

# 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制

李 晓, 李守定, 陈 剑, 廖秋林

(中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 以三峡水电工程库区大型山体滑坡为研究对象, 从三个方面研究地质灾害形成的内外动力耦合作用机制:

(1) 通过对大量古滑坡的空间分布特征和发育时间的研究, 寻求滑坡时空分布的控制因素, 揭示滑坡发育演化与地球内外动力耦合作用的关系; (2) 通过对大型基岩滑坡滑带发育演化过程的研究, 提出滑带形成演化的典型四阶段模式及其内外动力耦合作用机制; (3) 以三峡库区千将坪滑坡为例, 通过对泥化夹层和滑带结构的精细地质分析和测试, 重建滑带形成演化过程, 研究千将坪滑坡发育及滑带形成的内外动力耦合作用机制。研究表明, 新构造运动和第四纪气候变化的耦合作用是三峡库区发育多期大型古滑坡的主要动因; 层间剪切作用和水岩相互作用的耦合是基岩滑坡滑带形成演化的主控因素; 应重视三峡库区新生滑坡的研究, 特别是对重点地层的层间剪切带地质力学特性的研究, 将是发现和预测新滑坡的重要途径之一。

**关键词:** 工程地质; 地质灾害成因; 地球内外动力; 耦合作用; 滑坡; 三峡工程

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)09 - 1792 - 15

## COUPLING EFFECT MECHANISM OF ENDOGENIC AND EXOGENIC GEOLOGICAL PROCESSES OF GEOLOGICAL HAZARDS EVOLUTION

LI Xiao, LI Shouding, CHEN Jian, LIAO Qiulin

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Focused on the large-scale landslide hazards in the Three Gorges Project(TGP) reservoir area, coupling mechanism of the endogenic and exogenic geological processes of geological hazard is studied. The following three aspects are examined. (1) By analysing the landslide space-time distribution characters and its control factors, the relations between the landslide formation and the Earth's endogenic-exogenic geological processes are illustrated. (2) Slipping zones are the control factor of rock slide development. Based on the study of sedimentary formation, tectonic evolution and earth's exogenic geological process, four-phase patterns of slipping zone formation and evolution are put forward; and the coupling mechanism of the Earth's endogenic-exogenic geological processes is explained. (3) Qianjiangping Landslide is the first rock slide after impounding of TGP. Through the fine description and test on the slipping zone and interbedded shear zone, slipping zone formation process of Qianjiangping Landslide is rebuilt. The effect of the endogenic-exogenic geological processes on slipping zone formation is studied. The conclusions are shown as follows: (1) the coupling of neotectonic movement(intense tectonic up and river downcutting) and Quaternary climatic change(intense rainfall) is the main

**收稿日期:** 2008 - 05 - 14; **修回日期:** 2008 - 08 - 10

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702); 国家自然科学基金资助项目(40702052); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC3 - SW - L1, KZCX2 - YW - 109)

**作者简介:** 李 晓(1961 - ), 男, 博士, 1982年毕业于中国矿业大学建筑工程系矿山建设工程专业, 现任副研究员, 主要从事岩石力学与地质灾害方面的研究工作。E-mail: lix620@263.net

dynamic factor of many large-scale landslides development in TGP reservoir area; (2) the coupling of interbedded shear effect and water-rock interaction is the control factor of slipping zone formation in rock sliding; and (3) it is of great importance to study the neonatal landslide in TGP reservoir area. The geomechanical study on interbedded shear zone in easy-slipping strata is helpful to discover and forecast neonatal landslides.

**Key words:** engineering geology; geological hazards genesis; the earth's endogenic and exogenic geological processes; coupling action; landslide; Three Gorges Project

## 1 引 言

地质灾害历来都是影响人类社会发展和经济进步的重要灾害类型。例如, 中国新滩滑坡历史上曾经使长江断航 82 a<sup>[1]</sup>; 1963 年 10 月 9 日, 著名的意大利瓦依昂(Vajont)库区滑坡导致 1 925 人死亡, 水库失效<sup>[2]</sup>。滑坡灾害是危害最为严重的地质灾害类型。中国是世界上滑坡分布最广、危害最严重的国家之一, 山体滑坡遍及全国山地丘陵地区, 已知数量近百万处之多, 活动面积占国土面积的 45% 左右, 每年造成数千人死亡以及近百亿元的经济损失<sup>[3]</sup>。

从 20 世纪 60 年代开始, 我国就对地质灾害与重大工程安全问题开展了研究。尽管包括我国在内的世界各国对地质灾害环境下重大工程的安全性都极为重视, 但每年在我国乃至世界各地发生的地质灾害及其对工程设施的破坏并由此而造成的损失仍十分巨大, 有许多关键科学问题尚待解决。从引发地质灾害的主要动因来看, 人们通常将地震、火山爆发等定义为内动力地质灾害, 而将山崩、滑坡、泥石流和地面破坏等归为外动力地质灾害。随着对具有区域性、周期性和群发性等特点的重大地质灾害研究的深入, 人们发现, 对这类灾害发生的频度、规模和分布特征, 有时从单纯的外动力或内动力作用来解释似乎不够, 这类重大地质灾害的成因与地球内外动力的耦合作用密切相关。然而, 以往对地质灾害的研究, 大都采用局部的、孤立的、就事论事的研究方法, 没有将地质灾害融入地质环境和自然演化的大系统中加以全方位的综合研究, 从而限制了对地质灾害的自然演化模式和发生发展机制的共有规律性研究。因此, 重大地质灾害发育演化的内外动力耦合作用机制研究, 是地质灾害研究领域的关键科学问题。

近年来, 地球内动力对斜坡形成演化和变形破坏的影响和作用受到了广泛注意。地壳抬升区的斜

坡形态、水系格局反映了该地区构造运动与气候变化的演化历史<sup>[4~8]</sup>。D. W. Burbank 等<sup>[5]</sup>通过对现代喜马拉雅地区的研究, 认为该区的滑坡是协调快速基岩抬升和强烈河流下切而形成陡坡的相互作用结果; 阿根廷西北部干旱区山地的 55 处体积大于  $100 \times 10^4 \text{ m}^3$  的崩塌和滑坡体主要沿山前活动断裂带分布, 与第四纪期间的构造运动密切相关, 发育于峡谷陡壁处的崩塌受到逆冲活动断裂的控制<sup>[9]</sup>。法国东南部阿尔卑斯山的蒙多尔(Mondore)地堑是多期构造运动的产物, 发育有各种类型的大型滑坡, 而该地堑周围地区却几乎没有大型的滑坡<sup>[10]</sup>。E. Di Luzio 等<sup>[11]</sup>对意大利亚平宁山脉(Apennines)中部的 Maiella 背斜地区的山体斜坡变形破坏与构造模式的关系进行了调查和研究, 认为该区斜坡的深层重力变形和第四纪以来的大型岩体破坏现象主要受背斜构造格局和构造模式的影响和控制, 并建立三维模型解释了斜坡的深层重力变形与大型滑坡、崩塌等岩体破坏的关系。

地球外动力作用特别是气候变化与区域性滑坡的关系也是近年来地质灾害研究的热点。M. F. Thomas<sup>[12]</sup>对湿润气候区的风化作用与滑坡的发育规律进行了研究, 他认为风化作用导致了岩体强度降低, 进而影响斜坡系统的稳定性。在香港、巴西东南部等地的片麻岩出露区由于强烈风化而经常发生滑坡。M. H. Trauth 和 M. R. Strecker<sup>[13]</sup>利用湖相地层中纹泥所反映的气候波动以及滑坡体物质的测年资料, 分析印证了阿根廷西北部古气候变化与滑坡的关系。J. C. Flageollet 等<sup>[14]</sup>对法国南部阿尔卑斯山两个盆地的滑坡诱发和复活的气候因素进行了研究, 认为滑坡与气候的关系密切, 气候-滑坡相关度的可靠性和质量取决于滑坡的地点、发生日期及细节描述、气候资料以及滑坡类型和年龄等基本信息的准确度。Corsini(2000)采用碳同位素测年、地层学、历史分析以及滑坡类型研究等方法, 对意大利北部阿尔卑斯山前缘地区最后一次冰期作用(约 15 000 a)以来的大量古滑坡与气候变化关系进行

了综合研究,认为冰川作用和气候环境分别是在两个不同时段滑坡形成的主要影响因素<sup>[15]</sup>。Margielewski (2000)对喀尔巴阡山复理式地层中的滑坡活动与全新世以来气候波动的关系进行了深入研究,结果表明,往往是在气候的潮湿阶段,滑坡活动明显集中,说明大区域滑坡运动规律与全球气候变化之间的一致性关系<sup>[15]</sup>。K. S. Kellogg<sup>[16]</sup>从地质地貌学的角度对科罗拉多的威廉姆斯佛克山的大型滑坡(面积约25 km<sup>2</sup>)的成因进行了研究,认为冰川消退期产生的大量融水渗入了基岩断裂,引起孔隙水压力的急剧上升,从而引起了大型滑坡。

在内外动力耦合作用与地质灾害之间的关系方面, A. E. Scheidegger<sup>[6]</sup>认为地貌形态的形成和演化主要是受区域构造内动力作用和剥蚀等外动力作用的控制,并对青藏高原东缘的斜坡块体运动(崩塌、滑坡、碎屑流等)的成因机制进行了分析,认为斜坡块体运动是内动力地质作用引起山体抬升、斜坡岩土体重力势能增大的结果;斜坡作为一个处于动态平衡状态的复杂开放系统,崩塌、滑坡等斜坡变形破坏现象受到构造应力场的控制。J. F. Shroder<sup>[7]</sup>以喜马拉雅地区为例,讨论了斜坡系统的演化形式,他认为地壳抬升地区的斜坡系统演化是不同尺度的斜坡物质运动的综合效应,包括整个山脉在重力作用下的构造变形、单个山体或大范围斜坡的岩层深部蠕动和规模最小的崩塌、滑坡破坏等。王思敬<sup>[17]</sup>提出了“用以解释若干重大地质灾害成因的地球内外动力耦合作用理论”,对地震滑坡、边坡灾害和地面变形灾害的地球内外动力耦合机制进行了研究。

从以上研究现状来看,虽然人们已经认识到地球内外动力耦合作用对重大地质灾害成因的影响,但大多数研究定性描述多,定量研究少,缺乏科学数据的支撑,仍值得进行深入研究。本文以发育在三峡库区长江干流两岸的众多大型滑坡为背景,从滑坡时空分布与地球内外动力的关系、滑坡滑带形成演化的内外动力耦合过程与机制两个方面,研究和论证地球内外动力耦合作用与地质灾害形成演化的关系;并以三峡水库蓄水后的第一个大型基岩滑坡——千将坪滑坡为例,以实例进一步论证滑坡发育和滑带形成的内外动力耦合作用机制。

## 2 地质灾害时空分布与内外动力作用的关系

### 2.1 滑坡空间分布特征

三峡库区长江两岸分布有众多的古滑坡或老滑坡,从区域上看,这些滑坡在空间上的分布是否具有一定的规律,这对于库区不稳定岸坡的预测和监测选点、研究滑坡成因与内外动力作用的关系等具有重要意义。

#### (1) 三峡库区地质与滑坡概况

三峡库区是指从三峡大坝坝址宜昌市三斗坪到库尾回水末端重庆市之间的长江河道两侧的广大山区,长600 km,总土地面积约5.93×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。库区水系以长江为主体,组成树枝状水网,水量丰富,洪水多发生在7~8月。长江水位变幅较大,最大洪水位、枯水位相差20~72 m。库区地处我国地势第二级阶梯的四川盆地东缘及鄂西山地,地貌区划为板内隆升侵蚀中低山地<sup>[18]</sup>。库区出露地层较齐全,除缺失泥盆系下统、石炭系上统、白垩系的一部分和第三系以外,自前震旦系至第四系均有出露。库区构造上处于扬子准地台的中部,北以城口—房县断裂为界与秦岭造山带相邻;以巫山与奉节间的齐岳山断裂为界,其西为四川台坳,其东为上扬子台褶带。晚新生代以来,三峡地区构造运动主要表现为区域性间歇式整体抬升,断层差异性运动逐渐减弱<sup>[19, 20]</sup>。根据地形变形测量、震源机制解和Scheidegger法分析,三峡地区新构造应力场主压应力优势方向为NE向,具有自西向东由NNE向NEE向偏转的趋势。

坝区三斗坪—重庆市的长江河谷两岸,统计有滑坡、崩塌共256个,滑坡、崩塌总量达15.54×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,其中滑坡204个,体积14.27×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占总数的79.69%,占总体积的91.89%。滑坡、崩塌的个数和体积的分级统计如表1所示<sup>[21]</sup>。上述统计结果表明,三峡库区长江河谷岸坡的破坏形式以滑坡为主,并以大于1 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>的特大型滑坡最为活跃。

表1 三峡库区滑坡崩塌分级统计结果<sup>[21]</sup>  
Table 1 Statistical results of landslides and slides in Three Gorges reservoir area<sup>[21]</sup>

区间	崩塌规模/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	滑坡		崩塌	
		数量/个	体积/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	数量/个	体积/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
三斗坪— 重庆	<50	112	1 415.1	34	328.2
	50~99	15	1 009.0	7	492.0
	100~500	31	6 056.0	6	1 550.0
	501~999	11	8 120.0	1	530.0
	1 000~3 000	22	43 124.0	3	3 700.0
	3 001~4 999	5	21 500.0	0	0.0
	≥5 000	8	61 500.0	1	6 000.0
合计		204	142 700.0	52	12 600.0

(2) 滑坡分布与岩性组合的关系

三峡库区河谷地段的滑坡分布呈现出明显的地域性。在一些地段, 大、中型滑坡密集, 而另一些地段则十分稀少。例如, 库首三斗坪—新滩的长约 50 km 的长江干流库岸, 仅有一处滑坡; 而秭归树坪—巴东黄腊石、巫山老鼠错—大湾、黄瓜树—刘家屋场、奉节白衣庵—云阳茂河岭、云阳宝塔—兴隆滩、万州区一带等干流河段滑坡则十分发育<sup>[22]</sup>。

三峡库区滑坡分布的地域性与地层岩性及其组合密切相关。从岩性组合来看, 滑坡主要发生在含有软弱面的层状岩层中, 特别是软硬相间的层状碎屑岩和有软弱基座的局部碳酸盐岩岸坡, 变形破坏相对强烈, 大中型滑坡十分发育, 其数量和体积分别占总数的 87.3% 和 91.1% (见图 1)。三峡库区沿岸出露的软弱岩石包括强度较低的泥岩、页岩及含煤岩层等。侏罗系砂泥岩互层、三迭系巴东组泥岩、泥灰岩、粉砂岩互层的层状碎屑岩在该区广泛分布, 且沿砂泥岩界面常见泥化现象, 抗剪强度明显降低, 构成该地区的主要易滑地层。

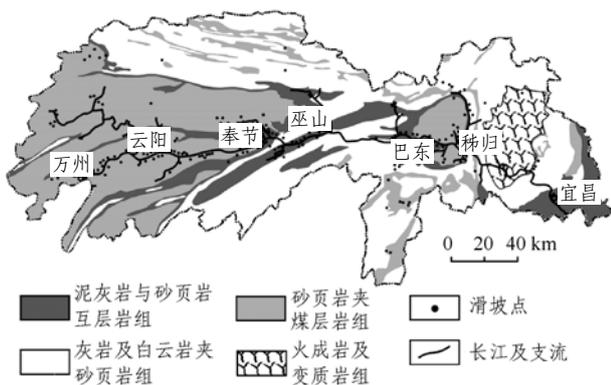


图 1 三峡库区宜昌—万州段滑坡空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of landslide along the section from Yichang to Wanzhou in Three Gorges reservoir area

(3) 滑坡分布与地质构造的关系

地质构造对库区滑坡分布密度、规模和滑动方向有很大影响<sup>[23]</sup>。发生大型滑坡的构造部位主要在不同构造体系交接复合地段、褶皱轴部及其转折部位、向斜翘起端以及新构造活动相对强烈区<sup>[20, 22]</sup> (见表 2)。由表 2 的统计结果可见, 整个三峡库区滑坡崩塌点的平均线密度和线模数分别为 0.17 个/km 和  $133 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ , 而位于地质构造部位的滑坡崩塌点平均线密度和线模数分别为 0.64 个/km 和  $1363 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}$ 。因此, 位于地质构造部位的滑坡崩塌点在分布密度和体积上均有大幅度增加, 特别

表 2 三峡库区大型滑坡、崩塌集中地段统计表

Table 2 Statistic results of large landslides in the geological structure zones in Three Gorges reservoir area

地段	构造部位	河谷长度 /km	线密度 / (个·km <sup>-1</sup> )	线模数 / (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup> )
万县市一带	川东褶皱带弧形转折部位	16	0.428	1 937.5
云阳—奉节	故陵向斜展形河谷段	17	0.353	1 617.6
奉节—巴东	故陵向斜东段翘起段	10	0.300	1 140.0
秭归—新滩—链子崖	川东、鄂西褶皱弧交接带 活动构造相对强烈地带	51	0.137	419.6
		2	2.000	1 700.0
全库区		600	0.170	133.0

是滑坡崩塌体积增加了约 10 倍。

从总体来看, 在万县—奉节河谷段, 大型滑坡基本上发育在向斜河谷的顺向坡; 在奉节—巫山河谷段, 大型滑坡则主要出现在几种构造体系复合部位, 顺向坡和切向坡都有滑坡发生。向斜河谷 (如故陵向斜) 是斜坡变形严重、容易发生大型滑坡的部位, 尤其是在顺向坡和向斜翘起端地段。例如, 位于奉节县境内的故陵向斜东段翘起段, 该处河谷长度不过 10 km, 分布大小滑坡 8 个。弧形褶皱构造的弧顶部位挤压作用强烈, 横向节理裂隙发育, 是岩体破碎程度较高的地段。如位于川东弧形褶皱带顶端的万县一带岩层十分破碎, 区域性的节理裂隙发育, 在长约 16 km 的河谷地段发育有大型滑坡 5 处, 变形破坏体积总量达  $31\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。奉节—巫山江段由于既是川东弧与八面弧交接的复合地段, 又是齐岳山基底断裂通过的部位, 因此也是大型滑坡体的发育地段。在新构造运动相对强烈的地段, 大型滑坡也比较发育, 并集中分布。黄陵地块周缘地区为构造上升区和下降区的过渡地带, 存在较大的差异运动, 成为新构造活动相对强烈地段。在新滩地段的岸坡挟持于仙女山和九湾溪活动断裂带之间, 在历史上曾发生过多次滑坡灾害。例如, 1030 年, 新滩发生滑坡, 堵江 22 a; 1524 年, 新滩再次发生滑坡, 堵江 82 a; 1985 年, 新滩古滑坡复活, 其体积达  $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(4) 滑坡分布与岸坡结构的关系

岸坡结构是地层岩性、地质构造和河谷地貌的综合体现, 它直接控制了滑坡的分布和发育程度。三峡库区岸坡可划分为四大类: (1) 土质岸坡; (2) 碎屑岩岸坡; (3) 碳酸盐岩岸坡; (4) 结晶岩岸坡。对于层状的碎屑岩和碳酸盐岩岸坡, 依据岸坡岩体结构和岩层的产状特征可进一步划分为: 平缓岩层

岸坡、顺向岸坡、反向岸坡、切向岸坡和特殊结构岸坡。

在不同岸坡结构的河谷地带，大型滑坡体的数量百分比从大到小依次为：陡倾岸坡、缓倾岸坡、平缓层状岸坡、特殊结构岸坡、反向岸坡和松散土岸坡；而体积百分比的顺序依次为：特殊结构岸坡、陡倾岸坡、缓倾岸坡、水平层状岸坡、反向岸坡和松散土岸坡(见图 2)。倾外层状的碎屑岩岸坡是大型滑坡的温床；具有软弱基座的碳酸盐岩岸坡结构段则是崩塌密集发育地带。特殊结构岸坡包括裂隙发育带岸坡和断层发育带岸坡，由于其处于背斜核部、褶皱复合部位和断层带附近，岩体破碎，岸坡稳定性差，因此极易发生大型、特大型滑坡。

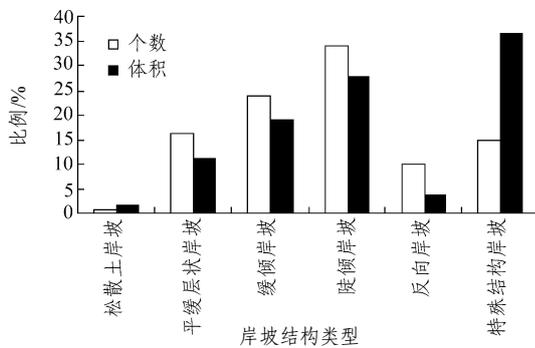


图 2 不同岸坡结构类型大型滑坡分布的百分比直方图  
Fig.2 Percentage histogram of large-scale landslides distribution with different bank structures

由上可见，滑坡是三峡库区斜坡变形和破坏的主要表现形式。三峡库区滑坡的空间分布和规模明显受到地层岩性、地质构造、岸坡结构以及新构造力场等地质因素的综合控制。三峡库区大型古滑坡主要沿长江干流和支流的深切河谷两岸分布，与河流发育演化史也密切相关。大型顺层基岩滑坡在岩性分布上以砂泥岩互层的层状碎屑岩类为主。

2.2 滑坡发育时间特征

三峡库区分布有众多的古滑坡或老滑坡，它们均是在地质历史时期发育和形成的。以下分析这些古老滑坡发生时间的分布特征，研究古老滑坡发生时间与地质构造运动历史和古气候古环境等的关系，以揭示滑坡发育时间特征与地球内外动力耦合的关系。

(1) 滑坡发育年代分布

表 3 为作者以及前人对三峡库区 29 个大型滑坡进行的绝对年龄测试数据<sup>[24~26]</sup>。测试样品主要为钻孔或平硐揭露出的滑带土；测试方法主要为 <sup>14</sup>C 法、热释光法(TL)和电子自旋共振法(ESR)。

表 3 三峡库区滑坡绝对年龄<sup>[24~26]</sup>

Table 3 Absolute ages of landslides in Three Gorges reservoir area<sup>[24~26]</sup>

序号	滑坡名称	绝对年龄/(10 <sup>3</sup> a)			资料来源
		TL	ESR	<sup>14</sup> C	
1	赵家沱		9.5		成都地质学院, 1990年
2	清岩子		14.0		成都地质学院, 1990年
3	黄腊石		80~12		长江水利委员会, 1997年
4	重钢		12		长江水利委员会, 1997年
5	马家屋场		30~40		崔政权等, 1999年
6	云阳城西		27.0		成都地质学院, 1990年
7	旧县坪西滑体	29.2			张年学, 1993年
8	新滩		44.6		张年学, 1993年
9	旧县坪主滑体		56.1		张年学, 1993年
10	黄腊石谭家湾		74.8		李兴唐, 1990年
11	黄腊石石榴树包		68.9		李兴唐, 1990年
12	黄腊石台子角		86.0		李兴唐, 1990年
13	曲尺盘		91.0		张年学, 1993年
14	黄土坡	372.9			钟立勋等, 1992年
		392.5			
		412.0			
15	故陵	126.0	116.0		张年学, 1993年
		142.0	124.0		长江水利委员会, 1996年
16	黄腊石大石板	105.0	120.0		长江水利委员会, 1990年
17	白衣庵	151.0			李 晓等, 2003年
18	重庆仪表厂	120.4			四川省地质矿产勘查开发局, 1990年
19	李子坝	159.1			四川省地质矿产勘查开发局, 1990年
20	镇江寺	181.9			四川省地质矿产勘查开发局, 1990年
21	茨草沱	266.0			张年学, 1993年
22	大坪	277.0			张年学, 1993年
23	宝塔		324.0		李 晓等, 2004年
24	百焕坪		331.0		张年学, 1993年
25	太白岩, 枇杷坪, 吊岩坪	230.0~290.0			崔政权等, 1999年
26	云沱, 赵树岭	116.8			崔政权等, 1999年
27	藕塘	160.0~170.0			长江水利委员会, 1996年
28	杨家岭	27.0			长江水利委员会, 1990年
29	草街子, 安乐寺	310.0~380.0			崔政权等, 1999年

另外，作者对三峡库区 84 个体积在 100×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 以上的大型滑坡进行了调查。这 84 个大型滑坡的前

缘高程集中分布在 60~90, 115~140, 170~200 m (见图 3)。滑坡数随滑坡剪出口高程降低而增加, 其中前缘高程分布在长江多年平均水位以下的滑坡最多, 约占调查的大型滑坡总数的 44%。由于坡脚部位是剪应力最集中的部位, 因此大型滑坡的前缘高程通常位于河床的高程附近。图 3 给出了秭归—重庆的 84 个滑坡的前缘高程与阶地高程的关系, 图中, T<sub>4</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>1</sub> 分别表示 IV, III, II, I 级阶地, 根据这些滑坡发生的临空条件, 可推算出滑坡发生的年代范围。

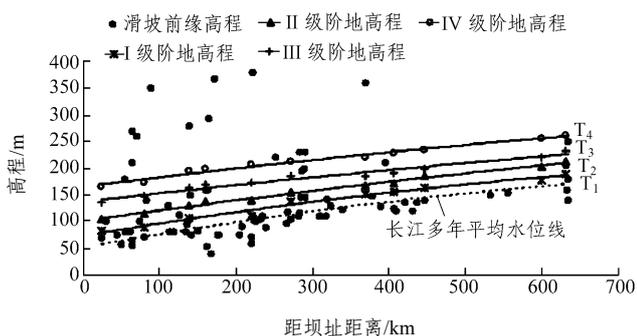


图 3 大型滑坡的前缘高程与阶地高程的关系图  
Fig.3 Relations between anterior border elevation of large-scale landslide and terrace elevation

根据上述 29 个古滑坡的绝对年龄测试数据与 84 个古滑坡的推算年代, 做出三峡库区古滑坡的年代分布直方图, 如图 4 所示。由图 4 可见, 三峡库区大型古滑坡在历史上的形成时间是不均匀的, 滑坡发生年龄主要集中在  $(2.7\sim 15)\times 10^4$ ,  $(27\sim 33)\times 10^4$ ,  $(37\sim 41)\times 10^4$  a 三个阶段; 尤其是中更新世晚期  $(15\times 10^4$  a) 以来, 滑坡具有数目明显增加, 延续时间增长的趋势。

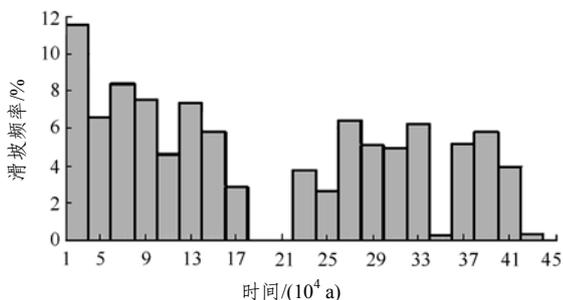


图 4 三峡库区更新世滑坡年代分布直方图  
Fig.4 Age distribution histogram of Pleistocene landslides in Three Gorges reservoir area

(2) 滑坡发育时间与构造历史的关系

① 滑坡时间与地壳抬升的关系

长江三峡库区新构造运动具有明显的间歇性隆升特征, 可以根据河流阶地计算各阶段的地壳抬升速率。在巫山出露有 6 级阶地, 高程分别为: 346 m (T<sub>6</sub>), 281 m (T<sub>5</sub>), 201 m (T<sub>4</sub>), 111 m (T<sub>3</sub>), 84 m (T<sub>2</sub>), 51 m (T<sub>1</sub>)。由各级阶地的高程及其绝对年龄计算出各级阶地形成以来的地壳平均抬升速度为: 0.30 mm/a (T<sub>6</sub> 形成后), 0.33 mm/a (T<sub>5</sub> 形成后), 0.27 mm/a (T<sub>4</sub> 形成后), 0.25 mm/a (T<sub>3</sub> 形成后), 0.56 mm/a (T<sub>2</sub> 形成后), 0.85 mm/a (T<sub>1</sub> 形成后)。宜昌出露的 6 级阶地高程分别为: 125 m (T<sub>6</sub>), 107 m (T<sub>5</sub>), 80 m (T<sub>4</sub>), 45 m (T<sub>3</sub>), 25 m (T<sub>2</sub>) 和 15 m (T<sub>1</sub>)。计算出各级阶地形成以来地壳的平均抬升速度为: 0.15 mm/a (T<sub>6</sub> 形成后), 0.14 mm/a (T<sub>5</sub> 形成后), 0.17 mm/a (T<sub>4</sub> 形成后), 0.30 mm/a (T<sub>3</sub> 形成后), 0.42 mm/a (T<sub>2</sub> 形成后) 和 0.50 mm/a (T<sub>1</sub> 形成后)。

以上结果表明: 三峡库区自中更新世晚期 ( $15\times 10^4$  a) 以后, 新构造运动的平均抬升速率增大, 表现出后期加速抬升的特点, 形成了 T<sub>3</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>1</sub> 三级阶地, 将三峡库区新构造抬升速率与滑坡频率的关系叠合于图 5。由图可见, 三峡库区滑坡的发育趋势与新构造抬升速率的递增趋势基本相吻合。  $15\times 10^4$  a 以来, 三峡地区新构造运动处于最活跃期, 地壳快速上升, 河流急剧下切, 造成斜坡失稳。

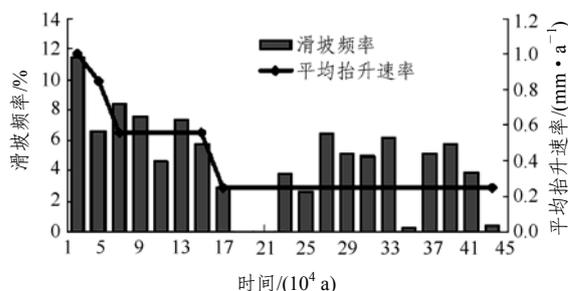


图 5 新构造抬升速率与滑坡的关系  
Fig.5 Relation between neotectonic movement velocity and landslide

② 滑坡时间与断裂活动的关系

根据三峡地区所获得的断裂综合测年资料<sup>[22]</sup>, 对区内  $(5\sim 78)\times 10^4$  a 的断裂年龄进行了信息分配处理<sup>[27]</sup>, 获得了断裂活动的年龄分布直方图 (见图 6)。

从图 6 可以看出, 地史时期断裂活动在时间上分布是不均一的。可以划分出 3 个活跃期 (以同位素年龄频率 > 4% 作为断裂活跃期):  $(9\sim 24)\times 10^4$ ,  $(30\sim 39)\times 10^4$ ,  $(45\sim 48)\times 10^4$  a。研究区内的主要断裂最新一次较明显的构造活动, 主要出现在中更新

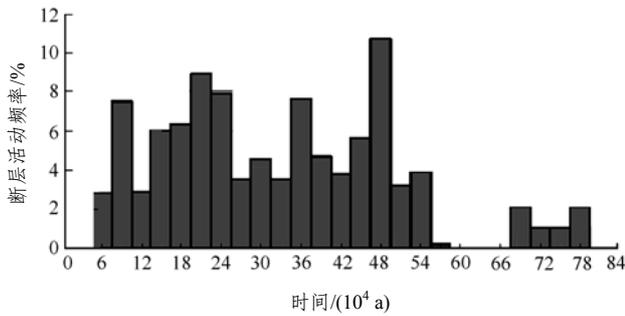


图6 三峡库区断裂活动年龄分布直方图

Fig.6 Histogram of fault action age distribution in Three Gorges reservoir area

世的中晚期。从断裂活跃期(图6)与滑坡活跃期(见图4)的时间对比来看,两者具有较好的对应关系,但是滑坡的活跃期表现出明显的滞后性。在构造活动期,断裂所处地带岩石较为破碎,容易形成易滑岩组,从而引起该区斜坡的变形破坏现象加剧。

从具有文献记载的地震事件来看,三峡库区地震活动与滑坡时间也有较好的相关性。根据有关历史记载,三峡库区的新滩崩滑体是一个长期活动的崩滑体,发生过多起崩滑事件,将其与邻近的秭归—渔关地震带和区域上的地震时序进行对比(见图7)<sup>[28]</sup>可以看出,地震活跃期与新滩崩滑事件之间有着很好的对应关系<sup>[28, 29]</sup>。这表明三峡库区部分滑坡的发生与地震的频度有关,地震也是促使库区滑坡发生的影响因素之一。

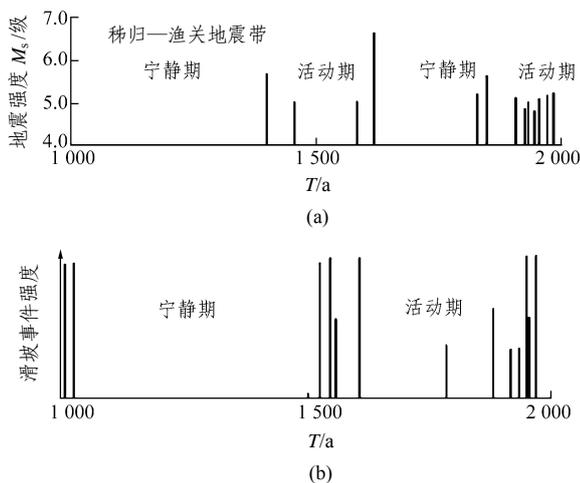


图7 新滩崩塌事件与区域地震活动周期对比<sup>[28]</sup>

Fig.7 Relation of Xintan landslide and regional earthquake<sup>[28]</sup>

### 3 内外动力耦合作用下滑带形成机制

滑带对于滑坡特别是大型基岩顺层滑坡具有控制作用。根据三峡库区干流库岸283处崩塌滑坡发

生的地层层位和岩性的统计结果,约90%的崩滑发生在含有软弱面或软弱层的层状岩层中<sup>[30]</sup>,而基岩顺层滑坡的滑带主要发育在这些软弱层(带)中。常见的软弱层包括强度较低的泥岩、页岩及其层面、含煤岩层等。滑带的形成直接控制着基岩顺层滑坡的发育、发生、复活和解体,滑带性质的演变也决定着滑坡稳定性。

前人对不同区域滑坡的滑带有大量研究,多注重滑带形成后最终的工程地质力学性质,而较少研究地球内外动力耦合作用下滑带演化过程与机制。以下以三峡库区侏罗系基岩滑坡为例,研究滑带形成演化的内外动力耦合机制。

#### 3.1 滑坡地层的沉积建造

地层的沉积环境对于地层岩性有至关重要的作用,地层沉积时的古气候特征、区域构造、沉积物质和后生作用等控制着地层岩性。早侏罗世中期,由于受燕山运动的影响,四川地区成菱形的刚硬基底下沉,堆积了较厚的侏罗纪陆相地层,接受了一套湖泊—河流沉积体系的沉积,四川盆地内下侏罗统为淡水湖相沉积,中、上侏罗统主要为泛滥平原相间夹湖相沉积。淡水湖相沉积物常为细粒物质,暗色泥质沉积,少量粉砂,常形成泥岩、泥灰岩或页岩;泛滥平原相沉积物常为砂和少量的泥砾,常形成砂岩,由于分选不好,砂岩不纯,含少量泥砾和泥岩夹层。长江三峡库区当时处在四川盆地的东部。

三叠纪~早侏罗世中期印支运动后,早侏罗世以南充—达州成为四川湖盆中心,向四周沉降幅度递减,湖水变浅。三峡库区位于湖盆的东部,以淡水湖相环境为主。在一个大的周期性气候变化下,沉积了以暗色为代表的泥质岩、粉砂岩、砂岩和介壳灰岩。

中侏罗世晚期,盆周山系强烈上升,盆地的沉积速率大于下降速率,加之气候干旱炎热,三峡库区形成了以泛滥平原为主的沉积和时令湖环境,沉积的泥岩普遍为紫红色、棕红色。

晚侏罗世早期,四川盆地周缘山系处于相对平静时期,输入盆地沉积的碎屑物普遍较细,以棕红色泥质沉积物为主夹少量粉砂、细砂沉积物。晚侏罗世晚期燕山运动中期,龙门山发生了强烈的上升,以棕紫色、灰绿色砂岩、粉砂岩夹泥岩(见图8)为主的泛滥平原亚相分布面积最广<sup>[31]</sup>。

从岩层物理力学性质角度看,泥岩碎屑粒度细,常为泥质结构,层理构造发育,特别是水理性质较差,膨胀崩解比较严重,其物理力学性质较差。



图 8 侏罗系上统的砂岩夹泥岩层(云阳宝塔)

Fig.8 Sandstone and mudstone strata in late Jurassic(in Baota, Yunyang County)

相比而言,砂岩碎屑粒度较粗,常为钙质胶结,层理发育,物理力学性质相对较好。因此,三峡库区侏罗纪潮湿气候下淡水湖相沉积岩层的物理力学性质比干热气候下泛滥平原相沉积岩层的物理力学性质差。沉积环境和沉积特征直接控制着地层岩性及其物理力学性质。这种沉积特征和韵律形成了软硬互层的地层结构,三峡库区侏罗系滑坡灾害的主滑面大多发育在这些层间软岩中。因此,淡水湖相沉积和泛滥平原相沉积是三峡库区侏罗系滑坡滑带广泛发育的沉积学物质基础。

### 3.2 内动力作用

上述软硬互层的地层结构,在经历多期次构造运动后,层间软岩可以形成层间剪切带。

三峡库区构造应力历史为:晋宁运动,地层强烈褶皱,形成古老的构造格架;震旦纪~中三叠世以来,区内一直处于沉降过程,未发生强烈的区域构造运动,沉积了巨厚的沉积盖层;中三叠世以后,构造变动频繁,印支运动使震旦系~中三叠地层发生褶皱,之后,燕山运动及喜山运动强烈影响该区。形成秭归向斜的新华夏系复合构造始于印支运动,燕山运动(侏罗纪末)得到进一步发展。

侏罗系地层形成后,本区经历了燕山运动、喜山运动和新构造运动。燕山运动区域构造应力方向为 NWW;喜山运动时,构造应力方向转变为 NNE;新构造运动时,受青藏高原隆起的影响,构造体现为间歇式地壳抬升。

当层间软岩遭受构造运动时,岩层发生倾斜或褶皱,层间软岩与上下硬岩交接带发生应力集中,形成劈理。当经过多次构造运动后,层间软岩结构连接发生破坏,形成层间剪切带,层间剪切带是层间软岩遭受内动力作用的关键标志。

研究<sup>[32]</sup>表明,形成层间剪切带后,粒度变细,

从黏粒到粉粒均有增加的趋势;蒙脱石的有效含量增大,伊利石/蒙脱石混层矿物相对含量增大;定向性变高,碎屑出现溶蚀,碎屑矿物转变为黏土矿物,黏土矿物中出现了蒙脱石化;pH 值升高,比表面积升高,阳离子交换量(C·E·C)升高,其中的  $\text{Ca}^{2+}$  含量最高,含水量增加,孔隙度增加,干密度降低, $c$ ,  $\phi$  值均降低,致使层间剪切带的物理力学性质变差。

### 3.3 外动力作用

内动力作用形成的层间剪切带在重力与暖湿气候等外动力环境下,发生泥化,形成泥化夹层。

#### (1) 重力地质作用

三峡库区侏罗系地层多为软硬相间的互层结构,硬层多为砂岩,软层多为泥岩或页岩。当软硬相间岩层在重力作用下(见图 9),弹性参数  $E_1$ ,  $\mu_1$  较大的硬层与弹性参数  $E_2$ ,  $\mu_2$  较小的层间剪切带接触面上将产生较大的应变,从而使层间剪切带结构再次遭受破坏。显然,软硬岩层间弹性参数相差越大,接触面上剪应变越大,层间剪切带越易破坏。

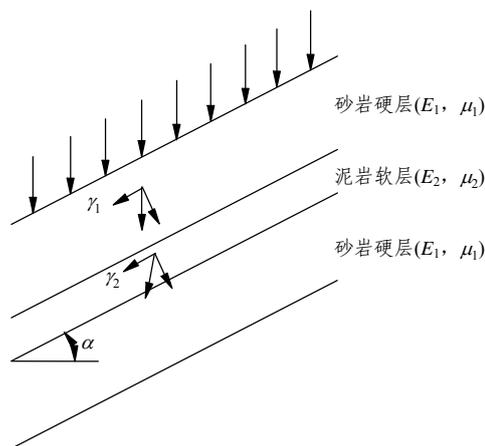


图 9 软硬相间岩体在重力作用下的破坏模式

Fig.9 Failure mode of interbedded soft and hard rock masses under gravity

此外,剪应变集中程度还与岩层倾角  $\alpha$  有关,  $\alpha$  越大,硬岩和软岩接触面上的剪应力越大,层间剪切带越容易破坏。层间剪切带在重力地质作用下,结构进一步破坏,为地下水的循环提供了空间。

#### (2) 地下水作用

层间剪切带形成后,其中存在大量的孔隙和裂隙,地下水便进入到其中。地下水在层间剪切带孔隙和裂隙中循环,不仅与层间剪切带发生物质交换,还使层间剪切带的结构发生变化,强烈的地下水动力作用将使层间剪切带含水量增高,结构疏松,发生泥化,形成泥化夹层。

由于地下水、地表水和大气降水是个循环的系统,地下水动力作用取决于气候环境,湿热的气候环境可产生强烈的地下水动力作用,干冷的气候环境地下水循环较弱。三峡库区新构造运动为间歇式上升,特别是中更新世以来,经历了6次暖湿气候期,降雨充沛,层间剪切带在强烈的地下水动力作用下,发生泥化,形成泥化夹层。

研究表明,形成泥化夹层后,液限、塑限和塑性指数均降低;伊利石和高岭石的有效含量增大,伊利石/蒙脱石混层矿物相对含量降低;定向性更高,黏土矿物中出现了伊利石化和高岭石化。pH值升高,阳离子交换量(C·E·C)降低,其中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量也降低<sup>[32]</sup>;含水量增加,干密度降低,天然孔隙比增加, $\phi$ 值降低,致使泥化夹层的物理力学性质进一步恶化。

### 3.4 滑带形成

当形成适合的边界条件,泥化夹层的物理力学性质蜕化到一定程度,斜坡体抗滑力小于下滑力时,斜坡体沿着泥化夹层整体发生剪切滑动,泥化夹层经受了较大的剪切变形后,形成滑带,滑动面上往往有擦痕、镜面与颗粒定向现象(见图10)。泥化夹层经历大的变形后,结构发生了非常大的变化,局部剪胀或剪缩,如果发生高速滑动,高速摩擦产生的高温可使滑带物质成分发生转变。



图10 典型滑坡滑带照片(奉节白衣庵滑坡)

Fig.10 Typical sliding zone in Baiyi'an Landslide in Fengjie County

### 3.5 滑带形成的四阶段模式及其内外动力耦合作用机制

根据以上研究,三峡库区典型顺层基岩滑坡的滑带形成可概化为4个阶段:层间软岩、层间剪切带、泥化夹层和滑带,分别经历了沉积建造、构造运动、气候环境和重力滑动作用。4个阶段演化模式如图11所示。滑带形成的四阶段均是内外动力

耦合作用的结果。

从层间软岩→层间剪切带过程中经历的层间剪切作用的成因为构造运动,而溶蚀作用、蚀变作用、离子交换作用、淋滤作用等一系列水岩耦合作用,是由于强烈的地下水活动,地下水活动强烈的原因为暖湿的气候,所以层间剪切带形成的原因为内动力作用和外动力作用,水岩耦合作用于层间剪切作用相互促进,共同使层间剪切带的性质弱化。因此,层间剪切带的形成是内外动力耦合作用的结果。

从层间剪切带→泥化夹层→滑带的演化也是由于内外动力耦合作用的结果,三峡库区的老滑坡多是第四纪以来的滑坡,第四纪的新构造运动,三峡库区表现为地壳强烈抬升,河流下切,岸坡应力重分布,层间剪切带再次发生层间剪切作用,所以其层间剪切作用的最终原因是新构造运动,古气候时期的间冰期,湿热的气候条件使地下水循环强烈,从而使层间剪切带变成泥化夹层。随着人类工程活动和暴雨的诱发,导致泥化夹层上覆地层发生失稳,泥化夹层从而转变为滑带。

对于三峡库区侏罗系基岩顺层滑坡来讲,滑带形成演化的条件是:淡水湖相沉积和泛滥平原相沉积是其沉积学物质基础,软硬相间的岩层层序是其发育的地层结构条件,多期复杂构造运动(燕山运动、喜山运动和新构造运动)的作用是其发育的内动力条件,暖湿的气候环境和重力地质作用为其提供了必要的外动力条件。

## 4 典型滑坡形成的内外动力耦合作用机制

千将坪滑坡发生在三峡水库蓄水至135 m后一个多月,是三峡库区蓄水以后发生的第一个大型滑坡,其所造成的社会影响和经济损失,引起了社会各方面的极大关注<sup>[33]</sup>。关于千将坪滑坡的类型与成因等问题一直是近年来研究的重点和热点。王治华等<sup>[34~45]</sup>就千将坪滑坡特征、类型、构造解析、成因机制、模拟实验等方面进行了研究。各学者根据自己的研究,对千将坪滑坡有着不同的认识,其中关于千将坪滑坡形成演化机制是研究的热点之一。对于千将坪滑坡的成因机制有三方面的观点:古滑坡复活、沿层间剪切带滑动形成的新滑坡、沿层面滑动形成的新滑坡。以下从内外动力耦合角度分析千将坪滑坡特别是滑带的形成过程与机制。

### 4.1 千将坪滑坡地质环境

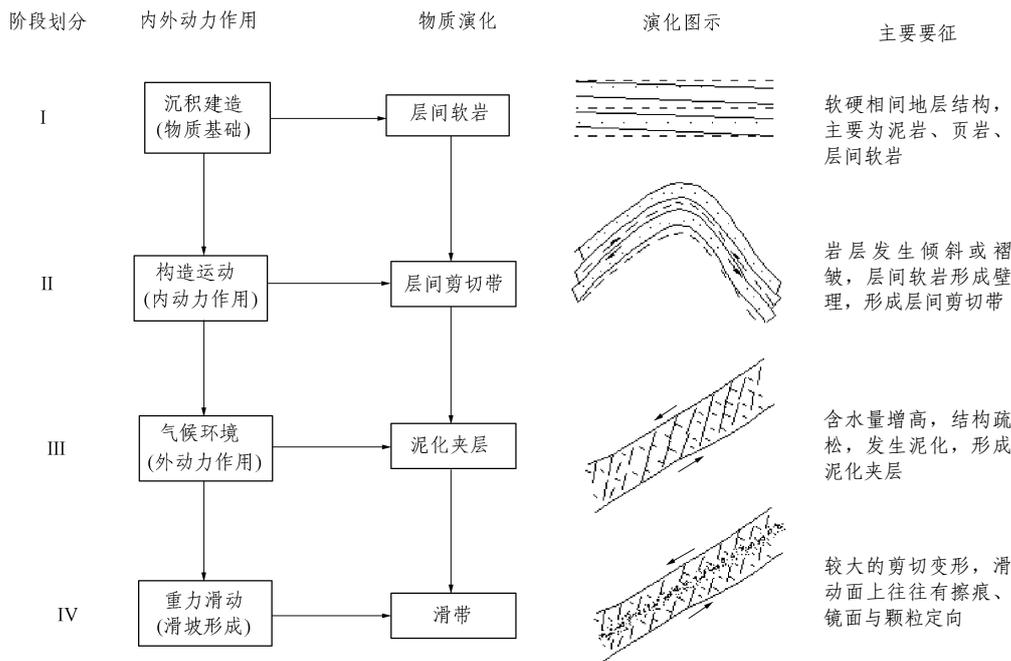


图 11 滑坡形成四阶段模式图  
Fig.11 Four-stage mode of landslide formation

千将坪滑坡位于湖北秭归县沙镇溪镇千将坪村, 长江一级支流青干河的北岸, 滑坡距青干河汇入长江河口上游 5 km。滑坡区内长年平均降雨量为 1 100 mm/a。滑坡地区属于低山侵蚀剥蚀地貌单元, 长江切割深 500~1 000 m 的中等切割区。地貌单元上为单斜地形顺向坡, 滑坡后脊高程约 450 m, 原河面坡脚高程约 95 m。区内地壳相对稳定, 地震基本烈度在 VI 度以下<sup>[46]</sup>。

千将坪滑坡区地层主要为侏罗系中统和下统地层, 地层结构为砂泥岩互层。只要出露地层有, 聂家山组(J<sub>1-2n</sub>): 紫红色中厚层黏土质砂岩, 长石石英砂岩夹亮晶生物屑灰岩; 香溪组(J<sub>1x</sub>): 灰绿色石英细砂岩夹煤层, 下部为灰白色厚层石英砂岩夹砾岩。滑坡汇水区内地表水系由青干河及大小冲沟组成。汇水区内除白果树沟为季节性流水外, 大部分为干沟。两条较大冲沟望家沟和白果树沟分别位于汇水区的西侧和东侧, 切割较深。

滑体地表总体形态呈簸箕状, 上窄下宽(见图 12)。滑坡前部沿青干河处最宽, 达 558 m, 滑坡后缘宽 360 m, 滑体最大纵长 968 m, 面积达 0.54 km<sup>2</sup>, 体积约为 2 400×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。滑坡的平均滑距为 147 m, 垂直滑距为 46 m。千将坪滑坡位于向斜的一翼, 滑动前地形平均坡度为 18°, 岩层倾角为 24°~32°, 平均为 27°。

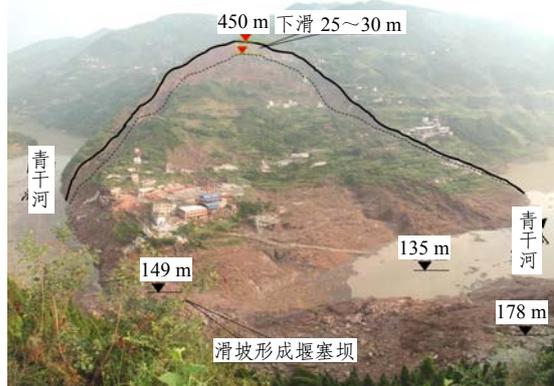


图 12 千将坪滑坡全景图  
Fig.12 An overview of Qianjiangping landslide

### 4.2 滑带宏观特征

千将坪滑坡滑带可分为上、下两段, 上段为顺层部分, 倾角较陡; 下段为切层部分, 倾角较缓。滑带总体倾角为 10°~27°。

上段滑带的原岩为薄层状黑色页岩(见图 13), 发育在粉砂岩夹层的层间剪切带中(见图 14)。层间剪切带厚约 15 cm, 分为 3 层。上、下层为影响带(B 区), 中层为剪切区(A 区), 影响带主要为裂隙带, 剪切区主要为泥化层。影响带上层顶面平直, 底面凹凸不平, 影响带中发育羽状裂隙, 裂隙中充满了方解石。方解石主要呈条带状充填, 局部呈团块状,



图 13 千将坪滑坡滑带

Fig.13 Sliding zone of Qianjiangping landslide

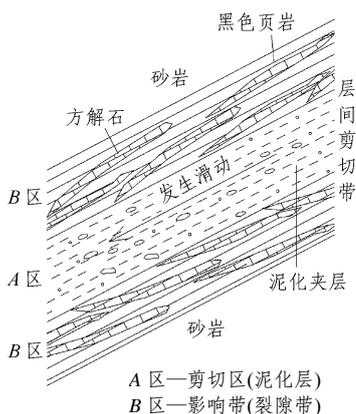


图 14 千将坪滑坡层间剪切带宏观结构素描图

Fig.14 Macrostructure sketch of interbedded shear zone in Qianjiangping landslide

条带走向与岩层走向平行。裂隙面积远远大于黑色页岩面积，层面上擦痕镜面明显(见图 13)。影响带上层表面为黑色页岩，无方解石充填，底面见两组陡倾 X 状共轭剪节理(见图 15)，第一组共轭节理( $J_1$  和  $J_2$ )走向分别为  $91^\circ$  和  $132^\circ$ ，第二组共轭节理( $J_3$  和  $J_4$ )走向分别为  $3^\circ$  和  $65^\circ$ 。节理平直，紧闭无充填。这两组共轭节理属陡倾角节理，应为水平构造应力所形成。影响带下层与上层呈对称分布，具有相似的特征。

滑带位于层间剪切带泥化层中(见图 16)，原生厚 5 cm，呈黄黑色软塑状，无擦痕和砂粒定向。滑动后，由于局部剪胀剪缩，导致厚薄不均，滑带为土夹碎石，擦痕、镜面特征明显，其中砾石呈定向排列，含有磨砾，含水量较高，塑性大。

下段滑带切层，发育在浅绿色粉砂岩层中。由于滑坡滑动切层，破坏了浅绿色粉砂岩岩体结构，使下段滑带上下扰动破坏范围较大。

### 4.3 滑带形成演化的内外动力耦合作用机制

(1) 河湖相交替沉积形成软硬互层的地层结构  
千将坪滑坡滑带发育在侏罗系下统的黑色页岩

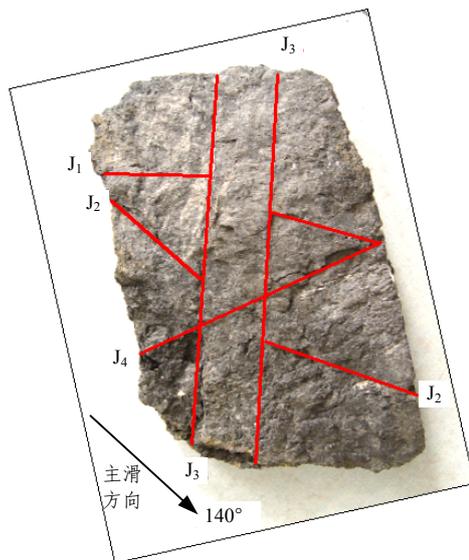


图 15 千将坪滑坡层间剪切带节理分布图

Fig.15 Joints distribution of interbedded shear zone in Qianjiangping landslide



图 16 千将坪滑坡泥化夹层照片

Fig.16 Photo of argillaceous interlayer in Qianjiangping landslide

中。侏罗纪早期，千将坪滑坡区属于内陆河湖，在干湿循环的气候条件下，沉积了砂岩和泥(页)岩互层的地层层序。随着上覆地层的增厚，一定的温度和压力条件下，砂泥(页)沉积层中的孔隙水逐渐排出，区内侏罗系地层成岩，形成砂泥(页)岩互层的地层结构。千将坪滑坡层间剪切带的原岩即为侏罗系下统的黑色页岩，为湖沼相沉积，原岩厚约 15 cm。

#### (2) 构造运动形成层间剪切带

根据地质年代的顺序，侏罗系地层形成以来，研究区经历的构造运动有：燕山运动、喜山运动和新构造运动。这三次构造运动均对侏罗系层间剪切带的形成演化有着重要影响。据分析，在层间剪切

带中发现的不同时期形成的两组共轭剪切节理就是二次构造运动的产物。

第一组共轭节理( $J_1$  和  $J_2$ )的走向分别为  $91^\circ$  和  $132^\circ$ (见图 15)。据节理应力分析, 形成该组共轭节理的最大主应力方向应为节理锐角夹角的角平分线, 即  $112^\circ$ 。该角度与本区燕山运动区域构造应力方向(NWW 向)一致。可见, 燕山运动形成了第一组共轭节理。此次构造运动导致侏罗系水平地层发生第一次褶曲, 受到层间剪切作用, 软硬相间的软岩层易发生剪应力集中, 产生剪应变。NWW 向的层间剪切作用使千将坪滑坡区黑色页岩产生剪应变, 黑色页岩中层为剪切区(A 区), 而上、下层为影响带(B 区), 如图 13 所示。层间剪切作用在剪切区产生劈理, 在影响带产生裂隙。此时层间剪切带虽遭受剪切揉搓, 但裂隙仍是闭合的。

第二组共轭节理( $J_3$  和  $J_4$ )的走向分别为  $3^\circ$  和  $65^\circ$ (见图 15)。据 X 状剪节理的应力分析, 形成该组节理的最大主应力方向应为  $34^\circ$ , 与本区喜山运动区域构造应力方向(NNE 向)一致。可见, 喜山运动时, NNE 向的构造应力, 使千将坪滑坡区黑色页岩层间剪切带遭受第二次剪切作用, 发生第二次层间错动。但产生这一次层间剪切的主应力方向发生了变化, 由燕山运动时的 NWW 向变为 NNE 向, 方位变化近  $80^\circ$ 。此次层间剪切作用使黑色页岩层间剪切带结构进一步破坏, 剪切区和影响带的结构变得更加疏松。

新构造运动时期, 受青藏高原隆起影响, 滑坡区构造运动表现为地壳抬升, 青干河河谷高程约为 180 m 时, 根据田陵君等<sup>[47]</sup>对新滩势大岭和冠包阶地的 ESR 测年,  $T_{III}$  高程为 170~180 m, 底部 ESR 年龄为  $8.9 \times 10^4$  a, 顶部 ESR 年龄为  $6.7 \times 10^4$  a。上游巫山的地壳抬升速度为 0.56 mm/a, 下游宜昌的地壳抬升速度为 0.30 mm/a, 研究区地壳抬升速度位于二者之间, 区域河谷切割速度较以前有大幅提高, 河流快速下切, 青干河岸坡岩体卸荷松动, 导致层间剪切带再次遭受层间剪切作用, 影响带裂隙开启。

因此, 燕山运动、喜山运动和新构造运动等地球内动力作用, 使千将坪滑坡区黑色页岩形成结构疏松的层间剪切带。

### (3) 暖湿气候使层间剪切带转变为泥化夹层

滑带原岩是黑色页岩, 属于湖沼相沉积, 但在层间剪切带的影响带裂隙中充填的方解石并非成岩时形成, 属于后生形成, 是由富含  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$  的地下水析出  $\text{CaCO}_3$  而成。方解石的沉积速率受环境温度、水动力条件和水层厚度(取决于水力坡度和

降水量等), 及溶液中钙浓度等多因素的控制。温度愈高, 流速愈快, 水层厚度愈大, 溶液中钙浓度愈高, 方解石沉积速率愈大<sup>[23]</sup>。因此, 层间剪切带的影响带(B 区)裂隙中充填的方解石, 是层间剪切带地下水动力作用强烈时在裂隙中结晶形成的。这也表明研究区当时的地下水作用较为强烈。

另一方面, 可根据方解石的年龄确定裂隙形成时间的下限和暖湿气候的时间。利用地质年龄测定方法中的铀系测年方法, 测得方解石的形成年代约为  $7.8 \times 10^4$  a 左右, 相当于晚更新世早期, 根据深海岩芯  $\delta^{18}\text{O}$  同位素气候分期(MIS), 属于 MIS5 暖湿期。

所以在  $7.8 \times 10^4$  a 之前, 受青藏高原隆起影响, 本区新构造运动表现为地壳抬升, 河流快速下切, 岸坡岩体卸荷松动, 青干河岸坡发生应力重分布, 导致层间剪切带再次遭受层间剪切作用, 影响带裂隙开启。在 MIS5 和之后的 MIS3 暖湿的气候环境下, 地下水动力作用加强, 在强烈的地下水交替作用下, 富含  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$  的地下水在影响区裂隙析出  $\text{CaCO}_3$ , 形成方解石。

而剪切区发生剪切变形, 结构遭到进一步破坏, 颗粒分散度增高, 孔隙较小, 发生了泥化。经测试, 泥化夹层的黏土矿物含量增至 19.29%, 蒙脱石含量达 14.23%, 结构疏松(见图 17)。

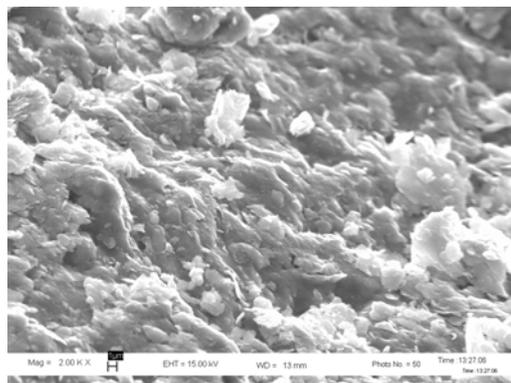


图 17 千将坪滑坡泥化夹层 SEM 照片( $\times 2000$ )  
Fig.17 SEM photo of argillaceous inter layer in Qianjiangping landslide( $\times 2000$ )

层间剪切带剪切区在 MIS5 和 MIS3 发生泥化后, 全新世迎来了 MIS1, 气候暖湿, 由于区域地壳隆升, 层间剪切带泥化进一步加剧, 在多种外因的诱发下, 发生了千将坪滑坡。综上所述, 千将坪滑坡滑带宏观形成演化的四阶段模式可用图 18 来表示。

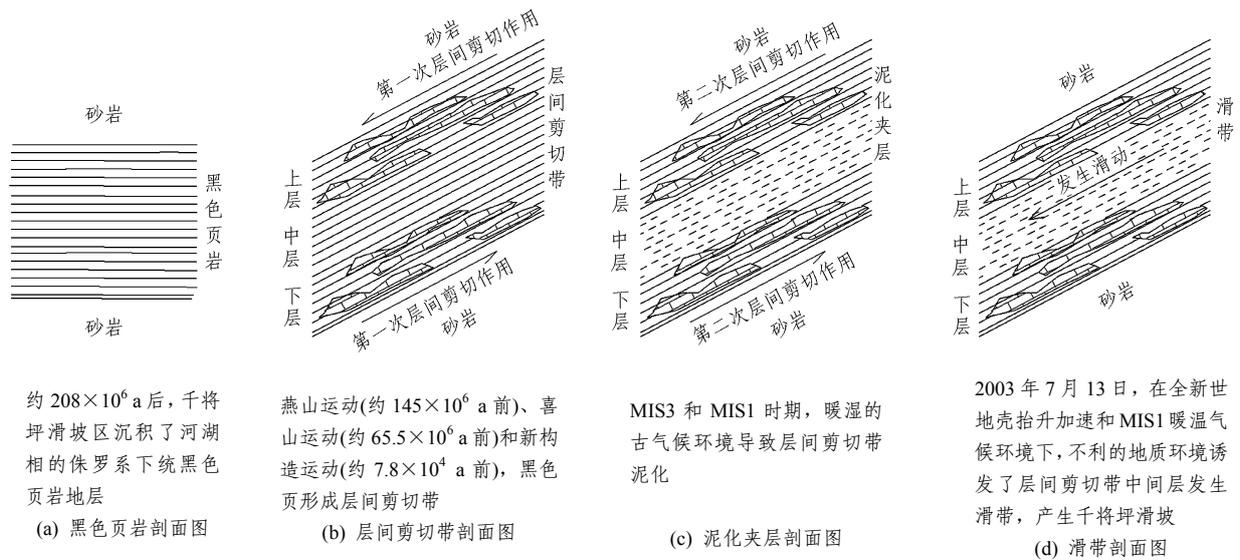


图 18 千将坪滑坡滑带宏观形成演化过程简图

Fig.18 Formation and evolution of sliding zone in Qianjiangping landslide

## 5 结 论

(1) 地壳抬升、断层活动、地震等内动力作用直接或间接地影响着滑坡的形成和演化过程。气候变化是一种重要的外动力作用。它对地形地貌、水文条件、河流侵蚀、风化作用等外部环境因素都会产生重要的影响。三峡库区大型滑坡的时空分布特征表明, 滑坡具有多期性和阶段性, 滑坡的广泛发育是内、外动力共同作用的结果。库区众多古滑坡的发育时间与新构造运动、气候变化的关系说明, 新构造运动(地壳抬升促使河流急剧下切)和第四纪气候变化(强降水过程)的耦合作用是三峡库区发生多期大型滑坡的主要动因。

(2) 基岩顺层滑坡滑带形成演化过程分为 4 个阶段: 层间软岩, 层间剪切带, 泥化夹层和滑带。滑带形成演化的条件是: 淡水湖相沉积和泛滥平原相沉积是其沉积学物质基础, 软硬相间的岩层层序是其发育的地层结构条件, 多期复杂构造运动(燕山运动、喜山运动和新构造运动)的作用是其发育的内动力条件, 暖湿的气候环境和重力地质作用为其提供了必要的外动力条件。

(3) 在特殊的沉积相与沉积韵律条件下, 形成滑坡发育的温床: 软硬相间的地层结构与层间软岩; 层间软岩成岩后, 在多期次的构造运动作用下, 层间软岩经历层间剪切作用, 形成层间剪切带; 在新构造运动的背景下, 多期次间冰期的暖湿气候条件

导致地下水动力作用强烈, 层间剪切带泥化, 形成泥化夹层; 随着降雨、库水位涨落以及人类工程活动等因素的诱发, 导致层间剪切带上覆地层失稳, 泥化夹层从而转变为滑带。从层间剪切带→泥化夹层→滑带的演化也是由于内外动力耦合作用的结果。

(4) 千将坪滑坡是属于新生大型基岩滑坡, 千将坪滑坡的滑带形成离不开两个因素, 即层间剪切作用和地下水与层间剪切带的水岩相互作用。即内外动力耦合作用加剧了层间剪切带物理力学性质的恶化, 促使千将坪滑坡发生。新滑坡在三峡库区滑坡防治中必须要重视和深入研究, 研究重点地层的层间剪切发育规律, 将是发现和预测新生滑坡的一个重要途径。

### 参考文献(References):

[1] 孙广忠, 姚宝魁. 中国滑坡地质灾害及其研究[C]// 中国典型滑坡. 北京: 科学出版社, 1988: 1 - 11.(SUN Guangzhong, YAO Baokui. Landslide geology disaster and landslide investigation in China[C]// China Typical Landslides. Beijing: Science Press, 1988: 1 - 11.(in Chinese))

[2] KILBURN C R J, PASUTO A. Major risk from rapid, large-volume landslides in Europe(EU Project RUNOUT)[J]. Geomorphology, 2003, 54(1/2): 3 - 9.

[3] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 302.(WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Century achievements in engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House,

- 2004: 302.(in Chinese))
- [4] SCHEIDEGGER A E. The fundamental principles of landscape evolution[J]. *Catena*, 1987, 10(Supp.): 199 - 210.
- [5] BURBANK D W, LELAND J, FIELDING E, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwest Himalayas[J]. *Nature*, 1996, 379: 505 - 510.
- [6] SCHEIDEGGER A E. Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya[J]. *Geomorphology*, 1998, 26(1 - 3): 37 - 46.
- [7] SHRODER J F. Slope failure and denudation in the western Himalaya[J]. *Geomorphology*, 1998, 26(1 - 3): 81 - 105.
- [8] WHIPPLE K X, HANCOCK G S, ANDERSON R S. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation[J]. *GSA Bulletin*, 2000, 112(3): 490 - 503.
- [9] HERMANN S R L, STRECKER M R. Structural and lithological controls on large Quaternary rock avalanches(sturzstroms) in arid northwestern Argentina[J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111(6): 934 - 948.
- [10] BOGAARD T A, ANTOINE P, DESVARREUX P, et al. The slope movements within the Mondorès graben(Drôme, France); the interaction between geology, hydrology and typology[J]. *Engineering Geology*, 2000, 55(4): 297 - 312.
- [11] DI LUZIO E, SAROLI M, ESPOSITO C, et al. Influence of structural framework on mountain slope deformation in the Maiella anticline (Central Apennines, Italy)[J]. *Geomorphology*, 2004, 60(3/4): 417 - 432.
- [12] THOMAS M F. Weathering and landslides in the humid tropics: a geomorphological perspective[J]. *Journal of the Geological Society of China(Taipei)*, 1997, 40(1): 1 - 16.
- [13] TRAUTH M H, STRECKER M R. Formation of landslide-dammed lakes during a wet period between 40 000 and 25 000 yr B.P. in northwestern Argentina[J]. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 153(1 - 4): 277 - 287.
- [14] FLAGEOLLET J C, MAQUAIRE O, MARTIN B, et al. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins(Southern French Alps, France)[J]. *Geomorphology*, 1999, 30(1/2): 65 - 78.
- [15] DIXON B N, IBSEN M L. Landslide in research, theory and proceedings[M]. London: Thomas Telford Ltd., 2000: 1 - 3.
- [16] KELLOGG K S. Tectonic controls on a large landslide complex: Williams Fork Mountains near Dillon, Colorado[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(4): 355 - 368.
- [17] 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(2): 115 - 117.(WANG Sijing. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes and origins on serious geological disasters[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(2): 115 - 117.(in Chinese))
- [18] LI J J, XIE S Y, KUANG M S. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2/3): 125 - 135.
- [19] 刘传正. 长江上游川峡二江续接地段岸坡演变过程探讨[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(1): 50 - 54, 59.(LIU Chuanzheng. The study on development process of slope in the connected part between Chuan and Xia rivers in Yangtze River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 50 - 54, 59.(in Chinese))
- [20] 李铁锋. 长江三峡斜坡演变模式与水库蓄水效应研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京大学, 2001.(LI Tiefeng. Slope evolution mode and reservoir sluice effect analysis in the Three Gorges reservoir area [Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Perking University, 2001.(in Chinese))
- [21] 杜榕桓, 刘新民, 袁建模, 等. 长江三峡工程库区滑坡与泥石流研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990.(DU Rongheng, LIU Xinmin, YUAN Jianmo, et al. A study on landslides and debris-flows in the reservoir area of the Three Gorges Project[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [22] 长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.(Water Conservancy Committee of Yangtze River. Geological research for the Three Gorges Project[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [23] 唐红梅, 陈洪凯, 祝晓寅, 等. 重庆库区新构造应力场及其对滑坡宏观活动规律的控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 352 - 356.(TANG Hongmei, CHEN Hongkai, ZHU Xiaoyin, et al. Neotectonic stress field and its impact on macro development of landslides in Chongqing area of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 352 - 356.(in Chinese))
- [24] 张年学, 盛祝平, 孙广忠, 等. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993.(ZHANG Nianxue, SHENG Zhuping, SUN Guangzhong, et al. Research on the bedding bank slopes of the Three Gorges reservoir area, Yangtze River[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.(in Chinese))
- [25] 李兴唐. 长江三峡黄腊石滑坡形成年龄及滑坡类型研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1990, 1(4): 11 - 21.(LI Xingtang. A study of the age of landslides formation and their types in Huanglashi area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1990, 1(4): 11 - 21.(in Chinese))
- [26] 张 生. 第四纪沉积物常用测年方法及其适用性研究[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 24(4): 383 - 388.(ZHANG Sheng. Dating methods used in quaternary noncohesive sediments and their applicability[J]. *Journal of Anhui Normal University(Natural Science)*, 2001, 24(4): 383 - 388.(in Chinese))
- [27] 黄崇福, 王家鼎. 模糊信息优化处理技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995: 24 - 34.(HUANG Chongfu, WANG Jiading. Optimization processing of fuzzy information and its application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1995: 24 - 34.(in Chinese))
- [28] 邓清禄. 斜坡变形构造——巴东新县城斜坡剖析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000: 15 - 18.(DENG Qinglu. Slope deformation structure—slope analysis in Badong New County[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000: 15 - 18.(in Chinese))
- [29] 谭周地, 薄景山. 长江三峡工程库首区地壳稳定性评价与水库诱发地震预测[M]. 北京: 地质出版社, 1991.(TAN Zhouyi, BO Jingshan. Crust stability evaluation and reservoir induced seismic prediction for the front region of the supposed reservoir in the Three Gorges

- Project[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.(in Chinese)
- [30] 殷跃平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 31.(YIN Yueping. Major geologic hazards and the prevention for relocation sites of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 31.(in Chinese))
- [31] 李守定, 李 晓, 张年学, 等. 三峡库区侏罗系易滑地层沉积特征及其对岩石物理力学性质的影响[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 385 - 389.(LI Shouding, LI Xiao, ZHANG Nianxue, et al. Sedimentation characteristics of the jurassic sliding-prone stratum in the Three Gorges reservoir area and their influence on physical and mechanical properties of rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(4): 385 - 389.(in Chinese))
- [32] 李守定, 李 晓, 吴 疆, 等. 大型基岩顺层滑带形成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480.(LI Shouding, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480.(in Chinese))
- [33] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 湖北省秭归县沙镇溪镇千将坪滑坡[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 1.(Working Headquarters for Prevention and Treatment of Geologic Hazards in Three Gorges Reservoir Area. Qianjiangping landslide in Shazhenxi Town, Zigui County, Hubei Province, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 1.(in Chinese))
- [34] 王治华, 杨日红, 王 毅. 秭归沙镇溪镇千将坪滑坡航空遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2003, (3): 5 - 9, 53.(WANG Zhihua, YANG Rihong, WANG Yi. An airborne remote sensing survey of Qianjiangping landslide in Zigui Shazhenxi Town[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2003, (3): 5 - 9, 53.(in Chinese))
- [35] 王治华. 数字滑坡技术及其应用[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 157 - 164.(WANG Zhihua. Progress and applications for digital landslide[J]. Geoscience, 2005, 19(2): 157 - 164.(in Chinese))
- [36] 王治华, 杨日红. 三峡水库区千将坪滑坡活动性质及运动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 5 - 11.(WANG Zhihua, YANG Rihong. The activity characteristics and movement style of Qianjiangping landslide in the Three Gorges reservoir region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 5 - 11.(in Chinese))
- [37] 陈永波, 王成华, 樊晓一. 湖北省千将坪大型滑坡特征及成因分析[J]. 山地学报, 2003, 21(5): 633 - 634.(CHEN Yongbo, WANG Chenghua, FAN Xiaoyi. Landslide feature and the genesis of Qianjiangping large landslide in Hubei Province[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(5): 633 - 634.(in Chinese))
- [38] 崔政权. 滑坡牵动域是滑坡研究领域里的重要内容[J]. 岩土工程界, 2003, 6(11): 66 - 68.(CUI Zhengquan. Influence area of landslide is the important part in landslide research[J]. Geotechnical Engineering World, 2003, 6(11): 66 - 68.(in Chinese))
- [39] 张业明, 刘广润, 常 宏, 等. 三峡库区千将坪滑坡构造解析及启示[J]. 人民长江, 2004, 35(9): 24 - 26.(ZHANG Yeming, LIU Guangrun, CHANG Hong, et al. Tectonic analysis and revelation of Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. Yangtze River, 2004, 35(9): 24 - 26.(in Chinese))
- [40] DAI F C, DENG J H, THAM L G, et al. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area[J]. Canada Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1 233 - 1 240.
- [41] 廖秋林, 李 晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 146 - 3 153.(LIAO Qiulin, LI Xiao, Lee Souting, et al. Occurrence, geology and geomorphic characteristics and origin of Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 146 - 3 153.(in Chinese))
- [42] 三峡大学, 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 三峡库区水库新生型滑坡形成机制和预测评价[R]. 宜昌: 三峡大学, 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2005.(University of Three Gorges, Working Headquarters for Prevention and Treatment of Geologic Hazards in Three Gorges Reservoir Area. Mechanism and forecast of new reservoir-induced landslide in Three Gorges reservoir area[R]. Yichang: China Three Gorges University, Working Headquarters for Prevention and Treatment of Geologic Hazards in Three Gorges Reservoir Area, 2005.(in Chinese))
- [43] 李孝平, 王世梅, 王卓娟, 等. 千将坪滑坡非饱和土土 - 水特征曲线试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(1): 40 - 42.(LI Xiaoping, WANG Shimei, WANG Zhuojuan, et al. Experimental research on soil-water curve of unsaturated soil of Qianjiangping landslide[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2007, 29(1): 40 - 42.(in Chinese))
- [44] 杨为民, 吴树仁, 石菊松, 等. 湖北秭归千将坪岩质滑坡形成机制分析[J]. 煤炭工程, 2006, (4): 57 - 59.(YANG Weimin, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Mechanism analysis of Qianjiangping rock landslide in Zigui County, Hubei Province[J]. Coal Engineering, 2006, (4): 57 - 59.(in Chinese))
- [45] 李守定, 李 晓, 刘艳辉, 等. 千将坪滑坡滑带地质演化过程研究[J]. 水文地质与工程地质, 2008, 35(2): 18 - 23.(LI Shouding, LI Xiao, LIU Yanhui, et al. Geological evolution process of sliding zone in Qianjiangping landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(2): 18 - 23.(in Chinese))
- [46] 中华人民共和国地质部水文地质工程地质局. 1:20万区域工程地质普查报告巴东幅[R]. 北京: 中华人民共和国地质部水文地质工程地质局, 1977: 153.(Bureau of Hydrology and Engineering Geology, Ministry of Geology of People's Republic of China. Investigation report of regional engineering geology—Badong area in the scale of 1:200 000[R]. Beijing: Bureau of Hydrology and Engineering Geology, Ministry of Geology of People's Republic of China, 1977: 153.(in Chinese))
- [47] 田陵君, 李平忠, 罗 雁. 长江三峡河谷发育史[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996: 16 - 20.(TIAN Lingjun, LI Pingzhong, LUO Yan. Developmental history of river valley in Three Gorges, Yangtze River[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1996: 16 - 20.(in Chinese))