

贵州省地质矿产局区域地质调查研究院

贵州省地质调查院

贵州省地质矿产局遥感站

国家“863”项目（编号：2003AA135120）

# 喀斯特地区典型地质灾害 及其遥感影像特征

——以贵州省为例

况顺达 王尚彦 戴传固 著  
刘沛 姚智 况忠 李硕

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

在解译大量大比例尺航空照片的基础上,以中国西南地区喀斯特地质灾害最发育的贵州省为实例,对喀斯特地区常见的滑坡、崩塌、泥石流、岩溶塌陷等突发性、危害性强的地质灾害进行了比较系统的研究,介绍了喀斯特地区地质灾害的类型、形成条件、活动特征和地质灾害链;并总结了喀斯特地区地质灾害的遥感解译标志、遥感调查特点及其典型遥感图像特征。书中的航空照片均为立体像对,并配有文字说明,借助反光立体镜可进行直观、形象、生动的立体观测。

本书是在长期生产实践和科学研究所积累的大量遥感图像中,遴选出了120多对典型航空像对及部分高分辨率SPOT图像,以此反映喀斯特地区常见地质灾害的特征,资料丰富,图文并茂,内容详实。

本书可作为工程地质勘察、遥感地质专业高校学生的参考教材,以及供从事工程地质勘察的工程技术人员、地质灾害调查及地方国土资源管理部门等的工作人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

喀斯特地区典型地质灾害及其遥感影像特征:以贵州省为例/况顺达等著. —北京:地质出版社,2005.8

ISBN 7-116-04510-4

. 喀... . 况... . 遥感技术 - 应用 - 地质灾害 - 监测 - 喀斯特地区 . P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第078993号

KASITE DIQU DIANXING DIZHI ZAIHAI JIQI YAOGAN YINGXIANG TEZHENG

责任编辑:王 璞

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324572(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:889 mm×1194 mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:9.25 图版:48页

字 数:246千字

印 数:1—700册

版 次:2005年8月北京第一版·第一次印刷

定 价:36.00元

ISBN 7-116-04510-4/P·2594

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

# 前 言

目前,国内外学者对地质灾害一词的定义有不同的认识,主要有两种:一种认为地质灾害是地质体发生形变和位移而危害人类生存和发展的灾害;另一种认为对人类生存和发展造成不良影响,甚至导致人类生命财产损失的地质过程是地质灾害(张梁等,1994;张磊,2004)。后者按成因又将其进一步分为自然地质灾害、人为地质灾害、复合地质灾害三种,按发生时间进一步分为现代地质灾害和古代地质灾害,按对人类造成破坏时间的长短进一步分为短期地质灾害和长期地质灾害。短期地质灾害包括地震、火山爆发、海啸、洪水、泥石流、滑坡、岩崩等在短时间内即可显示出其危险性的地质灾害。长期地质灾害包括诸如土地沙漠化、石漠化、盐渍化、水土流失、地面沉降、海水入侵、地下水污染、资源短缺、气候长周期演变、可食用淡水减少、某些地方病蔓延等在较长时间内(数年、数十年甚至更长时间)逐渐显示出其严重危害性的地质灾害。本书研究的地质灾害主要集中于常发生在喀斯特山地环境中的滑坡、崩塌、岩溶塌陷、泥石流等突发性地质灾害。研究的地区集中在中国西南地区,解剖实例主要在西南地区的贵州省,因为在中国西南地区喀斯特分布广泛,贵州尤为典型。在中国西南地区特殊的喀斯特脆弱生态环境系统中,各类地质灾害频繁发生,严重影响了当地居民的生命和财产安全。每年因各类地质灾害造成的直接经济损失达数千万元之巨,并造成人员伤亡,成为社会、经济发展的一大制约因素。该区喀斯特分布范围内地质灾害具有其独特的发育特征、演化规律及保存条件,是各类喀斯特地质灾害的天然博物馆。因此,本书以此作为窗口进行综合研究有很好的代表性。

喀斯特地区地形条件复杂,单纯依靠地面调查地质灾害,不仅周期长、费用高,且难以准确判断。利用遥感技术不但可准确、直观、全面、多角度地观察和研究地质灾害,还可以利用多时像的遥感资料,动态地观察地质灾害的发生、发展等过程,为地质灾害地面调查及后续治理提供指导。目前,遥感技术用于地质灾害调查与研究方兴未艾,国内外众多的专家学者利用遥感技术调查与研究地质灾害取得了许多成功经验和调查研究成果(Mantovani et al., 1996; Singhroy, V. et al., 1998; Hervás et al., 2003; 张振德等, 2003; 于学政等, 2003)。利用遥感技术监测发生在我国西藏的易贡大滑坡是一典型的成功范例(朱博勤等, 2001; 王治华等, 2001; 吕杰堂等, 2002)。随着遥感技术向多平台、高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率、高定位精度及立体三维成像技术方面发展,将会更直接、准确、逼真、动态地反映地质灾害的特征,为政府减灾防灾工作提供资料,为预防地质灾害,减少地质灾害对人民生命和财产的危害,为喀斯特分布区的经济和社会稳定可持续发展提供服务。

贵州省地质矿产局遥感站经过两代人的辛勤工作,对覆盖贵州省内喀斯特地区所有航空照片,包括航摄比例尺为1:5万、1:2.5万、1:1.4万及1:8000,拍摄时间从20世纪50年代到90年代多个时像的数万张航片及Landsat TM/ETM+、SPOT、Aster等航天遥感数据进行了全面细致的解译,包括基础地质、矿产与环境地质中的遥感专项

调查，公路（含高等级公路）与铁路建设、大型水库及水电站建设中的前期遥感调查，城市遥感、县市地质灾害调查等工作，覆盖多个应用领域。尤其在喀斯特地区地质灾害遥感解译方面积累了丰富的经验与大量基础资料。本书就是对上述成果一个方面的总结。项目组经过长期的思考、辛勤工作而努力，将各类喀斯特地质灾害遥感调查、应用的成功经验及成果进行认真细致的总结后，并精选其典型影像编撰成本书，供各位同仁参考。

本书是集体智慧的结晶，由况顺达、王尚彦、戴传固、刘沛、姚智、况忠及李硕编纂完成。全书由况顺达负责起草，王尚彦修改统稿，林卫华清绘插图。

况顺达

2005年4月

# Introduction

The south-west karst region of China is in the second step of China landform unit, which rises gradually from east to west in general, with the incising depth largening continually. The mid-west and north is higher, the east and south is lower. Its terrain and landform is very complicated. Various kinds of karst landforms are distributed in this region, from the karst high mountain and canyon to the low mountains and hills, from karst plateau to karst peak forest, or karst cluster or karst plain, etc. . Due to the effect of the strong uplift of Qinghai-Tibet Plateau, the southwest karst region has been in a lifting background since Tertiary Period, such rise of regional crust affect the evolution of the landform comprehensively and deeply, making terrain more fluctuant in this region, especially in canyon area and slope-break zone, where the mountains and valleys intervein the valley each other, the crags dip steeper, the slope is larger, the potential energy is higher, the weak discontinuities are exposed, making some geologic body more dangerous and easier to lose stability. The special karst geomorphologic environment has offered the advantage for the development of geologic hazards, especially make great help to the gestation, formation and development of landslide, rockfall, karst collapse and debris flow, etc. . Those geologic hazards influence the safety of local s inhabitants and their properties seriously, and directly resulted in economic losses of multimillion RMB every year, it also makes large casualty and becomes a big restricting factor of the development of society and economy in karst region. The geologic hazard in karst region has been a primary factor for economy progress of this region.

In this book, research cases of geologic hazard are picked from the south-west of China, and the analytical examples are put on Guizhou Province of SW China, and research contents are concentrated on the paroxysmal geological hazards such as landslide, rockfall, karst collapse and debris flow etc. , which happen in karst region subsequently. Because the karst region has unique developing features, evolutionary rules and preservative conditions, it becomes a natural museum of different kinds of karst geologic hazards. This book regards it as a window to carry on comprehensive research which has good representativeness.

In karst region, the terrain relief is very complicated, and applying RS technology is more efficient and precise than applying single fieldwork survey in geologic hazard research. It is precise, intuitionistic, and comprehensive to observe and study the geologic hazards from various visual angles by using RS technology. It also could observe the process of happening and development of geologic hazards dynamically by using multi-periodic RS data, and offer guidance for the investigation and post-disposal. At present, using RS technology in the investigation and study of geologic hazards is in the ascendant, numerous experts and scholars both at home and abroad utilizing the RS technology to do this kind of job have got lots of suc-

successful experience and research results ( Mantovani et al. , 1996; Singhroy, V. et al. , 1998; Herv á et al. , 2003; Zhang Zhende , et al. , 2003; Yu Xuezheng , et al. , 2003) . The application of RS to study the landslide in Yigong of Tibet is a typically successful case ( Zhu Boqin et al. , 2001; Wang Zhihua, et al. , 2001; Lu Jietang, et al. , 2002) . Along with the RS technology developing forward to multi-platform, high spatial resolution, high temporal resolution, high spectral resolution, high orientation precision and tridimensional three-dimensional imaging technology, it will reflect the characteristics of the geologic hazards more directly, accurately, vividly and dynamically. They can also provide help for decision-making of government to prevent and cut down the losses of geologic hazard in this region; moreover, they can also offer some references for other regions, serving for the sustainable development of karst regions. Therefore, this volume is a systematic introduction to the RS interpretation and surveying method of geologic hazard.

1. In this volume, the main types, formation conditions, activity characteristic and geologic disaster chain of geologic hazards in karst region were summarized and concluded systematically. The main geologic hazards are karst desertification, karst collapse, karst waterlog, landslide, rockfall and debris flow in karst region. But karst collapse, landslide, rockfall and debris flow are special, sudden and representative geologic hazards in karst region, and they are the emphases of the study in this book.

2. The deep analysis is given on the formative conditions and factors of the geo-hazard such as landform, climate, stratum lithology, tectonics and human activities.

3. Different kinds of geologic hazards in karst region are interrelated, inter-triggered and inter-transformed each other, offering very important information for the prediction and prevention of geologic hazards. This volume points out that the common geologic hazards chain in karst region include:

collapse or landslide landslide, landslide collapse, collapse or landslide debris flow, karst collapse collapse and landslide.

4. The characteristics of RS investigation, image features and interpretation signs in karst region are discussed in this book. The methods in RS investigation of landslide, rockfall, debris flow and karst collapse are introduced in detail through vivid concrete cases.

5. The features of geo-hazard are reflected in the 120 stereo photo-pairs ( including some TM/ETM + , SPOT, Aster images and etc. ) which are typical cases of the thousands types of geo-hazard selected from 60, 000 aerial stereo-photos in karst region in Guizhou. The hazard bodies confirmed after especial field survey are reliable, each of which is outlined with clear and easy-understand lines, accompany with literal illustrations. It can be carried on ocular, visual and vivid three dimensional observation by using stereo viewer.

6. 30 illustrations and 127 plates are included in this book. The data are abundant, both pictures and texts are excellent. The characters are brief and concise, easy-to-understand. A large number of analytic illustrations of the characteristics of geologic hazards is a direct expression of geologic hazards in karst region. These two attempts is one of the features of this

book, hoping that relational researches could understand easily and accept it.

All the aerial images covered the karst region in Guizhou Province are analyzed comprehensively and carefully by RS Station of Guizhou Geologic and Mineral Bureau through two generations hardworking. These original data include: nearly sixty thousands of images with a aerophotographic scale of 1 50 000, 1 25 000, 1 14 000  $\pm$ , and 1 8 000 photographed from 1950s to 1990s, and space RS data such as Landsat TM/ETM+, SPOT, Aster etc. . The analysis include fundamental geology survey, special investigation in mineral and environmental geology, RS investigation in the construction of roads ( include high-grade roads), railways, large-scale reservoirs and hydro-power construction, urban RS and investigation of geologic hazards in counties and cities, all of which cover lots of applications. Especially we accumulate abundant experience and basic data in RS analysis of geologic hazards in karst region, and the book is a summary of these achievements. The project team compiles this book after carefully summarizing the RS investigations in various karst geologic hazards, successful experience of application and achievements, and picking out typical images through long-time thinking and hardworking, in order to sum up the experience in RS analysis of geologic hazards in karst region in the past many years, discuss together with fellows both at home and abroad, which will be advantageous to reducing and preventing the hazards. Geologic hazards is one of focus problem of both common people and government because it could bring great harms to the economy, life and properties of human directly and indirectly. How to use advanced technology such as RS, GIS etc. to investigate, predict and deal with geologic hazards is an important task of science and technology workers and engineers, hope that this book can get a result of casting a brick to attract jade.

This book is a crystallization of collective intelligence. It is compiled by Kuang Shun-da, Wang Shang-yan, Dai Chuan-gu, Liu Pei, Yao Zhi, Li Shuo, Kuang Zhong. Kuang Shun-da is responsible for the draft which is corrected by Wang Shang-yan, and the illustrations are drawn by Lin Wei-hua.

This book could be used as a textbook for college students who study engineering geological exploration and RS geology. It also could be used as a reference for workers who engage in engineering geological exploration, geologic hazards investigation and national land and resource management.

Kuang Shun-da

2005. 4

# 目 录

## 前 言

## Introduction

第一章 喀斯特地区地质灾害 .....	(1)
第一节 喀斯特地区地质灾害的类型 .....	(1)
一、滑坡 .....	(1)
二、崩塌 .....	(2)
三、泥石流 .....	(3)
四、岩溶塌陷 .....	(5)
第二节 喀斯特地区地质灾害的形成条件 .....	(6)
一、地貌与地质灾害 .....	(6)
二、气候与地质灾害 .....	(7)
三、地层岩性与地质灾害 .....	(7)
四、构造与地质灾害 .....	(9)
五、人类活动与地质灾害 .....	(12)
第三节 喀斯特地区的地质灾害链 .....	(12)
一、崩塌或滑坡 滑坡 .....	(13)
二、滑坡 崩塌 .....	(13)
三、崩塌、滑坡 泥石流 .....	(13)
四、岩溶塌陷 崩塌、滑坡 .....	(13)
第四节 喀斯特地区地质灾害的活动特点 .....	(14)
第二章 喀斯特地区地质灾害遥感调查概况 .....	(15)
第一节 地质灾害遥感调查的研究现状 .....	(15)
第二节 喀斯特地区地质灾害遥感调查的特点 .....	(16)
一、视域广阔、信息丰富 .....	(16)
二、表现形式多样、能进行立体观测 .....	(16)
三、可以进行动态监测 .....	(16)
四、数据特征决定调查和监测精度 .....	(16)
五、喀斯特地区地质灾害的遥感影像比较清晰 .....	(17)
第三章 喀斯特地区地质灾害遥感调查 .....	(18)
第一节 喀斯特地区地质灾害遥感影像特征 .....	(18)
一、喀斯特地区地质灾害遥感判读标志 .....	(18)
二、喀斯特地区地质灾害遥感影像特征 .....	(18)
第二节 喀斯特地区地质灾害遥感调查 .....	(20)
一、滑坡遥感调查 .....	(20)
二、崩塌遥感调查 .....	(28)
三、崩塌、滑坡发育的地质模式 .....	(28)

四、泥石流遥感调查 .....	(31)
五、岩溶塌陷遥感调查 .....	(34)
结 语 .....	(37)
主要参考文献 .....	(38)

# 第一章 喀斯特地区地质灾害

## 第一节 喀斯特地区地质灾害的类型

喀斯特地质灾害主要包括石漠化、岩溶塌陷、岩溶洪涝、滑坡、崩塌、泥石流等。其中的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害在非喀斯特地区也较常见，但岩溶塌陷、石漠化、岩溶洪涝等却是喀斯特地区特殊的具代表性的地质灾害类型。本书以崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷等四类突发性、危害性强的喀斯特地区地质灾害作为主要研究对象。

### 一、滑 坡

#### (一) 滑坡的概念

学术界对滑坡的定义有不同的描述。国际地科联滑坡工作组对滑坡定义为“滑坡是大量的岩石、土或岩屑顺斜坡而下的运动”；刘传正等将滑坡定义为“滑坡指斜坡岩体或土体依附于其内在或潜在软弱面（带），在重力等综合因素作用下，失去原有平衡条件而产生的水平位移为主的滑动地质现象”（刘传正等，2000）。它是山地自然环境中较为常见的斜坡破坏形式。一个典型滑坡体的外貌及其所具有的基本形态要素见图1-1、图1-2。滑坡的基本要素包括滑坡体、滑床和滑动面（带）、滑坡周界、滑坡壁、滑坡裂缝、滑坡台阶、滑坡舌等，除以上要素外，还有一些滑坡标志，如滑坡鼓丘、滑坡泉、滑坡沼泽（湖）、马刀树、醉汉林等，各滑坡要素及其涵义见表1-1（刘传正等，2000）。这些滑坡要素及滑坡标志是遥感判译滑坡的基本特征。

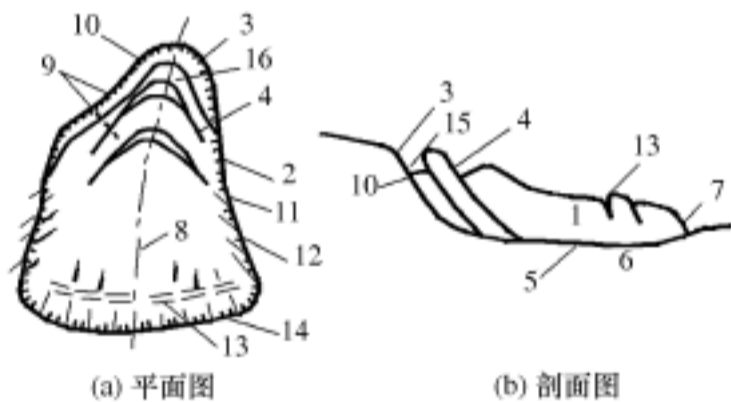


图1-1 滑坡要素平剖面示意图

（据刘传正等，2000）

图中数字代表滑坡要素，注释见表1-1

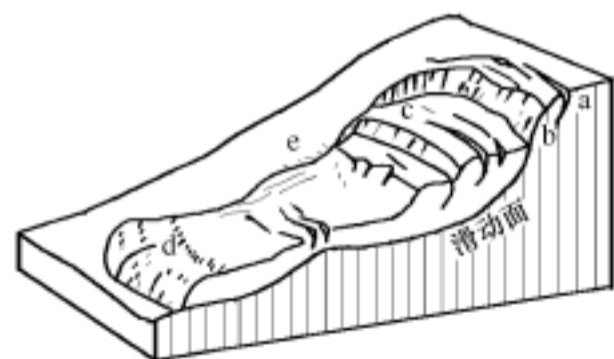


图1-2 滑坡体外貌图

（据刘传正等，2000）

a—后缘环状拉裂缝；b—滑坡断壁；c—横向裂缝及滑坡台阶；  
d—滑坡舌及膨胀裂缝；e—滑坡侧壁及羽状裂缝

#### (二) 滑坡的分类

国内外对滑坡分类的依据各异，方案较多。下面是我国几种常见的分类方案。

- 1) 按滑面与岩层层面的关系分为：无层（均质）滑坡、顺层滑坡和切层滑坡三类。
- 2) 按滑坡始滑部位分为：牵引式滑坡、推动式滑坡、混合式滑坡及平移式滑坡四类。
- 3) 按岩土体性质分为：基岩滑坡和松散层（土体）滑坡两大类，后者又进一步划分为黏性土滑坡、黄土滑坡、堆添土滑坡、堆积土滑坡、破碎岩石滑坡等。

表 1-1 滑坡要素及其涵义

滑坡要素	涵义	
滑坡体 (1)	滑坡发生以后, 相对于母体产生位移的滑动部分就是滑坡体, 简称滑体	
滑坡周界 (2)	滑坡体和周围不动体在平面上的分界线, 即称滑坡周界; 滑坡周界圈定了滑坡区或滑坡范围	
滑坡壁 (3)	滑坡体后缘位移后残留的母岩陡壁, 多呈弧状外貌	
滑坡台阶 (4)	滑坡上, 由于各段岩、土体运动速度的差异所形成的错台及错壁, 简称为台阶	
滑动面 (5)	滑坡体依附于母岩作下滑移动的软弱面, 叫滑动面, 简称滑面	
滑动带 (5)	平行滑面附近受揉皱及剪切的地带, 厚数厘米至数米	
滑坡床 (6)	滑体沿滑动面滑动时, 依附的下伏不动体叫滑坡床, 简称滑床	
滑坡舌 (7)	在滑体前部, 形如舌状伸入沟壑或河道中的部分叫滑舌, 滑舌也叫滑坡前缘	
主滑线 (或称滑坡轴) (8)	滑坡在滑动时, 滑体运动速度最快的纵向线叫主滑线; 它代表整个滑坡滑动方向, 位于滑体上推力最大、滑床凹槽最深的纵断面上, 可为直线或曲线; 此断面又称滑坡主轴断面	
滑 坡 裂 缝	拉张裂缝 (9) 主裂缝 (10)	分布在滑坡体的后部, 长数十至数百米, 多呈弧形, 和滑壁走向大致吻合或平行; 因受滑体向下滑动的拉力, 均为张开裂缝, 叫拉张裂缝; 滑坡体后缘接近滑坡壁的裂缝称主裂缝
	羽状裂缝 (11) 剪切裂缝 (12)	分布在滑坡体中部的左右两侧, 因下滑与相邻的不动体相对位移, 在滑体和不动体的分界处形成剪切区, 在此区内形成的裂缝为剪切裂缝; 在此裂缝的两侧常伴有羽状裂缝
	臃胀裂缝 (13)	分布在滑体的前部, 因滑体下滑受阻而隆起形成张性裂缝, 叫臃胀裂缝, 其方向垂直于滑动方向
	扇状裂缝 (14)	分布在滑坡中前部, 尤其以滑舌部分为多; 因滑体滑到下部向两侧扩散, 形成张开的裂缝, 此裂缝在滑体中部近于平行滑动方向, 在滑舌部分呈放射状, 故称为扇状张裂缝
封闭洼地 (15) (滑坡地壑)	滑体与滑坡壁之间的拉开沟、槽, 相邻楔体成反坡地形; 此沟、槽部分即成为四周高中间低的封闭洼地; 洼地往往由于地下水在此处出露或地表水的汇集, 成为喷泉、湿地或水塘, 所以也称滑坡湖	
滑坡基线 (16)	滑坡床与斜坡地面的交线 (即滑坡体剪切滑动出口位置), 可在斜坡基底附近或稍远处出现	

(据刘传正等, 2000)

4) 滑坡按发生年代可分为: 新滑坡 (近 50 年内)、老滑坡 (大于 50 年至全新世) 和古滑坡 (晚更新世及其以前)。

5) 滑坡按滑体厚度可分为: 浅层滑坡 (滑体厚度  $h \leq 10$  m)、中层滑坡 ( $10 \text{ m} < h \leq 25$  m)、深层滑坡 ( $25 \text{ m} < h \leq 50$  m) 和超深层滑坡 ( $h > 50$  m)。

6) 滑坡按滑体体积可分为: 小型滑坡 (滑体体积  $v \leq 10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), 中型滑坡 ( $10 \times 10^4 \text{ m}^3 < v \leq 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), 大型滑坡 ( $100 \times 10^4 \text{ m}^3 < v \leq 1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ) 和特大型滑坡 ( $v > 1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ )。

7) 滑坡按诱发因素可分为: 工程滑坡 (由工程活动诱发) 和非工程滑坡 (由自然因素和其他人为因素诱发)。

8) 滑坡因滑体滑动 (运动) 速度的不同, 可分为蠕动滑坡、常速滑坡、高速滑坡。高速滑坡据产生高速的原因进一步分为启程高速滑坡和滑程高速滑坡。

## 二、崩 塌

### (一) 崩塌的概念

高陡斜坡 (含人工边坡) 上的岩土体完全脱离母体后, 以滚动、跳动、坠落等为主的移动现象与过程, 称为崩塌。危岩体是正在开裂变形, 并可能发生崩滑的危险山体 (刘传正, 2000)。崩塌一般发生在高陡斜坡的坡肩部位, 质点位移矢量垂直方向比水平方向要大得多, 崩塌发生时无依附面, 常常是突然发生、运动快速。

### (二) 崩塌的分类

下面是国内常见的三种崩塌分类方案。

1) 按崩塌起始运动形式分类 (据胡厚田, 1989; 表 1-2): 倾倒式崩塌、滑移式崩塌、错断式崩塌、拉裂式崩塌、膨胀 (塑流) 式崩塌、陷落挤出式崩塌。

表 1-2 崩塌分类说明

说明 类型	岩性	结构面	地貌	崩塌体形状	受力状态	起始运动形式	失稳主要因素
倾倒式崩塌	黄土、石灰岩及其他直立岩层	多为垂直节理、柱状节理，垂直于岩层面	峡谷、直立岸坡、悬崖等	板状、长柱状	主要受倾覆力矩作用	倾倒	静水压力、动水压力、地震力、重力
滑移式崩塌	多为软硬相间的岩层，如石灰岩夹薄层页岩	有倾向临空面的结构面（可能是平面、楔形或弧形）	陡坡通常大于 55°	可能组成各种形状，如板状、楔形、圆柱状等	滑移面主要受剪切力	滑移	重力、静水压力、动力压力
膨胀式崩塌	直立的黄土粘土或坚硬岩石下有较厚软岩层	上部为垂直节理、柱状节理，下部为近水平的结构面	陡坡	岩体高大	下部软岩受垂直挤压	膨胀，伴有下沉、滑移、倾斜	重力及水的软化作用
拉裂式崩塌	多见于软硬相间的岩层	多为风化裂隙和重力拉张裂隙	上部突出的悬崖	上部硬岩层以悬臂梁形式突出	拉张	拉裂	重力
错断式崩塌	坚硬岩石或黄土	垂直裂隙发育，通常无倾向临空面的结构面	大于 45° 的陡坡	多为板状、长柱状	自重力引起的剪切力	错断	重力
陷落挤出式崩塌	可溶岩或含矿岩层	垂向裂隙发育，有倾向临空面的结构面	大于 45° 的陡坡	楔状、块状岩块及其他形状	自重力引起的张力剪力，作用于空区顶板	陷落下沉	重力、地震力

(据胡厚田, 1989)

2) 动力成因分类 (刘广润, 1997): 自然动力型 (降雨型、冲蚀型、风化剥蚀型、地震型、堆积加载型) 和人工动力型 (明挖型、洞掘型、爆破型、水库型、渗漏型、人工加载型)。

3) 潜在崩塌体规模 (体积) 分类: 巨型  $>100 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 大型  $100 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 中型  $25 \times 10^4 \sim 1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 小型  $<1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

### 三、泥石流

#### (一) 泥石流的概念

泥石流是发生在山区的一种携带有大量泥砂、石块的暂时性急水流，其固体物质的含量有时超过水量，是介于挟砂水流和滑坡之间的土石、水、气混合流或颗粒剪切流。它往往突然暴发，来势凶猛，运动快速，历时短暂，严重地影响着山区场地的安全，是严重威胁山区居民安全和工程建设的重要工程地质和岩土工程问题 (李智毅等, 2000)。

#### (二) 泥石流形成条件

泥石流是在有利于大量地表径流突然聚集，有利于水流搬运大量泥砂石块的特定地形地貌、地质、气候条件下形成的。有以下四种形成条件。

##### 1. 地形条件

通常多发生于山高沟深、地势陡峻崎岖、沟床纵坡降大的地区。这种陡峻地形条件为泥石流发生、发展提供了充足的位能，赋予泥石流一定的侵蚀、搬运和堆积能量。一般情况下，泥石流多沿纵坡降较大的狭窄沟谷活动。每一处泥石流自成一个流域，典型的泥石流域可划出形成区、流通区和堆积区三个区段，见图 1-3，它包括分水岭脊线和泥石流活动范围内的面积，亦即流水汇流面积与堆积扇面积之和。

形成区 多为三面环山、一面出口的宽阔地段，周围山坡陡峻，地形坡度多为  $30^\circ \sim 60^\circ$ ；沟

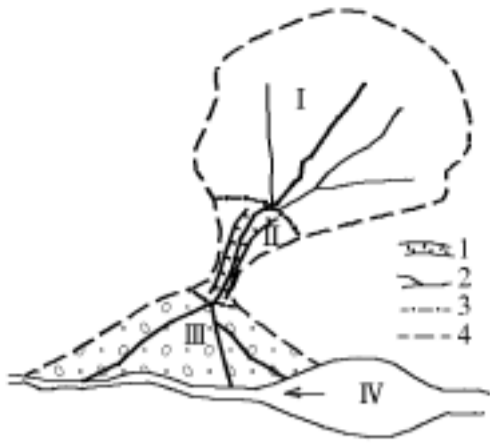


图 1-3 典型泥石流流域示意图  
(据李智毅等, 2000)

—形成区; —流通区; —堆积区;  
—堵塞河流形成的堰塞湖; 1—峡谷; 2—  
河流及冲沟; 3—分区界线; 4—流域界线

床纵坡降可达 30° 以上。它的面积有时可达几十甚至几百平方公里。坡体往往光秃破碎, 无植被覆盖。周围斜坡常为冲沟切割, 崩塌滑坡堆积物发育。这种地形有利于大量水流和固体物质迅速聚积, 并形成具有强大冲刷能力的泥石流。

**流通区** 该区是泥石流搬运通过的地段, 多系狭窄而深切的峡谷或冲沟, 谷壁陡峻而纵坡降较大, 且多陡坎和跌水。所以泥石流物质进入本区后具极强的冲刷能力, 将沟床和沟壁上冲刷下来的土石携走。流通区纵坡的陡缓、曲直和长短, 对泥石流的强度有很大影响。当纵坡陡而顺直时, 泥石流流途通畅, 可直泻下游, 能量大。反之则易堵塞停积或改道, 削弱能量。本区长短不一, 甚至可缺失。

**堆积区** 一般位于出山口或山间盆地边缘, 地形坡度通常小于 5°。由于地形豁然开阔平坦, 泥石流动能急剧降低,

最终停积下来, 形成扇形、锥形或带形堆积滩。典型的地貌形态为洪积扇。堆积扇地面往往垄岗起伏、坎坷不平、大小石块混杂。若泥石流物质能直泻入主河槽, 而河水搬运能力又很强时, 则堆积扇有可能缺乏。由于扇顶侵蚀基准面的长期不断变化, 前后多次泥石流活动的结果, 可使泥石流堆积范围不断前进或后退, 形成所谓溯源侵蚀或溯源堆积。有时因泥石流频繁活动, 可使堆积扇不断淤高扩展, 到一定程度逐渐减弱泥石流对下游的破坏作用。

由于泥石流流域具体地形地貌条件不同, 在有些泥石流流域, 上述三个区段不可能明显分开, 甚至缺乏某个区段。此外, 泥石流流域形态对流域内径流过程有明显影响, 进而影响各种松散固体物质参与泥石流的形成和泥石流规模。

## 2. 地质条件

流域地质条件决定了松散固体物质的来源、组成、结构、补给方式和速度等。泥石流强烈发育的山区, 多是地质构造复杂、岩石风化破碎、新构造运动活跃、地震频发、崩滑灾害多发的地段。这样的地段, 既为泥石流准备了丰富的固体物质来源; 又因地形高耸陡峻, 高差对比大, 为泥石流活动提供了强大的动能优势。

就区域分布看, 泥石流暴发区多位于新构造运动强烈的地震带或其附近。这是因为深大地震断裂带及其附近地段岩体破碎, 崩塌滑坡发育, 为泥石流形成提供了丰富的物质基础。

形成区内地层岩性分布与泥石流物质组成和流态密切相关。在形成区内有大量易于被水流侵蚀冲刷的疏松土石堆积物, 乃是泥石流形成的最重要条件。堆积物成因可分为风化残积的、坡积的、重力堆积的、冰碛的或冰水沉积的各种类型。它们的粒度成分相差悬殊, 大者为数十至上百立方米的巨大漂砾, 小者为细砂、粘粒, 互相混杂。这些疏松堆积物干燥时处于相对稳定状态; 但一旦湿化饱水后, 则会软化崩解, 易于垮塌而被冲刷。喀斯特地区泥石流形成区最常见的岩层是泥岩、页岩、峨眉山玄武岩、泥灰岩等软弱岩层或易风化的岩层。

风化作用也能为泥石流提供固体物质来源, 尤其是在干旱、半干旱气候带的山区, 植被不发育, 岩石物理风化作用强烈, 在山坡和沟谷中堆聚起大量的松散碎屑物质, 便成为泥石流的补给源地。

## 3. 气象水文条件

泥石流形成必须有强烈的地表径流。它是暴发泥石流的动力条件, 其通常来源于暴雨、高山冰雪的强烈融化和水体溃决。水体来源是激发泥石流的决定性因素, 它不仅是泥石流的组成部分, 而且也是搬运介质的基本动力, 故有人说“降雨是祸首”。由此可将它划分为暴雨型、冰雪融化型和水体溃决型等类型。

#### 4. 人为工程

除上述自然条件异常变化导致的泥石流现象发生外，人为工程活动（如毁林、开荒与陡坡耕种，放牧、水库溃决、渠水渗漏、工程和矿山弃渣不当等）越来越成为产生泥石流的触发因素，它不但直接诱发泥石流灾害，还往往加重泥石流活动强度，成为泥石流发生的“催化剂”。这些有悖于环境保护的工程活动，往往导致大范围生态失衡、水土流失，并产生大面积山体崩滑现象，为泥石流发生提供了充足固体物质来源，泥石流的发生、发展又反过来加剧环境恶化，从而形成一个负反馈增长的生态环境演化机制。

#### （三）泥石流的分类

泥石流的分类方法较多，以下是常用和适合现场勘察的泥石流单指标分类方案（表 1-3）（刘传正，2000）。

表 1-3 泥石流分类简表

类别	分类	内容及特征
物质组成	泥流	颗粒均匀，由粒径 $<0.005\text{ mm}$ 的黏粒和 $<0.05\text{ mm}$ 的粉粒组成，偶夹砂和圆砾，有稀性和黏性，主要集中在黄土及火山灰地区
	泥石流	颗粒差异性大，由黏粒、粉粒、砂粒、圆砾、碎块石等大小不同的粒径混杂组成，有黏性和稀性
	水石流	堆积物分选性强，由圆砾、碎块石及砂粒组成，夹少量黏粒和粉粒，为稀性
易发及危险性程度	极易发（严重的）	松散固体物质丰富，植被破坏，水土流失严重，沟口堆积扇发育和河沟沿程堵塞现象严重，塌方面积率 $>10\%$ ，松散物储量 $W > 1 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ ，泥沙补给长度比 $>60\%$ ，泥石流沟综合评判总分 114
	中等易发（中等的）	松散固体物质较丰富，植被部分遭到破坏，水土流失较严重，在河床局部地段形成较严重的坍塌堆积，塌方面积率为 $5\% \sim 10\%$ ，松散物总量 $W = (0.5 \sim 1.0) \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ ，泥沙沿程补给长度比为 $30\% \sim 60\%$ ，泥石流沟综合评判总分为 84 ~118 分
	轻度易发（轻微的）	流域内侵蚀情况明显减弱，河槽堆积物质甚少，植被良好，塌方面积率 $<5\%$ ，松散物储量 $W < 0.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ ，泥沙沿程补给长度比为 $10\% \sim 30\%$ ，泥石流沟综合评判总分为 40 ~90 分
流体性质	黏性	密度 $>1.6\text{ g/cm}^3$ ，黏度 $>0.3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (3P)，固体物质含量在 $40\% \sim 60\%$ ，高者达 $80\%$ ；层流，有阵流，浆体浓稠，承浮和悬托力大，流体直进性强，补给量大
	稀性	密度 $=1.2 \sim 1.6\text{ g/cm}^3$ ，黏度 $>0.3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (3P)，固体物质含量在 $10\% \sim 40\%$ ，有股流及散流现象，浆体浑浊，悬托力弱，堆积物松散，补给量小

（据刘传正等，2000，略有修改）

## 四、岩溶塌陷

### （一）岩溶塌陷的概念

岩溶塌陷是指隐伏岩溶洞穴上的岩、土体覆盖层及赋存其中的水、气组成的综合体系，在自然和人为因素作用下，产生各种破坏其稳定平衡状态的力学效应，导致岩、土体覆盖层向下陷落的作用和现象。其最终结果往往在地面形成塌陷坑，称为地面塌陷；有的陷落作用隐蔽于地下，尚未到达地表，在覆盖层中形成空洞或松散充填的“扰动体”，称为地下塌陷，在土层中发育的空洞称为土洞。

### （二）岩溶塌陷的分类

在喀斯特地区可溶物为碳酸盐岩类，表 1-4 是从塌陷发生时间、成因及该层结构进行分类的方案。

表 1-4 西南喀斯特地区岩溶塌陷的类型

按塌陷时期	按成因		按塌陷盖层结构
	类	型	
古塌陷 (陷落柱)	自然塌陷	重力塌陷; 暴雨塌陷; 洪水塌陷; 地震塌陷	土层塌陷
老塌陷 现代塌陷 (新塌陷)	人为塌陷	抽汲岩溶地下水塌陷; 坑道排水、突水塌陷; 水库蓄水、引水塌陷; 表水或污水下渗塌陷; 震动或加载塌陷; 多种成因复合塌陷	基岩塌陷

(据刘传正等, 2000, 略有修改)

## 第二节 喀斯特地区地质灾害的形成条件

### 一、地貌与地质灾害

喀斯特地区地势起伏较大, 尤其是峡谷地段与地势坡折带, 地面起伏大, 山地与沟谷交错、岩壁陡立, 坡度大, 势能高, 软弱结构面暴露, 危险地质体易于失稳, 这种特殊的喀斯特地貌环境为地质灾害的发育提供了有利条件, 特别有利于崩塌、滑坡和泥石流的孕育、形成和发展。

从喀斯特地区地质灾害发生的频率和强度总体分布看, 它们与地貌的关系密切, 地形切割强烈区常常是崩塌、滑坡的高发区。

在地势的坡折带及峡谷区, 地形被强烈切割, 容易形成具有临空面的自然边坡, 为崩塌与滑坡的发育提供了基本条件。地面切割越深、越容易发生崩塌、滑坡; 切割的深度越大, 产生大型、巨型崩塌、滑坡的可能性越大。对贵州省喀斯特地区内 3000 多个遥感解译出的滑坡、崩塌所处高程分布 (崩塌选择后壁高程, 滑坡选择剪出口高程) 统计后发现: 崩塌、滑坡的分布存在 1000 ~ 1100 m 与 1700 ~ 1800 m 两个峰值, 见图 1-4; 一些大型、特大型滑坡, 均发育于深切河谷的谷坡面上 (图版 51 ~ 53、55、59、96 ~ 100)。

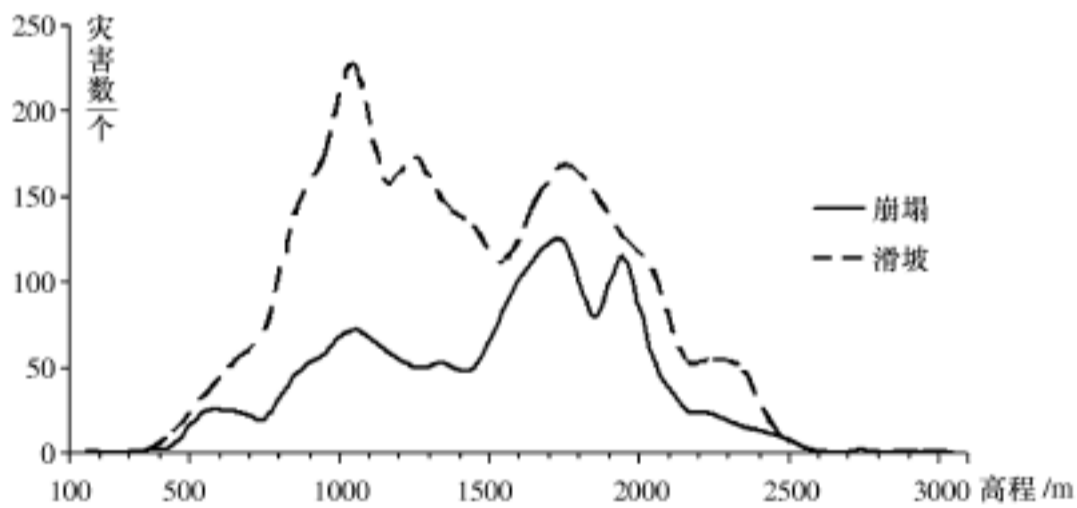


图 1-4 崩塌、滑坡高程分布图

当深切地面的沟谷与褶皱轴部重叠时, 沟谷两侧的谷坡坡面常常是崩塌、滑坡的高发区。

北盘江猴子场流段, 河谷发育在 NW 向的猴子场背斜轴部, 北盘江峡谷谷坡下部地层为下二叠统酒志组泥岩、页岩夹粉砂岩, 栖霞组底部为含炭质页岩, 与谷坡坡肩位置的栖霞组中上部灰岩及茅口组上部构成软硬叠伏带, 沿峡谷两岸谷坡, 发育大量的崩塌、滑坡, 见图 1-5。

基岩塌陷主要发育于深切河谷 (峡谷区) 及地势陡降地带, 如平塘—紫云一带、南盘江及北盘江峡谷区等。

土层塌陷 (土洞) 主要发生在坡度较缓的岩溶盆地、岩溶高原面、溶丘台面、岩溶槽谷等地带。如水城盆地、黔中高原等。

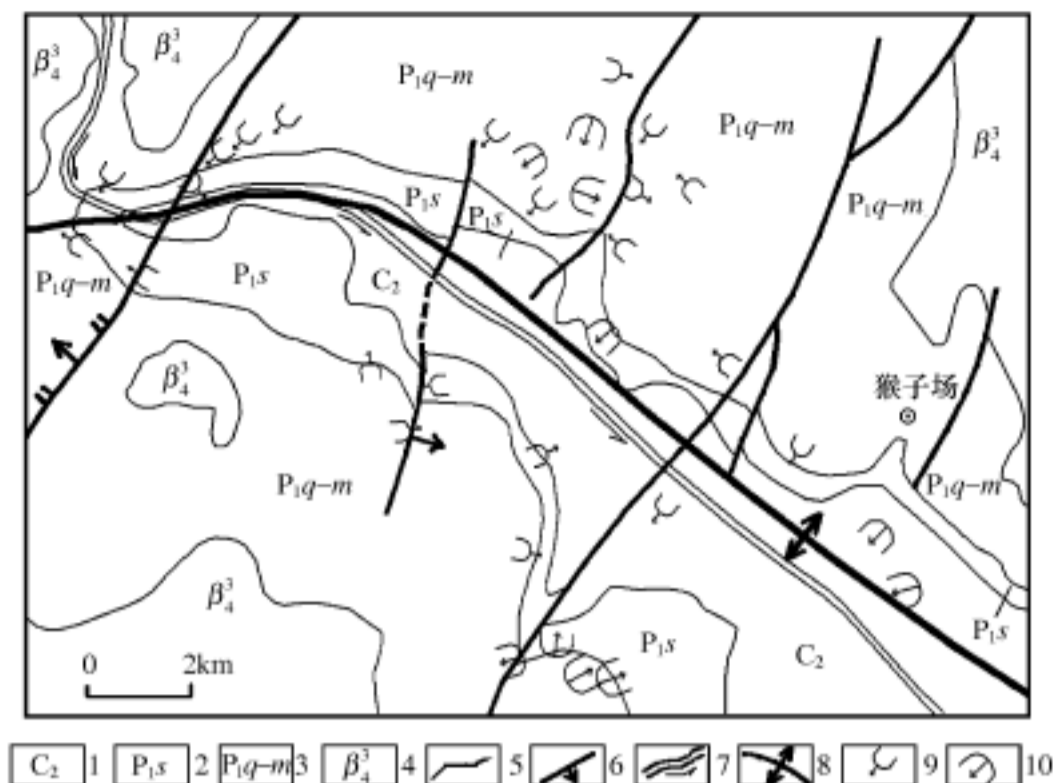


图 1-5 轴向切割河谷崩塌滑坡发育状况图

(据姚智, 1998, 略有改动)

- 1—上石炭统; 2—下二叠统酒志组; 3—下二叠统栖霞组—茅口组; 4—二叠纪峨眉山玄武岩; 5—地层界线;  
6—断层; 7—北盘江; 8—猴子场背斜轴迹; 9—滑坡; 10—崩塌

自然泥石流一般多发育于地势坡折带与峡谷地带, 如黔西北地区; 人为泥石流则多发育于不规范的人类工程活动比较强的山地地貌区, 如随意堆放的尾矿堆, 公路、铁路及大型水利水电工程建设开挖边坡时顺坡堆放的大量土石方等。

## 二、气候与地质灾害

在降雨时间长、强度大, 特别是暴雨等灾害性降雨频繁的气候条件下, 极易诱发地质灾害。从季节上看, 春夏季是地质灾害的高发时段。贵州省地质灾害发生频繁, 其严重性与气候的关系就很有代表性。贵州省年降水量 86% 以上集中在 5 ~10 月, 且多有灾害性降水, 多年暴雨频率为 2.7 ~ 5.5 次/年, 日最大降水量为 93.5 ~206.9mm, 时最大降水量为 52.5 ~77.7mm (杨利群等, 1999; 田英等, 2000)。泥石流在雨季 (5 ~10 月) 最容易发生, 7 月份发生的频数最大, 大量降水为泥石流的形成提供了水力条件。当连续降雨量达 150mm 或日降水量达 100mm 时, 区内就会有滑坡产生。

降水不但能促进软岩饱水软化、增加自重, 且降低了岩体的内聚力。大量的降雨顺地表或岩溶管道流入岩溶盆地等地势相对较低的地带时, 将使地下水位急剧上升, 打破了原有地下水循环系统的平衡形成地质灾害。

## 三、地层岩性与地质灾害

喀斯特地区地质灾害的形成, 与岩性本身特征和岩性结构特征有直接的联系。岩性本身特征决定了其力学能干性, 岩性之间的组合特征决定了其受外力作用后的稳固性。

岩溶塌陷主要形成在结构比较单一、且岩性也比较单一的碳酸盐岩出露区, 即主要分布在以灰岩、白云岩为主的碳酸盐岩区, 其次才是碳酸盐岩与碎屑岩互层分布区。前者占 75%, 后者占 25% (王明章等, 2005)。对贵州省岩溶塌陷的分布进行统计发现, 在平塘—紫云一带, 从石炭系—三叠系有比较纯净的碳酸盐岩连续出露, 基岩岩溶塌陷分布比较集中。在黔中高原、六盘水盆地等地, 大面积连续分布的碳酸盐岩之上覆盖着厚度不等的第四系松散盖层, 在岩溶作用、地下水位

变化及人类工程活动的影响下，土层塌陷比较发育。

崩塌、滑坡等斜坡破坏类地质灾害多发生在软质岩（泥岩、页岩、泥质灰岩、泥质白云岩等）与硬质岩（灰岩、白云岩等）叠覆带及其附近。根据对贵州省解译出的 3591 处滑坡及崩塌统计分析，发现崩塌、滑坡主要集中在志留系、二叠系、三叠系中。崩塌在下二叠统中分布最多，为 422 处，下三叠统次之，214 处，二者分别占全部总数的 37.8% 和 19.2%。滑坡在志留系中分布 249 处，在下石炭统中分布 217 处，在下二叠统中分布为 476 处，在上二叠统中分布 231 处，在下三叠统中分布 327 处，在中三叠统中分布 160 处，它们分别占滑坡总数的 10.75%、9.37%、20.55%、9.97%、14.12% 和 6.91%。崩塌、滑坡的这种集中分布，同以上地层内的软质岩地层与硬质岩地层相间叠覆组合关系密切。

在贵州，叠覆在软质岩类岩层之上的硬质岩类岩层构成的岩体介质结构，通常由软弱层构成坡体的基座，由于两种地层岩石在性质上的巨大差异，造成这种类型坡体的不稳定性。崩塌、滑坡集中分布的黔西北地区与黔东地区，这种层状的软硬叠覆结构面发育的地层有：下石炭统祥摆组与上覆岩层界线附近；下二叠统梁山组或洒志组或花贡组与上覆栖霞组—茅口组界线附近；下三叠统夜郎组或飞仙关组与上覆永宁镇组界线附近；夜郎组沙堡湾段与上覆玉龙山段界线附近；关岭组第一段与第二、三段界线附近；下寒武统九门冲组内部的灰岩与炭质页岩界线附近；中、下志留统翁项群与上覆蟒山群界线附近；下志留统韩家店群与上覆下二叠统栖霞—茅口组界线附近等等。在贵州上扬子地层分区黔西北地层小区内，从上石炭统至中三叠统，存在 10 个以上的软硬叠覆地层组合（贵州省地质矿产局，1987），见图 1-6。

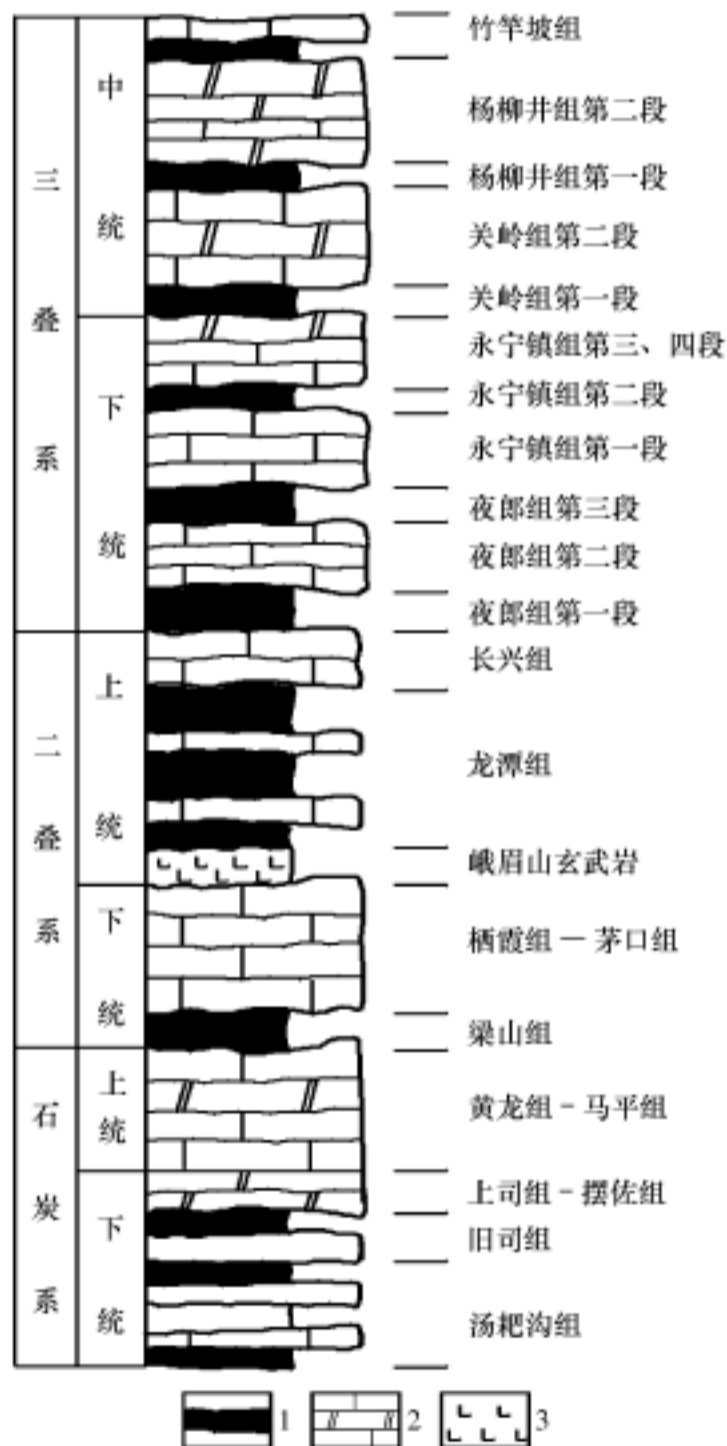


图 1-6 黔西北地层小区 C—T 地层软硬叠覆关系示意图

1—软质岩类（泥岩、页岩、粉砂质泥岩等）；2—硬质岩类（灰岩、白云岩）；3—玄武岩

软质岩类岩层岩石以粘土岩类为主，夹有煤或炭质页岩或玻屑凝灰岩等。从岩石力学性质看，这些岩石的抗剪强度相对其上覆的硬质岩碳酸盐岩石是极低的。这些软弱岩层均具有一定的厚度，在上覆岩层的巨大压力下，软弱岩层呈现出一定的塑性流动状态。可沿地层倾向方向滑动，也可沿走向方向滑动，甚至可逆倾向方向滑动，致使坡体失稳。

顺层滑坡的主滑面由上述两类地层的接触面构成，上覆硬质岩类地层岩石构成滑体。切层滑坡，其滑体仍由硬质岩类地层岩石构成，有时可包括部分下伏软质岩类地层岩石，滑床则可由下伏软质岩类地层和上覆硬质岩类地层构成，亦可由上覆的硬质岩类地层构成。在这种软硬叠覆地层界线附近发生的崩塌，其崩塌体均由上覆硬质岩类地层岩石构成。

碳酸盐岩石是强透水层，下伏软质岩类地层是隔水层。从岩石的水文特征看，常在接触面附近产生地下水的滞留，使粘土岩类岩石膨胀软化或变为流塑状软泥而成为泥化夹层，这种软弱岩层顶部形成的泥化夹层具有特别低的抗剪性能（可近似地视为零）和良好的连续性，对坡体稳定性的影响极大。

在大套碳酸盐地层出露区，若层间夹有泥质薄层或泥皮，也是滑坡、崩塌常发育的地段。虽然泥质薄层等