

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.17

我国单体滑坡模拟和区域滑坡易发性评价研究进展

吴赛男¹, 田毅^{1,2}

- (1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;
2. 北京市国土资源信息研究与开发重点实验室, 北京 100083)

摘要: 自然环境的演化及人类工程活动对自然环境的改变, 造成的滑坡灾害频发, 给人民生命财产安全带来极大的威胁。因此, 总结我国滑坡模拟研究发展趋势和存在问题, 提出发展方向建议, 无疑对滑坡模拟研究具有重要的指导意义。论文采用计量和内容分析相结合的方法, 分析了我国近30年来滑坡模拟研究热点和主要进展, 提出了滑坡模拟研究方法物理模拟与数值模拟相结合和模拟“数据采集新、数据分析新、可视化方式新”三新的发展趋势; 基于滑坡模拟基础模型适用性选择理论不成熟、灾害空间预测方法不具有地区普适性的现状, 提出了在可视化基础上开展特定区域空间连续自动预测的灾害空间预测发展方向建议。

关键词: 滑坡; 模拟研究; 进展; 发展建议

中图分类号: U216.41+9.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0113-07

Review on progress of individual landslide simulation and assessment of regional landslide susceptibility in China

WU Sainan¹, TIAN Yi^{1,2}

- (1. China University of Geosciences (Beijing) School of Land Science and Technology, Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The evolution of natural environment and the change of natural environment caused by human engineering activities have resulted in frequent landslide disasters, which poses a great threat to people's lives and property safety. Therefore, it is undoubtedly of great guiding significance to summarize the development trend and existing problems of landslide simulation research in China and put forward suggestions for its development direction. In this paper, the research hotspots and main progress of landslide simulation in China in recent 30 years are analyzed by the method of combining measurement with content analysis. Three new trends of landslide simulation are proposed, which are the combination of physical simulation and numerical simulation, and the simulation of "new data acquisition, new data analysis and new visualization methods". Based on the current situation that the applicability selection theory of landslide simulation basic model is immature and the spatial prediction method of disasters does not have regional universality, the development direction of disaster spatial prediction for spatial continuous automatic prediction in specific regions based on visualization is proposed.

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-10-31

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(20141107); 北京市教委北京市教育委员会共建项目建设计划: 北京市重点实验室建设项目(2016)

第一作者: 吴赛男(1993-), 女, 河北省邯郸市人, 地质工程专业, 硕士生, 主要研究方向为地质资源与地质工程调查与评价。E-mail: 382034474@qq.com

通讯作者: 田毅(1974-), 男, 博士, 土地资源管理专业, 副教授, 主要从事城市地下空间资源定量评价、土地综合整治规划与设计的教学与科研工作。E-mail: tianyi@cugb.edu.cn

Keywords: landslide; simulation research; progress; suggestions for development

0 引言

滑坡是指斜坡上的岩、土体由于受多种因素(地震、降水入渗及水流冲刷、人工挖破等)的影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面(带)整体或分散顺坡向下滑动的自然现象及其形成的地貌形态,俗称“走山”、“垮山”、“地滑”、“土溜”、“山剥皮”等。随着近年来自然环境演化和人类工程活动对自然环境的改变,作为主要地质灾害之一的滑坡灾害频发,给人民的财产和生命安全造成极大的威胁。据国家测绘地理信息局统计,2008年1月至2017年3月全国共发生山体滑坡486次,开展滑坡模拟已成为减灾防灾的重要内容。研究滑坡灾害形成机理、开展滑坡启动预警,既是保护人民财产和生命安全的需要,更是减灾防灾与自然资源管理决策的需要。因此,分析滑坡灾害研究内容、研究方法、研究模型的发展变化及其各自的优缺点,总结滑坡地质灾害研究的发展趋势,无疑对今后的滑坡稳定性评估、成灾预警及灾害治理具有重要的指导作用。

1 数据来源及研究思路

本文以万方数据库为文献检索平台,以“滑坡”“模拟”作为检索项进行篇名或关键词检索,检索时段为1988年至今。对初步筛选得到的文献,利用NoteExpress软件,开展作者、年份和关键词等信息的提取和归纳,分析滑坡模拟研究变化趋势,总结研究现状与不足,进而提出滑坡模拟未来发展建议。

本研究采用文献计量法与内容分析法相结合的研究方法,分析我国滑坡模拟进展,为地质综合减灾防灾与自然资源统一管理提供决策参考。

2 滑坡模拟研究发展与研究领域拓展

2.1 研究趋势

1988年后随着计算机的发展,我国的滑坡模拟研究开始起步。2000年后,随着现代信息技术、测绘技术和虚拟现实技术的发展,相关研究进入快速增长期。2007年前后,由于我国地震诱发的次生灾害频发,滑坡模拟研究出现第一个研究高峰期。2010年后,伴随着我国城镇化快速推进,中西部基础设施建设的加快,滑坡灾害多发,相关研究进入快速发展期(图1)。

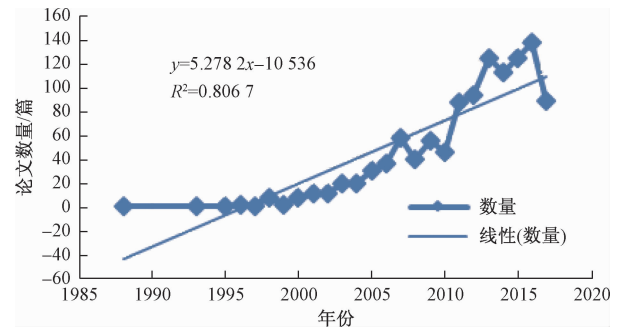


图1 滑坡模拟相关研究论文数量的年度变化趋势
(1988 ~ 2018)

Fig.1 Annual trend of research papers on landslide simulation (1988 ~ 2018)

2.2 主要内容

对关键词进行统计可获得滑坡模拟研究的热点。经对1988年至今的1121篇文献利用NoteExpress软件统计发现,共涉及2743个关键词、累计出现6522次。其中,关键词出现频次小于30的有2726个。为此,本文将30频次作为标准线区分高、低频关键词(表1),进而从关键词的特性进一步分析主要的研究内容。

表1 滑坡重点热点高频关键词统计

Table 1 Statistics on high frequency key words of key hotspots of landslide

主要内容	研究重点		小计
	内容	频次	
滑坡机理研究	形成机制	30	345
	稳定性评价	34	
	边坡稳定性	41	
	滑坡稳定性	43	
	稳定性分析	91	
滑坡模拟方法	稳定性	106	841
	数值模拟	706	
	numerical Simulation	135	
滑坡应用治理	滑坡治理	50	101
	抗滑桩	51	
滑坡研究区域	三峡库区	36	85
	黄土滑坡	49	
总计		1 372	1 372

从表1可知,我国滑坡模拟研究领域主要集中在滑坡机理研究、滑坡模拟方法、滑坡治理研究以及重点区域研究。其中,涉及研究机理的关键词频次为345,尤其是滑坡稳定性分析;涉及技术方法的关键词频次为841,尤其是为滑坡数值模拟;涉及滑坡应用治理关

关键词频次为 101,尤其是抗滑桩研究与应用;涉及研究区域的关键词出现频次达 85,主要集中在三峡库区和黄土高原。

2.3 作者分析

统计显示,滑坡模拟研究涉及作者 2 088 人次,篇均合作度为 1.84。从作者合作性情况看,合作性研究 609 篇,占比 53.66%,说明合作性研究是该类研究的主要形式(表 2)。同时,以个人独立研究也有一定占比。

表 2 论文作者合作情况
Table 2 Co-operation of paper authors

合作人数	人数	所占比例/%
1	526	46.34
2	123	10.84
3	204	17.97
4	151	13.30
5	82	7.22
≥6	49	4.32

通常,统计研究群体的分布特征可以客观地体现该领域研究领导核心群,从而进一步把握研究重难点。根据普赖斯理论^[1],核心作者中发文量最多的作者所发论文($N_{\max}$)与发文量最少作者所发论文量($N_{\min}$)关系密切公式(1)。

$$N_{\min} = 0.749 \times (N_{\max})^{1/2} \quad (1)$$

根据公式 1 计算可知,本领域核心作者最少发文量 $N_{\min} = 2.90$ 篇(在此本文取整为 3 篇),发文量大于 3 篇可列入核心作者,人数为 119 人,是滑坡模拟研究领域的核心作者或核心作者群。其中,来自成都理工大学的许强教授的发文量最多,达 15 篇。另外,分析发文量前五的作者,分别来自成都理工大学、生态环境

部、上海交通大学、自然资源部地质灾害技术指导中心、浙江大学等科研院所与大学,研究重点涉及地质灾害评价、监测预警方法研究、边坡稳定性分析等方面,说明滑坡模拟研究在我国已呈现多部门、多领域、多学科共进的特点(表 3)。

2.4 期刊统计分析

按期刊载文数量递减顺序进行统计排列,根据布拉德福定律,在各个分区文章数量大约相等的情况下,可将文献综述研究的期刊分为核心区、相关区、非相关区三个区,其期刊数量成 $1:n:n^2$ (n 为常数)的关系^[2]。基于该定律,本文计算得到滑坡模拟研究的期刊数量比中核心区、相关区、非相关区依次约为 1:5:18,即 n 值为 5。按照布拉德福定律,发文量在前 25 名的期刊为本领域研究的核心区期刊(表 4),这些期

表 3 核心作者及其研究情况
Table 3 Core authors and their research situation

作者	发文量/篇	主要研究领域	所在机构
许强	15	滑坡灾害的评价、预测及防治处理研究	成都理工大学
黄润秋	14	专长大型工程岩石高边坡稳定性评价及崩滑地质灾害的预测与防治	生态环境部
邢爱国	12	地质灾害与工程安全评估;公路高边坡稳定性评价及加固技术;环境岩土工程;土石混填路基压实控制技术研究	上海交通大学
殷跃平	11	地质灾害早期识别理论、高速远程滑动成灾模式、监测预警方法、防治工程、应急处置方法技术等方面取得了系统创新性成果	自然资源部地质灾害技术指导中心
孙红月	10	主要从事岩土工程、地质工程方面的教学与科研工作	浙江大学

表 4 核心期刊及发文量
Table 4 Core author and number of papers

期刊	发文量/篇	总研究中占比/%	期刊	发文量/篇	总研究中占比/%
工程地质学报	31	5.06	城市建设理论研究(电子版)	7	1.14
岩土力学	27	4.40	建筑工程技术与设计	7	1.14
岩石力学与工程学报	26	4.24	煤矿安全	7	1.14
水文地质工程地质	24	3.92	西部探矿工程	6	0.98
山西建筑	22	3.59	金属矿山	6	0.98
中国地质灾害与防治学报	16	2.61	中国水运(下半月)	5	0.82
路基工程	14	2.28	人民黄河	5	0.82
地质灾害与环境保护	13	2.12	安全与环境工程	5	0.82
科学技术与工程	12	1.96	水土保持通报	5	0.82
长江科学院院报	12	1.96	煤田地质与勘探	5	0.82
人民长江	10	1.63	长春工程学院学报(自然科学版)	5	0.82
露天采矿技术	9	1.47	合计	286	46.66
地下空间与工程学报	7	1.14			

刊载文量占整个研究领域的 46.66%。其中,排名前三的依次为《工程地质学报》(总研究占比 5.06%)、《岩土力学》(总研究占比 4.40%)、《岩石力学与工程学报》(总研究占比 4.24%)。

3 物理模拟与数值模拟相结合与滑坡模拟三新趋势

3.1 研究方法

目前,我国滑坡模拟方法研究主要是开展滑坡运动过程分析,涉及方法包括经验统计法、力学模型计算法、物理模型试验法以及数值模拟法等方面^[3]。其中滑坡模拟方法以滑坡运动过程分析为主、滑坡模拟以物理模拟与数值模拟相结合为主(图 2)。

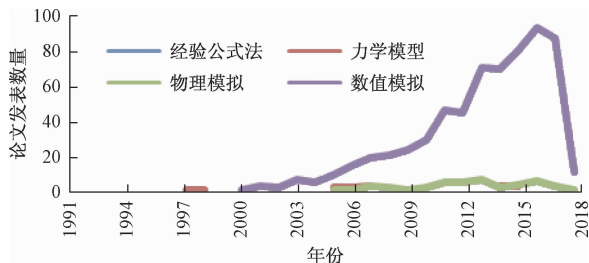


图 2 滑坡动态模拟方法年度变化

Fig.2 Annual change of dynamic simulation method of landslide

其中,经验统计法研究方面,从 2007 出现,逐步增多。例如,王思敬教授、王效宁博士在对我国数个大型滑坡运动机理研究基础上,通过滑坡全过程能量分析,提出了最大滑速及滑距计算公式。甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所结合多个典型黄土滑坡灾害实例的研究反演,提出了考虑滑出条件的黄土滑坡空间预报理论模型。

力学计算模型法中,应用最为广泛是滑坡块体模型法,包括单一质点块体模型、独立单元模型以及可变块体运动二维模型等^[4]。例如,刘忠玉等^[5]建立了预测高速滑坡远程的块体运动模型。

物理模拟法主要包括室内实验室模拟和现场模拟。例如,任光明等^[6]利用物理模拟再现顺层坡滑坡

的形成机制;范宣梅等^[7]以四川省宣汉县天台乡滑坡为地质原型,通过物理模拟再现滑坡的变形破坏过程;张健等^[8]结合野外现场调查,利用三维振动台物理模拟试验,研究了大光包滑坡在地震作用下的启动机制与破坏过程,探讨了滑坡发生与坡体结构的密切关系;曹从伍等^[9]基于物理模拟实验对黑方台黄土滑坡破坏机理进行研究;易志坚等^[10]采用物理模拟中的底摩擦试验方法和离散元数值计算对唐古栋滑坡的成因机制进行分析;张灵熹等^[11]基于工程地质勘察,建立边坡地质模型,结合底摩擦试验、二维离散元和有限元模拟等方法,探讨云盘头滑坡的变形破坏机制。

从 2007 年起,数值模拟法逐步成为主要研究方法,包括连续介质模型和非连续介质模型 2 类。其中, DAN-W 和 DAN-3D 是连续介质模型的典型代表,非连续介质模型多采用离散单元法^[3];齐超等^[12]通过滑坡动力分析软件 DAN-W 分别建立了摩擦模型、Voellmy 模型和 F—V 等 3 种不同的滑坡数值模型,对东河口滑坡一碎屑流进行了模拟;高杨等^[13]通过二维 DAN-W 模拟,选取 Frictional、Voellmy 等流变模型,模拟了滑坡运动的整个过程。柴贺军等^[14]运用有限单元法模拟藏渡密县易贡多发生大型山体崩滑体破坏、运动全过程。

3.2 研究模型

根据模型是否考虑滑坡内在的物理力学机制可以分为确定性模型和非确定性模型方法,非确定性模型通常包括统计模型、模式识别模型、模糊数学模型以及一些复合模型^[15]。

确定性模型是在滑坡失稳的物理过程和力学机制基础上,以稳定性状态为评价指标,结合基础区域空间数据对区域滑坡发生的危险性进行评价预测^[15]。例如,陈悦丽等^[16]应用 SHALSTAB 模型计算安全系数;武利^[17]以陕西省略阳县为试验区构建了分布式斜坡稳定性定量评估模型 SINMAP;夏蒙等^[18]以山西兴县某典型黄土斜坡为例,结合 TRIGRS 模型与 Rosenblueth 点估法,研究了降雨对浅层黄土滑坡的影响(表 5)。

表 5 滑坡确定性模型对比分析表

Table 5 Comparison and analysis table of the deterministic model of landslide

模型	适用性	优点	缺点
SHALSTAB 模型	适用于受季节性降雨影响较大、浅层滑坡较发育的地区。	物理力学意义明确,对区域滑坡危险性可定量分析	假设条件、参数类型较多,适合小范围岩土性状、水文地质特征类似区域。
SINMAP 模型	对受浅层地下水流动控制的浅层平移式滑坡具有一定的通用性。		
TRIGRS 模型	适用于饱和土、非饱和土体,是一种水文动力学模型		

非确定性模型通常包括统计模型,模式识别模型,模糊数学模型以及一些复合模型,各种方法还在不断发展完善中^[15](表 6)。例如,王志旺等^[19]采用证据权法对长江三峡库区秭归——巴东段进行了滑坡危险度区划研究。安凯强等^[20]运用信息量支持下的 SVM

模型对三峡库区滑坡灾害易发性进行评价,并以模型决策值的零点和突变点确定易发性等级划分标准。刘玉洲等^[21]采用二级模糊综合评判的方法对三峡库区的实际滑坡进行了稳定性的计算。

表 6 滑坡非确定性模型对比分析表

Table 6 Comparison and analysis of the non-deterministic model of landslide

	模型	优点	缺点
	确定性系数法	数据处理和评价流程简单,评价因子敏感性强	完全依赖于过去滑坡发生的情况,对突发条件考虑少
统计模型	证据权法	一定程度上可避免评价因子选择和权重赋值的主观性	权值过分依赖于栅格数量,独立性检验繁琐耗时
	层次分析法	相对简单,便于操作,一致性检验可做出最优选择	评价因子判别具有主观性,同一评价因子使用单一权重,似乎难以反映因子内部不同等级对滑坡危险性的不同贡献大小
	二分类 Logistic 回归模型	自变量可是连续型、离散型、组合型,变量不一定需要服从正态分布	当滑坡样本数量过少时,估计方程会变得不稳定,从而使方程无法解释
	信息量模型	客观性更高,多元异质数据融合较好	单因素叠加,未体现各个因素不同的权重
模式识别模型	人工神经网络模型(ANN 模型)	非线性优势,兼容连续型、类连续型和分类数据等优势	初始权重随机化,计算过程收敛慢,最佳学习参数难以确定
	支持向量机模型(SVM 模型)	输入参数调整较小,易于使用,数学理论基础坚实,预测能力强	在大型数据上的训练较费时
	决策树模型	数据处理尺度、类型丰富,容易构建,结果易于理解,滑坡评价因子敏感性感应强	对噪声数据较敏感
	模糊综合评判	相对更适合单体滑坡的评价	评价结果具有主观性,评价结果不够细致

3.3 发展趋势

近年来,随着三维建模理论和方法在地质体和地形领域广泛应用,基于“3S”技术、三维动态建模和虚拟现实技术,滑坡模拟出现了“数据采集新、数据分析新、可视化方式新”的“三新”趋势,滑坡模拟研究进入新领域。例如,申杰等^[22]开展了免标定扩充现实技术在滑坡可视化中的应用;王旭春等^[23]探讨了 GIS 可视化技术在滑坡主滑动方向确定、建筑物适宜程度综合解析方面的应用;乔建平^[24]将 GIS 与人工智能结合实现三维可视化滑坡危险度评价。祝文化等^[25]利用可视化软件 IDL,建立了基于 Delaunay 三角网的滑坡体规则格网地面模型和滑动面三维可视化模型;张昆等^[26]基于 3D GIS 技术,结合具体的滑坡变形监测工程实例,采用不规则三角网和等高线构建了滑坡体三维模型;肖盛燮等^[27]基于 VC 和 OpenGL 的三维滑坡可视化演绎系统采用跟踪球算法完成了灵活的人机交互功能;李明超等^[28]开展了面向滑坡地质体三维建模的 NURBS-BRep 混合数据结构和地质结构单元实体构造技术;刘釜保^[29]基于 3DSMax 与 OpenGL 相结合对复杂物体建模对水库库岸滑坡进行可视化研究;李建辉等^[30]阐述了滑坡点云数据采集、数据处理、三维

模型可视化的基本方法,实现了滑坡体地形精细三维模型制作;谭冬生等^[31]通过应用 Open GL 软件成功开发出滑坡三维可视化软件。

4 结束语

综合而言,滑坡模拟研究由起步进入快速发展阶段,重点热点主要涉及滑坡机理、滑坡模拟、滑坡治理以及重点区域,滑坡灾害空间预测方法地区性差异研究是其研究难点,呈现多部门、多领域、多学科共进状态。与此同时,滑坡模拟方法以滑坡运动过程分析为主、滑坡模拟物理模拟与数值模拟相结合,呈现“数据采集新、数据分析新、可视化方式新”的三新趋势。考虑到滑坡灾害空间预测方法区域性研究理论相对不成熟,因此在可视化基础上开展特定区域空间连续自动预测是该领域发展方向。

参考文献:

[1] 刘则渊,陈悦,朱晓宇.普赖斯对科学学理论的贡献——纪念科学计量学之父普赖斯逝世 30 周年[J].科学学研究,2013(12):1761-1772.
LIU Zeyuan, CHEN Yue, ZHU Xiaoyu. D J Price's contribution to theory of the science of science;

- commemorating father of scientometrics D J Price's 30th anniversary of his death[J]. *Studies in Science of Science*, 2013(12):1761-1772.
- [2] 李江,伍军红,孙秀坤. 中国科技期刊的“核心区”研究—基于布拉德福定律与二八法则的统计分析[J]. *中国科技期刊研究*, 2013(6):869-873.
- LI Jiang, WU Junhong, SUN Xiukun. Research on the core area of Chinese scitech periodicals based on the statistical analysis of Brad Ford's law and the 28 law[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2013(6):869-873.
- [3] 邓建丽. 基于 FVM 的滑坡运动三维动态仿真及应用[D]. 兰州:兰州大学, 2008.
- DENG Jianli. 3D dynamic simulation of landslide movement based on FVM and its application[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [4] 杜娟,殷坤龙,王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3):480-488.
- DU Juan, YIN Kunlong, WANG Jiajia. Simulation of Three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3):480-488.
- [5] 刘忠玉,马崇武,苗天德,等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000(6):742-746.
- LIU Zhongyu, MA Chongwu, MIAO Tiande, et al. Kinematic block model of long run-out prediction for High-speed landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000(6):742-746.
- [6] 任光明,李树森,聂德新,等. 顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析[J]. *山地研究*, 1998(3):182-187.
- REN Guangming, LI Shusen, NIE Dexin, et al. The physical simulation and mechanical analysis on landslide's formation mechanism on consequent slope[J]. *Journal of Mountain Research*, 1998(3):182-187.
- [7] 范宣梅,许强,张倬元,等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. *岩石力学与工程报*, 2008, (增刊2):3753-3759.
- FAN Xuanmei, XU Qiang, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, (S2):3753-3759.
- [8] 张健,王小群,王兰生,等. 大光包滑坡启动机制的物理模拟试验[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(3):58-62.
- ZHANG Jian, WANG Xiaoqun, WANG Lansheng, et al. Physical simulation on the formation mechanism of the Daguangbao landslide[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2013, 40(3):58-62.
- [9] 曹从伍,许强,彭大雷,等. 基于物理模拟实验的黑方台黄土滑坡破坏机理研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4):72-77.
- CAO Congwu, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Research on the failure mechanism of the Heifangtai loess landslides based on the physical simulation experiments[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2016, 43(4):72-77.
- [10] 易志坚,黄润秋,吴海燕,等. 唐古栋滑坡成因机制研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(6):1072-1079.
- YI Zhijian, HUANG Runqiu, WU Haiyan, et al. Research on formation mechanism of Tanggudong landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(6):1072-1079.
- [11] 张灵熹,陈筠,刘恋嘉,等. 云盘头滑坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. *长江科学院院报*, 2018.
- ZHANG Lingxi, CHEN Jun, LIU Lianjia, et al. Physical simulation study on deformation damage mechanism of Yun pan landslide[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018.
- [12] 齐超,邢爱国,殷跃平,等. 东河口高速远程滑坡—碎屑流全程动力特性模拟[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(3):334-339.
- QI Chao, XING Aiguo, YIN Yueping, et al. Dynamic characteristics simulation of rapid and long run-out landslide-debris flow in East Hekou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(3):334-339.
- [13] 高杨,殷跃平,邢爱国,等. 鸡尾山高速远程滑坡—碎屑流动力学特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(4):46-51.
- GAO Yang, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4):46-51.
- [14] 柴贺军,王士天,许强,等. 西藏易贡滑坡物质运动全过程数值模拟研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2001(2):1-3, 82.
- CHAI Hejun, WANG Shitian, XU Qiang, et al. Numerical simulation on overall process of Yigong study at Bomi, Tibet[J]. *Journal of Geological*

- Hazards and Environment Preservation, 2001(2):1-3,82.
- [15] 蒋树,王义锋,刘科,等. 滑坡灾害空间预测方法研究综述[J]. 人民长江,2017,48(27):67-73.
JIANG Shu, WANG Yifeng, LIU Ke, et al. Review on landslide hazard spatial prediction methods [J]. Yangtze River, 2017,48(27):67-73.
- [16] 陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等. 基于 Monte Carlo-SHALSTAB 模型的滑坡危险性评价——以福建省德化县为例[J]. 灾害学,2015(4):101-106.
CHEN Yueli, CHEN Dehui, LI Zechun, et al. Assessment of landslide hazard based on Monte Carlo-SHALSTAB Model [J]. Journal of Catastrophology, 2015(4):101-106.
- [17] 武利. 基于 SINMAP 模型的区域滑坡危险性定量评估及模型验证[J]. 地理与地理信息科学,2012(2):35-39.
WU Li. A SINMAP-based quantitative assessment and model verification of regional landslide hazard [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012(2):35-39.
- [18] 夏蒙,王家鼎,谷天峰,等. 基于 TRIGRS 模型的浅层黄土滑坡破坏概率评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2013(4):453-458.
XIA Meng, WANG Jiading, GU Tianfeng, et al. Evaluation of shallow loess landslide destruction probability based on TRIGRS model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013(4):453-458.
- [19] 王志旺,李端有,王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报,2007(8):1268-1273.
WANG Zhiwang, LI Duanyou, WANG Xianggui. Zonation of landslide hazards based on weights of evidence model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(8):1268-1273.
- [20] 安凯强,牛瑞卿. 信息量支持下 SVM 模型滑坡灾害易发性评价[J]. 长江科学院院报,2016(8):47-51+58.
AN Kaiqiang, NIU Ruiqing. Landslide susceptibility assessment using support vector machine based on weighted-information model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016(8):47-51+58.
- [21] 刘玉洲,肖盛燮,王子健,等. 滑坡稳定性的模糊综合评判[J]. 四川建筑,2010(1):89-91.
LIU Yuzhou, XIAO Shengyan, WANG Zijian, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of landslide stability [J]. Sichuan Architecture, 2010(1):89-91.
- [22] 申杰,刘浩吾,郑小玉. 一种新的滑坡可视化方法[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1364-1367.
SHEN Jie, LIU Haowu, ZHENG Xiaoyu. New method for landslide visualization [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9):1364-1367.
- [23] 王旭春,蒋宇静,赵月,等. 滑坡 GIS 可视化研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2):2511-2514.
WANG Xuchun, JIANG Yujing, ZHAO Yue, et al. Study and application on the visualization of geological information system in landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2):2511-2514.
- [24] 乔建平,朱阿兴,陈永波,等. GIS 与人工智能结合下的三维可视化滑坡危险度评价[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2003,33(1):79-84.
QIAO Jianping, ZHU A'xing, CHEN Yongbo, et al. 3D visualization landslide risk assessment based on GIS and artificial intelligence [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2003,33(1):79-84.
- [25] 祝文化,田金华,池秀文,等. IDL 支持下的滑坡可视化方法研究[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(8):55-56.
ZHU Wenhua, TIAN Jinhua, CHI Xiuwen, et al. Three-dimensional visualization study of landslide under IDL support [J]. Journal of WuHan University of Technology, 2004, 26(8):55-56.
- [26] 张昆,张松林,刘祖强,等. 滑坡变形的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(9):795-798.
ZHANG Kun, ZHANG Songlin, LIU Zuqiang, et al. On 3D visualization of landslide's deforming [J]. Geomatics and Information Science of WuHan University, 2006,31(9):795-798.
- [27] 肖盛燮,钟佑明,郑义,等. 三维滑坡可视化演绎系统及破坏演变规律跟踪[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):2618-2628.
XIAO Shengxie, ZHONG Youming, ZHENG Yi, et al. Visual deductive system of 3D landslide and damage evolution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1):2618-2628.