中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

贵州“7•23”水城滑坡触发机制及二次滑坡动力致灾分析

张彦博，孙　俊，陈　涛，李志鹏，刘碧龙，廖德武

Triggering mechanism and secondary landslide analyses of the “7•23” Shuicheng landslide in Guizhou

ZHANG Yanbo, SUN Jun, CHEN Tao, LI Zhipeng, LIU Bilong, and LIAO Dewu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312016

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与隐患点致灾范围预测

Dynamic analysis and prediction of rear slope affected area of the Jianshanying landslide in Shuicheng County, Guizhou Province

张磊, 周银朋, 庄宇, 邢爱国, 何君毅, 张彦博　中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 1–7

对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考

Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis

李同录, 李颖, 赵丹旗, 胡向阳, 李萍　中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 25–32

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysison the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48–53

雅砻江中游楞古水电站夏日滑坡发育特征及稳定性分析

Characteristics and stability analysis of Xiari landslide at Lenggu hydropower station in the middle reach of the Yalong river

裴小龙, 杨瀚文, 宋东阳, 杨斌, 田野　中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 75–82

贵州松桃长冲组滑坡形成机理分析

Analysis of the formation mechanism of landslide in Changchong group, Songtao, Guizhou

穆启超, 王万迁, 王琦, 严景题　中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 40–47

岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测

Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province

王琦, 胡亚净, 宋伟利, 穆启超　中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 75–84

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312016
张彦博, 孙俊, 陈涛, 等. 贵州“7•23”水城滑坡触发机制及二次滑坡动力致灾分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 18-26.
ZHANG Yanbo, SUN Jun, CHEN Tao, et al. Triggering mechanism and secondary landslide analyses of the “7•23” Shuicheng landslide in Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 18-26.

贵州“7•23”水城滑坡触发机制及二次滑坡动力致灾分析

张彦博[1,2], 孙　俊[3], 陈　涛[1], 李志鹏[2], 刘碧龙[2], 廖德武[3]
（1. 清华大学安全科学学院，北京　100084；2. 北京辰安科技股份有限公司，北京　100085；3. 贵州地矿基础工程有限公司，贵州 贵阳　550081）

摘要：2019 年 7 月 23 日，贵州省六盘水市水城区鸡场镇发生特大山体滑坡，造成了 43 人遇难，9 人失踪。滑坡发生后，残留滑体堆积物与附近不稳定斜坡仍然威胁坡脚村民居住地。基于滑坡现场精细调查，探明了水城滑坡地质环境条件，阐述了滑坡的孕灾环境、诱发因素与破坏模式；首次对滑后残留滑体堆积物与附近不稳定斜坡进行了不同降雨条件下的稳定性分析。结果表明：极端降雨可能促使水城滑坡的大量堆积物发生二次滑坡运动；此外，基于流态滑体运动控制方程及数值求解，对二次失稳破坏后的滑体动力学过程及潜在致灾范围进行了预测。研究结果可对水城滑坡二次破坏的滑体动力致灾机理与坡脚村民生命财产的保障工作起到支撑作用。

关键词：水城滑坡；触发机制；稳定性分析；动力致灾机理
中图分类号：P642.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035(2025)03-0018-09

Triggering mechanism and secondary landslide analyses of the “7•23” Shuicheng landslide in Guizhou

ZHANG Yanbo[1,2], SUN Jun[3], CHEN Tao[1], LI Zhipeng[2], LIU Bilong[2], LIAO Dewu[3]
（1. *School of Safety Science*, *Tsinghua University*, *Beijing*　100084, *China*;
2. *Beijing Global Safety Technology Co. Ltd.*, *Beijing*　100085, *China*;
3. *Guizhou Geological and Mineral Foundation Engineering Co. Ltd.*, *Guiyang*, *Guizhou*　550081, *China*）

Abstract: On July 23, 2019, a catastrophic landslide occurred in Jichang Town, Shuicheng District, Liupanshui City, Guizhou Province, resulting in the tragic loss of 43 lives, with 9 people still missing, and causing direct economic losses estimated at approximately 103 million Yuan. Following the landslide, significant debris and an unstable slope continued to threaten the nearby residences in the Pingzhai and Pingxing groups. Through comprehensive on-site investigations, this study identifies and analyzes both the geological environment and contributing factors of the Shuicheng landslide, providing an in-depth understanding of its triggering mechanisms. For the first time, a thorough stability analysis of the post-landslide residual deposits and the adjacent unstable slope under varying precipitation conditions is presented. The results indicate that extreme

收稿日期：2023-12-15；**修订日期：**2024-05-14　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3320800)；黔科合支撑([2023] 一般 127)
第一作者：张彦博(1993—)，男，湖南长沙人，博士，主要从事地质灾害相关研究。E-mail: zhangyanbo@gsafety.com
通讯作者：孙　俊(1983—)，男，浙江龙游人，水工环地质高级工程师，主要从事西南地区地质灾害防治、地质环境保护、废弃矿山生态修复等研究。E-mail: 172129101@qq.com

rainfall may trigger secondary landslide within the extensive debris deposits from the Shuicheng landslide. Additionally, we performed a dynamic behavior analysis of the unstable slope using rheological models and depth-averaged approaches. The findings provide essential insights into the dynamical mechanisms driving secondary landslide disasters and are crutial for safeguarding the lives and properties of residents at the slope toe.

Keywords: Shuicheng landslide；triggering mechanism；slope stability；dynamic behavior

0　引言

我国西南岩溶山区地质环境脆弱，多形成“上硬下软、上陡下缓”的孕灾地貌，加上人类工程活动强烈，极端降雨频发，是我国高位远程崩滑灾害的高易发区[1]。这种高位远程滑坡不仅监测预警难、突发性高，并且动力致灾过程复杂，形成了大量造成群死群伤的灾害事件[2－4]。

2019 年 7 月 23 日 20 时，贵州省水城县鸡场镇坪地村岔沟组发生高位滑坡，大约 1.50×10^6 m^3 的滑体高速下滑，铲刮坡面的松散堆积物，形成体积约为 2.00×10^6 m^3 的堆积体，造成了 43 人遇难，9 人失踪，直接经济损失约 10 300 万元。水城滑坡发生后，很多学者对其启动机理、动力学过程、铲刮作用等进行了分析。Zhang 等[5]基于 DAN 模拟和滑震信号反演对水城滑坡动力学过程进行了分析；Zhuang 等[6]采用电镜扫描、高密度电法、数值模拟等手段多源协同研究了水城滑坡的高速远程动力学特征；高浩源等[7]分析了水城滑坡运动过程和冲击铲刮特征，认为铲刮可分为冲击嵌入-剪切推覆-裹挟混合三个阶段；郑光等[8]阐述了水城滑坡发生的成因机理，并分析了滑坡的动力学过程；李华等[9]探讨了公路切坡和持续降雨对水城滑坡稳定性的影响，并分析了滑坡的形成机制。刘建强等[10]基于主成分分析方法，研究了水城滑坡水−岩（土）作用过程与对滑坡稳定性的影响。Guo 等[11]基于地形地貌对水城滑坡动力学过程进行了详细的研究。

水城滑坡后，斜坡残留大量滑体堆积物，在降雨诱发条件下，存在二次滑坡的隐患。然而，当前对水城滑坡的研究主要集中于“7•23”水城滑坡的失稳机理与动力学过程，针对滑后的残留堆积体和边坡的稳定性分析与潜在动力致灾范围的研究还十分欠缺。

本文基于无人机、钻探等滑坡现场调查手段，探明了水城滑坡地质环境条件，阐述了滑坡的基本特征，分析了滑坡成因与破坏模式；基于传递系数法，首次对滑坡后的残留堆积物与附近不稳定斜坡进行了不同降雨条件的稳定性分析，并对二次滑坡动力致灾机理进行了研究分析。

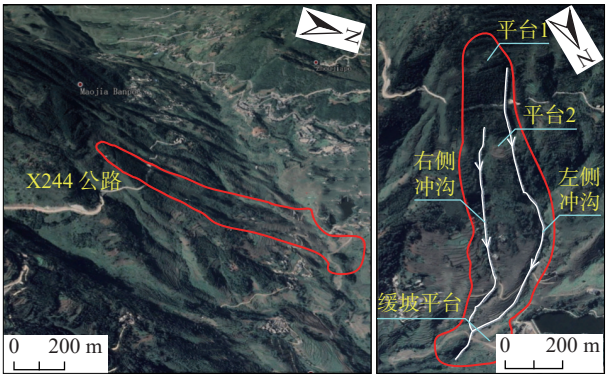
1　水城滑坡地质环境条件

1.1　地质条件

水城位于云贵高原中部，地形总体西北高、东南低，属于侵蚀、溶蚀地貌。构造位于扬子准地台，断层发育，地质构造复杂，节理裂隙较为发育，风化、卸荷等地质作用明显，对水城滑坡的发育起到综合控制影响作用。

水城区气候温和，雨量充沛，年平均气温 11 ~ 17 °C，降水主要集中在 6—8 月，年均降雨 940 ~ 1 450 mm。据六盘水市气象局提供资料，滑坡发生前一周内水城区日平均降雨量较大。7 月 18 日 20 时—23 日 20 时，水城区鸡场镇累计降雨量鸡场站点 141.8 mm，坪地村站点 189.1 mm。7 月 23 日 15 时 03 分六盘水市自然资源局联合市气象局发布地质灾害气象风险黄色预警。

研究区滑前地形地貌图如图 1 所示，斜坡顶部高程约为 2 070 m，坡底高程 1 250 m；整体地形较为平缓，滑坡区域发育有两条冲沟；斜坡整体呈折线型，存在三级缓坡。



（a）滑前地形地貌图　　（b）滑前两侧冲沟

图 1　（a）滑前地形地貌图和（b）滑前两侧冲沟（Google Earth，2018.11.14）

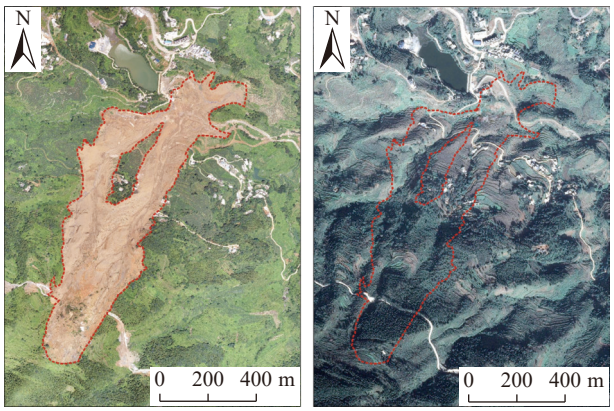
Fig. 1　(a) Pre-event topography and geomphology map of the Shuicheng landslide and (b) Pre-event gullies on both sides (Google Earth, 2018.11.14)

滑坡主要地层岩性为二叠系峨眉山玄武岩组；区内出露地层有第四系残坡积，下三叠统飞仙关组（T_1f），上二叠统龙潭组（P_3l），上二叠统峨眉山玄武岩组（$P_3\beta$）及中二叠统茅口组（P_2m）。

滑坡区域内人类工程活动强烈，包括斜坡中下部居民房屋及斜坡上部 X244 公路的建设；其中，X244 公路 1984 年建成，2016、2018 年两次改扩建，未实施防护工程，对周边地质环境破坏较为严重，削弱了滑体的抗剪强度，对滑坡的形成有一定的影响。

1.2 滑坡基本特征

水城滑坡发生前后影响对比见图 2。滑坡主滑方向 20° ~ 26°，整个滑坡区域呈长条形，平均坡度约 24°，滑坡体总长 1 250 m，宽 200 ~ 600 m，滑坡体后缘陡壁高程约 1 665 m，坡脚岔沟处海拔约为 1 200 m，相对高差 465 m，沿主滑方向最大运动距离约为 1 250 m，滑坡面积约 4×10^4 m^2，滑坡体积约 2.00×10^6 m^3。



（a）滑坡滑后影像图 （b）滑坡滑前影像图

图 2 （a）滑坡滑后影像图 和（b）滑坡滑前影像图

Fig. 2 (a) Post-event image of the Shuicheng landslide and (b) Pre-event image of the Shuicheng landslide

滑坡源区后缘为小平台，滑坡发生后在源区后部形成了一处高差 50 ~ 60 m 的玄武岩基岩后壁（图 3），壁面呈弧形起伏，为一贯通性较好的长大节理面组成，基岩壁壁面产状：20° ~ 40°∠38° ~ 53°（顺坡向面理）；岩体发育三组主要片理：①40°∠53°（外倾），②20°∠38°（外倾），③184°∠52°（内倾）；滑坡后壁上覆为厚约 2 m 的残坡积层，下伏为弱风化块状岩体，岩性为杏仁状玄武岩、凝灰岩。基于原公路处钻孔结果，钻探施工深度超过原路面高程近 10 m 均未见到原公路路基物质成分，故推测滑坡剪出口位于县道以下位置，高程范围为 1 505 ~ 1 515 m。

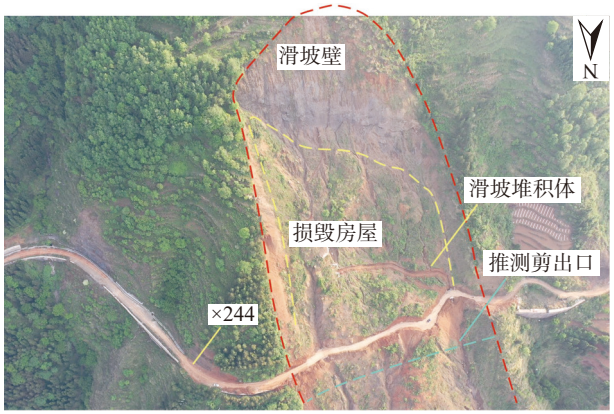


图 3 滑坡源区后缘基本特征

Fig. 3 Basic characteristics of the rear edge of the landslide source area

滑坡左侧残留体较薄，至左侧边界陡坎下部，残留体被水流冲蚀后，底部出露墨绿-绿白色凝灰岩基岩面。滑坡残留体与滑坡左侧边界之间为陡坎，陡坎为土层覆盖，颗粒粒径较细，推测为弯道超高导致的土体薄层覆盖。

滑坡右侧为小山脊，岩土体滑走后在滑坡区右侧和右后侧形成了基岩陡壁（图 4），高差 30 ~ 40 m。由于陡壁突然临空，上部的残积层和强风化岩体二次失稳，形成数个小型垮塌体覆盖在滑坡残留体后部，这些小滑塌宽度 30 ~ 40 m，前后高差约 20 m，体积 6 000 ~ 8 000 m^3。原位于滑坡区右后侧的一处混凝土民房随滑体滑移后破坏（图 3、图 4），经测量运动距离约 122 m，运动方向为 24°。

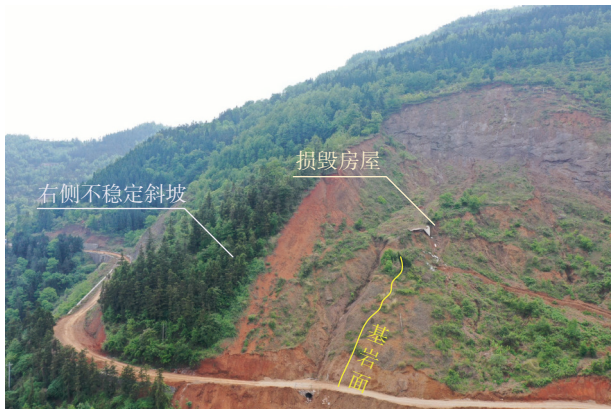


图 4 滑坡右侧边界特征

Fig. 4 Characteristics of the right boundary of the landslide

基于研究区域的基本孕灾条件、工程活动扰动与滑后侧面临空条件，水城滑坡源区右侧存在不稳定隐患区域，如图 4 标识所示。不稳定斜坡右侧边界根据地貌特征，以其右侧冲沟为界，如图 4 黄线标识所示。斜坡坡向为 25° ~ 32°，整个斜坡区域呈“上窄下宽”的长条形，斜坡现状地形整体呈起伏波状，斜坡单元后缘区域较平缓，中部有一个平台，前缘为缓坡区（坪寨组居民区），坡度约 15° ~ 32°，斜坡体总长 1 030 m，宽 70 ~ 305 m，斜坡体后缘高程约 1 595 m，坡脚坪寨组前缘冲沟处海

拔约为 1 155 m，相对高差 440 m，整个斜坡面积约 19.4×10^4 m^2，根据现场调查及物探结果显示，斜坡岩土体结构从上至下为第四系残破积含砾粉质黏土、碎石土及上二叠统峨眉山玄武岩组（$P_3\beta$）的玄武岩，第四系堆积层及散体-碎裂结构的强风化玄武岩平均厚度约 15 m。第四系残破积含砾粉质黏土、碎石土，碎石块粒径一般为 3 ~ 6 cm，碎石含量约 35%，偶含直径大于 1.0 m 的块石，碎块石原岩成分为玄武岩；在坪寨组居民区前缘坡脚公路边坡处可见堆积层具一定韵律性，如图 5 所示。图 5 中，①为碎石土，顶部为根植层；②③为含碎石粉质黏土，分界线处渗水。

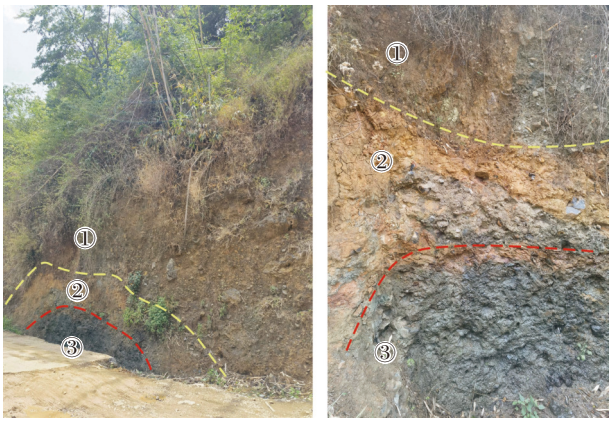


图 5　斜坡底部出露土层特征

Fig. 5　Characteristics of the exposed soil layers at the slope bottom

2　滑坡成因分析

水城滑坡的变形特征、产生现象并结合环境地质条件综合分析，滑坡发生主要形成因素为地形特征、斜坡岩土体特征、水文地质条件及极端天气、人类工程活动等。

2.1　形成条件

滑坡发生前斜坡整体地形较为平缓，滑坡部位斜坡呈波状起伏，有三级缓坡平台（后缘顶部平台、中上部平台及中下部缓坡平台），中上部平台区域（滑源区）没有系统的排水通道，不利地表水排泄，且在斜坡上呈“陡缓陡”地形，陡坡部位临空条件较好，坡度为 35° ~ 50°，临空高度达大于 10 m，为滑坡失稳提供了条件。

调查区覆盖层主要成分为斜坡中上部的残坡积粉质黏土及中下部的滑坡堆积层碎石土，滑坡堆积层较厚（图 5），下伏地层为上二叠统峨眉山玄武岩组（$P_3\beta$）的玄武岩，岩体节理裂隙发育，强风化层呈散体-碎裂结构（图 6）。

综合现场调查、钻孔揭露及物探成果，上覆土层及

图 6　滑坡右侧边界处山脊岩体特征（强风化玄武岩）

Fig. 6　Characteristics of the ridge rock at the right boundary of the Shuicheng landslide (highly weathered basalt)

破碎强风化玄武岩厚度约 15 ~ 41 m；含大量碎石，抗剪强度较低，在受扰动的情况下，因自身重力容易下滑。其次，大量地表水易下渗在岩土交界面及强风化层界面上汇聚，长期受地下水浸泡影响，强风化玄武岩和表层黏土层抗剪强度降低，进而造成斜坡岩土体失稳。

地下水的主要类型为第四系孔隙水和基岩（玄武岩）裂隙水，主要补给源为大气降水。根据现场调查来看，滑坡区受大气降雨影响明显。滑坡体后缘汇水面积较大，降雨条件下，后缘大量地表水漫流下渗，致使地下水水位抬高，并向滑坡体前缘斜坡体上排出。高水位的地下水对堆积体产生强大浮托力，不利斜坡稳定。

2.2　诱发因素

降雨是水城滑坡形成的主要诱发因素。首先，雨水浸润后缘岩土体自重增大；其次，降雨导致滑面强风化玄武岩和黏土层软化，抗剪强度降低，后缘岩土体剪切下错，对中部岩土体产生水平推力，推动中部及前缘岩土体滑动，从而促进了滑动面的形成；最后，大量雨水沿覆盖层下渗，富集于滑带处，抬高了地下水水位，对滑体土产生强大的浮托力，且长期浸泡降低了前缘抗滑岩土体的物理力学指标，从而引起坡体失稳。

滑源区公路建设开挖，改变了原有地形地貌，破坏原始斜坡力学平衡，卸荷作用强烈，且公路开挖形成的高陡边坡又为滑坡的形成提供了良好的位移空间。

综上来看，滑坡区处于地质破碎带，覆盖层松散且较厚，岩体风化强烈，山高坡陡，强降雨导致土体和强风化岩体饱和，形成了地下高水位，降低了岩土体的摩擦系数及抗滑力，斜坡上 X244 县道施工坡面清理降低了山体阻滑的能力，在重力和降雨的作用下，导致山体失稳，并转化为高位远程滑动，形成特大型滑坡地质灾害。滑坡体变形、破坏模式分析详见表 1。

表 1　滑坡成因分析一览表

Table 1　Overview of landslide causation analysis of the Shuicheng landslide

主要影响因素	地形地貌	滑坡体发育于波状起伏地形的斜坡体上，后缘为平台区，汇水面积较大。坡体呈“陡缓陡”交替分布，地面起伏较大，滑源区没有系统的排水通道，不利地表水排泄。斜坡上呈“陡缓陡”地形，陡坡部位临空条件较好，坡度35°～50°，临空高度大于10 m，为滑坡失稳提供了条件
	地层岩性	根据钻探及物探资料显示，滑坡体主要为第四系坡堆积层及强风化玄武岩，强风化层呈散体-碎裂结构，抗剪强度较低；其次，大量地表水易下渗在强风化层界面上汇聚，长期受地下水浸泡影响，界面处岩土体强度易降低，不利坡体稳定
	水文条件	根据现场调查来看，滑坡区受大气降雨影响明显。滑坡体后缘汇水面积较大，降雨条件下，后缘大量地表水漫流下渗，致使地下水水位抬高，并向滑坡体前缘斜坡体上排出。高水位的地下水对堆积体产生强大浮托力，不利斜坡稳定
	诱发外因	降雨是滑坡形成的主要诱发因素，一方面增加了坡体自重，另一方面大量雨水沿覆盖层下渗，富集于滑带处，长期浸泡降低了滑带土的物理力学指标，不利于坡体稳定。同时后缘大面积的汇水抬高地下水水位，向沟道排出，对堆积体产生强大的浮托力，降低坡体稳定；斜坡上公路开挖形成高边坡，改变了原有地形地貌，破坏原始斜坡力学平衡，且公路开挖形成的高陡边坡又为滑坡的形成提供了良好的位移空间
变形模式		滑坡在强降雨作用下，大量雨水下渗浸泡后，产生强大浮托力，坡体在自重作用下，易沿底部强风化层界面向下部临空侧整体发生滑动变形，为一推移式变形破坏滑坡
破坏模式		综合现场调查、钻孔揭露及物探成果，水城区鸡场镇坪地村岔沟组滑坡物质组成分为三层，自上而下分别为：第四系堆积层，强风化玄武岩及中风化玄武岩层；根据钻探、物探资料及现场变形特征推测，滑坡的破坏模式可能为在堆积层及强风化玄武岩层范围内产生似圆弧型滑动，及在堆积层与基岩界面产生折线滑动

3　斜坡稳定性与二次滑坡动力致灾分析

3.1　稳定性分析

水城滑坡后，斜坡残留大量滑体堆积物、两条冲沟之间存在未滑区域；沿 1−1′剖面，滑体强风化层较厚，拟定强风化层界面为斜坡整体滑动的潜在滑动面，潜在剪出口位于斜坡底部(图 7 黄色线)；将 1−1′剖面原水城滑坡剪出口作为对照组，采用滑前地形，累积滑源区条形地基的混凝土民房作为附加荷载，稳定性分析验算。1−1′剖面对照滑面与主要滑面的稳定性分析模型如图 8 a—b 所示。

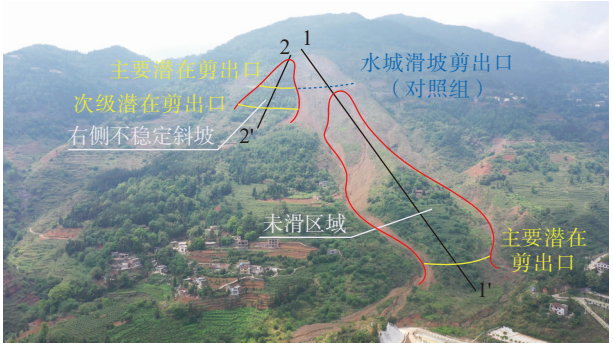


图 7　滑后稳定性分析区域

Fig. 7　Post-landslide stability analysis area

其次，滑后地形导致右侧边界附近斜坡临空，卸荷严重；在强降雨条件下，原水城滑坡区域边界右侧外容易形成不稳定斜坡，如图 7 中 2−2′所示。对于右侧不稳定斜坡 2−2′剖面(图 9)：①右侧斜坡地形地貌、岩土体

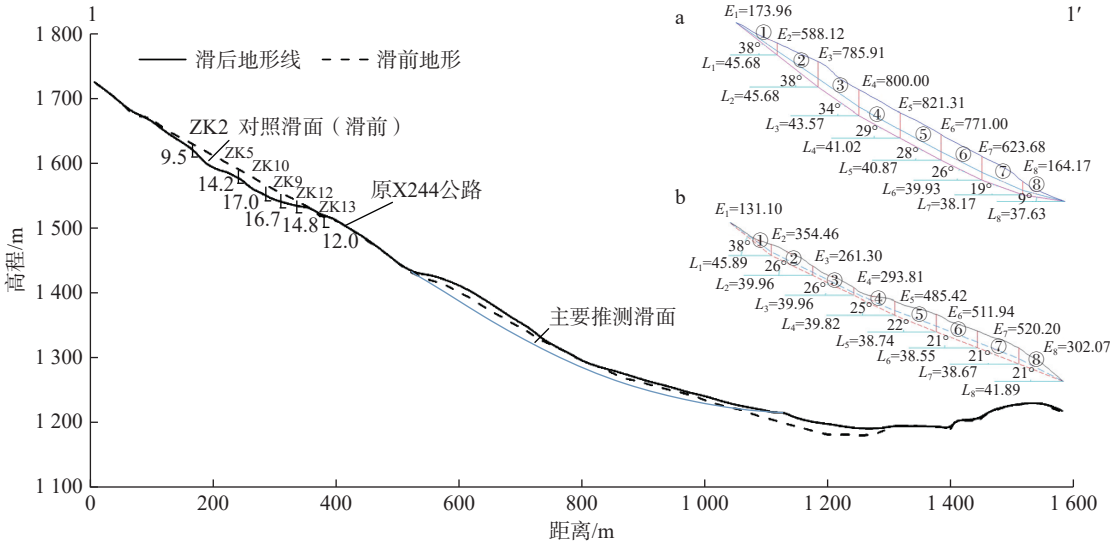


图 8　1−1′剖面示意图

Fig. 8　The longitudinal profile of cross-section 1−1′

注：a 为对照滑面稳定性模型；b 为主要潜在滑面稳定性模型。

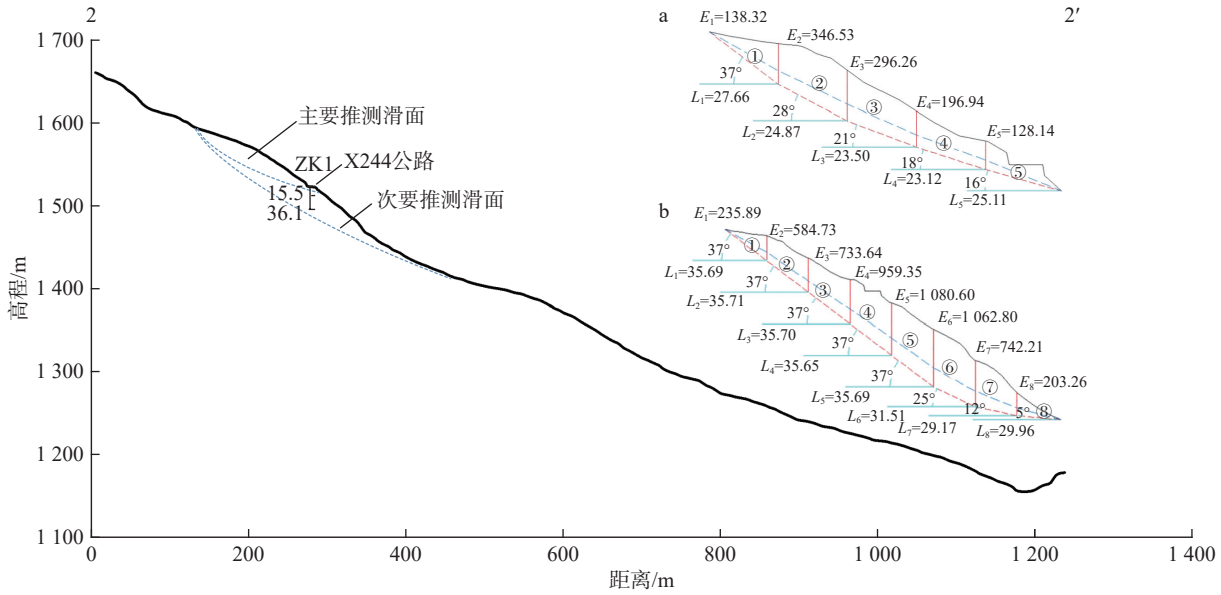


图 9　2−2′剖面示意图

Fig. 9　The longitudinal profile of cross-section 2−2′

注：a 为主要潜在滑面稳定性模型；b 为次级潜在滑面稳定性模型。

结构、水文地质等条件基本与已滑动区一致，加之 X244 公路建设期间工程活动影响，切坡卸荷现象严重，结合钻孔资料，钻探施工深度超过原路面高程近 10 m 均未见到原公路路基物质成分，故拟定右侧不稳定斜坡主要潜在剪出口位于县道以下位置；②基于右侧斜坡现状基本特征，堆积层及强风化层较厚，拟定强风化层界面长节理面作为次级潜在滑面，剪出口位于右侧斜坡缓坡平台后缘陡坡底部。2−2′剖面主要潜在滑面与次级潜在滑面的稳定性分析模型如图 9 a—b 所示。

对水城滑坡区域基覆面土体进行现场取样（图 8 钻孔处），取土体的残余剪抗剪强度指标；由滑带土样室内试验成果数理统计得，天然抗剪强度 c 值为 10.2 kPa，φ 值为 22.6°；饱和抗剪强度 c 值为 9.8 kPa，φ 值为 22.3°。

对右侧不稳定斜坡区域基覆面土体进行钻孔取样（图 9 钻孔处），取土体峰值剪抗剪强度指标；由滑带土样室内试验成果数理统计得，天然抗剪强度 c 值为 10.8 kPa，φ 值为 23.1°；饱和抗剪强度 c 值为 10.1 kPa，φ 值为 22.5°。

选取①自重+天然水位作为基础工况、②自重+1/3 饱水作为水城滑坡降雨工况以及③自重+2/3 饱水作为极端降雨工况进行分析。根据现场野外调研情况，滑坡后壁上覆为厚约 2 m 的残破积层，呈浸湿状态。基于李华等[9]研究，水城滑坡后缘玄武岩壁见大量的水从玄武岩-残坡积土间隙中大量渗出；此外，李华等认为存在 3 m 的毛细水上升高度，将地下水位线以下的风化玄武岩视为饱和状态；因此，结合稳定性分析中滑体条块的厚度数据，选取了 1/3 饱水平均厚度作为水城滑坡降雨条件下稳定性分析的入渗。2/3 饱水厚度是对应百年一遇降雨或郑州“7•20”暴雨等极端情况做的饱水厚度假设，郑州“7•20”暴雨短时内高达 200 mm/h 的雨型达到了超蓄产流条件，土壤基本处于饱和状态；此外，水城滑坡汇水面积较大，因此本文选取了 2/3 饱水厚度作为极端降雨条件下的土壤饱和厚度。

本文基于传递系数法对斜坡稳定性进行计算，其控制方程为：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1}\left(R_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j\right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1}\left(T_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j\right) + T_n} \tag{1}$$

式中：R——抗滑力；

T——下滑力；

Ψ——传递系数，下标代表条块序号。

依据《滑坡防治工程勘察规范》评价标准，结果如表 2 所示。

在自重+天然水位工况时：1−1′剖面的主要滑面与对照滑面稳定系数为 1.174 和 1.122，处于稳定与基本稳定状态；2−2′剖面的主要滑面与次级滑面的稳定系数为 1.135 和 1.302，处于稳定与基本稳定状态；

在自重+1/3 饱水工况时：1−1′剖面的主要滑面与对

表 2 稳定性计算结果表

Table 2 Slope stability calculation results

剖面	滑面	计算工况	稳定系数	评价
1−1′	主要滑面	自重+天然水位	1.174	稳定
		自重+ 1/3饱水	1.073	基本稳定
		自重+2/3饱水	1.035	欠稳定
	对照滑面	自重+附加荷载+天然水位	1.122	基本稳定
		自重+附加荷载+1/3饱水	1.037	欠稳定
		自重+附加荷载+2/3饱水	0.996	不稳定
2−2′	主要滑面	自重+天然水位	1.135	基本稳定
		自重+ 1/3饱水	1.021	欠稳定
		自重+ 2/3饱水	0.989	不稳定
	次级滑面	自重+天然水位	1.302	稳定
		自重+1/3饱水	1.105	基本稳定
		自重+ 2/3饱水	1.064	基本稳定

照滑面稳定系数为 1.073 和 1.037，处于基本稳定与欠稳定状态；2−2′剖面的主要滑面与次级滑面的稳定系数为 1.021 和 1.105，处于欠稳定与基本稳定状态；

在自重+2/3 饱水工况时：1−1′剖面的主要滑面与对照滑面稳定系数为 1.035 和 0.996，处于欠稳定与不稳定状态；2−2′剖面的主要滑面与次级滑面的稳定系数为 0.989 和 1.064，处于不稳定与基本稳定状态。

对水城滑坡区域（1−1′剖面）及右侧不稳定斜坡（2−2′剖面）稳定性进行的计算分析，由于对照组计算结果与滑坡实际情况基本吻合，验证了原滑坡区域残留堆积物、未滑区域与右侧不稳定斜坡在暴雨工况下的稳定性计算结果可信。在极端降雨工况下，水城滑坡残留堆积物与未滑区域处于欠稳定状态，右侧不稳定斜坡沿主要滑面处于不稳定状态。极端暴雨下，右侧不稳定斜坡首先发生破坏。因此，需要对右侧不稳定斜坡进行动力致灾分析。

3.2 右侧不稳定斜坡动力致灾分析

高速远程滑坡-碎屑流往往呈现出流态化的动力学特征[12]，滑体运动控制方程的形式与浅水方程类似，其笛卡尔坐标系下的守恒方程表述为：

$$\frac{\partial}{\partial t}h+\frac{\partial}{\partial x}hu+\frac{\partial}{\partial y}hv=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hu+\frac{\partial}{\partial x}hu^2+\frac{\partial}{\partial y}huv+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}gh^2+gh\frac{\partial}{\partial x}z_t(x,y)+\tau_x=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hv+\frac{\partial}{\partial y}hv^2+\frac{\partial}{\partial x}huv+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial y}gh^2+gh\frac{\partial}{\partial y}z_t(x,y)+\tau_y=0 \tag{4}$$

式中：h——滑体厚度；

u、v——x、y 方向的速度；

t——时间；

$z_t(x,y)$——底坡高程；

τ——摩擦项，其下标代表摩擦方向。

Xing 等[13]基于环剪试验与数值模拟方法，验证了包括摩擦项和湍流项的 Voellmy 流变模型适合模拟高速远程滑坡动力学过程。Voellmy 流变模型为：

$$\tau_x=-\left(\sigma_z f+\frac{\rho g u^2}{\xi}\right) \tag{5}$$

式中：f——摩擦系数；

ξ——湍流系数；

σ_z——正应力，定义方程为：

$$\sigma_z=\rho h\left(g\cos\alpha+\frac{\sqrt{u^2+v^2}}{R}\right) \tag{6}$$

式中：R——曲率半径；

α——坡度。

根据稳定性分析结果，基于 Matlab 编程，采用 Lax-Wendroff 差分格式对方程组（2）—（4）进行离散并数值求解，得到右侧不稳定斜坡破坏后的动力致灾过程（图 10）。

如图 10 所示，当不稳定斜坡（2−2′）沿主要滑面发生破坏时，滑体沿左前方剪出，向左侧水城滑坡源区发生倾倒；5 s 后土质滑体逐渐解体，其中大量滑体沿原水城滑坡的滑移路径在重力作用下加速滑动，少量滑体解体后与水城滑坡右侧边界外下滑；20 s 后，滑体主体沿水城滑坡右侧冲沟滑移，少量滑体沿水城滑坡右侧边界外沟谷滑动；最终滑体主体停在水城滑坡右侧冲沟前缘，少量滑体沿右侧边界外的沟谷堆积分布。

水城滑坡滑体高速滑移，铲刮裹挟了大量的表层松散土体，为右侧不稳定斜坡二次滑坡创造了优势滑移路径；右侧冲沟内的曲率半径较小，导致滑体在冲沟内受到的支撑力与摩擦阻力较大，造成二次滑坡在冲沟内的减速与堆积。

受控制方程的限制，模拟中将滑床视为不可铲刮的刚体；然而，水城滑坡后，仍有大量滑坡堆积物残留于斜坡上。不稳定斜坡二次滑坡冲击、铲刮等运动过程中，铲刮裹挟松散的残留堆积物，甚至造成残留堆积物的破

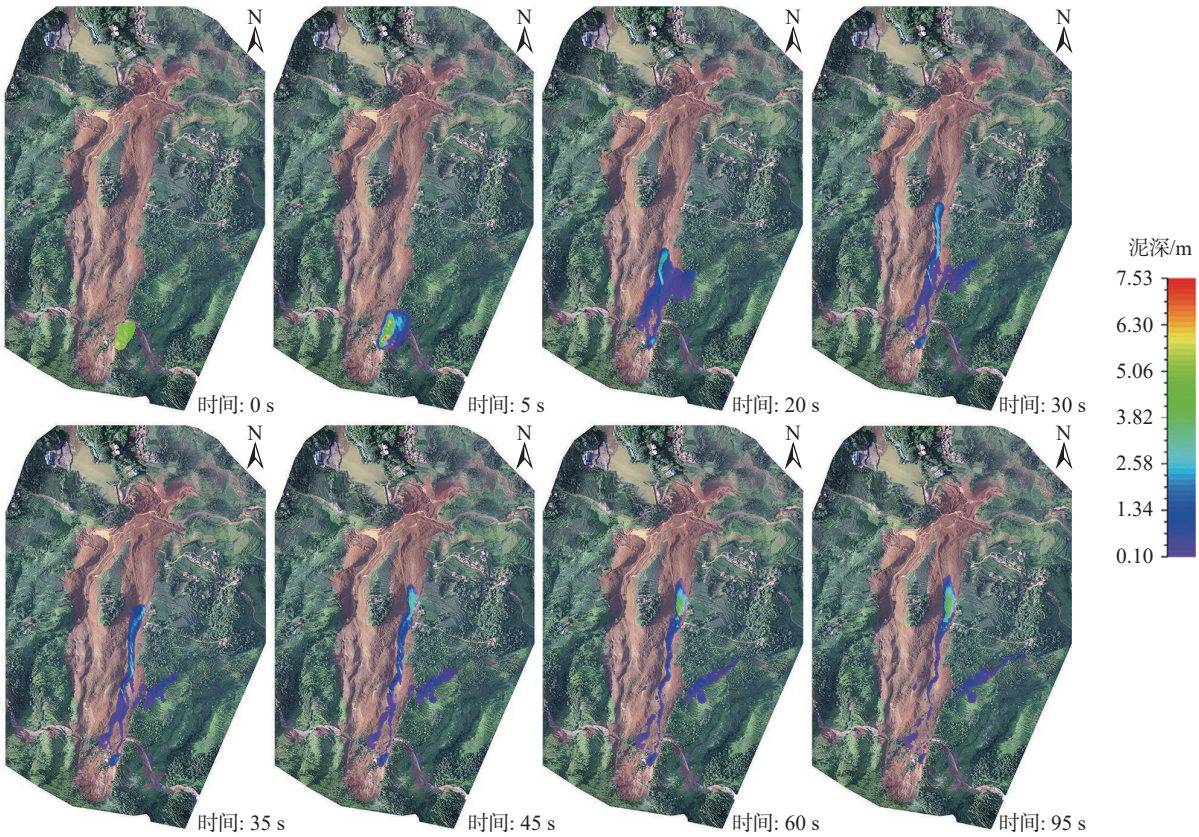


图 10　不稳定斜坡动力致灾过程

Fig. 10　Dynamic disaster-causing process of post-failure unstable slopes

坏与启动，可能导致滑体大量增积、滑移路径增加和动力致灾范围变大，严重威胁斜坡下部岔沟组及坪寨组居民及斜坡前缘区域内公共设施的生命财产安全。

4　结论

（1）水城滑坡处于地质破碎带，覆盖层松散且较厚，岩体风化强烈，山高坡陡，强降雨导致土体和强风化岩体饱和，形成了地下高水位，降低了岩土体的摩擦系数及抗滑力，斜坡上 X244 县道施工坡面清理降低了山体阻滑的能力，在重力和降雨的作用下，导致山体失稳，并转化为高位远程滑动，形成特大型滑坡地质灾害。

（2）对水城滑坡区域及右侧不稳定斜坡稳定性进行的计算分析，基于对照组验证了稳定性计算结果可信。在百年一遇暴雨工况下，水城滑坡残留堆积物与未滑区域处于基本稳定状态，右侧不稳定斜坡沿主要滑面处于欠稳定状态。

（3）水城滑坡后，仍有大量滑坡堆积物残留于斜坡上。极端降雨可能诱发不稳定斜坡二次滑坡运动，滑体铲刮裹挟松散的残留堆积物，可能导致残留堆积物的破坏与启动，造成滑体大量增积、滑移路径增加及动力致灾范围变大，严重威胁斜坡下部岔沟组及坪寨组居民及斜坡前缘区域内公共设施的生命财产安全。

参考文献（References）：

［1］　李滨，殷跃平，高杨，等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题［J］. 水文地质工程地质，2020，47（4）：5－13.［LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47（4）：5－13.（in Chinese with English abstract）］

［2］　殷跃平，高少华. 高位远程地质灾害研究：回顾与展望［J］. 中国地质灾害与防治学报，2024，35（1）：1－18.［YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35（1）：1－18.（in Chinese with English abstract）］

［3］　许强，郑光，李为乐，等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究［J］. 工程地质学报，2018，26（6）：1534－1551.［XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on October 11 and November 3, 2018［J］. Journal of Engineering Geology, 2018, 26（6）：

1534 − 1551. (in Chinese with English abstract)]

[4] 黄润秋, 许强, 等. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]

[5] ZHANG Yanbo, XING Aiguo, JIN Kaiping, et al. Investigation and dynamic analyses of rockslide-induced debris avalanche in Shuicheng, Guizhou, China[J]. Landslides, 2020, 17(9): 2189 − 2203.

[6] ZHUANG Yu, XING Aiguo, LENG Yangyang, et al. Investigation of characteristics of long runout landslides based on the multi-source data collaboration: A case study of the Shuicheng basalt landslide in Guizhou, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(8): 3783 − 3798.

[7] 高浩源, 高杨, 贺凯, 等. 贵州水城"7•23"高位远程滑坡冲击铲刮效应分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 535 − 546. [GAO Haoyuan, GAO Yang, HE Kai, et al. Impact and scraping effects of the high-elevation, long-runout "7• 23" landslide in Shuicheng, Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 535 − 546. (in Chinese with English abstract)]

[8] 郑光, 许强, 刘秀伟, 等. 2019 年 7 月 23 日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 28(3): 541 − 556. [ZHENG Guang, XU Qiang, LIU Xiuwei, et al. The Jichang landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 28(3): 541 − 556. (in Chinese with English abstract)]

[9] 李华, 史文兵, 朱要强, 等. 贵州省水城县"7•23"灾难性滑坡形成机制研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(6): 188 − 198. [LI Hua, SHI Wenbing, ZHU Yaoqiang, et al. Study on the formation mechanism of "7• 23" catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(6): 188 − 198. (in Chinese with English abstract)]

[10] 刘建强, 许强, 郑光, 等. 贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 132 − 140. [LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Water-rock/soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 132 − 140. (in Chinese with English abstract)]

[11] GUO Jian, YI Shujian, YIN Yanzhou, et al. The effect of topography on landslide kinematics: A case study of the Jichang town landslide in Guizhou, China[J]. Landslides, 2020, 17(4): 959 − 973.

[12] HUNGR O, FELL R, COUTURE R, et al. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity[M]. Landslide Risk Management. Boca Raton: CRC Press, 2005: 109 − 138.

[13] XING Aiguo, WANG Gonghui, LI Bin, et al. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in Guanling, Guizhou, China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(7): 971 − 981.