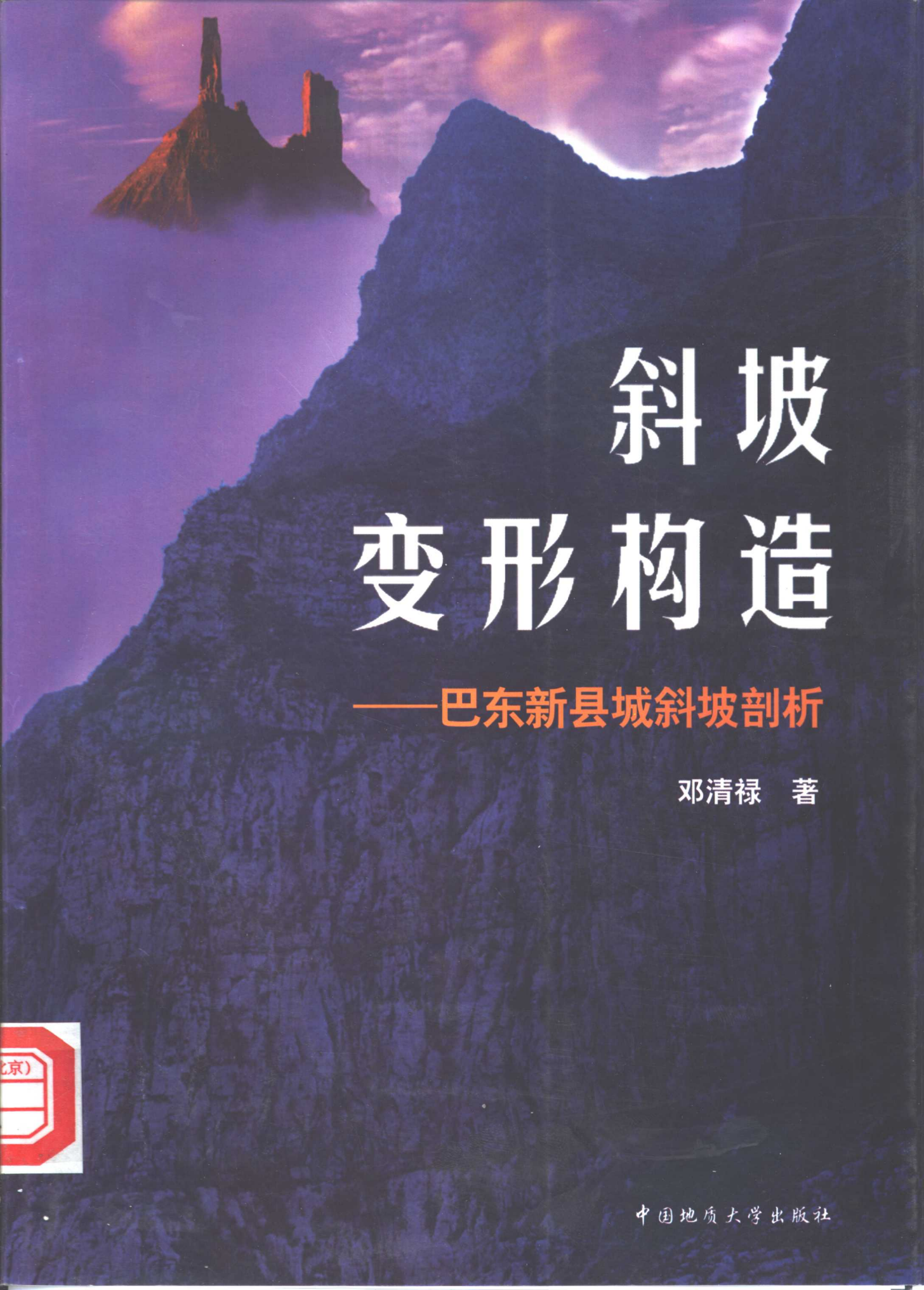




斜坡 变形构造

——巴东新县城斜坡剖析

邓清禄 著



中国地质大学出版社

斜坡变形构造

——巴东新县城斜坡剖析

邓清禄 著

中国地质大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

斜坡变形构造/邓清禄著. —武汉: 中国地质大学出版社, 2000. 9

ISBN 7-5625-1553-0

I. 斜…

II. 邓…

III. 变形-构造-斜坡

IV. P54

斜坡变形构造

邓清禄 著

责任编辑: 贾晓青

责任校对: 杨 霖

出版发行: 中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 31 号)

邮编: 430074

电话: (027)87483101 传真: 87481537 E-mail: cbs@qugdx.edu.cn

经 销: 全国新华书店

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16

字数: 200 千字 插图 1

版次: 2000 年 9 月第 1 版

印次: 2000 年 9 月第 1 次印刷

印刷: 中国地质大学印刷厂

印数: 500 册

ISBN 7-5625-1553-0/P · 535

定价: 18.00 元

前 言

构造与斜坡变形、失稳之间有着密切的联系。区域的构造格局控制着滑坡的空间分布，断裂的延伸部位、地壳强烈抬升（河流强烈下切）的地区、地壳上升区与下降区的交接部位是滑坡有利的发育部位；内力地质作用是滑坡作用因素的主要方面，一个地区新构造活动的历史必将反映在滑坡发育的历史上，构造活动的活跃期对应着滑坡的高发期；对一个斜坡而言，历史构造形态和构造组合深刻地影响着斜坡变形与失稳的类型、规模和机制；斜坡变形与失稳的过程中会有新的构造出现，斜坡变形与失稳的过程始终伴随着一个构造过程。

本书正是用构造的眼光审视长江三峡工程库区巴东县城斜坡的变形与失稳问题。

巴东县城是属全部搬迁的县城之一，也是斜坡地质灾害较为突出的县份。古滑坡分布广泛，新出现的变形、滑坡、泥石流频繁，未来的库岸再造问题严峻。这些问题的出现主要归因于巴东县城特定的构造形迹与区域构造背景。因此，巴东县城斜坡是探索滑坡与构造关系难得的场所；同时，对巴东县城斜坡开展深入的研究，也是三峡工程建设的需要。

构造与滑坡的关系虽得到广泛的认可，但这方面系统的论述尚属少见。本书为构造地质学研究斜坡问题提供了一个范例，笔者期望本书的出版能起到抛砖引玉的作用，扩大构造地质学的研究领域，促进滑坡学的发展。

本书的编写始终得到中国地质大学晏同珍教授和水利部长江水利委员会崔政权勘察大师的指导；研究中得到唐辉明、李宁、杨裕云、杨森楠、王智济、伍法权、殷坤龙教授，刘佑荣、刘吉平、张双喜、王园、王建锋副教授，研究生石林、夏金梧、吴永锋高工，陈波、阮文保、王良清等在学术思想上的启迪和工作上的协助；九六至九八届毕业生张天平、强巴扎西、章军锋、文绵良参加了部分野外工作及室内研究。笔者对所有付出辛勤劳动和给予协助的同志致以衷心感谢。

笔者还要特别感谢妻子王学平女士，在笔者多年的研究中，她一如既往地承担了繁重的家务劳动，且负责本书全部图件的计算机清绘工作，本书的完成离不开她默默的奉献。

笔 者

1999年10月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 斜坡利用与滑坡研究的历史和现状	(1)
§ 1.2 巴东县城区域地质灾害概况及研究现状	(3)
§ 1.3 研究思路	(4)
第二章 巴东县城区域地质环境	(6)
§ 2.1 黄陵地块隆升及其对周缘地质环境的影响	(6)
§ 2.2 长江三峡库区滑坡与构造活动的关系	(10)
§ 2.3 长江三峡库区滑坡与线性构造的关系	(18)
第三章 巴东县城区域斜坡稳定性主要影响因素分析	(23)
§ 3.1 地层岩性成分及其工程特性	(23)
§ 3.2 构造变形及其对斜坡稳定性的影响	(30)
§ 3.3 水文地质条件分析	(48)
§ 3.4 阶地及地形地貌特征	(49)
第四章 巴东断裂与县城弧形斜坡蠕变问题	(50)
§ 4.1 巴东断裂特征	(50)
§ 4.2 巴东县城弧形斜坡与斜坡蠕变	(54)
§ 4.3 蠕变与古滑坡发育关系	(57)
§ 4.4 巴东县城斜坡发育过程数值模拟	(58)
第五章 黄土坡古滑坡的形成及演化	(70)
§ 5.1 坠覆作用	(70)
§ 5.2 滑坡作用	(77)
§ 5.3 黄土坡滑坡的后期改造	(80)
§ 5.4 黄土坡滑坡形成及演化的模式	(81)
第六章 黄土坡斜坡稳定性评价	(83)
§ 6.1 有限元模拟分析	(83)
§ 6.2 神经网络法稳定性判别	(88)
§ 6.3 模糊信息优化处理评价斜坡稳定性	(92)
第七章 西壤坡斜坡稳定性评价	(95)
§ 7.1 西壤坡斜坡结构	(95)
§ 7.2 Sarma 法斜坡稳定性分析	(96)
§ 7.3 二维非线性有限元数值模拟	(98)
第八章 巴东县城区域斜坡稳定性分区及新近变形失稳现象分析	(102)
§ 8.1 信息量法稳定性分区	(102)
§ 8.2 神经网络法分区	(104)
§ 8.3 巴东县城斜坡新近变形失稳现象分析	(106)
参考文献	(111)
英文摘要	(114)
附图: 长江三峡工程库区巴东县城新址工程地质图 (1:20 000)	

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
§ 1.1	Brief review of slope use and landslide study	(1)
§ 1.2	Brief review of slope disasters and related researches in Badong	(3)
§ 1.3	Methods	(4)
Chapter 2	Regional Geological Setting of Badong Town	(6)
§ 2.1	Uplifting of the Huangling block and its impact on geological setting around it	(6)
§ 2.2	Relationship between landsliding and tectonic activity in the reservoir area of the Three Gorges Project	(10)
§ 2.3	Relationship between landsliding and linear structure in the reservoir area of the Three Gorges Project	(18)
Chapter 3	Main Factors Influencing the Slope Stability of the County-Seat Town of Badong	(23)
§ 3.1	Lithology, mineral and chemical compositions	(23)
§ 3.2	Structures	(30)
§ 3.3	Hydrogeology	(48)
§ 3.4	Topography	(49)
Chapter 4	Badong Fault and Creep Structures in the Arc Badong Slope	(50)
§ 4.1	Features of the Badong fault	(50)
§ 4.2	Creep structures in the Arc Badong Slope	(54)
§ 4.3	Relationship between slope creep and landslide	(57)
§ 4.4	Simulation of the slope development	(58)
Chapter 5	Evolution of the Huangtupo Landslide	(70)
§ 5.1	Mass rock creep	(70)
§ 5.2	Landsliding	(77)
§ 5.3	Surficial and partial reactivation	(80)
§ 5.4	Evolution model for the Huangtupo landslide	(81)
Chapter 6	Stability Evaluation of the Huangtupo Landslide	(83)
§ 6.1	Finite element analysis	(83)
§ 6.2	Neural network judgement	(88)
§ 6.3	Fuzzy information processing	(92)

Chapter 7	Stability Evaluation of the Xirangpo Slope	.....	(95)
§ 7.1	Structure of the Xirangpo slope	.....	(95)
§ 7.2	Analysis by Sarma method	.....	(96)
§ 7.3	Simulation by finite element	.....	(98)
Chapter 8	Stability Zonation and Recent Deformation Analysis of the Badong Town		
	Slope	.....	(102)
§ 8.1	Stability zonation by information evaluation	.....	(102)
§ 8.2	Stability zonation by neural network method	.....	(104)
§ 8.3	Analysis of recent slope deformation	.....	(106)
References		.....	(111)
Abstract		.....	(114)
Appendix:	Engineering Geological Map of the New County-Seat Town of Badong in the Reservoir Area of the Three Gorges Project, Yangtze River	(1 : 20 000)	

第一章 绪 论

§ 1.1 斜坡利用与滑坡研究的历史和现状

斜坡与人类的生存、发展息息相关。古人类起源发育之地多在斜坡地带，如周口店北京人（50 万年前）和山顶洞人（10 万年前）遗址都处在斜坡地带。斜坡地带的古滑坡，地形平坦，土质松软肥沃，自然地成为人类的生息滋养之地。当今，由于人口的增长，土地资源不足，越来越多的斜坡包括滑坡地带被开发、利用。

但是，斜坡包括滑坡在提供给人类可利用的珍贵的土地资源的同时，也没有停止过给人类带来灾难。目前斜坡灾害（泥石流、滑坡、岩崩）已成为仅次于地震的第二大地质灾害（傅冰骏，1996）。滑坡重灾国如意、日、美、俄、印（度）、中、捷及奥（地利）等，近 20 年来各国年平均损失达 10~20 亿美元。

滑坡研究最早的报道是海姆（A. Heim）1882 年发表的一篇关于瑞士阿尔卑斯山区某处滑坡的文章，至今已有 100 余年的历史，目前已逐步发展成为一门成熟的学科。科学发展的动力主要来自生产实践的需要，滑坡研究的发展也是如此。

南威尔士矿业的开发对英国乃至世界滑坡的研究起到了巨大的促进作用。19 世纪末 20 世纪初，英国正经历第二次产业革命，煤炭需求量大增。南威尔士盛产煤炭，是当时英国最主要的煤炭基地，同时，随着矿业的蓬勃发展、城市化的形成，也使其成为英国滑坡发育最密集的区域。最早研究该区滑坡的文章可追溯到 1906 年，到本世纪六七十年代，集中了英国大部分的政府研究基金（Stephen，1996），最新的研究理论、技术手段被运用到滑坡研究中，在滑坡理论分析与煤矿开发之间关系、滑坡评价、滑坡治理等方面都获得了长足的进展，使英国在滑坡研究领域处于当时国际领先地位，也涌现出一批世界知名的学者，如毕肖普、安德逊等。

1963 年意大利 Vaiont 水库滑坡对世界滑坡研究又起到了一个巨大的推动作用。Vaiont 滑坡是世界上灾难最严重的一次滑坡之一，它夺去了大约 3 000 人生命，使当时世界第二高坝（266m 高）毁弃。此滑坡灾难是人为的，给人类的教训也是深重的。自此，世界各国的重大工程都对斜坡稳定性研究非常重视。

长江三峡水利枢纽工程是为世人所瞩目的跨世纪工程，“三峡工程的成败在移民”，而移民工程的成败主要取决于迁建的新城镇能否经得起历史运行的考验。新建的城镇几乎都在斜坡地带，因此斜坡问题也就成为首要问题之一。三峡工程所涉及的范围之广、问题的复杂性是国际少有的，它已经成为新理论、新方法和新技术实施、展现的场所，也将是孕育新理论、新方法和新技术的温床。

近二三十年来，滑坡研究广度和深度都得到很大的发展，主要体现在以下几个方面：

（1）滑坡机理的认识不断深入。通过认识滑坡从稳定的斜坡开始孕育变形到扩展、破坏

的规律,一些学者提出了孕破(滑)源机理^①;滑坡从渐进变形进入临滑状态后,滑动往往从一处先启动,据此崔政权提出了起跳点(域)的概念^②;解释滑坡滑动特别是远距离快速滑坡,孔隙压力说、气垫层假说(Shreve *et al.*, 1966; 晏同珍, 1994)、滑动摩擦热融机制说、规模控制说(Gogouel, 1978)、颗粒流-碎屑流说(Hsü, 1978)相继提出。除滑坡以及泥石流外,斜坡存在更广泛的变形破坏类型,如深层重力蠕变、倾倒变形被逐步认识(Von Engelen, 1963; Ter-Stepanian, 1966、1969; Dramis *et al.*, 1994; Radbruck-Hall, 1978; Mahr, 1977; Savage *et al.*, 1987; Chigira *et al.*, 1994)。

(2) 斜坡稳定性计算评价发展迅速。基于刚体极限平衡理论的斜坡稳定性分析不断地得到完善,目前的最新成就是Sarma法(Sarma, 1979),它可以对计算坡体进行任意条分,不同条块底面抗剪强度可以变化,可以考虑水位、地震力等因素,且有计算简单等优点(Sarma, 1979; 何满潮等, 1996)。数值计算以有限元法为代表,从应用线弹性本构模型发展到非线性的弹塑性本构模型,从处理二维问题发展到处理三维问题,从解决连续介质小变形问题到解决非连续介质大变形问题,从静态分析到动态仿真分析(李宁等, 1996)。

由于地质体本身的复杂性及人们认识的随机性(崔政权, 1992),决定了滑坡稳定性评价的不确定性或不准确性,所以有时计算安全系数大于1发生了失稳,而安全系数小于1却仍然稳定(黄国民等, 1996)。从中人们认识到滑坡事件是概率事件,从而提出用概率模型进行斜坡稳定性评价(崔政权, 1992; 罗文强, 1996)。据概率分析的思路,一些学者提出并发展了斜坡稳定性分析的随机搜索技术(宋昆仑, 1989)。

(3) 区域性滑坡规律及滑坡空间预测取得进展(晏同珍, 1989)。不同的构造、地貌单元,不同的经济、地理区域,滑坡发生的频率、规模和损失程度均会有差异,而这方面的研究可为重大国民经济开发提供宏观决策的依据。一些数学地质的方法引入到滑坡空间预测中,而GIS的应用,使空间预测及制图技术上上了一个新台阶(Gupta *et al.*, 1990)。

(4) 滑坡时间预测由经验方程、统计预测向基于动力学机理的预测探索。滑坡时间预测经历了60~70年代的经验方程预测,80~90年代(中期)的统计模型、时间序列(ARMA)模型、Pear生长模型(晏同珍, 1990; Yan Tongzhen, 1989、1990),这些方法目前处于广泛应用并不断完善的阶段。与此同时,有些学者开始探索基于动力学分析(物理分析)的预测模型。廖小平(1994)根据弹塑性力学原理提出了滑坡预测的功率模型,秦四清等用尖点突变模型及特定的非线性动力学模型分析了滑坡的孕育过程、混沌特征及可预测时间尺度问题(许强等, 1997; 秦四清, 1996; 周萃英等, 1995、1996),吴法权(1996)也进行了动力学分析方法的尝试。据此可见动力学分析的滑坡预测方法是今后发展的方向。

时间预测是建立在多年的变形(位移)监测资料上的,但具备这一条件的只限于那些潜在威胁特别大的崩、滑体,使得各种预测方法在应用上有较大的局限性。同时每种方法本身也都还不完善,一个具体的滑坡又受到多种复杂因素的影响,因此往往出现一种预测方法对某个滑坡获得成功预测而对另一个滑坡却不适用的情况。崔政权(1996)从实践中提出“变形点(域)扩展轨迹”的概念,对滑坡的中、长期预报问题提供了新的思路^③。

日本学者对降雨引发滑坡的预测有较深入的研究,提出了临界降雨滑坡预测、预警系统

① 吴光, 1990,《斜坡岩体孕破(滑)源机理与试验研究》,中国地质大学博士学位论文。

② 水利部长江水利委员会综合勘测局, 1996,《长江三峡工程库区库岸稳态及崩、滑体专论》。

③ 长江水利委员会综合勘测局, 1997,《长江三峡工程库区滑坡泥石流预报3S工程可行性论证报告》。

(Okada *et al.*, 1992、1994)。

§ 1.2 巴东县城地质灾害概况及研究现状

巴东县隶属鄂西恩施土家族、苗族自治州,老城信陵镇位于长江巫峡与西陵峡之间的长江南岸。209国道自此通过,为水、陆交通要道,素有川东、鄂西门户之称。巴东县城是属全部搬迁的县城之一,1984年黄土坡新城址开始兴建,1986年发现黄土坡是一古滑坡体,经多年的研究论证,并经长江水利委员会综合勘测局详细勘察,1992年重新选定西壤坡为新县城,目前在大规模建设中,而将黄土坡作为巴东新县城的一个区。因此,未来的巴东县城将从老城区后缘延伸到西壤坡,延绵约10km。

巴东县城是地质灾害严重困扰的县城。首先,巴东县城是古滑坡密集的地区,较大规模的有黄土坡滑坡、赵树岭滑坡、童家坪滑坡,其中黄土坡滑坡体积达 $4\,000\times 10^4\text{m}^3$ 。此外还有一系列小规模滑坡,如红石包滑坡、榨坊坪滑坡、谭家坪滑坡、谭家湾滑坡、中园子滑坡等。这些古滑坡体的稳定性如何,直接威胁着巴东县城的安全。

其次,随着黄土坡新城的建设,人类活动以较高的强度改变着原有的自然斜坡系统,伴随着新城的建设,地质灾害也一直没有停止过。让我们回顾一下近几年巴东的地质灾害:1995年6月,二道沟发生滑坡,造成5人死亡,经济损失数千万元;1996年10月,三道沟西侧山梁发生滑坡,209国道中断一个星期;1996年9月,大暴雨引发头道沟巴东一秭归公路桥上滑,造成1人死亡,同是这场暴雨,引发了四道沟泥石流,致使恩施州油库被淹埋,造成数百万元的经济损失,油库因此停业一个星期;1997年白岩沟发生滑坡,大坪到白土坡、西壤坡的公路中断,同时威胁着其下方正在建设中的白岩沟大桥的安全;在公路或屋基施工中,由于不注意开挖方式及开挖后的防护,小的崩塌滑坡不计其数,据县城建委员会负责同志介绍,因为这些小的崩塌、滑坡,工程施工特别是道路施工中土方量要增加1/3以上,既加大投入,又延误工期;一些新的变形正在形成,县气象局一带,地面、院墙开裂,裂缝多达40条以上,缝宽1~2mm到4~5cm,最长的100余米,此区裂缝开始出现是在1995年,1997年8月仍有扩展的迹象,另外在三道沟滑坡西侧、木材场、水厂、移民局、秋风亭等地也都出现有拉裂变形现象。这是在长江自然水位(70~100m)状态下出现的地质灾害状况,水库建成后,最高蓄水位175m,且每年有从145m到175m、又从175m回落到145m的周期性水位波动,在这新的环境条件下,新的变形和失稳将是不可避免的。

除此之外,潜伏着的地质灾害也是非常严峻的。新华-黔江断裂断断续续地从巴东县城附近通过,它是一条活动断裂,1979年在巴东县城北东10余公里的龙会观发生的5.1级地震,即与此断裂活动有关;巴东库段为灰岩、泥灰岩地段,地质结构复杂,又是诱发地震的危险地段;巴东县城江岸呈一巨型的向北突出的弧形地貌,也有可能为大型深层蠕滑体的表现;还有库岸再造问题;等等。

巴东县城地质灾害的严重性引起了各级政府部门的高度重视。1979年以来,有关单位在巴东县城开展了一系列环境地质调查,积累了较为丰富的地质资料。1996年10月,三道沟滑坡发生后,李鹏总理和邹家华副总理曾亲临现场考察。

前人在巴东县城开展的环境地质方面的工作主要有:

(1) 1979年湖北省综合勘察院完成了巴东县新城址勘查工作,并分别于1982年和1986年提交了《巴东县新城工业区新址白土坡规划阶段工程地质勘查报告》和《巴东县工业区新

址白土坡总体规划阶段工程地质勘查报告》。

(2) 地质矿产部环境地质研究所承担了“七五”国家重点科技攻关项目“长江三峡工程地质与地震”课题子题“库区拟迁城市新址环境地质研究”，对巴东县新城区进行了环境地质调查，提交了《三峡水库拟迁城市巴东县新城址环境地质研究报告》，首次发现了黄土坡滑坡和园艺场滑坡。

(3) 湖北省水文地质工程地质大队在进行“七五”国家重点科技攻关项目“长江三峡水库库岸稳定性调查”时，对黄土坡滑坡进行了1:5 000工程地质测绘，确认黄土坡为大型岩质滑坡。

(4) 1990年，湖北省水文地质工程地质大队完成了地质矿产部重点勘查项目“湖北省巴东县新城址滑坡工程地质勘查”，于1992年6月提交了《湖北省巴东县新城址黄土坡滑坡工程地质勘查报告》。

(5) 1991—1992年，湖北省水文地质工程地质大队在巴东县城进行了滑坡泥石流勘查，1992年12月提交了《湖北省巴东县城滑坡泥石流勘查报告》。

(6) 长江水利委员会综合勘测局对现县城至西壤坡沿江一带进行了选址考察，之后进行了初勘阶段的地质勘查，1994年4月提交了《巴东县迁建城镇新址地质论证报告（初勘阶段）》，推荐云沱至庙坪一带为巴东县城扩建新址。

(7) 1993年至1994年间长江水利委员会综合勘测局组织有关单位对云沱至庙坪一带进行了详勘，1995年5月提交了《巴东县迁建城镇新址地质论证报告（详勘阶段）》，查明了赵树岭为一古滑坡。

(8) 1995年二道沟滑坡发生后，湖北省地质灾害防治工程勘查设计院针对二道沟滑坡防治工程设计实施了专门性工程地质勘察，同年12月提交了《湖北省巴东县城二道沟滑坡防治工程可行性研究报告》。

(9) 1997年，中国地质大学（武汉）组织完成了“三峡库区巴东县城黄土坡前缘斜坡稳定性预测与防治对策研究”课题，首次将研究的重点定位在黄土坡前缘地带。

据不完全统计，近几年针对巴东县城环境地质撰写的论文有10篇（钟立勋等，1992；吴永丰，1996；邓清禄等，1996a、1996b；易学文等，1996；林坚等，1992；徐开祥等，1994；袁登维等，1992；崔政权，1996；何满潮等，1996），所以研究程度是较高的。

§ 1.3 研究思路

国际滑坡的研究，从发生、发展的机理、稳定性评价到时空预测等各个领域都在向纵深发展。三峡库区已进行的斜坡研究中，主要是面向生产的勘察和治理，对滑坡稳定性评价做得较多，但对滑坡的形成机理、发展演化的模式深入研究不足，这无疑在很大程度上会阻碍滑坡的正确评价、预测和合理的治理。本书运用前人最新的理论和成果，对三峡工程移民区巴东县城斜坡稳定性问题进行解剖，一方面试图解决生产实践中提出的一些斜坡问题，另一方面力求体现系统工程地质和构造地质与工程地质相结合的研究思路。因此，本书的研究思路可总结为三点：一个基本观点，即系统的观点；一个立足点，即以构造分析为立足点；一个基本目标，即解决巴东县城移民工程实施中提出的一些斜坡地质问题。

1. 系统的观点

首先，一特定的斜坡与其所处的环境是一个系统，这个系统包括地层、构造发育状况、地

型地貌、水文、气象等，因此要认识一个斜坡，就要对系统中的各个元素进行深入地认识；其次，某一斜坡系统本身又处在更大的系统中，即受区域环境的制约，如区域构造发育的历史，区域构造的形迹（如断裂、褶皱），新构造运动的规律等，因此，本书将从区域环境研究入手。

2. 构造分析为立足点

许多地区的滑坡特别是岩质滑坡与构造背景之间有着密切的联系（Giraud *et al.*，1990；Parise *et al.*，1997；Santaloia *et al.*，1997；Gostelow *et al.*，1997）。其原因一方面是，一个地区构造背景是历史构造的反映，断裂发育、节理密集的斜坡显然有利于滑坡；另一方面，一个地区的构造背景也体现其现今的活动特点，地壳强烈抬升（河流强烈下切）的地区、活断层经过的部位滑坡易于形成。因此通过构造的空间发育规律和时间上活动规律分析，有利于从时空上把握滑坡的发育规律。

对于一个滑坡来说，从开始形成斜坡，演化到出现斜坡变形，最终滑坡失稳，始终伴随着一个构造演变过程。因此，反过来，针对斜坡变形或滑坡，深入认识其构造特征、构造过程，可以揭示斜坡变形或滑坡演化的过程和规律。

3. 一个基本目标

目前巴东县城斜坡关键的几个问题可以归结为：①巴东县大弧形斜坡的性态问题；②黄土坡滑坡的性态问题；③西壤坡斜坡的稳定性问题。

解决这些问题成为本书的一个基本目标，从而为巴东县城移民工程实施提供依据，为三峡工程建设服务。

笔者以构造为立足点揭示斜坡的演化规律，在宏观的定性性态判别基础上，充分利用各种定量评价手段，如数值模拟、Sarma 法、神经网络、模糊数学等方法，从而定性、定量相互印证，以获得较为可靠的结论。

第二章 巴东县城区域地质环境

巴东县城区的斜坡地质环境属于区域地质环境系统的一部分,所以首先在这一章中对区域地质环境做一论述。

§ 2.1 黄陵地块隆升及其对周缘地质环境的影响

三峡工程经历了数十年的论证,投入了大量的地质工作,已经取得了丰富的资料和成果,对一些重大地质工作问题已经有基本结论,其中对坝区地壳稳定性的基本认识是:地壳稳定程度较高,在黄陵背斜内部的地震活动微弱,但沿黄陵背斜周边的基底断裂存在弱到中等强度的地震带(刘国昌,1993;陈学波,1994)^①。

同时人们也注意到,黄陵背斜周边的构造有一显著的特征,即以黄陵背斜结晶核为中心,不同方向的断裂环绕其分布。然而,对三峡区为什么存在这样的构造分布及活动格局,应力状态如何,目前还未见到比较系统的阐述,认识上也不统一。如杨森楠等(1996)提出压力影的模式以解释燕山晚期构造,即在近南北向的区域主压应力作用下,刚性较大的黄陵结晶核构成硬核,东西两侧形成两个弱应力区,黄陵结晶核外缘的断裂可归结为两组成共轭关系的断裂系。这种认识强调水平应力场的作用,能解释黄陵背斜周边的构造分布,但它与这些构造并非完全吻合,在区域上成这种共轭关系的断裂系统也不存在。国家地震局地球物理研究所等认为^②,现代三峡地区的主压应力轴的走向为NE—SW向,由于黄陵地块的控制作用,使得地块周围的局部应力场发生改变,南部和北部主压应力轴为近S—N向,东侧为NE向,西侧为NNE—NE向。但黄陵地块是如何对应力场起控制作用的,并没有明确指出。刘锁旺等(1983)的研究也认为,长江三峡及邻区各构造区域内 σ_1 轴向随时空而变化。李安然等(1994)则认为本区是在大范围的引张力背景上叠加了NE—SW向压应力的联合作用,并由此决定了中强地震活动特点及其发展断裂系统。

笔者支持黄陵背斜起到控制三峡区构造活动的作用的观点,也不排斥区域水平应力场的作用,但同时强调黄陵背斜的均衡断块状隆升是影响、控制其周缘地区构造分布及活动形式的主要因素。下面从地质构造、地震活动、地壳形变等角度对这一问题做阐述。

2.1.1 黄陵背斜周边盆地及断裂活动的特征

1. 盆地

本区三叠纪以后整体抬升并脱离海侵,然后经历陆相拗陷、断陷阶段。晚三叠世至侏罗纪发育了两个拗陷盆地,分别分布在黄陵背斜的东西两侧。进入白垩纪,黄陵背斜周边的断裂开始发育,并控制了数个断陷盆地的形成:西有周坪地堑,南有天阳坪-宜昌地堑(宜昌地

① 国家地震局地球物理研究所,1990,《长江三峡工程三斗坪坝区地震危险性分析和地震动参数研究》。

② 国家地震局地球物理研究所、长江水利委员会三峡地震大队,1992,《兴山县城新址的地震稳定性评价报告》。

区可能为坳陷), 东有远安地堑。这些坳陷、断陷环绕黄陵背斜周边分布 (图 2-1), 可以推论当时的应力场是以黄陵背斜为核心指向四周的拉伸应力场。

2. 断裂展布及活动特征

黄陵背斜周边的断裂展布不同于区域展布的 NW 向、NNE 向断裂系统, 而具有环绕黄陵结晶核分布的特点 (见图 2-1)。综合有关资料^①, 黄陵背斜周边的断裂产出及活动特征如下:

新华断裂 位于黄陵背斜西北侧, NNE (20°) 走向, 倾向 NW。主期为左行正断层活动, 后受到逆冲活动的改造, 近期活动显示拉张兼顺扭。

仙女山断裂 位于黄陵背斜西偏南侧, NNW (340°) 走向, 倾向 SW。早期为正断层, 控制周坪断陷的西侧边界, 后经强烈的逆冲改造, 近期微弱活动显示拉张兼扭动。

九弯溪断裂 位于黄陵背斜西偏南侧, NNE (10°~15°) 走向, 向西倾。早期为正断层, 控制周坪断陷的东侧边界, 挽近期有过明显活动, 活动方式为拉张兼顺扭。

狮子口断裂带 位于黄陵背斜西翼南段, NNW 走向, 倾向西, 为一重力滑动构造带 (任建业, 1993), 形成于印支—燕山早期, 挽近期 (40~50 万年) 有过明显活动。

天阳坪断裂 位于黄陵背斜南侧, NW 走向, 倾向 SW, 早期为正断层, 控制了白垩纪断陷形成, 后期受到逆冲改造, 见古生界地层逆冲于白垩系红层之上。挽近期有过明显活动, 拉张兼顺扭占主要地位。

远安断裂带 位于黄陵背斜东侧, NNW 走向, 由相距十余公里的两断裂组成, 西断裂向东倾, 东断裂向西倾, 成地堑式构造, 控制了白垩系堆积。在白垩纪末到早第三纪, 断裂转化为逆冲性质, 远安地堑中的白垩系也伴随发育有 NNW 向的短轴褶皱。挽近期仍有较明显的活动, 并继承地堑式的活动趋势, 断层性质为正断层兼右旋。

板庙断裂 为黄陵背斜北端的弧形断裂, 向北倾, 倾角 35°~60°, 现保存的性质主要为逆断层, 但历史上也有正断、逆冲交替活动的踪迹。

这些断裂大都形成在燕山早期, 此前形成的秭归盆地及当阳盆地为坳陷性质, 其形成未受到断裂的影响, 白垩系盆地是在断裂的控制下形成的, 为断陷盆地的性质。断裂形成早期以正断层兼走滑为特征, 结合断裂环绕黄陵背斜分布、断面向外倾这样的几何特征, 可以推论黄陵背斜相对于周缘的隆升提供了形成的动力学背景。

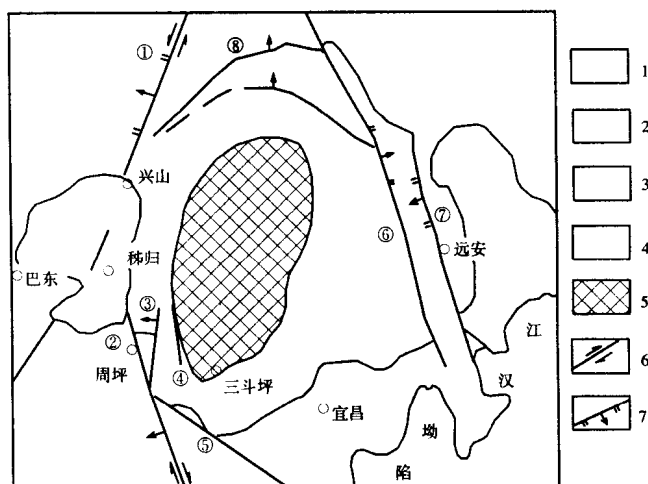


图 2-1 黄陵背斜及邻区构造略图

Fig. 2-1 Tectonic sketch in and near the Huangling anticline

1. 新生界盆地; 2. 白垩系盆地; 3. 侏罗系盆地; 4. 前侏罗系出露区;
5. 太古宇结晶岩系出露区; 6. 走滑断层; 7. 正断层; ①新华断裂;
- ②仙女山断裂; ③九弯溪断裂; ④狮子口断裂; ⑤天阳坪断裂; ⑥远安
- 西断裂; ⑦远安东断裂; ⑧板庙断裂

① 长江水利委员会勘测总队, 1990, 《长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究》。

进入喜马拉雅运动早期（晚白垩世—早第三纪），相对隆升作用趋于减弱，本区曾一度转为强烈的挤压状态，全区主压应力场 NEE—SWW 向（杨森楠，1996；湖北省地质矿产局，1990），断陷盆地被挤压逆冲改造，远安地堑中普遍见有 NNW 向的短轴褶皱。

挽近期以来，这些断裂仍有明显活动，活动特征又是以正断层为主兼走滑，且靠近黄陵地块一侧的岩盘多属上升盘（张众服，1996），这预示黄陵背斜的均衡隆升再次控制着本区的构造活动。

2.1.2 现代地壳均衡状态及垂直形变特征

前面论述了黄陵背斜及周缘的构造格局起因于黄陵背斜的隆升，而挽近期的活动仍受黄陵背斜隆升的控制。本节将利用地壳均衡状态及垂直形变资料进一步论证挽近期本区黄陵背斜相对隆升的活动格局。

1. 地壳均衡状态

从三峡地区重力均衡异常图（图 2-2），可以得出两点结论：

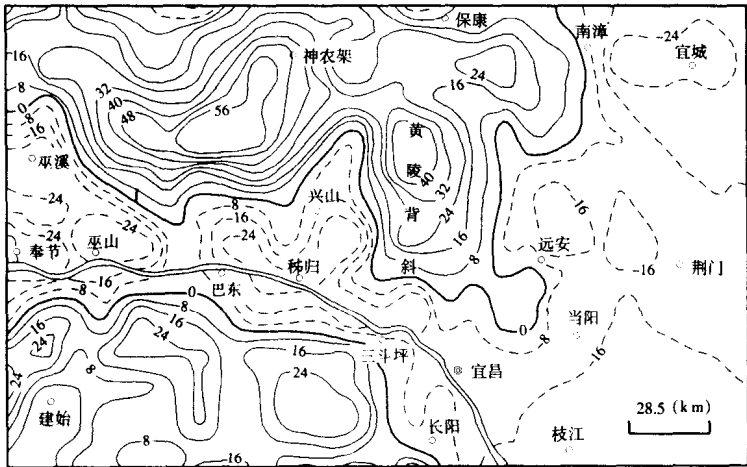


图 2-2 三峡地区均衡异常图

Fig. 2-2 Gravity anomaly in the Three Gorges area

（据陈步云，1994）

（1）长江三峡地区地壳处于均衡状态，平均均衡异常介于 $-32 \times 10^{-5} \sim +32 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 范围内，低于布格异常水平（ $-20 \times 10^{-5} \sim -120 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ）。

（2）均衡程度不均一，不仅存在正、负异常区的分异，而且正异常区内部也存在较大起伏。黄陵背斜所在的位置即为一较高的正异常区，在其西面、南面及东面都为负异常，北面虽为正异常，但也明显存在弧形的正异常低值槽。

前人（陈步云，1994；冯锐等，1988）已总结出，正异常区对应新构造运动的隆升区，负异常区对应新构造运动的沉降区，其异常的强度可以反映上升或下降的强度。因此，黄陵背斜相对于周边处于地壳进一步的均衡调整的上升区，但三峡区地壳总体处于均衡状态，黄陵背斜异常的幅度也不大，所以进一步均衡调整的幅度不大。

2. 地壳垂直形变

图 2-3 是虞廷林等 (1992) 根据 1952—1981 年间的精密水准测量资料编制的地壳垂直形变图, 由图可见, 黄陵背斜相对于秭归盆地和江汉盆地呈明显的上升状态, 黄陵背斜隆起的最大值约为 $+4.8\text{mm/a}$, 江汉盆地隆起多数为 $0\sim+2\text{mm/a}$, 而秭归盆地下降最大值为 -3.7mm/a , 黄陵背斜与秭归盆地之间最大升降幅度为 8.5mm/a 。李念军 (1991) 也同样认为, 黄陵背斜相对于周缘存在差异升降, 最大速率 $5\sim10\text{mm/a}$ 。

2.1.3 黄陵背斜邻近地区地震分布规律

以上从地质、地壳均衡状态及垂直形变分析, 一致反映出黄陵背斜处于相对隆升状态, 这一现象也得到黄陵背斜邻近地区地震分布规律的支持。

1. 震源深度

图 2-4 是根据人工地震测深资料得到的长江三峡奉节—观音当地质、地球物理综合解释剖面 (陈学波, 1992)。从该剖面上的地震分布看, 有明显的规律: ①黄陵背斜核心部位很少有地震, 地震分布在黄陵背斜核东西两侧; ②震源深度从黄陵背斜核边界处往外逐渐加深, 地震分布的下边界形态与黄陵结晶核的边界产状相关, 西侧边界产状较陡, 地震分布的内侧边界也较陡, 东侧边界产状较缓, 地震分布内侧界面也较缓。

由此可以分析, 黄陵背斜为一较完整的相对刚性的地质体, 所以内部较少有地震发生, 但

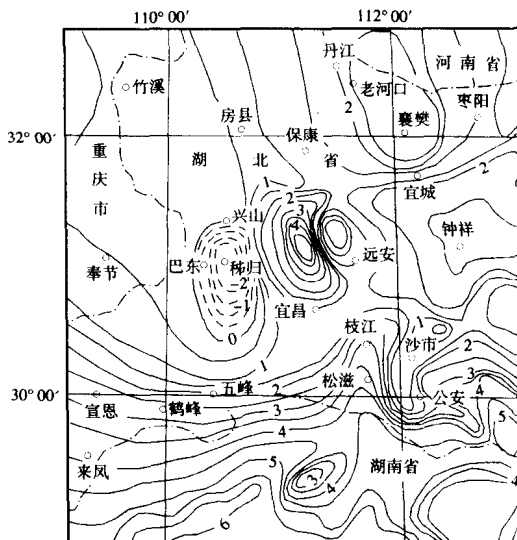


图 2-3 三峡地区地壳垂直形变图

Fig. 2-3 Vertical displacement of the crust surface in the Three Gorges area
(单位: mm/a , 据虞廷林等, 1992)

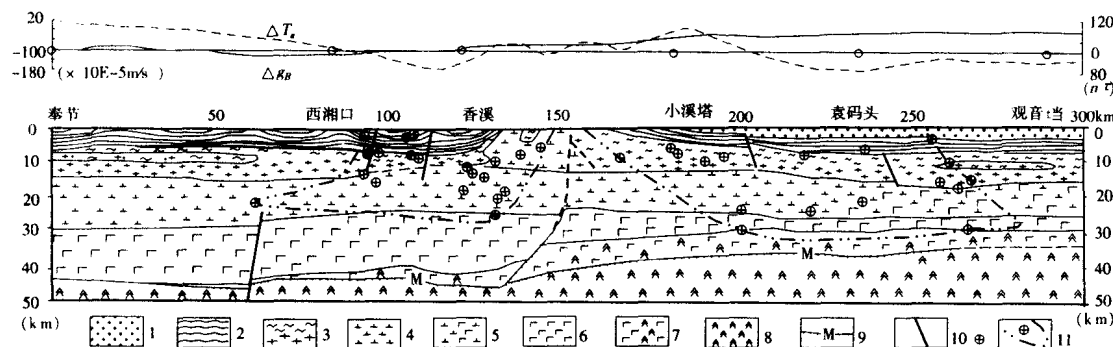


图 2-4 奉节—观音当地质、地球物理综合解释剖面图

Fig. 2-4 Synthetic interpretation of geophysics and geology of Fengjie-Guanyindang cross section
(据陈学波等, 1994 增改)

1. 陆相沉积岩层; 2. 海相沉积岩层; 3. 基底变质岩、花岗岩; 4. 闪长岩; 5. 辉长闪长岩; 6. 辉长岩;
7. 壳幔过渡层; 8. 铁镁质橄榄岩; 9. 莫霍界面; 10. 断层; 11. 地震及其分布的边界

由于黄陵背斜相对隆升，在与外侧相对下降区的界面附近存在较大的剪切应力，成为易震地带。

地震分布形态说明，黄陵结晶核往深部是变宽的，地震最深多落在中地壳，这与地震测深所反映的黄陵背斜隆起的根深入（发育）到中地壳下部的结果是吻合的（陈学波，1992；刘国昌，1993）。

2. 地震平面分布

图 2-5 是黄陵背斜周缘几十公里范围内能够给出震源机制的 10 次地震中 9 次地震的分布及机制图（1979 年至 1986 年内发生的地震）。这 9 次地震很有规律地分布在一个圆周上（高锡铭等，1994），黄陵背斜结晶核分布在圆周内。这些地震震源机制解所给出的主张应力方向大多呈以黄陵背斜为中心的辐射状分布。这种地震分布图像反映出黄陵背斜对现今地震的控制作用（黄陵背斜结晶核地表出露的范围并非在圆心的位置上，这可由结晶核的边界形态和产状的不对称来解释），而应力状态则再次印证了黄陵背斜的隆升作用。

通过前面的论述，可以归结出两点主要结论：①环绕黄陵背斜周边的地质构造，是中生代阶段黄陵背斜结晶核相对周边强烈隆升的结果；②挽近以来，黄陵背斜仍处于隆升状态，控制着邻近地区的构造及地震活动。

据此，可以认为，三峡坝区所在的黄陵结晶块体，因块体较为完整，虽处于相对隆升状态，仍然是较为稳定的地区，而黄陵结晶地块周缘地区，即上升与下降的过渡地带，因存在较大的差异运动，成为较活动的地带。从地壳深部看，巴东县城区仍处在这个带上。

§ 2.2 长江三峡库区滑坡与构造活动的关系

滑坡作为地壳表层的一种物质移动现象，是由内因和外因共同决定的。构造活动是一个重要的内在因素。构造活动可以表现在多个方面，如地壳的隆升、断层错动、地震等，它们都直接或间接地影响着滑坡的形成和发展。除地震外，人类的感官是觉察不到构造活动的，如断层的蠕滑、地壳的升降，但正因为它们缓慢的运动，应变能、势能在地壳局部得以积累，然后突然释放，出现地震、滑坡。Hutchinson (1988) 也认为，轻微的构造变形对坡面滑移也是一种重要的背景条件。

长江三峡经历了 40 余年系统的论证工作（长江水利委员会，1997），积累了大量的构造活动和滑坡的资料^{①②}。以往的工作多集中于滑坡点上的研究，而对三峡工程库区大量的滑

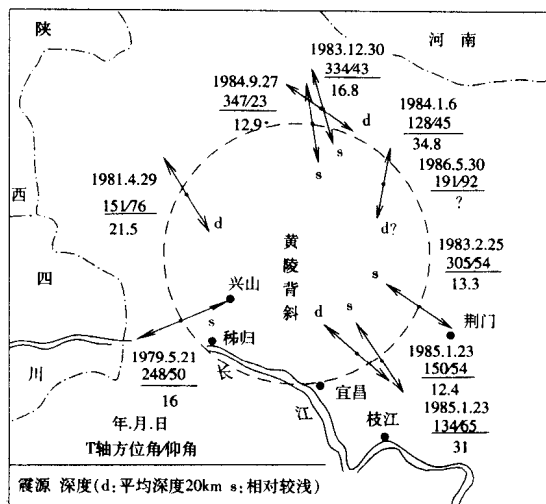


图 2-5 黄陵背斜地区地震机制及分布图

Fig. 2-5 Earthquake distribution and mechanism in and near the Huangling anticline

① 水利部长江流域规划办公室，1989，《长江三峡水利枢纽可行性研究专题报告》。

② 水利部长江水利委员会综合勘测局，1996，《长江三峡工程库区岸岸稳态及崩、滑体专论》。