

金沙江向家坝水电站
重大工程地质问题研究之三

高边坡变形破坏机制及稳定性评价

王士天 严 明 黄润秋 著

西南交通大学出版社

责任编辑：李太熙 杨 怡

ISBN 7-81022-675-4



ISBN 7-81022-675-4/P·016

定价：8.00元

9 787810 226752 >

赠书

金沙江向家坝水电站
重大工程地质问题研究之三

高边坡变形破坏机制及稳定性评价

王士天 严 明 黄润秋 著

本项研究获国家自然科学基金资助

西南交通大学出版社

(川)新登字 018 号

内 容 提 要

本书是国家自然科学基金课题“复杂岩体中高边坡稳定性系统工程地质研究”的研究成果之一。本书以金沙江上拟建的大型水电站——向家坝水电站为例,系统论述了一类特殊复杂环境条件下高边坡岩体的变形破坏机制及稳定性评价方法。尤其重点深入讨论了由于地壳浅表层应力释放所导致的高边坡变形破裂及其与高边坡稳定性的关系;地下采掘与坡体变形的关系等。介绍并提出了一套与之相关的研究技术手段及方法体系。本书成果对我国西南、西北地区大型水电工程建设具有一定的理论指导意义,其研究方法与技术手段具有推广价值。

书中采用了较多的新理论、新方法及新的测试研究技术,可供从事工程地质科研、设计、生产的科技人员参考,亦可供高等院校高年级本科生及研究生参考。

金沙江向家坝水电站重大工程地质问题研究之三 高边坡变形破坏机制及稳定性评价

王士天 严 明 黄润秋 著

责任编辑 李太熙 杨 怡

西南交通大学出版社出版发行

成都理工学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.5

字数: 185 千字 印数: 1—500 册

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-81022-675-4/P·016

定价: 8.00 元

目 录

绪 言	(1)
第一章 研究区的地质背景	(5)
1.1 地层岩性	(5)
1.2 地质构造及构造应力场的演化	(6)
1.2.1 地质构造特征	(6)
1.2.2 构造发展史及最新构造应力场特征	(12)
1.3 地貌及新构造运动	(14)
1.3.1 地貌	(14)
1.3.2 新构造运动及河谷发育史	(15)
1.3.3 地震	(16)
1.4 水文地质条件	(16)
第二章 高边坡岩体力学环境条件研究	(17)
2.1 边坡组成及形态特征	(17)
2.2 边坡岩体结构特征	(20)
2.2.1 原生软弱夹层及泥化夹层	(20)
2.2.2 构造结构面	(20)
2.2.3 岩体结构面分级	(25)
2.3 高边坡岩体力学特性	(25)
2.3.1 岩石变形特征	(25)
2.3.2 岩石强度特性	(28)
2.3.3 结构面力学特性	(30)
2.3.4 Ti^{-4} 泥岩流变力学特性的试验研究	(33)
2.4 高边坡应力的凯塞尔效应测试	(38)
2.4.1 基本原理	(38)
2.4.2 凯塞尔效应及其多期性的实验验证	(39)
2.4.3 边坡岩体应力的凯塞尔效应测试	(43)
第三章 高边坡岩体变形破坏的现象岩体力学研究	(50)
3.1 边坡已有变形破坏特征	(50)
3.1.1 坡顶后缘张裂	(50)
3.1.2 坡体深部张裂	(55)
3.1.3 断层 F_2 、 F_3 表生改造迹象	(59)
3.1.4 F_0 复合断裂结构面表生改造	(63)
3.1.5 层间滑移迹象	(64)

目 录

3.1.6 采掘沉陷变形迹象	(66)
3.2 边坡变形破坏组合模式	(69)
第四章 高边坡现今变形监测研究	(70)
4.1 水准测量	(70)
4.1.1 观测布置情况	(70)
4.1.2 观测结果分析	(71)
4.2 岩体声发射监测研究	(79)
4.2.1 岩体声发射监测的基本原理	(79)
4.2.2 监测及结果分析	(79)
4.3 岩体氦气— α 监测研究	(80)
4.3.1 岩体氦气— α 监测的基本原理	(80)
4.3.2 监测及结果分析	(81)
第五章 高边坡变形破坏机制研究	(83)
5.1 高边坡整体变形破坏机制研究	(83)
5.1.1 以往若干观点的评述	(83)
5.1.2 坝区应力场及边坡整体变形破坏机制的有限元反演分析	(83)
5.1.3 边坡整体变形破坏机制的离散元(DEM)模拟	(88)
5.1.4 边坡变形破坏机制的物理模拟	(92)
5.1.5 边坡变形破坏机制的综合论证	(95)
5.2 T_1 上部坡体变形破坏机制研究	(96)
5.2.1 T_1 上部坡体变形破坏机制的弹塑性有限元模拟	(96)
5.2.2 T_1 上部坡体变形破坏机制的综合论证	(104)
第六章 高边坡稳定性评价	(105)
6.1 高边坡整体稳定性评价	(105)
6.1.1 计算模型的确定	(105)
6.1.2 因素敏感性分析	(105)
6.1.3 稳定性计算及评价	(106)
6.2 T_1 上部坡体稳定性评价	(108)
6.2.1 计算模型的确定	(108)
6.2.2 因素敏感性分析	(109)
6.2.3 稳定性验算及评价	(110)
主要结论	(112)
致 谢	(113)
参考文献	(114)

绪 言

1. 工程概况及其勘察、研究现状

拟建的向家坝水电站属金沙江流域规划中最下游的一个梯级,库尾与溪落渡水电站尾水相接。坝段横跨川、滇两省,其左岸位于四川省屏山、宜宾县境内,右岸属云南省水富县管辖。坝段距下游宜宾市约 33km,距下游的水富县城仅 0.5~2km。

向家坝水电站控制流域面积 $45.88 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均流量 $4580 \text{ m}^3/\text{s}$,年径流量为 $1440 \times 10^8 \text{ m}^3$,水库正常蓄水位 +380m,总库容 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。大坝以混凝土重力坝及土石坝作为比选坝型。最大坝高 151m,总装机容量 $600 \times 10^4 \text{ kW}$,年发电量 $265.27 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。本电站工程以发电为主,兼有航运、灌溉和防洪等综合效益。因此,这一巨型水电枢纽的建成对推动攀西—六盘水开发区乃至西南地区的经济发展,以及实现“西电东送”,缓解东部地区的能源紧缺问题,均具有重要战略意义。

向家坝水电站的勘测工作自 1957 年开始到现在,大体可分为以下两个阶段:

第一阶段为规划选点阶段(1957—1960 年,1976—1980 年)。这一阶段先后由长办第四地勘队、四川省地质局水文地质工程地质大队及原水电部四川勘测设计处(简称:四川勘设处)进行勘察工作。在坝段内共勘探了六条坝线(原 I—VI 坝址)。1980 年 4 月,四川勘设处提交了《金沙江向家坝水电站规划选点阶段地质报告》。

第二阶段为可行性研究阶段(1980 年到现在)。在这一阶段中先由武警水电独立支队承担勘测工作,于 1986 年 3 月编写了《金沙江向家坝水电站可行性研究阶段(中间)地质报告》。1986 年,能源部水利部中南勘测设计院(简称:中南院)接手继续进行可行性研究,于 1989 年 3 月编写了《金沙江向家坝水电站坝址比选工程地质勘察报告(可行性研究阶段)》。目前,勘测工作仍在继续进行。

2. 课题的由来及其研究意义

马步坎高边坡位于龙仓溪一大滩坝峡谷左岸。距上游 III 坝址 3.5km,距下游 VII 坝址 2.5km。边坡陡峭,坡高达 600 余米(照片 1)。边坡上游侧为 F_2 断层切割,下游侧有 F_0 断裂结构面通过,底部有 T_1^{-4} 含泥化夹层泥岩作为软垫层。边坡后缘出现有长达 500 余米,宽 7~28m 的拉裂带;拉裂带内,裂缝宽度个别达 0.97m。经勘探平硐揭露,坡体深部也有拉裂带存在。

被上述结构面所分割的坡体,方量达 6000 余万方。如果这部分坡体整体失稳,则对上游的 III 坝址而言,将会堵塞尾水,淹没地下厂房;对下游 VII 坝址而言,将会产生巨大的涌浪,直接危及坝体安全。即使发生局部小规模崩塌,也将会使水电站的施工乃至运营产生一定的影响。因此,马步坎高边坡稳定性如何?直接制约着坝址比选及向家坝水电站工程的可行性。

鉴于上述原因,1990 年 4 月,在向家坝水电站工程地质技术讨论会上,专家们一致建议:“对马步坎高边坡应及时制订一个全面、系统的研究计划,并尽快实施。”同年 8 月,中南院正式委托成都地质学院(现名:成都理工学院)工程地质研究所进行“金沙江向家坝水电站马步坎高边坡稳定性研究”的科研工作。



照片1 马步坎高边坡全景

马步坎高边坡稳定性问题,在电站勘测早期便引起了人们的注意,曾陆续作过一些专项研究,主要包括:

(1) 1986年,中南院接手可行性研究工作后,立即将马步坎高边坡稳定性问题作为向家坝水电站主要工程地质问题之一,布置了大量勘测工作,并于1989年10月,完成了《马步坎高边坡稳定性工程地质评价报告》。

(2) 1989年3月,武汉水利电力学院对马步坎高边坡进行了粘弹塑性有限元分析,并于同年12月提交了《马步坎高边坡稳定性研究》报告。该报告采用粘弹塑性有限元分析了边坡应力、变形及稳定条件,并用弹塑性随机有限元方法计算了边坡的局部破坏概率,进而推求其整体稳定可靠度。

(3) 1989年11月,国家地震局地质所运用偏光显微镜、扫描电镜(SEM)、电子自旋共振(ESR)测年及热释光(TL)测年等现代测试技术,对马步坎高边坡 F_2 、 F_3 、 F_4 及 F_5 断层最新活动年龄,断层运动时的应力、应变速率、运动方式等开展了显微构造研究,并于1990年3月提交了《马步坎高边坡断裂带稳定性研究报告》。

(4) 1990年11月,中南院完成了《马步坎高边坡稳定性平面非线性有限元计算及结构力学计算分析》。报告采用平面非线性有限元法对马步坎高边坡的应力、位移进行了计算。并用刚体法对边坡进行了抗滑、抗震分析。

总的看来,尽管上述诸项研究均取得了一定的有意义的成果,但是,也仍然存在不少问题。这些问题概括起来是:

1) 缺少从基础地质、岩体力学环境条件、边坡变形破坏机制到稳定性评价预测的系统性研究。

2) 以往研究将边坡稳定性研究局限于稳定性计算,忽略了对边坡赋存的区域地质——岩体力学环境条件研究,尤其是应力场环境条件的研究。

3) 对边坡结构的认识存在着问题。过去一直将 F_2 断层作为边坡西部边界, F_5 断层作为边坡东部边界, 将 T_3^{-1} 底部的煤层作为边坡底部统一软垫层。

4) 关于边坡变形破坏现象及组合模式的认识, 过去仅仅注意到了边坡后缘的拉裂变形, 忽视了对边坡西部边界结构面 F_2 断层错动变形及边坡底部软层滑移迹象的研究, 因而未能概括出正确的边坡变形破坏整体组合模式。

5) 对边坡变形破坏机制的认识, 以往曾提出: 重力蠕滑、纵张及山体采掘机制。这些机制均不能很好地解释现今边坡变形破坏迹象。

6) 关于稳定性计算模型, 以往的计算中, 一直认为 T_3^{-1} 底部煤层缓倾坡外, 为边坡底部统一软层; 并认为边坡后缘有 F_2 断层切割, 这种认识是不符合实际的。

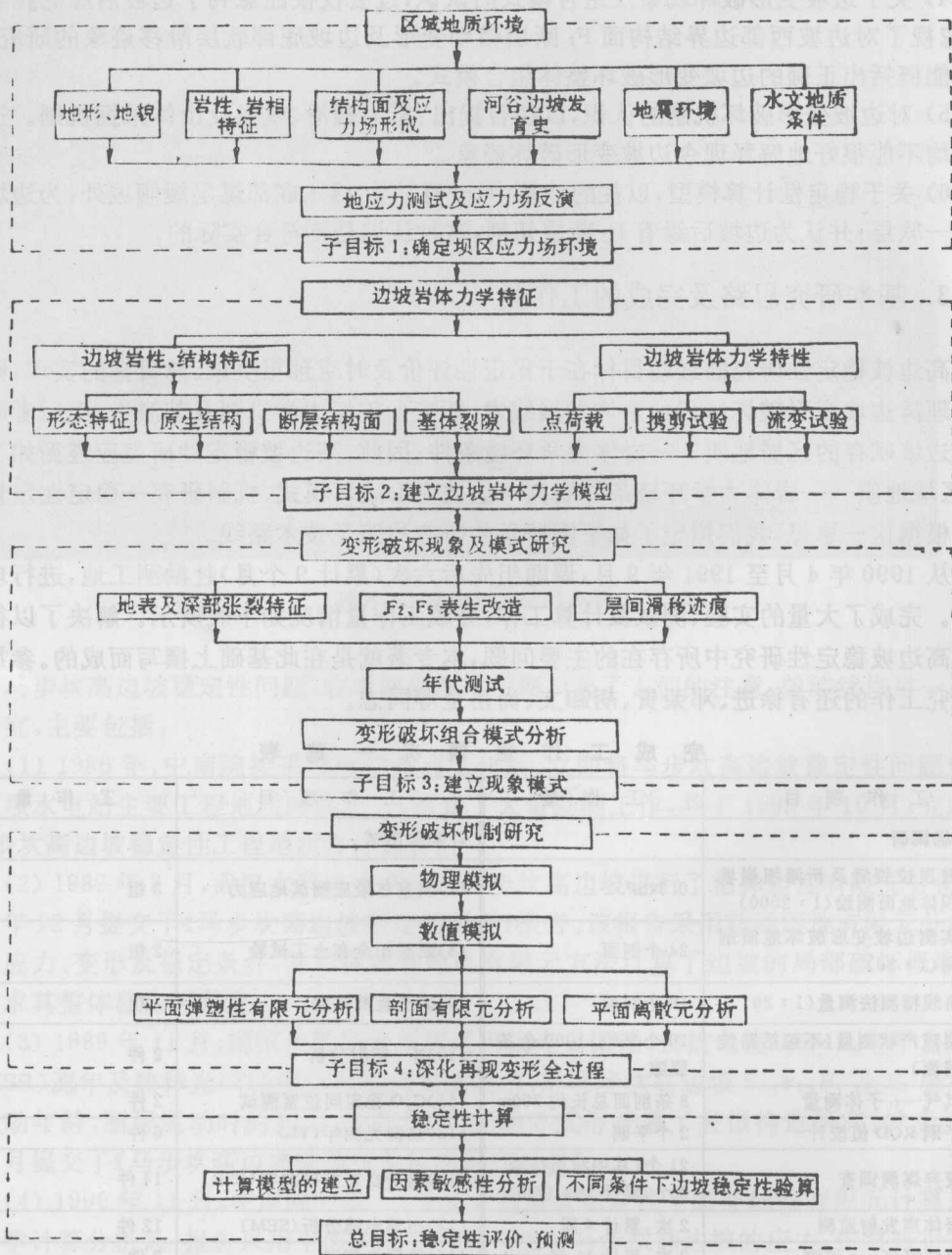
3. 基本研究思路及完成的工作量

高边坡稳定性研究的最终目标在于稳定性评价及时空预报决策。总目标的实现, 则取决于理清边坡变形破坏过程的整体发展线索, 即变形破坏力学机制及其演进。而后者则受控于边坡赋存的区域地质——岩体力学环境条件。因此, 高边坡稳定性研究应遵循如下途径: 区域地质——岩体力学环境条件研究→边坡变形破坏模式、机制研究→稳定性定量评价。根据这一思想, 我们拟定了如下图所示的研究思路及技术路线。

从 1990 年 4 月至 1991 年 9 月, 课题组先后六次(累计 9 个月)赴勘测工地, 进行现场调研。完成了大量的实验、测试及计算工作, 完成工作量情况如下表所示。解决了以往马步坎高边坡稳定性研究中所存在的主要问题, 本专著就是在此基础上撰写而成的。参加本项研究工作的还有徐进、邓荣贵、胡卸文、尚岳全等同志。

完成工作量情况一览表

工 作 项 目	工 作 量	工 作 项 目	工 作 量
1. 现场调研		2. 实验测试	
(1) 坡顶拉裂缝及新滩崩塌堆积体地面测绘(1: 2000)	0. 3km ²	(7) 凯塞尔效应测试地应力	3 组
(2) 实测边坡变形破坏地质剖面(1: 20)	24 个剖面	(8) 断层泥全套土工试验	2 组
(3) 路线精测法测量(1: 20)	19 个剖面	(9) 矿渣直剪试验	1 组
(4) 裂隙产状测量(不包括路线精测)	10 个平硐, 1000 余条裂隙	(10) X—衍射分析	2 件
(5) 氦气— α 子体测量	8 条剖面总长约 700m	(11) C、O 稳定同位素测试	2 件
(6) 平硐 RQD 值统计	2 个平硐	(12) 热释光测年(TL)	6 件
(7) 废弃煤洞调查	21 个(其中测量煤洞 6 个, 累计 193.05m)	(13) 电子自旋共振测年(ESR)	14 件
(8) 岩体声发射监测	2 次, 累计 6 周	(14) 扫描电镜分析(SEM)	12 件
(9) 岩体氦气— α 监测	2 次, 累计 11 周	(15) 热释光测温	2 件
2. 实验测试		(16) 薄片鉴定	12 片
(1) 现场携剪试验	17 组	3. 物理模拟	1 个模型
(2) 现场点荷载试验	148 组, 每组 10 块	4. 数值计算	
(3) 常规压缩试验	5 组	(1) 坝区平面弹塑性有限元计算	1 个模型(2 种方案)
(4) 常规三轴试验	4 组	(2) 坝区平面离散元计算	1 个模型(2 种方案)
(5) 单轴应力—应变全过程试验	4 组	(3) T_3 上部山体有限元计算	1 个模型
(6) 泥岩流变试验	2 组		



研究技术路线及主要内容示意图

第一章 研究区的地质背景

1.1 地层岩性

研究区除西部分布有少量二叠系地层外,主要为中生代地层,第四系只零星分布。由老至新各地层的岩性特征、厚度列于表 1-1。

表 1-1

研究区地层岩性简表

系	统	组	代号	厚度	岩性特征	备注
第四系	全新统		Q ₄		河流冲洪积物、残坡积物、崩坡积物	
	上更新统	江北砾石层	Q _c	10	灰、褐灰色砾石层夹含砂砾粘土层。砾石成分以砂岩为主,灰岩、玄武岩、安山岩少数	
		冰水堆积	Q _s		褐色、棕黄色砂质粘土及砾石	
	中更新统	雅安砾石层	Q _y		砾石成分以石英岩、砂岩为主,次为玄武岩、灰岩	
		冰碛冰水积	Q ₂		棕黄、棕红色砂质粘土及砾石,下部见岩屑砂夹块石及漂砾	
白垩系	嘉定群		K ₁	154~588	砖红色厚至巨厚层状长石石英细砂岩夹粉砂岩及泥岩、页岩	
侏罗系	上统	蓬莱镇组	J _{3p}	165~393	棕红色、紫红色砂质泥岩夹粉砂岩及紫灰色含长石石英粗砂岩,中上部薄层油页岩,底部细砂岩	
	中统	遂宁组	J _{2su}	204~457	一套鲜红色、棕红色泥岩、砂质泥岩夹粉砂岩,底部有一层砖红色含长石石英砂岩	
		上沙溪庙	J _{2s}	564~870	下部,灰紫色细粒长石石英砂岩、粉砂岩、砂质泥岩不等厚互层;上部,紫红色钙质泥岩;顶部,大量钙质结核;底部,中细粒长石石英砂岩	
		下沙溪庙	J _{2x}	94~230	紫红色砂质泥岩与紫灰色含长石石英(细)砂岩、泥质细砂岩呈不等厚互层	
	下统	自流井	J ₁	202~286	紫红色砂质泥岩夹粉砂岩、钙质粉砂岩及少量细砂岩;底部:	
			J _{2x}		紫红色泥岩或粉砂岩	
三叠系	上统	须家河	T _{3xj}	480~670	底部以紫红色粘土岩或砾岩与 T _{2f} 假整合接触。下部,灰色厚层状粗一中粒长石石英砂岩、粉砂岩夹泥岩及页岩。中部,黄灰色巨厚层状细一中粒长石石英砂岩夹泥质粉砂岩及少量页岩。上部,深灰厚层状粉至细砂岩夹炭质页岩及薄煤层	假整合
	中统	雷口坡	T _{2L}	247~301	灰绿色水云母粘土岩。下部为白云质灰岩及页岩夹粉砂岩。上部为深灰色灰岩、泥质灰岩为主夹白云岩及角砾状灰岩	
	下统	嘉陵江	T _{1j}	192	上部,角砾状灰岩与白云岩互层。顶部,为硅质白云岩。中部,灰色白云岩、灰岩。下部,黄灰色泥质灰岩、生物碎屑灰岩	
		铜街子	T _{1t}	60~147	上部,紫红色,黄绿色砂质泥岩、页岩。下部,灰~灰绿中厚层泥质灰岩、灰岩与紫红色页岩夹细砂岩	
		飞仙关	T _{1f}	234~392	上部,紫红色泥质粉砂岩、页岩。中部,见层间细砾岩。下部,紫红色岩屑砂岩夹紫红色粉砂岩及砂质泥岩	
二叠系	上统	乐平	P ₁	100~163.5	上部,黄绿色、灰绿色岩屑砂岩。中部,含泥砾岩屑砂岩。底部,砾岩、页岩、粉砂岩与 P _{2b} 呈假整合接触	假整合
		峨眉山玄武岩	P _{2b}	160~341	暗灰色至灰黑色致密状、斑状、杏仁状及气孔状玄武岩。底见灰黑色铁质泥岩,与下伏 P _{1m} 呈假整合接触	假整合
	下统	茅口	P _{1m}	187~253	块状灰岩为主,上部见中厚层状炭质、泥砂质灰岩夹层,顶面起伏不平,见风化壳及冲刷现象	
		栖霞	P _{1q}	219~352	上部,灰至灰黑含燧石团块、条带灰岩。下部,灰至灰黑厚层状含炭质生物碎屑灰岩及厚层状灰岩。底部,含砂泥质灰岩	
		梁山	P _{1L}	1~2	砂质粘土岩、粉砂岩及炭质页岩	

为了揭示须家河组(T_{3xj})地层的总体相变规律,这里对表 1-1 中须家河组(T_{3xj})的特

征给予详细描述:

须家河组(T_{3xj})为河湖沼泽相的含煤建造。岩性以中、细砂岩为主,含粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、炭质页岩及煤层。总厚度 686m。自下而上按岩性可分为四个大层:

T_3^1 : 分布高程低,一般在河床覆盖层之下,仅在坝区中、上游河段的两岸有零星出露。为浅湖相—沼泽相沉积。岩性以灰白色中、厚层中—细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩为主,夹少量炭质页岩及煤线。底部以 0~5.5m 厚的砂砾岩或粗砂岩假整合于雷口坡组(T_{2r})之上。接触面凹凸不平,常见有黄铁矿结核。厚 90~110m。

T_3^2 : 分布于河床两岸,构成峡谷两岸高达 100~200m 的悬崖陡壁,为滨湖相—浅湖相沉积。岩性以灰黑色、灰白色厚—巨厚层粗—中砂岩为主,夹少量薄层或透镜体状泥质粉砂岩、砂质泥岩、炭质泥岩及煤线。厚度 312~334m。

T_3^3 : 出露在峡谷中段,高程在 520~570m 以上。地貌上构成缓坡地形,为浅湖相—沼泽相沉积。其岩性以黄绿、灰白色中—厚层粉砂岩为主,夹泥岩、页岩、炭质泥岩及薄煤层。厚度 77~110m。

T_3^4 : 出露在峡谷上段,高程在 600~750m,地貌上构成悬崖陡壁,为滨湖相—浅湖相沉积。上部岩性为灰白色厚层中—粗粒硅质石英砂岩;中部为灰褐色中—厚层细、粉砂岩互层,夹泥岩、页岩、炭质泥岩;下部为灰白色厚层中—细砂岩。厚度 80~132m。

从上面的描述中可以看出:随着时代由老至新,即 $T_3^1 \rightarrow T_3^2 \rightarrow T_3^3 \rightarrow T_3^4$,岩相呈交替变化趋势,即浅湖相—沼泽相→滨湖—浅湖相→浅湖相→滨湖相的相变韵律,粒度由细颗粒→粗颗粒→细颗粒→粗颗粒;水动力条件则由低能环境→高能环境→低能环境→高能环境。因此, T_3^1 、 T_3^3 地层中较细的沉积(如粉砂质泥岩、泥岩、煤等)分布较广泛,而且厚度较稳定,而 T_3^2 、 T_3^4 地层中则以粗颗粒的沉积为主。

1.2 地质构造及构造应力场的演化

1.2.1 地质构造特征

坝段位于四川内陆盆地盖层褶皱滑脱构造区西南缘。该构造区东南侧以华蓥山基底断裂带为界,与川黔内陆盆地盖层褶皱滑脱构造区毗邻,西南侧以曲靖—昭通—马边南北向基底断裂带为界,与凉山—峨眉内陆盆地褶皱冲断构造区接壤。

研究区内构造形迹以褶皱、断裂为主,构造线方向主体呈 NE 向及 NW 向。

1.2.1.1 褶皱

研究区内分布的背、向斜及其简要特征见表 1—2。从表 1—2 及图 1—1 可以看出:研究区西北部、东南部因分属于不同的大地构造单元,其褶皱构造显示出明显差异:①研究

表 1—2 研究区褶皱一览表

褶皱名称	序号	轴 向	两翼倾角 (°)	长 度 (km)	出 露 地 层	
					轴 部	翼 部
五角堡背斜	2	N30—40°E	NW 翼 8~10 SE 翼 60	20	P	T—J
老鹰咀向斜	3	N40—50°E	NW 翼 12~29 SE 翼 14~35	>30	K _j	J
青杠坪背斜	4	N55°E	NW 翼 3~7 SE 翼 3~8	16	J _{3p}	K _{1w} —K _{1d}
大塔场背斜	5	N45°E	NW 翼 5~10 SE 翼 3~6	15	J _{2s} _n	J _{3p} —K _{1d}
贾村背斜	7	N50°E	NW 翼 30~50 SE 翼 36~60	84	S—T ₁	P ₁ —J _{2s} ²

续表 1—2

褶皱名称	序号	轴 向	两翼倾角 (°)	长 度 (km)	出 露 地 层	
					轴 部	翼 部
符江向斜	9	N50°E	NW翼 8~58 SE翼 10~55	>40	J _{2s} _B	T ₃ —T ₂
莱复渡向斜	10	N50°E	NW翼 50 SE翼 60	>30	J—K	T ₃ —J _{2s}
南广双河背斜	11	N40—45°E	NW翼 35~80 SE翼 20~80	>50	T ₁ —T ₃	J ₁ —J _{2s} ²
宜宾背斜	12	N40—50°E	NW翼 25~50 SE翼 30~40	30	T _{3xj}	J _{2z} —J _{2s} ²
天官堂背斜	1	N50°W	NW翼 45~50 SE翼 8~10	30	T _{3xj} —T _{2t}	J _{2z} —J _{2s} ²
长宁双河背斜	8	NE 转 NW	N翼 40~68 S翼 15~30	>50	←—P	S、T ₃ 、J _{2z}
糖房湾背斜	6	西段 N60°E 东段 N35°W	两翼 10~20	7.5	T ₂ 、T ₃	J ₁ —2z

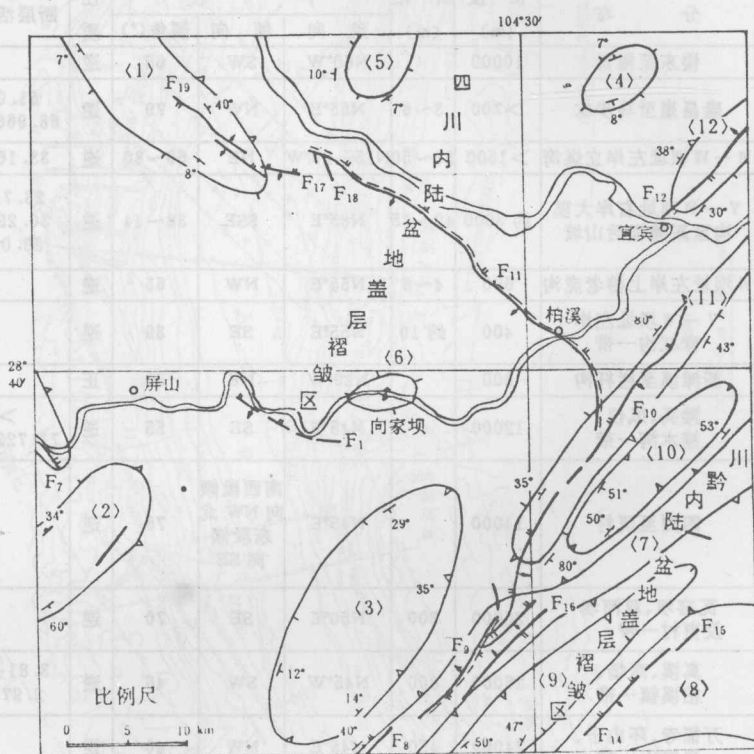


图 例



图 1—1 构造纲要图

1. 低缓倾角背斜; 2. 中等倾角背斜; 3. 非对称背斜; 4. 高陡倾角背斜;
5. 低缓倾角向斜; 6. 中等倾角向斜; 7. 非对称向斜; 8. 高陡倾角向斜;
9. 壳型断层; 10. 盖层断层; 11. 背、向斜编号

区西北部,属四川内陆盆地盖层褶皱滑脱区。褶皱平缓宽阔,一般呈短轴状背向斜,主要有天官堂背斜(1)、五角堡背斜(2)、老鹰咀向斜(3)、青杠枰背斜(4)、大塔场背斜(5)等。轴向集中分布于两个方向:N30°—55°E和N50°W;在坝段则略有偏转,糖房湾背斜西段轴向

N60°E 左右,东段轴向 N35°W 左右。②研究区东南部属川黔内陆盆地盖层褶皱滑脱构造区,褶皱轴向主要为 N40°—50°E。背斜一般窄而陡,向斜则宽而缓,两者构成隔挡式褶皱,如贾村背斜(7)、南广—双河背斜(11)、宜宾背斜(12)、符江向斜(9)、莱复渡向斜(10)等。

坝区褶皱构造为糖房湾背斜(图 1—2)。该背斜位于金沙江的龙仓溪—大滩坝峡谷地段。总体呈短轴状或穹窿状,东西长约 7.5km,南北宽 2.5km。背斜轴呈向北凸出的弧形,其西段轴向 N60°E,东段轴向 N35°W 左右。背斜核部出露三叠系中统(T₂)、上统(T₃)地层,翼部则为侏罗系自流井组(J_{1-2z})地层。两翼近于对称,且产状平缓,其中北翼倾角 5°~15°,南翼倾角 3°~12°,轴面近于直立或陡倾南,东西倾伏端岩层产状明显不对称,其中东倾伏端岩层陡立,且较为破碎,西倾伏端岩层则较平缓,且较为完整(图 1—2)。

1.2.1.2 断层及其新活动性

研究区内分布的断层及其特征列于表 1—3 中。

表 1—3 研究区断层一览表

断层名称	代号	分 布	长 度 (m)	断 距 (m)	产 状			性 质	断层活动年代(万年)
					走 向	倾 向	倾角(°)		
楼东断层	F ₁	楼东至福延	10000		N60°W	SW	65	逆	
马步坎断层	F ₂	隆昌崖至马步坎	>700	3~6	N55°E	NW	79	逆	51.0±5%(ESR) 68.966±10.345(TL)
立煤湾断层	F ₃	Ⅴ—Ⅵ坝址左岸立煤湾	>1500	30~50	N15—20°W	NE	60~80	逆	33.16±9.95(ESR)
大溪沟断层	F ₄	Ⅴ—Ⅵ坝址右岸大溪沟至新滩坝后山坡	约 3000	40~75	N85°E	SSE	38~44	逆	28.71±8.6(ESR) 30.29±9.08(ESR) 36.05±2.70(TL)
老虎沟断层	F ₅	Ⅵ坝址左岸上游老虎沟	600	4~6	N55°E	NW	65	逆	
青杠沟断层	F ₆	Ⅴ—Ⅵ坝址左岸青杠沟一带	400	约 10	N55°E	SE	39	逆	
海湾滩断层	F ₇	新滩溪至栏杆沟	800		N20°W	NE	50	正	
凤仪断层*	F ₈	滩头、凤仪、楠木湾一带	12000		N45°E	SE	55	逆	>100(ESR) 77.722±15.544(TL)
四烈断层*	F ₉	四烈至贾村	14000		N45°E	南西段倾向 NW 北东段倾向 SE	75	逆	
福建山断层*	F ₁₀	瓦窑坝、双河场及贾村一带	26000	300	N50°E	SE	70	逆	
柏树溪断层*	F ₁₁	真溪、高场、柏溪镇一带	26000	800	N45°W	SW	45	逆	3.81±2.5%(ESR) 2.97±0.594(TL)
观斗山断层*	F ₁₂	万福寺、环山子、翠屏山一带	24000	450	N45°E	NW	40	逆	
毛桥断层	F ₁₃	杉木岩、黄沙沟、大王咀一带	28000		N65°W	NE	60	逆	
芭蕉断层	F ₁₄	高县西北 2km	7000		N50°E	SE	78	逆	
郎平断层	F ₁₅	高县东北 6km	6000		N55°E	SE	60*	正	
大华村断层	F ₁₆	王么田至马道子一带	9000		N50°E	NW	65	逆	
真溪断层	F ₁₇	真溪西南 2km	2500		N30°W	NE	55	逆	
双河口断层	F ₁₈	石板滩至双河口一带	6800		N50°W	SW	61	逆	
水泥坝断层	F ₁₉	龙鼻子、观音岩一带	6800		N50°W	SW	61	逆	
	f ₁₁	PD22* 硐深 87m 处			N69°E	NW	80		36.72(ESR) 38.6(TL)

注:①* 为基底断层,其余为盖层断层;②ESR 为电子自旋共振测年,TL 为热释光测年。

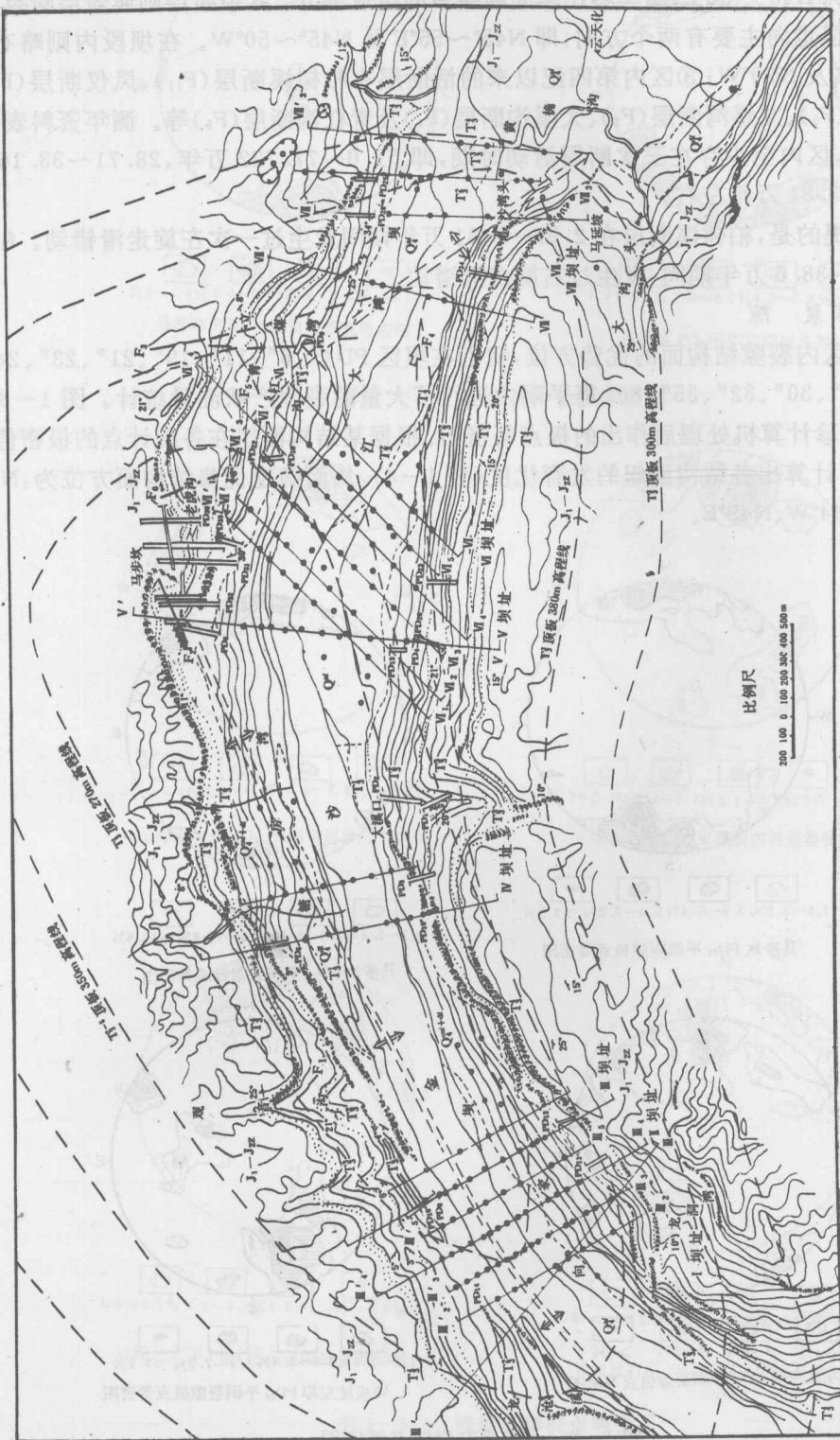


图 1—2 研究区工程地质略图

1. 探槽; 2. 层位界线; 3. 小路; 4. 产状; 5. 构造界线; 6. 背斜轴线; 7. 逆断层; 8. 正断层;
9. 推测断层; 10. 等高线; 11. 滑、崩; 12. 陡崖; 13. 平硐; 14. 钻孔; 15. 坝线

从表 1—3 可以看出：①区内基底断裂有凤仪断层(F_8)、四烈断层(F_9)、福建山断层(F_{10})、观斗山断层(F_{12})及柏树溪断层(F_{11})。其中凤仪、四烈、福建山、观斗山断层构成的断裂带总体走向 $N45^\circ\sim 50^\circ E$ ，属华蓥山基底断裂带的组成部分。其余断层则属盖层断裂；②区内压性断层走向主要有两个方向，即 $N45^\circ\sim 55^\circ E$ 及 $N45^\circ\sim 50^\circ W$ 。在坝段内则略有偏转，为 $N55^\circ E$ 及 $N20^\circ W$ ；③区内第四纪以来的活断层有柏树溪断层(F_{11})、凤仪断层(F_8)、马步坎断层(F_2)、立煤湾断层(F_3)、大溪沟断层(F_4)及青杠沟断层(F_6)等。测年资料表明，第四纪以来，区内至少存在三次断层活动时期，即 51.0~77.722 万年，28.71~33.16 万年及 2.97~3.81 万年左右。

值得一提的是，柏树溪断层在 2.97~3.81 万年期间发生过一次左旋走滑错动。 f_{11} 断层在 36.72~38.6 万年期间，发生过右旋走滑错动。

1.2.1.3 裂隙

为确定区内裂隙结构面的优势方位，我们在坝区 PD4[#]、6[#]、11[#]、19[#]、21[#]、23[#]、24[#]、25[#]、27[#]、28[#]、30[#]、32[#]、35[#]、36[#] 等平硐内进行了大量的裂隙产状测量统计。图 1—3 为 PC—1500 袖珍计算机处理后作出的极点等密图。根据某结构面组在各统计点的极密值及出现的次数，计算出各结构面组的发育优度(表 1—4)，从而确定优势结构面方位为： $N80^\circ E$ 、 $N73^\circ W$ 、 $N44^\circ W$ 、 $N49^\circ E$ 。

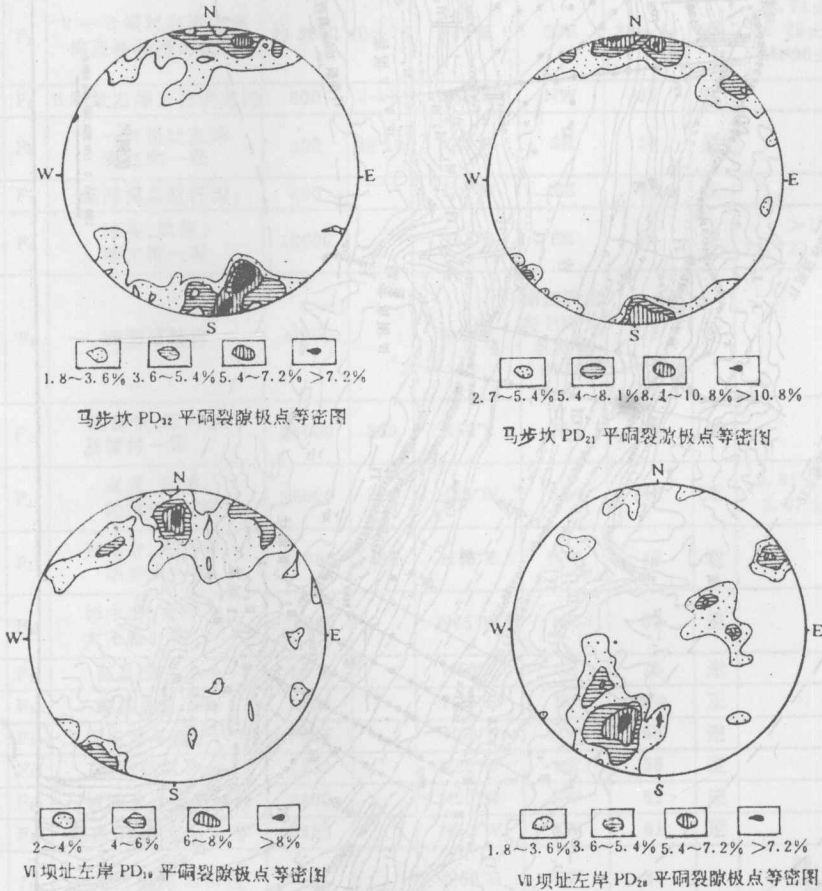


图 1—3 a 坝段左岸极点等密图

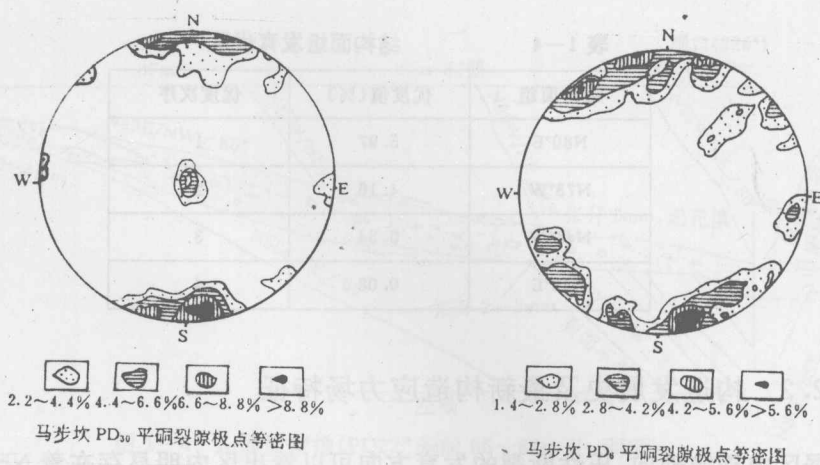


图 1-3 a 坝段左岸极点等密图

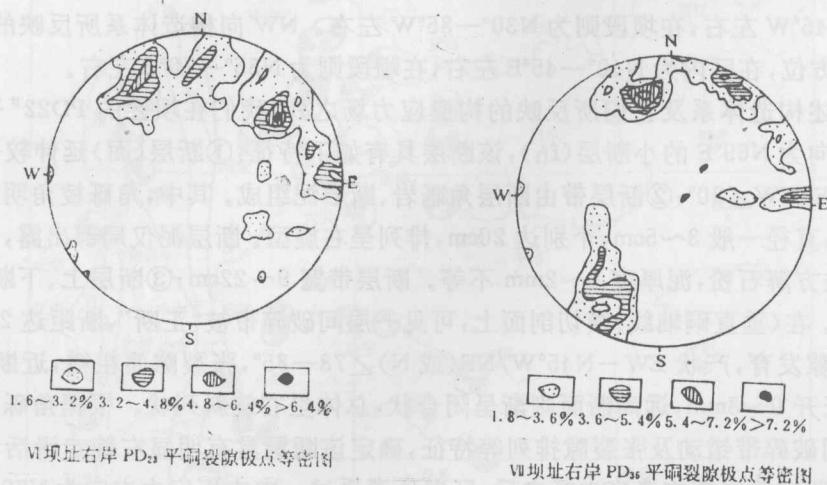
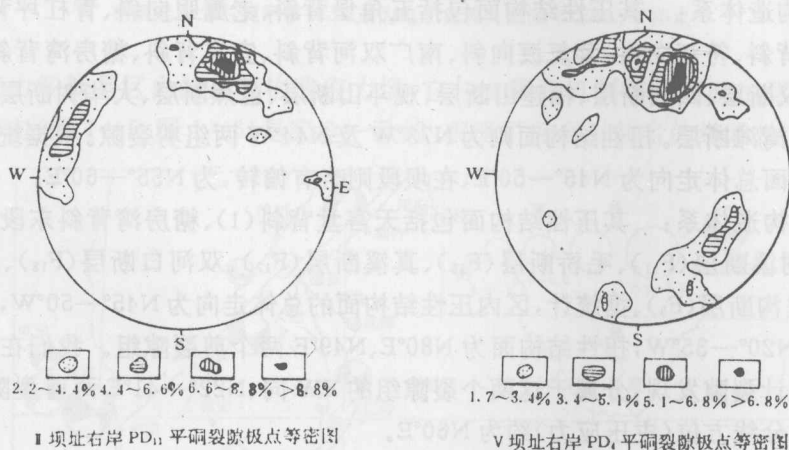


图 1-3 b 坝段右岸极点等密图