

# 国内外典型工程滑坡灾害比较

王 涛, 吴树仁, 石菊松, 辛 鹏, 石 玲

WANG Tao, WU Shu-ren, SHI Ju-song, XIN Peng, SHI Ling

中国地质科学院地质力学研究所/国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081  
*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences/ Key Laboratory of Neotectonics  
Movement & Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China*

**摘要:**在搜集和梳理全球一个多世纪以来灾难性工程滑坡实例的基础上,将人类工程活动诱发的滑坡分为 4 种基本类型和若干亚类:①采矿工程滑坡(包括地下采空型、露天采场型、尾矿坝及排土场型);②水利水电工程滑坡(包括库区岸坡型、水库大坝型、灌溉工程型);③线性基础设施工程滑坡(包括公路及铁路工程型、油气管道工程型);④城市建设复合型工程滑坡。重点剖析了国内外著名的工程滑坡灾害案例,并兼顾一般工程滑坡的共性特征进行分析,综述了各类典型工程滑坡灾害的发育特征、形成机制及部分处置措施。通过不同类型工程滑坡特征的比较分析,总结了工程滑坡成灾的教训和成功处置的经验,为未来工程项目区和城市化过程中工程滑坡的综合防治及风险减缓提供了参考。

**关键词:**工程滑坡;采矿;水利水电;线性基础设施;城市建设

**中图分类号:**P642.22      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-2552(2013)12-1881-19

**Wang T, Wu S R, Shi J S, Xin P, Shi L. A comparative study of typical engineering landslide disasters both in China and abroad. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):1881-1899**

**Abstract:** The landslide induced by human engineering activity is classified into 4 basic types and several subclasses based on collection and combination of worldwide catastrophic engineering landslide cases over the past century. Engineering landslide classification framework consists of the following parts: ①mining engineering landslide (consisting of underground mining, open pit and quarry, tailing dam and dump subclasses); ②water conservancy and hydropower engineering landslide (composed of reservoir bank slope, reservoir dam, irrigation engineering subclasses); ③linear infrastructure engineering landslide (comprising highway and railway as well as oil and gas pipeline engineering subclasses); ④urban construction compound engineering type. The well-known catastrophic engineering landslide cases both in China and abroad are emphatically analyzed, and the general characteristics of common engineering landslide are overviewed. The authors systematically summarize the modes of occurrence, mechanisms and treatment measures of various engineering landslides. Through a comparative study of different types of engineering-induced landslides, lessons drawn from landslide failure and successful treatments are overviewed. It is hoped that these conclusions and suggestions will serve as references for engineering landslide comprehensive control and risk mitigation in the future projects and urban construction.

**Key words:** engineering landslide; mining; water conservancy and hydropower; linear infrastructure; urban construction

Crutzen P J<sup>[1]</sup>将 18 世纪晚期工业化和城市化起步以来全球 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度日益增长、人类活动成为影响地质环境演化主导因素的时代命名为“人类世”,其中人与自然的互馈作用日益加剧,成为该时

代区别于以往地质时代最重要的特征。工程滑坡灾害(包括狭义的滑坡、崩塌、泥石流等)作为人与自然互馈机制的典型现象之一,既是人类工程活动诱发所致,也危及人类自身的生命和财产安全。

收稿日期:2013-09-10;修订日期:2013-11-04

资助项目:国家“十二五”科技支撑计划项目课题(编号:2012BAK10B02、2011BAK12B09)、国家自然科学基金项目(批准号:41102165)和中国地质调查局项目(编号:1212011220144)

作者简介:王涛(1982-),男,博士,助理研究员,从事地质灾害评估与防治研究。E-mail:wangtao\_ig@163.com

人类活动既可以通过工程切坡和超载等方式直接诱发滑坡,也可以通过工业化引起全球气候变化形成的极端异常降雨等突发因素间接诱发滑坡<sup>[2-3]</sup>。因此,人口密度已成为目前控制全球灾难性滑坡分布的关键因素<sup>[4]</sup>。在世界历史上,工程活动诱发的灾难性滑坡比比皆是。其中,因滑坡致人死亡多集中于亚洲地区,以喜马拉雅山脉地带和中国尤为集中<sup>[4]</sup>。中国自20世纪以来约50%的灾难性滑坡是工程活动直接诱发所致<sup>[5-9]</sup>,诱发因素涉及到许多工程门类,例如矿山开采诱发的盐池河磷矿岩崩、元阳老金山滑坡、抚顺西煤矿滑坡,水利水电工程诱发的三峡库区滑坡群、黄河拉西瓦电站果卜滑坡、黑方台灌区黄土滑坡群,线性基础设施工程诱发的宝成铁路滑坡<sup>[10]</sup>、青藏及川藏线的公路和铁路滑坡<sup>[11-12]</sup>、成昆铁路铁西滑坡、江西东乡县铁路滑坡、西气东输管道滑坡<sup>[13-14]</sup>,城市建设诱发的丹巴县城滑坡<sup>[7]</sup>、武隆县城5·1滑坡等<sup>[8-15]</sup>。全球其它地区著名的灾难性工程滑坡还包括美洲的加拿大Frank矿山滑坡<sup>[16]</sup>、智利El Cobre尾矿坝滑坡<sup>[17]</sup>、美国Los Angeles大坝滑坡<sup>[18]</sup>、波多黎各Mameyes城镇滑坡<sup>[18-19]</sup>,欧洲的德国东部Sedlitz矿山滑坡<sup>[20]</sup>、意大利Vaiont库岸滑坡和Stava尾矿库滑坡<sup>[21-25]</sup>、瑞典Surte城镇滑坡<sup>[26]</sup>、新西兰Abbotsford城镇滑坡<sup>[27]</sup>、非洲的埃及Cairo城镇滑坡<sup>[28]</sup>等。

城市化速度在过去1个世纪增加了约10倍,全球陆地面积的30%~50%已被人类开发,预计世界城市人口至2030年可达50亿<sup>[1]</sup>;城市人口的增加导致城市住房、工业结构、交通设施和通讯系统建设以前所未有的趋势扰动地质环境;土地需求量的增加迫使开发活动不断向滑坡高易发的山区推进<sup>[29-30]</sup>。为了应对人口膨胀和城市扩张造成工程滑坡日趋严峻

的态势,本文系统地回顾了一个多世纪以来国内外典型的工程滑坡灾害实例,通过对工程滑坡类型划分(图1)、滑坡发育特征和成灾机理的比较分析,试图从各类典型工程滑坡灾害成功处置案例中汲取经验与教训,初步揭示工程滑坡成灾规律的共性与差异,为未来工程活动诱发滑坡及滑坡危害工程项目运营的风险减缓提供参考。

## 1 采矿工程滑坡

矿山开采和水电工程建设开挖的边坡通常比其它工程切坡更高,影响范围更大,因此导致采矿工程滑坡的灾害效应较为突出<sup>[31]</sup>。根据采矿工艺和坡体失稳模式,可将采矿工程诱发滑坡类型分为3种,地下采空型、露天采场型、尾矿坝及排土场型(表1)。

### 1.1 地下采空

地下采矿活动在全球许多国家都形成了严重的灾害问题,主要表现形式包括3种:地面沉降塌陷、斜坡变形和水文地质变化<sup>[40-41]</sup>;其中,地下煤矿采空引发的地表滑坡灾害在世界各地分布最为广泛,例如加拿大Frank滑坡<sup>[16]</sup>、斯洛伐克Handlová采区滑坡<sup>[42-44]</sup>、英国南威尔士采区滑坡等<sup>[45-46]</sup>。中国典型煤矿工程滑坡主要包括重庆鸡冠岭崩塌和鸡尾山滑坡<sup>[35-36]</sup>、陕西韩城电厂滑坡等<sup>[12]</sup>;此外,还包括盐池河磷矿岩崩等其它非金属矿产地下开采诱发的滑坡灾害等<sup>[7]</sup>。

地下采空诱发滑坡的机理主要取决于坡度、采矿活动和上覆地层中的软弱夹层等因素。其共性特征主要表现在4个方面:①许多矿山位于褶皱或断裂等强烈的构造变形部位,岩体结构破碎,结构面控制滑带或边界特征;②在深部地下采空条件下,上覆地层内部应力场及水文地质变化会诱发大型重力构

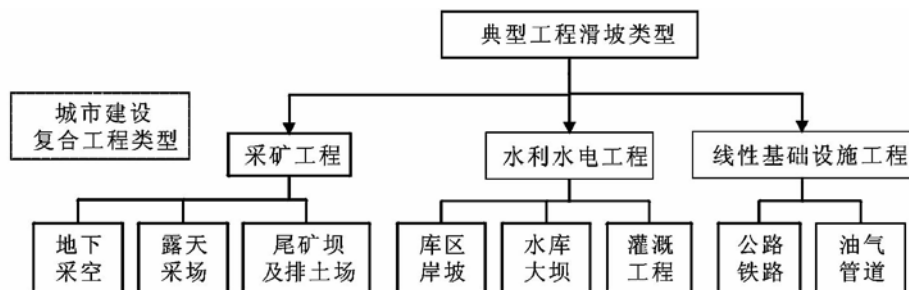


图1 典型工程滑坡类型划分框架

Fig. 1 Classification framework of typical engineering landslide types

造式滑坡,诱发因素与降雨等外界因素关系甚微;③中浅部采空多与强降雨耦合,在陡峭山体部位诱发崩塌灾害;④上覆地层的岩溶及裂隙往往是控制滑坡形成的关键结构因素。尽管具有上述共性,但应注意到,国外最具代表性的地下采矿诱发滑坡主要以区域群发性为特色,而国内则以单体崩滑灾害为主。国外典型的地下采矿诱发滑坡灾害如下。

(1)加拿大 Frank 滑坡:是加拿大迄今最具灾难性的滑坡,滑坡形成于龟山东坡,属于高速远程的石灰岩质崩滑—碎屑流,堆覆面积达  $300 \times 10^4 \text{m}^2$ 。滑坡影响和诱发因素总结如下:①构造与岩性:原始斜坡岩体呈节理—碎裂化状态,龟山背斜东翼层面控制了坡体结构<sup>[47]</sup>,龟山断裂和弗兰克湖断裂控制滑坡侧边界;②河流侵蚀:以 Gold 溪为主的 Crowsnest 河

支流冲积扇使主流改道,导致主流西岸侧向侵蚀龟山东侧坡脚;③天气冷热交替形成的冰劈作用:龟山东坡下部位于阴影中,但是龟山山脊上部光照强烈,使积雪融化渗入到溶蚀拓宽的灰岩裂隙中,夜晚气温骤降至  $-18^\circ\text{C}$ ,坡体下部裂隙水结冰形成强烈的楔入冰劈作用,导致坡体破坏<sup>[46]</sup>;④地下采矿对滑坡的影响尚存争议,支持诱发作用的观点包括:A. 山坡下部的采煤巷道使山体稳定性降低,采煤后显著的应力释放导致围岩应力调整及轻微形变,甚至使支撑采空区的岩体发生断裂;而滑后特征也显示采煤巷道明显控制了滑坡南侧边界;B. Terzaghi<sup>[48]</sup>分析指出,龟山东坡的安全系数在不到 3 年从 2.5 降至 1.0 左右,坡体下伏的软岩变形导致上覆坚硬石灰岩块间粘结力降低,同时石灰岩重力在软岩中形成不

表 1 国内外典型采矿工程灾难性滑坡事件

Table 1 Catastrophic landslides of mining engineering both in China and abroad

编号	滑坡名称	地理位置	体积 / $10^4 \text{m}^3$	诱发因素	致灾描述
1	Frank 滑坡 <sup>[16,32]</sup>	加拿大阿尔伯特塔龟山东坡	3000	地下采矿	1903 年 4 月 29 日,导致 83 人死亡、23 人受伤 影响面积约 $156 \text{km}^2$ ,危及 16 座村庄,26km 公路,4km 铁路,1 条高压电线路等
2	Handlov 滑坡群	斯洛伐克 Vtacnik 火山		地下采矿	
3	盐池河矿岩崩 <sup>[7]</sup>	湖北宜昌远安县	150	地下采矿 强降雨	1980 年 6 月 3 日,摧毁矿山,284 人死亡,损 失 2500 万元
4	鸡冠岭岩崩 <sup>[33-34]</sup>	重庆武隆乌江	450	地下采矿 降雨	1994 年 4 月 3 日,崩塌体入江形成涌浪高 1~5m, 中断水运 3 个月,损失近 1 亿元
5	韩城电滑坡 <sup>[12]</sup>	陕西韩城	500	地下采矿	1980 年 3 月,破坏厂房设施,治理费用达 5000 余万元
6	老金山滑坡 <sup>[7]</sup>	云南元阳县大坪乡	500	强降雨 地下采矿	1996 年 6 月 1 日,致 111 人死亡、116 人失踪、 16 人重伤,经济损失 1.4 亿元
7	鸡尾山滑坡 <sup>[35-36]</sup>	重庆武隆铁矿乡	700	地下采矿	2009 年 6 月 5 日,掩埋 12 户民房以及山下的铁 矿矿井入口,74 人死亡,8 人受伤
8	鱼洞村崩塌	贵州凯里龙场镇	24	地下采矿	2013 年 2 月 18 日,致 5 人死亡
9	岩口滑坡 <sup>[7]</sup>	贵州印江县东	1500	坡脚采石 暴雨	1996 年 9 月 18 日,堰塞坝高 65m,回水 8km, 淹没 1 座电站,3 人死亡,损失 1.5 亿元
10	铁西滑坡 <sup>[37]</sup>	四川成昆线铁西车站	220	爆破采石 地下水	1980 年 7 月 3 日,掩埋铁路涵洞,堵塞隧道洞 口,掩埋铁路长 160 米,中断行车 40 天
11	Shitagura 滑坡 <sup>[38]</sup>	日本冈山县	80	采石场	2001 年 3 月 12 日,致 3 人死亡
12	El Cobre 滑坡 <sup>[17]</sup>	智利 El Cobre		尾矿坝 地震	1965 年 3 月 28 日,2 座尾矿坝失稳,摧毁 El Cobre 镇,200 余人死亡
13	Aberfan 滑坡	英国威尔士 Aberfan		煤矸石堆 强降雨	1966 年 10 月 21 日,导致乡村学校的近半数孩 子遇难,144 人死亡
14	Stava 泥石流 <sup>[21]</sup>	意大利北部特兰托	18	尾矿坝	1985 年 7 月 19 日,摧毁下游 Stava 村及 Tesero 河岸边的建筑物,268 人死亡
15	Buffalo 溪泥石流 <sup>[39]</sup>	美国西弗吉尼亚洛根县		尾矿库	1972 年 2 月 26 日,摧毁 39 座桥、507 座房屋, 死亡 125 人,伤 1121 人,4000 人无家可归
16	Sedlitz 流滑 <sup>[20]</sup>	德国东部 iederlausitz	1200	排土场 液化	1987 年,极短时间内形成高 9m 的涌浪,摧毁 部分设施

均匀载荷分布,使软岩蠕滑加剧,采煤则导致滑移速率进一步增加。认为采矿诱发作用并不重要的观点包括:A. 尽管 Benko 等<sup>[49]</sup>通过数值模拟指出采矿可以诱发滑坡,但其模拟过程忽略了主巷道上部岩体中持续 2 年的抽排地下水和瓦斯情况;模拟的工况是由地表向下进行开挖的,而实际是从主入口平硐向上进行开采的,因此未能反映实际工况;B. Krahn 等<sup>[50]</sup>模拟采矿使坡体安全系数仅降低了 1%,已证实偏高,因此推断高估了采矿对滑坡的诱发效应。Frank 滑坡自发生至今 110 年来的研究工作仍在继续,通过后续的山体变形监测及风险评估,判定龟山南侧发育体积约  $5 \times 10^6 \text{m}^3$  的危岩体,并利用 InSAR 和 LiDAR 等遥感技术对危岩体范围和活动速率、山脚废弃矿山的沉降范围及速率进行观测分析<sup>[16-47]</sup>。

(2)斯洛伐克 Handlová 褐煤采区滑坡:煤炭开采在 Vtacnik 火山山麓复杂的工程地质条件下进行,开采范围约占山体下方面积的 50%,煤层厚约 10m,采后造成上覆坡体发生深层重力变形破坏<sup>[44]</sup>。原始坡体的地层组合为:上覆厚 300~600m 的安山岩、火山角砾岩等,中部为塑性粘土岩,下伏为古近系一新近系的褐煤层。工程扰动形式除了地下采矿以外,还有地下管线开挖、上部堆载、垃圾填埋场建设等。诱发滑坡类型包括 2 类:①山体坡脚下方遭到采空形成巨型深层蠕变式滑坡,厚 100~500m 的坚硬火山岩块体沿下伏塑性粘土层滑动,蠕滑速率 1~4cm/a,滑带绝大部分呈旋转—平移式产出。地下水对滑坡运移影响显著,滑动块体周边的拉裂陡坎地带出露泉水<sup>[44]</sup>;②山体上部的地下采空诱发中小型浅表层快速岩崩,地表发育裂隙、洼地、圆形沉降凹坑等<sup>[43]</sup>。地下采空诱发斜坡变形的时序特征表现在:集中变形主要在采后 5~14 月,此后一定时期处于休止状态;在采空对滑坡的长期影响方面,由于土体性质退化、坡体排泄条件变差、含水量增加等原因,未来滑坡稳定性堪忧<sup>[44]</sup>。反过来,滑坡严重危及采矿作业,尤其对运输及通风竖井等垂向矿井结构更甚,在深 100~300m 范围内曾有竖井被剪断,而从技术层面纠正变形的竖井几乎不可能;同时,采后上覆地层沉陷过程产生很高的地应力,会诱发突泥、突水或者毁坏采煤作业面。

(3)南威尔士煤矿采区滑坡:是英国滑坡分布密度最高的地区之一,在过去的 100a 中造成严重的人员伤亡和设施损毁。大部分古滑坡形成于冰缘气候

时期,许多滑坡又在 19 世纪晚期 Welsh 地区城市和工业化初期被人类活动诱发复活。针对这些滑坡的研究约始于 1927 年,在 Aberfan 矸石堆滑坡灾害之后,再度引起关注,结果显示区内滑坡稳定性主要取决于上层滞水的水位,诱发因素除了采煤以外,斜坡下伏流砂层对滑带的形成也十分关键<sup>[45-46]</sup>。

国内地下采矿诱发灾难性滑坡的研究主要始于 20 世纪 80 年代,这些滑坡呈零散分布状态,以单体滑坡灾害为主,滑坡类型较为单一,致灾效应十分严重。滑坡诱发因素往往不止于单纯的地下采矿,而是大都叠加强降雨因素。坡体变形过程一般随着采矿活动呈现逐步累积的特征,而最后失稳破坏在极短的时间内完成。典型的地下采矿诱发崩滑灾害如下。

(1)乌江鸡冠岭崩塌:拉裂倾倒式崩塌—碎屑流,崩塌形成的内因是坡体位于桐麻湾背斜轴部,岩层挤压变形强烈,尤其平行于岸坡的横张裂隙发育,控制了坡体结构,岸坡陡峭,且具有上硬下软结构;外部因素以坡体下部的兴隆煤矿开采为主,但修建公路的爆破振动影响也不容忽视<sup>[33-34]</sup>。

(2)陕西韩城电厂滑坡:多级蠕变型砂泥岩质滑坡,滑坡形成的内因是下伏平缓岩层中的泥质软弱夹层及背斜构造,外因是横山下部煤矿开采,导致巷道顶板冒落,形成塌陷盆地和自然塌落拱,塌陷盆地随采空区移动产生层间剪切位移和水平推力,使山体产生临空蠕滑;同时,红旗渠漏水及地表水入渗使软弱夹层强度弱化<sup>[12]</sup>。

(3)湖北盐池河磷矿崩塌:高速岩质崩塌—碎屑流,影响和诱发因素包括,①岸坡具有软硬相间的地层结构,采场底板为粉砂质页岩,山体底部为薄层泥质白云岩与砂页岩互层;②岩体中 NE 向和 NW 向 2 组节理控制了地表裂缝及其滑面发育特征;③地下采空面积大,采用爆破矿柱崩落顶板的方式释放地压,是导致崩塌的主要工程因素;④崩塌前短时降雨约 80mm,降雨入渗对垂直节理起到水楔作用,增加了下滑推力,对诱发崩塌起关键作用<sup>[51]</sup>。

(4)云南元阳老金山滑坡:由白云岩及灰岩风化带形成的中—深层高速远程滑坡—碎屑流。其影响和诱发因素包括:①斜坡位于老金山背斜核部、小寨—金平断裂与小新街断裂之间,优势结构面控制了主画面和侧边界;②源区地层为岩溶风化的层状碎裂—散体状硅质白云岩;③滑源区地貌呈“鹰嘴岩”状凸起形态;④老金山群采区矿硐 144 个,巷道

总长度达 120km,部分矿洞上下左右连通,内部岩溶裂隙发育,是导致坡体变形的工程因素;⑤滑前连续 4 天中一大雨,累计降雨 137mm,是诱发滑坡的关键自然因素<sup>[7]</sup>。

(5)贵州开阳磷矿崩塌:白云岩质崩塌—碎屑流,矿山沿洋水背斜两翼的垂直裂隙带形成大规模崩塌带。其影响和诱发因素包括:①磷矿层顶板为厚层白云岩,而磷矿层及底板均为软质岩类,形成上硬下软的坡体结构;②厚 4~6m 的磷块岩矿层采空后形成较大采空区,频繁爆破振动使山体产生较大卸荷裂隙,导致采空区顶板冒顶跨塌<sup>[8,52]</sup>。

## 1.2 露天采场

通过露天切坡开采资源的行业主要包括矿产资源、建筑及工业石材开采 2 种。与地下开采诱发坡体变形机制不同,露天边坡属于开放的斜坡系统,由于开挖卸荷形成了回弹释放的应力环境,坡面形态高陡等因素奠定了坡体失稳的基础条件,往往在地震、降雨等动态因素作用下诱发形成崩滑灾害。统计显示,中国 80%~90%的露天开采矿山发生过或存在潜在失稳危险,如果缺乏有效的控制措施,大规模的边坡失稳会摧毁整座矿山<sup>[53]</sup>。

露天采场的矿山资源以铁矿和煤矿为主,例如中国的潘洛铁矿和抚顺西煤矿。露天开采的石材包括石灰岩、砂岩、花岗岩等,在国外形成了十分常见的采石场崩滑灾害,例如土耳其 Izmir 采石场、日本埼玉县 Kagemori 及冈山县 Shitagura 采石场等。露天采场崩滑灾害的共性特征主要包括:①褶皱或断裂构造一般控制大型矿山边坡地层,导致其变形强烈及结构破碎,对小型采石场影响甚微;②汛期强降雨导致地下水位上升及孔隙水压力升高,对边坡失稳具有关键作用;③基于前期坡体变形监测分析,采取恰当的防控措施,可以在保证施工安全的前提下实现经济效益<sup>[54]</sup>;④爆破开采对边坡结构松弛及变形加剧具有重要影响。

大型矿山露天边坡失稳的典型案例包括以下两处。

(1)潘洛铁矿滑坡:福建省最大的露天铁矿,台湾海峡 Ms5.3 级地震及前期异常强降雨(连续 7 日降雨,且日均降雨量达 132mm)导致矿山边坡产生拉张裂隙,使古滑坡复活,滑坡体积约  $1 \times 10^6 \text{m}^3$ 。通过实施变形控制措施,滑坡活动速率随支护措施变缓,尽管也随着降雨和采矿变快,但是截至 2000 年

闭坑期间并未发生整体失稳,是控制露天开采工程滑坡达 10 年的成功案例<sup>[53]</sup>。降雨入渗导致滑带孔隙水压力升高是诱发滑坡的主因,而局部软弱夹层也削弱了坡体的稳定性<sup>[55]</sup>。

(2)抚顺西露天煤矿滑坡:煤田发育于浑河深大断裂带,地层为古近系内陆沼泽相沉积,开挖集中在主向斜南翼,持续百年开挖后,形成东西长 6.6km,南北宽 2.0km,深约 400m 的矿坑。自 1927 年以来,矿坑发生较大滑坡 90 余次,破坏区面积  $64 \times 10^4 \text{m}^2$ ,滑体总量约  $2100 \times 10^4 \text{m}^3$ 。断层及构造裂隙切割边坡形成楔形体,露天采掘台阶过高,特别在底板帮、煤层台阶坡面切断煤层底板时产生滑坡,井工开采造成边坡岩体破裂,爆破、地下水或地面水入渗使边坡变形加剧乃至滑坡<sup>[8,56]</sup>。

采石场边坡的失稳机制相对简单,以崩塌为主,体积规模一般较小,但是其发生频次和危害呈不断增加趋势,逐渐接近于大型滑坡的致灾结果。例如西班牙采石场崩塌数量约占边坡失稳灾害总数的 20% 以上,成为最常见的导致伤亡的灾害<sup>[57]</sup>。许多国家(例如西班牙、土耳其、日本等)对采石场滑坡进行了较为系统的编录及研究工作,但是中国露天开采边坡的安全管理相对滞后,仅对少数造成重大伤亡及损失的灾难性事件较为关注,例如贵州印江岩口滑坡和成昆铁路铁西车站滑坡等。由于采石行业产出的经济效益比金属或能源矿业少很多,因此在采场设计和运营过程中,对崩滑控制问题缺乏关注,一般根据经验进行开采作业,致使崩滑灾害相对频发<sup>[57]</sup>。

国内外采石场诱发崩滑灾害的案例如下。

(1)土耳其 Izmir 采石场崩滑灾害群:区内分布 70 处废弃采石场,人口快速增长和城市扩张导致以往位于郊区的采石场处在目前市中心地段,崩滑数量达 84 处,边坡失稳模式主要包括弯折倾倒、坠落式崩塌,以及顺层和楔形体滑坡;岩体不连续面、强风化及居民排放地表水是主要的诱发因素<sup>[58]</sup>。

(2)日本东京埼玉县 Kagemori 采石场崩塌:1973 年 9 月 20 日,发生石灰岩崩塌,体积  $30 \times 10^4 \sim 40 \times 10^4 \text{m}^3$ 。在崩塌前 15 个月,观测到边坡出现小型连续裂缝,得益于持续监测,没有造成伤亡和损失,但是引起了日本石灰岩工业对边坡失稳问题的强烈关注<sup>[59]</sup>。冈山县 Shitagura 采石场滑坡:2001 年 3 月 12 日发生板岩滑坡,体积约  $80 \times 10^4 \text{m}^3$ ,尽管发现前兆,

但未及时撤离,致3人死亡,其影响和诱发因素包括:①坡脚河流下切形成陡坡;②顺向坡结构易发生深层滑坡;③大量节理和断层面切割坡体,导致岩体结构松弛;④采石切削使坡体更加高陡,并最终诱发滑坡<sup>[38]</sup>。

(3)贵州印江岩口滑坡:石灰岩质滑坡—碎屑流,原始坡体为斜顺倾结构,约 $210\times 10^4\text{m}^3$ 的岩体从印江河左岸滑落冲入河谷,形成高51m的坝体。滑源区坡脚的采石场正好处在斜坡变形体的锁固段,爆破振动导致关键部位裂隙扩展及应力集中,使坡脚在滑前3个月就形成鼓胀裂缝<sup>[7]</sup>;采石切削创造了工程背景条件,而短时连降暴雨是滑坡形成的直接诱因。

(4)成昆铁路铁西车站滑坡:滑体从高40~50m的采石场边坡下部剪出,剪出口高出采石场坪台和铁路路基10m,滑体厚达14m。其影响和诱发因素包括:①原始地层为软弱砂页岩及泥岩,陡倾顺向坡结构,层面控制滑带;②采石场每天100余人进行频繁爆破采石,导致岩体结构日益松弛,滑前4年在山坡上方出现明显开裂及下错等蠕变变形;③降雨及溪流入渗,导致坡体地下水位上涨,使滑带炭质页岩软化,最终形成滑坡<sup>[37]</sup>。

### 1.3 尾矿坝及排土场

矿山工程中露天采矿与地下开采均会形成松散废弃物堆积,例如煤矿矸石堆和排土场、金属矿山尾矿库和尾矿坝等<sup>[60]</sup>。国际大坝委员会针对尾矿坝失稳灾害进行了编录分析,结果显示全球74%的尾矿坝灾害集中分布在少数国家,例如美国39%、欧洲18%、智利12%、中国分布数量中等2.7%(统计数据不全)<sup>[61]</sup>。从尾矿坝高度分析,56%的坝高15m以上,23%的坝高30m以上,但均低于45m;从诱发因素分析,许多坝体破坏源于综合诱发因素,例如气象因素(强降雨、飓风、快速融雪、坝体冻胀等),以及基础失稳和管理失误等;单一诱发因素以异常强降雨为主,地震液化次之<sup>[61]</sup>;遗憾的是,中国目前尚缺少针对尾矿坝失稳的系统研究。

欧盟对尾矿坝灾害研究的广泛关注源于2000年前后几次尾矿坝灾难,目前已建立了尾矿坝滑坡数据库,在全球147起尾矿坝失稳灾害中,欧洲各国约占18%,其中英国数量最多。异常强降雨是最常见的诱发因素,管理缺陷和工程活动是第二诱因,而地震液化诱发的案例很少。尾矿坝相比其它拦蓄工程

(例如水坝)发生变形失稳的危险性更高,原因在于:①筑坝材料一般就地取材,例如采矿产生的表土、粗废料及尾矿等;②缺乏专门的尾矿坝设计标准;③在尾矿坝选址、建设和运营中,缺乏对坝体的稳定性管理及持续监测手段;④闭矿后的尾矿坝维护成本高,因此缺乏持续维护<sup>[61]</sup>。欧美尾矿坝失稳导致的灾难事件如下。

(1)意大利Stava尾矿泥流:Prestavel萤石矿的尾矿库坐落于Stava村上游,由上下2座尾矿库组成,坝体失稳形成灾难性泥流。导致尾矿液化及失稳成灾的因素包括:①尾矿库中积蓄大量的水,外部补给和松散尾矿中包含的水都顺着尾矿及下部管道流入尾矿库,且没有系统设施拦截降雨和地下水、有效地转移周围山坡汇流;排水系统也不健全,失稳前降雨量略高于平均值;②上部尾矿库设计粗糙、高度过大、坡度过陡,且坝体局部坐落于下部尾矿库的松散尾矿之上,因此其稳定性较差;③尾矿物质处于松散状态,尾矿坝下伏凸出地形造成刺入效应;④坝顶运输车辆和挖掘机的振动荷载,加之尾矿流体不断注入,导致尾矿液化及坝体失稳;⑤在尾矿库内部和周边及坝体中缺少水压力控制或监测系统;⑥小型滑坡及库水渗漏等预警征兆并未引起足够重视;⑦村落位于与尾矿库相同沟谷的下游,难免受到威胁<sup>[21]</sup>。

(2)美国西弗吉尼亚中北部的煤矿矸石堆滑坡:具有多级滑面特征,初始破裂主要发育在矸石堆与地面的接触部位,然后逐渐扩展传播至矸石堆积体中,形成贯通的滑带。滑坡主要诱因是浅层地下水,以及地层组合关系和下伏基础的土体性质等;其中红色页岩的存在十分关键,使矸石中粘土含量高达10%~35%,导致土体活性、回弹变形和蠕变效应增强;页岩风化壳中的蒙脱石和退化伊利石吸水膨胀,进一步降低了矸石堆和基础的抗剪强度<sup>[62]</sup>。典型的滑坡案例是1972年Buffalo溪煤矿尾矿泥流<sup>[39]</sup>。

(3)德国东部褐煤采区排土场滑坡:区域大部分矿山闭坑之后,地下水位升高,在废弃矿坑地带形成大片湖塘,并诱发严重滑坡灾害,特别在德国东部边界的Niederlausitz地区。在没有人工排洪的条件下,地下水位每年可上升1~3m,矿坑边坡被淹没后,具有突然滑动的特征,在数分钟内,液化的滑体即可灌入到废弃矿坑中。滑坡体积一般大于 $1000\times 10^4\text{m}^3$ ,堆覆面积可达数千平方米。滑坡成因机制:土体为磨圆较好的松散—极松散细—中粒砂土;当矿坑水位

上涨时,导致砂土液化流滑;坡体破坏由坡脚开始,逐级向上溯源破坏形成阶梯状错坎;滑体表面休止角度非常平缓,经常介于  $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$  之间,水下滑体休止角可以小于  $3^{\circ}$ ;然而,此类滑坡还缺乏诸如地表裂缝或小型滑动等易于识别的预警标志。自 1955 年以来至少发生大型流滑灾害 15 次,累计滑体体积约  $4500\times 10^4\text{m}^3$ ,共造成 16 人伤亡,摧毁大量森林及采矿设施。典型的滑坡案例是 1987 年 Sedlitz 流滑灾害<sup>[20]</sup>。

## 2 水利水电工程滑坡

水电工程边坡与矿山边坡相似,高度和范围明显大于其它人工边坡,例如中国锦屏一级水电站左岸边坡高达  $540\text{m}$ <sup>[69]</sup>;此类工程边坡的稳定性问题也更为复杂,根据边坡类型可将此类工程滑坡分为:库区岸坡型、水库大坝失稳型和灌溉工程诱发型 3 类(表 2)。

### 2.1 库区岸坡

水库岸坡的滑坡问题一直以来都是危及大坝和水库设计、建设及运营安全的重要问题之一<sup>[69]</sup>,例如意大利北部在过去 150a 间发生的自然灾害事件,包括瓦依昂库区滑坡在内的工程滑坡共导致 2915 人死亡,约占自然灾害造成死亡人数的  $60\%$ <sup>[21-25,70]</sup>。库区岸坡的具体危害包括:①直接损毁大坝、排水工程及其他库区设施;②形成涌浪、危及生命且导致大坝及设施毁坏;③导致库容缩减;④延误建设进度等<sup>[71-72]</sup>。全球针对库区滑坡的研究正是自瓦依昂滑坡灾难之后引起广泛关注<sup>[71]</sup>。

库区岸坡滑坡灾害的特征主要包括:①由于水电工程选址一般会避开强活动构造地段,因此地震等内动力诱发库岸失稳的灾难较为少见<sup>[73]</sup>,诱发因素主要以强降雨及库水位波动等外动力因素为主<sup>[74]</sup>;②许多库区滑坡具有较长的变形活动历史,是已有古滑坡复活所致,正如国际大坝委员会(ICOLD)统计显示,古滑坡复活的实例约占库区滑坡总数的  $75\%$ <sup>[75]</sup>;③库区滑坡具有明显的集中分布时序特征,主要表现在库区蓄水初期数年之内群发的特性;④尽管库区滑坡的灾害效应广泛,但是滑体冲入库区形成涌浪是最主要的致灾方式,一般因库区滑坡导致大坝被毁的记录很少。

国内外最著名、研究程度最高的单体灾难性库区滑坡是意大利瓦依昂滑坡,而围绕库区群发滑坡

研究最为系统的当属中国三峡库区滑坡群。国外典型库区滑坡实例如下。

(1)意大利北部瓦依昂(Vajont/Vaiont)滑坡:很可能是世界上相关报道和分析最多的水库诱发滑坡灾害,岩质滑体从水库左岸山坡滑下,入水速度约  $30\text{m/s}$ ,激起巨大涌浪冲击至对岸,又折回至库区,并冲击越过大坝,约  $25\times 10^6\text{m}^3$  的巨大水体从坝顶猛然落下,冲入狭窄的泄洪道和 Piave 峡谷<sup>[21-25]</sup>。坡体变形过程为:1960 年底大坝建成蓄水时,滑坡边缘就形成连续裂缝,宽约  $1\text{m}$ ,长约  $2500\text{m}$ ,滑体向库区发生蠕滑;通过 1960—1962 年期间水库 2 次蓄水和排空循环之后,1963 年 9 月蓄水位达到  $710\text{m}$  最高水位线,坡体地表累积位移超过  $2.5\sim 3\text{m}$ ;监测曲线显示滑坡加速变形与水位上涨关系密切,在坡体临滑之前数日,表面位移速率可达  $20\sim 30\text{cm/d}$ 。坡体滑动模型由 2 个互锁楔形体组成,且上部楔形体通过内部的剪切带将部分质量传递至下部楔形体<sup>[24]</sup>。Alonso 等<sup>[24]</sup>提出滑坡启动机制为:①根据 Vajont 河左岸的演化史,推断滑坡是古滑坡经历了多次大规模滑动之后再次复活,滑动面发育在连续分布的高塑性粘土层中;②基底滑动带的 Malm 粘土有效内摩擦角残余值较小(约  $12^{\circ}$ );③滑前数年间多次地震对岩层造成了累进剪切作用;④滑体渗透性较好,滑体中的水压力对库水位波动响应敏感。在滑坡启动初期,随着滑动位移增加,上部楔形体质量部分转移至下部楔形体导致阻滑作用增加,使整体安全系数有所升高。随着滑动过程的持续,滑带强度退化降低,使滑移速率增至约  $4.5\text{m/s}$ 。滑体入库的高速机制可以利用滑带摩擦生热产生超孔隙压力来解释:其关键条件是底层滑带发育在处于残余强度状态下的低渗透、高塑性粘土层中,而滑面孔隙压力的自激发机制最终使滑速达到  $25\text{m/s}$  左右<sup>[23]</sup>。

(2)国外其它库岸滑坡的典型实例还包括:①意大利 Pontesei 库岸滑坡,1959 年 3 月 22 日,  $500\times 10^4\text{m}^3$  的滑体入库形成脉冲式涌浪,使对岸街道的骑车人受冲击致死,使库容降低约  $50\%$ ,但是对大坝无害;涌浪的物理模型试验结果显示,最大涌浪波幅主要取决于滑体质量或体积和初始水位,呈近似线性关系<sup>[76-77]</sup>;②阿塞拜疆 Mingechar 库岸滑坡,位于水电站大坝右岸联接段的上水池部分,发生在库区泄洪导致库水位骤降阶段,主要影响和诱发因素为:A. 边坡结构为顺向坡;B. 库水侵蚀使库水降落区的坡

表2 国内外典型水利水电工程灾难性滑坡事件  
Table 2 Catastrophic landslides of water conservancy  
and hydropower engineering both in China and abroad

编号	滑坡名称	地理位置	体积 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	诱发因素	致灾描述
1	Vajont 滑坡 <sup>[22-25]</sup>	意大利贝卢诺	27000	强降雨 库区泄洪	1963年10月9日, 滑坡冲入水库形成涌浪, 摧毁树木和建筑物, 致约2500人死亡
2	千将坪滑坡 <sup>[7-8, 63]</sup>	三峡秭归县 沙溪镇	2400	强降雨 库区蓄水	2003年7月13日, 涌浪高30m, 堵江形成堰塞湖, 14人死亡, 10人失踪, 毁房1100多座
3	柘溪滑坡 <sup>[9, 12]</sup>	湖南安化县 资水中游	165	强降雨 库区蓄水	1961年3月6日, 涌浪高24m, 翻过坝顶, 将直径25cm的大树连根拔起
4	Mingechaur 滑坡	阿塞拜疆	1000	强降雨 库区泄洪	1989年8月23日, 30m长的隧洞衬砌破坏, 进水塔发生移位
5	新丰江大坝 <sup>[64]</sup>	广东河源市		混凝土坝 地震	1962年3月19日, 近坝发生6.1级地震, 导致坝体上部形成82m长的水平裂缝, 使库水渗漏
6	梅山大坝 <sup>[64]</sup>	安徽金寨县 梅山镇		连拱坝 坝基失稳	1962年11月6日, 右岸坝基渗漏, 使坝基上抬, 坝顶强烈摆动, 坝体出现几十条裂缝
7	纪村大坝 <sup>[64]</sup>	安徽泾县 青弋江		重力坝 坝基失稳	1977年建成投运不久, 发生坝基红层泥化, 被迫停止发电
8	白山大坝 <sup>[64]</sup>	吉林桦甸县 白山镇		重力拱坝 泄洪	1995年汛期, 最高库水位超500a一遇洪水位, 坝基渗漏量大增, 个别渗水点管涌
9	喀什大坝 <sup>[64]</sup>	新疆喀什疏附县		粘土心墙砂 砾石坝 泄洪	1998年6月1日, 泄洪漫过坝顶导致溃坝, 毁坝一半以上, 一级及下游电站全部瘫痪
10	板桥大坝 <sup>[65]</sup>	河南省泌阳县 汝河		土石坝 暴雨	1975年8月8日, 暴雨致库水位超过防浪墙, 溃坝使下游村庄及设施尽毁, 1190万人受灾, 2.6万人死亡, 京广铁路中断50多天
11	沟后大坝 <sup>[65]</sup>	青海省共和县 恰卜恰镇		混凝土面板 堆石坝渗漏	1989年, 大坝右侧在开始蓄水时出现渗漏; 1993年8月27日, 溃坝发出巨响, 下游坝坡块石滚落撞击产生火花
12	San Fernando 大坝 <sup>[18, 66]</sup>	美国加利 福尼亚州		地震液化 大坝	1971年2月9日, 摧毁大坝, 8000人撤离4d
13	Los Angeles 大坝 <sup>[18]</sup>	美国加利 福尼亚州		历史滑坡 大坝	1928年3月12日, 库水沿着 Santa Clara 河冲出54英里, 65英里的峡谷岸坡滑塌, 500多人死亡, 损失约6.7亿美元;
14	Rainbow 大坝	美国新泽西州		强风暴降雨 大坝	2007年4月15日, 溃坝后进一步摧毁两座附近的小型坝体
15	Big Bay 大坝	美国密西西比州		坝体渗漏	2004年3月12日, 摧毁100户民房、2座教堂、1座火电站、1座大桥、大量汽车等
16	Ka Loko 大坝	美国夏威夷 考艾岛		强降雨大坝	2006年3月14日, 溃坝洪水致7人死亡, 经济损失超过5000万美元
17	Camara 大坝	巴西卡马拉		强降雨大坝	2004年6月17日, 致5人死亡, 毁房2000座
18	黄茨滑坡 <sup>[12]</sup>	甘肃省永靖县 黑方台	600	灌溉渗透	1995年1月30日, 黄土斜坡: 摧毁71户民房, 因提前预报无伤亡
19	大名镇滑坡 <sup>[67]</sup>	陕西华县		灌渠渗漏	2006年10月6日, 致24所房屋被毁, 12人死亡
20	Thredbo 滑坡 <sup>[68]</sup>	澳大利亚新 南威尔士州		水管泄露	1997年7月30日, 18人死亡, 摧毁1座滑雪旅馆



脚被掏蚀,形成局部应力集中;C. 库水位骤降导致岩体中产生顺坡向的渗流力;D. 降雨通过岩溶孔洞和裂隙入渗,以及坡体中下部饱和,导致泥岩物理力学性质劣化,岩体流动性增加<sup>[78]</sup>。

针对库区群发滑坡的时序分布特征,Cojean 等<sup>[71]</sup>指出约 50%的库岸滑坡发生在首次蓄水期间,其余滑坡主要在大坝建成后 3~5a 期间;Riemer<sup>[79]</sup>对 60 例库岸滑坡统计显示,约 85%的滑坡发生在水库建设、蓄水或者建成后 2a 期间。中村浩之<sup>[80]</sup>对日本库岸滑坡统计显示,约 60%的滑坡发生在库水位降落期,40%发生在库水位上涨期;Jones 等<sup>[81]</sup>对 Ronsvelt 湖岸边 500 处滑坡统计显示,约 49%的滑坡发生在水库蓄水期,30%发生在 2 次库水位降落 10~20m 期间,而其余年份的滑坡很少;在东西伯利亚的安加拉河库区及美国哥伦比亚河的大古力水坝库区岸坡也具有开始蓄水初期群发滑坡的时序特征<sup>[69,82]</sup>。

中国河流水系十分发达,各大流域均有库岸滑坡灾害发生,其中三峡大坝是全球最大的水电工程,库区周边也是全球著名的库岸滑坡集中分布区,单体规模超过  $1.0 \times 10^5 \text{m}^3$  的滑坡共计 428 处,而且随着水库建设和蓄水,滑坡数量和体积还在继续增加<sup>[74,83]</sup>。库区水位升降波动是控制岸坡稳定性的关键因素。已有研究结论如下<sup>[84]</sup>。①在库区蓄水期间,绝大部分滑坡受到水位变动的影 响,具体影响取决于滑带形状、高程、结构、物质组成、排水条件等。库水位上升对坡体稳定性的影响是双方面的,其中不利于稳定性的因素包括:孔隙水压力升高、岩土体溶蚀软化及浮托合力作用,甚至诱发水库地震或浅部断层活动<sup>[69]</sup>;利于坡体稳定的因素是水面向坡体内部的逆向渗透压力。矛盾双方对坡体稳定性的综合影响是利 或有 害经常因滑坡而异,例如滑体渗透性较好的清江鱼洞河滑坡和鹤峰滑坡在库区蓄水引起的静态水压力作用下稳定性得到改善<sup>[85~86]</sup>;但是树坪滑坡、千将坪滑坡及泄滩滑坡在库区蓄水时稳定性变差甚至被诱发复活<sup>[7~8,75,87]</sup>。②蓄水停止后正常水位的影响,被淹没滑体的水文地质条件和滑带物理力学性质的改变,直接影响滑坡稳定性。对于滑带整体或者部分处在地下水水位以下的滑体而言,库水位上涨对强度没有必然影响;但是在水位以上的滑带部分和由土体、角砾土组成的滑体在饱和后,强度会降低。通过对 37 处大型滑坡在库水位升至

175m 前后的安全系数进行比较显示,蓄水后 44%的滑坡与之前相同或者有微弱增加;24%的滑坡安全系数降低了 3%~10%;32%的滑坡安全系数大幅降低了 11%~30%<sup>[84]</sup>;③库水位波动的影响,三峡水库运行包括 2 个明显波动阶段:一是汛期前的水位缓慢降落,从每年 11 月至来年 3 月期间,大坝前水位从正常 175m 水位降至防洪限制水位 145m,下降速率为 0.2m/d,这种下降速率并未对库岸边坡的整体稳定性造成明显影响,但会导致一些稳定性较差的变形体活动;二是在汛期洪峰之后,库水位在小范围内突然降落,以 1954 年洪水为例,坝前水位最大降速为 1.2m/d,共计降落了 17m;这种大幅度快速水位降落是为了应对同时出现的暴雨和洪水,会造成岸坡岩土体细粒物质潜蚀、坡体地下水向下渗流,一般认为会对稳定性产生不利影响。例如监测数据显示,树坪滑坡、鹤峰滑坡和黄土坡滑坡均表现出随着库水位下降,尤其是急降过程,产生强烈附加变形,且整体稳定性明显降低的特征<sup>[71,86~87]</sup>。然而,也有研究通过对主流沿岸 28 处大型滑坡敏感性分析,发现仅有 7 处滑坡在水位急降时稳定性相比自然状态有所降低;对主流沿岸 31 处大型—特大型滑坡的宏观地质分析、稳定性计算、失效概率分析及灰色综合评价结果显示,只有龙王庙滑坡和安乐死滑坡稳定性降低,其余稳定性状态与水位降落前相似<sup>[84]</sup>。

三峡库区除了由库水位升降诱发滑坡以外,还有一些大型滑坡尽管并非由水库诱发,但滑坡活动却直接影响水电工程运营安全,典型案例包括:①西陵峡新滩滑坡,属于多期活动的特大型古崩坡积体,1985 年 6 月 12 日,发生高速滑坡,体积约  $3000 \times 10^4 \text{m}^3$ ,滑体以 10~30m/s 摧毁新滩千年古镇,毁坏 481 户居民的房屋,激起涌浪高 54m,波及长江航道约 42km,中断航运 12d;滑坡复活的主导因素是滑坡体后缘广家崖危岩逐年崩塌加载,主动滑移区崩塌堆积物不断积累,超过滑床抗力所致;②鸡扒子滑坡,1982 年 7 月,区域性特大暴雨导致老滑坡复活,最大滑速达 12.5m/s,滑体前缘推入长江并直达对岸,最大滑距超过 200m,体积约  $1500 \times 10^4 \text{m}^3$ ;虽未造成人员伤亡,但毁坏房屋 1730 间,经济损失约 600 万元,入江滑体形成 700m 长的急流险滩,导致航运中断 7d,碍航达数月<sup>[7]</sup>。

中国除了三峡库区以外,库岸滑坡在各大流域也有分布,例如 1961 年柘溪电站库岸滑坡是中国第

一例水库蓄水诱发的大型灾难性顺层岩质滑坡<sup>[912]</sup>;黄土高原区延安红庄水库渗漏导致周边地下水位上涨,诱发赵家安老滑坡复活<sup>[88]</sup>;黄河上游拉西瓦电站果卜滑坡<sup>[89]</sup>;金沙江流域梯级电站的库岸崩塌和滑坡群<sup>[90]</sup>,以及金沙江两家人电站的滑石板滑坡等<sup>[73]</sup>。

## 2.2 水库大坝

目前全球许多国家的水库大坝运营安全不容乐观,且日益引起广泛关注。以美国为例,全国编录在册的大坝约 79000 座,历史上在供水、防洪、航运、灌溉及发电等领域发挥了重要作用;但是自 1999 年至今,超过 3300 座大坝处于不稳定状态,其中 129 座已经破坏。美国大坝安全联盟呼吁全国关注大坝安全性恶化进而危及公共安全的问题,但至今仍缺乏专门针对大坝修复的公共政策和资金支持。

中国大坝安全问题也十分突出,国内一半以上水库建成于 20 世纪 50~70 年代,建设过程一般是边勘测、边设计、边施工,工程标准和施工质量低劣,目前大量库坝处于病险状态。针对国内大坝失事机理的初步研究显示:①溃坝时间大致遵循 24a 大周期及 12a 小周期的变化规律;②经历了长时间干旱后的集中降水会使库区大坝失稳概率增加;③北方大坝失稳主要由于泄流能力不足和大坝质量问题,而南方大坝失稳除此原因以外,超标准洪水也是主要诱因之一<sup>[91]</sup>。

通过对国内外水库大坝失稳破坏的综合分析,初步总结出大坝失稳的 5 个主要原因<sup>[92]</sup>:①坝基失稳:如法国 Malpasset 拱坝失稳,由于左岸坝肩地质条件较差,2 组优势结构面切割形成不稳定楔形体;蓄水后悬臂梁底部产生拉应力,坝踵开裂,水流入渗形成巨大扬压力;坝肩渗流力和拱推力导致楔形体滑动,左坝肩产生变形,带动坝体整体破坏;②泄洪能力不足:如印度 Machhu 大坝失稳是由于前期特大暴雨漫顶,实际流量超过设计泄流能力 2 倍多,加之未能开闸放水所致;③渗流控制措施不当:如 1928 年美国洛杉矶 St Francis 重力坝失稳,内因是坝址存在地质缺陷,外因则是渗流,在蓄水初期就沿坝体、断层和坝肩开始渗流;由于砾岩中含可溶性矿物,岩体吸水软化,受水流冲刷出现缺口,导致右侧坝体失去支撑。在水压力作用下,古滑坡体复活,岩体沿页岩层面楔入坝体左侧基础并将坝体抬高,最终洪水将重达万吨的混凝土坝体卷走。一般水库蓄

水必然会产生渗流,随着水位抬高,孔隙水压力增加可使土体发生潜蚀及管涌破坏,进而引起坝基和坝体破坏;由于渗流多因地下水而起,常被忽视,因此破坏性比较大;④地震诱发坝体破坏:美国圣费尔南多大坝滑坡,1971 年 M7.5 级加州地震诱发填土坝体液化,滑坡主体在震后 25s 发生滑动,滑面位于上游坝面,切穿坝体导致溃坝<sup>[18,66]</sup>;⑤库区滑坡导致溃坝:美国加州 Los Angeles 大坝为大型重力坝,东侧坝肩处的历史滑坡在库水浸泡下滑动导致坝体破坏<sup>[18]</sup>。

## 2.3 灌溉工程

中国西北黄土高原区的农业灌溉活动诱发滑坡现象十分典型,尤其以甘肃永靖黑方台灌区的塬边滑坡群最具代表性。黄土在干燥状态下的内聚力较高,但是当含水量增加时,强度会明显降低。黑方台地区年均蒸发量约为 1600mm,远大于年均降雨量约 300mm,因此降雨对滑坡诱发因素微弱,而最近 30 多年的塬面灌溉活动导致黑方台上层滞水位显著升高,成为诱发滑坡的主要因素。

甘肃永靖黑方台黄土滑坡群:位于甘肃永靖盐锅峡镇,地处黄河和湟水河交汇处的黄河左岸,东西长约 10.7km,南北宽 13km,台塬面积约 13.7km<sup>2</sup>,为黄河 IV 级基座阶地,台塬高出周围地形 100~133m。塬边地带共发育 35 处滑坡,总体积约 4600×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,具体可分为黄土滑坡和黄土-基岩滑坡 2 类:①黄土层内滑坡以黄土泥流为主,具有高速远程及频繁复发特征,滑距超过 300m,平均滑速大于 5m/s。导致黄土泥流的机制:随着滞水位升高,排水条件下首先诱发黄土崩解,同时对位于黄土台塬下部饱和部分的土体施加了不排水荷载;在上覆干燥黄土的重力作用下,最终形成了不排水的流动破坏;宏观破坏方式表现为液化饱和黄土流在先、上部干燥黄土在后的发育特征<sup>[93]</sup>;②黄土-基岩滑坡以黄茨滑坡为例,位于黑方台南缘,1995 年发生上覆厚层黄土的顺岩层滑坡,前缘宽 300m,后缘宽 500m,长 370m,体积约 600×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;由于成功预报,未造成人员伤亡;2006 年滑坡复活,体积 320×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,毁房 153 间且中断道路<sup>[8]</sup>。灌溉诱发黑方台滑坡群的一种解释为:随着灌溉水流入裂缝,裂缝底部的未扰动黄土孔隙水压力急剧增加,进而导致土体局部液化并发生显著位移破坏<sup>[94]</sup>。也应注意灌溉水流入黄土裂隙可以导致小型破坏,大型滑坡通常是地下水位升高诱发

的结果<sup>[94]</sup>。同时,地下水在冬季前后的冻胀壅高效应,以及下伏砂泥岩风化壳中可溶盐淋滤流失导致剪切强度降低效应对塬边滑坡形成的影响也不容忽视<sup>[95]</sup>。

在黄土高原东部地区,也不乏灌溉诱发滑坡灾害的案例,如陕西省华县大名镇快速黄土流滑灾害<sup>[67]</sup>,以及陕西泾阳南塬塬边的崩滑灾害等<sup>[96]</sup>。国外也有一些灌溉渠道渗漏诱发的滑坡灾害,例如澳大利亚历史上最为严重的自然灾害 Thredbo 滑坡,正是由于输水管道渗漏导致 Alpine 公路填筑路堤饱和及坡体最终失稳所致<sup>[68]</sup>;新西兰 Abbotsford 滑坡与原始边坡顶部的输水管道渗漏诱发作用的关系密切<sup>[27]</sup>。

### 3 线性基础设施工程滑坡

线性基础设施工程滑坡以公路、铁路等道路工程和油气管道工程 2 类为主。出于经济及国防建设的目的,这些长距离线性穿越工程,经常无法避开强活动构造区及极端气候地区,因此也造成了人类工程扰动、不良地质及异常气候因素等对沿线切坡稳定性的综合影响效应。在各类工程滑坡中,线性工程扰动区滑坡是分布最为广泛、涉及地质环境条件和形成机制最为复杂的工程类型,且通常沿线呈带状集中分布特征(表 3)。

#### 3.1 公路及铁路工程

在全球范围内,从经济发达程度分析,发展中国家的经济社会发展、国防、交通、日益增加的旅游业等导致其公路及铁路交通系统快速膨胀,随之而来

严重的滑坡问题也困扰着这些国家的山区道路建设。从形成发育条件分析,道路工程滑坡主要集中在极端复杂的地质及气候条件地区,例如亚洲的喜马拉雅弧形地带、欧亚交界的高加索山脉地区等。以中国大陆为例,在道路切坡方面,京福高速公路福建段 200km 内高度大于 40m 的边坡达 180 余处;云南省元江至磨黑高速公路 147km 内高度大于 50m 的边坡 160 余处;宝成铁路宝鸡至绵阳段内,边坡开挖至少 293 处,接近或超过临界安全坡度的 123 处,占开挖长度 53%<sup>[69]</sup>。在切坡失稳致灾方面,宝成铁路建成后 35 年间,沿线滑坡密度达 2 处/km<sup>[10]</sup>;青藏公路和铁路线路总长约 1268km,沿线 50km 宽条带内,面积大于 10<sup>4</sup>m<sup>2</sup> 的滑坡多达 552 处<sup>[11]</sup>。

公路及铁路工程滑坡的形成机制与发育特征主要具有以下共性:①坡体下部切削导致坡体失去支撑;②超载堆积及切削过陡的填筑边坡;③边坡自然水文地质条件改变,导致地表径流或地下水向不稳定斜坡部分汇聚;④除了工程扰动以外,滑坡与地震和极端异常降雨等内外动力因素的综合诱发作用密切相关<sup>[98]</sup>;⑤在道路建设过程中,大多采取了滑坡治理或避让措施,运营过程中的滑坡主要为极端因素诱发的群发小型崩滑灾害;大型滑坡灾害并不易发,然而一旦发生,则灾害惨重。

国内外公路及铁路工程滑坡的形成与分布类型,根据主要诱发因素可分为 3 类:①内动力地质因素——地震与活动构造诱发型;②外动力气象因素——极端异常降雨诱发型;③内外动力耦合作用诱发型。以下将分别进行阐述。

表 3 国内外典型线性基础设施工程灾难性滑坡事件  
Table 3 Catastrophic landslides of linear infrastructure engineering both in China and abroad

编号	滑坡名称	地理位置	体积 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	诱发因素	致灾描述
1	宝成线 K190 滑坡 <sup>[12]</sup>	宝成铁路 K190	30	铁路切坡	1992 年 5 月, 中断运输 35d, 砸坏明洞, 改线花费 8500 万元
2	东乡县何坊村滑坡	中国江西省东乡县		连日降雨 铁路切坡	2010 年 5 月 23 日, 导致火车 9 段车厢脱轨, 线路中断, 19 人死亡, 71 人受伤
3	102 道班滑坡群 <sup>[12]</sup>	川藏公路林芝通麦段	500	公路切坡	1991—2000 年期间, 堵塞帕隆藏布江, 致翻车事故 20 起, 9 人死亡
4	Attabad 滑坡 <sup>[97]</sup>	巴基斯坦北部 Hunza 河	3000	公路切坡	2010 年 1 月 4 日, 堵河形成堰塞湖, 淹没 5 座村庄, 致 20 人死亡, 阻断公路

(1)以活动构造、新构造运动及地震为主的诱发机制

①委内瑞拉加拉加斯-拉瓜伊拉高速公路滑坡,古滑坡紧邻断裂发育,区域水平构造应力与地震诱发滑坡复活,并毁坏了公路高架桥<sup>[9]</sup>;②阿塞拜疆从首都巴库至俄罗斯的高速公路穿越高加索山麓地震构造活跃区,在一些高陡斜坡的切脚部位,不良地形条件和地震活动诱发滑坡<sup>[100]</sup>;③以色列耶路撒冷 Soreq-Refaim 峡谷铁路沿线,1927年死海  $M_L 6.2$  级地震诱发岩崩毁坏铁轨<sup>[101]</sup>。

(2)以异常强降雨和地下水为主的诱发机制

①在环太平洋地区:A.南昆铁路八渡古滑坡,在不良岩体结构和物质组成条件下,由强降雨及河岸侵蚀作用诱发形成<sup>[9]</sup>;B.台湾穿岛公路的里山乡滑坡,为大型古滑坡复活形成,滑带位于风化壳的下界面部位,强降雨及排水不畅是主要诱因<sup>[102]</sup>;C.台湾南部莫拉克台风诱发公路滑坡,雨强可达 100mm/h,累积降雨量达 2000mm,阿里山 T18 公路是受灾最严重的公路之一,断层影响区的软弱破碎岩体及不透水层控制坡体稳定性<sup>[103]</sup>;D.此外还包括日本奈良 168 号国道 Ohto 蠕动滑坡<sup>[104]</sup>,以及马来西亚槟榔屿 Tun-Sardon 公路浅层花岗岩残坡积物滑坡<sup>[105]</sup>等;②在环地中海地区:A.约旦 Amman-Jerash-Irbid 国际高速公路在过去 40 多年中,发生许多灾难性滑坡,坡体中发育极软弱的夹层及强降雨是关键影响因素<sup>[106]</sup>;B.约旦重要的公路滑坡之一 NA'UR-4 号大型平移式滑坡,降雨及地表水入渗至泥灰质夹层,使其孔压增加、物性改变和强度降低;坡脚切削及上覆灰岩自重驱动了滑坡<sup>[107]</sup>;C.土耳其安卡拉-伊斯坦布尔-锡诺普的 Karandu 公路滑坡,体积超过  $100 \times 10^6 \text{m}^3$ ,滑体位于强风化不透水的复理石层中,滑带与丘状地形组合形成了大于 2 个大气压的高承压水头;滑体密集的裂隙面顺坡向产出,便于地下水运移;滑体中含有大量抗剪强度较低的粘土质风化物,不利于坡体稳定<sup>[108]</sup>;D.克罗地亚的亚德里亚海公路滑坡,陡坡上部为石灰岩、下部为复理石层;工程切坡导致坡度变陡,地下水的水力梯度增加,降雨诱发大量滑坡<sup>[109]</sup>;③在大西洋东岸地区:A.尼日利亚 Umuahia-Bende 联邦公路滑坡,尽管滑坡已评定为稳定,但在汛期持续降雨作用下,尤其滑前一天强降雨导致地下水位突然上涨,增加了滑体自重使滑坡复活<sup>[110]</sup>;B.威尔士北部 Trevor

公路滑坡,长期地表变形、坡脚侵蚀及地下水变动为滑坡创造了条件;前期异常强降雨和输水管道渗漏,诱发形成旋转-平移式滑坡<sup>[111]</sup>;④在印度洋沿岸地区,印度南部 Nilgiri 山区道路工程滑坡,具有降雨型滑坡集中群发的特征,2006年11月14日,持续 3h 降雨 150mm,在 Burliyar 地区诱发 166 处滑坡,绝大部分为浅层平移式滑坡和碎屑流滑类型,尽管规模不大,但是造成了大量伤亡和财产损失<sup>[112]</sup>。从 1987—2007 年历时 21a 调查揭示 901 处工程滑坡,主要是每年 10~12 月份季风撤退期降雨诱发的小型滑坡;在某些铁路段的滑坡密度可达 50 处/km,而公路段的滑坡密度可达 10 处/km,每年降雨诱发群发滑坡事件最多可达 11 次,每次诱发滑坡数量最多可达 148 处<sup>[113]</sup>。印度 39 号国道沿线滑坡类型主要以楔形体滑动为主,监测数据显示地下水位紧随每年 6~7 月份的强降雨上涨,导致土体饱和,从而引起群发滑坡<sup>[114]</sup>。

(3)强活动构造或地震与强降雨综合诱发的道路工程滑坡

典型分布区之一是青藏高原腹地及周边地区。

①青藏高原腹地:川藏公路然乌-鲁朗 290km 路段分布 34 处滑坡,其中包括 12 处体积大于  $5 \times 10^5 \text{m}^3$  的滑坡;滑体物质一般由巨厚层冰积物、冲洪积物、湖相沉积及碎裂岩组成。滑坡成因机制可表述为:地震导致坡体变形趋于不稳定,汛期强降雨使土体饱和且抗剪强度降低,河流侵蚀扰动坡脚,形成累进式破坏,公路切坡和植被破坏降低了斜坡稳定性并诱发滑坡<sup>[115]</sup>。目前绝大部分是强降雨诱发的滑坡,地震滑坡较少;除了少数不活跃滑坡以外,大部分滑坡发生或复活周期小于 50a<sup>[115]</sup>。典型滑坡案例是 102 道班滑坡群:位于西藏通麦附近,冰洪积物从 400m 高处滑下,松散滑体又演化成数条泥石流,仅保通工程即花费 5000 余万元<sup>[112]</sup>;②青藏高原东缘:岷江上游 G213 国道滑坡,经常堵塞河流或摧毁公路,由地质结构、河流下切和人类切坡活动所致,以小宗渠滑坡为例,其形成机制机理为:A.岷江持续下切导致坡脚累进破坏,从现有破裂面不断溯源扩展;B.位于强震影响区,茂县-汶川断裂带的次级断裂控制滑坡区地质结构,岩体裂隙发育且在古滑坡之后风化严重;C.2002 年秋天重修公路的切坡活动导致滑坡失稳复活<sup>[116]</sup>;③青藏高原南缘:印度北部喜马拉雅山区的工程地质条件及诱发因素与川藏铁路相

似,公路滑坡问题非常突出,集中分布区包括加瓦尔—喜马拉雅地区<sup>[117]</sup>,以及 Almora 和 Nainital 公路沿线<sup>[118]</sup>;④青藏高原北侧:天山山脉强震活动区的亚欧大陆桥 55~70km 路段是整个铁路沿线最大水平地表变形量和平均速率分布区,同时是滑坡分布最为集中的路段,主要发育在白垩系—古近系的粘土岩中,降雨及融雪是主要诱发因素<sup>[119]</sup>。

除了青藏高原地区以外,地中海及环太平洋地区的道路工程滑坡分布也较为集中,典型案例包括:①意大利威尼斯 Fadalto 滑坡,是由古老岩质滑坡从未次冰期演化而来,最初由内外动力因素综合诱发,外因是冰川融化和新构造活动,内因是下伏冰水沉积物滑带抗剪强度降低,基岩裂隙发育,岩层倾向沟谷的顺向坡结构;现代公路和铁路开挖又使滑坡再度复活<sup>[120]</sup>;②北美不列颠哥伦比亚中西部的公路及铁路滑坡类型多样,其影响因素包括岩土体强度软弱、峡谷深切、冰川活动、公路建设与开挖;诱发因素包括降雨、融雪、超载及地震活动;强降雨一般诱发浅层滑坡(如残坡积层滑坡和泥石流),经历较长的水文地质响应时期和累积变形则会诱发深层滑坡(如岩质滑坡、土流及流滑灾害)<sup>[121]</sup>。

### 3.2 油气管道工程

油气管道工程主要采用埋设方式穿越,因此相对公路及铁路等工程滑坡而言,切坡诱发的滑坡灾害较少,但滑坡对管道工程的负面影响不容忽视。油气管道工程在全球分布广泛,此类工程滑坡实例主要包括:①中国西气东输管道穿越西北黄土高原区,沿线地质灾害十分发育,尤其在皋兰至凤翔 350km 段更为集中,且以滑坡及黄土湿陷灾害为主,遥感影像解译显示沿管线两侧 200m 范围内至少发育 43 处滑坡,根据地层组合关系可以分为 3 类: $Q_3$ (晚更新世)黄土滑坡、 $Q_3+Q_2$ (中、晚更新世)黄土滑坡、 $Q_3$ 黄土+ $N_2$ (上新世)红色粘土滑坡,其中  $Q_3+Q_2$  黄土滑坡分布数量最多,一般沿下伏新近系红色粘土风化壳发生滑动,且具有远程滑移和群发特征。尽管沿线滑坡具有局地集中的发育态势,但是在同一沟谷两侧的发育频次不同,多期活动的滑坡相互交切组合形成滑坡群,滑坡空间分布与气候、地形、地震地质及新构造运动因素密切相关。沿线自西向东的气候由干旱经历半干旱转为半湿润气候,降雨量逐渐增加,滑坡灾害也越来越密集,且重要集中在每年 7~8 月份雨季<sup>[13-14]</sup>;②俄罗斯远东穿越

Makarov 山区的油气管道,区内构造活动强烈,地震活动及强降雨会诱发表层风化岩和残坡积层滑坡,滑体厚度以数米为主<sup>[100]</sup>;③土耳其至希腊的天然气管道,在布尔萨附近被滑坡损坏,滑坡长约 96m,宽 48m,滑带深度在地下 1.9~12.4m 处,欠固结粘土沿着与下伏粘土岩接触带发生滑移破坏<sup>[122]</sup>。

油气管道一般以平行或者垂直于滑动方向 2 种方式穿越滑坡区:①当平行穿越时,如果沿管道修筑护堤,二者共同组成纵向防护结构,可以一定程度避免滑坡;否则,当滑坡发生时,尖锐石块可能会划破管道保护层;②当垂直或近垂直穿越时,由于管道由钢制材料构成,自身可以横向抵抗下滑力,尤其对小型滑坡可以起到支护作用,管道抗力的能力主要取决于管道接头的固定墩数量和间距<sup>[123]</sup>。

## 4 城市建设复合型工程滑坡

目前全球大部分地区人口压力在不断增长,这种趋势在未来仍会继续加速。迫于人口膨胀的压力,城市发展日趋被动地向山区推进;同时,山区自然美景及渴望融入其中的主动意愿,也使人们不断向山区开发定居,这种发展趋势进一步加剧了城市化过程中山区滑坡的风险,并且已经形成了许多灾难性滑坡事件(表 4)。

城市建设过程中涉及的工程种类繁多,概括起来工程滑坡主要包括 5 种诱因:①工程切削形成高陡坡体或者掏空坡脚;②在不稳定斜坡或者处于临界稳定状态的坡体上部加载;③人为干扰地表径流导致坡体排水条件劣化;④景观灌溉或蓄水等原因,导致坡体含水量增加;⑤对森林和灌木等植被的砍伐活动等<sup>[29]</sup>。尽管城市建设工程滑坡的诱因多样,但是其发育及分布特征一般具有以下共性:①区别于其它工程滑坡,主要表现在其诱发机理难以归咎于某种单一的工程类型,往往具有以某种工程为主、多种工程为辅的复合诱发特征,如新西兰 Abbotsford 滑坡<sup>[27]</sup>;②人类世以来,工程活动由最初的外在诱发因素,逐渐演变成基础背景要素,尤其在城市化中心或者经济社会发达地区表现尤为明显<sup>[30]</sup>;③工程滑坡灾害几乎与城市化如影随形发展而来,无论经济发达或者欠发达地区,均无例外。例如在意大利,近年来不合理的土地利用诱发了许多灾难性滑坡<sup>[79]</sup>;意大利南部 Basilicata 地区土地利用的改变导致 20 世纪以来的城市滑坡持续增加,而这些滑坡均为人

表4 国内外城市化复合型工程灾难性滑坡事件  
Table 4 Catastrophic landslides of urban construction  
compound engineering both in China and abroad

编号	滑坡名称	地理位置	体积 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	诱发因素	致灾描述
1	重庆武隆县城5·1 滑坡 <sup>[8,15]</sup>	重庆武隆 县城	1.6	公路及城 建切坡	2001年5月1日,缓倾碎裂岩切向坡,致使一 幢9层楼房被摧毁掩埋,79人死亡、7人受伤
2	天水锻压机床厂 滑坡 <sup>[12,124]</sup>	甘肃省 天水市	60	修路建厂 强降雨	1990年8月21日,黄土梁斜坡,摧坏6个车间, 7人死亡,损失2000多万元
3	丹巴县城滑坡 <sup>[7]</sup>	四川丹巴县	220	长期蠕变 城建切坡	2005年2月18日,堆积层斜坡,破坏房屋,损 失1066万元,威胁整个县城安全
4	八渡车站滑坡 <sup>[9,12]</sup>	南昆线八渡	500	建筑切坡	1997年7月,深层巨型切层古滑坡,威胁车站 安全,治理费9000万元
5	Aldercrest-Banyon 滑坡 <sup>[125]</sup>	美国华盛顿 Kelso		城镇建设 强降雨	1998—1999年,蠕滑滑坡摧毁137间房屋,造 成4000万美元损失
6	Cairo滑坡 <sup>[126]</sup>	埃及开罗		城建切坡	2008年9月6日,119人死亡,山区建设活动诱 发悬崖崩塌,各别巨石重达70t
7	Abbotsford滑坡 <sup>[27]</sup>	新西兰南岛 但尼丁地区	500	强降雨 坡脚采砂 管道渗漏	1979年8月8日,摧毁69间房屋及许多城市基 础设施毁坏,损失超过1000万新西兰元

类工程活动诱发<sup>[27]</sup>。在非洲肯尼亚,公路建设、池塘开挖及建筑场地整理等工程活动是斜坡失稳的直接诱因<sup>[128]</sup>;乌干达 Bushika 地区建房切坡直接诱发许多滑坡灾害<sup>[129]</sup>。国内外城市建设复合型工程诱发的典型滑坡灾害如下。

(1)新西兰近50多年以来最著名的滑坡 Abbotsford 滑坡,属于快速深层平移式滑坡,坡体在经历了几周变形之后,迅速发生整体破坏,堆覆面积18×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>。影响滑坡发生的自身因素是滑体下伏为倾角约7°的软粘土层,构成顺向坡结构,老滑坡坡脚的河流侵蚀进一步降低了坡体稳定性;人为控制因素包括坡脚处采砂和滑源区的输水渠道渗漏,由于采场已于滑前10a关闭,此间降雨量增加使地下水位长期上涨,而渠道渗漏最终控制了滑坡的发生时间<sup>[27]</sup>。

此外,尽管诱发因素与城镇建设并无直接关系,但自然因素诱发滑坡导致城镇灾难性后果的事件还包括:①波多黎各历史上迄今最具灾难性的滑坡——Mameyes 滑坡,1985年10月,Isabel 热带风暴导致每小时降雨量可达70mm,诱发岩质滑坡,体积约30×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,导致至少129人死亡,120多座房屋被毁<sup>[19]</sup>;②瑞典 Surte 敏感粘土滑坡,发生于1950年

9月,体积400×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,导致1人死亡,毁房40余栋,300多人无家可归,破坏了附近高速公路、小型公路及铁路轨道,渡轮停运一段时期<sup>[26]</sup>。

(2)国内城市建设活动诱发的典型滑坡灾害包括:①四川丹巴县城滑坡,在古滑坡的基础上发育形成,斜坡前缘位于大金河凹岸,侵蚀形成高陡临空面;在20世纪50年代到1998年期间,经历了2次浅层滑动而后处于相对稳定状态;此后,丹巴县城大量建房切坡工程破坏了坡体自稳状态。2004年3~10月,城建切坡使坡体前缘临空面进一步增高,造成坡脚支撑力减弱,坡体变形加剧,整体向前缘临空方向挤压变形。坡体后部土体被拉裂,形成明显的拉裂缝,并逐渐向深部发展。坡体两侧的剪切裂缝也逐渐形成。滑坡后缘和两侧的剪切裂缝逐渐贯通闭合,导致丹巴滑坡整体复活<sup>[7]</sup>;②重庆武隆县城5·1滑坡:坡体由碎裂状的砂岩夹泥岩互层岩体组成,坡体属缓倾切向坡结构。自1989年以来,坡脚遭受2次开挖,分别是1989年兴建G319国道,沿乌江河谷开挖斜坡,形成高约20m,倾角达60~80°的陡倾边坡,未加支护;1997年被规划为建设用地,形成了宽160m、深15.5m、高46.6m的槽形场地。尽管局部采

取浆砌块石挡墙支挡措施,但未设置合理防水反滤层和排水孔,导致防护效果甚微,最终发生滑坡<sup>[8]</sup>;  
③天水锻压机床厂滑坡:暴雨诱发厂区后山发生黄土崩塌性滑坡,不合理工程主要包括:A.修路建厂削坡挖脚,形成险陡临空面;B.灌渠洪水的浸泡和冲蚀导致坡体洞穴发育;C.前期连阴雨及暴雨诱发了滑坡<sup>[12,124]</sup>;④香港历史上的残坡积层滑坡灾害发生频繁,例如 1906 年 9 月 18 日的飓风诱发滑坡,造成 3000 艘渔船和 670 艘远洋轮船损坏或失踪,15000 人死亡,占当时人口的 5%,成为香港史上最惨重的灾害<sup>[130]</sup>。

针对城市建设诱发的复合型工程滑坡,目前主要通过 4 种途径来控制及减缓风险:①尽量限制或禁止在滑坡易发区开发建设;②实施和执行相关规范标准指导工程切坡及建筑工程;③利用工程减灾措施保护现有的建设项目及人员安全;④开发和安装多场指标参数的监测及预警系统。此外,滑坡保险不失为风险减缓措施的选择之一,以此来减少滑坡灾害对个体业主造成的损失,但是目前尚处在探索和尝试应用阶段。

## 5 讨论与结论

通过对国内外的采矿工程滑坡、水利水电工程滑坡、线性基础设施工程滑坡及城市建设复合型工程滑坡等 4 种基本类型及若干亚类的工程滑坡案例的回顾,比较分析了各类典型工程滑坡的发育特征、形成机理及部分防控措施,初步获得以下 7 点警示与认识。

(1)建议加强工程滑坡灾害编录、建库及跨行业共享交流。与国际工程滑坡研究相比,例如国际大坝委员会及欧盟尾矿坝安全管理及事故分析、印度公路与铁路工程滑坡编录、西班牙及土耳其露天采场边坡管理方法和经验,中国在工程滑坡编录、斜坡安全管理及废弃工程边坡复垦利用方面的工作较为欠缺,这在很大程度上阻碍了工程滑坡的研究进展,亟需进行各类工程滑坡编录建库及动态更新工作。借此不仅可以提升行业内部研究的系统性,也便于不同行业间的跨界交流和相互借鉴,从而进一步提升国家层面上工程滑坡研究及支撑减灾的整体水平。

(2)重视工程滑坡的综合诱发机制研究:大部分工程滑坡灾害经常并非由单一工程活动诱发形成,

而是表现为以特定工程因素为主,各类内外动力因素为辅的综合诱发特征,尤其是城市建设复合类型的工程滑坡灾害更为明显。因此需要开展深入细致的现场调查评估、针对性的物理力学测试及理论分析,避免对各种影响和诱发因素顾此失彼,才能准确地揭示滑坡赋存条件、形成机制、演化历史及发展趋势,并提出相应的风险处置措施。

(3)着重进行工程滑坡区的地质背景调查:在大部分工程滑坡灾害的形成机制中,基础地质条件通常起决定性作用,而人类工程活动则起到雪上加霜的诱发作用,例如莫拉克台风诱发台湾阿里山公路滑坡。然而,多数工程诱发因素具有多变性,对坡体稳定性的影响不易把握,所幸地质背景条件相对恒定,并且可以通过系统的调查分析揭示。因此,在工程开发项目的规划、选址及建设各阶段,做好地质背景调查评估工作,是杜绝滑坡后患的重要前提。遗憾的是,在许多前期的滑坡危险性评估中,诸如断层结构面的产状信息等地质要素通常会被忽视或简化,得不到真实的反映。

(4)注重古老滑坡的演化历史分析:许多灾难性滑坡是古老滑坡复活所致,活动历史有时长达数千甚至万年,例如南威尔士煤矿采区滑坡;应注重从更长历史时期的尺度,系统地审视滑坡演化的过程。不宜轻视已经评判为稳定的滑坡,需要深入了解岩土体的力学特性,尤其随着位移和时间因素变化的特性;在此基础上合理预计潜在诱发因素,评估其复活风险,避免因仅注意到暂时稳定,未顾忌潜在失稳趋势的灾难发生,例如尼日利亚 Umuahia-Bende 联邦公路滑坡。

(5)强调坡体变形监测及早期预警分析:由于工程扰动区人员及设施等较为集中,顾及这些承灾体的安全,通常会布设监测设备或安排目视监测,滑坡早期变形迹象及临滑征兆也易于察觉或观测。由于许多灾难性滑坡通常具有较长的变形历史,留有时间进行调查评估和采取风险减缓措施,如果及时采取合理的措施,完全可以避免成灾,还在保证安全的前提下,产出经济效益并指导未来工程活动,成功案例包括中国潘洛铁矿边坡及日本埼玉县 Kagemori 采石场边坡等。相反如果疏于监测或者忽视预警信息,则会酿成灾难,例如意大利 Stava 尾矿泥流、Vajont 滑坡及中国鸡冠岭崩塌—碎屑流等。同时,对监测结果的评判分析十分关键,尤其对暂时休眠的滑

坡不应疏于防范,经常会由于地震等突发因素导致加速变形致灾,例如委内瑞拉加拉加斯—拉瓜伊拉高速公路滑坡。

(6)关注小型工程滑坡的重大潜在风险:许多造成灾难性后果的工程滑坡体积规模并不大,例如贵州凯里鱼洞村崩塌及意大利特兰托 Stava 泥流等。究其原因,尽管滑坡规模较小,但是危及人员及财产甚众,因此建议对人员及设施等承灾体密集分布的工程项目区,着重提高滑坡调查编录精度,防微杜渐,准确地分析评估滑坡失稳造成的潜在风险,尽量避免“小滑坡、大灾难”的悲剧发生。

(7)未来工程滑坡灾害发展的趋势:随着城市规模的扩张,曾经位于郊区的工程场地逐步变成了城市中心区,对滑坡有影响的多种工程类型密集交织,工程滑坡诱发因素逐渐向复合诱发类型转变。与此同时,已有静态缓变的地质环境条件,在日益加速的工业化与城市化进程中,被人类活动改造后的环境所替代,形成了“人类世”特有的背景环境条件,转变成滑坡灾害的基础诱发因素,在降雨或地震等关键诱发因素条件下易于成灾。未来滑坡防灾减灾工作,需要在深入研究单一诱发类型的机理和防治措施之后,关注复合工程扰动区的滑坡综合减灾措施及其优化组合问题。

**致谢:**在成文过程中,文献的搜集和资料整理工作得到中国地质大学(北京)研究生李硕、王玢佳和何晓磊的帮助,在此谨表谢意。

## 参考文献

- [1]Crutzen P J. Geology of mankind[J]. *Nature*, 2002, 415: 23.
- [2]Bruschi V M, Bonachea J, Remondo J, et al. Analysis of geomorphic systems' response to natural and human drivers in northern Spain[J]. Implications for global geomorphic change. *Geomorphology*, 2012, 196: 267-279.
- [3]Steffen W, Sanderson A, Tyson P, et al. The Anthropocene Era: How Humans are Changing the Earth System, in *Global Change and the Earth System*[M]. Berlin Heidelberg:Springer, 2005: 81-141.
- [4]Petley D. Global patterns of loss of life from landslides[J]. *Geology*, 2012, 40(10): 927-930.
- [5]黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 433-454.
- [6]孙广忠,姚宝魁,等.中国典型滑坡[M].北京:科学出版社,1988: 364.
- [7]黄润秋,许强,等.中国典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008: 553.
- [8]殷跃平.中国典型滑坡[M].北京:中国大地出版社,2007: 84.
- [9]王恭先,等.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2007: 497.
- [10]鄢毅.宝成铁路滑坡与降雨关系探讨[J].*水文地质工程地质*, 1993, (4): 14-16.
- [11]王治华.青藏公路和铁路沿线的滑坡研究[J].*现代地质*, 2003, 17 (4): 355-362.
- [12]王恭先,王应先,马惠民.滑坡防治100例[M].北京:人民交通出版社,2008: 527.
- [13]Wang J E, Xiang W, Zuo X. Situation and prevention of loess water erosion problem along the west-to-east gas pipeline in China[J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(6): 968-973.
- [14]Wang Y Z, Zhou L C. Spatial distribution and mechanism of geological hazards along the oil pipeline planned in western China[J]. *Engineering Geology*, 1999, 51(3): 195-201.
- [15]殷跃平.重庆武隆“5·1”滑坡简介[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(2): 98-98.
- [16]Cruden D M, Martin C D. A century of risk management at the Frank Slide, Canada[C]//Nottingham, United Kingdom: The Geological Society of London, 2006: 1-7.
- [17]Rudolph T, Coldewey W G. Implications of Earthquakes on the Stability of Tailings Dams [EB/OL](2013-05-13)[2013-11-05] [http://www.imwainfo/docs/imwa\\_2008/IMWA2008\\_025\\_Rudolph.pdf](http://www.imwainfo/docs/imwa_2008/IMWA2008_025_Rudolph.pdf), 2008.
- [18]Highland L M, Schuster R L. Significant Landslide Events in the United States[J]. USGS, Retrieved from [http://landslide.usgs.gov/docs/faq/significantls\\_508.pdf](http://landslide.usgs.gov/docs/faq/significantls_508.pdf), 2000.
- [19]Lepore C, Kamal S A, Shanahan P, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 66(6): 1667-1681.
- [20]Wichter L. Stabilisation of old lignite pit dumps in Eastern Germany[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 66(1): 45-51.
- [21]Sammarco O. A Tragic Disaster Caused by the Failure of Tailings Dams Leads to the Formation of the Stava 1985 Foundation[J]. *Mine Water and the Environment*, 2004, 23(2): 91-95.
- [22]Hendron A J, Stefani R. The vaiont slide—A geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface[J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1/4): 475-491.
- [23]Pinyol N M, Alonso E E. Criteria for rapid sliding II. Thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3/4): 211-227.
- [24]Alonso E E, Pinyol N M. Criteria for rapid sliding I. A review of Vaiont case[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3/4): 198-210.
- [25]Paronuzzi P, Bolla A. The prehistoric Vajont rockslide: An updated geological model[J]. *Geomorphology*, 2012, (169/170): 165-191.
- [26]Lindberg F, Olvmoa M, Bergdahl K. Mapping areas of potential slope failures in cohesive soils using a shadow-casting algorithm—A case study from SW Sweden[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38 (6): 791-799.
- [27]Hancox G T. The 1979 Abbotsford Landslide, Dunedin, New Zealand: a retrospective look at its nature and causes[J]. *Landslides*, 2007,



- 5(2):177-188.
- [28]Wikipedia. 2008 Cairo landslide[EB/OL](2013-07-14)[2013-11-05]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/2008\\_Cairo\\_landslide](http://en.wikipedia.org/wiki/2008_Cairo_landslide), 2013.
- [29]Schuster R L, Highland L M. The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006,66(1): 1-27.
- [30]Maruyama Y,Sugiura M. The effect of urbanization on sediment disasters[J]. *Geo. Journal*,1996, 38(3): 355-364.
- [31]孟晖, 胡海涛.我国主要人类工程活动引起的滑坡、崩塌和泥石流灾害[J]. *工程地质学报*,1996,4(4):69-74.
- [32]Benko B, Stead D. The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2):299-311.
- [33]李玉生, 谭开鸥, 王显华.乌江鸡冠岭岩崩特征及成因[J]. *中国地质*, 1994, (7): 25-27.
- [34]刘传正, 黄学斌, 黎力.乌江鸡冠岭山崩堵江地质灾害及其防治对策[J]. *水文地质工程地质*, 1995, (4): 6-11.
- [35]刘传正.重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(3): 297-304.
- [36]殷跃平.斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2):217-226.
- [37]胡余道.铁西滑坡发生发展规律与整治工程实践[J]. *铁道标准设计通讯*, 1987, (1): 14-22.
- [38]Suwa H, Mizuno T, Suzuki S, et al. Sequential processes in a landslide hazard at a slate quarry in Okayama,Japan[J]. *Natural Hazards*, 2008, 45(2): 321-331.
- [39]Wikipedia. Buffalo Creek Flood [EB/OL](2013-10-05)[2013-11-05]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Buffalo\\_Creek\\_Flood](http://en.wikipedia.org/wiki/Buffalo_Creek_Flood), 2011.
- [40]Tang F Q. Research on mechanism of mountain landslide due to underground mining[J]. *Journal of Coal Science& Engineering (China)*, 2009, 15(4): 351-354.
- [41]Altun A O, Yilmaz I, Yildirim M. A short review on the surficial impacts of underground mining[J]. *Scientific Research and Essays*, 2010, 5(21): 3206-3212.
- [42]Marschalko M,Yilmaz I, Bednárík M, et al. Influence of underground mining activities on the slopedeformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic[J]. *Engineering Geology*, 2012: 147-148, 37-51.
- [43]Klukanová A, Rapant S. Impact of mining activities upon the environment of the Slovak Republic: two case studies[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66(1/2): 299-306.
- [44]Jozef M,Frantisek B, Tibor M. Prediction of the influence of underground coal mining on slope stability in the Vtúžnik mountains[J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1986, 33(1): 57-65.
- [45]Bentley S P, Siddle H J. The evolution of landslide research in the South Wales Coalfield[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 1990, 101(1): 47-62.
- [46]Bentley S P, Siddle H J. Landslide research in the South Wales coalfield[J]. *EngineeringGeology*,1996, 43(1): 65-80.
- [47]Froese C R, MorenoF. Turtle Mountain Field Laboratory (TMFL): Part 1—overview and activities[C]// Schaefer V R, SchusterR L, TurnerA K. AEG Special Publication 23.(1st North AmericanLandslide-Conference, 2007: 971-980.
- [48]Terzaghi K V. Mechanism of landslides[C]//Paige S. Application of Geology to Engineering Practice[C]// New York: Geological Society of America,1950: 83-123.
- [49]Benko B, Stead D. The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2):299-311.
- [50]Krahn J, Morgenstern N R. The Mechanics of the Frank Slide[C]// Geotechnical Engineering Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder, Colorado, American Society of Civil Engineers, 1976,(1): 309-332.
- [51]孙玉科, 姚宝魁.盐池河磷矿山体崩坍破坏机制的研究[J]. *水文地质工程地质*, 1983, (1):1-7.
- [52]吴瑾, 等.贵州开阳磷矿区崩塌及其防治[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(3): 27-32.
- [53]Wei Z, Zhi G, Wan L, et al. Case history of controlling a landslide at Panluo open-pit mine in China[J].*Environmental Geology*, 2007, 54(4): 699-709.
- [54]Min H, Deng J, Zhang Q, et al. Slope safety control during mining below a landslide[J]. *Science in China Ser. E Engineering and Materials Science*, 2005, 48(Supp.): 47-52.
- [55]Zhang L, Wei Z, Liu X, et al. Application of three-dimensional discrete element face-to-face contact model with fissure water pressure to stability analysis of landslide in Panluo iron mine[J]. *Science in China Ser. E Engineering and Materials Science*, 2005, 48 (Supp.): 146-156.
- [56]李凤明, 谭勇强.采矿活动引发的滑坡及工程治理实践[J]. *煤矿开采*, 2002, 7(2): 1-6.
- [57]Alejano L R, Pons B, Bastante F G, et al. Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6):903-921.
- [58]Koca M Y,Kincal C. Abandoned stone quarries in and around the Izmir city centre and their geo-environmental impacts-Turkey. *Engineering Geology*, 2004, 75(1): 49-67.
- [59]Yamaguchi U, Shimotani T. A case study of slope failure in a limestone quarry[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 1986, 23(1): 95-104.
- [60]郑颖人, 等.边坡与滑坡工程治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 758.
- [61]Rico M, Benito G, Salgueiro A R, et al. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context[J]. *Journal of Hazard Mater*, 2008, 152(2):846-852.
- [62]Okagbue C O. An investigation of landslide problems in spoil piles in a strip coal mining area, West Virginia (U.S.A.)[J]. *Engineering Geology*, 1986, 22(4): 317-333.
- [63]Wen B P, Shen J, Tan J. Evaluation of the Roles of Reservoir Impoundment and Rainfall for the Qianjiangping Landslide in Zigui County, Three Gorges Area[C]// Wang F, Li T. Landslide DisasterMit-

- igation in Three Gorges Reservoir, China Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2009: 231-242.
- [64] 邢林生. 我国水电站大坝事故分析与安全对策[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(2): 26-34.
- [65] 宋恩来. 国内几座大坝事故原因分析[J]. 大坝与安全, 2000, (2): 41-44.
- [66] Stamatopoulos CA, Petridis P. Back Analysis of the Lower San Fernando Dam Slide Using a Multi-block Model [M]. Engineering Conferences International, 2006: 1-8.
- [67] Zhang D, Wang G, Luo C, et al. A rapid loess flowslide triggered by irrigation in China[J]. Landslides, 2008, 6(1): 55-60.
- [68] Hand D. Report of the inquest into the deaths arising from the Thredbo landslide[R]. New South Wales: State Coroner, 2000: 206.
- [69] Schuster R L. Reservoir-induced landslides[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1979, 20(1): 8-15.
- [70] Tropeano D, Turconi L. Using Historical Documents for Landslide, Debris Flow and Stream Flood Prevention. Applications in Northern Italy[J]. Natural Hazards, 2004, 31(3): 663-679.
- [71] Cojean R, Cai Y J. Analysis and modeling of slope stability in the Three-Gorges Dam reservoir (China)-The case of Huangtupo landslide[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(2): 166-175.
- [72] Cload L, Webby G. Mokihinui dam-effect of landslides on dam and reservoir[C]// Wellington, New Zealand: Opus International Consultants Limited, 2007: 13.
- [73] Zhou JW, Xu W Y, Yang X G, et al. The 28 October 1996 landslide and analysis of the stability of the current Huashiban slope at the Liangjiaren Hydropower Station, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1/2): 45-56.
- [74] He K Q, Li X R, Yan X Q, et al. The landslides in the Three Gorges Reservoir Region, China and the effects of water storage and rain on their stability[J]. Environmental Geology, 2007, 55(1): 55-63.
- [75] Deng J H, Wei J B, Min H, et al. Response of an old landslide to reservoir filling: A case history[J]. Science in China Ser. E Engineering & Materials Science, 2005, 48(Supp.): 27-32.
- [76] Panizzo A, Girolamo P D, Risio M D, et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5: 733-740.
- [77] Carvalho R F, Antunes do Carmo J S, et al. Landslides into reservoirs and their impacts on banks[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, 7(6): 481-493.
- [78] Kotyuzhan A I, Molokov L A. Landslide at the abutment of the dam of the Mingechaur hydroelectric station[J]. Hydrotechnical Construction, 1990, 24(2): 92-95.
- [79] Riemer W. Landslides and Reservoirs, Keynote Paper[C]// Hell D H. the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, 1992: 1373-2004.
- [80] 中村浩之, 王恭先. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53-64.
- [81] Jones F O, Embody D R, Peterson W L, et al. Landslides along the Columbia River valley northeastern Washington, with a section on seismic surveys[Z]. U.S. Govt, 1961, 367: 98.
- [82] Trzhtsinskii Y B. Landslides along the Angara reservoirs[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1978, 17(1): 42-43.
- [83] 王治华. 三峡水库区城镇滑坡分布及发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(1): 33-38.
- [84] Xue G F, Xu F X, Wu Y H, et al. Bank Slope Stability Evaluation for the Purpose of Three Gorges Reservoir Dam Construction[C]// Wang F, Li T. Landslide Disaster Mitigation in Three Gorges Reservoir. China, Verlag Berlin Heidelberg, 1997: 41-86.
- [85] Wang HB, Xu W Y, Xu R C, et al. Hazard assessment by 3D stability analysis of landslides due to reservoir impounding[J]. Landslides, 2007, 4(4): 381-388.
- [86] Zhang T, Yan E, Cheng J T, et al. Mechanism of reservoir water in the deformation of Hefeng landslide[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(6): 870-875.
- [87] Wang F, Yan E, Cheng J T, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China[J]. Landslides, 2008, 5(3): 321-329.
- [88] Zhang M, Dong Y, Sun P. Impact of reservoir impoundment-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateau of Western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1715-1725.
- [89] Zhang D, Wang G, Yang T, et al. Satellite remote sensing-based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower Station, China[J]. Landslides, 2012, 10(2): 231-238.
- [90] Li Y, Feng X, Cheng G. Landslide and rockfall distribution by reservoir of stepped hydropower station in the Jinsha River[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 801-805.
- [91] 何晓燕, 王兆印, 黄金池, 等. 中国水库大坝失事统计与初步分析[C]// 中国水利学会 2005 学术年会. 青岛: 中国水利水电出版社, 2005: 1-13.
- [92] 马永锋, 生晓高. 大坝失事原因分析及对策探讨[J]. 人民长江, 2001, 32(10): 53-56.
- [93] Xu L, Dai F C, Gong Q M, et al. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-West China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 66(6): 1707-1713.
- [94] Xu L, Dai F C, Gong Q M, et al. Field testing of irrigation effects on the stability of a cliff edge in loess, North-west China[J]. Engineering Geology, 2011, 120(1/4): 10-17.
- [95] Wen B P, He L. Influence of lixiviation by irrigation water on residual shear strength of weathered red mudstone in Northwest China: Implication for its role in landslides' reactivation[J]. Engineering Geology, 2012, 151: 56-63.
- [96] 范立民, 岳明, 冉广庆. 泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(5): 33-35.
- [97] Petley D. The landslide at Attabad in Hunza, Gilgit/Baltistan: current situation and hazard management needs[M]. National Disaster Management Agency, Pakistan, 2005: 9.
- [98] Sidle R C, Furuichi T, Kono Y. Unprecedented rates of landslide

- and surface erosion along a newly constructed road in Yunnan, China[J]. *Natural Hazards*, 2010, 57(2):313-326.
- [99]Salcedo DA. Behavior of a landslide prior to inducing a viaduct failure, Caracas-La Guaira highway, Venezuela[J]. *Engineering Geology*, 2009, 109(1/2):16-30.
- [100]Novotný J. Stability problems in road and pipeline constructions and their mitigation - Examples from Sakhalin and Azerbaijan[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(2):307-313.
- [101]Katz O, Reichenbach P, Guzzetti F. Rock fall hazard along the railway corridor to Jerusalem, Israel, in the Soreq and Refaim valleys[J]. *Natural Hazards*, 2010, 56(3): 649-665.
- [102]Shou K J, Chen Y L. Spatial risk analysis of Li-shan landslide in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2005, 80(3/4):199-213.
- [103]Liu C N, Dong J J, Chen I J, et al. Typical landslides and related mechanisms in Ali Mountain highway induced by typhoon Morakot: perspectives from engineering geology[J]. *Landslides*, 2011, 9(2):239-254.
- [104]Suwa H, Mizuno T, Ishii T. Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan[J]. *Geomorphology*, 2010, 124(3/4):157-163.
- [105]Khan YA, Lateh H. Failure Mechanism of a Shallow Landslide at Tun-Sardon Road Cut Section of Penang Island, Malaysia[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(6):1063-1072.
- [106]Malkawi A I H, Taqieddin S A. Geotechnical study of landslides resulting from a highway construction in Jordan [J]. *Natural Hazards*, 1996, 13(1):1-15.
- [107]Al-Hompud A S, Husein A I, Salameh E, et al. A review of twenty years of geotechnical studies at Na'ur Landslide No. 4 in Jordan[J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1995, 51(1):39-55.
- [108]Yilmazer I, Yilmazer O, Saraç C. Case history of controlling a major landslide at Karandu, Turkey[J]. *Engineering Geology*, 2003, 70(1/2): 47-53.
- [109]Arbanas Ž, Dugonjić S. Landslide Risk Increasing Caused By Highway construction[C]// *International Symposium in Pacific Rim, Taiwan, China*, 2010:333-342.
- [110]Okagbue C O. A landslide in a quasi-stable slope[J]. *Engineering Geology*, 1988, 25(1):69-82.
- [111]Nichol D, Graham J R. Remediation and monitoring of a highway across an active landslide at Trevor, North Wales[J]. *Engineering Geology*, 2001, 59(3/4): 337-348.
- [112]Jaiswal P, Van Westen C J, Jetten V. Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering Geology*, 2010, 116(3/4):236-250.
- [113]Jaiswal P, Van Westen C J, Jetten V. Quantitative assessment of landslide hazard along transportation lines using historical records[J]. *Landslides*, 2011, 8(3):279-291.
- [114]Kumar A, Sanoujam M. Landslide studies along the national highway (NH 39) in Manipur[J]. *Natural Hazards*, 2006, 40(3):603-614.
- [115]Shang Y, Hyeong Dong P, Yang Z, et al. Distribution of landslides adjacent to the northern side of the Yarlu Tsangpo Grand Canyon in Tibet, China[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(6):721-741.
- [116]Ding Y, Wang Q. Remediation and analysis of kinematic behaviour of a roadway landslide in the upper Minjiang River, Southwest China[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(7):1521-1532.
- [117]Barnard P L, Owen L A, Sharma M C, et al. Natural and human-induced landsliding in the Garhwal Himalaya of northern India[J]. *Geomorphology*, 2001, 40(1/2):21-35.
- [118]Haigh M J, Rawat J S, Bartarya S K. Environmental correlations of landslide frequency along new highways in the Himalaya: Preliminary results[J]. *CATENA*, 1988, 15(6):539-553.
- [119]Kojogulov K C, Nikolskay O V. Danger of the Landslide Activity of Slopes on the Railway Line China-Kyrgyzstan - Uzbekistan On Site Karasu-Torugart[C]// Liu, Deng, Chu. *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*. Beijing: Verlag GmbH Berlin Heidelberg, Science Press, Springer, 2008:526-532.
- [120]Pellegrini G B, Surian N. Geomorphological study of the Fadalto landslide, Venetian Prealps, Italy [J]. *Geomorphology*, 1996, 15(3/4): 337-350.
- [121]Geertsema M, Schwab J W, Blais-Stevens A, et al. Landslides impacting linear infrastructure in west central British Columbia. *Natural Hazards*, 2008, 48(1):59-72.
- [122]Topal T, Akin M. Geotechnical assessment of a landslide along a natural gas pipeline for possible remediations (Karacabey-Turkey)[J]. *Environmental Geology*, 2008, 57(3):611-620.
- [123]Ma Q W, Wang C, Kong J M. Dynamical mechanisms of effects of landslides on long distance oil and gas pipelines[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(4):820-824.
- [124]薛振勇, 侯书云. 人类活动诱发的地质灾害——天水锻压机床厂滑坡[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1991, 2(4):52-60.
- [125]Rogers J D. Aldercrest - Banyon Landslide Kelso, Washington (1998-99)[EB/OL](2010-01-01)[2013-11-05] [http://web.mst.edu/~rogersda/professional\\_experience/aldercrest\\_banyon\\_ls.htm](http://web.mst.edu/~rogersda/professional_experience/aldercrest_banyon_ls.htm). 2010.
- [126]BBC. Deadly rockslide hits Cairo homes [EB/OL](2008-09-06)[2013-11-05] [http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle\\_east/7601761.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle_east/7601761.stm). 2008
- [127]Oliver S. 20th-century urban landslides in the Basilicata region of Italy[J]. *Environmental Management*, 1993, 17(4):433-444.
- [128]Davies TC. Landslide research in Kenya[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1996, 23(4): 541-545.
- [129]Knapen A, Kitutu M G, Poesen J, et al. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): Characteristics and causal factors [J]. *Geomorphology*, 2006, 73 (1/2):149-165.
- [130]欧树军. 滑坡灾害: 香港治理的历史经验[EB/OL](2012-07-27)[2013-11-05][http://www.guancha.cn/ou-shu-jun/2012\\_07\\_27\\_87329.shtml](http://www.guancha.cn/ou-shu-jun/2012_07_27_87329.shtml). 2012.