

丹江口水库地震发生的 地质构造条件

于 品 清

(国家地震局地震研究所)

丹江口水库自1969年11月关闸蓄水以来,库区范围内地震活动的频度和强度均有所提高。到1977年底为止,库区内共记到地震299次,其中 $M_L = 1.0 \sim 1.9$ 级的138次,2.0~2.9级的34次,3.0~3.9级的9次,4.0~5.0级的4次,5.1级的1次。这些地震的绝大多数发生在过去无震或少震灰岩形成的峡谷地段。据已有的资料统计:林茂山、瓦房沟两个微震密集区发生的地震数约占地震总数的71%,三官殿、关防滩等地次之,其余地震零星地分散在水库边缘。库区发生的几次较大的地震均是在高水位迅速下降之后,与水库水位的升降幅度、速度有密切关系。滞后现象明显,但随着时间的推移和地点的改变,一次比一次缩短。为了弄清这些现象,本文拟从地质构造角度探讨一下丹江口水库区地震发生的地质构造条件和趋势,不当之处请批评指正。

一、库区位置及构造特点

丹江口水库由汉库段、丹库段、浙库段及一些峡谷组成,第一期库容为170亿立方米。整个水库位于秦岭纬向构造带和南阳~襄樊盆地(以下简称南襄盆地)的过渡地段,且夹于毛堂~内乡和白河~谷城两大断裂带之间。新生代早期开始,库区西部的秦岭山地长期上升,晚第三纪的核桃园组、上寺组已分别处于标高320~340米和500~600米以上;东面的南襄盆地继续下沉,相应地层分别下降到-5200~-5800米和-300~-900米之间^[1]。从1927~1972年水准测量成果看,丹江以东——襄樊~南阳一线上升较快,各测点平均年速率在13mm以上。襄樊附近达16mm,而黄陵背斜、武当地块、秦岭山地一线上升幅度相对较少,各测点平均年速率普遍在10mm以下,仅个别测点达12mm,可见东面目前为相对上升,西面下降;丹江库段、关防滩峡谷和羊山峡谷恰位于这种差异运动的转折地段(图1)。这一现象与丹唐分水岭近期仍在强烈上升相一致。

深部构造层的界面在丹库段亦有类似情况。根据重力成果可知,库区所在地块的地壳厚度大致为37~40公里^[1],这一数据得到瑞雷波和乐甫波资料的有力支持^[2]。从我国东部第二条巨大重力梯级带通过库区,及丹江河谷以西地壳厚度急剧增加,东面南襄盆地地壳较薄且呈波状起伏的特点分析,丹库段及关防滩、羊山峡谷等有可能是地壳厚度的转折段。

库区南北两侧均有结晶基底出露,唯库区一带为古生代地层所占据。根据区测资料统计,古生代沉积盖层最大厚度为4~5公里,这与瑞雷波、乐甫波频散曲线^[3]和航磁资料所获

结果基本相同。盖层最大厚度恰分布于库区,然后向南、北两侧减薄,直至夹灭。可见与之相适应的结晶基底是一个由西向东展布的“悬谷”,水库区就是位于这样的“悬谷”口附近。根据盖层的构造形态、接触界面和岩性特征等,又可分出古生代沉积亚层和中、新生代沉积亚层。前者分布于丹库西边及峡谷地段,主要为震旦、寒武、奥陶纪灰岩、白云质灰岩、白云岩、砂质灰岩等,其厚度4~5公里,与结晶基底为不整合或假整合关系。中、新生代沉积亚层,主要由白垩~第三纪红层组成,分布于两郧、均县、李官桥、浙川和南襄等盆地。红层厚度多数在2公里以上(南襄盆地红层厚达3~5公里),与下伏构造层均呈不整合关系或断层接触。



图1 丹江口水库构造位置

这种新构造运动、地壳厚度转折地段,各种不同形态构造层的结合部位,多处于弹性不稳定状态,在构造力和地球自转速度发生突变时,无疑容易产生断块滑动和层间虚脱,形成有利于迅速运动的构造环境。

二、库区主要活动构造

水库所在地块的地壳,在历次构造运动的作用和影响下,形成了一系列北西~北西西向褶皱和各种方向的断裂。与丹江口水库关系最为密切的有汉江断裂带、瓦屋厂~周山断裂带和丹江拗折带。它们不仅穿过库区或从其附近通过,而且规模大,是本区主要活动性构造(图2)。

(1)汉江断裂带:自漫川关进入库区后,经过郧西、郧阳、老均县、光化林茂山,达于赵岗以东,全长在200公里以上。由数条大致平行的断裂组成。沿断裂带分布有大量基性、超基性岩脉,变质火山岩和玄武岩,这表明该断裂带具有深断裂带的性质。

1) 南阳石油勘探指挥部物探大队:南阳凹陷地震剖面图,1973年

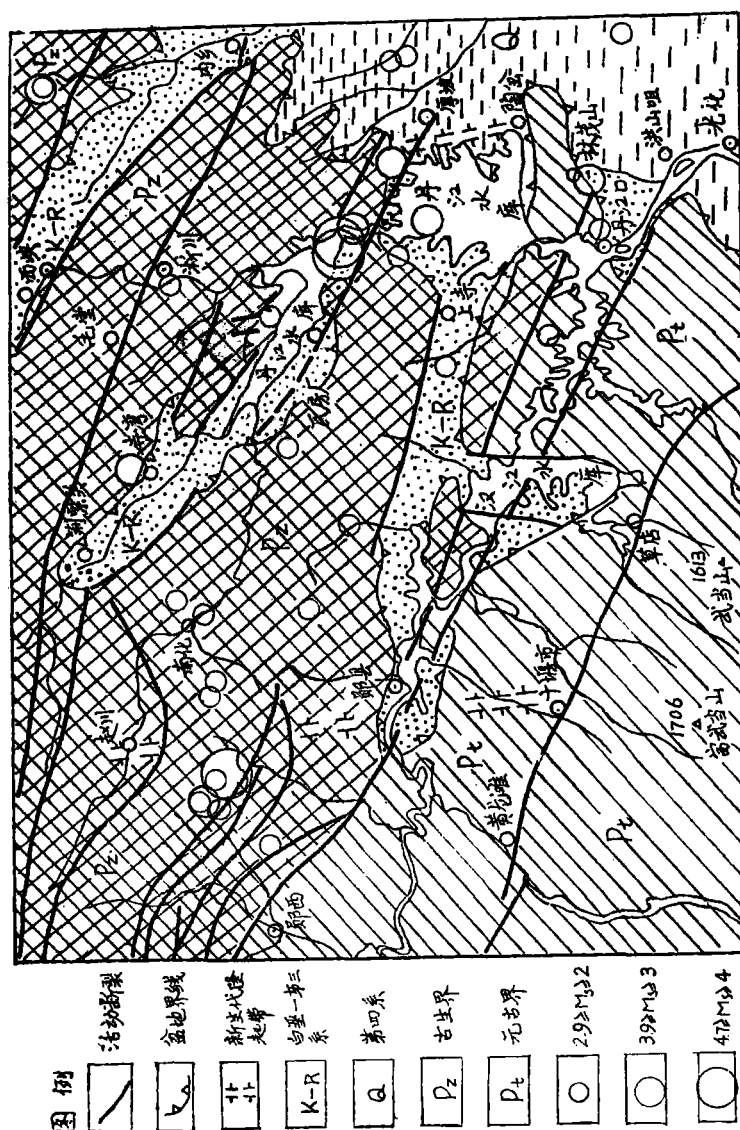


图2 丹江口水库区主要活动断裂与震中分布图

汉江断裂带自元古代形成以来, 长期活动。早期控制断裂带北侧古生代沉积(见图2); 志留纪末期沿断裂带北缘有基性岩浆溢出¹⁾²⁾; 中生代后期在断裂带下盘形成了一系列断陷盆地, 如两郧盆地、老均县盆地和丹江口盆地等, 并在其中堆积了一套厚达2000余米的白垩~第三纪红层。盆地的形成反映该断裂带已由早期的压性~压扭性变成了张性或张扭性。红色盆地的断续分布和沉积厚度、岩性上的差异, 表明断裂带各段下沉的速度、幅度是不均一的。早第三纪末期的构造运动, 使白垩~第三纪红层沿断裂带逆冲于老地层之上, 在金家

1) 中国科学院地质研究所, 秦岭研究队主编, 秦岭区域地质构造, 1962年。

2) 地质部地质科学院, 中国大地构造基本特征, 1962年。

棚一带红层的断面上,可以看到明显的水平、垂直和斜冲三组擦痕,证明第三系形成之后,该断裂带又经历过几次较强的活动。第四纪以来的活动,地貌上有明显反映,如断层三角面成线状排列,汉江河道沿断层带发育,东面的孟桥川、古城、水桥河、西排子河等水库所在盆地的连线,恰与该断裂带的延线相吻合;同时该断裂带从公元200年到现在共发生有感地震60余次,上述资料均说明该断裂带至今仍在活动。

(2)瓦屋厂~周山断裂带:西起瓦屋厂、田庄一带,经盛湾、下王沟、袁坪,在殷家鼻过江,最后延至周山、厚坡等地,全长40余公里。根据卫片判断,该断裂带可能西延至荆紫关南,走向北西西,袁坪一带转为北西;倾向北,由于倾角大,各地倾向不完全一致。它由两~三条大致平行断层、破碎带和中、基性岩墙组成。其规模虽次于汉江断裂带,但从该带的中、基性岩墙特点分析,有可能仍属于切穿砂铝层的深断裂带。

瓦屋厂~周山断裂带自海西期(或更早)形成以来,一直具有较强的活动。从断裂带的规模、展布方向和结构面的特点分析,早期具有压性、压扭性;中生代以后,在其北侧(即上盘)形成了浙川盆地,堆积了一套厚达2000余米的白垩~第三纪红层。从盆地出现开始,断裂带已逐步转为张性活动特征。根据盆地内沉积物厚度和岩相差异分析,断裂带西段下沉最早和幅度最大,然后逐步东移。第三纪末期的燕山运动,使断裂带北侧块体强烈上升,在瓦屋厂~盛湾~下王沟一带形成了轴面与该断裂带主要断层面重迭的倒转背、向斜,其规模是库区红层褶皱中的最大者,这无疑是断层两盘在近南北向压应力作用下产生差异活动的证据。在断裂带东段卫岭一带不仅可以看到中震旦统角砾状白云岩、下寒武纪灰岩逆掩于白垩~第三系之上;而且在其北侧半胶结的砂砾岩层中还可见到约有30米宽砾石的产状转为直立,且与断裂的产状一致¹⁾。这次运动之后,区内调整性差异运动仍较活跃,并在该断裂带内或其南侧堆积了一套巨厚层的第三纪砾岩,不整合于老地层之上。上更新世之后的构造运动,使瓦屋厂~周山断裂带的上盘西移,切断了中、上更新世和已前的地层,最大断距至少42米*。从钻孔资料获知,断裂带内中、上更新世沉积物的揉皱现象极其强烈。上更新世后构造运动的痕迹在袁坪一带也可以找到证据:瓦屋厂~周山断裂带中之黄龙泉断层,由于北盘西移,剪断了断裂带内上第三纪红色角砾,而且使堆积在该断层南侧由粗砂、细砂、凝灰质沉积和河流相砾石组成的一套中、上更新世沉积物受到挤压,并在凝灰质沉积物中形成了许多(组)次一级小断层,断距一般10~20厘米;其中的近南北向断裂具压性。上述资料说明该断裂带上更新之后曾发生过反时针扭动。

新石器晚期以来,断裂带两侧地块上升的速度和方向曾出现过一次明显变化²⁾。前期南侧地块上升较快,致使盆地南北两侧部族居住点的位置相差甚大(北侧在一级阶地后缘,南侧在前缘)。后由于北侧地块进一步下降,当时部族的遗址被埋没于近代“砂砾层”2.4米之下。南侧恰与此相反,不断上升并遭到切割、侵蚀,阶地中的砾石层暴露于现代丹江河水面之上。北侧同级阶地中的砾石层至少在河水面下3~5米,这一现象与南、北两侧同级阶地的地面高差基本一致。根据“砂砾层”中文物的特点分析,它很可能是在明朝或稍早一点形成的,由此推测在这一时期之前丹江河道应靠近浙川盆地的北缘,否则是无法解析这一现象的。砂砾层堆积之后,断裂带南北两侧地块运动的方向(或速度)发生了相反的变化,丹

1)长江流域规划办公室第一勘测队,丹江口水库地震活动及其地震预报1978年

• 1975年丹江口水库地震及规划讨论会,某些同志发言中提出的数字大于42米。

2)长江流域规划办公室考古队、勘测处:古文化遗址所处阶地变化的初步讨论,1977年。

江河道为了适应新的情况,只好南迁。之所以如此,均是由瓦屋厂~周山断裂带差异升降运动引起的。

到此可以得出:瓦屋厂~周山断裂带近期仍有较强活动,并在某些特殊部位蓄备有较多的弹性应变能。

(3)丹江拗折隆起带:是秦岭纬向构造带内,中生代末期以来逐步形成的隆起拗折系列中一条最大者。它大致展布于西峡、淅川、马蹬、李官桥、丹江口一线,近南北向延伸,全长160余公里。东面为新生代以来逐步形成的丹唐分水岭,共同组成丹江拗折隆起系列。多数资料表明:它们和钟祥~远安地堑、地叠系列尚有某些差别,首先是中、新生代红色盆地在这一条带上的断续分布,其边界主要受北西~北西西向活动性断裂控制;其次是该带内所发现的断裂、节理、裂隙和破碎带不但断续分布,而且走向经常发生变化^[4];第三是所有北西~北西西向构造线和地层走向在这一带上均保持连续¹⁾;第四是断裂带的标志在卫星照片上没有什么显示^[9],这些均表明它还是一条完整的大断裂带或地堑、地叠系列。

这条隆起拗折带中生代后期就已具雏形,但活动强度较低;中、上更新世之后获得了加速发展。这一点可从丹唐分水岭中、上更新世地层目前的高度得到证实。隆起带分布于洪山咀、陶岔、周山和丹水一线;而何家沟、陶岔、凤凰一段由 Q_{2+3} 团块状红色粘土组成,目前已上升到180米的高度,构成丹江和唐河水系的分水岭,可见全新世以来该带上升的速率是较大的。正由于这一隆起带的迅速上升,与此相伴生的丹江拗折带随之加深,于是老灌河、丁河、丹江(可能还有汉江、南河)不走故道而在拗折带附近拐弯南流。老灌河、丁河、丹江等在这一带拐弯南流,汤禹山的强烈上升和陶岔第四纪断层的形成,瓦屋厂~周山断裂带东段中、上更新世后的剧烈活动等是拗折隆起带存在的证据,也是它们目前仍在活动的材料。这一结论还得到微观地震资料的证实。

库区范围内目前仍在活动的北西~北西西向断裂带和近南北向延伸的拗折隆起带,在其交汇复合部位形成了三度空间构造上的特殊“闭锁”地段。这样的部位应力较为集中,容易发震^[6]。丹江口水库蓄水后丹库段已发生地震的震中是这样的部位,1964年赵川发生的 M_s 4.6级地震的震中也是如此,因此值得注意。

三、发震地段的水文地质条件

丹江口水库蓄水后所有发震地段,在水文地质方面都具备如下两个条件:

(1)良好的渗水通道。发震地段多数位于关防滩和羊山峡谷地段,沟谷纵横;两峡谷多垂直切割北西~北西西向构造线和岩层层面,渗漏面积增加;瓦屋厂~周山断裂带、汉江断裂带所有构造要素分别通过这些地段,岩层分外破碎,由于现今应力场的应力又在这些地段集中,破碎带的岩块进步解体(大的几尺见方,小的如米粒);震旦、寒武、奥陶纪灰岩、白云质灰岩、白云岩、砂质灰岩等岩溶发育,暗沟、暗河、落水洞众多,且规模巨大,如金鱼洞、八仙洞等。间歇性升降运动和断裂带两个因素,又将这些孤立溶洞统一于一个整体之中。建库前它们把地下水输送给河水,水库蓄水后它们又成了库水渗入地下的良好通道。相反过程的出现,彻底改变了这些地段地下水的平衡条件。

1) 长江流域规划办公室第一勘测队,对丹江“南北向大断裂”的初步看法,1978年。

(2) 水体有限效应区。所谓水体有限效应区, 是指已渗漏到地下的水, 在某些特定空间高度聚集起来, 从而充分发挥水的物理、化学和力学作用, 促使有关块体产生运动, 这样的有限充水空间, 就叫做水体有限效应区。瓦房沟、茂林山(即史家庄一带)、三官殿、关防滩等震区都具备这样的条件(图3)。从图3可以看出: 它们均处于构造上的“天窗地段”。

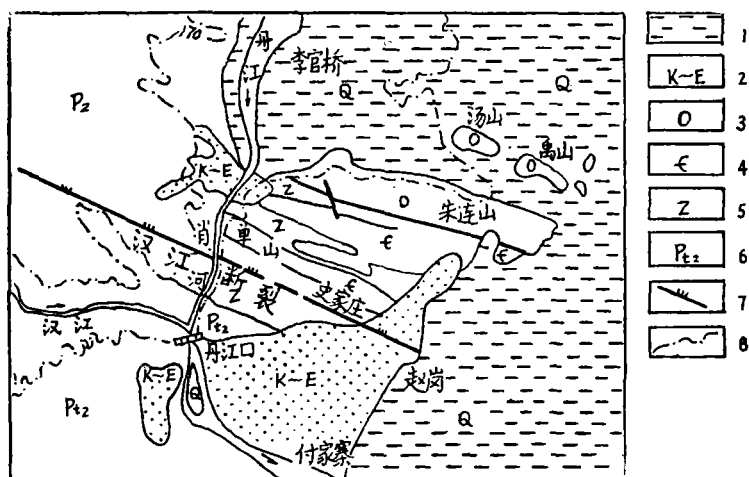


图3 A 林茂山一带水文地质简图

1. 第四纪沉积 2. 白垩~第三纪红层 3, 4, 5. 震旦~奥陶纪灰岩、白云质灰岩、白云岩、砂质灰岩等, 6. 元古代变质岩 7. 断层 8. 水库边界。

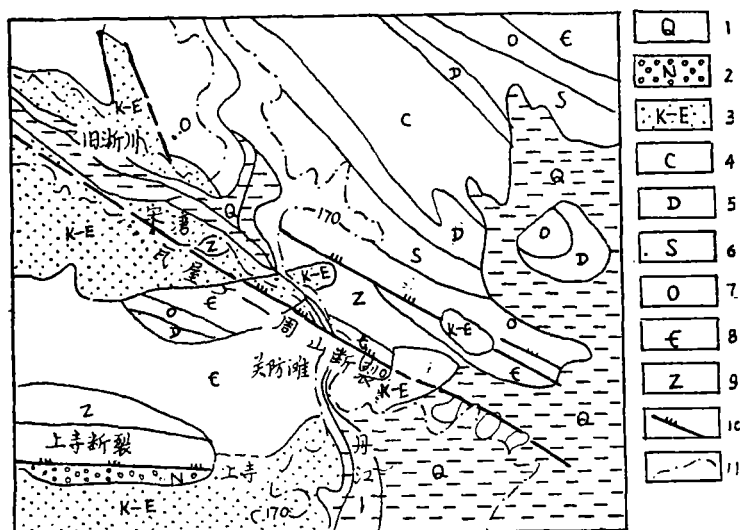


图3 B 瓦屋沟一带水文地质简图

1. 第四纪沉积, 2. 新第三纪砾岩, 3. 白垩~第三纪红层, 4, 5, 6, 7, 8, 9 古代生地层, 主要为灰岩、白云质岩、白云岩、砂质灰岩和泥质灰岩、砂页岩等, 10. 断层, 11. 水库边界。

渗漏条件良好的震源区其他两边或三边被白垩~第三系或第四纪沉积物圈闭着。这些岩系断裂构造多不太发育,渗透系数极低,由渗漏通道渗透到地下的库水,传递到这些界面之后,只好停止前进,并在断裂(层)带的特殊部位或新老地层接触界面聚集起来^{[6][10]},而当这些有限空间的水达到某一极限值时,往往就可以发挥各种作用,从而促使断层两盘、断块不同部分和新老地层间产生差异运动而发生地震。林茂山、瓦房沟地震就是这方面的例子。瓦房沟、关防滩一带的下寒武系红色泥质灰岩也可以起类似的作用,就这样有效地防止了地下水向关防滩以北灰岩区渗漏的可能性。关防滩以北地区发震率极低,除构造因素外,大概还与上面提到的因素有关。

三官殿震区虽位于丹库西侧,但上面两个条件依然具备。丹库水通过北西西向断裂带和震旦系砂质灰石中的裂隙及新老地层的接触带进入地下,然后在新老地层的接触界面和附近聚集起来,进而促发了1977年8月6日三官殿M_s3-8级地震。

没有发生或很少发生水库地震的其他地段,除构造因素外,一般说不是渗漏条件差,就是无法使渗漏到地下的水高度聚集起来,不可能充分发挥水的各种作用。汉库段和丹江口一带就可能是这方面的例证。

正反两方面的事实表明,良好的渗漏条件和能形成水体有限效应区是丹库段和两峡谷地段发生水库地震的关键性因素。一般说前者是由构造和岩性因素决定的,后者是通过岩层的完整性和不同岩层的组合来实现的。由此可以看出有利因素和不利因素是相对的,有条件的,同时是可以相互转化的。

四、库区现今应力场

用库区及周围地区新生代以来逐步形成的近南北向隆起拗折系列、库区周围近年来发生的104个小震、以及武汉地震大队1974~1975年陶盆激光测量成果(表7)建立起来的应力场,其主压轴的方向分别为北东东和北西西(图4)。它们之间虽有一些差别,但数值不大,这说明上述结果是接近实际的。同时它与用中、上更新统中构造形迹推导出来的应力场也近乎一致,表明水库所在地块的现今应力场是在中、上更新世应力场基础上发展起来的。

陶盆74、75年激光测量成果 表1

编 号	75年成果 (m)	74年成果 (m)	差 值(mm) 75-74	线应变 ϵ
S ₁	3755.611	3755.618	- 7 mm	-1.9×10^{-6}
S ₂	3456.158	3456.158	0	0
S ₃	1764.872	1764.859	+13mm	$+7.4 \times 10^{-6}$
S ₄	4727.116	4727.095	+21mm	$+4.4 \times 10^{-6}$
S ₅	1821.862	1821.821	+14mm	$+22.5 \times 10^{-6}$
S ₆	3708.912	3708.906	+ 6 mm	$+1.6 \times 10^{-6}$

用新构造形迹,激光测量结果和104个小震建立起来的区域构造应力场,与我国某些地质、地震工作者根据我国东部广大地区用相应资料推导出来的应力场有相似的特点;从数字上看似乎与华南区应力场更为相近^{[7][8]},这种相近性可能意味着成因上的联系。一些人认为它是新华夏应力场的继续和发展,也有人认为是太平洋板块向深部俯冲、印度板块向北挤推在这一带相互干涉的

结果。尽管其力源问题尚有争论,但这一近东西向应力场确实存在并在起作用是无疑问的。

根据应力摩尔园知道:库区不同走向、不同性质的断层在这一应力场作用下,它们运动的难易程度是不相同的:北北东、北东~北东东向断裂应作顺时针扭动,北北西、北西~北西西向断裂必作反时针扭动。四组断裂所构成的两组共轭剪切破裂面的夹角均正好对着挤压

应力轴的方向,因此,在这些断裂面上分布有正应力和水平扭力,但由于北东~北东东和北西~北西西两组断面所构成的共轭剪切面的夹角较小,扭应力值最大,故易产生水平扭动。北北西和北北东两组断面的走向与压应力的夹角较大,扭应力较少,较难运动。近东西向断裂因与压应力轴的夹角最少或近乎平行,因此断面上所承受的压应力和扭应力都最少,处于构造应力场横张的位置。近南北向构造处于与前者相反受挤压的状态,因此在这方向上存在一系列拗折隆起带。

综合上述可知:目前区域应力场对库区北西~北西西、北东~北东东向活动性断裂的运动是极其有利的。事实也证明:建库前和建库后的地震活动绝大多数与上述两组活动性断裂的运动有关。

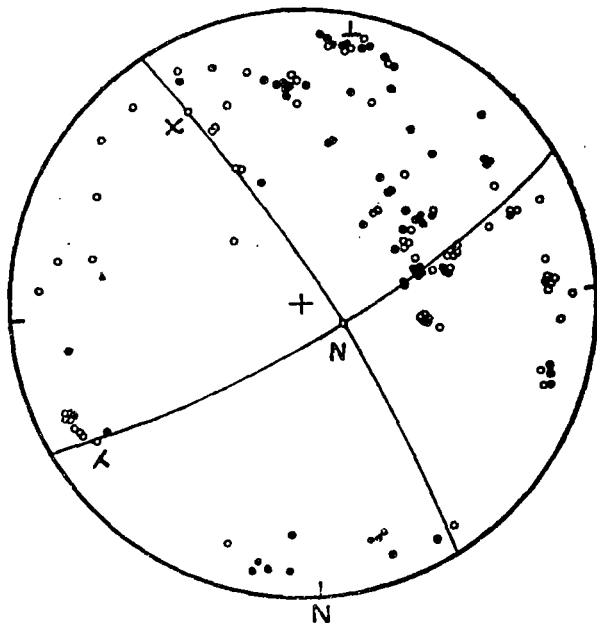


图4 库区及周围104小震平均应力场

五、地震成因和发展趋势

通过以上的叙述和分析,至少可以得出如下几点看法:

(1)地震成因:从已有的资料可知*,丹江库段及关防滩、羊山峡谷位于升降运动、地壳厚度、不同界面的转折地段,储备有较高的应变能;瓦房沟、林茂山、三官殿、关防滩的地震均发生在北西~北西西向活动性断裂带和中生代末期以来逐步形成的近南北向隆起拗折带的交汇部位(即应力的闭锁部位);几次较大地震,极震区等震线的长轴方向与北西~北西西向断裂带或新老地层接触界面延伸方向一致;发震应力场的主压应力轴方向($NW291^{\circ} \sim 293^{\circ}$)与现今构造应力场主压应力轴方向相近,说明库区蓄水后的地震活动是库区老的活动构造面在现今构造应力场、重力场和水体综合作用和相互影响下发生的构造型水库地震[10],因此,它具有构造地震的一般特点,但也有与其不尽相同的地方。

(2)最大震级问题:构造型水库地震主要是在构造应力场作用下发生的,因此,库区已发生的地震强度可作为估计库区未来地震强度的参数。N、I、尼古拉耶夫在分析了大量的实际资料之后指出:“水库地震只能改变本区地震的频度,但不能增加其强度”[12]。这一结论在大多数情况下无疑是能够成立的。对丹江口水库地震来说,水体的物理作用和化学作用只能减少不同块体间的正压力、摩擦力和降低岩石内部的结构强度,故能使发震时间提前

* 武汉地震大队,林茂山3.5级地震调查小结,1972年;武汉地震大队水库队,1973年11月29日浙川宋湾5.1级地震第二次调查报告,1974年;武汉地震大队水库队,1977年8月6日库区3.8级地震调查报告,1978年。

或频度增高;水体的力学作用(包括水的静压力作用)才是提高库区震级的因素。它能使构造应力场得到加强,克服障碍物的力相应增大;但不可能成倍、成十倍增涨;即使如此,根据震级与能量关系式 $\log E = 11.4 + 1.5M$ 推算,也只能提高零点零几级到零点几级。由此看来,水库水位和库容的增加,大大提高水库区地震的震级是有困难的;尤其对发生 $M_s \geq 5.0$ 级的地震来说更是这样。丹江口水库区过去发生的地震均未超过 $M_s = 5.0$ 级,因此今后即使提高水位,加大库容,在新构造运动较明显的瓦屋厂~周山断裂带和近南北向拗折隆带及其交汇部位,发生 $M_s \geq 5\frac{1}{2}$ 级地震的可能性仍然是极少的。

(3)发震地段:前面已经指出:丹江口水库区的地震活动,即与库区构造位置、活动性断裂有关,又与当地的水文地质条件有密切联系。在目前条件下,具备这些条件的似乎只有关滩峡谷、羊山峡谷和丹库西侧几个老震区。第二期工程完成后,库水位将进一步提高,淹没范围将进一步扩大,发震部位因此可能会增加一些,但仍脱离不了上面指出过的几个条件;不会由于水库范围的扩大,库容的成倍增加,而到处爆发水库地震,特别是破坏性的水库地震。

(4)水库区的地震地质工作:水库区的地震地质工作,实际上就是要解决库区的地质构造和最新构造运动的性质和强度问题。水库建成储水后会不会发生水库地震,主要是由其地质、构造条件和地壳活动强度决定的,查明相关因素就可以大致判断这个水库会不会发生水库地震,进而能比较明确地指出发生水库地震的地段和强度。为了判明某一水库区发生水库地震的可能性,首先应查明库区的地质背景,活动性构造及其在目前应力场条件下的表现;其次应查明库区岩性特征(表层的、深部的)、分布范围和组合关系;第三应初步探明地壳表层构造与深部构造、表层运动和深部运动及相互关系。在获得发震地段和地震强度之后,就可以采取某些有力措施,以减轻或避免震害,为人类造福。

* * *

本文在撰写过程中,长江流域规划办公室第一勘测队地质组提供了很多新资料,这次修改时我所徐卓民、谢广林、刘锁旺、李安然、古成志等同志提了不少宝贵意见,在此一并致谢。

1978年7月第一稿

1979年8月修改。

(1979年9月11日收到)

参 考 文 献

- [1] 成都地震大队,中国东部地区反映地壳深部状态的某些物探异常与地震活动相关特点的初步研究,1974年11月。
- [2] 宋仲和等,用瑞雷波和乐甫波群速度确定我国地壳厚度,地球物理学报,1965年14卷第1期。
- [3] 宋仲和等,我国大陆表面沉积层的研究,地球物理学报,1965年14卷第3期。
- [4] 李坪等,均郧断层和丹江断层的研究,並论本区的地震地质条件,丹江口水库诱发地震文集,地震出版社出版。
- [5] 郝用威,丹江口水库区地震地质特征,丹江口水库诱发地震文集,地震出版社出版。

- [6] 何鉴荣, 丹江口水库区发震的水文地质条件, 丹江口水库诱发地震文集, 地震出版社出版。
- [7] 高名修, 华北块断构造的现代引张应力场, 地震地质, 1979年第2期。
- [8] 鄢家全等, 中国及邻区现代应力场的区域性特征, 地震学报, 1979年第1期。
- [9] 湖北省地质局航空遥感地质学习班, 湖北省卫星照片的应用和断裂构造的解释, 湖北省地质科技情报, 1979年第二期。
- [10] 武汉地震大队水库队于品清, 水库地震, 地震战线, 1977年4.5.6期
- [11] M, ohtake, Seismic activty induced by Water inje-ction at Matsushiro, Japan, J, phys, Earth 1974.22.163—176
- [12] N. I. NikolAev, Tectonic Conditions tavourable for Causing earthguakes ouurring in Connetion With reservoir filling ,Engineering GeoLogy, Vol, 8 No1/2 AuGust 1974 p171~189