

高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势

程谦恭¹, 张倬元², 黄润秋²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 高速远程崩滑动力学机理的研究, 一直是国内外工程地质与山地灾害领域崩塌、滑坡灾害研究的前沿热点问题。对这一研究领域, 最近几十年来所取得的研究成果、研究现状及发展趋势进行了述评。厘定了高速远程崩滑的定义; 详细地阐述了国内外众多典型重大高速远程崩滑灾害事件的几何学、运动学特征; 概述了迄今为止所提出的高速远程崩滑形成的各种动力学机理; 分析与讨论了高速远程崩滑动力学机理研究的发展趋势与动向; 提出了今后进一步研究的总体思路、目标与应重点解决的关键问题。

关键词: 高速远程崩塌; 高速远程滑坡; 动力学; 述评

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

高速远程崩滑动力学机理的研究, 一直是国内外工程地质领域与山地灾害领域崩塌、滑坡灾害研究的前沿热点问题, 在理论方面无论是在基础研究还是在应用基础研究领域均具有重要的科学意义, 在实践方面对于建立典型重大崩滑灾害预警的关键技术方法, 推动崩滑灾害监测预警技术水平的提高, 具有重大的工程价值。本文对这一领域最近几十年来国内外所取得的研究成果、研究现状及发展趋势进行述评, 并提出进一步研究的总体思路、目标以及应解决的重点问题。

1 高速远程崩滑的定义

高速滑坡 (High-speed landslide), 国内外目前没有明确严格的定义。根据“国际地科联滑坡工作组”1995年公布的“建议用于描述滑坡位移速度的一种方法”^[1], 滑坡位移速度分为“极缓慢、很缓慢、缓慢、中速、迅速、很迅速、极迅速”7个等级, 其中

“极迅速 (extremely rapid)”级别的滑坡位移速度, 下限速度为 5 m/s 上限速度为 70 m/s 。目前, 大多数学者认为高速滑坡的平均运动速度都在 20 m/s 以上, 相当于“极迅速”级别的滑坡。

高速远程崩滑, 这里指的是高速远程滑坡 (Long-runout landslides, Landslides with anomalous travel distances) 与高速远程崩塌 (Long-runout rock-falls, far-travelled rock avalanches)。在北美国家的文献中, 与此相对应的术语是“岩崩 (rock avalanches)”, 根据美国地质调查局最近出版的第四版《地质学辞典》的定义, 它“是一种非常快的顺着斜坡下方的岩石碎屑流动, 在流动的过程中, 碎屑进一步变得破碎亦即粉碎化。典型的 rock avalanches 由大的岩崩和岩滑 (large rock falls and rockslides) 形成, 其运动形式导致了术语‘岩石碎屑流’ (rock-fragment flow) 的产生。典型特征包括混杂分布的大岩块、流动的表面形态和内部结构、厚度薄分布范围大、高孔隙度、棱角状碎屑以及舌状形态”^[2]。除了

收稿日期 (Received date): 2006-06-19; 改回日期 (Accepted): 2006-09-15

基金项目 (Foundation item): 国家杰出青年科学基金 (40025103)、国家自然科学基金 (40172093)、教育部科学技术研究重点项目 (03143) 与教育部“春晖计划”项目资助。[The study supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 40025103), the National Natural Science Foundation (No. 40172093), the Science and Technology Key Project of National Ministry of Education (No. 03143), and the Chunhui Plan of National Ministry of Education.]

作者简介 (Biography): 程谦恭 (1962-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 博导, 主要从事高速崩塌、滑坡动力学机理的研究。[Cheng Qiangong (1962-), male professor, engaged in the research of dynamics of rock avalanches]

“rock avalanches”一词外,优先被使用来描述这种类型块体运动的术语是“sturzstrom”(由德文而来,与 rock avalanches 和 Long-runout landslides 的含义相同);其次,依次使用的术语有:岩崩-崩塌 (rockfall avalanche), 岩滑-崩塌 (rockslide-avalanche)、岩屑流 (rock-fragment flow)。

高速远程崩滑具有巨大的体积 (一般都在数百万 m^3 以上,可达几千万 m^3 、几亿 m^3 、十几亿 m^3 甚至几十亿 m^3)、超乎异常的高速度 (迄今为止,已知两个高速远程滑坡的最大速度分别达 213 m/s 和 278 m/s)、难以预料的超常运动距离 (最大水平距离是最大垂直落差的几十倍,甚至更大;远程可以达到几 km 、十几 km 甚至几十 km)、巨大的能量 (例如,在运动过程中往往能仰冲爬上并翻越相当高的山坡;最大爬越高度可达 640 m)、以及异常高的流动性 (例如,可环绕障碍物运动,有流动特点) 等许多“令人惊异”和“迷惑不解”的现象。例如,地球上已知最大的第四纪岩崩位于美国加利福尼亚沙斯塔古火山地区^[3]。它出现在距今大约 $30 \times 10^4 \sim 36 \times 10^4 \text{ a}$ 前,岩屑堆积物从沙斯塔山开始,沿谷地延伸 43 km ,覆盖了至少 450 km^2 的面积,体积达 26 km^3 。伊朗西南赛达曼热地区史前时期的一个大滑坡,体积大约 $21\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$,从高处落下,远程运动 15 km ,席状碎屑流覆盖面积达 165 km^2 ^[4]。再如,1911-02-18 帕米尔中部发生 7.4 级强烈地震,吉尔吉斯斯坦境内木尔加木河右岸发生巨大滑坡,体积约 $2\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的石炭纪、晚三叠纪和第四纪沉积岩石,沿着面积 6 km^2 、摩擦角 32° 的剪切带 (滑面),高速滑入峡谷中,堵江形成水深 500 m 的巨大堰塞湖^[5]。

2 高速远程崩滑研究现状

2.1 国外研究现状

2.1.1 典型重大崩滑实例的研究

20 世纪 80 年代以前,国外最著名的高速崩滑研究成果有 3 项。首先是 1932 年著名地质学家海姆对 1881 年瑞士埃尔姆 (Ehn) 滑坡的研究^[6]。海姆在其著作《Bergsturz und Menschenleben》中,详细地描述了埃尔姆岩崩-碎屑流的运动学现象,并把岩崩碎屑流称作“sturzstrom”。海姆的著作原文为德文,美籍华人许靖华 20 世纪 70 年代在“岩崩碎屑流的特征”一文中,曾作过详细地介绍^[7],并推荐用

海姆用过的德文“sturzstrom”这个词专门用来描述由于高速滑坡和岩崩形成的碎屑流,以示与描述泥石流的“debris flow”相区别;英文版文献在 1989 年由 Skemer 翻译,加拿大 B Tech 出版公司出版。这本书的问世虽然已经过去了大半个世纪,然而时至今日,它仍然是关于“高山地区滑坡原型观察描述最迷人的独特的文献记录”。其次是 Schiedegger 于 1973 年首次发表了《关于灾难性滑坡的滑程与滑速的预测》的重要论文,开创了高速滑坡滑动速度计算的先河^[8]。第三项成果是 1978 年,由 Voigh 等人编辑的《滑坡和岩崩》论文集的出版,这本书对当时及以前发生在西半球欧美国家中,最主要的 16 个灾难性高速滑坡实例,进行了详细地描述和分析^[9]。例如,发生在秘鲁安第斯山脉最高峰来瓦多斯-瓦斯卡兰山的 3 次 (1970 年,1962 年和前哥伦布时期) 灾难性岩崩,举世闻名。1970 年的岩崩,由 7.7 级地震触发,埋没了 Yungay 城和几个小村庄,被岩屑破坏的面积约 22.5 km^2 ,死亡人数超过 18 000 人;估计体积 $50 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的碎屑以 280 km/h 的速度,沿着垂直落差近 4 km 的路径,从海拔 $6\,654 \text{ m}$ 的峰顶下落到海拔 $2\,400 \text{ m}$ 的河谷,水平运动 16 km ;一些碎屑物,被加速到 $1\,000 \text{ km/h}$ (约 278 m/s) 速度的量级;重达数吨的块石抛向空中远达 4 km ;运动过程具有明显的源区岩崩和冰崩 (a rock and ice fall)、上部空中飞行 (air-launch phase)、中部岩石冲击和泥浆飞溅 (rock impacts and mud spatter) 和下部堆积舌阶段 (the depositional lobes)。

20 世纪 80 年代以后,许多学者先后对欧洲阿尔卑斯山区、北美洲加拿大的落基山脉地区、美国加利福尼亚的山区等地区出现的各种类型的高速远程崩滑灾害事件,进行了深入地调查和分析。

Bock (1977) 研究了美国加利福尼亚 Martinez 山岩崩 (约 $380 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的花岗片麻岩从海拔 $1\,926 \text{ m}$ 破裂后流到海拔 49 m ,滑动碎屑的长度 7.6 km)^[10]。Moore 和 Mathews (1978) 研究了加拿大不列颠哥伦比亚西南“碎石谷”滑坡 (体积 $25 \times 10^6 \text{ m}^3$,远程达 4.6 km ,最大落差 $1\,060 \text{ m}$,运行平均坡度 8.5° ,速度超过 20 m/s)^[11]。Eisbacher (1979) 研究了加拿大西北马更些山区悬崖崩落和碎屑流 (sturzstrom),认为干碎屑流 (dry sturzstrom) 可分为失稳和流态化 (streaming) 两个阶段,流态化是由崩落岩石后部向前部解体部分的动量转换所导致^[12]。

Porter和 Ombelli(1980)研究了 1717-09-12 发生在意大利蒙特布莱克块状山, 埋没两个村庄的灾难性岩崩(体积 $15 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6 \text{ m}^3$, 落差 1 060 m, 平面远程 7.2 km, 仰冲 60 m, 速度 125 km/h)^[13]。加拿大地质调查局 Clague和 Souther(1982)研究了加拿大不列颠哥伦比亚卡里山“灰尘谷”滑坡(体积 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 碎屑运移 1 km, 覆盖河谷长达 1 km, 厚度 65 m)^[14]。美国地质调查局 Schultz(1986)研究了弗吉尼亚州阿巴拉契亚南部辛肯-克里克山巨大的岩体古滑坡(岩滑条带长 25 km 宽 1 km, 体积至少 $1\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 0.5~1 km)^[15]。Southworth(1988)研究了弗吉尼亚州西部阿巴拉契亚盆岭省中部的两个第四纪大滑坡(小滑坡体积 $7 \times 10^6 \text{ m}^3$, 运移 3 km, 大滑坡长 1.2 km, 宽 0.6 km, 厚度 60 m, 体积 $43 \times 10^6 \text{ m}^3$)^[16]。加拿大冰川学家 Hewitt(1988)在美国《Science》杂志上撰文, 详细地研究了 1986-07 在喀喇昆仑-喜马拉雅地区 Bualtar 冰川发生的总体积达 $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的 3 个灾难性滑坡, 详细地描述了滑坡的运动学、动力学和沉积学特征。其中规模最大的一个滑坡, 垂直下滑 1 490 m, 水平运行 4.8 km, 覆盖冰川面积 4.1 km^2 ; 向冰川下落时平均速度 62 m/s 同冰川撞击时最大速度可能达 124 m/s 在冰川上滑行时最小速度 44 m/s 并且, 在运动过程中, 岩石保留了它们相对的地层顺序, 其碎屑物质保持相当完全地干燥^[17]。King Lovday 和 Schuter(1989)研究了 1985 年巴布亚新几内亚拜若曼滑坡坝和所导致的泥石流的活动特点(滑坡体积 $180 \times 10^6 \text{ m}^3$, 充填 3 km 长的河谷厚度达 200 m), 分析表明滑坡具有明显的岩滑 (rock-slide)、岩崩 (rock avalanche)、滑坡坝 (landslide dam) 和溃坝泥石流 (debris flow) 等四个先后不同的运动阶段^[18]。Evans Clague Woodsworth 等 (1989) 研究了加拿大不列颠哥伦比亚南部海岸山脉“魔窟”峡谷岩崩(大约 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 块状的片麻状石英闪长岩碎屑, 沿着一个极不规则的路径, 从垂直高度 2 km 的高处落下, 水平远程 9 km, 最高时速达 81~100 m/s), 分析表明岩崩在运动方向上具有多次弯道超高、两级仰冲和两次右旋冲撞折射的高速流动性; 同时, 还具有明显的“初始启动-仰冲前阶段”非常快的运动和“能量突然损失后阶段”极低速的运动^[19]。1989 年, Evans 在英国《Nature》杂志上撰文“岩崩的仰冲记录”指出, 根据岩崩仰冲高度计算, 加拿大“岩崩湖”岩崩最大速度(不考虑摩擦损

失)为 112 m/s 极限速度(考虑摩擦损失)可达到 213 m/s 这是迄今为止, 关于滑坡(岩崩)碎屑流最高速度的其中一个实例^[20]。Kaiser 和 Simmons (1990)在研究加拿大育空和西北地区马更些山脉的一些岩崩时, 提出了岩崩碎屑在冰川上滑动的观点, 解释岩崩所具有的异常运行距离和非常显著流动性^[21]; 然而, Evans Hungr 与 Enegren (1994)通过研究马更些山脉“岩崩湖”岩崩 ($200 \times 10^6 \text{ m}^3$ 巨大泥盆系碳酸盐岩体, 沿着倾角 30° 的滑面滑动, 最大垂直落距 1 220 m, 最大仰冲 640 m, 最大速度 80 m/s)的运动过程及其成因, 否定了上述观点, 认为岩崩的远程距离与岩崩本身的运动状态有关^[22]。Shaller (1991)详细地分析了美国爱达荷州卡尔森滑坡失稳、启程、运行、停止以及沉积就位后经受剥蚀的全过程, 比较了干滑坡 (dry landslides, dry rock avalanches) 与湿滑坡 (moist and water-saturated landslides) 二者之间的地貌学、沉积学以及运动学特征^[23]。Peart (1991)对巴布亚新几内亚的凯尔皮特滑坡 (1988-09-06 发生, 碎屑体积 2 km^3 , 覆盖了 11.4 km^2 的面积; 5 min 之内, 碎屑流冲出 6 km, 速度 180 km/h) 的形成过程和机理进行了分析^[24]。Costa (1991)^[25], Azzoni Chiesa 与 Frasson 等 (1992)^[26] 分别讨论了意大利瓦尔波尔滑坡的形成过程 (1987-07-02 发生, 体积 $340 \times 10^6 \text{ m}^3$, 从 800 m 高处落下, 毁灭了 4 km 外的谷地, 造成 27 人死亡)。Melellan 和 Kaiser (1992)研究了加拿大马更些山脉“岩滑山口”岩崩 ($370 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的棱柱形块体沿着倾角 14° 的滑面, 水平运行距离达 6.5 km, 速度 40~70 m/s)^[27]。Cruden 和 Lu (1992)对 1984-07 发生在不列颠哥伦比亚省卡利山的滑坡坝 (约 $32 \times 10^6 \text{ m}^3$ 火山岩以 35 m/s 的速度向下运移 2 km 形成)和溃坝泥石流 (速度 34 m/s)进行了分析^[28]。Strom (1994)研究了帕米尔和天山地区 $100 \times 10^6 \sim 1\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的巨大岩质滑坡堆积物, 对滑坡体滑动顺序“多层化”的内部结构特征进行了深入地分析^[29]。Wieczorek, Snyder 与 Wait 等 (2000)研究了美国加利福尼亚约斯曼特国家公园 1996-07 发生的一次不寻常的岩崩 (rockfall), 研究表明, 岩崩从高处落下后, 产生了极为明显的一股冲击气浪 (an airblast) 和一阵磨蚀性砂质密云 (an abrasive dense sandy cloud), 毁灭了坡下冲击场地的大片地区。冲击时岩崩具有的相对高速度为 110~120 m/s 冲击气浪速度超过 110 m/s 推翻或折断了约 1 000 棵树;

砂质密云尾随其后,磨蚀了落下的树干和残留的直立树木。它是世界范围内所知产生了冲击气浪和磨蚀性砂质密云的为数不多的岩崩之一^[30]。Evans, Hungr 与 Clague (2001)研究了加拿大不列颠哥伦比亚西南卡利火山西侧斜坡的滑落(1984年发生,估计源区体积为 $0.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的第四纪火山岩块体滑落,解体的岩体进一步裹挟了 $0.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的碎屑,形成大的岩崩,水平运动距离 3.46 km,垂直落差 1.18 km,等价坡度 19° 。从运动路径中部碎屑边界的超高,可估计速度至少达到 42 m/s 在运动路径上部,速度可能接近 70 m/s 。岩崩部分转化成远端泥石流,沿着狭窄的沟谷进一步运动 2.6 km,到达下游,形成暂时堵塞)^[31]。

在日本的高山地区,也有大量的高速滑坡-碎屑流出现;同时,相应的研究成果层出不穷。1984-09-14 日本 Naganoken-Seibu 地区发生了 6.9 级地震,诱发了数以千计的大规模高速滑坡、岩崩、碎屑流。特别是长野县御岳山滑坡,以规模巨大(体积 $36 \times 10^6 \text{ m}^3$,堆积物形成长 3 km,宽 200~400 m,厚度 30~40 m 的沉积平原)、远程(碎屑流沿峡谷流动 8 km)、速度高(最大起飞速度 70~75 m/s,平均流动速度 30~40 m/s)、强烈的磨蚀性(碎屑流像翻动的犁一样,将沿途树木、植被和土层一铲而光,裹挟而下;距河床 40 m 高程范围内的峡谷低处均被冲刷、刷深成“U”形)、多级冲程(3 级大的仰冲,5 次碰撞转折)、多序次运动阶段(块体滑动、腾空飞越、碎屑飞行、碎屑流滑)等运动特点而闻名于世^[32,33]。

最近 20 a 来,国外最著名的高速崩滑坡研究成果有三项。一个是在 1984 年,加拿大地质调查局的 Eisbacher 和 Clague 编写了专著《高山地区破坏性的块体运动:灾害和管理》,分 5 个专题(表面堆积物中的泥石流,基岩失稳中的泥石流,火山区的块体运动,与冰川有关的块体运动以及崩塌与岩崩(rock-falls and rock avalanches))论述了山区的地质灾害和防范措施;特别是论著的第二部分,收集了欧洲阿尔卑斯地区 137 个破坏性块体运动的实例,具有重要的参考价值^[34]。其次是 2001 年 Erisman 与 Gerhard 在专著《岩滑和崩塌动力学》中,研究了崩滑失稳、解体、运动的实例与机理^[35]。第三是 2002 年 Evans 与 DeGraf 编辑的《灾难性滑坡:效应、发生与机理》论文集的出版,书中论述了当前世界范围(包括中国洒勒山滑坡在内)最有影响的 16 个灾难性高速崩滑(碎屑流)事件的运动过程和形成机理,是

关于高速崩滑(碎屑流)研究的重要阶段性总结^[36]。

2.1.2 崩滑动力学机理的研究

高速远程崩滑动力学问题的“难解之谜”,国外先后有许多学者作过研究和探讨。高速崩滑的远程运动机理,最早可追溯到 1932 年著名地质学家海姆对 1881 年瑞士埃尔德姆(Eldm)滑坡的研究。但真正引起世界范围内的重视,则是在 1963 年意大利瓦依昂(Vaiont)发生特大型灾难性滑坡后才开始的。瓦依昂滑坡发生后,在世界范围内陆续出现许多有关大型高速崩滑机理的专门性研究成果。

对于瓦依昂滑坡高速启动机理,Skempton 认为是岩体的残余强度太低造成;Muller 提出触变液化的观点;而 Loky 和 Romero 等人认为滑动面上的孔隙水压力起着重要作用。关于其他高速远程滑坡碎屑流态化运动机理,拜格诺德和美籍华人许靖华先后提出高速滑坡运动的“无粘性颗粒流说”;Kent 提出“圈闭空气导致流体化说”;Shreve 提出“气垫层说”;Habib 等人提出“孔隙气压力说”;Erisman 提出“岩石自我润滑说”;Melosh 提出“声波流态化”观点;Davies 提出“机械流态化说”。这些观点是 20 世纪 80 年代以前提出的关于高速崩滑启程与远程运动的主要机理^[37,38]。

20 世纪 80 年代以后,随着高山地区众多高速远程崩滑灾害现象的不断发现,人们对这种独特的山地地质灾害现象的认识和理解也在不断地加深。在一些学者进一步丰富和完善已有的崩滑动力学机理的同时,还有一些学者提出了崩滑动力学机理的新观点。

对于灾难性滑坡启动后在滑面的快速运动,Vardoulakis (2002)基于滑体底部快速变形的剪切带与加速运动的刚性块体之间的耦合,通过提出土的摩擦速率软化与热-孔隙-力学软化的概念,以及通过修正泰勒提出的摩擦环方法,进行了热-孔隙-力学的动力学分析。在建立描述快速变形的剪切带内热产生的孔隙水压力现象的方程后,详细讨论了控制方程中各个材料参数的估计值,并根据试验数据和 1963-10 瓦依昂滑坡滑带土的性质,对这些参数进行了调整。两种力学耦合控制方程的数值分析表明,滑坡的加速运动由滑带土材料应变软化引起,而加速运动又进一步促使剪切带内部材料应变速率软化作用。由于初期阶段的速度,热被圈闭在剪切带内,并由于粘土泥的热塑性崩溃,从而快速导

致其内部孔隙水压力的暴发,造成总强度的迅速损失和无摩擦滑床上不受禁止的滑动运动^[39]。

Sassa(1988, 2000)提出沟谷中饱水的滑坡物质由于受到来自于斜坡上方失稳的块体的快速荷载,在快速不排水条件下发生液化的启动机理。并且广泛应用高速环形剪切仪,对采自日本御岳山、中国洒勒山等许多滑坡的滑带土和滑体土样品,进行了排水和不排水条件下视摩擦角的变化实验,研究了孔隙水压力对高速远程滑坡-碎屑流运动的影响^[40-41]。

Foda(1994)^[42], Kobayashi(1997)^[43]等先后提出“底部压力波机理”^[44]解释大滑坡远程运动的原因,其主要观点是:野外观察和实验记录表明,许多大滑坡的最初运动是滑动。在滑动时剪切作用集中在滑体的底部,远离底部几乎没有或完全没有剪切作用出现。一旦滑坡的滑动速度达到一个临界值,可以在上覆的准静态变形的颗粒团块与下伏的颗粒惯性支配的快速颗粒流之间的界面上,产生强大的压力波,诱发了开尔文-赫姆霍兹类型的失稳,迫使在上覆压力与滑动速度之间出现有利的相移,从而导致摩擦消耗的总能量的净减少。可以用一个漂浮在底部颗粒剪切流层上面的有限深度的整体弹性滑块模型,代表这些大量的整体颗粒物质的滑动运动。分析结果表明,由于大滑坡比小滑坡易于达到速度的临界值,所以运动过程中摩擦阻力小,更易于远程运动。

2.2 国内研究现状

2.2.1 典型重大崩滑实例的研究

20世纪60年代以后,我国先后发生了十几起著名的灾难性高速滑坡与崩塌。1961年,湖南柘溪水库开始蓄水初期,近坝库区右岸塘岩光发生滑坡,造成巨大损失^[45]。1965年云南禄劝普渡河谷大型高速滑坡-碎屑流,掩埋5个村庄,致死444人^[46]。1980年湖北宜昌盐池河磷矿灾难性高速崩滑体,掩埋整个矿区,死亡284人^[47]。1983年甘肃东乡洒勒山高速滑坡,掩埋4个村庄,伤亡278人^[48]。1985年长江三峡新滩高速滑坡,堵塞航道,造成重大损失^[49]。1989年四川华蓥溪口镇高速滑坡-碎屑流,掩埋221人^[50]。1991年云南昭通头寨沟特大规模山体高速滑坡-碎屑流,造成216人死亡^[51]。1999-09-21台湾中部南投县发生7.3级强烈地震,诱发大面积滑坡和碎屑流灾害。云林县古坑乡草岭村之春秋断崖,向南滑向清水溪及对岸嘉义县

梅山乡之倒交山,体积约 $120 \times 10^6 \text{ m}^3$,沿倾角 14° 的顺向坡层面滑动。其中,约 $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ 之土石散落在长达5 km的清水溪中,大部分土石(约 $100 \times 10^6 \text{ m}^3$),连同原住草岭春秋断崖上方的14户36人,飞越清水溪河谷而降落于倒交山上,29人遇难^[52]。2000-04-09,西藏林芝地区波密县易贡藏布河扎木弄沟发生巨大规模高速远程崩塌,强大的冲击力激发了沟内的块石碎屑物质,瞬间形成高速块石碎屑流,以锐不可挡之势,扫荡谷口两侧山体,倾泻于易贡湖出口处,形成长达4.6 km,前沿最宽达3 km,高达60~100 m的天然坝体,完全堵塞易贡藏布江^[53]。2001-11-14青海昆仑山地区发生7.9级地震,由于强烈的地面运动,冰盖区的斜坡失稳激发了几个巨大的冰崩,以35 m/s的运动速度向下运动超出冰川前舌2~3 km^[54]。2003-07-13,长江三峡一级支流青干河左岸的湖北秭归县沙镇溪镇千将坪村,发生大型高速顺层强风化残坡积层滑坡,滑坡体积约 $24 \times 10^6 \sim 30 \times 10^6 \text{ m}^3$,快速冲入河道,形成堵河大坝,先后造成14人死亡,10人失踪^[55]。

2.2.2 崩滑动力学机理的研究

在众多高速崩滑发生的同时,我国先后出现了崩滑机理的研究成果。潘家铮1980年在《建筑物的抗滑稳定和滑坡分析》中,提出了滑坡速度的计算公式^[56]。张缙(1980)进一步提出了高速滑坡的启动机理,指出峰值强度与残余强度越大,滑体势能越大,并可转化为动能,同时指出运动路线对运动速度与距离的影响^[57]。郭崇元(1982)提出了超大型滑坡速度的计算公式^[58]。方玉树(1984)对超大型滑坡动力学问题进行了详细地论述与分析^[59]。张倬元、刘汉超(1989)通过对黄河上游龙羊峡水电站近坝库岸大型高速滑坡-碎屑流的研究,首次提出碎屑流化滑坡高速远程运动的原因是碎屑间相互碰撞引起的动量传递,发现非地震导致的饱水砂土液化使滑坡高速滑动的地质证据,并认为高速滑坡获得并保持高速和达到远程滑动的原因有滑体高位能、中部剪断带粘土峰残强度差值相当大以及饱水砂土液化、气垫效应和碎屑流动等^[60]。王兰生(1988)提出高速滑坡启动的“平卧支撑拱”机理^[49],并在《工程地质分析原理》一书中,对高速滑坡-碎屑流进行了深入地阐述和分析^[61]。晏同珍(1994)在《水文工程地质与环境保护》等著作中,对滑坡的形成机理、高势能滑坡的滑程进行了深入地分析和研究^[62]。胡广韬(1988, 1995)系统论述了多

冲程与多序次“石家坡型剧动式高速滑坡”的动力学机理, 特别对多冲程高速滑坡的“超前溅泥气浪”与“边缘旋流”进行了深入地分析; 并在《滑坡动力学》文献中, 系统地提出、阐述、论证了有关“滑坡动力学”的 20 余项关键性理论、观点和问题, 具有重要的理论意义^[37, 63]。王思敬、王效宁 (1989) 在“大型高速滑坡的能量分析及其灾害预测”一文中, 专门分析了高速滑坡运动全过程的能量变化^[64]。黄润秋、王士天、张倬元 (1989) 提出斜坡岩体高速滑动的“滚动摩擦”机制^[65]。张佳川、周瑞光 (1989) 从几种滑坡运动主要因素讨论分析出发, 用能量法和物理方程分析导出地下水作为主要触发与运动动力的滑坡其滑速公式^[66]。卢万年 (1991) 应用空气动力学中的机翼理论分析了高速滑坡体在空气中滑行的规律, 在理论上定量地分析了“空气动力擎托”的机理, 提出了滑坡远程运动中滑坡速度及滑程的预测公式^[67]。徐俊龄 (1994, 1997) 提出高速滑坡形成的“闸门效应”, 并讨论了高速滑坡的基本类型^[68, 69]。陈自生 (1993) 对沟谷型滑坡的流态化问题进行了分析^[70]。王效宁 (1993) 研究了滑坡体中滑带温度场的变化规律, 讨论了温度与滑动速度的关系^[71]。程谦恭、彭建兵、胡广韬等 (1997, 1999, 2000) 详细研究了剧冲式高速滑坡变形、破坏、失稳剧动、高速飞行、碰撞解体及冲击成坝的动力学机理^[38, 72-79]。钟立勋 (1998) 基于洒勒山滑坡、溪口滑坡、头寨沟滑坡的调查研究, 提出“崩滑灾害形成的相似性”^[80]。王家鼎与张倬元 (1999) 对典型高速黄土滑坡群进行了系统的工程地质研究, 提出了地震诱发高速黄土滑坡的机理—黄土体解体、斜抛和粉尘化效应^[81, 82]; 并与白铭学、肖树芳 (2001) 分析了强震作用下低角度黄土斜坡滑移的机理^[83]。王士天、许强、柴贺军 (2000)^[53]、殷跃平 (2000)^[84]、朱平一、王成华、唐邦兴 (2000)^[85]、任金卫、单新建、沈军 (2001)^[86] 分别对易贡高速崩塌—碎屑流的机理进行了研究。

苗天德、刘忠玉、马崇武等 (2000) 基于对高速滑坡发生机理的认识及对其运动特征和堆积特征的分析, 假定滑体的运动形式是连续可变的, 建立了预测高速滑坡远程的块体运动模型^[87]。南凌、崔之久 (2000) 基于西安翠华山高速运动的古崩塌性滑坡体, 将其平面堆积体划分为中央相带、边缘相带、抛掷相带、气浪溅泥相带和特殊的残留相带, 分析了崩塌体的运动和动力学特性^[88]。黄润秋 (2003) 对几

类典型的大型岩质斜坡变形及失稳机理进行了深入地分析, 阐述了大型滑坡形成的“滑移—拉裂—剪断”、“挡墙溃决”、“超级强夯”等模式的发生机理^[89]。程谦恭、张倬元、黄润秋、崔鹏 (2004) 对斜向层状岩体斜坡上滑坡的变形、破坏、失稳的动力学机理进行了深入地分析, 建立了相应的力学判据^[90-92]。李忠生、胡广韬、彭建兵 (2004) 对地震动作用下黄土滑坡的稳定性动力学机理进行了细致的分析和研究^[93]。

3 高速远程崩滑动力学研究趋势

3.1 应用比较滑坡学的方法研究崩滑的动力学机理

20 世纪 80 年代以后, 特别是近年来, 随着人类探索地外行星技术的发展, 以及海洋探测技术的进步, 应用比较滑坡学的方法, 开拓崩滑的研究领域和视野, 从另外一个侧面研究崩滑的远程机理, 正在成为一种新的发展趋势。科学家将地球表面的崩塌 (滑坡)—碎屑流 (Sturzstrom) 现象与发生在月球表面、火星表面的大的岩质滑坡碎屑流, 进行了比较研究^[94-99], 发现二者的沉积地貌特征与运行规律具有惊人的相似性。但是月球和火星表面的岩崩 (滑坡) 碎屑流的规模比地球表面的岩崩 (滑坡) 碎屑流发育范围明显地大, 例如, Apollo 17 登月舱触发的滑坡岩屑流, 面积 27 km^2 , 在平坦月面上运行超过 5 km , 最大高度落差 2 km ; 火星表面 3 个大的滑坡, 宽度范围接近 120 km , 最大垂直落差达 9.4 km ; 火星 Gangis Chasma 南坡上一个大的滑坡堆积物, 体积 $100 \times 10^9 \text{ m}^3$, 以 $> 100 \text{ km/h}$ 的速度沿着槽状谷地运动了 60 km 。

与此同时, 也有许多学者比较了崩滑—碎屑流与火山碎屑流 (pyroclastic flow)、海底水下滑坡 (submarine landslide) 等块体运动特征的异同点。最明显的差异是, 火山碎屑流以及海底水下滑坡, 它们的速度大^[100]; 并且其规模和运动范围, 也比非火山的滑坡 (岩崩)—碎屑流明显地高出 1 个数量级。例如, 墨西哥科利马火山 18 500 a 前的一个巨大岩屑崩落, 远程 120 km , 覆盖面积 $2\,200 \text{ km}^2$ ^[101]; 中大西洋海岭裂谷东壁上, $45 \times 10^4 \text{ a}$ 以前 $4 \times 5 \text{ km}$ 范围的巨大水下滑坡, 崩溃形成的碎岩激流, 流动 11 km 以上, 在谷地形成了体积 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的“碎屑楔”, 仰冲和逆向滑动特点表明, 碎岩激流速度很高^[102]; 美国夏威夷的一些巨大水下滑坡, 被认为是属于地

球上的最大滑坡, 长度大于 200 km, 体积几千 km^3 [105]。

由于高速崩滑体在运动过程中, 与运动路径两侧或前方突出的阻挡山体发生多次不同类型的碰撞, 崩滑体多已破碎成碎屑状或碎块状; 加之在运动过程中, 由于有合适的圈闭地形 (如狭谷) 条件, 裹挟了大量的气体; 或者由于崩滑坡体在启动时就有水的参与, 或者裹挟了所经过路径 (如沟谷或小河) 的水体; 加之在碎屑体中有强烈的振动作用存在 (由崩滑体的势能或动能转化而来), 因此崩滑体在运动过程中被“流态化 (fluidization)”或转化为“流体”状态。此时, 滑坡体是由固体碎屑与空气相互混合的二相干碎屑流 (sturzstroms, dry sturzstroms, dry landslides, dry rock avalanches, dry rock debris fluidization of dry landslides), 或是固体碎屑、水和空气混合的三相湿碎屑流 (wet debris wet flow)。也有的滑坡经“碎屑化”和“流态化”, 最初为固-气二相干碎屑流, 后来由于有水的掺入, 而转化为三相湿碎屑流, 而且是很高动能和势能、具有极大冲击破坏力的碎屑流。上述两种碎屑流的物质组成、运动方式及运动机理均不同于一般所讲的泥石流 (debris flow), 例如泥石流运动的最大速度比崩滑-碎屑流的最大速度小一个数量级 (加利福尼亚 Wrightwood 泥石流的最大速度为 20 km/h, 我国云南蒋家沟泥石流的最大速度为 15 m/s); 而且泥石流主要由固-液二相组成, 基本没有或很少有气相。崩滑-碎屑流之所以有很高的速度, 就在于碎屑流在运动过程中有强烈的气体掺入。流体力学的多相流理论 [104] 认为, 固、液、气三相各相含量的不同对流体的流变特性有明显的影响。随掺气量的增大, 流体粘度减小, 导致雷诺数增大, 阻力系数减小, 流动加快, 破坏性加剧。火山碎屑流之所以有比崩滑-碎屑流更大的速度, 也是因为火山碎屑流中有大量的 (由火山喷发提供) 比崩滑-碎屑流更多的气体, 并且是温度很高的气体 (碎屑流的温度越高, 粘度也越小), 而且往往还有水的掺入。海底水下滑坡之所以有更大的速度, 是因为有巨大的水体掺入, 形成了低粘度、高流动性的浊流。虽然在火星和月球上没有气体或很少有水体, 但火星和月球上的碎屑流往往由巨大的陨石碰撞冲击 (相当于小型原子弹爆炸的能量) 而触发, 因此碎屑流像火箭一样被“喷射”或“溅射”很远; 并且没有空气阻力, 反而使碎屑流“飞行”得更远。

3.2 广泛应用物理模拟和数值模拟手段, 量化地分析崩滑的动力学机理

20世纪 90 年代以后, 国内外对高速崩滑远程运行机理的研究主要体现在, 根据流体力学的理论和方法, 广泛应用物理模拟和数值模拟手段, 再现崩滑的运动过程, 分析崩滑的运动机理。例如, T rank (1986) 应用模型实验研究美国蒙大拿州麦迪逊河峡谷 $2140 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡, 利用连续介质力学和水动力学的哈维-斯托克斯方程建立了数学模型, 估计了滑坡运动速度 [105]; Sousa 与 Voight (1992) 建立了连续动力流模型, 应用非压缩二相粘流的瞬变流模型, 估价灾难性滑坡的灾害 [106]; Chu, Hill 与 Melong 等 (1995) 根据颗粒流物理实验预测岩屑崩落的仰冲 [107]; Hungn (1995) 基于运动方程的拉格朗日解和材料流变特性, 建立了一个连续运动模型模拟滑坡-岩屑流、大规模液化失稳等块体运行过程 [108]。Okura, Kitahara 与 Sammori (2000) 先后用试验方法研究了干滑坡的流态化机理, 分析了岩崩体积对于远程距离的影响 [109-110]。Davies 与 McSaveney (2002) 用一个快速块体动力学分析的连续模型, 进行了碎屑化岩崩运动的动力学模拟 [111]。邢爱国、高广运、吴世明 (2002) 开展了高速滑坡飞行气动特性的风洞试验研究 [112]。胡厚田、刘涌江、邢爱国等 (2003, 2004) [113-114] 进行了高速滑坡岩体碰撞效应的试验研究。

4 进一步研究应解决的重点问题

4.1 研究的总体思路与目标

由上述国内外高速崩滑动力学的研究现状与发展趋势, 结合本文作者近年来的研究工作, 可以认为进一步研究的总体思路与研究目标是:

以典型重大崩滑灾害为研究对象, 以高速崩滑体诱发、运动的丰富而翔实的地质证据为依据, 以野外现场地质原型的全面调查和建立为基础, 以室内岩土力学参数试验、大型物理模型实验和多种数值模拟为手段, 以现代工程地质和岩土力学等理论为指导, 运用多学科的手段, 定性分析和定量研究方法相结合, 分析研究重大崩塌、滑坡诱发与运动全过程的机理, 提出类似灾害事件预警的关键技术和方法, 推动地质灾害监测预警技术水平的提高, 为重大地质灾害的减灾防灾提供科学依据。

4.2 研究应解决的十大重点问题

根据研究的总体思路与目标, 今后应解决的重

点问题可以归纳为以下十个方面:

1. 分析斜坡变形、破坏、失稳的工程地质条件, 查明重大典型崩塌、滑坡的成因机制和变形破坏模式, 建立斜坡变形及演化过程的工程地质 - 力学机理模型。

2. 分析降雨 (大暴雨) 条件与诱发作用下, 岩质斜坡变形、破坏与演化过程中, 岩体裂隙介质中水岩的相互作用条件、特点及规律, 建立斜坡的固 - 液耦合作用及突变动力学模型, 确立重大高速岩质滑坡的暴雨触发机理。

3. 分析强地震作用下, 岩质斜坡变形、破坏与演化过程中, 岩体裂隙累进性破坏的损伤效应、特点及规律, 以及岩体突变破坏的断裂效应、特点及规律, 建立斜坡的固体 - 弹性波作用及突变动力学模型, 确立重大高速岩质崩塌的地震触发机理。

4. 分析重大崩塌、滑坡运动全过程的运动特点, 划分运动阶段及其期次, 建立其运动过程的几何学、运动学、动力学的地质模型与力学模型, 研究其各个运动阶段的运动规律及其机理。

5. 分析重大崩塌、滑坡转化成碎屑流的“碎屑化过程”的特点, 建立崩塌 (滑坡) - 碎屑流时间、空间转换过程与作用的地质模型与力学模型, 研究碎屑流的“碎屑化机理”。

6. 分析重大崩塌、滑坡转化成碎屑流的“流态化过程”的特点, 建立碎屑化的崩塌、滑坡物质, 在运动过程中由于裹挟了大量的气体或者裹挟了所经过路径的水体后, 进一步“流态化”运动的地质模型与力学模型, 研究碎屑流的“流态化机理”。

7. 分析重大崩塌、滑坡高速远程运动停止后, 在堆积区停积的物质组成、成分及其堆积物的各种宏观和微观结构特征, 分析堆积区的分布范围及纵向、横向地貌形态特征, 进行堆积区的分区、分带、分类, 建立碎屑流堆积的地质模型和力学模型, 研究堆积物的形成与成因机理。

8. 分析重大崩塌、滑坡运动过程中, 形成灾害的原因、过程及其机理, 根据崩塌、滑坡的不同运动类型和运动路径, 建立崩塌 (滑坡) 的体积与启程速度、平均运动速度、最大运动速度的函数关系式; 建立崩塌 (滑坡) 体积、运动速度与滑坡最大运动距离的函数关系; 建立崩塌 (滑坡) 体积、运动速度与碎屑流最大覆盖面积的函数关系; 建立崩塌 (滑坡) 体积、运动速度与碎屑流冲击破坏力、冲击气浪破坏力的函数关系。

9. 建立重大崩塌、滑坡灾害, 失稳前、临界失稳及失稳后等不同预警阶段, 斜坡的变形速率及崩塌、滑坡灾害的剧动速度与运动速度等预警值, 建立灾害作用影响范围 (流域、面积) 的预警值, 提出防灾减灾的有效措施。

10. 建立重大崩塌、滑坡灾害预警规范。

参考文献 (References)

- [1] International Union of Geological Sciences Working Group on Landslide. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1995, 52: 75~78
- [2] Jackson, J. A. Glossary of Geology (Fourth Edition) [M]. Virginia: American Geological Institute, 1997, 556~557
- [3] Crandell D. R., Miller C. D., Glicken, H. X. Catastrophic debris avalanche on ancestral Mount Shasta volcano, California [J]. *Geology*, 1984, 12: 143~146
- [4] Harrison J. V., Fakon N. L. An ancient landslip at Saidn arreh in south western Iran [J]. *Journal of Geology*, 1938, 46(3): 296~309
- [5] Gaziev E. Study of the U soy landslide in Pam ir [A]. In: *Proceedings of 4th International Symposium on landslide*, Vol 1 [C]. Toronto, Canada, 1984, 511~515
- [6] Heim, A. Bergsturz und Menschenleben [M]. Zürich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932. (English translation by Skemer N. A. Landslides and Human Lives [M]. Vancouver, B.C.: BTEch Publishers Ltd, 1989, 1~196)
- [7] Hsu K. J. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86(1): 129~140
- [8] Scheidegger A. E. On the prediction of the reaching and velocity of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5: 231~236
- [9] Voight B. Rockslides and Avalanches Vol 1, Natural phenomena [M]. New York: Elsevier, 1978, 1~826
- [10] Bock C. G. Martinez mountain rock avalanche [A]. In: *Reviews in the Engineering Geology*, Vol 13, Landslide [C]. U. S.: Geological Society of America, 1977, 155~168
- [11] Moore D. P., Mathews W. H. The Rubble Creek landslide south western British Columbia [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1978, 15(3): 1039~1052
- [12] Eibacher G. H. Cliff collapse and rock avalanche (sturzstrom) in the Mackenzie Mountains northwestern Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1979, 16: 309~344
- [13] Porter S. C., Ormbelli G. Catastrophic rock fall of September 12, 1717 on the Italian flank of the Mont Blanc Massif [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1980, 24(2): 200~218
- [14] Chague, J. J., Souther J. G. The Dusty Creek landslide on Mount Cayley, British Columbia [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 1982, 19: 524~539
- [15] Schultze A. P. Ancient giant rockslides: Sinking Creek Mountain

- tain, southern Appalachians Virginia[J]. *Geology*, 1986, 14: 11~14
- [16] Southworth C. C. Large Quaternary landslides in the Appalachian Valley and Ridge province near Petersburg west Virginia[J]. *Geomorphology*, 1988, 1: 317~329
- [17] Hewitt K. Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya[J]. *Science*, 1988, 242: 64~67
- [18] King J., Loveday I., Schuster R. L. The 1985 Baiman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1989, 22: 257~270
- [19] Evans S. G., Clague J. J., Woodsworth G. J., et al. The Pandemonium Creek rock avalanche, British Columbia[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26: 427~446
- [20] Evans S. G. Rock avalanche run-up record[J]. *Nature*, 1989, 340: 271
- [21] Kaiser P. K., Simmons J. V. A reassessment of transport mechanism of some rock avalanches in the Mackenzie Mountains Yukon and Northwest Territories Canada[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27: 129~194
- [22] Evans S. G., Hungr O., Enegeen E. G. The Avalanche Lake rock avalanches Mackenzie Mountains Northwest Territories Canada description, dating and dynamics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31: 749~768
- [23] Shaller P. J. Analysis of a large moist landslide Lost River Range, Idaho U. S. A. [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1991, 28: 584~600
- [24] Pearl M. The Kaipit landslide events and mechanisms[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1991, 24: 399~411
- [25] Costa J. E. Nature, mechanics and mitigation of the Valpola landslide, Valtellina, Italy, 1987~1988[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1991, 35(1): 15~38
- [26] Azzoni A., Chiesa S., Frassoni and Govi, M. The Valpola landslide[J]. *Engineering Geology*, 1992, 33: 59~70
- [27] McLellan P. J., Kaiser P. K. The Rockslide Pass rock avalanche Mackenzie Mountains N. W. T. [A]. In Preprint Volume for 37th Canadian Geotechnical Conference Canadian case histories-landslide[C]. Toronto, Canada, 1984, 135~140
- [28] Cruden, D. M., Lu, Z. Y. The rockslide and debris flow from Mount Cayley, B. C., in June 1984[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29: 614~626
- [29] Strom, A. L. Mechanism of stratification and abnormal crushing of rockslide deposits[A]. In 7th International AEG Congress[C]. Balkema, Rotterdam, 1994, 1287~1295
- [30] Wieczorek G. L., Snyder J. B., Waitt R. B. Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles Yosemite National Park California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(1): 75~85
- [31] Evans S. G., Hungr O., Clague J. J. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada Implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(1): 29~51
- [32] 自然研究会. 昭和 59年长野县西部地震による災害[M]. 日本: 信州大学, 1985, 1~110
- [33] Anna S., Makuma H., Yoshinura M. Dynamics of earthquake induced slope failure of Ontake[A]. In Proceedings of the 5th International Symposium on Landslide Vol. 1[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988, 61~66
- [34] Eishacher G. H., Clague J. J. Destructive mass movements in high mountain hazard and management[M]. Ottawa: Canadian Government Publishing Centre, 1984, 1~228
- [35] Eismann T. H., Abeke G. Dynamics of rockslides and rockfalls[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001, 1~316
- [36] Evans S. G., Delfaff J. V. Catastrophic Landslides Effects Occurrence and Mechanisms[M]. Boulder, Colorado: The Geological Society of America, 2002, 1~411
- [37] Hu Guangtao. Landslide Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 16~22[胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 16~22]
- [38] Cheng Qiangong, Peng Jianbing, Hu Guangtao, et al. Dynamics of Rockslide-Avalanche[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999, 1~7[程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999, 1~7]
- [39] Vardoulakis I. Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(3): 157~171
- [40] Sassa K. Special lecture: Geotechnical model for the motion of landslides[A]. In Proceedings of the 5th International Symposium on Landslide Vol. 1[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988, 37~55
- [41] Sassa K. Mechanism of flows in granular soils[A]. In Geo-Eng2000—An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering Vol. 1: Invited Papers[C]. Lancaster: Pennsylvania Technomic Publishing Co. Inc, 2000, 1671~1702
- [42] Foda M. A. Landslides riding on basal pressure waves[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 1994, 6: 61~79
- [43] Kobayashi Y. Long runout landslides riding on a basal guided wave[A]. In Engineering Geology and the Environment[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997, 761~766
- [44] Zhang D., Foda M. A. An instability mechanism for the sliding motion of finite depth of bulk granular materials[J]. *Acta Mechanica*, 1997, 121: 1~19
- [45] Jing Delian, Wang Genfu. Tangyanguang landslide of Zhexi Reservoir[A]. In Chinese Typical Landslides[C]. Beijing: Science Press, 1988, 301~307[金德谦, 王耕夫. 柘溪水库塘岩光滑坡[A]. 见: 中国典型滑坡[C]. 北京: 科学出版社, 1988, 301~307]
- [46] ShiYafeng, Tang Bangxing, Xu Bing, et al. Investigation on Lannigou huge rock avalanche in Luquan County, Yunnan Province [A]. In Proceedings of the first symposium of the debris flows and landslides prevent and control in China[C]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1993, 188~194[施雅风, 唐邦兴, 许兵, 等. 云南省禄劝县普福河烂泥沟特大崩塌型滑坡调查研究[A]. 见: 首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集[C]. 昆明: 云南科技出版社, 1993, 188~194]

- [47] Sun Yuke, Yao Baokui. Study on mountain landslide mechanism at Yanchihe phosphorus mine [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1983, (1): 1~7 [孙玉科, 姚宝魁. 盐池河磷矿山体崩塌破坏机制的研究 [J]. 水文地质工程地质, 1983 (1): 1~7]
- [48] Wu Weijiang, Wang Shouying. Mechanism of Sala Shan landslide [A]. In *Selected Papers on Landslide* [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 184~189 [吴玮江, 王守颖. 洒勒山滑坡机制 [A]. 见: 一九八七年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集 [C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 184~189]
- [49] Wang Lansheng, Zhan Zheng, Su Daogang, et al. The preliminary studies of Xintan landslide's development characteristic and the mechanism of the starting and motioning and stopping [A]. In *Chinese Typical Landslides* [C]. Beijing: Science Press, 1988. 211~217 [王兰生, 詹铮, 苏道刚, 等. 新滩滑坡发育特征和起、滑、停及制动机制的初步研究 [A]. 见: 中国典型滑坡 [C]. 北京: 科学出版社, 1988. 211~217]
- [50] Huang Runqiu, Deng Rungui, Zhang Zhuoyuan. Full Course Numerical Simulation of High Slope Material Movement [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1993. 87~121 [黄润秋, 邓荣贵, 张倬元. 高边坡物质运动全过程模拟 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. 87~121]
- [51] Tan Jizhong. Analysis of movement of huge high speed landslide in Toudaigou, Yunnan Province [J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 1993, 4(1): 37~44 [谭继中. 云南头寨沟大型高速滑坡运动特征探讨 [J]. 地质灾害与环境保护, 1993, 4(1): 37~44]
- [52] Hung Jijiang, Lee Chiyi, Lin Meiling. A flying mountain and dam-up lake (Taoling Rockslides) [J]. *Sino-Geotechnics*, 2000, 77: 5~18 [洪如江, 李锡堤, 林美聆. 天堑可以飞渡, 崩山足以断流 [J]. 土工技术 (台湾), 2000 77: 5~18]
- [53] Wang Shitian, Xuqiang, Cai Hejun. Nature and forming mechanism of Yigong rockfall-avalanche in Boni County, Tibet [A]. In *Theories and practices on geological engineering problems in complicated environments* [C]. Chengdu: Sichuan University Press, 2002. 162~175 [王士天, 许强, 柴贺军. 西藏自治区波密县易贡崩塌——高速滑坡发育的基本特征及成因机制研究 [A]. 见: 复杂环境中地质工程问题研究的理论与实践 [C]. 成都: 四川大学出版社, 2002. 162~175]
- [54] Van der Woerd J., Owen L. A., Tapponnier P. Giant similar to M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics [J]. *Bulletin of the Geological Society of American*, 2004, 116(3~4): 394~406
- [55] Dai F. C., Deng J. H., Than, L. G. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1233~1240
- [56] Pan Jiazheng. Antisliding to Structures and Landslide Analyses [M]. Beijing: Water Resources Press, 1980. 120~132 [潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1980. 120~132]
- [57] Zhang Jing. Preliminary analysis of rock stone falling and moving [A]. In *Geomechanics Problems in Rock Engineering (3)* [C]. Beijing: Science Press, 1980. 133~143 [张缙. 岩块崩塌与运动初析 [A]. 见: 岩体工程地质学问题 (三) [C]. 北京: 科学出版社, 1980. 133~143]
- [58] Guo Chongyuan. Large scale rockslides and the methods for determining their sliding velocity [A]. In *The Collected Works of the Institute of Water Resources and Hydropower Research Vol. 8* [C]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1982. 28~45 [郭崇元. 大型滑坡及其速度计算 [A]. 见: 水利水电科学院科学研究论文集, 第 8 集 [C]. 北京: 水利水电出版社, 1982. 28~45]
- [59] Fang Yushu. On the dynamics of super-large landslides [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1988, (6): 20~24 [方玉树. 超大型滑坡动力学问题研究 [J]. 水文地质工程地质, 1988 (6): 20~24]
- [60] Engineering Geology Research Office of Chengdu College of Geology. Study on the Major Engineering Problems in Longyang Gorge Hydropower Station [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1989. 52~116 [成都地质学院工程地质研究室. 龙羊峡水电站重大工程地质问题研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. 52~116]
- [61] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principle of Engineering Geology Analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 308~382 [张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. 308~382]
- [62] Yan Tongzhen. Hydro-Engineering Geology and Environment Protection [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1994. 41~71 [晏同珍. 水文工程地质与环境保护 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 41~71]
- [63] Hu Guangtao. Multiple stroke and violent motion and high speed landslide in Shijiao [A]. In *Chinese Typical Landslides* [C]. Beijing: Science Press, 1988. 39~44 [胡广韬. 石家庄多冲程剧烈式高速滑坡 [A]. 见: 中国典型滑坡 [C]. 北京: 科学出版社, 1988. 39~44]
- [64] Wang Sijing, Wang Xiaoning. Analysis of energy on large-scale high speed landslide and their catastrophic prediction [A]. In *Selected Papers on Landslide* [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 117~124 [王思敬, 王效宁. 大型高速滑坡的能量分析及其灾害预测 [A]. 见: 一九八七年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集 [C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 117~124]
- [65] Huang Runqiu, Wang Shitian, Zhang Zhuoyuan. The rolling friction mechanism of high speed sliding rocky slopes [A]. In *New Advances in Engineering Geology* [C]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1989. 318~325 [黄润秋, 王士天, 张倬元. 斜坡岩体高速滑动的“滚动摩擦”机制 [A]. 见: 工程地质科学新进展 [C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. 318~325]
- [66] Zhang Jiachuan, Zhou Ruiguang. An analysis of landslide movement [A]. In *New Advances in Engineering Geology* [C]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology,

1989. 277~ 287[张佳川, 周瑞光. 滑坡运动分析 [A]. 见: 工程地质科学新进展 [C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. 277~ 287]
- [67] Lu Wannian. A erodynamic approach to sliding problems of high speed landslide [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1991, 13 (4): 77~ 85[卢万年. 用空气动力学分析坡体高速滑坡的滑行问题 [J]. 西安地质学院学报, 1991, 13(4): 77~ 85]
- [68] Xu Junling. High speed landslides and its basic types in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5 (Suppl): 24~ 29[徐峻岭. 中国的高速滑坡及其基本类型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增刊): 24~ 29]
- [69] Xu Junling. A summary of present research on high speed and long distance landslide [A]. In: *Collected Works of Landslide* (12) [C]. Beijing: China Railway Press, 1997. 54~ 64[徐峻岭. 高速远程滑坡研究现状综述 [A]. 见: 滑坡文集 (12) [C]. 北京: 中国铁道出版社, 1997. 54~ 64]
- [70] Chen Zisheng, Kong Jining. Fluidization of landslides on channeled slope [A]. In: *Proceedings of symposium on the stability of natural slopes and the slope deformation of Huaying Mountain* [C]. Beijing: Earthquake Press, 1993. 85~ 91[陈自生, 孔纪名. 试论沟谷型滑坡流态化问题 [A]. 见: 自然边坡稳定性分析暨华莹山边坡变形研讨会论文集 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 85~ 91]
- [71] Wang Xiaoning. Landslide temperature field and its application to the Three Gorges project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(2): 126~ 137[王晓宁. 滑坡温度特性研究及其在三峡库岸稳定分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(2): 126~ 137]
- [72] Cheng Qiangong, Peng Jianbing, Hu Guangtao. Dynamic mechanism analysis on rockslide with violent starting and high speed caused by rocky peak-residual strength drop [A]. In: *Xi'an Engineering College. New advances for geological engineering and water resources* [C]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. 42~ 50[程谦恭, 彭建兵, 胡广韬. 剧动式高速岩质滑坡临床峰残强降加速动力学机理分析 [A]. 见: 西安工程学院编, 地质工程与水资源新进展 [C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 42~ 50]
- [73] Cheng Qiangong, Hu Houtian. Dynamical analysis on the whole process of acute-colliding high-speed landslide [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1999, 26(4): 19~ 23[程谦恭, 胡厚田. 剧冲式高速滑坡全程动力学机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(4): 19~ 23]
- [74] Cheng Qiangong, Hu Houtian, Peng Jianbing. Analysis on the evolution process about rocky high speed landslide and landslide dam [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1999, 10(3): 28~ 36[程谦恭, 胡厚田, 彭建兵等. 剧冲式高速滑坡及滑坡坝演化过程分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 28~ 36]
- [75] Cheng Qiangong, Hu Houtian, Hu Guangtao, et al. On the dynamic mechanism of disintegration colliding and shock damping by high speed rocky landslide [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 43~ 46[程谦恭, 胡厚田, 胡广韬等. 高速岩质滑坡撞击弹落冲击夯实成坝的动力学机理 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 43~ 46]
- [76] Cheng Qiangong, Hu Houtian, Hu Guangtao, et al. A study of complex accelerated dynamics mechanism of high speed landslide by elastic rocky impulse and peak-residual strength drop [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 173~ 176[程谦恭, 胡厚田, 胡广韬等. 高速岩质滑坡临床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机理 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173~ 176]
- [77] Cheng Qiangong, Hu Houtian, Peng Jianbing. Study on dynamics mechanism of landslide with locked flank in plane rotation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 634~ 639[程谦恭, 胡厚田, 彭建兵. 侧翼锁固平面旋转式滑坡动力学机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 634~ 639]
- [78] Cheng Qiangong, Hu Houtian, Peng Jianbing, et al. Visco-elastoplastic finite element simulation of progressive failure of high-steep rock slope [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8 (1): 25~ 30[程谦恭, 胡厚田, 彭建兵等. 高边坡渐进性破坏粘弹塑性有限元数值模拟 [J]. 工程地质学报, 2000, 8 (1): 25~ 30]
- [79] Cheng Qiangong, Hu Houtian. Discrete element simulation of full course kinematics of rocky high-speed landslide [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2000, 35(1): 18~ 22[程谦恭, 胡厚田. 剧冲式高速岩质滑坡全程运动学数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1): 18~ 22]
- [80] Zhong Lixun. Forming resemblance of the rock falls and landslides [A]. In: *Proceedings of Conference on Natural Hazards Mitigation of China* [C]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1998. 174~ 178[钟立勋. 崩滑灾害形成的相似性 [A]. 见: 全国减轻自然灾害研讨会论文集 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 174~ 178]
- [81] Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan. A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 670~ 674[王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670~ 674]
- [82] Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan. Research on Systems Engineering Geology of Typical High Speed Loess Landslide Group [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999. 79~ 114[王家鼎, 张倬元. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999. 79~ 114]
- [83] Wang Jiading, Bai Mingxue, Xiao Shufang. A study on compound mechanism of earthquake-related sliding displacements on gently inclined loess slope [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 445~ 449[王家鼎, 白铭学, 肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 445~ 449]
- [84] Yin Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Boni Tibet [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, (4): 8~ 11[殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾对策 [J]. 水文地质工程地质, 2000, (4): 8~ 11]

- [85] Zhu Pingyi Wang Chenghua Tang Bangxing. The deposition characteristic of supper debris flow in Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(5): 453~ 456[朱平一, 王成华, 唐邦兴. 西藏特大规模碎屑流堆积特征[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 453~ 456]
- [86] Ren Jinwei Shan Xinjian Shen Jun. Geological characteristics and kinematics of the rock fall landslide in Yifeng Southeastern Tibet[J]. *Geological Review*, 2001, 47(6): 642~ 647[任金卫, 单新建, 沈军. 西藏易贡崩塌—滑坡—泥石流的地质地貌与运动学特征[J]. 地质评论, 2001, 47(6): 642~ 647]
- [87] Tiandei M., Zhongyu L., Yonghong N. A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38: 217~ 226
- [88] Nan Ling Cui Zhijiu. The deposit characteristics of the paleo- avalanche landslide in Xifan Cuihua Mountain and analysis of its generative process[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(6): 502~ 507[南凌, 崔之久. 西安翠华山古崩塌性滑坡体的沉积特征及其形成过程[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 502~ 507]
- [89] Huang Runqiu. Mechanism of large scale landslides in western China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 640~ 647[黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 640~ 647]
- [90] Cheng Qiangong Zhang Zhuoyuan Huang Runqiu. Dynamics and stability criterion of oblique layered rocky landslide under lockup with combination of flank and bedding plane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(11): 1874~ 1882 [程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 侧翼与滑床复合锁固切向层状岩体滑坡动力学机理与稳定性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1874~ 1882]
- [91] Cheng Qiangong Zhang Zhuoyuan Cui Peng *et al.* Dynamics and stability criterion of oblique layered landslide with plane rotation under lockup of centric segment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2718~ 2725 [程谦恭, 张倬元, 崔鹏等. 中部“砥柱”锁固平面旋转切向层状岩体滑坡启动机理与稳定性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2718~ 2725]
- [92] Cheng Qiangong Zhang Zhuoyuan Cui Peng. Dynamical mechanism and stability criterion of landslide under lockup of soil arching[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2855~ 2864 [程谦恭, 张倬元, 崔鹏. 平卧“支撑拱”锁固滑坡动力学机理与稳定性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2855~ 2864]
- [93] Li Zhongsheng. Stability of Loess Landslide in Dangerous Region of Earthquakes[M]. Beijing: Science Press, 2004. 104~ 135 [李忠生. 地震危险区黄土滑坡稳定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 104~ 135]
- [94] Lucchitta B. K. Valles Marineris Mars Wet debris flows and ground ice[J]. *International Journal of Solar System Studies*, 1987, 72: 411~ 429
- [95] McEwen, A. S. Mobility of large rock avalanches: Evidence from Valles Marineris Mars[J]. *Geology*, 1989, 17: 1111~ 1114
- [96] Melosh, H. J. Giant rock avalanches[J]. *Nature*, 1990, 348: 48
- [97] Mangold, N., Allmand, P. Topographic analysis of features related to ice on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(3): 407~ 410
- [98] Schultz R. A. Stability of rock slopes in Valles Marineris Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 381~ 384
- [99] Quantin C., Allmand P., Delacourt C. Morphology and geometry of Valles Marineris landslides[J]. *Planetary and Space Science*, 2004, 52(11): 1011~ 1022
- [100] Calder, E. S., Cole, P. D., Dade, W. B. Mobility of pyroclastic flows and surges at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(5): 537~ 540
- [101] Stoopes G. R., Sheridan M. F. Giant debris avalanches from the Colima volcanic complex, Mexico: Implications for long runout landslides (> 100 km) and hazard assessment[J]. *Geology*, 1992, 20: 299~ 302
- [102] Tucholke, B. E. Massive submarine rockslide in the rift valley wall of the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geology*, 1992, 20(2): 129
- [103] Moore, J. G., Nomark, W. R., Holcomb, R. T. Giant Hawaiian landslide[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1994, 22: 119~ 144
- [104] Jin Yong Zhu Jingxu Wang Zhanwen *et al.* Fluidization Engineering Principles[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 17~ 54 [金涌, 祝京旭, 汪展文, 等. 流态化工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 17~ 54]
- [105] Frank, F. J. Computer modeling of large rock slides[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(3): 348~ 360
- [106] Sousa, J., Voight, B. Computational flow modeling for long runout landslide hazard assessment with an example from Chapierre landslide, France[J]. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 1992, 29(2): 121~ 130
- [107] Chu, T., Hill, G., McClung, D. M. Experiments on granular flows to predict avalanche runup[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32: 285~ 295
- [108] Hung, O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 32: 610~ 623
- [109] Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T. Fluidization in dry landslides[J]. *Engineering Geology*, 2000, 56(3~ 4): 347~ 360
- [110] Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T. Effects of rock fall volume on runout distance[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(2): 109~ 124
- [111] Davies, T. R., McSaveney, M. J. Dynamic simulation of the motion of fragmenting rock avalanches[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(4): 789~ 798
- [112] Liu Yongjiang Hu Houtian, Zhao Xiaoyan. Experiment study on impact effect of high-speed landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 255~ 260 [刘涌江, 胡厚田, 赵晓彦. 高速滑坡岩体碰撞效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 255~ 260]
- [113] Hu Houtian, Liu Yongjiang, Xing Aiguo *et al.* Research on fluid dynamics of the high speed and long distance landslide[M].

Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003. 51~ 75[胡厚田, 刘涌江, 邢爱国, 等. 高速远程滑坡流体动力学理论的研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003. 51~ 75]

[114] Xing Aiguo, Gao Guangyun, Wu Shiming. Study on wind tunnel

testing of aerodynamic properties of high speed flying[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(5): 633~ 638[邢爱国, 高广运, 吴世明. 高速滑坡飞行气动特性的风洞试验研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(5): 633~ 638]

Study on Dynamics of Rock Avalanches State of the Art Report

CHENG Qiangong¹, ZHANG Zhuoyuan², HUANG Ruiqi²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Professional Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract In the realms of engineering geology and mountain hazards, study on dynamic mechanism of rock avalanches is one of the hot spots all over the world. In this paper, the authors reviewed the achievements obtained current status and developing trends on dynamics of rock avalanches over the past decades. Firstly, a definition for rock avalanches was given, and the nature of case histories of rockfall-avalanches and rockslide-avalanches occurred at home and abroad was introduced in detail. Then the present mechanisms of release, disintegration, and displacement of rock avalanches were outlined, as well as its developing trends were analyzed. Finally an overall thinking for directing study and key problems solved in further research were proposed.

Key words rockfall avalanches, rockslide avalanches, dynamics, review

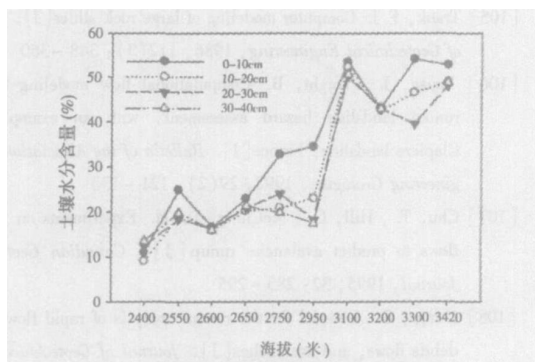


图 1 土壤水分含量随海拔梯度的变化

Fig 1 Variation of soil water content along altitude gradient

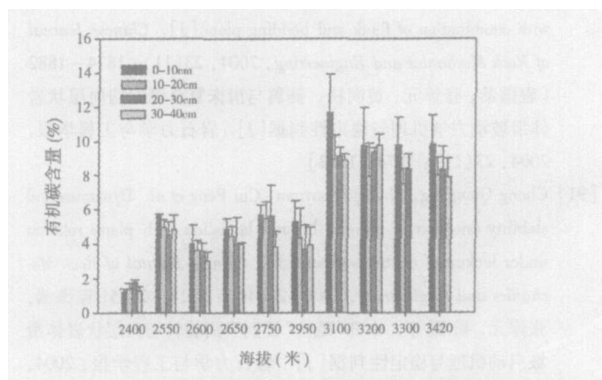


图 2 土壤有机碳含量随海拔梯度的变化

Fig 2 Variation of soil organic carbon along altitude gradient

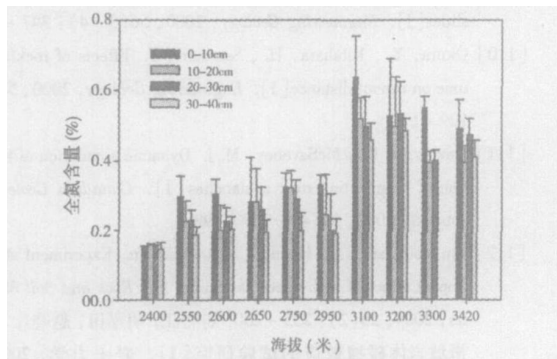


图 3 土壤全氮含量随海拔梯度的变化

Fig 3 Variation of soil total nitrogen along altitude gradient

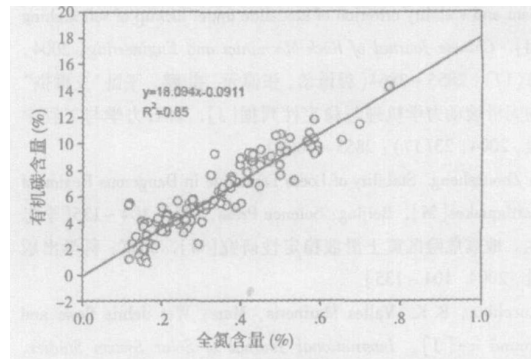


图 4 土壤有机碳与全氮含量的关系

Fig 4 Relationship between soil organic carbon content and total nitrogen

* 图 1~ 4 为山地学报 2006, 24(6)上刊登的“祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征”一文中漏排的插图, 作者胡启武。