

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202005024

## 基于突发地质灾害应急防治的边(滑)坡分类方法\*

刘红岩<sup>1,2</sup>, 张小趁<sup>3</sup>, 李俊峰<sup>4</sup>, 祁小博<sup>4</sup>, 陈红旗<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083;  
3. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601; 4. 自然资源部地质灾害技术指导中心, 北京 100081)

**摘要:** 边(滑)坡分类是进行突发地质灾害应急防治研究的重要手段之一,也是采用工程类比法进行边(滑)坡灾害防治的基础。为此,首先对国内外边(滑)坡分类方法研究现状进行了回顾,并按照分类方法及分类目的,把现有的边(滑)坡分类方法分为了4类:基于单因素及多因素的滑坡分类方法、基于破坏模式与治理措施的滑坡分类方法、基于监测预警的滑坡分类方法和基于稳定性评价的滑坡分类方法,而后对上述分类方法的优缺点进行了评述。最后,基于突发地质灾害应急防治的迫切需求和分类目的,在前人研究的基础上分别建立了基于监测预警和失稳后运动距离预测的突发滑坡应急防治分类方法,该分类方法基于应急防治的特殊要求,在前者加入了临灾征兆的分类指标,这将对突发滑坡灾害应急防治提供更有针对性的指导。

**关键词:** 边(滑)坡; 分类方法; 研究现状回顾; 应急防治; 突发地质灾害

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0193-10

### Slope (Landslide) Classification Method based on Emergency Prevention of Sudden Geological Disaster

LIU Hongyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaochen<sup>3</sup>, LI Junfeng<sup>4</sup>, QI Xiaobo<sup>4</sup>, CHEN Hongqi<sup>4</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology of Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;  
3. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;  
4. Geological Disaster Technical Guidance Center of MNR, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Slope (landslide) classification is one of the key ways to study the emergency prevention of sudden geological disaster, and is also the basis for adopting the engineering analogy method in preventing the slope (landslide) disaster. So, the existing researches on the slope (landslide) classification method at home and abroad were firstly reviewed, and then the existing slope (landslide) classification methods were divided into four groups according to the classification method and classification purpose. They are the method based on single or multiple factor, the method based on failure mode and countermeasures, the method based on monitoring and early warning, and the method based on stability appraisal. Next, their advantages and disadvantages were reviewed respectively. Finally, according to the urgent demand and classification purpose of the sudden geological disaster, the emergency prevention classification methods for slope (landslide) based on monitoring and early warning

\* 收稿日期:2020-05-12;修回日期:2020-07-30

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1509701)、国家级地质灾害应急防治项目(2020)资助

作者简介:刘红岩(1975—),男,教授,博导,博士。主要从事地质灾害方面的研究。E-mail:lhyan1204@126.com

and movement distance of the landslide after failure were established respectively on the basis of the previous researches. Based on the special requirement of the sudden geological disaster emergency prevention, the classification index representing the signs before the disaster was included, which will provide more targeted guidance for emergency prevention of the sudden geological disaster.

**Keywords:** slope (landslide); classification method; review of the existing researches; emergency prevention; the sudden geological disaster

## 引言

滑坡已成为世界范围内仅次于地震的第二大地质灾害,且其危害的广度和强度也呈逐年增长的趋势。2020年1月由应急管理部公布的2019年我国十大自然灾害中就有2项为滑坡,即贵州水城7.23特大山体滑坡和山西乡宁3.15滑坡;还有1项与滑坡有关,即四川8.20强降雨特大山洪泥石流。自20世纪初中期以来,随着世界人口的不断增长及全球气候变化,人类赖以生存的地质环境与生态环境日益恶化,滑坡发生的规模越来越大、频率也越来越高,因而造成的经济损失也愈发难以估量<sup>[1]</sup>。

为更好地进行防灾减灾,目前已有许多学者采用不同方法从不同角度对滑坡的发生机制进行了深入研究。由于岩土体独有的天然地质属性,导致目前的滑坡理论模型预测结果与实际都存在一定差距,个别情况下差距还较大,因此工程类比法仍是滑坡防治工程中最为常用和有效的分析方法之一,而边(滑)坡分类则是工程类比法使用的前提和基础。边(滑)坡分类的目的在于对边(滑)坡的各种表观特征以及诱发其失稳的各种内、外因素进行分析概括,以便扼要地反映同类滑坡失稳的内在规律。科学合理的边(滑)坡分类不仅能深化对边(滑)坡的认识,而且可以依据分类特征对滑坡的属性予以快速辨识,从而达到应急防治的目的。因此,滑坡分类研究是一项具有重要意义的基础性工作。J. D. Dana<sup>[2]</sup>最早开始滑坡分类研究,他将滑坡分为碎屑流、土体扩散和岩石滑坡,这为之后的滑坡分类研究奠定了基础<sup>[3-4]</sup>。C. F. S. Sharpe<sup>[3]</sup>根据物质运动形式将滑坡分为:流动、滑动和沉陷;而根据岩土体类型则将滑坡分为4类:土壤、土、碎屑和岩石。目前国外最著名的2个分类方法是Varnes方法<sup>[5-6]</sup>和Hutchinson方法<sup>[7]</sup>,二者的主要区别在于前者强调运动形式,而后者强调运动结果。目前前者已得到普遍认可,它将斜坡移动类型分为6类:崩

塌、倾倒、滑动、侧向扩展、流动和复合移动。卢鑫樾<sup>[8]</sup>、傅传元<sup>[9]</sup>首先开展了这方面的研究工作,之后又有不少学者提出了多种基于不同目的的滑坡分类方法<sup>[10-11]</sup>。

在此有两点需要说明:(1)边坡一般是指未发生明显失稳破坏的斜坡,而滑坡是已经发生变形或失稳的斜坡,此时二者含义是不同的;但在没有严格区分是否已经发生滑动时,这里认为二者含义相同。(2)关于滑坡的概念,长期以来国内外有2种界定:一种是广义的,即把斜坡岩土体顺坡向下运动的所有现象统称为滑坡,包括滑坡、崩塌、泥石流等;另一种是狭义的,即仅把斜坡岩土体沿一定的面(带)整体向下滑动的称为滑坡。近年来,世界各国已基本趋于采用后者,本文亦然。

下面首先对目前国内外滑坡分类研究现状进行回顾和总结,而后基于突发地质灾害应急防治的特殊需求,初步提出了其相应的滑坡分类方法。

## 1 边(滑)坡分类方法研究现状回顾与评述

为进行滑坡分类,首先要建立相应的分类指标体系,其选择受滑坡分类目的的影响,且不同的分类指标体系也将导致不同的分类结果。为此,下面基于不同的分类指标体系和分类目的对目前的滑坡分类方法进行回顾分析。

### 1.1 基于单因素及多因素指标的滑坡分类方法

早期通常根据滑坡的物质组成、高度、体积等简单指标对滑坡进行分类,根据所采用的指标个数,可分为单因素指标和多因素指标两类。

#### (1) 滑坡的单因素指标分类方法

它是指以滑坡某一方面的特性为指标进行分类,如姜德义等<sup>[12]</sup>在总结高速公路工程边坡勘察成果的基础上,提出了适合于高速公路工程的边坡工程地质分类方法,并将未变形边坡分为岩质边坡、

土质边坡和土石边坡。主要代表性分类方法见表1。该分类方法仅采用单一因素指标,因此比较简单,该方法在一定程度上对滑坡的勘察及治理设计等起到了很好的指导作用,但因为控制指标太少导致滑坡的某些关键特征难以被反映出来,因此其实际应用也受到一定的限制。

### (2) 滑坡的多因素指标分类方法

以单一特征进行分类,往往不能对滑坡进行全面描述,而采取多因素指标分类方法则能更全面地反映滑坡的性质和特征。这种分类方法通常是把单因素分类方法综合起来,每次采用两个及两个以上的分类指标,如浅层岩质高边坡等。

## 1.2 基于破坏模式与治理措施的滑坡分类方法

滑坡破坏模式是破坏机理的外在表现形式,而破坏模式又是工程治理设计的基础。为此不少学者根据破坏模式的不同对滑坡进行了分类。根据分类指标个数的不同,分为单因素指标和多因素指标。

首先是基于单因素指标的分类方法,如E. Hoek等<sup>[13]</sup>根据滑面形状,把斜坡破坏分为4类:平面破坏、楔形破坏、弧形破坏和倾倒破坏(弯曲倾倒破坏、块状倾倒破坏和块状弯曲倾倒破坏)。李安洪等<sup>[14]</sup>根据顺层路堑边坡破坏模式不同将其分为8类:顺层滑移破坏、顺层滑移-拉裂破坏、楔形体滑移

失稳破坏、滑移-弯曲破坏、滑移-压致拉裂破坏、滑劈破坏、陡倾岩层的弯曲-拉裂倾倒破坏、沿底部软岩塑流-拉裂破坏。黄润秋<sup>[15]</sup>基于对汶川8.0级地震后的滑坡调查结果,根据滑坡成因机制的不同将其分为5大类、14小类,其中5大类分别为:溃滑型、溃崩型、抛射型、剥皮型和震裂型。成永刚<sup>[16]</sup>对山西省已建8条高速公路的75处滑坡进行分析,根据物质组成将其分为岩质与土质滑坡两大类,进而又细分为切层、顺层、破碎岩石滑坡及黄土、黏土、堆积土滑坡6个小类。张倬元等<sup>[17]</sup>按照变形破坏模式将边坡分为4类:均质或似均质斜坡、层状体斜坡、块状体斜坡和软弱基座体斜坡。徐峻岭等<sup>[18]</sup>按照滑坡变形的力学机制把坡体分为6类:类均质土结构、近水平层状结构、顺倾层状结构、反倾层状结构、碎裂状结构、块状结构,并分析了其破坏模式。陈关平等<sup>[19]</sup>按照局部破坏形态的不同将露天矿边坡分为4类:下滑式、张拉式、侵蚀式和复合式,并提出了相应的工程治理措施。肖诗荣等<sup>[20]</sup>基于滑坡复活机理的不同将三峡库区水库复活型滑坡分为3类:库水浮托型滑坡、动水压力型滑坡和库水浸泡软化型滑坡。戴敬儒等<sup>[21]</sup>按滑坡成因将山丘区工程滑坡分为5类:场地选址不当、切脚开挖且放坡过陡、斜坡加载填土不当和环山渠渗漏降低土体抗滑力。以某水电边坡为研究对象,陈红旗等<sup>[22]</sup>提出了以控制性结构面组合特征为首要分类要素的分类方法,

表1 滑坡单因素分类方法

Table 1 Single factor classification method for landslide

分类依据	分类结果
物质组成	岩质滑坡(岩石滑坡、破碎岩石滑坡)、土质滑坡(黏质土滑坡、黄土滑坡、堆积土滑坡、堆填土滑坡)
结构	同类土滑坡、顺层滑坡、切层滑坡
高度	超高边坡、高边坡、中高边坡、低边坡
滑动面深度	浅层滑坡(<6 m)、中层滑坡(6~20 m)、厚层滑坡(20~50 m)、巨厚层滑坡(>50 m)
滑动面形态	平面滑坡、楔形滑坡、圆弧形滑坡、折线形滑坡
滑坡体积	小型滑坡(<10万 m <sup>3</sup> )、中型滑坡(10~100万 m <sup>3</sup> )、大型滑坡(100~1 000万 m <sup>3</sup> )、巨型滑坡(>1 000万 m <sup>3</sup> )
边坡坡度	缓坡(<10°)、斜坡(10°~30°)、陡坡(30°~45°)、峻坡(45°~60°)、悬崖(65°~90°)、倒坡(>90°)
发生年代	现代滑坡、老滑坡、古滑坡
稳定性	稳定边坡、不稳定边坡、失稳边坡
边坡与岩层走向	顺向边坡、斜切边坡、切向边坡、逆向边坡
滑动历史	首次滑坡、再次滑坡
成因	天然动力、人为动力
力学机制	牵引式滑坡、推移式滑坡、平移式滑坡
变形机制	蠕滑-拉裂、弯曲-拉裂、滑移-压致拉裂、塑流-拉裂、弯曲-滑移
变形破坏模式	水平剪切变形、倾倒变形、追踪平推滑移、顺层高速滑动、张拉顺层追踪破坏
滑坡防治方式	工程治理、监测预警、搬迁避让、不处理类滑坡

将枢纽区边坡分为5类:无结构面型、单结构面型、双结构面组合型、多结构面组合型和结构面随机组合型,并探讨其各自可能的失稳模式和工程支护建议。郝立新等<sup>[23]</sup>基于坡体结构类型把西南地区已建与在建的工程边坡划分为6类:滑面控制式、软弱带控制式、软硬交替式、层状、节理控制式和类均质式,并分析了其破坏模式。陈洪凯等<sup>[24]</sup>根据岩体结构面的控制性,将公路高切坡分成3类:土体高切坡、岩体高切坡和岩土复合型高切坡,并在此基础上提出了4种复合破坏模式:楔形体-平面滑动破坏模式、崩塌-滑动破坏模式、滑动-拉裂型破坏模式及滑动-压裂型破坏模式。

其次是基于多因素指标的分类方法,廖小平<sup>[25]</sup>结合福建地区道路边坡工程实际情况,根据物质组成、成因机制和坡体结构特征把该地区的类土质路堑边坡分为4类:残积土边坡、风化土边坡、崩滑流堆积物边坡和复杂结构边坡,并分析了其相应的变形破坏机制。陈祖煜<sup>[26]</sup>针对我国水电建设中的高边坡问题,依据边坡类型、地质结构、破坏类型及尺度等对其进行了分类,并开发了相应的数据库。易巍<sup>[27]</sup>按滑体组成物质及滑面形态将公路顺层边坡分为2大类9小类:岩质滑坡(完全平面式顺层破坏模式、前缘剪出式顺层破坏模式、溃屈式顺层破坏模式、阶梯式顺层破坏模式、楔形顺层破坏模式、缓倾平推式顺层破坏模式)、土质滑坡(沿不同堆积面破坏模式、堆积土层沿基岩顶面破坏模式、沿老滑动面破坏模式)。章征宇<sup>[28]</sup>考虑岩层倾角、边坡坡角以及岩层走向与边坡走向(即边坡的开挖方向)之间的相对关系,将层状岩质边坡划分为7种类型:水平层状岩质边坡、缓倾层状岩质边坡、中/陡倾层状岩质边坡、切向坡、垂向坡、反倾坡,并分析了相应的破坏模式。孙英勋<sup>[29]</sup>从滑坡治理角度以滑面深度、滑床岩性和滑面倾角三要素将滑坡划分12种类型,并提出了相应的处治模式。宋胜武等<sup>[30]</sup>根据工程重要性、组成物质、坡体结构、坡度、坡高、变形机制、破坏模式、变形范围和危险源等指标对水电工程边坡进行了分类,并指出了其可能的失稳模式。晏同珍等<sup>[11]</sup>根据滑坡发生的初始条件、根本原因及滑动方式,将滑坡分为9种类型:流变倾覆滑坡、应力释放平移滑坡、震动崩落或液化滑坡、潜蚀陷落滑坡、地化悬浮-下陷滑坡、高势能飞越滑坡、孔隙水压浮动滑坡、切蚀-加载滑坡、巨型高速远程滑坡。焦姗等<sup>[31]</sup>根据滑坡地层结构、岩性特征、诱发

机制及运动特征等因素将山西煤矿区滑坡归结为5种类型:顺基岩面推移-滑动型黄土滑坡、蠕滑-挤出型黄土滑坡、水浸溜滑型黄土滑坡、煤层自然倾覆-拉裂滑移型岩质滑坡和受节理控制的蠕滑-张裂型岩质滑坡。金德濂<sup>[32-34]</sup>结合我国水利水电工程边坡特点,基于岩性、岩体结构和边坡变形特征等指标对水力水电工程边坡进行了分类。潘国林等<sup>[35]</sup>按照物质组成、结构特征和成因机制将皖南山区滑坡分为3大类6小类:岩质滑坡(滑移-压致拉裂式顺层岩质滑坡、弯曲-拉裂式反倾岩质滑坡、蠕滑拉裂式碎裂状岩质滑坡、滑移拉裂式块状岩质滑坡)、土质滑坡(蠕滑拉裂式滑坡)和古滑坡(滑移-弯曲式滑坡)。任伟中等<sup>[36]</sup>根据坡体物质组成、结构及变形动力成因等3个最主要特征把鄂西北山区边坡划分为19种类型,并分析了其变形破坏模式和机制。

总之,单因素指标分类方法主要考虑的是滑坡失稳破坏结果即破坏模式或失稳机制等,即仅关注结果而没有关注导致结果产生的原因。而多因素指标分类方法则主要关注的是原因,即导致滑坡产生不同破坏的内外因素如岩体类型、结构特征等(内因)和地震、开挖等(外因)。因此相比之下,多因素指标分类方法更为具体,对实际工程的指导性更强。

### 1.3 基于监测预警的滑坡分类方法

监测预警也是目前滑坡防治的一个重要研究内容和研究目的,即如何对不同类型的边坡实施有针对性的监测预警方案。谢婉丽等<sup>[37]</sup>按照滑体特征、动力成因和滑动特征等对大西安地区的滑坡进行了分类,并建立了具有层次性的滑坡分类体系,为该地区的滑坡监测预报和稳定性分析等奠定了基础。刘广润等<sup>[38]</sup>指出滑坡分类的目的在于对滑坡作用的各种表象特征以及诱发因素进行组合概括,以更好地反映滑坡作用的内外规律。为此,其基于滑体特征、动力成因和活动特征等3类指标提出了相应的综合性滑坡分类体系。杨诗义<sup>[39]</sup>基于滑坡预测预报的目的,采用滑坡岸坡结构、地层岩性特性和变形监测曲线等3类指标对长江沿岸地区的滑坡进行了分类。其不仅考虑了内因对滑坡的影响,而且还同时考虑了滑坡对外因的响应即滑坡变形曲线,因此这种滑坡可以较好地进行滑坡稳定性预警预报。李迪等<sup>[40]</sup>根据岩石边(滑)坡深部变形监测资料,将深部变形曲线分为4类,即稳定型变

形曲线、滑动型变形曲线、坍塌型变形曲线和倾覆型变形曲线,这对岩石边(滑)坡的变形和破坏机理的判识,以及滑坡预警预报等提供了基础。

可以看出,在该分类方法中非常有必要把监测方法及结果作为一个独立的指标引入,这样才能更好地基于监测结果根据工程类比的方法确定相应的滑坡稳定性及其预警等级。

#### 1.4 基于稳定性评价的滑坡分类方法

对于不同的滑坡类型采用何种稳定性评价方法也是关系到滑坡稳定性分析结果是否合理的一个重要方面,因此不少学者也对此展开了研究。宋雪琳等<sup>[41]</sup>在对堆积层滑坡地质特性进行分析的基础上,提出相应的堆积层滑坡分类方法,即首先按成因分为:堆积层滑坡、洪积层滑坡、残积层滑坡、混合成因的堆积层滑坡、冰积层滑坡和人工堆积层滑坡。按滑动面位置分为:沿基岩顶面滑动的及沿不同年代或不同成因类型堆积物的接触面滑动的。按滑坡历史分为:初次滑动和堆积层滑坡复活。按滑体厚度分为:浅层、中层和深层。叶唐进等<sup>[42]</sup>对国道G318藏东段碎屑斜坡进行了野外调查,并结合其成分、颗粒大小、胶结状态、失稳运动方式、对公路的危害程度以及整治的难易程度,将碎屑斜坡细分为3类:溜砂坡、滚石坡以及碎石坡,并研究了其破坏模式和稳定性分析方法。毛雪松等<sup>[43]</sup>按照坡积体的形成方式将坡积体分为崩坡积体、残坡积体和冲坡积体,并分析了其稳定性。宋胜武等<sup>[44]</sup>结合我国近年来水电工程岩质边坡勘测实践,以边坡主控结构面和潜在变形失稳模式为核心,提出了坡体结构类型划分体系,将岩质边坡分为4大类:层状坡体结构、中陡裂控制坡体结构、楔形坡体结构、均质坡体结构,这对复杂岩质边坡稳定性评价及治理方案设计等均具有指导意义。

#### 1.5 研究现状评述

边坡分类仍是目前边坡研究领域的热点和难点课题之一,通过对目前研究成果的归纳总结可知:

(1)从分类指标的个数来看,边坡分类指标由最初的单因素指标逐渐向多因素指标发展,一方面是由于工程实践中接触到的边坡越来越复杂,另一方面是导致边坡发生失稳的因素也日益复杂,仅仅依靠单一指标无法准确刻画边坡的实际特征和失

稳破坏机理,因而基于多因素指标的边坡分类方法将成为今后的发展方向。

(2)从分类目的来看,如前所述边坡分类的一个主要目的是为工程类比法提供基础资料。由于边坡稳定及破坏受多种因素影响如内因和外因等,并且内因与外因之间的相互作用机理也十分复杂,而目前的理论仍无法完全掌握其规律,因此出现了很多理论预测与实际不符的案例。为此,最古老的工程类比法作为一种最简单和直接有效的方法仍在边坡工程乃至整个岩土工程中得到广泛应用。而工程类比法的一个重要前提是必须要有大量的类似工程案例为基础,因此边坡分类就成为了积累大量类似边坡工程案例的一种有效手段。两个边坡之间的相似度越高,其稳定性、力学破坏模式、治理措施等方面的一致性也就越高。因此,根据研究目的的不同,前人分别进行了基于破坏模式与治理措施、监测预警和稳定性评价的滑坡分类方法,以便于对一个新的边坡采用工程类比的方法进行上述分析。同时还可以看出,对于不同的研究目的,在分类过程中采用的分类指标也有所不同。

(3)从分类指标属性的选取来看,由于边坡失稳通常是内、外因素共同作用的结果,因此边坡分类指标的选取必须包含这两类属性,而目前较好的边坡分类方法基本上都包含了这两类属性,如谢婉丽等<sup>[37]</sup>、刘广润等<sup>[38]</sup>提出的边坡分类体系。另外边坡内因对外因的力学响应也是一个重要的指标,也就是说同一类型的边坡在相同外因如地震或降雨的作用下有可能会产生不同的响应,即边坡在具有共性的同时也具有鲜明的个体特征。这就需要第三类指标即边坡的活动特征,而对于边坡活动特征的描述有的是采用对边坡本身活动特征的具体描述,如刘广润等<sup>[38]</sup>采用边坡的变形运动特征及发育时程来描述,而有的则是采用外在监测手段获得的信息来描述,如杨诗义<sup>[39]</sup>采用了滑坡变形监测曲线来描述。总之,为了更好地对边坡进行准确分类,在分类指标的选取上一方面要结合边坡分类的目的,另一方面也要充分考虑影响边坡稳定性的内、外因素及边坡对外因的力学响应,这样才能更准确、客观地描述边坡的力学行为,进而建立更为精确的边坡分类体系。

(4)从边坡分类系统发展来看,边坡分类系统由最初的单因素指标发展到目前的多因素指标;由最早的铁路系统开始逐渐发展到目前的水利水电、

交通、能源、国土等多个行业和部门;由最初的单一分类目的发展到目前的多目的和综合应用;由最早的人工分类方法发展到目前的智能分类系统,等等。因此,随着研究的不断深入,更为智能及合理的边坡分类系统将会逐步出现。

## 2 基于突发地质灾害应急防治的滑坡分类方法

突发地质灾害应急防治是指一旦发生地质灾害或者出现地质灾害临灾险情时,为了避免或最大限度地减轻地质灾害造成的人员伤亡和财产损失,而采取的不同于正常工作程序的紧急防灾和抢险救灾行动。其中对地质灾害发生机理及动态演化过程的认识是地质灾害应急的核心内容<sup>[45]</sup>,即当地质体处于临灾险情时,必须要迅速判断出其是否会最终失稳及失稳规模、直至失稳后可能的影响范围,进而由此制定相应的应急策略。因此,在这种紧急状态下通常没有足够的时间以准确获取地质体的相关信息,进而很难采用详细的理论及数值方法对其稳定性及破坏特征进行研判,此时工程类比方法是最方便、最有效的方法之一。如前所述,滑坡分类的一个重要目的就是为工程类比提供基础资料,因此可以在已有滑坡分类研究成果的基础上,结合滑坡应急特点提出基于突发地质灾害应急防治的滑坡分类方法。由前述可知,当需要进行突发滑坡灾害应急防治时,边坡一般处于临滑状态或刚刚失稳状态,如果是前者,那么首先需要迅速对边坡的失稳破坏模式及失稳后的运动范围作出准确判断,进而采取相应的工程治理措施或避险措施以阻止滑坡发生或减轻滑坡发生后造成的危害,此时就需要对边坡稳定性进行监测预警及灾情预判。而对于后者,则主要是进行救灾工作,此时需要对失稳后的边坡进行稳定性判断,以确定其是否会再次失稳,那么也需要借助滑坡分类系统用工程类比法进行边坡稳定性判断。从而为更好地进行突发地质灾害应急防治,非常有必要建立一套相应的滑坡分类方法,下面就根据突发地质灾害应急防治中涉及到的两类问题分别建立相应的滑坡分类体系。

### 2.1 基于监测预警的突发滑坡应急防治分类方法

如前所述,突发地质灾害应急防治一般包括3方面的内容:发生地质灾害或出现地质灾害临灾险

情是前提条件;避免或最大限度地减轻地质灾害造成的人员伤亡和财产损失是目的;采取的不同于正常程序的紧急防灾和救灾行为是主要工作。当已经发生地质灾害时,主要工作是救灾,而对滑坡本身的关注相对较少,因此这不属于本文的研究内容。所以这里主要考虑当边坡处于临灾险情时,此时对边坡何时发生失稳及失稳模式和规模的快速合理研判则是最重要的工作。由于滑坡的发生是滑坡自身条件(内因)对地震、降雨、人工开挖等(外因)所做出的力学响应(内因对外因的响应),也就是说一个合理的滑坡分类必须要能反映上述三方面的因素,而目前的分类方法如刘广润等<sup>[38]</sup>、杨诗义<sup>[39]</sup>提出的滑坡分类方法也都很好地反映了这一点,然而他们的分类方法主要是针对一般情景下的滑坡,而没有考虑应急情景下的特殊因素。为此,下面在对应急情景下的特殊因素进行分析的基础上,建立基于监测预警的突发滑坡应急防治分类体系。

李俊峰等<sup>[46]</sup>对比了数值模拟技术在常规地质灾害防治及应急地质灾害防治应用中的区别,指出二者在研究目的、研究对象、工况分析、监测数据、物理力学参数获取、几何模型构建、边界范围圈定、岩土体本构模型选取及时间要求等方面的区别,说明了地质灾害应急防治的特点,他认为在应急情形下,不可能掌握较为详细的滑坡资料,因而通过数值分析等手段得到的结果相对粗糙。那么此时是否可以把滑坡设想为一个黑匣子,根据它对外因(如地震或降雨等)的响应来判断滑坡的失稳时间及规模呢?正如我们可以根据地震前的一些征兆如动物出现异常反应等预判地震是否发生一样。类似地,滑坡临灾前的一些征兆就必然要成为滑坡应急分类的一个重要指标,黄润秋等<sup>[47]</sup>通过研究认为滑坡失稳前兆信息主要包括坡体信息(如坡体摇摇欲坠、前缘急剧膨胀、前缘持续上爬、坡体位移加速等)、裂缝信息(如后缘裂缝迅速闭合、扩张加剧、宽度骤减;内部裂缝迅速延伸)和地声信息(如微震信号异常、地鸣持续轰隆、声学信号异常等)。于远忠<sup>[48]</sup>在分析崩滑地质灾害成灾时间规律的基础上,提出了3种常见的崩塌地质灾害宏观前兆现象:地形变形迹、地声、动物异常和地下水宏观异变。刘广润等<sup>[38]</sup>的分类方法中仅考虑了滑坡的动力成因,这不甚全面,在同样的动力作用下,不同地质成因的滑坡所产生的响应也肯定不同,也就是说边坡的

地质成因如区域地质特征、地形地貌、地质构造运动、地下水等因素对滑坡的形成及破坏机制均有很大影响。由此在刘广润等<sup>[38]</sup>提出的滑坡分类方法的基础上,加入滑坡临灾征兆和地质成因等两个二级分类指标,就可以建立起如图1所示的基于监测预警的滑坡应急防治分类方法,进而可应用于突发滑坡地质灾害的应急处置。

## 2.2 基于失稳后运动距离预测的突发滑坡应急防治分类方法

当边坡处于临滑状态时,为了尽可能减轻或避免滑坡失稳后造成的人员伤亡及财产损失,非常有必要对滑坡失稳后的运动距离进行提前预测,以划定危险范围,实施人员安全撤离。

樊晓一<sup>[49]</sup>对滑坡失稳后的运动距离进行了大

量研究,并建立了多种不同的滑坡运动距离经验预测公式,他认为滑坡体积和地形地貌是影响滑坡滑动距离的两个主要因素,因为滑坡失稳后的运动过程是滑坡的高位势能转化为动能的过程,滑坡体积越大,其相应的势能就越大;而地形地貌条件决定了滑动运动过程中的势能消耗,地形起伏越大,消耗的能量就越多,相应的滑动距离也就越小。其中,地形地貌为主要条件,滑坡体积为辅助条件,有时滑坡运动速度的影响也较大,由此本文基于上述3个主要指标对滑坡进行了分类,如图2所示。樊晓一<sup>[49]</sup>基于对大量滑坡失稳后运动距离的统计分析提出了多种不同类型滑坡失稳后的运动距离计算经验公式。所以,通过这种滑坡分类方法可以很快地对滑坡失稳后的运动距离进行预估,以达到突发

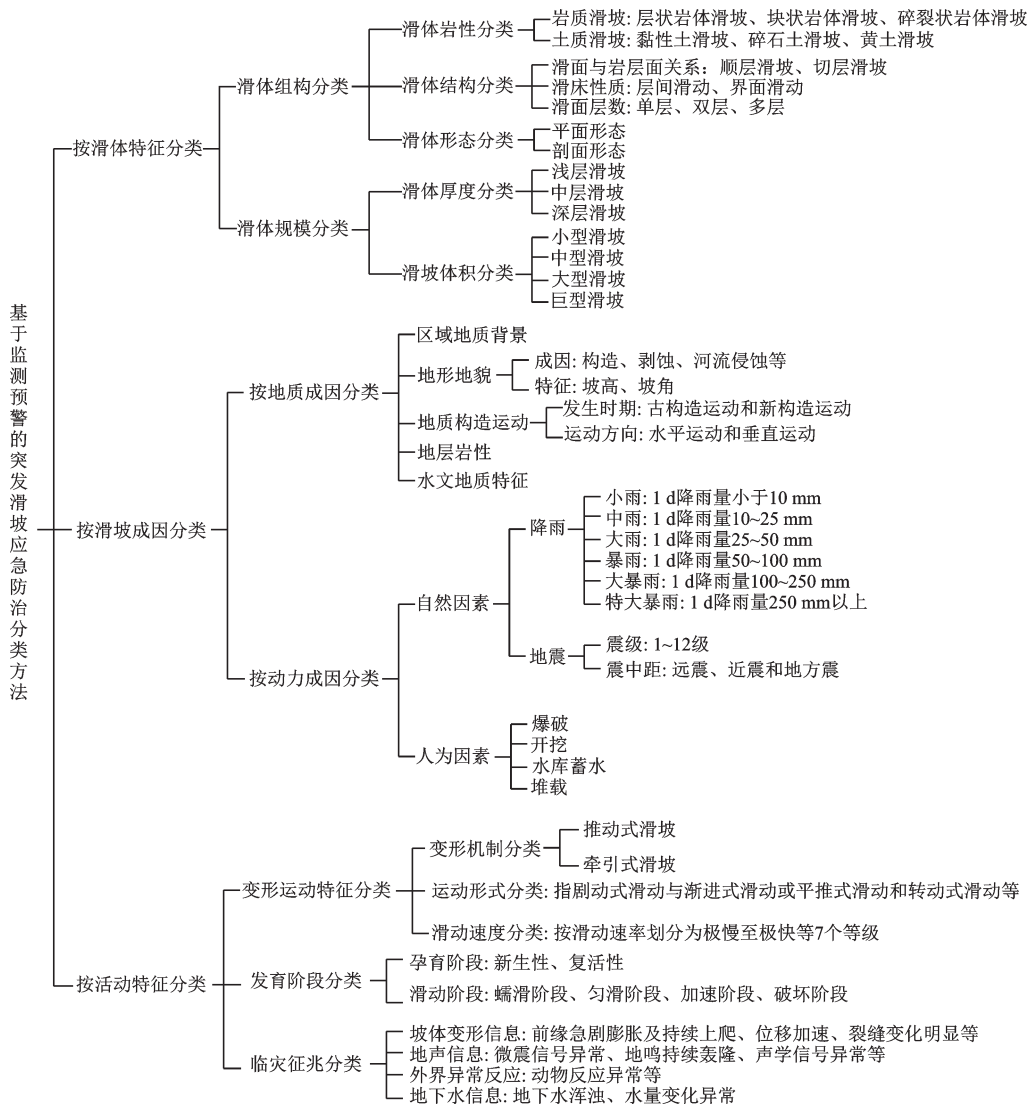


图1 基于监测预警的滑坡应急防治分类方法

Fig.1 The emergency prevention classification method for landslides based on monitoring and early warning

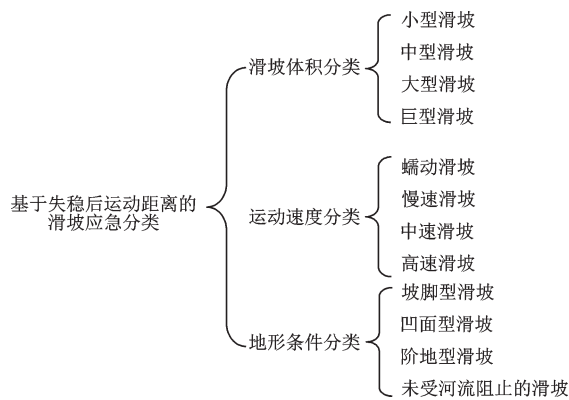


图2 基于失稳后运动距离预测的滑坡应急防治分类方法  
Fig.2 The emergency prevention classification method for landslide based on the movement distance after failure

滑坡灾害应急防治的目的。

### 3 结 语

(1) 由于边(滑)坡种类繁多且涉及行业面广, 因此目前存在多种不同的分类体系, 一方面说明边(滑)分类对众多行业来说都是一项必要的基础性研究工作, 另一方面也说明滑坡分类难度较大, 目前还没有一个能够适用于多行业部门的滑坡分类体系出现。

(2) 在边(滑)坡分类体系中, 分类目的是最为重要的一个因素, 依据不同的分类目的可以选择不同的分类指标, 进而获得不同的分类结果。为此本文基于4种不同的分类目的, 对前人研究成果进行了归纳总结。

(3) 结合目前地质灾害应急防治的客观需求, 初步提出了基于地质灾害应急防治的滑坡分类方法, 可以为滑坡灾害应急防治提供技术支撑。但是该分类方法相对比较粗糙, 仍需进一步深入研究。

#### 参考文献:

[1] 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.  
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese)

[2] Dana J D. Manual of geology treating of the principles of the science with special reference to American geological history for the uses of colleges, academies and

schools of science [M]. Philadelphia: Theodore Bliss, 1863.

[3] Sharpe C F S. Landslides and related phenomena: a study of mass movement of soil and rock [M]. New York: Columbia University Press, 1938.

[4] Cruden D M. The first classification of landslides [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2003, 9 (3): 197-200.

[5] Varnes D J. Landslide types and processes [R]. Washington DC: Highways Research Board, National Academy of Sciences, 1958.

[6] Varnes D J. Slope movement types and processes [R]. Washington DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1978.

[7] Hutchinson J N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology [C] // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Rotterdam: [s.n.], 1988: 3-36.

[8] 卢鑫樾. 论滑坡时代分类与滑动历史分类 [C] // 滑坡文集(第三集), 北京: 人民铁道出版社, 1981: 32-39.  
Lu Zh Y. On chronological and historical classifications of landslides [C] // Landslides Corpus (3rd), Beijing: Railway Press, 1981: 32-39. (in Chinese)

[9] 傅传元. 滑坡七类七型分类和中国铁路滑坡分布规律 [J]. 重庆交通学院学报, 1985(2): 83-91.  
Fu Ch Y. The seven classes and seven models of landslide's classification and the law of landslide's distribution in Chinese railways [J]. Journal of Chongqing Institute of Jiaotong, 1985(2): 83-91. (in Chinese)

[10] 徐邦栋. 滑坡分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.  
Xu B D. Analysis and prevention of the landslide [M]. Beijing: Press of Chinese Railway, 2001. (in Chinese)

[11] 晏同珍, 杨顺安, 方云. 滑坡学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.  
Yan T Zh, Yang Sh A, Fang Y. Landslide [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000. (in Chinese)

[12] 姜德义, 王国栋. 高速公路工程边坡的工程地质分类 [J]. 重庆大学学报, 2003, 26(11): 113-116.  
Jiang D Y, Wang G D. Engineering geologic classification of slopes for highway projects [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26 (11): 113-116. (in Chinese)

[13] Hoek E, Bray J W. Rock slope engineering (Revised second edition) [M]. London: The institution of Mining and Metallurgy, 1977: 150-259.

[14] 李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及

- 设计对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2915-2921.
- Li A H, Zhou D P, Feng J. Failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 1): 2915-2921. (in Chinese)
- [15] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
- Huang R Q. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249. (in Chinese)
- [16] 成永刚. 山西省高速公路不同滑坡类型的贡献率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 188-191.
- Cheng Y G. Contribution rate research of landslide type of Shanxi expressway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 188-191. (in Chinese)
- [17] 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.
- Zhang Z Y, Wang Sh T, Wang L Sh. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Press of Geology, 1994. (in Chinese)
- [18] 徐峻龄, 马惠民, 郑静, 等. 滑坡的规律研究与防治[J]. 铁道工程学报, 2005, 26(增): 333-339.
- Xu J L, Ma H M, Zheng J, et al. Research on the rules and controlling of landslide[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 26(Sup): 333-339. (in Chinese)
- [19] 陈关平, 张拥军, 李乾龙, 等. 露天矿边坡局部破坏形式分类及破坏机理分析[J]. 金属矿山, 2016(4): 126-131.
- Chen G P, Zhang Y J, Li Q L, et al. Classification of slope local damage and damage mechanism analysis in an open pit mine[J]. Metal Mine, 2016(4): 126-131. (in Chinese)
- [20] 肖诗荣, 胡志宇, 卢树盛, 等. 三峡库区水库复活型滑坡分类[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 39-44.
- Xiao Sh R, Hu Zh Y, Lu Sh Sh, et al. Classification of reservoir-triggered landslides in three gorges reservoir area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 39-44. (in Chinese)
- [21] 戴敬儒, 周泽平, 吴昕. 山丘区工程滑坡分类与灾害防治[J]. 山地学报, 2005, 23(6): 709-713.
- Dai J R, Zhou Z P, Wu X. Classification and controlling on human affected landslides[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(6): 709-713. (in Chinese)
- [22] 陈红旗, 赵华. 水电工程高边坡的地质工程分类研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(4): 9-12.
- Chen H Q, Zhao H. Geological engineering classification for the high slopes of a hydroelectric project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(4): 9-12. (in Chinese)
- [23] 郝立新, 陈伟明, 马宁. 岩质边坡坡体结构分类及其工程意义[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 19-24.
- Hao L X, Chen W M, Ma N. Classification of slope structure of rock slope and its engineering significance [J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 19-24. (in Chinese)
- [24] 陈洪凯, 杨世胜, 叶四桥. 公路高切坡分类及其破坏模式[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(5): 92-96.
- Chen H K, Yang Sh Sh, Ye S Q, et al. Classification of high cutting slope along road and its failure models [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, 26(5): 92-96. (in Chinese)
- [25] 廖小平. 类土质路堑边坡变形破坏类型及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2765-2772.
- Liao X P. Failure mechanism and stability analysis of cutting soil slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup 2): 2765-2772. (in Chinese)
- [26] 陈祖煜. 岩质高边坡稳定性分析方法与软件系统[J]. 水力发电, 1998(3): 1-6.
- Chen Z Y. Analysis method of the stability of the high rock slope and the software system [J]. Water Power, 1998(3): 1-6. (in Chinese)
- [27] 易巍. 高速公路顺层边坡破坏模式分类及防治对策[J]. 铁道建筑, 2015(8): 93-96.
- Yi W. Classification of the failure modes of the consequent slope of the expressway and its countermeasures [J]. Railway Engineering, 2015(8): 93-96. (in Chinese)
- [28] 章征宇. 贵州岩溶地区层状岩质公路边坡类型划分[J]. 山西建筑, 2010, 36(24): 292-293, 325.
- Zhang Zh Y. The classification of stratified rock slope of highway types on Guizhou karst area [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(24): 292-293, 325. (in Chinese)
- [29] 孙英勋. 滑坡的处治分类与治理模式探讨[J]. 地质与勘探, 2006, 42(1): 85-88.
- Sun Y X. Discussion on the treatment category and modules for landslides [J]. 2006, 42(1): 85-88. (in Chinese)
- [30] 宋胜武, 徐光黎, 张世殊. 论水电工程边坡分类[J]. 工

- 程地质学报, 2012, 20(1): 123-130.
- Song Sh W, Xu G L, Zhang Sh Sh. On slope classification for hydropower engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(1): 123-130. (in Chinese)
- [31] 焦姍, 龙建辉, 于慧丽. 山西煤矿区滑坡特征及分类 [J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 102-106.
- Jiao Sh, Long J H, Yu H L. Characteristic and classification of landslide in Shanxi coal mine area [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(3): 102-106. (in Chinese)
- [32] 金德濂. 水利水电工程边坡的工程地质分类(上) [J]. 西北水电, 2000(1): 10-16.
- Jin D L. Engineering geologic classification of slopes for water resources and hydropower projects (Part I) [J]. Northwest Water Power, 2000(1): 10-16. (in Chinese)
- [33] 金德濂. 水利水电工程边坡的工程地质分类(中) [J]. 西北水电, 2000(2): 10-12, 36.
- Jin D L. Engineering geologic classification of slopes for water resources and hydropower projects (Part II) [J]. Northwest Water Power, 2000(2): 10-12, 36. (in Chinese)
- [34] 金德濂. 水利水电工程边坡的工程地质分类(下) [J]. 西北水电, 2000(4): 6-14.
- Jin D L. Engineering geologic classification of slopes for water resources and hydropower projects (Part III) [J]. Northwest Water Power, 2000(4): 6-14. (in Chinese)
- [35] 潘国林, 洪天求, 林桂香. 皖南山区滑坡分类及形成机制研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 10-16.
- Pan G L, Hong T Q, Lin G X. Research on classification and formation mechanism of landslides in mountainous area of southern Anhui [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016, 39(4): 10-16. (in Chinese)
- [36] 任伟中, 范建海, 孔令伟, 等. 鄂西北山区边(滑)坡综合分类探讨 [J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 433-454.
- Ren W Zh, Fan J H, Kong L W, et al. Probing of syntheetical classification of slope/landslides in northwest mountain area of Hubei province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 433-454. (in Chinese)
- [37] 谢婉丽, 滕宏泉, 杜蕾, 等. 大西安地区滑坡分类及其特征分析 [J]. 地球环境学报, 2018, 9(1): 79-88.
- Xie W L, Teng H Q, Du L, et al. An analysis of landslide classifications and characteristics in Xi'an [J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(1): 79-88. (in Chinese)
- [38] 刘广润, 晏鄂川, 练操. 论滑坡分类 [J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 339-342.
- Liu G R, Yan E Ch, Lian C. Discussion on classification of landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 339-342. (in Chinese)
- [39] 杨诗义. 滑坡预测预报与滑坡分类体系研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- Yang Sh Y. Study on landslide prediction and classification system [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [40] 李迪, 张漫, 张保军. 岩石边(滑)坡深部变形的分类及应用 [J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 23-27.
- Li D, Zhang M, Zhang B J. Classification on deep deformations of rock-slopes and landslides and its application [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 23-27. (in Chinese)
- [41] 宋雪琳, 阳吉宝. 堆积层滑坡稳定性评价及其时间预报 [J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(3-4): 352-357.
- Song X L, Yang J B. Stability evaluation of accumulative landslide and its time forecast [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19(3-4): 352-357. (in Chinese)
- [42] 叶唐进, 谢强, 王鹰. 国道 G318 藏东段碎屑斜坡分类与稳定性评判 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 914-922.
- Ye T J, Xie Q, Wang Y. Stability evaluation and classification of debris slopes in eastern Tibet section of G318 highway [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 914-922. (in Chinese)
- [43] 毛雪松, 刘龙旗, 张海宁, 等. 坡积体路段的稳定性研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 52-55, 69.
- Mao X S, Liu L Q, Zhang H N, et al. Study on the stability of slope product section [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(4): 52-55, 69. (in Chinese)
- [44] 宋胜武, 严明. 一种基于稳定性评价的岩质边坡坡体结构分类方法 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 6-10.
- Song Sh W, Yan M. Stability evaluation based classification method for rock mass structures in rock slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 6-10. (in Chinese)
- [45] 陈红旗, 徐永强, 庄茂国, 等. 地质灾害应急支撑体系建设基本问题分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 108-111.
- Chen H Q, Xu Y Q, Zhuang M G, et al. Study on the construction of geological disaster emergency support system [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 108-111. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)

(下转第 237 页)