

# 论 滑 坡 学

陈 自 生

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

**提 要** 滑坡学可分为理论滑坡学和应用滑坡学。前者的分支有:滑坡发生学、滑坡运动学、滑坡组构学、滑坡形态学、滑坡断代-周期学、滑坡分类学、滑坡分布学、滑坡制图学、滑坡编目学和滑坡数据库系统等。应用滑坡学含滑坡研究方法论、技术手段和滑坡防御工程等。

**关键词** 滑坡 滑坡学 理论滑坡学 应用滑坡学

滑坡学(Landslide Science)是研究滑坡的综合性学科。它广泛涉及地理学、地质学、工程学等的领域,以及经济学、社会学的范畴。滑坡是指构成斜坡的一部分岩土体在重力作用下失稳,并沿坡体内部的软弱面(带)发生剪切而下滑。

自人类出现以来,滑坡现象就引起关注。我国是最早论述滑坡事件的国家之一,可追溯到3 000多年前。在国外古罗马时代(公元前30年至公元476年)也记载着大量的滑坡事件;至16世纪随着自然地理学、地质学、工程学的发展,滑坡开始作为单独客体来描述。滑坡研究的经典著作是一篇描述1881-09-11瑞士阿尔卑斯山区埃姆(Elm)滑坡的文献<sup>[1,2]</sup>。19世纪中叶以来,工业迅猛发展,使滑坡研究不断取得进展。20世纪中叶在国外广义的滑坡概念占有主导地位<sup>[3]</sup>。1962年前苏联有学者<sup>1)</sup>提出了“滑坡学”一词,并确定了其基本研究方向。80年代以来,滑坡学研究更加蓬勃发展:1. 滑坡学的研究内容更加明确<sup>[4,5]</sup>;2. 滑坡学研究规模之大,参加人数之多前所未有,并引起全社会的重视;3. 滑坡学术刊物办得更为活跃,滑坡学术专著增多,大量滑坡学研究成果与其他山地灾害研究成果还组合成文集一起发表;4. 某些国家控制滑坡的法规日趋完善;5. 国际滑坡学术交流与科技合作更加频繁;6. 滑坡学更加重视滑坡发生机理的系统研究,提出了许多新概念、新模式,滑坡研究还与减灾防灾紧密结合,增添了应用研究的内容。

目前我国已涌现一批在国际上有一定影响的滑坡专家,他们在滑坡发生学、滑坡分类学、滑坡分布学,以及滑坡识别、滑坡稳定性分析、滑坡预测、滑坡预警预报、滑坡制图、滑坡防御工程等诸多领域内的研究成果都有独到之处,甚至走在世界前列。

滑坡学发展至今,已可归纳为理论滑坡学和应用滑坡学两部分。

## 1 理 论 滑 坡 学

其是研究滑坡发生、发展、消亡过程中所显现的规律性。

### 1.1 滑坡发生学

1) 叶米里扬诺娃 E П. 铁道部科学研究院西北研究所滑坡研究室译。滑坡作用的基本规律。重庆:重庆出版社, 1986. 1—4.

本文收稿日期:1995-09-29.

这是理论滑坡学的核心分支学科,要研究的是如下这些。

### 1.1.1 滑坡发育的环境条件

众多的环境条件在滑坡发生发展过程中都有各自的作用和变化,自 20 世纪 70 年代以来,仍可把这些环境条件分成变化缓慢的地质地貌背景条件(又称内部条件、基本条件、必要条件、静态条件)和变化显著的环境条件(又称外部条件、触发或诱发条件、充分条件、动态条件)<sup>[6]</sup>。只要有一项外部条件能激发内部条件(岩土物质、坡体结构和有效临空面)的变化,即可发生多样的滑坡。

### 1.1.2 滑坡发生机理

它是指环境条件在滑坡孕育过程中的作用机理。一种环境条件可能有多种作用机理,而不同的环境条件或许有相同的作用机理,甚至更多的环境条件还有相互关联的作用机理。近年有用系统科学来研究滑坡发育的,这将滑坡作为一个开放性系统,具确定性和随机性共存的混沌过程等<sup>[7]</sup>。

### 1.1.3 滑坡孕育的阶段性的

这分为:1. 蠕滑阶段,即坡体内部逐渐形成滑动面,并最终发展成滑坡的坡体物质蠕滑现象,不过难以觉察,研究难度较大,一直是滑坡学的重点研究课题;2. 滑动阶段,即滑坡体已显宏观变形,但限于局部,变形微弱,可经历数月至数年;3. 剧滑阶段。

## 1.2 滑坡运动学

70 年代以来,在滑坡运动机理、滑程、滑速、滑向等研究方面有较快的进展,并提出了远程、高速、滑垫面等新概念。滑坡运动状态各具特色,这不仅与滑坡孕育期受相关环境条件的制约有关,更与滑垫面的形状、坡度、坡向、起伏度、粗糙度、植被、覆盖层厚度和物质类型、含水状况等诸多因素有关。滑坡体在运动过程中可能会转化为崩塌,甚至解体而为碎屑滑动或泥(石)流等块体运动形式<sup>[8]</sup>。

## 1.3 滑坡组构学

它研究的是滑坡体内独特的结构、构造特征。这是参与滑动的原始坡体在孕育、发展、堆积过程中受力变形的结果。滑坡群体的结构、构造特征更为复杂。

滑坡体结构、构造特征是滑坡学的重点研究课题。在宏观上,滑坡发生区内滑动面的纵横剖面、平面形态、层数及其与地层的关系等早已引起关注。此外滑坡堆积物结构、构造特征也有一定研究<sup>[9]</sup>。近年来滑动面(带)的中观微观结构、构造特征[如波状褶曲、劈理带、泥化带、角砾状构造、擦痕、阶步(台坎)、囊状粘土、蠕虫状肠状眼球状构造等]的研究进展明显。

滑坡水文地质结构取决于地下水补给类型与滑坡体结构、构造特征,需加深入研究。

滑坡群体的多层性、多条性、多块性和多级性,使各滑坡块体之间往往存在着很复杂的相互关系。这方面我国已积累了丰富的理论和实践经验<sup>[10]</sup>。

## 1.4 滑坡形态学

滑坡形态是滑坡力学特征在地表的反映,包括地表裂缝(后缘裂缝、牵引裂缝、侧界裂缝、滑坡体中部的横向裂缝和前部的放射状裂缝)和微地貌形态(滑坡洼地、滑坡湖、滑坡台地、滑坡剪出口、滑坡趾、滑坡舌、滑坡鼓丘、滑坡坝),能反映滑坡物质、发育阶段、边界

条件等诸多特征。各类滑坡的地表裂缝和微地貌形态,以及与滑坡地貌相关的滑坡堰塞湖等均不相同。这些形态特征表露了滑坡的存在及各种性质,所以滑坡形态学就成为理论滑坡学研究的重要内容。随着研究的深入,越来越多的滑坡形态特征将被揭示,这会丰富滑坡形态学的研究内容<sup>[10,11]</sup>。

### 1.5 滑坡断代-周期学

滑坡发生时间是滑坡的重要特征之一,加以断定大多比较困难。以往是将滑坡堆积物与周围地层对比,断定史前滑坡发生的相对时代;或者利用古建筑、古墓来断定历史滑坡的发生年代;利用滑坡发生区植被演替历史,也可推断数百年至千年内的滑坡发生时间。当今已采用同位素测年技术来测定滑坡发生时间。

滑坡群体和单个滑坡的发生有周期性。近年来对滑坡的旋回性(超长周期性)的研究有较快的进展。研究结果表明,滑坡集中发育在起源于板块运动和造山运动的地貌旋回中的青年期末至壮年期。更多的滑坡周期性研究,集中在由地球动力学和日地关系所引起的气象-水文极端事件(如气候波动等)的变异而呈现的周期性。

### 1.6 滑坡分类学

近百年来,滑坡分类方案由简单到复杂,又从复杂到简单,即由低级认识阶段向高级认识阶段发展。从已有的百余种分类方案来看,凡具有生命力的滑坡分类方案都符合科学性、实用性和易操作性的分类原则。众多的分类方案有单指标单级别的、单指标多级别的、多指标单级别的和多指标多级别的。

少数的滑坡分类方案属综合性的,是高级别的滑坡分类方案。它在全面系统分析各种分类标志的基础上,筛选出最主要的几项标志,并按主次顺序排列组合、统一命名。综合性分类方案能反映出滑坡发生机理、力学性状和滑动特征,利于揭示滑坡分布规律,便于滑坡发生区域预测。当前综合性滑坡分类方案多以二级标志或三级标志为主。

水下滑坡(库底滑坡、湖底滑坡、海底滑坡)的分类方案尚少见。

### 1.7 滑坡分布学

滑坡具有全球性分布,是地球环境要素综合作用的产物,只发生在流水作用带内,具有显著的区域性。滑坡分布的地域性取决于山区内的地貌基本组合和地质构造骨架,以及错综复杂的环境单元。特别在高易滑性地层分布区、地质构造复杂区、大变率降水区,滑坡分布更为集中,但在其中仍可有滑坡分布的离散区,这反映了滑坡分布规律的复杂性。目前滑坡分布学的研究成果还不能满足经济建设的要求。

### 1.8 滑坡制图学

滑坡制图学一直是随滑坡学的进展而发展的。滑坡图件既表达了滑坡学的研究成果,又标志着滑坡学的研究水平。至今在滑坡形态学、滑坡分布学等研究成果基础上,滑坡图件囊括了各种比例尺的专门图件,并已有了滑坡系列图(平面图、剖面图、立体图)。图件内容涉及环境条件、滑坡形态、受力状况、运动特征、防御工程等诸多方面。近年来计算机制图技术也在滑坡制图学中得到了推广应用。其典型实例如80年代中国科学院、水利部山地灾害与环境研究所开展的三峡库区的万县市区滑坡预测工作的计算机制图。由此滑坡制图学已进入了一个新的发展时期。然而目前滑坡制图学的发展带有明显的自发

性。今后需在制图理论和制图标准化、系列化方面应有所突破。

### 1.9 滑坡编目学和滑坡数据库系统

20 世纪 60 年代,国外才开展系统性的滑坡编目工作;我国的滑坡编目是从 70 年代结合铁路沿线、地震区、暴雨区、水利水电工程而逐步开展起来的。但由于受到技术手段的限制,滑坡编目学的发展缓慢。近年来由于遥感技术的推广应用,尤其是得到计算机技术的支持,滑坡编目学才发展较快,并建起了滑坡事件数据库。

正是由于滑坡事件数据库的迅速发展,滑坡数据库系统的研究,80 年代以来有了长足的进展<sup>[12]</sup>。在滑坡数据库系统内,滑坡事件数据库是基本的数据库,此外还包括滑坡文献库、滑坡图形库、滑坡观测库和滑坡模型库。其实滑坡数据库系统为未来的滑坡专家系统奠定了基础。

## 2 应用滑坡学

其以理论滑坡学为研究基础,密切结合社会经济发展的实际问题,使滑坡学的技术、方法、手段有了快速的进步。当前应用滑坡学研究进入了一个蓬勃发展的新阶段。

### 2.1 滑坡识别

识别滑坡涉及到宏观、中观和微观三个层次。目前利用光学显微镜和电子显微镜来认识滑坡,还只是些补充性手段。

宏观识别滑坡是在区域性滑坡调查时,用遥感信息(包括图像和磁带)识别滑坡的方法,这已从单纯的图像判译发展到计算机数字化处理。对地形图进行数字化处理,也有助于识别滑坡。

中观识别滑坡是指滑坡地表综合分析方法。它融合了地貌学、第四纪地质学和工程地质力学等学科的研究成果,已成整套实用方法。其不仅是后期(勘探、试验、观测)工作的基础,还指导着滑坡计算分析和滑坡工程治理<sup>[13]</sup>,颇具特色,亦较为成熟。

### 2.2 滑坡勘探

这是从地质勘探移植过来的。由于滑坡的特殊性,滑坡勘探已不是一般意义的普通工程地质勘探,而是具有特殊勘探设备和特殊勘探工艺的技术手段。

滑坡挖探是最为直观的勘探方式,包括槽探、坑探、洞探和井探。它既可验证滑坡地表综合分析和钻探的成果,还能配合现场岩土试验、观测和治理工程。今后在重要的典型滑坡体上开展挖探仍是必不可少的。

滑坡钻探开展得广泛,对钻孔设计、钻探方案、钻探孔径、钻探机具、钻进方法和钻进工艺等都有明确的特殊技术要求,并已有进展。

滑坡物探中的地震勘探应用较早,并已用于水下滑坡勘探。滑坡电法勘探的应用历史最长,效果明显。此外测井技术、探地雷达、重力勘探、静力触探,以及放射性静电  $\alpha$  卡法、氡气浓度法已用于或试用于滑坡勘探。

### 2.3 滑坡试验

这包括室内和现场开展的滑坡地下水试验、滑坡岩土试验、滑坡模型试验等。滑坡地下水试验进展缓慢。滑坡岩土试验则发展较快,已有一系列滑带土强度试验方法,如滑面

重合剪、多次直剪、三轴切面剪、现场大面积直剪和环剪等,但它们需与反算法和经验对比法相互印证;再者将旁压试验用于现场已取得可喜成果。滑坡模型试验是滑坡试验中进展最快的,分为原状土模型试验和相似材料模型试验;随着计算机技术的推广应用,滑坡数值模拟试验也发展极快,如有限元法、变分法、非线性离散元法等已加以运用。此外激光全息摄影技术和激光散斑法也作了探索性应用。

## 2.4 滑坡稳定性分析与滑坡稳定性计算

分析是计算的基础,许多分析内容已含于滑坡地表综合分析方法中。

当前滑坡稳定性计算方法仍以静力极限平衡分析方法为主,如条块法、传递系数法等。近些年来进展表现在对某些细节的改进上,如地震因素的影响已不单考虑震级差异,还应考虑震中距、地震波峰值加速衰减。再者较明显的改进是:滑坡稳定计算中采用了三维分析方法。赤平极射投影方法也可对小型滑坡——滑动岩块进行三维空间处理。需要指出的是,在滑坡稳定性计算中常采用边坡稳定性计算方法,如图表法、图解法、水平分力法、微积分法等,尤以萨尔玛法用得最广。但这些方法仅局限在边坡变形将最终转化为滑坡的前提下才能应用,而且滑动块体规模较小、几何边界条件清楚时才能得出明确的结果。

## 2.5 滑坡观测

这广泛用于室内模型试验和现场观测,属三维空间准动态观测。滑坡现场观测发展最为明显。我国的滑坡观测始于 50 年代,至 70 年代仅科研单位加以重视,但手段限于视准线法和地下应变测试技术。80 年代来,滑坡观测的最明显的特点是:以移植或研制等多种途径,使滑坡观测设备多样化,如作局部动态观测的有测缝计、位移计、倾斜仪、水位计等;作整体动态观测的有水准仪、经纬仪和光电测距仪或定期物探等。专作地下观测的有:钻孔倾斜仪、金属线多层移动计、地声仪等。许多观测手段在计算机支持下,能作实时观测、预警、系统分析。此外许多部门和地区都建立了滑坡观测队伍,这标志着我国滑坡观测已迈入了一个新的发展阶段。目前滑坡观测设备的系列化、商品化、可靠性和可操作性都有待改进和提高。

## 2.6 滑坡预报

它是指滑坡发生时间的预先判断,分为经验型、经验-数值型、数值型。后者是滑坡预报的发展方向,目前多应用前两者。这时的观测数据超出预警值实质上就是预警。预报是对各种信息(包括预警信息)加以综合后,所作出的判断。

据滑坡预报的目的和年限,又可将滑坡预报分为超长期预报、长期预报、中期预报、短期预报、工程安全预报和蠕滑预报等。超长期预报为时百年,对大型特大型工程来说尤为重要;长期预报为时数十年,多用于区域性滑坡活跃期预报;中短期预报为时数年或数月,视坡体变形速率、地下水位变化等而定。上述诸类预报均属滑坡发生剧滑时间的预报。而工程安全预报和蠕滑预报则是预报可能危及地物的滑坡发生时间和蠕滑时间。目前已有起滑坡预报成功实例。实践表明,滑坡预报必须依据大量的前期观测资料,这总是随滑坡观测的进展而发展的。

## 2.7 滑坡预测

滑坡预测是指滑坡发生地点的预先判断,包括坡体稳定性预测和滑坡稳定性预测。后者的内容已包含在滑坡稳定性分析、计算中,前者多包括在区域性坡体稳定性分析中。

滑坡预测历来受到重视,70年代来发展突飞猛进。最早出现的滑坡预测方法是图斑(控制参量)叠置法,至今仍常用。近年来滑坡预测应用了许多数学方法,如概率统计、正交方法、多元回归分析、聚类分析、系统模型法、信息量法、模糊综合判别法、灰可公度性方法,以及体积流量(对数正态分析、高濂矩量法和干贝尔-周法)等。滑坡预测结果尚需时间的考验,但这些方法无疑标志着滑坡预测的发展。

## 2.8 滑坡灾害评估

随着防灾减灾活动的深入开展,人们的防灾意识在不断增强,滑坡灾害评估也发展较快。在滑坡灾害评估中应综合分析滑坡发育与周围环境条件的关系。

滑坡对人员和财产均可造成危害。这既有滑坡直接造成的,也有滑坡间接造成的。滑坡直接造成的灾害评估方法有多种。世界滑坡编目联合工作组<sup>1)</sup>提出的按人·年作为评估灾害损失的计量单位,具有可比性,是一种操作性很强的评估方法。至于滑坡间接造成的灾害评估方法,目前尚未统一,有待今后解决。

## 2.9 滑坡防御工程

滑坡防御工程是抵御滑坡进一步发展的工程措施,包括截排地表水、疏导地下水、减小下滑力、增大抗滑力、防止冲刷坡脚、改变滑带土性质和绕避滑坡危险区等。

近年来滑坡防御工程的进展主要在支挡结构和疏导地下水方面。就支挡结构而言,60年代出现的抗滑桩能利用桩周抗力、节省圬工量、改善劳动条件、施工期短、可避免施工对滑坡稳定性的影响、结构型式多种等长处。继而又出现预应力锚固抗滑桩,它克服了单纯抗滑桩受力不尽合理、桩身长、截面大、造价高的弊端,已广泛应用。就疏导地下水而言,除垂直排水外,仰斜钻孔排水也发展较快,并有相应的机具和工艺,利于推广应用。

## 2.10 滑坡的利用

将滑坡视为灾害仅是一个侧面,实际上还有可利用的一面。滑坡利用有:1.被动型利用方式,如滑坡平台用作建居民点,近年来还用滑坡堰塞湖引水发电、灌溉或改成水上公园;2.主动型利用方式,即人为诱发滑坡,按人们意愿改造局地环境,如黄土区曾用滑坡过程建造人工土坝,近年来用滑坡过程来清除水库淤积,省工省时,值得推广。

综上所述,滑坡学是一门拥有自己的独特研究客体和一系列理论研究课题、应用性课题的综合性学科。今后滑坡学必将在深度和广度上取得更大的进展,为人类的经济建设和保护环境作出更大的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] Heim A. Der Bergsturz von Elm. *Zeitschr. der Deutsch Geol. Ges.*, 1882, 34: 74—115.
- [2] 丁锡祉. 积极发挥滑坡专业委员会的作用. 见,四川省地理学会滑坡专业委员会,中国科学院成都地理研究所. 滑坡分析与防治. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1984. 1—6.

1)Cruden D M, Lugt J Dc. An Inventory of the Landslides of the World. 1988.

- [3] Eckel E B. Introduction. In: Landslides and Engineering Practice. Highway Research Board, Special Report 29, 1958. 1—5.
- [4] 陈自生, 卢鑫桓. 滑坡学及其基础研究课题. 见: 四川省地理学会滑坡专业委员会, 中国科学院成都地理研究所. 滑坡分析与防治. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1984. 24—31.
- [5] 晏同珍, 殷坤龙. 滑坡学初议. 见: 水文地质及工程地质论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 155—160.
- [6] 卢鑫桓. 滑坡形成条件分析及其引伸应用. 见: 中国地理学会地貌专业委员会编. 中国地理学会一九七七年地貌学术讨论会文集. 北京: 科学出版社, 1981. 167—181.
- [7] 高鹏, 艾南山. 土质坡体破坏的突变模型. 工程地质学报, 1994, 2(4), 67—75.
- [8] 陈自生. 高位滑坡的运动转化形式. 山地研究, 1992, 10(4), 225—228.
- [9] 卢鑫桓, 陈自生. 滑坡堆积物的基本特征及其研究意义. 见: 滑坡文集编委会主编. 滑坡文集(第六集). 北京: 中国铁道出版社, 1988. 119—127.
- [10] 铁道部科学研究院西北研究所编. 滑坡防治. 北京: 人民铁道出版社, 1977. 5—8.
- [11] 四川省地理研究所编著. 滑坡. 北京: 科学出版社, 1975. 13—15.
- [12] 陈自生, 金石. 滑坡研究中的数据库系统. 地理, 1988, 1(1), 61—67.
- [13] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治. 北京: 科学出版社, 1994. 238—269.

## ON THE LANDSLIDE SCIENCE

Chen Zisheng

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences*  
*& Ministry of Water Coservancy Chengdu 610041*)

### Abstract

Landslide Science includes 2 types: theoretic landslide science and applied landslide science. The content of theoretic landslide science includes landslide genetics, landslide kinesiology, constitution and structure of landslide, landslide morphology, landslide age and periodism, landslide taxonomy, landslide distribution, landslide cartography, landslide inventory and landslide database system.

The content of applied landslide science includes recognition and identification of landslide, landslide investigation, landslide testing, analysis and computation of landslide stability, landslide observation, landslide time forecasting, landslide location predicting, disasters assessment, landslide engineering and landslide defense.

**Key words** landslide, landslide science, theoretic landslide science, applied landslide science