

水库地震文集

(新丰江水库1962年3月19日6.1级
主震二十周年学术报告会专集)

3

谈身瑾同志指正

广东省地震局地震科学研究所水库地震研究室

1982.6

目 录

1. 徐煜坚	新丰江水库地震研究的回顾与展望·····	(1)
2. 李自强	附加侧应力在水库地震中的一些作用·····	(7)
3. 丁原章	潘建雄 肖安予 沈立英 马汉雄 缪维城 新丰江水库诱发地震的构造条件·····	(12)
4. 肖安予	潘建雄 新丰江水库地震的主要特点及形成条件的探讨·····	(25)
5. 沈立英	马汉雄 缪维城 新丰江水库区构造应力场与地震关系的数学 模拟·····	(35)
6. 潘建雄	肖安予 对新丰江地震构造、地壳垂直形变与应力场相互关系的 初步探讨·····	(46)
7. 周克森	新丰江库区小震震源机制与震源参数测定的研究——一个非均匀断 裂模式的“统一解”·····	(56)
8. 陈益明	新丰江水库区七十年代中强地震及其前后小震震源机制的研究·····	(86)
9. 卢汝圻	陈俭德 廖岭堂 新丰江水平形变与地震·····	(93)
10. 吴景浓	李健康 颜玉定 廖远群 岩石、混凝土室内水压致裂的初 步试验研究·····	(104)
11. 颜玉定	含薄弱面岩石的破裂特征及其在震源力学中的应用·····	(114)
12. 常宝琦	莫抗存 林庆麟 梁纪彬 水库诱发地震模拟实验原理及模 拟材料的选定·····	(124)
13. 林庆麟	水库地震实验的超声—声发射复合传感器的研制与应用·····	(135)
14. 常宝琦	诱发地震中水的触发作用·····	(139)
15. 潘建雄	我国东部古岩溶的形成发展及其与地震的关系·····	(148)

新丰江水库地震研究的回顾和展望

徐煜坚（国家地震局地质研究所）

“独立自主，自力更生”

——毛泽东

满地皆春，梅岭春早，感谢广东省地震局邀请我参加这次盛会，对我是一个学习的好机会。并预祝这次学术讨论会成功！

多年来，我没有接触水库地震，只是关心水库地震的调查和研究，让我回顾过去，展望未来，提点建议，供大家参考。

一、我国水能丰富，可是旱涝频繁，筑坝拦洪，提供廉价电力，综合利用，变水害为水利，造福于人民，这是发展国民经济的一项基本建设。可是，有些水库在蓄水后却发生频繁的地震，严重地威胁着大坝的安全和大坝下游广大人民的生命财产。新丰江水库地震的研究在实践和理论上具有重大和深远的意义。

在全国九万多座建坝历史中，新丰江水库写下了光辉的一页。1958年7月开工，1960年11月发电。勘探、设计、施工、电机制造，组装和输电设施都是我们自己动手的。这样高速度、高质量、高效益和低造价的兴建高坝，在当时是国际水平的。可是，好事多磨，大坝截流后不久，库区的西北方出现小震群。地震活动随库区水位上涨而增多。广东省委向中央报告，周总理当机立断，立即召集水利电力部、中国科学院和地质部，成立河源地震科研领导小组，统一领导，广泛开展和测震、抗震有关的科技研究，及时对大坝按八度要求加固。1962年3月19日04时18分在大坝附近发生了6.1级地震，震中烈度八度，震源深度约5公里。大坝和电机轴承有损伤，但坝体基本完好，没有发生沉陷和位移，经受了这次强烈地震的考验，确保大坝安全，东江下游上百万城乡居民和社会主义建设得到保障。

鉴于工程的重要性，对大坝又进行了第二期抗震加固，加固的费用约相当于大坝的造价。科研和系统的观测工作也继续进行。二十年来二十多个单位，近千人次进行长期不懈的工作在世界科技史上也是少有的。

一九七三年在西班牙召开的第十届国际大坝会议和一九七五年在加拿大召开的第一届国际诱发地震会议，新丰江水库地震的论文得到外国专家很高的评价，去过新丰江水库参观访问的外国知名学者都赞赏我们的作法。当然，也指出了我们工作中的不足之处。

新丰江水库地震教育了人民，锻炼了干部，培育了知识分子。要说新丰江水库地震研究对祖国作出了贡献，出了人才，出了成果，这一切都应归功于党的正确领导。对我们年纪大的知识分子来说，经过自己在新丰江工作的切身体会，逐渐理解党是大公无私的，全心全意为人民服务的和完全彻底向人民负责的。

根据新丰江的经验，1962年李坪、刘行松、王思乔预测丹江口水库会发生地震。1979年胡毓良、陈献呈成功地预报乌江渡的地震。以后，陆续发现一些水库地震的史例。（见图1

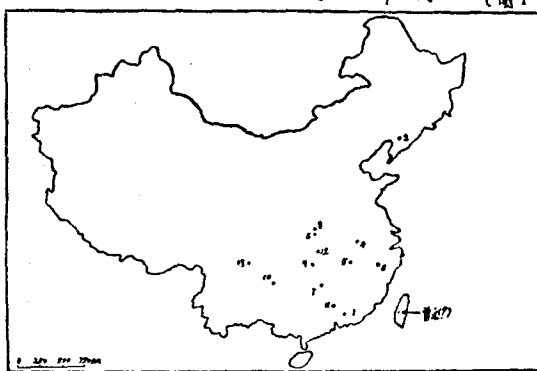
表1)。我个人认为：我国地震预测、预报、防震、抗震的工作是从新丰江开始的。或者说至少是一个开端或萌芽。

二、我国水库地震研究现状有下面4点：

(1) 在14个震例中有11个库区是在溶岩区(喀斯特)。即使调查不全面、也应引起我们注意(广西的大藤和大化两个将要兴建的大水库)当然，并不是所有溶岩地区的水库必然会诱发大或小的地震。

(2) 一般说来，水库水位猛涨，伴随小震数目增多。可是，丹江口水库在1979年有一次高水位，当时只发生几十次小地震，频度和强度并没有显著变化。同样，去年长江，黄河特大洪水，葛州坝、刘家峡和青铜峡至今没有听说这些坝库区有明显的地震活动。

我国水库地震分布图 (图1)



注：(1) 库中发生地震的水库位置，详见表1。
(2) 库中发生地震的水库位置。
(3) 除佛子岭、曾文水库外，均建在喀斯特地区。

延钢铁路局供稿。

我国水库地震震例表

(表一)

编号	水库名称	位置	坝高 (m)	库容 (亿方)	开始蓄水 时间 (年、月)	开始地震 时间 (年、月)	间隔 (月)	已知最大地震			间隔 (年月)
								M _s	I ₀	年月日	
1	新丰江	广东河源	105	115	1959.10	1959.11 (60.4)	1 (6)	6.1	VIII	1962.3.19	2.5
2	参窝	辽宁辽阳	50	5.4	1972.11	1973.2	3	4.8	VI	1974.12.22	2.1
3	丹江口	湖北均县	97	160	1967.11	1970.1	26	4.7	VII	1973.11.29	5.0
4	佛子岭	安徽霍山	74	4.7	1954.6	1954.12	6	4.5	VI	1973.3.11	
5	柘林	江西永修	62	71.7	1972.1	1972.2	1	3.2	V	1972.10.14	0.9
6	前进	湖北谷城	50	0.2	1970.5	1971.10	17	3.0	VI	1971.10.20	1.5
7	南冲	湖南邵东	45	0.2	1969	1969	1-2	2.8	VI	1974.7.25	
8	湖南镇	浙江衢县	1.9	20	1979.1	1979.6	5	2.8	V	1979.10.7	0.9
9	黄石	湖南桃源	40	6.1	1970	1973.5	29	2.3	V	1974.9.21	4.0
10	乌江渡	贵州遵义	165	21	1979.11	1980.4	5	(1.8)			
11	南水	广东乳源	81.5	10.5	1969.2	1970.1	11	3.0	V	1970.2.26	1.0
12	邓家桥	湖北宜都	12	0.004	1979.12	1980.8	8	(1.9)			
13	新店	四川犍为		0.25	1974.4	1974.7	3	4.2	VI	1979.9.15	5.5

(3) 重视高坝大水库地震的研究和强调着重在兴建高坝大水库前进行周详的水库地震研究。这是正确方向的问题。(胡毓良的意见我赞成和支持这个意见)。

(4) 关于水库地震的分类问题。武汉地震研究所的同志把水库地震分为四类：应力型、重力型、水力型和水化型。胡毓良认为：“水库诱发地震主要有两个条件：一是水库区存在下稳定岩体，包括构造和重力不稳定，二是库水的渗漏”。夏其公、汪雍熙以地层岩性、地质构造和水文地质条件作为三个主要因素。强调构造破裂和裂隙水的作用。徐煜坚、苏克忠、吴裕文在1975年曾认为水库蓄水后可能出现四种情况：一、没有地震活动；二、地震活动明显；三、地震活动加剧和四、地内活动减少。水库地震成因争论较多，慎重的人认为：了解很少。提出过早或过于肯定的结论是不恰当的。我认为有设想，多探索总是好的。

三、国外水库地震研究的一些情况：

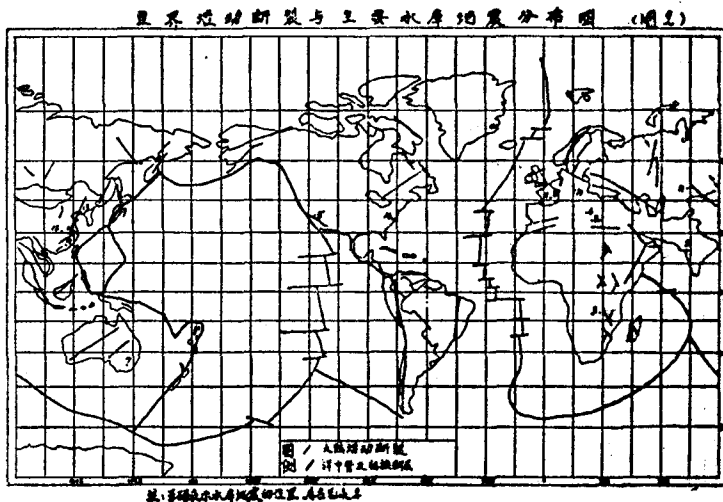
(1) 水库地震史例是一项基础资料。据目前不完全统计，五大洲，约30个国家，八十多个水库地震。车用太认为“有据可查的有75座之多。实际数目远大于此数……”。他选择了54座地震、地质资料相当齐全的水库。水库地震震级等于或大于4.5级的不到20座(见表2、图2)，目前最大震级为6.5级，震中烈度最大九度。当然，有不少水库地震是有争论的，有些水库蓄水后地震反而减少了，如：Tarbela，

Flaming Gorge, Glen Ganyon, 以及Anderson等水库。有人解释为这些水库是建在震带上，蓄水后，水体荷载对逆断层起抑制作用。

(2) 水库地震成因的思路比较活跃。一、水库蓄水诱发了积累在地壳中的初始应力的释放。有人认为构造应力就是初始应力。二、有人认为重力应力，也有人

把初始应力应全包括重力应力。三、水库水体引起补充应力作用。四、岩石的孔隙水压增加和地下水位上升液化是主要原因。五、岩体中束缚水压缩气体发生爆炸(气体膨胀)。六、地内大同岩塌陷(气体压缩)。七、沿岩体裂隙发生液压变化。八、地下水沿裂隙或小断层渗透，使岩体发生物理和化学作用如润滑、软化、膨胀、收缩等产生各种变形。九、水压在硅酸盐类岩石裂隙端部产生腐蚀作用。十、岩体产生固结和调整，在达到新的平衡的过程中产生地震。十一、库区地壳形变引起附加应力。十二、水在地壳中引起温差应力，可能也是一种诱发应力。

(3) 各国间合作有了发展，水库已被作为地震预报的实验场。二十年来，各国水库越建越大，水坝越建越高。最初是由发展中国家通过联合国教科文组织邀请外国协作，如孟加拉水库，卡里巴水库等。近来合作的事情又多起来。美国参加苏联努烈克水库和托克托吉水库。美国 D. W. Simpson 等提出用控制蓄水的办法来避免破坏性地震的发生。美国的



世界十六个水库地震史例

(表二)

编号	名称		国家	类型	坝高 (m)	库容 (亿方)	震级	最大烈度	对大坝的影响
	中	英							
1	柯依那	Koyna	印度	重力	104	28	6.4~6.5	VIII~IX	大坝漏水, 坝顶有破坏, 震害严重。
2	克雷玛斯塔	Kremasta	希腊	土石	163	47	6.3	VIII	右坝墩渗漏
3	卡里巴	Kariba	津巴布韦	拱	128	1750	5.8~6.1	VII(?)	一无所知
4	新丰江	Hsinfeng-kiang	中国	重力	105	11.5	6.1	VIII	大坝裂缝, 轻微漏水, 震害严重。
5	鲍尔德	Boulder (现名: Hoover)	美国	重力拱	222	400	4.6~5.0	IV	不 知
6	马拉松	Marathon	希腊	重力拱	63	0.4	4.7~5.0		不 知
7	沃剑比尼	Eucambene	澳大利亚	土石	118	47.6	5.0		
8	蒙台纳尔	Monteynard	法国	拱	115	2.4	5.0	VII~VIII	
9	黑布第四	Kurobewaga No. 4	日本	拱	186	2.0	5~6	VIII~IX	
10	巴济那巴士塔	Bajina Basta	南斯拉夫	拱	90	13.4	4.5~5.0	VI(?)	
11	努烈克	Hypek(俄文)	苏联	土石	300	15.5	5.0		不 知
12	丹江口	Danjinkou	中国	重力	97	160	4.7	VII	伤 人
13	参窝	Shenwo	中国	重力	51	6.0	4.8	VI	轻微破坏
14	克拉克山	Clark Hill	美国	?	70		4.5		
15	乌克兰	Vouglans	法国	拱	110	6.0	4.5		不 知
16	佛子岭	Feziling	中国	拱	47	4.7	4.5	VI	

注: (1) $M_s \geq 4.5$ (2) 震中烈度 $\geq IV$ (采用《新中国地震烈度表》)

C. H. Scholz D. W. Simpson 研究委内瑞拉的 Yacambu 水库。印度的柯依那水库从1980年9月2日以来先后发生了3次5级(mb)左右地震, 美国地质调查所准备与印度国家地球物理所合作, 在水库区设置13个流动台, 进行地震方法研究。美国有人成功预报了两次2—4级的水库地震。

(4) 观测手段增多, 提高观测仪器的精度, 加密遥控和流动台网的密度和布局。除了

传统的测震和测量的方法外，水化学、地倾斜，深井地应力测量。由于观测仪器精度提高和电子化的广泛应用，多快好省地测定，处理大量地震震源的位置、震级、地震数目，震源机制，地震矩， t_s/t_p 和 P_v/S_v 振幅比，地震序列的变化和地震迁移的时、空、强的样式。用深井测量地应力，孔隙压力、渗透率，地震波速和断层与裂隙的产状、规模和性质的一套方法是从油井测量移植到水库地震的研究。举一反三，工艺和学科都在发展，方法和手段也在实践中不断改进。观测数据是基础性工作一向被人们所重视。

(5) 理论方面：从六十年代开始人们认为水库地震的成因是和地质构造和水库的水体的作用有关的直观看法以来，水库地震问题很多，可以说还是处于感性认识的初期阶段。地震学的理论和假说，岩石力学的模拟实验先后被应用到水库地震来，如扩容理论，孔隙水压力，岩石破裂等。当然也存在一些争论，如初始应力，低剪切力的作用，结构面的强度变化。地壳的高应力状态还是低应力状态产生地震？这些问题都需要我们的科学实践或经验加以检验为好。

(6) 两个现象值得我们注意。大家都认为水库水位急剧上涨会诱发地震，但也要注意到水位急剧下落也有诱发地震的现象，有的水库的水放空，重新蓄水也会诱发地震。最近有人认为地表裂隙水冻结引起岩石破裂而产生小地震，用来解释瑞士和罗马尼亚的水库地震，我国西北地区的工作同志可以参考。

四、对新丰江水库地震研究的几点建议。

新丰江水库地震研究是我国一项较全面、较系统和较长期的，具有中国风格和特点的科技工作，在国内外都享有较高的声誉，理应对社会主义祖国四个现代化和对人类认识自然和改造自然作出应有的贡献，为此，我提出一些建议，供大家议论和考虑。

1. 改善领导，齐心协力，完善观测系统，加强专群结合，一致贯彻预报和预防的中央地震工作方针。为把新丰江地震台网建成我国乃至世界第一流的地震台网而奋斗终身。

2. 全局一盘棋，人人重视基本数据，（齐、全、准、特别是准）一丝不苟，毫不含糊。统一集中资料数据。加强基础训练，熟悉乃至精通本职的观测仪表和本省乃至邻区的地震动态。开阔研究思路和提高理论分析能力。

3. 二十多年来积累了极其丰富的资料数据是极其宝贵的，排除干扰的假象，去伪存真，去粗取精，试作出不同的地震序列的动力学性质和地表构造和深部构造的联系。用图象识别或有限单元法做出综合预报模式。

4. 水库区精密水准复测可否与激光测距仪配合？特别注意台风暴雨后或长期干旱对基岩标石的影响。库区测量和大坝的观测以及省一级精密水准测量点有没有联系？水准测量和定期的重力测量有没有做对应的比较？库区的测环作了实测数值和理论计算数值的比较没有？

5. 水库区水位的日变化、旬、月、季变化曲线和地震台网的各种仪表记录的曲线同记在一张纸上，想方设法认识干扰，对比干扰，是一项艰巨细致的工作。需要也是做得到的，特别台风暴雨或水位猛落的前后一段时间，地震台网所记到的各种曲线作了对比没有？

6. 为了学习外国经验教训和教益。今年在印度召开的国际工程地质会议，争取派人参加，并在事前和印度国家地球物理所和柯依那水电站联系好，以便学习他们和美国地质调查所合作的水库地震预报的思路、方法，台站网设置和理论依据。

以上是一些不成熟的“急就篇”耽误大家的时间，表示欠意。

最后,让我以一个地震地质界的老兵,向为东江父老站岗放哨的台站青壮年同志致以衷心的敬意,谢谢大家。

1982.3.16于北京
(1982.3.19在广州宣读)

参 考 文 献

- (1). 胡毓良: 水库研究的新进展(待发表)。
- (2). 胡毓良、陈献程、张忠连: 我国七个大型在建水、电工程蓄水后诱发地震可能性的初步评价(待发表)。
- (3). 车用太: 水库地震评述(待发表)。
- (4). 车用太译: 热诱发的水库微震活动(待发表)。
- (5). 夏其发、汪雍熙: 试论水库诱发地震地质分类(待发表)。
- (6). 徐光宇译: 苏联吉尔斯托克托克尔水库地区的大地构造学与地震活动性(待发表)。
- (7). 诱发地震座谈会筹备组: 全国第一次诱发地震座谈会论文摘要汇编(1981年)。
- (8). 中国人民解放军00300部队: 水电勘测通讯, (1981年5. 6. 7期)
- (9). 广东省地震科学研究所水库地震研究室: 水库地震文集, 2, (译文集)(1980年)。
- (10) A. 胡毓良、陈献程: 我国的水库地震及有关成因问题的讨论《地震地质》(第1卷第4期 45—57页 1979年)
B. 胡毓良、陈献程、张忠登: 乌江渡水电工程蓄水后可能诱发地震。
1979. (内部资料)
- (11). 李坪、刘行松、王思乔: 丹江口地区均郢断裂性质并论本区的地震地质条件。
(内部资料)1963年。
- (12). 徐煜坚、苏克忠、吴裕文: 水库地震(内部资料, 油印稿)1975年。
- (13). Rothe, J.P.: Man-made lakes: Their problems and Environmental Effects. Geophysical Monographs, Series, American Geophysical Union, No. 17, 1973, pp. 444-454.
- (14). Muri, N.G.K.,: Presidential Address, Bulletin of the Indian Society of Earthquake Technology. (在第104页说“... Such a pace of construction seems to beat all world records in concrete dam construction.” 指的是新丰江水坝。

附加侧应力在水库地震中的一些作用

李自强 刘建中

(国家地震局地球物理研究所)

一、引言

随着人类改造自然进行兴建水库, 开发油田与矿山以及大型地下爆破等工程日益增多, 诱发地震的事例已遍及全球。其中水库地震的强度最大, 已达到震级6级强, 这不仅影响到水库水电能源的充分运用, 而且造成人畜的伤亡, 房屋, 建筑的破坏, 如果由此酿成水灾, 将使人民的生命、财产蒙受更大的损失, 因此最受各国的重视。

我国自从1962年发生6.1/级新丰水库地震以来, 迄今已发现13起震例, 水库地震的危险性预测和诱发机制的探讨已成为重要的研究课题。我们通过对新丰江、丹江口等水库的诱发地震所进行的工作以及对鸭绿江云峰大坝等水库进行鉴别, 初步认为, 水库地震的发生是在有利于库水渗透并能保持一定承压的多裂隙地质条件下, 裂隙中的液压作用, 软弱构造面的物质软化作用, 小地震引起的应力集中和水压应力场的作用等共同影响的结果。

为了将研究引向深入, 我们探讨了以改进的水压致裂法测量水库地震在地下深部的初始应力以及随时间演变的问题, 深井注水地震与水库地震的类比问题等, 本文拟对水库蓄水后引起的侧应力变化与作用予以讨论, 以期对水库地震的全面认识有所参考。

二、侧应力的作用

在围压为 P 的情况下, 当岩石内的孔隙流体压力 $P_0 = 0$ 时, 三轴的压缩主应变为:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = P/K \quad (1)$$

此处, K 为弹性模量

当孔隙流体压力增加到 P_0 时, 有效围压 $\bar{P} = P - P_0$, 三轴的压缩主应变变为:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_1 + \varepsilon'_2 + \varepsilon'_3 &= \frac{P}{K} - \frac{P_0}{K} \\ &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3 \end{aligned} \quad (2)$$

此处, $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$ 和 $\Delta\varepsilon_3$ 分别为孔隙流体压力增加引起的三轴全应变。

由此可知, $(2) < (1)$, 即随孔隙流体压力的增加而出现岩石膨胀。

若在一有限区间内, 由孔隙流体压力的增加, 所产生的膨胀体积与周围的广大区间相比可以忽略时, 有效应力理论是可以近似地满足野外观测结果的解释。但在大型水库, 由于蓄水, 促使库区几百平方公里以上的大区间内的孔隙流体压力的增加, 所产生的膨胀体积是不能忽略的, 必然导致库区和广大邻区应力场发生变化, 便不能简单地用有效应力理论来解释了。

(一) 对库区周围带来的影响

(1) 当坝区基底为渗透率较高的多孔性岩石并具有网络状裂隙结构时, 孔隙流体压力

的增加将导致库区基底岩石的膨胀，部分裂隙的张开以及对周围孔隙流体压力未增高区域的压缩，于是

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varepsilon_1 R = \frac{R}{L} \left[\Delta \sigma_r - v (\Delta \sigma_\theta + \Delta \sigma_H) \right] \\ u_2 &= \frac{\Delta \sigma_r}{C} \frac{R}{P} \\ u_3 &= \frac{1-v^2}{\pi F} \Delta S_r \iint \frac{d \times dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = W_s \Delta S_r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_r &= \Delta S_{r1} - \rho g h \\ \Delta \sigma_\theta &= \Delta S_{\theta 1} - \rho g h \\ \Delta \sigma_H &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

此处， u_1 为库区基底岩石的形变位移， u_2 为基底岩石裂隙张开的位移， u_3 为库区周围孔隙流体压力未增高区域的位移； R 为库面宽度， ε_1 为基底岩石的形变， E 为杨氏模量， v 为泊松比； $\Delta \sigma_r$ 、 $\Delta \sigma_\theta$ 和 $\Delta \sigma_H$ 为三个有效正应力的增量； D 为相邻两个裂隙间的平均距离， C 为裂隙刚度， ΔS_{r1} 、 $\Delta S_{\theta 1}$ 分别为 S_r 、 S_θ 正应力的增量， ρ 为密度， h 为水位高程变化。

将(4)、(5)式代入(3)式，则

$$\frac{R}{E} \left[\Delta S_{r1} - \rho g h - v (S_{\theta 1} - \rho g h) \right] + \frac{\Delta S_{r1} - \rho g h}{CD} R - W_s S_r = 0$$

即

$$\Delta S_{r1} = \frac{\frac{E}{CD} + 1 - v}{\frac{E}{CD} + 1 - v + \frac{W_s E}{R}} \rho g h = \lambda_1 \rho g h \quad (6)$$

(ii)、当库区基底为渗透率低的岩石并具有网络状裂隙结构时，同样

$$u'_1 + u'_2 + u'_3 = 0 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} u'_1 &= \frac{R}{E} \left[\Delta \sigma'_r - v (\Delta \sigma'_\theta + \Delta \sigma'_H) \right] \\ u'_2 &= \frac{\Delta \sigma'_\theta}{C} \frac{R}{D} \\ u'_3 &= \frac{1-v}{\pi F} \Delta S_{r2} \iint \frac{d \times dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = W_s \Delta S_{r2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma'_r &= \Delta S_{r2} \\ \Delta \sigma'_\theta &= \Delta S_{\theta 2} \\ \Delta \sigma'_H &= \rho g h \\ \Delta \sigma_p &= \Delta \sigma_{12} - \rho g h \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

此处, σ_p 为裂隙的有效接触应力, 其他引用的符号与 (i) 所用意义相同。

(8)、(9) 式代入 (7) 式得出

$$\Delta S r_2 = \frac{\frac{E}{CD} + \nu}{\frac{E}{CD} + 1 - \nu + \frac{W_3 F}{R}} \rho g h = \lambda_2 \rho g h \quad (10)$$

从 (6)、(10) 两式可以看出, 如库区基底为坚硬的岩层, E 较大, 则 $\Delta S r_1$ 和 $S r_2$ 接近于孔隙流体压力, 即侧压系数 λ_1 和 λ_2 接近于 1, 相当于在库区周围附加一个数值等于孔隙流体压力的应力场, 因此库区基底 E 较大的大型水库较一般水库易于诱发地震。

结果把库水能渗透的深度与水域边缘的范围划分为许多小单元, 于是一个小单元在库区周围的一点 P 引起的附加有效应力为:

$$\sigma_\gamma = \frac{3 \lambda \rho g h \Delta S x^3}{2 \pi \gamma^5} \quad (11)$$

此外, ΔS 为个单元的面积, r 为 P 点距原点的距离

为了求得许多小单元的作用结果, 必须将这些作用力转换到统一坐标系内:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{xi} &= \sigma_x \cos^2 \theta_1 + \sigma_y \sin^2 \theta_1 + 2 \tau_{xy} \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ \sigma'_{yi} &= \sigma_y \cos^2 \theta_2 + \sigma_x \sin^2 \theta_2 + 2 \tau_{xy} \cos \theta_2 \sin \theta_2 \\ \sigma'_{zi} &= \sigma_z \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau'_{y_i z_i} &= \sigma_y \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sigma_z \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ &\quad + \tau_{xy} (\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_2 \sin \theta_1) \\ \tau'_{y_i x_i} &= \sigma_y \cos \theta_1 + \sigma_x \sin \theta_1 + \tau_{yx} (\cos \theta_1 + \sin \theta_1) \\ \tau'_{z_i x_i} &= \sigma_y \cos \theta_2 + \sigma_x \sin \theta_2 + \tau_{xy} (\cos \theta_2 + \sin \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

此处, θ_1 , θ_2 分别为 x' 与 x_1 , y' 与 y 之间的夹角。

于是在 P 点各应力分量的总和为:

$$\left. \begin{aligned} \overline{\sigma_x} &= \sum_{i=1}^n \sigma'_{xi} \\ \overline{\sigma_y} &= \sum_{i=1}^n \sigma'_{yi} \\ \overline{\sigma_z} &= \sum_{i=1}^n \sigma'_{zi} \\ \overline{\tau_{yz}} &= \sum_{i=1}^n \tau'_{y_i z_i} \\ \overline{\tau_{yx}} &= \sum_{i=1}^n \tau'_{y_i x_i} \\ \overline{\tau_{zx}} &= \sum_{i=1}^n \tau'_{z_i x_i} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

P点的主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 均为 σ 的特征值, 可通过下式先求出 σ

$$\begin{vmatrix} \overline{\sigma_x} - \sigma & \overline{\tau_{yx}} & \overline{\tau_{zx}} \\ \overline{\tau_{xy}} & \overline{\sigma_y} - \sigma & \overline{\tau_{xy}} \\ \overline{\tau_{xz}} & \overline{\tau_{yz}} & \overline{\sigma_z} - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

然后由 σ 的方程求解 σ 、 σ_1 和 σ_3 , 其相应的特征值分别为三轴的方向余弦

(二) 对库区内的影响

(i) 当库区基底岩石渗透率高时, 水平有效应力减量为:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \Delta S r_1 - \rho g h \\ &= -\frac{\frac{W_3 E}{R}}{\frac{E}{CD} + 1 - \nu + \frac{W_3 E}{R}} \rho g h \end{aligned} \quad (16)$$

(ii) 当库区基底岩石渗透率低时, 水平有效应力减量为:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \Delta S r_1 - \rho g h \\ &= \frac{2\nu - 1 - \frac{W_3 E}{R}}{\frac{E}{CD} + 1 - \nu + \frac{W_3 E}{R}} \rho g h \end{aligned} \quad (17)$$

从(4)、(8)式可知, W_3 项内含有 $\frac{1}{E}$ 值, 因此(16)及(17)式中的 $\frac{W_3 E}{R}$ 项,

实际上与杨氏模量 E 无关。这说明水平有效应力降低的幅度与库面的宽度有关, 在同样的孔隙流体压力情况下, 当库面越宽阔, 有效应力降低的幅度相对越小, 因此, 往往在形状狭长的水库部位, 不同方向的有效应力降低的幅度不同, 侧应力可能促使剪应力增加, 在摩擦系数较小, 水能渗透并能保持一定承压的多裂隙地质条件下, 可能出现诱发地震活动。

(三) 一些实例

例如赞比亚卡里巴水库以北约50公里的奇伦杜附近发生的小震活动, 以附加的水库荷载剪切应力0.06巴难以解释, 即使以地貌及水文地质的具体条件说明一些地下水中的孔隙流体压力变化可能带来的影响, 但值得注意的是蓄水后附加的侧应力作用, 如以(11)式为基础进行总的的影响粗略估计约2巴。

我国新丰江水库大坝东约5公里的三王坝附近, 1964年8月2日曾发生4.6级地震, 水库荷载附加剪应力的影响约为0.4巴, 如上述方法粗略估计约4巴。另外, 在大坝南约9公里的火辣山一带也出现过小震活动, 与卡里巴水库有类似情况。

上述实例仅仅是粗糙的估计, 今后还需结合具体的条件, 以计算机进行仔细的计算, 但至少可以说明侧应力的影响比水库荷载引起的剪应力增量大一个数量级, 这是不可忽视的一个因素。

结 束 语

水库地震的诱发因素可能是裂隙中的液压、岩石的软化、小地震引起的应力集中、附加侧应力和水压应力场等的综合作用结果。

大型水库蓄水后附加的侧应力，可能较水库荷载引起的剪应力大一个数量级，在狭长的水域边缘，尤其在库区外围所起的作用会更大一些。今后需要结合水库的具体环境、蓄水水位高度以及库面宽度等进行详细的计算。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 李自强，试论丹江口水库宋湾地震
- [4] H. K. Gupta, B. K. Rastogi, Dams and Earthquakes, 1976
- [5] D. T. Snow, Geodynamics of Seismic Reservoirs, Proc. Symp. on Percolation through Fissured Rocks. Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau, Stuttgart, T₂-J, 1972
- [6] Gough, D. I. and Gough, W. I., Stress and deflection in the lithosphere near lake Kariba, 1, Geophys. J., 21, 1970a.
- [7] Gough, D. and Gough, W. I., Load-induced earthquake at Lake kariba, 2, Geophys. J. 21, 1970. b,
- [8] Bell, M. and Nur, 1978, Strength changes due to Reservoir-induced Pore Pressure and stress and application to Lake Oroville, J. G. R. 83, 1978
- [9] 国家地震局地震研究所编，丹江口水库诱发地震文集，地震出版社，1980.

新丰江水库诱发地震的构造条件

丁原章 潘建雄 肖安予

沈立英 马汉雄 缪维成

前 言

水库蓄水诱发地震的机制受许多因素支配。水库的地质构造背景是最主要的条件之一。深入地分析已知诱震水库的地质条件,既是探索水库诱发地震成因机制的基础,又有助于实现水库地震的预测预报。因此,在指导今后大型水库建设中,这项工作有着十分重要的意义。

新丰江水库位于中国广东省东部。蓄水以后,诱发了大量地震活动,主震(1962年3月19日)为 $M_s 6.1$ 级。它是目前世界上已知四例诱发6级地震的水库之一。二十年来记录到三十一万多次地震,为开展地质背景研究提供了难得的现场。本文在已有工作的基础上^[1,2,3,4],对发震构造做了地质考察,同时结合已取得的航空磁测、航空重力、电阻率测量、地应力解除、大地水准测量、区域水平形变测量及钻探成果,对发震构造做了综合分析。还用有限单元法模拟了地震序列和构造条件,探讨了水库荷载的效应及其与地震的关系。

一、发 震 构 造

新丰江水库主要位于巨大的燕山期花岗岩岩基体上,此岩体侵入于古生界和中生界沉积岩系中。新丰江坝以东,该岩体与晚白垩纪——第三纪断陷盆地相接(图1)。全区断裂构造十分发育,主要有三组,其走向分别为:北 20° — 45° 东、北 15° — 35° 西(以北 20° 西为主)和北 70° — 80° 东。

北北东走向的逆断层和逆掩断层是本区地表最发育的断裂。仅水库附近,长度超过三公里的北北东向断层可达八条。它们散布于水库的不同部位,有的贯穿库区,有的平行水域边缘。其优势产状为倾向南东,倾角 45° 左右,有的倾角仅 30° 。这组断裂具有多期活动特点,不同阶段其错动方式有所区别,概言之,以逆冲为主,同时伴有右旋剪切扭动。虽然主震震中位于北北东走向的河源断裂附近,但是地质研究认为,区内地震序列与这组断裂并无直接联系。地震分布、震源机制、地形变测量和其他方面的研究,均获相同结论^[3,4,5]。

北北西走向的断裂主要分布于水库东侧。其基本产状为:走向北北西,倾向北东东——南西西,倾角 65° — 90° 。通常为几百米——几公里长的平推断层,或者呈密集的剪切节理,部分被石英脉填充。它们的滑动痕迹表明主要为左旋水平扭动,局部略显压性。在地震最密集的水库峡谷区,前震分布的位置和产状与这组断裂完全一致。从P波初动得到的主震震源机制解和波谱分析都显示主震断裂为北 28° 西,倾向南西,倾角 88° ,左旋走滑。利用主震前后的水准资料,按位错理论计算得到的主震断裂为北 40° 西,倾向南西,倾角 80° ,左旋滑

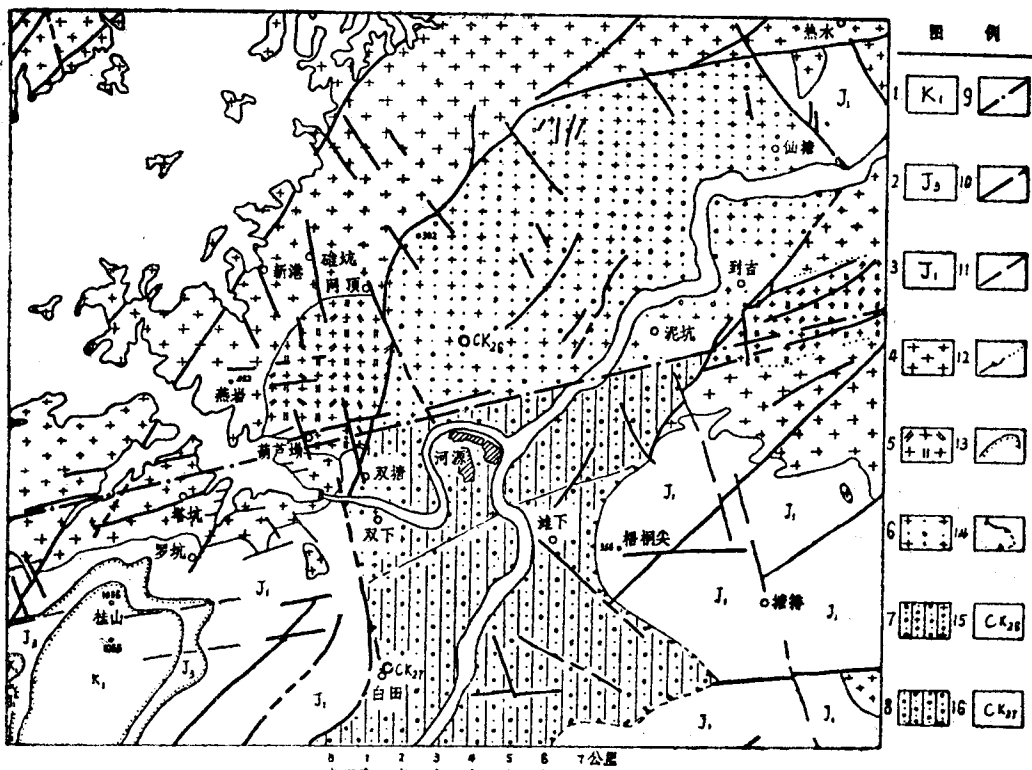


图 1. 河源晚白垩纪——第三纪盆地的基底地质略图

1. 下白垩系; 2. 上侏罗系; 3. 下侏罗系; 4. 花岗岩; 5. 二长花岗岩; 6. 上复上白垩系——第三系的花岗岩类(包括岩体顶部残留的围岩)基底; 7. 上复上白垩系——第三系的盆地基底, 其岩性为花岗岩体与围岩(下侏罗系)的不规则接触带; 8. 上复上白垩系——第三系的下侏罗系盆地基底; 9. 主要的北东东断裂; 10. 主要断裂; 11. 推测断裂; 12. 地质界线; 13. 不整合界线; 14. 沉积盆地边界; 15. 26号钻孔, 海面下384米处为花岗岩体, 其上为上白垩系——第三系; 16. 27号钻孔, 海面下397米处为下侏罗系, 其上为上白垩系——第三系。

动, 滑动角 2° 〔3〕。主震的等震线, 主震后几个月内较强余震的分布和有些较强余震的强有感范围(图2)都支持这种判断。地质考察还注意到, 虽然北北西向断裂近期活动的规模和位移幅度均不甚大, 但它确实在许多地段切割错动了北北东断裂, 表现近期有明显的活动性。新丰江水库蓄水以前二十二年(1937—1959年)内, 本区三次有感地震(1937年2月20日, 河源城关, V度; 1953年1月1日, 苟排, VI度; 1959年秋, 仙塘, V度)均发生在北北西向断裂附近。从古河道的变迁、阶地的分布和其他地貌标志, 也可找到此组断裂自第四纪以来活动的痕迹。所以, 北北西走向的断裂是一组活动断裂。诱发地震的主震就发生于本区这组活动性最强的断裂带上。新丰江水库的震例表明, 诱发地震的主震和大部分强余震的发展构造, 与水库蓄水以前当地构造地震的发展构造属于相同的构造系统。

北东东向断裂分布于水库南北两侧, 尤以峡谷区附近最发育。其基本产状为走向北东

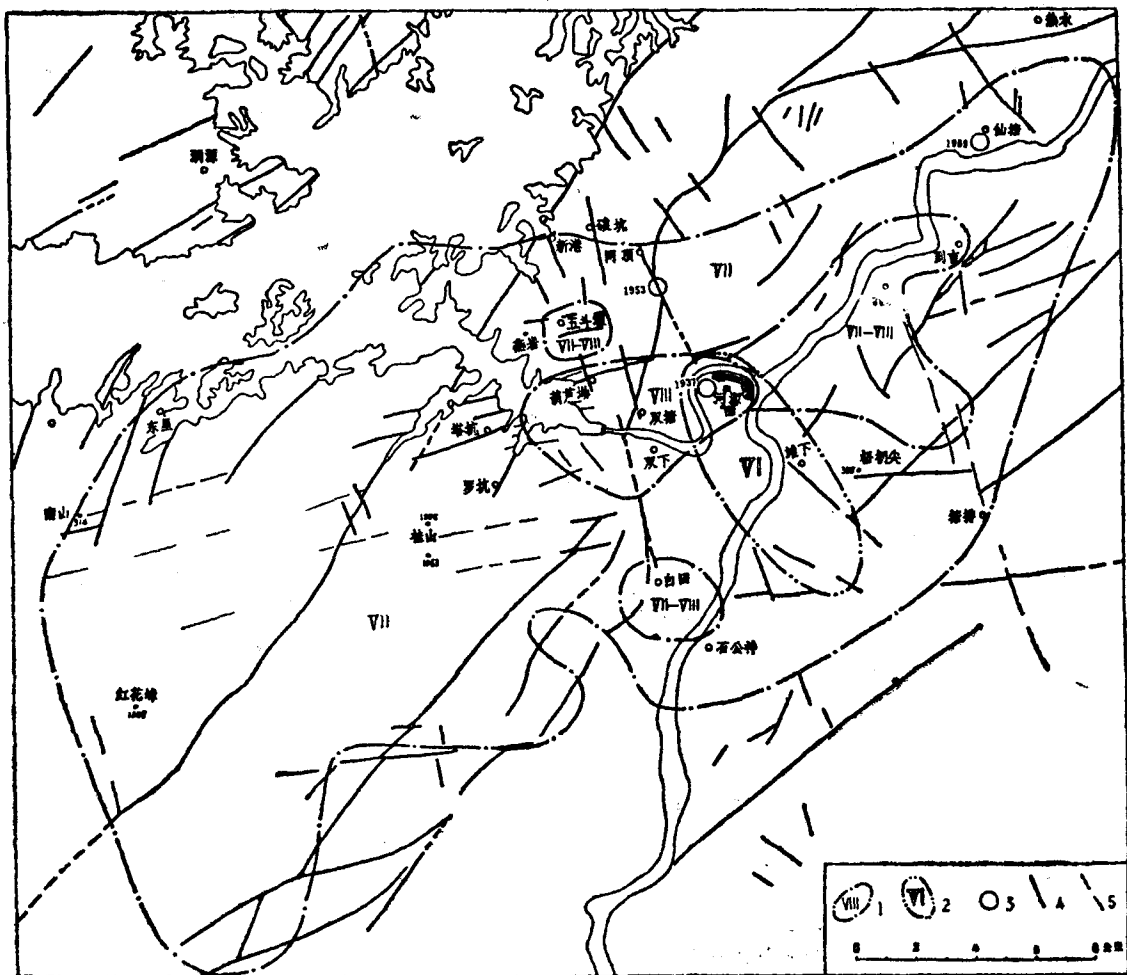


图 2. 新丰江水库地震影响场略图

1. 主震等震线; 2. 1981年5月4日4.3级地震的极震区; 3. 水库蓄水以前本区三次有感地震的震中; 4. 实测断裂; 5. 推测断裂。

东, 近直立。它们主要为水平右旋扭动, 有些则以倾滑错动为主。余震的分布和震源机制表明, 北东东向断裂是某些余震的发震构造。但是这组断裂在地表的分布不如前述两种构造发育。通过电阻率测定和钻探的研究, 认识到它是河源晚白垩纪——第三纪盆地基底的最主要的构造, 并把盆地基底分成南北两部。航空磁测 ΔT 平面图(图3—a)和区域重力异常图(图3—b)则显示北东东走向的断裂是地壳深部最主要的构造。延拓十公里得到的重力剩余异常(图3—c)已消除浅部重力异常的影响, 北东东断裂更为突出。对比图3—b、c, 可知峡谷区的北东东断裂在深部依然是高角度断裂, 略向南倾斜。

总之, 新丰江水库区有两组发震构造, 其走向分别为北北西和北东东, 都是近于直立的高角度产状, 并且同以水平剪切为主, 分别为左旋和右旋扭动。但是它们赋存的条件则有所区别, 前者主要发育在地壳浅层, 向深部减弱以至消失; 后者在地表不甚发育, 而在地下十

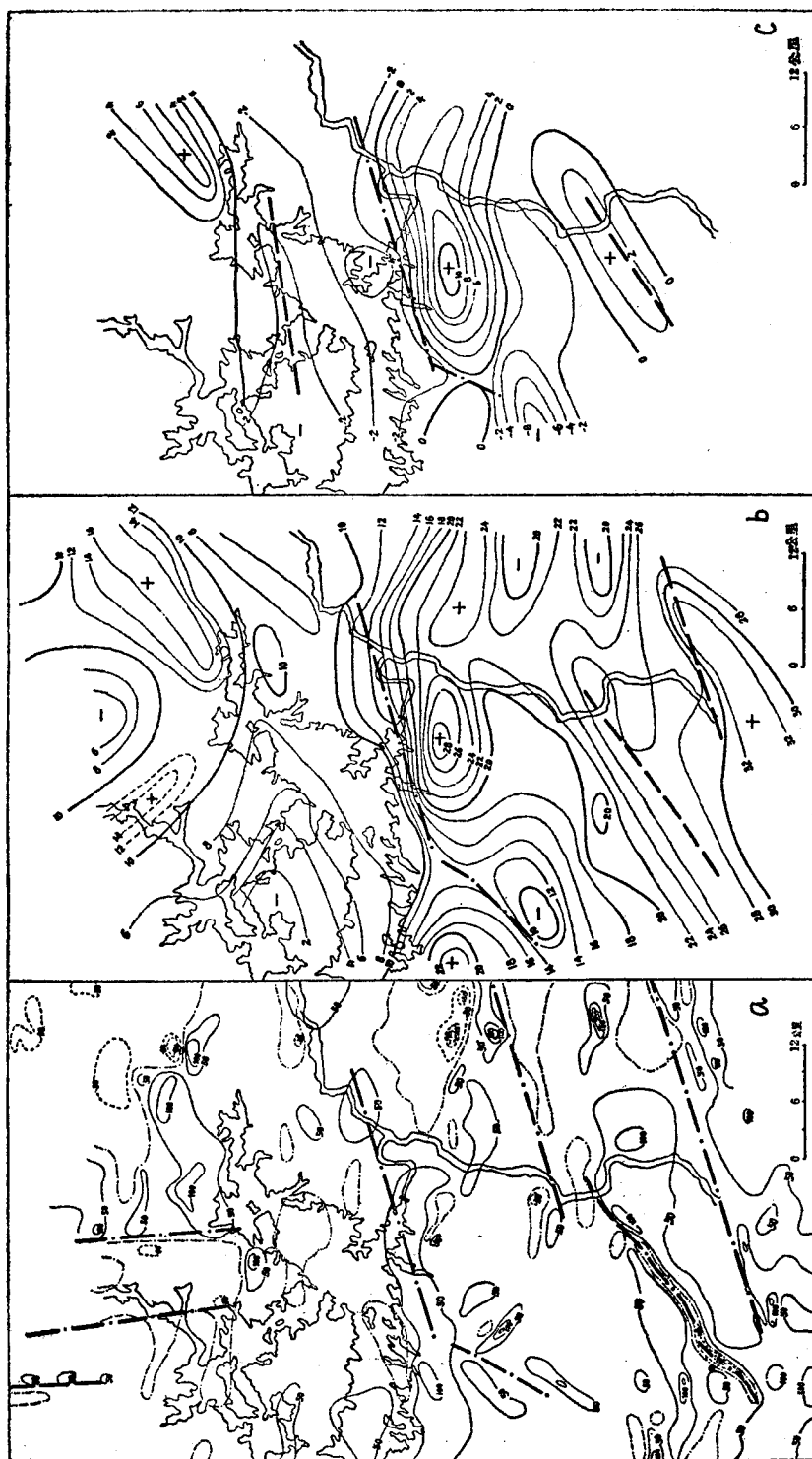


图3. a. 航磁 ΔT 图; b. 区域重力异常图; c. 延拓十公里的重力剩余异常图

1. ΔT “零”值线; 2. 正 ΔT 等值线及异常数值(伽玛); 3. 负 ΔT 等值线及异常数值(伽玛);
4. 布格等值线(单位: 微伽); 5. 正布格异常; 6. 负布格异常; 7. 主要断裂; 8. 推测断裂。

(据广东省地质局新丰江地质队资料编绘)