

龙滩水库区诱发地震危险性估计

陈益明

(广东省地震局)

摘 要

龙滩水库为待建工程。利用库坝区近年来发生的三个天然地震的资料,求得该区主压应力方向为 $N50^{\circ}W$ 。龙鱼和河池两地区发生的震群的 Q 值偏低,平均分别为360和23。对震源参数的测定结果表明, M_0 与 M_L 呈线性相关,震源尺度 a 、应力降 $\Delta\sigma$ 与 M_L 无相关性。估计水库建成后可能会诱发较强地震。

前 言

广西龙滩水库是一座待建的水电枢纽工程,位于桂西北和黔西南部交界的红水河上游,大坝位于该河与布柳江交汇口下游1 km,天峨县城以西16 km处。库区面积537 km²,设计坝高215 m,最大水深181 m时,相应库容为273亿m³。电站计划装机容量400万千瓦。鉴于工程的重要性,考虑水库建成后的诱发地震问题是十分重要的。本文对库坝区($\phi 24^{\circ}\sim 26^{\circ}$,入 $105^{\circ}\sim 108^{\circ}$)发生的天然地震的震源机制、 Q 值和震源物理参数进行了研究,进而估计该水库蓄水后的地震危险性。

一、资 料

1983年6月22~23日在广西河池地区曾发生过一次小震群活动,其震级范围为0.5~2.8(M_L ,下同),1984年1月11日又发生了一次3.6级地震。1983年12月在天峨县也发生过一次小震群活动,即龙鱼震群,其中两次最大地震的震级分别为5.0和4.8,其分布如图1所示。本文对上述震群和地震进行了研究。为了便于比较分析,还收集了研究区附近及相邻省区发生的10次4级(M_s)以上地震的震源机制结果。

二、震源机制

表1及图2、3是上述震群和地震的震源机制结果。由图2可见,龙鱼震群的5.0和4.8级地震的震源机制结果一致,由震源机制解确定区域平均主压应力方向为 $N50^{\circ}W$ 。由小震综合解和河池3.6级地震的震源机制解也得到与上述近似的结果。

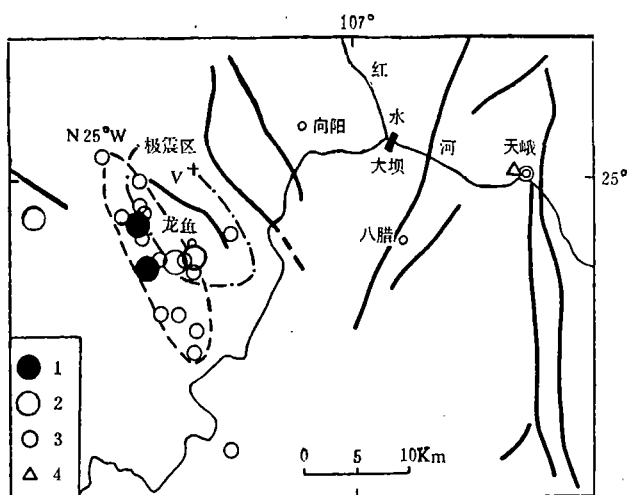


图1 龙鱼地震震中分布

1. $M_L=4.8-5.0$ 2. $M_L>3.0$ 3. $M_L<3.0$ 4. 临时台

Fig. 1 Epicentral distribution of Longyu swarm in Longtan reservoir

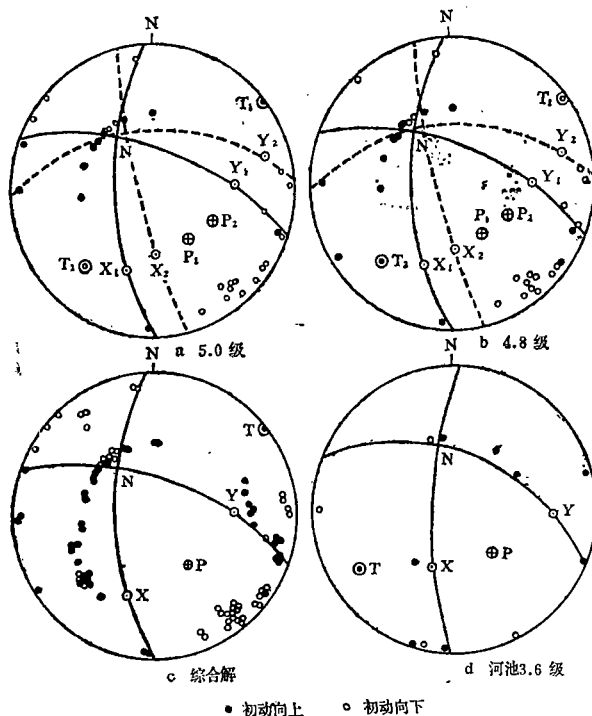


图2 震源机制解

Fig. 2 The solution of source mechanism

图3 a给出了研究区及相邻省区13次地震的震源机制结果, 图3 b是P、T轴及节面走向的综合结果。由图可见, 该区震源机制解中主压应力轴(P)的方位与相邻省区的主压应力轴优势方位 $N46^\circ W$ 相符。

由龙鱼5.0和4.8级地震及其余震综合解得到的两组节面中, 走向NNW的一组节面与六

表1 广西龙滩水库区及邻近省区地震震源机制解

地区	日期 年月日	震度		震源深度 km	节面 I				节面 II				主压应力轴 (P)		主张应力轴 (T)		中间应力轴 (N)		资料来源	
		纬度	经度		地区	Ms	走向	倾向	倾角	滑角	走向	倾向	倾角	滑角	方位	仰角	方位	仰角		方位
水库	1983.12.5	24°55.5'	106°48.4'	广西天峨 鱼龙	5.0 (M _L)	N 2° W	NE	60°	35°	N 71° W	SW	60°	35°	143°	45°	53°	0°	324°	45°	
	1983.12.7	24°57.8'	106°47.9'	同上	4.8 (M _L)	N 15° W	NE	79°	44°	N 86° E	SE	47°	16°	116°	39°	224°	20°	333°	45°	
	1983.12- 1984.12			同上	小震 综合	N 2° W	NE	59°	35°	N 71° W	SW	60°	35°	143°	45°	54°	0°	323°	44°	
河池	1984.1.11	24°43'	108°05'	河池市	3.6 (M _L)	N 8° E	SE	70°	48°	N 68° W	SW	46°	29°	132°	47°	241°	16°	345°	40°	
	1936.4.1	22°5	109°4	广西灵山	6.3 6.4	N 70° W	SW	65°		N 19° E	SE	86°		151°	19°	247°	15°	12°	64°	(1)
邻	1961.6.12	21°6	106°0	越南北部	5.0	N 34° W	SW	82°	5°	N 57° E	NW	85°	8°	282°	10°	191°	2°	92°	81°	(2)
	1966.2.5	26°2	103°2	云南东川	6.5	N 21° W	SW	85°	10°	N 69° E	NW	80°	5°	294°	11°	24°	3°	130°	79°	(2)
	1966.9.23	26°3	104°5	云南宣威	5.0	N 14° W	SW	75°	16°	N 72° E	SE	74°	15°	118°	0°	208°	22°	28°	68°	(2)
	1970.3.25	26°0	105°0	贵州水城	4.8	N 14° W	NE	78°	15°	N 73° E	NW	75°	12°	298°	2°	29°	18°	204°	71°	(2)
区	1974.11.24	22°1	109°6	广西浦北	4.1	N 82° W	NE	82°		N 14° E	SE	56°		151°	13°	51°	30°	266°	55°	(1)
	1977.10.19	23°4	107°5	广西平果	5.2	N 65° W	NE	62°		N 34° E	SE	75°		342°	9°	76°	32°	238°	57°	(1)
	1982.10.27	23°8	105°8	云南富宁	5.9	N 12° W	NE	80°		N 86° E	SE	52°		119.5°	34°	221.5°	20°	337°	51°	(8)
	1983.6.16	22°10.6'	100°59.2'	高州水库	3.0	N 80° W	直立	90°		N 10° E	直立	90°		144°	0°	234°	0°		90°	(1)
1983.6.24	21°41'	103°19'	越南北部	7.0	N 51° W	NE	70°	20°	N 32° E	NW	71°	18°	349°	23°	76°	5°	173°	62°	(1)	

资料来源：(1) 广东地震局 (2) 云南地震局 (3) 广西地震办公室

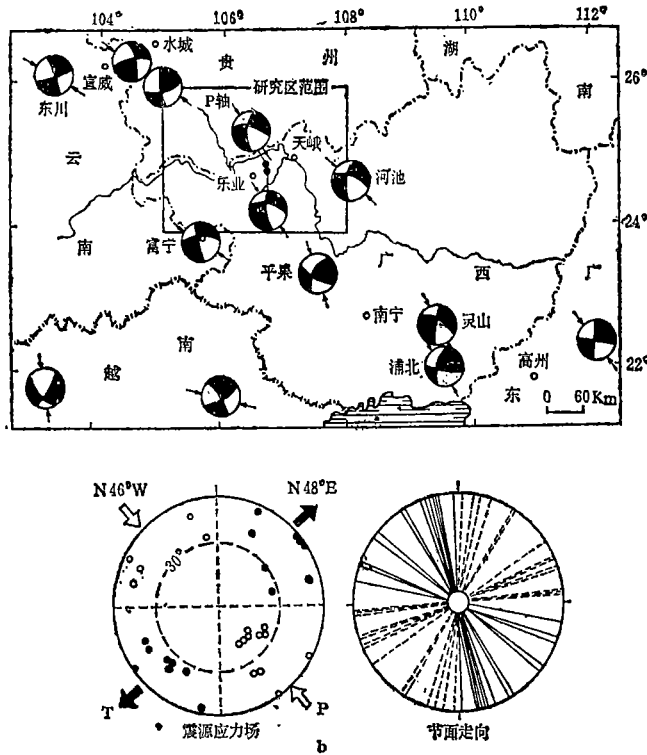


图3 龙滩水库区及其邻区震源机制解
 Fig. 3 The solutions of source mechanism in Longtan reservoir and its surrounding areas

必岭等断裂走向近于平行，也与极震区(∇⁺)长轴方向(320°)及余震展布的长轴方向(N25°W)大致相符。据此推断，NNW节面是龙鱼震群的发震断层。该断层具高角度兼有一定倾滑分量，在NW向主压应力作用下呈左旋错动，平面上表现为张扭破裂。

三、介质特征量——Q值

我们利用文献[1]提出的方法，由已知的震源距(r)及初动半周期 $\overline{t_{2a}}$ (或 $1/4\overline{t'_{2a}}$)求Q值。由于可供选用的地震极少，故尽可能选用多台记录(多为DD-1地震仪的记录)测量 $\overline{t_{2a}}$ 和 $\overline{t'_{2a}}$ ，使对同一个地震取得多个 Q_1 和 Q_2 测值。同时由河池台的记录资料测定了河池小震群的Q值。

表2给出了测定结果。其中舍去个别的与其他相差悬殊的测值(表中画方框者)，然后再求两组 Q_1 、 Q_2 值的平均值及误差(±S)。由于测定精度有差异，故用权系数(W)求 Q_1 和 Q_2 的最佳平均值：

$$\overline{Q} = W_1 \overline{Q}_1 + W_2 \overline{Q}_2 / W_1 + W_2, \tag{1}$$

可以证明W与二组测值的S的平方成反比：

$$W_2 / W_1 = S^2_1 / S^2_2, \tag{2}$$

用S代替W，经变换后得加权平均 \overline{Q} 值公式：

$$\overline{Q} = S^2_2 \overline{Q}_1 + S^2_1 \overline{Q}_2 / S^2_2 + S^2_1. \tag{3}$$

表2 1983年龙鱼震群Q值

地震时间 月 日	M _L	台站	r (km)	t _{2σ}	r/Q	Q ₁	$\bar{t}_{2\sigma}$	r/Q	Q ₂
12.5	5.0	河池	127	0.230	0.65	196	0.035	0.20	635
		岩滩	125	0.265	0.77	163	0.050	0.41	309
		大化	174	0.190	0.53	331			
		桂林	323	0.300	0.88	367			
12.5	3.4	河池	123	0.265	0.76	162	0.030	0.14	878
		大化	176	0.290	0.85	207	0.075	0.73	241
		岩滩	119	0.100	0.24	496	0.040	0.25	476
12.5	2.6	岩滩	114	0.100	0.24	475	0.050	0.40	285
		河池	123	0.115	0.28	439	0.040	0.28	439
12.7	4.8	文山	315	0.275	0.80	394	0.085	0.86	366
		罗平	260	0.175	0.48	543	0.062	0.56	464
		河池	122	0.240	0.68	180	0.040	0.27	452
		大化	178	0.125	0.32	556	0.030	0.15	1187
		桂林	326	0.335	0.99	329	0.060	0.54	604
12.10	1.4	乐业	30	0.080	0.17	176	0.030	0.15	200
		天峨	37.6	0.073	0.15	250	0.025	0.08	476
12.15	1.5	乐业	32.4	0.050	0.07	462			
		天峨	37	0.038	0.04	925			
12.15	1.5	乐业	33.3	0.110	0.26	128	0.025	0.08	416
12.16	1.5	乐业	33.3				0.040	0.27	123
		天峨	31.9	0.057	0.10	319	0.022	0.05	638
12.18	1.8	乐业	33.3	0.070	0.14	238			
		天峨	35.7	0.045	0.06	595			
12.20	1.4	乐业	31.5	0.070	0.14	225			
12.23	1.5	乐业	31.7	0.080	0.17	187			
12.29	1.8	乐业	31.7	0.065	0.12	264	0.030	0.14	226

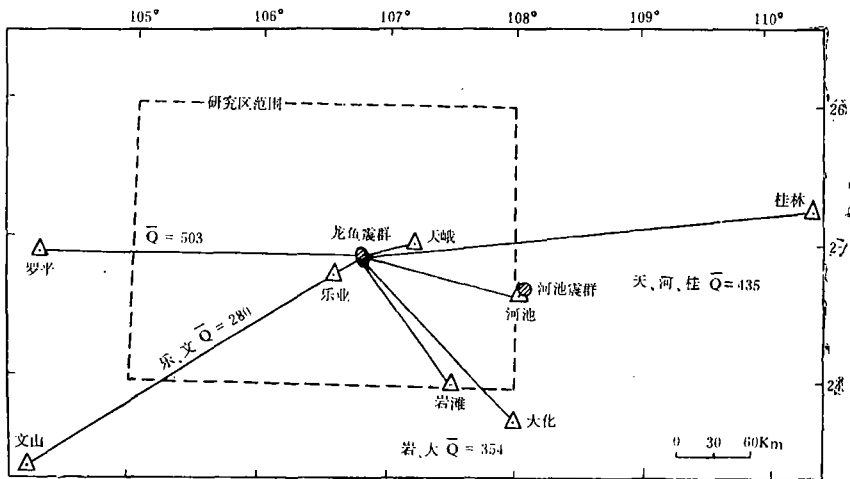


图4 龙滩水库区介质Q值分布

Fig. 4 Distribution of the Q value in Longtan reservoir region

加权后Q值误差用下式计算

$$S = 1/\sqrt{\sum_{i=1}^2 S_i^2} \quad (4)$$

利用上述公式求得坝区Q值为360 (±117)，这一结果比河池地区介质平均Q值(23)高，与新丰江水库区(Q=450)〔1〕和柘林水库区(Q=320)〔2〕的Q值接近，而比巧家地区(Q=620)和石棉地区(Q=560)〔8〕低，表明该区介质结构非均匀程度较高。而且从地震波辐射路径(覆盖大片介质)看，在各个方向上Q值还存在差异性(图4)。

四、震源参数测定

我们用文献〔3〕、〔4〕提出的震源模式测定龙鱼和河池地区小震震源参数。表3和表4给出了两个地区的测定结果。由表可见，龙鱼地区的M₀为10¹⁸~10²¹达因·厘米，河池地区M₀较稳定，为10¹⁸达因·厘米。图5 a给出了lgM₀-M_L的关系，为了比较，将新丰江、柘

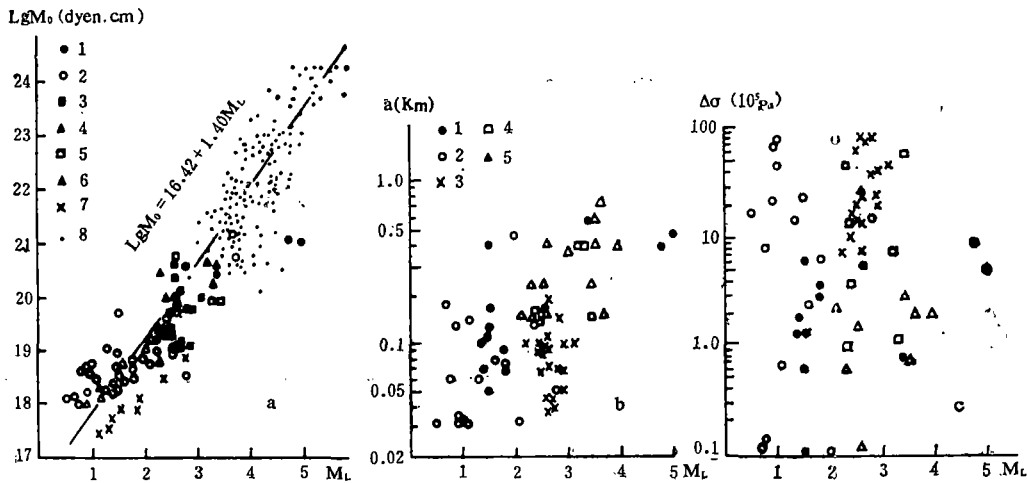


图5 震源参数与震级的关系

- a. lgM₀与M_L的关系 b. lga与M_L关系 c. lgΔσ与M_L关系
 1. 龙滩水库 2. 河池 3. 新丰江水库 4. 柘林水库 5. 陈运泰
 6. 道格拉斯和赖亚尔 7. 斯密斯等 8. 外斯和布龙

Fig. 5 Relationships between source parameters and magnitude

林水库区以及陈运泰等人所作的结果一并点绘于图中。由图可以看出，本文结果与上述结果呈正相关。据此求得关系式：

$$\lg M_0 = 16.42 + 1.40 M_L \quad (5)$$

(5) 式中的系数与如下关系式中的系数很接近：

- lgM₀ = 16.2 + 1.2M_L; (高野)
- lgM₀ = 15.4 + 1.6M; (里兹尼科)
- lgM₀ = 16.0 + 1.5M. (陈培善)

龙滩水库区的震源尺度a为0.072~0.565km，与河池地区(0.032~0.473)、柘林水库区

表 3 1983年龙鱼震群震源参数测定

地震时间		震级 (M _L)	台 站	r (km)	$\bar{u} \times 10^{-5}$ (cm)	\bar{t}_{2a} (Sec)	\bar{a} (km)	M ₀ (dyen.cm)	$\Delta\sigma$ (10 ⁶ Pa)	\bar{D} (cm)	
月 日	时 分										
12 5	20 00	5.0	岩滩	125	0.603	0.26	0.463	1.2 × 10 ²¹	5.1	0.90	
			河池	127	0.924	0.23					
			贵阳	169	0.864	0.30					
			桂林	323	2.830	0.30					
12 5	20 58	3.4	河池	123	0.503	0.27	0.565	3.0 × 10 ²⁰	0.8	0.15	
			大化	176	0.592	0.29					
12 5	21 14	2.6	岩滩	114	0.754	0.11	0.173	6.5 × 10 ¹⁹	5.5	0.36	
			河池	123	0.144	0.12					0.05
12 7	17 03	4.8	河池	122	0.756	0.24	0.393	1.3 × 10 ²¹	9.2	1.40	
			贵阳	169	1.020	0.30					
			岩滩	113	0.400	0.18					
			文山	315	4.023	0.27					
12 10	21 14	1.4	乐业	30	0.304	0.08	0.099	2.6 × 10 ¹⁸	1.2	0.05	
			天峨	37.6	0.045	0.07					0.08
12 15	06 48	1.5	乐业	32.4	0.459	0.05	0.157	5.5 × 10 ¹⁸	6.2	0.37	
12 15	20 25	1.5	乐业	33.3	0.116	0.11	0.03	0.119	2.1 × 10 ¹⁸	0.6	0.03
12 16	22 08	1.5	乐业	33.3	0.167	0.19	0.04	0.440	9.1 × 10 ¹⁸	0.1	0.02
12 18	04 45	1.8	乐业	33.3	0.223	0.07		0.072	3.0 × 10 ¹⁸	3.5	0.10
12 20	04 45	1.4	乐业	31.5	0.123	0.07		0.072	1.6 × 10 ¹⁸	1.9	0.05
12 23	12 23	1.5	乐业	31.7	0.218	0.08		0.110	3.5 × 10 ¹⁸	1.2	0.05
12 29	04 24	1.8	乐业	31.7	0.380	0.07	0.03	0.094	5.6 × 10 ¹⁸	3.0	0.11

表 4 由河池台测定的1983年 6 月河池小震群震源参数及相应Q值

地震时间		M _L	r (km)	$\bar{u} \times 10^{-5}$ (cm)	\bar{t}_{2a} (Sec)	\bar{a} (km)	M ₀ × 10 ¹⁸ (dyen.cm)	$\Delta\sigma$ (10 ⁶ Pa)	\bar{D} (cm)	Q	
月 日	时 分										
6 22	02 34	1.1	6.8	0.367	0.16	0.126	2.9	0.64	0.03	16	
	02 37	0.8	8.6	0.403	0.135	0.063	4.6	8.1	0.19	25	
	02 42	0.5	6.8	0.223	0.13	0.032	1.4	18.7	0.23	21	
	10 02	0.7	4.0	0.378	0.14	0.158	1.3	0.14	0.01	11	
	12 37	0.8	6.8	0.118	0.16	0.126	1.0	0.22	0.01	16	
	15 47	1.0	8.6	0.561	0.15	0.032	6.3	84.2	1.03	22	
	19 40	1.0	8.6	0.312	0.135	0.032	3.5	46.6	0.57	25	
	21 59	0.9	8.6	0.145	0.13	0.032	1.6	21.7	0.27	26	
	22 00	1.3	10.3	0.564	0.18	0.063	10.0	17.5	0.42	21	
	22 16	2.1	12.0	0.247	0.105	0.032	6.0	79.5	0.97	48	
	23 57	2.8	5.1	1.015	0.10	0.047	3.5	14.8	0.27	21	
	6 23	00 00	2.0	6.8	0.397	0.24	0.473	7.0	0.1	0.02	10
		01 36	1.8	7.7	0.784	0.15	0.079	7.2	6.4	0.19	19
		09 14	0.9	10.3	0.300	0.10	0.032	4.9	65.2	0.80	43
15 55		1.5	10.3	0.318	0.175	0.047	5.4	22.6	0.41	21	
16 18		1.6	7.7	0.310	0.16	0.079	2.8	2.5	0.08	18	

(0.14~0.40)、新丰江水库区(0.038~0.190)和陈运泰等所得结果(0.16~1.76)都很接近。图5b给出了 $\lg \bar{a}-M_L$ 关系,二者之间虽显示优势正比分布,但十分离散,给出一个简单关系式是不可能的。

龙滩水库区的小震应力降 $\Delta\sigma$ 均小于 10×10^5 帕(Pa),平均为 3.2×10^5 Pa。图5c表明, $\Delta\sigma$ 与震级 M_L 之间无相关关系。

综上所述,本文所测定的震源参数中,仅 M_0 与 M_L 呈线性相关。 \bar{a} 和 $\Delta\sigma$ 与 M_L 无相关性,说明 \bar{a} 、 $\Delta\sigma$ 值不受震级大小的影响。这一结果与文献[5]的结果一致。

五、水库诱发地震危险性估计

研究区东部的河池地区,历史上曾发生过3.5~5.0地震3次,1974年以来微震活动频繁,1983年6月22~23日两天内接连发生27次小震群活动,震源丛集(图4),而且该区介质Q值(23)特别低(表4)。郑明生也曾指出,该区为岩溶区,节理、裂隙及小断层均很发育。上述事实表明,这一地区地壳介质薄弱。因此,河池地区的地震活动可作为区域应力场加强的一个“窗口”,这个“应力窗口”在龙滩水库蓄水后将具有一定意义。

库坝区龙鱼震群应力降($\Delta\sigma$)偏低,说明龙滩水库区有发生强震的危险性。如果按古博维茨(S·J·Gibwicz)公式

$$M_L = 1.5 \lg \Delta\sigma + 5.0$$

及龙鱼震群主震(5.0级)的 $\Delta\sigma$ 为 5.1×10^5 Pa估算,未来发生强震的震级约为6.1。但鉴于库区介质Q值(360)低,表明该区介质结构不均匀和岩石破碎程度较高,不利于积累大的应变能,故地震可能不会太强烈。

库坝区主压应力方向平均为N50°W,该区出露的一系列NW-NNW和NE向断裂在此应力场作用下易于发生滑动。断层两侧岩石主要为砂岩与页岩互层,岩体内节理和裂隙发育,渗水性相对较强,如坝区右岸D₂₃号平洞F₀₀断层处实测水量为42升/分,过河平洞为170升/分¹⁾。而渗透性弱的页岩又起着隔水层作用,这有利于含水层的形成。此外,由于断层的纵横切割,使各层间形成密切水力联系,同时库区有部分碳酸岩出露,这都为高水头(181米)的库水向深部渗透提供了便利。从构造条件和水文地质条件考虑,龙滩水库蓄水后诱发较强地震的可能性是不容忽视的。

本文得到周克森的指导和支持,谨致谢忱。

(本文1987年7月15日收到)

参 考 文 献

- [1]周克森,用介质仪器脉冲响应求新丰江水库Q值,地震研究,Vol.7, No.4, 1984.
- [2]陈益明,柘林水库地震及其震源机制,地震, No.4, 1985.
- [3]陈运泰等,巧家、石棉的小震震源参数的测定及其地震危险性的估计,地球物理学报, Vol.19, No.8, 1967.
- [4]周克森,小震震源参数与震源机制的联合测定,地震学报, Vol.7, No.8, 1985.
- [5]梁秀英,云南地震的震源参数特征,地震研究, Vol.8, No.4, 1985.

1) 水电部中南勘测设计院,红水河龙滩水电站开发可行性研究报告,1984.

THE ESTIMATION OF INDUCED EARTHQUAKE DANGER IN THE LONGTAN RESERVOIR REGION

Chen Yiming

(*Seismological Bureau of Guangdong Province*)

Abstract

Based on 3 natural events of late in the area of Longtan reservoir which is to await construction, this paper obtains the principal compression of mean $N50^{\circ}W$ in direction and the Q -values of about 23 and 360, respectively. It is proved that there is linear dependence of seismic moment M_0 on magnitude M_L , and linear independence of mean source dimension \bar{a} or stress drop $\Delta\sigma$ on M_L . It is estimated that after impounding, the reservoir is able to induce stronger earthquakes.

《灾害物理学》征订通告

由郭增建和秦保燕合作编著的《灾害物理学》一书即将于1989年9月由陕西科技出版社正式出版，全书约32万字。著名地震学家付承义教授为该书作了序。

《灾害物理学》是一本综合各种灾害的共性、互性及其对策的论著。全书共分十章，即绪论、灾害物理学的方法论、灾害强度的物理量、灾害成因、灾链、灾害预测、救灾、防灾、控灾、灾害物理学与灾害学。

该书是作者多年来的一部力作，他们突破了单学科研究的局限，把研究工作扩展到各种灾害的综合研究方面，这不仅开阔了思路，而且反过来又可对单学科研究的深入起重要的指导作用。

该书内容深入浅出，图文并茂，通过阅读该书不仅可了解各种灾害的成因、前兆和预测方法等，从而提高人们防灾、控灾、救灾的能力，而且本书对灾害的共性、互性及其对策的研究思路和方法对灾害科学工作者也有重要借鉴。

本书印数不多，需要者请速订购。

联系及汇款地址：甘肃省兰州市盘旋路兰州地震研究所震源室李亚荣或宝鸡科学书社周可兴（帐号：114426427；开户行：工商银行宝鸡市支行渭滨办事处）。本书定价5.60元，免费邮寄，发票随书寄出。