

汉江丹江口水库地震*

高士钧 陈永成
(国家地震局地震研究所)

摘要

汉江丹江口水库由汉江、丹江两个库段组成。在丹库的峡谷灰岩地带，断裂、节理发育，利于水的渗透和循环。

1967年11月蓄水后，随水位的变化，地震活动增加，几年来由 $M_s < 2.5$ 上升到 $M_s = 4.7$ ，并在丹库的峡谷附近形成北北西方向延伸的三个地震密集区。地震频度、强度与水位(库容)变化有一定的相关性。

蓄水后地壳形变明显，并讨论了形变应力分布特征及诱发机制。

引言

汉江丹江口水库是跨越鄂豫两省的一个大型水利枢纽工程。库区分为汉江和丹江两个库段。1967年11月第一期工程竣工蓄水后，丹江库段地震频度和强度都增加。为了监视库区的地震活动和研究水库地震的形成原因，许多单位先后在库区开展了地震地质、地壳形变和地震活动等方面的实际考察和现场观测工作，取得了一些实际资料。

本文是在多年工作的基础上，对汉江丹江口水库地震的形成条件作某些探讨。

一、库区的地质构造条件

汉江丹江口水库区位于新华夏系第三隆起带和第二沉降带的过渡地带^[1]。其间的新华夏系北北西、北北东向构造与秦岭纬向构造带(南缘)和北西西向构造带反接复合、构造复杂。

由几条大型复式褶皱和主干断裂组成的秦岭纬向构造带和北西西构造带是库区主要的控制构造。其中汉江和上寺压扭性断裂在库区规模较大，控制和切割白垩一下第三纪红层(图1)。特别是在丹江库段的红层盆地中，有走向298°的周山晚第三纪断层，错距最大达42米和走向300°的陶岔第四纪断层，除切穿中、上更新世地层外，还切入下伏的中、下奥陶系基岩。垂直和水平位移为8—10米和20米。其附近曾有温泉出露，说明这两组构造带具有多期活动。

新华夏系北北西向构造的活动在丹江库段较为明显，初步认为是库区的主要发震构造。其表现为：

* 1979年5月17日收到。

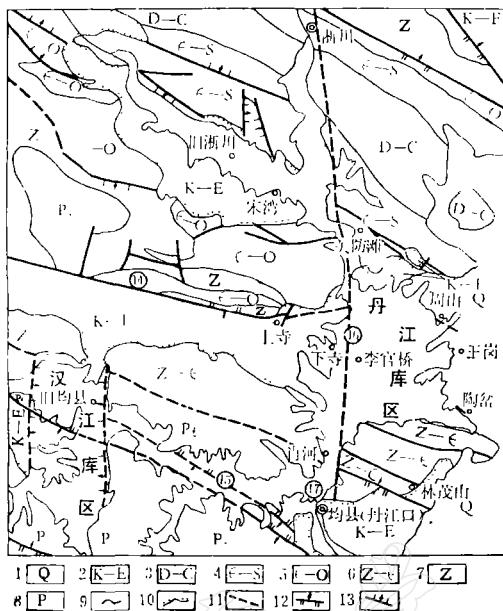


图 1 水库区地质略图

1. 第四系：冲积层 2. 白垩一下第三系：红色碎屑岩 3. 泥盆—石炭系：主要为
碎屑岩 4. 寒武—志留系：碳酸岩和泥质页岩 5. 寒武—奥陶系：碳酸岩 6. 震旦
—寒武系：碳酸岩 7. 震旦系：碳酸岩和变质砂岩 8. 元古界：变质页岩和变质
火成岩 9. 地层分界线 10. 红层分界线 11. 推测及被水淹没的断层 12. 压性断
层 13. 张性断层 14. 上寺断裂 15. 汉江断裂 16. 北北西向断裂带 17. 大坝

1. 在关防滩和肖河峡谷内,北北西向断裂发育,在坝址区规模较大,破碎带宽12米,延伸远,错断早期所有各方向均断裂。

2. 李官桥盆地北缘的红层在丹江河谷东西两岸倾向不同，同层位高程悬殊。如西岸下寺附近下第三系岩层绝对标高 200 米，而东岸分水岭一带（钻探）在 200 米以下尚未见到下第三系岩层。

3. 丹江河谷以西为上升的山区,而东部为下沉的盆地。如西部上寺盆地第四纪,已抬升到海拔400米,变成剥蚀区,东部李官桥盆地新生代以来沉积2500米的砂砾岩。丹江河谷恰位于升降的转折部位。

4. 丹江奔丹唐分水岭(由第四系粘土组成、海拔170米)不流,反而横切近东西走向的羊山(海拔400米)向南流去,说明在丹唐分水岭形成的同时,北北西向构造仍在活动.

上述三组构造带交汇于关防滩和肖河峡谷，是库区应力集中，孕育地震的主要地点。蓄水后，在两地交替发生了(M_s)3.5、4.7、3.8级较大地震，并形成三个地震密集区(图2)。

库区较大地震震源机制解和大量小地震的平均应力场均显示了地震断层与北北西和北东东向剪切破裂相吻合，其主压应力作用方式与库区挽近期以来近东西向的挤压应力作用方式相似。图 3 和下表给出 4.7 级地震的震源机制解。

按照极震区等震线长轴方向与地震时错动的走向相一致的观点和地震在两个峡谷区往返迁移、交替发生的特点,取节面 I 为地震断层面。故主要地震是北北西走向断层沿近

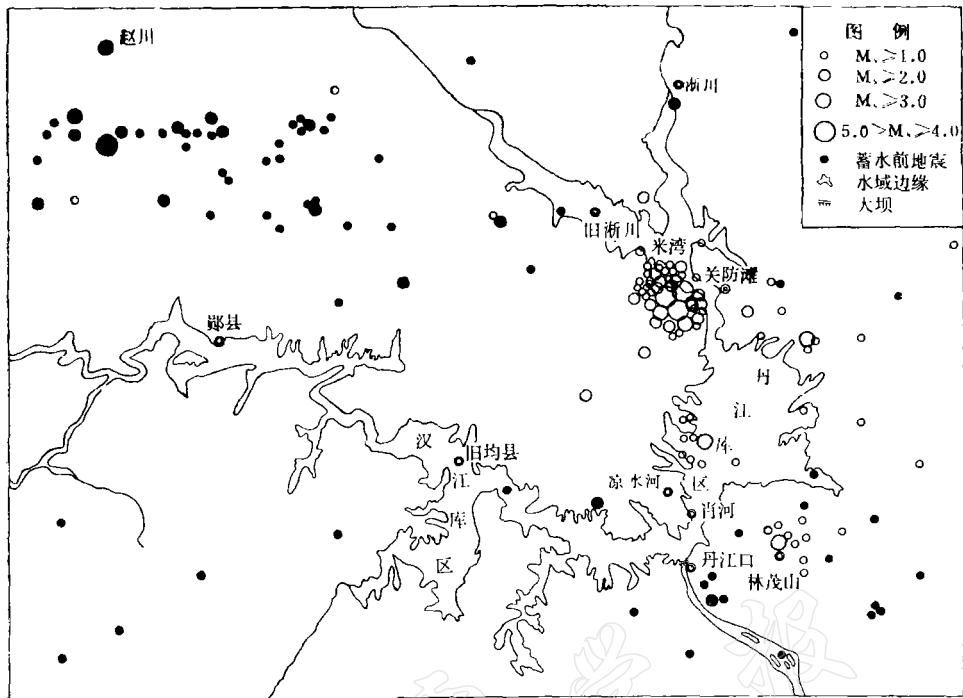


图 2 库区及邻区蓄水前后震中分布图

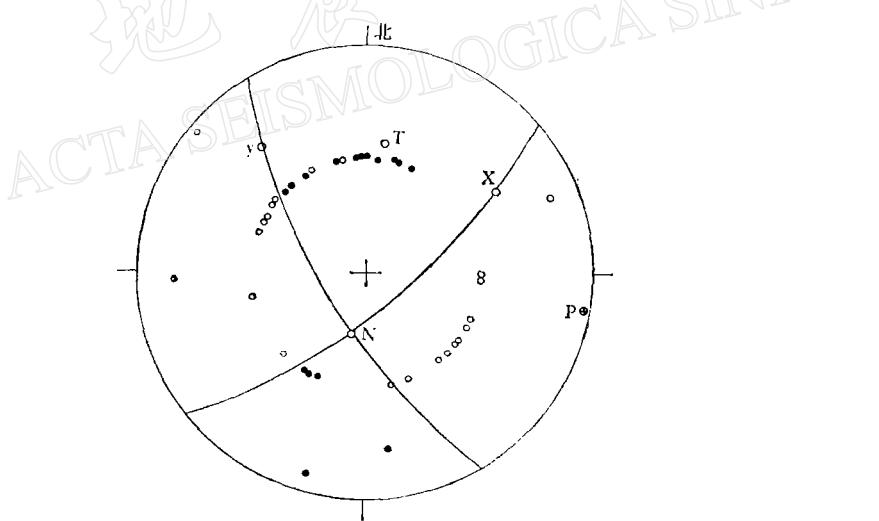


图 3 1973 年 11 月 29 日宋湾主震震源机制解
T——主张应力轴 P——主压应力轴 N——中间应力轴
初动向上 ○ 初动向下

名 称	节 面		沿节面的剪切力		应 力 主 轴		
	I	II	I	II	P	T	N
走 向	328°	50°	320°	58°	99°	9°	196°
倾 向	北东	北西					
倾 角	68°	70°	20°	22°	2°	30°	60°
备 注	逆断层		近平推				

水平方向错动所致。

二、库区的渗透条件

1. 岩层的含水性和透水性

汉江库段和丹江库段岩石的含水性和透水性是完全不同的。如汉江库段主要由元古界片岩、变质火成岩及胶结紧密的白垩一下第三系砂岩、砂砾岩等组成，含水性和透水性较差。而丹江库段为：

(1) 在关防滩和肖河峡谷地带，主要分布有下古生界可溶性碳酸盐类岩石，如白云岩和灰岩等。由于几组构造带在此交汇共同作用，使岩层陡立，并将岩层切割成网格状，破坏了岩石的完整性。由于晚期地壳抬升，地表水和地下水下蚀作用强烈，所以沿岩石层面和断裂破碎带，落水洞、漏斗等垂直式岩溶管道特别发育。例如，在关防滩峡谷一带有八仙洞、老虎洞、金鱼洞等大型溶洞。在肖河峡谷地带分布有厚度达100米以上的强岩溶带。尤其是在这两个峡谷地带内，沿北西西—南东东方向顺层夹有透水性差、厚度不等的数条铝土质页岩和砂岩，不仅利于地下水沿垂直方向上，而且也利于沿北西西—南东东这一水平方向上渗透和循环。如灰岩渗透系数 $K = 22\text{--}28 \text{ 米}/\text{日}$ ，平均吸水量为 $0.2\text{--}0.7 \text{ 公升}/\text{秒}$ ；泉水也多沿北西西—南东东方向呈串珠状分布，流量为 $2\text{--}5 \text{ 公升}/\text{秒}$ 至 $3\text{--}90 \text{ 公升}/\text{秒}$ 。

(2) 李官桥盆地是丹江库段蓄水的主体(库容占整个库区的42%)。分布有厚2000余米的白垩一下第三系砾岩、泥质砂岩和粉砂岩等，胶结紧密，含水性和透水性差。其上覆有100—500米厚度不等的半胶结的上第三系砂砾岩、砂岩和粉砂岩等，含水丰富，透水性强。在丹唐分水岭王岗一带，厚度大于300米，组成了水头由20—40米不等的数个承压含水层。按其水位可分为上下两层：上层水位160—169米，下层水位145—155米。渗透系数 $k = 1.44\text{--}22.0 \text{ 米}/\text{日}$ ，单位涌水量 $q = 0.05\text{--}0.9 \text{ 升}/\text{秒}$ 。地下分水岭与地形分水岭一致，水力坡降0.26—1.3%。

蓄水后，库区地壳下沉，年沉降率平均为2.84—3.9毫米。由于丹江库段水域分布形态主要呈近南北向，库区中心部位沉降量大，两侧沉降量小，所以造成近东西向的侧向挤压。这种附加应力场与现今地震应力场迭加，有助于使峡谷区脆性碳酸岩中的北西西向和北北西向断裂拉开，利于水的渗透。当水库蓄水到155米高程时，部分含水层水位将低于库水位，成为渗透的入水口，使上第三系含水层流量增加。特别是水库荷载作用造成库基上第三系含水层压缩变形，这样，便迫使地下水向水域边缘多裂隙的灰岩分布地段流动。

当地下水顺着分水岭倾斜的方向由东向西流动时，因为丹江河谷西侧白垩一下第三系红层出露较高，受到阻碍，所以只有沿着北北西向断裂构造带向纵深渗透。

(3) 关防滩和肖河峡谷地带，沿北西西—南东东方向呈“半岛状”插入南阳盆地之中(白垩一下第三系红层厚3000余米)。蓄水后，当地下水由北西西向南东东方向排泄时，不透水的红层成了天然隔水屏障。所以，地下水只能沿着灰岩的裂隙、岩溶管道以及灰岩与红层的不整合接触面向深部渗透。

(4) 库水在渗透(两个峡谷)过程中,一方面从表层携带了大量游离的 CO_2 ,增强了地下水对碳酸盐的溶蚀能力;另一方面又通过地下水带走了一些可溶物质,结果使灰岩的孔隙度增大即渗透系数 K 增大。渗透系数 K 的大小不仅决定于岩石的空隙性,而且还决定于渗透液体的物理性质。若以 K_0 纯粹表示由岩石空隙性所决定的渗透性能,则:

$$K = K_0 \frac{\gamma}{\mu}$$

式中, K_0 为渗透率,它是不随渗透液体的物理性质而变化的。 γ 为渗透液体的重率(吨/米³), μ 为渗透液体的动力粘滞系数(泊)。对于地下水来说, γ 、 μ 决定于矿化度、水温和压力等因素。一般条件下,水温对 μ 值的影响较大。

例如:

$$\text{水温}=0^\circ\text{C} \quad \mu = 0.018 \text{ (泊)}$$

$$\text{水温}=10^\circ\text{C} \quad \mu = 0.013 \text{ (泊)}$$

$$\text{水温}=20^\circ\text{C} \quad \mu = 0.010 \text{ (泊)}$$

由此可见,水温在上述范围内差 10°C , K 值则差 $30\text{--}40\%$ 。不难看出,随着地热增温率的变化,越往深处(地壳范围内),会使渗透系数 K 增大。

2. 岩石物理力学性质的变化

综上所述,丹江库段的关防滩和肖河峡谷是库区天然的主要“注水”通道。水库蓄水后,便沿着这两个通道进行渗透——“注水”。岩石受水长期渗透后,物理力学性质发生了如下变化。

(1) 断裂带中的破碎岩石,在含有较多的游离 CO_2 地下水长期作用下,使碳酸盐岩石受到溶蚀,并带走了一些可溶物质,结果使岩石的粘结强度 τ_0 降低。

(2) 随着库水的持续渗透,地下水位普遍上升。如丹江先锋沟地下水位观测点,当库水位上升到 150 米高程时,地下水位则升高 6 米以上(图 4)。

地下水中的静水压力:

$$P = \gamma h$$

式中, γ 为水的重率(吨/米³), h 为地下水位高差(米)。由上式看出,当地下水位上升时,岩石的孔隙压力增加。特别是越往深部,地下水位高差(h)越大,则孔隙液压亦随之增大。

(3) 岩石破裂时的剪应力 τ 可近似的用库仑-摩尔公式表示:

$$\tau = \tau_0 + (\delta - P) \tan \phi$$

式中, τ_0 为岩石的粘结强度, δ 为破裂面上的正应力, P 为孔隙液压, ϕ 为内摩擦角。

由于(1)和(2)的两个结果,使 τ_0 和 $(\delta - P)$ 变小,因而导致岩石的抗剪强度 τ 降低。当应力积累到接近岩体破裂强度时,可促使岩体滑动,地震即发生。

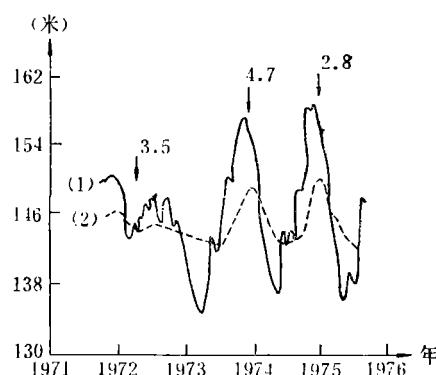


图 4 丹江先锋沟库水位与地下水位变化对应曲线
(1)——库水位 (2)——地下水位

三、水库地震与蓄水过程的关系

根据历史文献的记载，库区的淅川、均县、郧县，从公元十六世纪到 1959 年共发生 IV—V 度地震 29 次。1959 年—1967 年蓄水前，库区仅发生 $M_s = 1.2\text{--}2.3$ 的地震 19 次，而地震主要集中在邻区的赵川弧形构造带内（距大坝 100 公里，汉库水边 25 公里），最大强度为 $M_s = 4.6$ （图 1）。水库蓄水后，震中逐步向丹库水边迁移，频度和强度随距水边距离 K 的减小而增加（图 5），并且蓄水过程与地震活动有一定的关系。

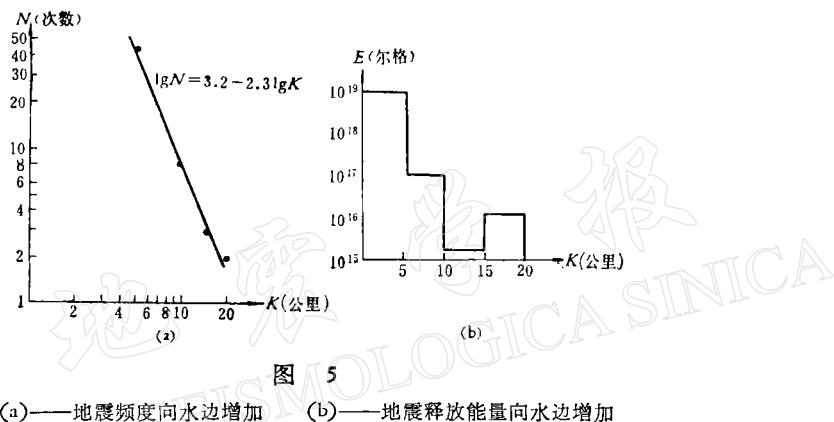


图 5

(a)——地震频度向水边增加 (b)——地震释放能量向水边增加

1. 水库蓄水的变化对地震活动的影响

1967 年 11 月水库开始蓄水，初期水位上升比较缓慢，库区没有 $M_s \geq 1.2$ 的地震活动。1969 年 9 月，当水位上升到 135 米的高程后，从 1970 年元月—1971 年 10 月库区接连发生了 $M_s = 1.2\text{--}3.1$ 的地震 20 余次，表明地震活动比蓄水前已有加强。以后水位逐渐上升，地震频度和强度也不断提高。到 1977 年 12 月为止，库区共发生 $M_s \geq 0.1$ 的地震 200 多次，其中 $M_s \geq 1.2$ 的地震 63 次，最大强度为 $M_s = 4.7$ 。与蓄水前九年相比，库区 $M_s \geq 1.2$ 的地震的年地震频度增加 2.1 倍，年能量释放率增加 1.4×10^3 倍，显然能量大的地震增多了。地震最高裂度为 VII 度，超过了蓄水前的 V 度。可见蓄水的变化对地震活动有一定的影响。

2. 地震活动与水位(库容)升降速度的关系

图 6 为地震频度、强度与库容的综合曲线。可以看出三者有较好的同步性。从 1969 年 12 月到 1974 年底有六次高水位分别与频度和能量的六个峰相对应，且频度的峰和能量的峰比库容的峰滞后，而能量的峰又比频度的峰滞后。

一般当水位缓慢地上升到峰值后（高水位持续时间较长）又缓慢地下降到较低水位时，则频度峰和能量峰比库容峰滞后时间较长。如①—3，1971 年 4 月—10 月，水位由 141 米缓慢地上升到 150 米（速率为 0.12 米/月，高水位持续约三个月）又缓慢地下降到 144 米时，即 1972 年 4 月 3 日发生了 $M_s = 3.5$ 的地震。相对应的②—3 比①—3 滞后约三个月，而③—3 又比②—3 滞后约二个月。

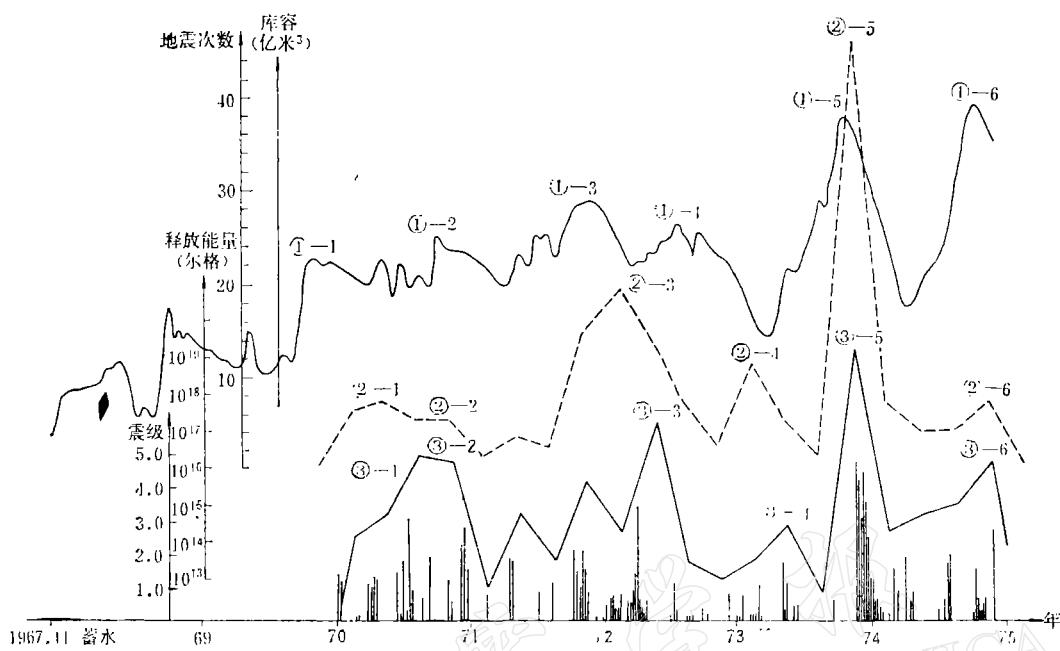


图 6 地震频度、地震强度与库容综合曲线

①——库容(亿米³) ②——地震频度(次/三个月) ③——地震释放能量(尔格/三个月)

如果当水位急剧上升到峰值后(高水位持续时间较短)又急剧下降到较低水位时,则频度峰和能量峰比库容峰滞后时间较短。如①—5,1973年3月—10月,水位由134米急剧上升到历年来最高水位157米(速率为3.3米/月,高水位持续约1.5个月)又急剧下降到154米时,即1973年11月29日—30日连续发生了 $M_s = 4.7, 4.2, 4.6$ 的地震群。相对应的②—5和③—5比①—5滞后仅有一个多月。

上述特点表明,一般当水位出现一个峰值后,首先诱发了一些小地震,尔后才有较大地震发生。同时也说明水位升降速度的快慢和高水位持续时间的长短对诱发地震活动(主要是地震发生时间)有一定的影响。

四、诱发机制的初步探讨

前面分析了汉江丹江口水库区地质环境和蓄水过程与地震活动的关系,这里再对诱发机制作一些初步讨论。

从图2和图6可以看出:

1. 1969年9月以前水位低于135米时,库基岩体淹没面积不大,表层岩体在水体荷载作用下产生弹性变形——下沉。在附加的引张应力部位将孕育初期小破裂^[2]。水渗透产生的孔隙压力还不足使破裂产生滑动,因此,蓄水初期库区很少有地震发生。

2. 随着水库水位的升高,库区淹没面积增大,在水体荷载作用下,扩大和加剧了水沿岩体裂隙向纵深方向渗透。由于孔隙液压的增加,造成破裂面上的正应力减少及抗剪强度的降低^[3]。所以1970年以来,首先在水域边缘诱发初始应力的释放,形成一系列小地

震^[4],从而在北北西向构造带上的关防滩、肖河峡谷引起新的应力集中。

3. 水位逐渐增高,在两个峡谷区渗透愈益加剧。特别是在岩溶发育、连通性好的宋湾、林茂山两个震区,地下水主要沿着北北西和北东东破裂线(或面)由浅向深渗透,逐步改变着岩体中应力状态,随之又不断有小震发生。这样,使新老微破裂串通,并向深部延伸,更利于水的渗透和循环,于是就在这个深度附近诱发了较大地震^[4,5]。如1972年4月3日,当水位缓慢上升到150米高峰后,首先在肖河峡谷区发生了 $M_s = 3.5$ 的地震,形成林茂山地震密集区。以后应力沿北北西向构造带向关防滩峡谷更加集中。1973年10月当水位急剧上升到历年来最高水位157米,渗透液压也达到最大值,1973年11月29日—30日,终于在关防滩峡谷区发生 $M_s = 4.7, 4.2, 4.6$ 的地震群,形成宋湾地震密集区。

4. 1973年冬季以后,水位呈波浪式升降,由于应力重新调正,仍有相对应的地震在两地发生。如1977年6月水位经134米低水位急剧上升到143米,1977年8月6日,在肖河峡谷区的凉水河附近又发生了 $M_s = 3.8$ 的地震。

总之,库区蓄水后,地震活动随水位增高而逐渐增强。地形变观测资料表明,初期蓄水,库基岩体表现为弹性状态的下沉,地震活动与蓄水关系不够明显。尔后,随水位的升高,岩石孔隙液压增大,加剧了水向深部的渗透能力,从而降低岩石抗剪强度,首先在水域边缘地带发生了小震,进而使小破裂串通,向深部延伸,形成大的破裂线(或面),在两个峡谷区产生较大地震。

五、结 论

汉江丹江口水库区地震形成条件,主要有下列几点:

1. 地震的孕育和发生是秦岭纬向构造带、北西西向构造带和新华夏系北北西向构造带共同作用的结果,而新华夏系北北西向构造带是库区的主要发震构造。
2. 上述三组构造带交汇的关防滩和肖河峡谷是库区应力集中和孕育地震的主要场所。
3. 这两个峡谷区是库区地下水主要渗透地带。岩石受水渗透后抗剪强度降低,是诱发地震产生的有利条件。
4. 渗透到岩石裂隙带中的水,在一定深度上能够被封闭或具有一定的承压性,更利于应力集中,是产生诱发地震的必要因素。
5. 地震活动与蓄水过程有一定的对应关系,即与蓄水速度^[6]和高水位持续的时间有关。说明蓄水对诱发地震有着积极的作用。
6. 在诱发较大地震的过程中,小地震(前震)活动对岩体中微破裂串通所引起的应力集中亦起了重要作用。

参 考 文 献

- [1] 李四光, 地质力学概论, 科学出版社, 41, 1973.
- [2] N. I. Nikolaev, Tectonic conditions favourable for causing earthquakes occurring in connection with reservoir filling, *Engineering Geology*, B, 171—189, 1974.
- [3] D. I. Gough, W. I. Gough, Load induces earthquakes at lake kariba-II geophys., *J. R. Astr. Soc.*,

- 21, 79—101, 1970.
- [4] 王妙月等, 新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨, 中国科学, 1, 85—97, 1976.
- [5] 沈崇刚等, 新丰江水库地震及其对大坝的影响, 中国科学, 2, 187—205, 1974.
- [6] A. Ryall, W. A. Peppin and J. D. Vanwormer, Field-Seismic investigation of the August 1975 oroville, California, earthquake sequence, *Engineering Geology*, 10, 353—369, 1976.

ON THE HANJIANG-DANJIANGKOU RESERVOIR EARTHQUAKES

GAO SHI-JUN, CHEN YONG-CHENG

(Institute of Seismology, State Seismological Bureau)

Abstract

The Hanjiang-Danjiangkou Reservoir is composed of two parts, the Dan River and Han River Reservoirs. In the gorge district of the Dan River Reservoir, the limestone area consists of well-developed faults and joints, favourable to the permeation and circulation of water.

After impounding of water in November 1967, seismicity increased with the changes of water level. The earthquake magnitude of the past few years rose from $M_s < 2.5$ to $M_s = 4.7$ and three earth-quake clustered areas, elongating in the NNW direction were formed near the gorge district of the Dan River Reservoir. Earthquake frequency and intensity correlate to certain extent with the change of water level in the reservoirs.

Obvious crustal deformation was observed after filling up of the reservoirs. Distribution of the stress field causing the deformation and the mechanism of earthquake inducing are discussed.