

• 聚焦国家重点研发计划 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900719

青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究

邓建辉¹, 戴福初², 文宝萍³, 姚 鑫⁴

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100023;
3. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 4. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100086)

摘 要:青藏高原是全球地质环境最脆弱的地区之一,地质条件复杂,地壳隆升、高地应力、地震、冻融、暴雨等内外动力强烈,重大滑坡频发,链生灾害剧烈。滑坡问题已严重影响川藏铁路、水能资源开发等国家重大工程建设,威胁区域居民人身与财产安全。2018年金沙江上游连续发生的白格“10.10”和“11.3”滑坡堵江事件即为典型案例。然而,目前理论上对青藏高原重大滑坡的孕灾环境与成灾机制认识不清,技术上不能对重大滑坡进行早期识别和有效风险防控,不能有效地为该地区重大滑坡灾害的灾前防控、灾后救灾提供科技支撑。针对上述问题,以地质条件最复杂、内外动力作用最强烈、滑坡灾害最频繁的青藏高原东南三江流域为重点研究区,采用多学科综合交叉融合的方法,从滑坡的成因机制入手,破解其链生演化难题,提出早期识别与风险防控体系;通过解决青藏高原重大滑坡孕育的内外动力耦合作用机制、青藏高原重大滑坡及其灾害链的动力学机制等科学问题,以及青藏高原重大滑坡的遥感早期识别与监测、基于重大滑坡动力过程的动态风险评估与防控等技术问题,最终形成青藏高原重大滑坡成因理论、防控技术和综合减灾技术示范。

关键词:青藏高原; 滑坡; 高速远程滑坡; 堵江滑坡; 动力灾变; 防控技术

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)05-0001-08

Investigation on the Catastrophic Mechanism and Risk Control Measures of Major Landslides in Tibetan Plateau

DENG Jianhui¹, DAI Fuchu², WEN Baoping³, YAO Xin⁴

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.College of Architecture and Civil Eng., Beijing Univ. of Technol., Beijing 100023, China;

3.School of Water Resources and Environment, China Univ. of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

4.Inst. of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: Tibetan Plateau is one of the districts with the most susceptible geo-environments. The district is characterized by its complex geology, strong endogenic and exogenic geological processes as crustal uplift, high in-situ stresses, earthquakes, repeating ground freeze and thaw, intensive precipitation etc., frequent landslides and chained disasters. Landslides have become a serious problem affecting the construction of major engineering project as Tibet-Sichuan railway line and regional hydropower stations, and also menacing the safety of local residents and their living facilities. On October 10th and November 3rd, 2018, landslides, damming the upper reach of Jinsha River at Baige village, are two typical cases. However, for the research of major landslides in Tibetan Plateau, theoretically it's not quite clear that how they happen and what is their catastrophic mechanism; technically it is still under development that how to effectively recognize and control the disasters in advance. That is, current theory and technique cannot provide efficient support for pre-disaster control and post-disaster relief works. The three-river area (Jinsha River, Lancang River and Nu River) is located on the southeast edge of Tibetan Plateau and is characterized by complex geology, strong endogenic and exogenic geological processes and frequent landslide disasters, making it selected as the key area for investigation. Multidisciplinary endeavor will be used in the investigation, starting from the genesis mechanism of landslides, revealing the evolution of the chained disasters, then suggesting techniques for early recognition and risk control of landslide disasters. Through solving the scientific problems of major landslides in

收稿日期:2019-07-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505000)

作者简介:邓建辉(1965—),男,教授,博士.研究方向:边坡工程与地质灾害. E-mail: jhdeng@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-09-09 14:11:16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190909.1139.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Tibetan Plateau such as the coupling mechanism of endogenic and exogenic processes, the dynamic mechanism of the disaster and its chains, and the technical challenges as remote sensing-based early recognition and monitoring, kinematic process-based risk evaluation and control techniques, the project finally demonstrates the application of the above theory and techniques by typical case histories of disaster reduction.

Key words: Tibetan Plateau; landslide; high-speed and long runout landslide; landslide dam; catastrophic mechanism; control measure

青藏高原是世界上海拔最高的高原,面积约 $2.5\times 10^6\text{ km}^2$,平均海拔大于4 000 m,被称为世界的第三极。青藏高原也是世界上最年轻的高原,其隆起和形成是晚新生代地质历史上最重大的地质事件之一。

青藏高原的隆起对其自身、周边地区以至全球的自然环境和人类活动都有着重大的影响,是世界地学研究的热点之一。中国自20世纪50年代以来,对青藏高原进行了长期的科学考察研究,在青藏高原的隆升机理、阶段、过程及其资源环境效应等方面成果丰硕^[1-4]。

青藏高原的地质灾害研究总体上与工程建设密切相关。以滑坡研究为例,早期修建的青藏公路(铁路)、川藏公路和滇藏公路沿线的地质灾害问题首先得到了较多的关注^[5-9],其次是与水能资源开发相关的主要流域地质灾害^[10-12],再次是高原及其周边地区城镇建设相关的灾害问题^[13-14]。青藏高原的链式灾害问题在近年也开始得到关注和重视,如滑坡堵江灾害链问题^[10-12, 15-16]和高速远程滑坡问题^[17-19]。这些研究的总体特点是以点和线为主,面上研究仅2001年中国地质调查局“中国西部地质灾害区域调查评价”项目进行了部分工作^[20],区域性滑坡灾害发育规律及其与青藏高原隆升的关系尚缺乏系统、深入的研究工作^[21]。

从已有研究成果来看,青藏高原区域范围内滑坡灾害数量多、规模大,且往往形成灾害链,对区域经济与社会发展影响严重。目前区域内的滑坡调查与研究水平已经很难满足正在规划或实施中的“一带一路”南亚通道、中巴经济走廊、川藏铁路^[22]、滇藏铁路、川藏高速、水电站等工程建设的需求。因此,开展青藏高原重大滑坡动力灾变与防控关键技术研究对青藏高原地区防灾减灾与社会经济可持续发展、工程建设与当地脆弱生态环境的协调发展具有现实与战略意义。

基于此,以青藏高原东南三江流域为重点研究区,采用多学科综合交叉融合的方法,从滑坡的成因机制入手,破解其链生演化难题,提出早期识别与风险防控体系,最终形成青藏高原重大滑坡成因理论、防控技术和综合减灾技术示范。

1 研究现状与关键科技问题

1.1 研究现状

青藏高原区域广袤,具有海拔与高差大、构造隆

升与地震活动强烈、气候变化影响显著等特点。

从已有成果来看,青藏高原滑坡具有区域集中发育的特点,主要分布区包括喀喇昆仑山-帕米尔高原地区、喜马拉雅山南部地区和横断山脉地区等。横断山脉的三江地区面积约 $0.5\times 10^6\text{ km}^2$,地形地貌上横跨青藏高原东南的川藏高山峡谷区与藏北高原区,是青藏高原地区滑坡灾害最为发育的区域,也最能够反映青藏高原地质环境特点。2018年10月10日和11月3日发生的白格堵江滑坡即位于该地区^[22]。故以青藏高原东南三江流域为重点研究区,其成果具有代表性。

目前研究存在的主要问题包括:

1)重大滑坡发育演化的内外动力耦合作用机制尚待系统深入。此类研究目前尚处于对局部地段、特定动力作用下的定性分析阶段,尚无针对强震、高应力、地壳隆升等内动力与冻融、暴雨等外动力耦合作用下青藏高原重大滑坡成因机制的系统研究。

2)重大滑坡灾害遥感早期识别与监测技术需要进一步完善。基于几何形状、色调、纹理等高分辨率光学遥感特征识别滑坡已日趋成熟,星载干涉雷达(InSAR)、激光雷达(LiDAR)等先进的地空探测技术在滑坡早期识别中的应用日趋广泛。但这些技术的有效性受峡谷地形、植被等环境条件限制,针对高位能、大梯度的青藏高原,发展一套多尺度、多层次的滑坡干涉雷达识别与监测技术体系是亟待解决的技术难题。

3)高速远程滑坡灾变机制与动力学过程仍然是难题。高速远程滑坡是高位能、大梯度地区危害最大的滑坡类型,链生灾害是其主要致灾方式。高速、超远运动机理是滑坡研究的最大难题。目前,相关研究尚处于基于现象观察和针对某个阶段的各类假说探索阶段,亟需在对滑坡启动→运动→堆积全过程研究的基础上,建立刻画滑坡全过程的动力学模型和数值模拟系统,实现对滑坡过程的准确反演或预测。

4)滑坡堵江与溃决机制及其灾害效应研究需要定量化。滑坡→堵江→溃坝→洪水是高山峡谷区大型滑坡最主要的链生灾害模式。目前,相关研究主要集中于已有案例的定性解释,缺乏结合滑坡模式、堰塞坝结构和山区河流特点的链生灾害过程研究,亟需建立滑坡堵江、堰塞坝溃决及其灾害预测模型和

数值模拟系统,实现对滑坡堵江、溃坝灾害过程的预测。

5)缺乏基于灾害过程调控的重大滑坡风险防控技术。现有主动控制措施极少考虑强震作用下斜坡岩体结构的损伤,缺乏适用于强震碎裂大变形的新型抗震阻滑结构和加固治理技术;现有被动防护措施抗冲击能力差、吸能承载特性低,不能抵御重大滑坡高速碎屑流的强烈冲击,亟需针对青藏高原重大滑坡的岩体地质力学模式和过程演化特征,构建重大滑坡灾前主动控灾、灾时被动减灾、灾后科学救灾的综合防控技术体系。

1.2 关键科学与技术问题

针对上述问题,该地区的滑坡研究从理论上需要厘清重大滑坡的成因机制和滑坡灾害链的动力学机制,从技术上需要解决早期识别技术和基于全过程的灾害风险防控技术。拟解决如下关键科学问题和关键技术问题。

科学问题1:青藏高原重大滑坡孕育的内外动力耦合作用机制。

科学问题2:青藏高原重大滑坡及其灾害链的动力学机制。

技术问题1:青藏高原重大滑坡的遥感早期识别

与监测技术。

技术问题2:基于重大滑坡动力过程的动态风险评估与防控技术。

2 研究内容与课题设置

2.1 研究内容

以青藏高原东南三江流域为重点研究区,揭示重大滑坡孕育的内外动力耦合机制,建立重大滑坡的岩体工程地质力学模式;揭示高速远程滑坡的动力灾变机制、超强运动机理、滑坡制动与堆积分异机制,建立高速远程滑坡启动—运动—堆积全过程动力学模型;揭示重大滑坡堵江与溃决机制及其灾害效应,建立重大滑坡堵江与溃决危险性评价方法及堰塞坝溃决洪水演进模型;研发重大滑坡遥感早期识别技术、风险评估与风险控制技术,建立青藏高原重大滑坡的多尺度与多层次遥感早期识别技术方法体系、基于重大滑坡的孕育演化与致灾机制的动态风险评估方法、基于重大滑坡岩体工程地质力学模式与演化特征的全过程控制设计理论与阻滑耗能结构设计方法及其关键技术体系。

2.2 课题设置

针对以上研究内容,分解为以下6个课题(图1)。

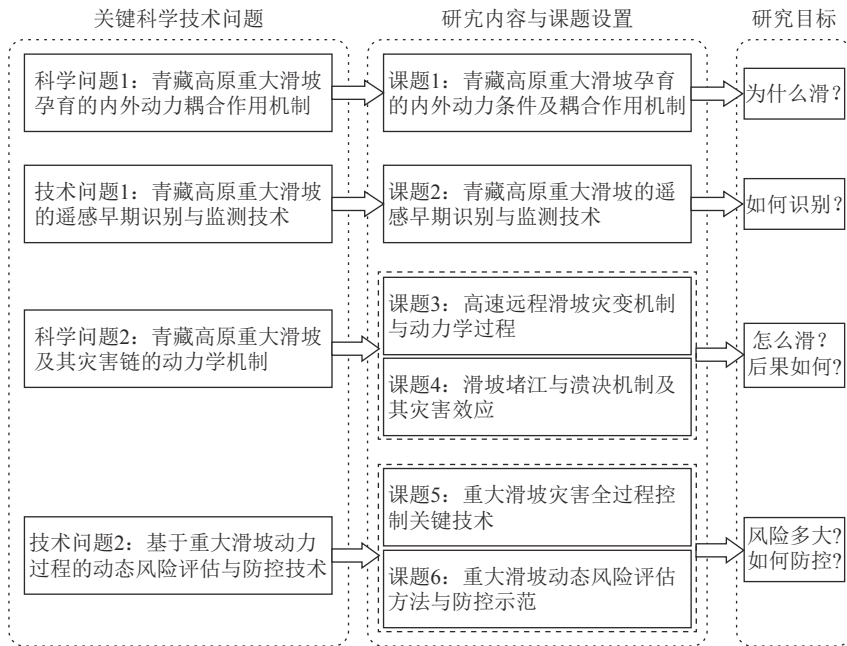


图1 课题设置

Fig. 1 Division of the project

课题1“青藏高原重大滑坡孕育的内外动力条件及其耦合作用机制”针对关键科学问题1,解决重大滑坡的成因问题。首先,拟通过遥感解译和现场调查,深入分析重点研究区及邻区的内动力条件,如活动断裂空间展布及其规模、活动性质,地震活动的时

空强规律、地壳形变速率、应力场特征等,系统掌握研究区内动力环境;其次,结合振动台试验和数值模拟研究强震作用下斜坡岩体结构动力学响应特征;然后,在对降雨、气温等外动力条件的时空变化进行系统分析的基础上,采用物理模拟与室内试验的方

法揭示冻融、干湿循环变化条件下典型易滑岩组物理力学性质的变化规律,从而定量掌握研究区及邻区外力环境变化及其对斜坡岩体物理力学性质的影响规律;最后,基于研究区重大滑坡的空间分布、规模、性质等,采用多因素叠加分析、空间统计分析方法揭示内外动力环境特征,揭示重大滑坡空间分异的内外动力耦合作用机制,建立重大滑坡的岩体工程地质力学模式。

课题2“青藏高原重大滑坡的遥感早期识别与监测技术”针对关键技术问题1,解决重大滑坡的早期识别问题。拟探索基于天-空-地等多源信息的相互融合技术,研发适合高山峡谷区的斜坡精细形态多源遥感探测和斜坡变形观测技术,突破高位、高危、隐蔽型重大滑坡高精度遥感快速调查与早期识别的技术瓶颈,建立重大滑坡多尺度、多层次遥感早期识别技术方法体系,即区域尺度重大滑坡隐患的遥感早期识别关键技术、重点区段重大滑坡隐患的遥感精细判识技术和单体重大滑坡多源遥感时序监测关键技术。

课题3“高速远程滑坡灾变机制与动力学过程”和课题4“滑坡堵江与溃决机制及其灾害效应”针对关键科学问题2,解决三江地区两类典型的灾害链形成过程及其动力学机制问题。高速远程滑坡研究以(干)碎屑流型和液化型两类高速远程滑坡为研究对象,系统开展青藏高原东南缘不同类型高速远程滑坡致灾机制和动力学过程研究,即内外动力作用下高速远程滑坡的动力灾变机制、高速远程滑坡超强运动机理、高速远程滑坡制动机理与堆积分异规律,建立高速远程滑坡全过程物理模型与数值模拟平台。滑坡堰塞坝的研究拟通过滑坡堵江事件的现场详细调查,研究滑坡堆积体与河水的相互作用,揭示滑坡堵江的形成机理与条件;研究宽级配堰塞体的抗蚀性、渗透性与力学特性,揭示堰塞坝溃决机理与破坏模式,建立不同溃决模式的堰塞坝危险性评估模型,模拟溃口演化与溃决洪水演进过程。

课题5“重大滑坡灾害全过程控制关键技术”和课题6“重大滑坡动态风险评估方法与防控示范”针对关键技术问题2,解决重大滑坡的动态风险评估与防控技术问题。拟对不同空间尺度,开展区域尺度上基于统计学习的重大滑坡风险评估、重点区段考虑灾害空间范围的风险评估;针对单体重大滑坡,在重大滑坡的孕育演化与致灾机制研究的基础上,研发基于青藏高原重大滑坡成因机制与动力学过程的动态风险评估技术。建立重大滑坡灾害全过程调控设计理论与阻滑耗能结构设计方法,研发基于岩体工程地质力学模式的源头处置技术、基于不同运动模

式的过程调控新型结构及重大滑坡堰塞坝的应急处置技术,形成一套灾前主动控灾、灾时被动减灾、灾后科学救灾的重大滑坡灾害风险评估与控制关键技术体系,并结合研究区的水能资源开发、重要交通干线等重大工程,建立高风险重大滑坡综合防控示范区,对课题1~5的研究成果进行示范与验证。

3 研究方法与技术路线

3.1 研究方法

按照青藏高原重大滑坡的“孕育机制→早期识别→链生演化规律→风险防控”的研究主线,针对目前青藏高原重大滑坡灾害的特点和拟解决的关键科学与技术问题开展多学科、多方法协同攻关研究。

联合多学科、多领域专家协同攻关,采用遥感解译、野外调查、室内和原位试验、物理模拟、数值模拟、对地观测、理论分析相结合的方法,开展青藏高原重大滑坡的动力灾变、链生演化机制与风险防控的研究。

1)突出青藏高原地域特色。青藏高原是世界上海拔高差最大、构造隆升与地震活动最强烈、气候变化影响最显著的地区,融冻作用、干湿循环强烈,侵蚀强烈,其特殊的地质环境及其变化控制着重大滑坡的时空分布规律。通过查明青藏高原东南三江流域重大滑坡的空间分布规律,揭示内外动力条件与重大滑坡灾害区域分布的内在关系,建立重大滑坡孕育的内外动力耦合作用机制,进而从本质上揭示青藏高原重大滑坡的孕灾背景、发育规律及成灾模式。

2)突出青藏高原重大滑坡的链生演化机制。在青藏高原地区的高位能、大梯度复杂地形地貌环境下,重大滑坡灾害的链生演化致灾效应表现为部分滑坡具有高速远程特征,灾害效应放大明显;在河谷区,滑坡也易堰塞成湖,在上游造成淹没损失,在下游堰塞坝溃决易形成次生洪水灾害。基于灾害链演化机制研究,建立相应的过程模拟模型、危险性评估模型,可为青藏高原重大滑坡防灾减灾提供理论依据。

3)突出青藏高原减灾防灾的紧迫性,建立青藏高原重大滑坡防控关键技术方法体系。在青藏高原重大滑坡成因机理与链生演化机制研究的基础上,突破高位、高危、隐蔽型重大滑坡高精度遥感快速调查与早期识别的技术瓶颈,建立重大滑坡多尺度、多层次遥感早期识别与监测技术方法体系;基于重大滑坡岩体工程地质力学模式与演化特征,研发基于岩体工程地质力学模式的源头处置技术、基于不同运动模式的过程调控新型结构及重大滑坡堰塞坝的应急处置技术,形成一套重大滑坡灾害风险控制关键技术体系,并进行综合试验应用,形成青藏高原重

大滑坡减灾示范。

3.2 技术路线

项目实施的技术路线如图2所示。项目实施整体上划分为理论研究、技术研发和示范应用3大模块。其中: 理论研究由课题1、3和4完成, 主要采用光学遥感解译, 结合现场调查的方法确定研究区目前已经存在的滑坡(已有滑坡), 揭示其孕育机制和地质力学模式, 以及高速远程滑坡和堵江滑坡灾害链的动

力学机制; 技术研发主要由课题2和5完成, 解决研究区潜在滑坡(包括已有滑坡的复活)的早期识别与监测技术问题, 以及研发基于灾害全过程防控理念的减灾技术体系; 示范应用由课题6完成, 集成课题1~5的研究成果, 形成一套不同空间尺度的重大滑坡灾害风险评估方法, 并结合示范工程应用技术研发成果。

各课题具体的技术路线简述如下。

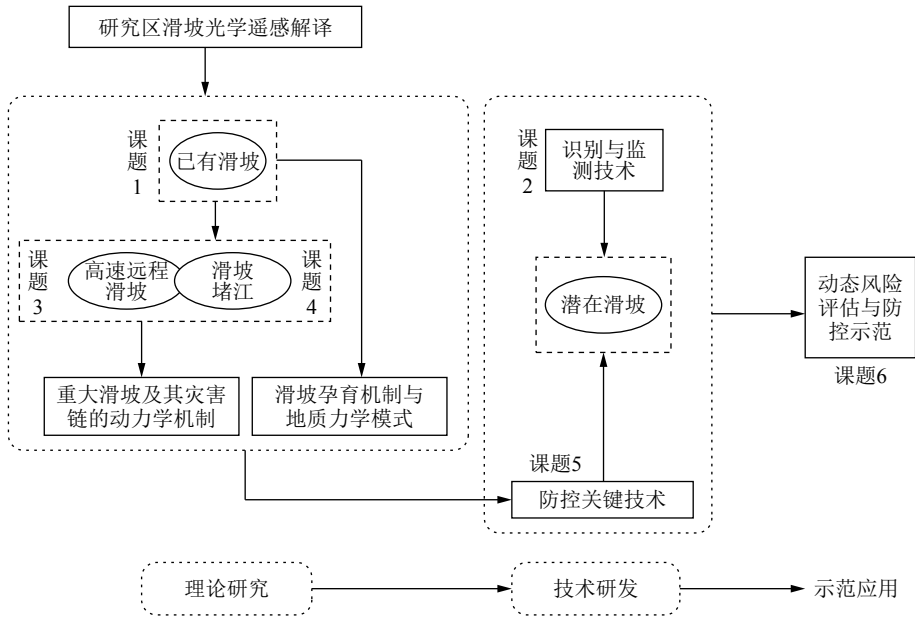


图 2 项目实施技术路线

Fig. 2 Flowchart for the implementation of the project

1) 青藏高原重大滑坡孕育的内外动力耦合作用机制。拟采用遥感解译、现场调查方法确定青藏高原东南三江流域重大滑坡空间分布; 采取遥感分析、现场调查、现场观测、年代测试方法、室内试验、物理模拟、数值反演确定各种内动力因素的空间分布特征, 采用多因素叠加综合分析方法进行内动力作用的强弱分区; 根据观测资料、现场观测所获得的观测数据, 综合分析外动力(主要为降雨、气温)的时空变化规律; 采用物理模拟与室内测试方法定量研究斜坡岩体物理力学性质随冻融循环、干湿循环的变化规律; 采用振动台试验、数值模拟方法分析强震作用下斜坡岩体结构响应特征, 揭示重大滑坡发生的浅表层动力成因。基于以上研究, 采用多因素综合分析、空间统计方法揭示青藏高原重大滑坡孕育的内外动力耦合作用机制。

2) 青藏高原重大滑坡及其灾害链的动力学机制。拟采用室内试验、物理模拟和理论分析相结合的方法揭示高速远程滑坡运动过程机制, 建立高速远程滑坡启动—运动—堆积全过程物理模型和数值分析平台; 采用现场调查、室内试验、机器学习、物理模

拟与数值模拟方法揭示滑坡堵江与溃决机制, 建立能够考虑堰塞坝溃口演变和岸坡冲刷作用的山区河流溃决洪水演进的固液耦合数值模型。

3) 青藏高原重大滑坡的遥感早期识别与监测技术。拟采用高精度卫星光学影像、InSAR技术进行大范围区域尺度的重大滑坡灾害隐患的快速调查; 采用LiDAR点云数据自适应精细滤波技术、无人机立体摄影测量技术快速获取精细的数字高程模型(DEM), 采用基于无人机高分正射影像与精细DEM的3维实景模型进行重点区段重大滑坡隐患的快速详查; 采用基于多时序InSAR技术、3维激光扫描与GPS相结合的方法获取单体重大滑坡的时空变形信息。

4) 基于重大滑坡动力过程的动态风险评估与防控技术。以区域性滑坡灾害孕育、演变规律为基础, 应用GIS平台, 建立区域尺度、重点区段、单体重大滑坡的定性—半定量、半定量、定量动态风险评估技术体系。基于重大滑坡岩体工程地质力学模式与演化特征, 建立重大滑坡灾害全过程调控设计理论与阻滑耗能结构设计方法; 基于地质分析、材料试验、物

理模拟、数值模拟方法,研发基于岩体工程地质力学模式的源头处置技术、滑坡运动过程调控新型结构、重大滑坡堰塞坝的应急处置技术,从而形成一套重大滑坡灾害风险评估与控制关键技术体系。

4 白格滑坡研究进展

2018年,研究区内金沙江上游西藏自治区江达县白格村先后发生了两次严重的滑坡堵江事件,即白格“10.10”滑坡和“11.3”滑坡。两次滑坡项目组均参加了应急地质调查和灾害损失调查工作^[23]。

鉴于白格滑坡的典型性与重要性,遵照项目指导专家组意见,将白格滑坡作为重点研究对象。除现场调查、InSAR解译外,于2019年5月开始了白格滑坡的内观监测工作,目前的研究进展如下:

1)滑坡后缘牵引区目前整体上处于渐进解体状态,延缓了近期再次大规模滑坡的可能性。

2)牵引区的长期稳定性不容乐观,不能排除再次滑坡堵江的风险。其一,渐进解体的碎屑堆积于沟槽部位,二次滑移的可能性很大;其二,碎裂基岩处于相对缓慢解体过程中;其三,滑坡区右侧的裂缝区K3存在独立滑坡的风险。

3)滑坡南侧K2区范围扩展较大,K1、K2、K3区的后缘裂缝完全贯通(图3)。InSAR解译结果表明:K2的主要变形区位于中后缘,与早期分析结论一致;K2变形在持续发展。2018年11月3日至2019年6月12日变形面积扩展至 $0.69 \times 10^6 \text{ m}^2$,最大累计变形量41.7 cm。

4)滑坡已于2019年3月开展地质勘探工作,6月初开始了堰塞坝和K1区和K2区后侧的清方工作,一定程度上降低了短期再次滑坡堵江的风险。部分清方后的滑坡现状见图4,清方和局部坍塌残留于滑床部位的碎屑可能构成新的风险源。

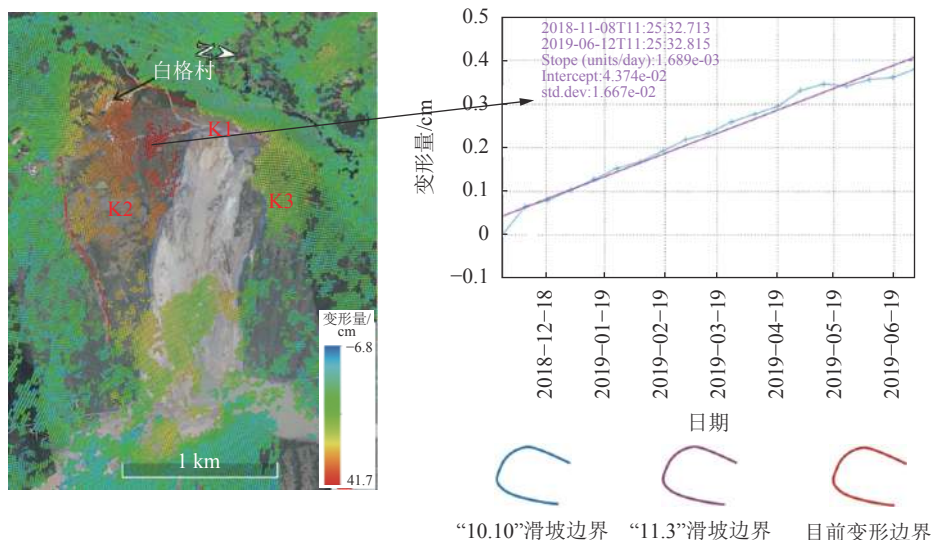


图3 白格滑坡变形边界与InSAR解译结果

Fig. 3 Deformation boundary of Baige landslide and interpretation results of InSAR



图4 部分清方后的白格滑坡(2019-07-16)

Fig. 4 Baige landslide after partial excavation(2019-07-16)

5 结论与展望

介绍了青藏高原重大滑坡研究项目的背景、研

究内容、研究方法和技术路线,以及白格滑坡目前的主要进展。小结如下:

1)青藏高原的滑坡灾害发育,对区域防灾减灾、社会经济可持续发展,以及工程建设等存在严重影响,开展系统深入研究具有现实与战略意义。

2)以“孕育机制→早期识别→链生演化规律→风险防控”为研究主线,从理论上厘清重大滑坡的成因机制和滑坡灾害链的动力学机制,从技术上解决早期识别技术和基于全过程的灾害风险防控技术。

3)以三江流域地区为重点研究区,从滑坡遥感解译和现场调查入手,在剖析区域滑坡孕育的内外动力作用规律基础上,揭示链式灾害的动力学机制,研发早期识别技术和以减灾为目标的滑坡风险防控

技术,并予以示范应用。

4)研究区内白格滑坡后缘的牵引区目前处于缓慢变形和渐进解体阶段,清方等工程措施一定程度上降低了短期再次滑坡堵江风险,后期需进一步关注滑床部位的滑坡残体整体失稳风险。

作为青藏高原滑坡问题的首次系统调查研究,项目面临基础地质资料欠深入,前期调查工作不足等技术难题,同时研究区的高海拔、高寒、交通不便等也对研究人员提出了挑战。目前,已经完成研究区滑坡的遥感解译工作,并在研究区开始了连续的调查与研究工作。

参考文献:

- [1] Sun Honglie,Liu Dongsheng,Cheng Guodong,et al.Review on the researches of Tibetan Plateau in China[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,1997(4):283–285.[孙鸿烈,刘东生,程国栋,等.对我国青藏高原研究的评述[J].中国科学院院刊,1997(4):283–285.]
- [2] 施雅风,李吉均,李炳元.青藏高原晚新生代隆升与环境变化[M].广州:广东科技出版社,1998.
- [3] Zheng Du,Yao Tandong.Uplifting of Tibentan Plateau with its environmental effects[J].Advances in Earth Science,2004,21(5):451–458.[郑度,姚檀栋.青藏高原隆升与环境效应[J].地球科学进展,2004,21(5):451–458.]
- [4] Li Jijun.Uplift of Tibetan Plateau and its environmental changes in Late Cenozoic[J].Journal of Lanzhou University (Natural Science),2013,49(2):154–159.[李吉均.青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(2):154–159.]
- [5] Wu Zhenhan,Ye Peisheng,Wu Zhonghai et al.Hazard effects of active faulting along the Golmud-Lhasa railway across the Tibetan Plateau[J].Geoscience,2003,17(1):1–7.[吴珍汉,叶培盛,吴中海,等.青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应[J].现代地质,2003,17(1):1–7.]
- [6] Zhu Jian,Zhu Dongchun,Liu Weimin.Types and distribution of geological hazards in Sichuan–Tibet highway (Tibet border)[J].Journal of Catastrophology,2018,33(Supp1):18–24.[祝建,朱冬春,刘卫民.川藏公路(西藏境)地质灾害类型与分布规律研究[J].灾害学,2018,33(增刊1):18–24.]
- [7] Zhao Yongguo.Geological disasters and controlling measures along the highway from Sichuan to Xizang[J].Journal of Natural Disaster,1993,2(1):72–78.[赵永国.川藏公路沿线地质灾害及其整治对策[J].自然灾害学报,1993,2(1):72–78.]
- [8] Yao Xin,Zhang Yongshuang,Li Lingjing,et al.InSAR-based recognition of slow-moving slope disasters along the Xi-anhuihe fault in the Qinghai–Tibetan Plateau[J].Acta Geologica Sinica,2017,91(8):1694–1705.[姚鑫,张永双,李凌婧,等.青藏高原鲜水河活动断裂带蠕变斜坡地质灾害InSAR识别研究[J].地质学报,2017,91(8):1694–1705.]
- [9] Zhang Yuming,Tang Ximei.Application of remote sensing in the geohazard survey of Yanjing–Mangkang section of G214 highway[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2009,20(1):94–98.[张玉明,汤喜梅.G214盐井-芒康段地质灾害调查中遥感技术的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):94–98.]
- [10] Zhang Y,Zhao X,Lan H,et al.A pleistocene landslide-dammed lake,Jinsha River,Yunnan,China[J].Quaternary International,2011,233:72–80.
- [11] Chen J,Dai F,Lv T,et al.Holocene landslide-dammed lake deposits in the upper Jinsha River,SE Tibetan Plateau and their ages[J].Quaternary International,2013,298:107–123.
- [12] Wang P,Chen J,Dai F,et al.Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River,SE Tibetan Plateau:Implications to Holocene tectonic perturbations[J].Geomorphology,2017,217:193–203.
- [13] Peng Jianbing,Ma Runyong,Lu Quanzhong,et al.Geologic-al hazards effects of uplift of Qinghai–Tibet Plateau[J].Adv-ance in Earth Sciences,2004,19(3):457–466.[彭建兵,马润勇,卢全中,等.青藏高原隆升的地质灾害效应[J].地球科学进展,2004,19(3):457–466.]
- [14] Sun Ying,Sui Jia,Wei Sailajia,et al.Uplift of Tibetan Plateau and its relation with geological disasters in Xining City[J].Management and Strategy of Qinghai,2018(3):58–61.[孙莹,隋嘉,魏赛拉加,等.青藏高原隆升与西宁市地质灾害的关系研究[J].青海国土经略,2018(3):58–61.]
- [15] Dai F,Lee C,Deng J,et al.The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River,southwestern China[J].Geomorphology,2005,65(3/4):205–221.
- [16] Yin Yueping.Characteristics of the rapid huge Yigong landslide in Bomi county,Tibet and its disaster reduction[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2000,27(4):8–11.[殷跃平.西藏波密贡嘎高速巨型滑坡特征及减灾研究[J].水文地质工程地,2000,27(4):8–11.]
- [17] Wen B,Wang S,Wang E,et al.Characteristics of rapid giant landslides in China[J].Landslides,2004,1(4):247–261.
- [18] Wang Y,Cheng Q,Shi A,et al.Sedimentary deformation structures in the Nyixoi Chongco rock avalanche:Implications on rock avalanche transport mechanisms[J].Landslides,2018,18:1117–1123.
- [19] Wang Y,Cheng Q,Lin Q,et al.Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche(Tibetan Plateau,China) based on its complex surface landforms[J].Geomorphology,2018,317:170–183.
- [20] Peng Xuanming,Yan Daoping,Huang Bolin.Geohazard distributing and trending in Tibet and its vicinity[J].Geology and Mineral Resources of South China,2006(3):61–69.[彭轩明,鄢道平,黄波林.西藏及邻区地质灾害分布与发展趋势[J].华南地质与矿产,2006(3):61–69.]

- [21] Peng Jianbing. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1): 5–12. [彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(1): 5–12.]
- [22] Song Zhang, Zhang Guangze, Jiang Liangwen, et al. Engineering geological features and geological route selection principle of Sichuan–Tibet railway[J]. *Railway Engineering*, 2016(1): 142–145. [宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J]. *铁道标准设计*, 2016(1): 142–145.]
- [23] Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9–16. [邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 9–16.]



邓建辉, 四川大学水利水电学院教授、博士生导师, 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室副主任, 全国注册岩土工程师, 四川省学术和技术带头人, 国家重点研发计划“青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究”项目负责人, 中国岩石力学与工程学会常务理事, 环境岩土工程分会和地面岩石工程专委会副理事长, 四川省岩石力学与工程学会副理事长, 以及《岩石力学与工程学报》《岩土力学》等期刊编委。主要研究边坡工程与地质灾害、原型监测与反馈分析。曾获得国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技进步奖多项; 发表论文 100 余篇, 其中 SCI、EI 收录 70 余篇; 曾获得《Canadian Geotechnical Journal》2001 年度最佳论文提名奖 (the R.M. Quigley Award)。

(编辑 李轶楠)

引用格式: Deng Jianhui, Dai Fuchu, Wen Baoping, et al. Investigation on the catastrophic mechanism and risk control measures of major landslides in Tibetan Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 1–8. [邓建辉, 戴福初, 文宝萍, 等. 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 1–8.]