

doi: 10.6046/zrzyyg.2020348

引用格式: 刘志中, 宋英旭, 叶润青. 渝东北 2014 年“8·31”暴雨诱发滑坡遥感解译与分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 192-199. (Liu Z Z, Song Y X, Ye R Q. An analysis of rainstorm-induced landslides in northeast Chongqing on August 31, 2014 based on interpretation of remote sensing images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 192-199.)

渝东北 2014 年“8·31”暴雨诱发滑坡遥感解译与分析

刘志中¹, 宋英旭², 叶润青³

(1. 中铁十一局集团第四工程有限公司, 武汉 100855; 2. 东华理工大学信息工程学院
江西省放射性地学大数据技术工程实验室, 南昌 330013; 3. 中国地质调查
局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205)

摘要: 2014 年 8 月 31 日—9 月 2 日重庆市渝东北地区出现一次强降雨过程, 引发了大量滑坡, 造成了人员伤亡和重大经济损失。为掌握此次降雨诱发滑坡情况, 分析滑坡与降雨关系, 结合遥感和地理信息系统技术, 通过该地区“8·31”暴雨前后的高空间分辨率卫星遥感影像解译, 获得了暴雨诱发滑坡分布情况, 分析了滑坡发生与降雨、地形之间的关系, 研究发现: 渝东北地区复杂的地质构造条件以及由其产生的特有的构造侵蚀地貌格局, 不仅使得该区域成为暴雨中心, 也导致了该地区降雨型滑坡多发、频发。当日降雨量和累积降雨量分别超过 80 mm 和 160 mm 时滑坡开始持续发生; 当日降雨量超过 100 mm 或累积降雨量超过 210 mm 时滑坡大量发生。迎风坡且坡度在 25°左右斜坡最易发生滑坡。研究认为, 在降雨诱发地质灾害易发性分析及预测预报中, 应考虑山区地形对局地降雨强度和分布的影响, 以提高地质灾害时间和空间分析预测精度。

关键词: 极端暴雨; 滑坡; 遥感解译; 渝东北

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2021)04-0192-08

0 引言

长江流域大部分地区属于亚热带季风气候, 降雨较充沛, 是我国洪涝灾害发生最频繁的地区, 尤其是极端气候的发生对于长江流域的影响极为严重。在气候特征上, 长江流域既受太平洋的影响, 又受到印度洋西南季风的影响, 尤其是全球气候变暖加剧了极端天气、气候事件的发生, 年极端降雨事件表现为增加趋势^[1]。且年极端降雨发生在暖季的比例达到 80% 以上, 几乎集中了所有最大量级的极端降雨^[2]。2000 年以来, 长江流域处在多雨的年代际背景中^[3]。历史气象监测数据显示, 长江中上游地区, 多年平均降雨量和连续最大降雨量分布在重庆市万州和开州附近区域, 其中开州监测到的连续最大降雨量超过 450 mm。因此, 渝东北地区年降雨量大, 出现极端降雨天气的频次高, 在极端天气的影响

下, 降雨型地质灾害多发、频发, 以滑坡、崩塌、泥石流等斜坡地质灾害为主。如 1981 年、1982 年、1998 年、2014 年、2017 年和 2018 年等年份的汛期均出现了极端天气, 受到极端天气的影响, 在川东(渝东北)、鄂西诱发大量的滑坡、崩塌地质灾害。1981 年 7—9 月, 四川省遭受了特大暴雨的袭击, 使全省 18 个地、市、州的 90 多个县区发生了约 6 万处滑坡, 其中规模较大的达 4.7 万处^[4]。1982 年 7 月川东暴雨期间, 重庆云阳县境内共发生大中型滑坡 76 处^[5], 如鸡扒子滑坡^[6], 堵塞长江河道。2014 年 8 月 30 日—9 月 2 日, 渝东北地区出现了持续强降雨的天气, 奉节县、云阳县、巫山县、巫溪县和开州区等地区均出现了极端降雨天气, 出现大量滑坡、危岩、泥石流等地质灾害, 造成了 32 人死亡, 10 人失踪, 129 人受伤, 7 024 间房屋垮塌, 直接经济损失约 5.8 亿元, 造成人员伤亡、道路中断、房屋冲毁, 水、电、气等基础设施被毁, 严重影响人民群众的正常生

收稿日期: 2020-11-06; **修订日期:** 2021-02-09

基金项目: 东华理工大学江西省放射性地学大数据技术工程实验室开放基金项目“基于地学大数据的滑坡危险性动态评价研究”(编号: JELRGBDT202004)、“基于大数据分析与机器学习的相山铀矿田大地电磁数据特征提取与噪声抑制”(编号: JELRGBDT202003)、江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心基金项目“柴达木盆地油砂有机地球化学特征研究-应用可视化建模技术”(编号: JETRCNGDSS202002)、东华理工大学博士科研启动基金项目“基于多源数据的滑坡灾害风险动态评价研究”(编号: DHBK2019218)和宜昌市资源环境承载力调查评价项目(编号: DD20190315)共同资助。

第一作者: 刘志中(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事地质工程、隧道工程、安全工程等方面的研究。Email: 798636717@qq.com。

通信作者: 宋英旭(1989-), 男, 博士, 主要从事地质灾害危险性评价方向的研究。Email: yxsong@ecut.edu.cn。

活^[7]。2017年9—10月华西久雨,长江中上游三峡库区持续阴雨天气达1个月以上,降雨量是往年同期的2~3倍甚至更多,诱发了滑坡变形及大规模滑移,如秭归县柏堡滑坡和盐关滑坡、巫溪县广安村滑坡等。

遥感影像具有多源、多时相、多时空分辨率、覆盖面广的特征,非常适于开展灾害地质调查工作。遥感、地理信息科学等技术的发展为长江三峡库区的精细化地质调查提供了有力的技术保障,很好地解决了库岸消落带地形变化、重点地区地质灾害隐患调查、地质环境破坏等地质新问题^[8]。

20世纪70年代,就有相关学者利用SPOT影像进行滑坡块体运动的识别及滑坡危险性制图的工作^[9]。与传统的地质调查方法相比,基于光学影像特别是航空影像的滑坡解译更加简单且经济实惠,信息的存储和传递也更加便捷^[10]。文广超等^[11]利用Landsat影像提取了四川茂县滑坡和贵州纳雍等6个滑坡遥感特征。随着微波遥感技术发展,合成孔径雷达干涉测量技术也被广泛地应用到地质灾害调查和特征提取中。Colesanti等^[12]将差分干涉合成孔径雷达技术用于滑坡识别。此外,遥感影像也为滑坡易发性区划和滑坡风险评价提供了数据源,如植被覆盖度、降雨量分布和地形坡度等信息。

本文以渝东北2014年“8·31”极端降雨诱发滑坡为研究对象,基于高空间分辨遥感影像开展滑坡解译工作,获取了本次暴雨诱发滑坡的分布情况,结合降雨遥感观测数据,分析了滑坡与暴雨、地形关系。从区域地质构造的角度,探讨了渝东北地区极端降雨和滑坡多发、频发的原因,为降雨诱发地质灾害易发性分析及预测预报提供依据。

1 2014年“8·31”极端降雨特征分析

1.1 渝东北地区2014年“8·31”极端降雨特征

2014年8月底和9月初,渝东北地区出现了一次广泛的强降雨过程,此次降雨持续时间在3~6d。此次极端降雨的最大特点是雨量大,局部地区降雨量超过300mm,日降雨量超过200mm。在渝东北地区出现特大暴雨降雨,主要降雨时间在8月31日—9月1日,暴雨主要集中在渝东北地区,包括巫溪县、奉节县、云阳县、开州区和万州区等区县。据国家气象站点监测数据显示,8月31日—9月2日,巫溪县累积降雨量为233.3mm,最大日降雨量为214.4mm;开州区的累积降雨量为189.3mm,最大日降雨量为179.3mm(表1)。

表1 渝东北地区2014年秋汛“8·31”极端降雨监测数据
Tab.1 Monitoring data of extreme rainfall on August 31, 2014 of northeast Chongqing

国家气象监测站点	降雨时间	累积降雨量/mm	最大日降雨量/mm
巫溪县	8月31日—9月2日	233.3	214.4
奉节县	8月26日—9月2日	101.8	80.5
云阳县	8月31日—9月2日	129.2	92.5
开州区	8月31日—9月2日	189.3	179.3
万州区	8月31日—9月2日	60.2	35.7

为获取区域性降雨分布,本文通过美国航空航天局全球降雨测量(globe precipitation measurement, GPM)和热带降雨测量任务(the tropical rainfall measuring mission, TRMM)降雨数据,获得了渝东北2014年“8·31”暴雨降雨过程的累积降雨量及最大日降雨量分布(图1)。

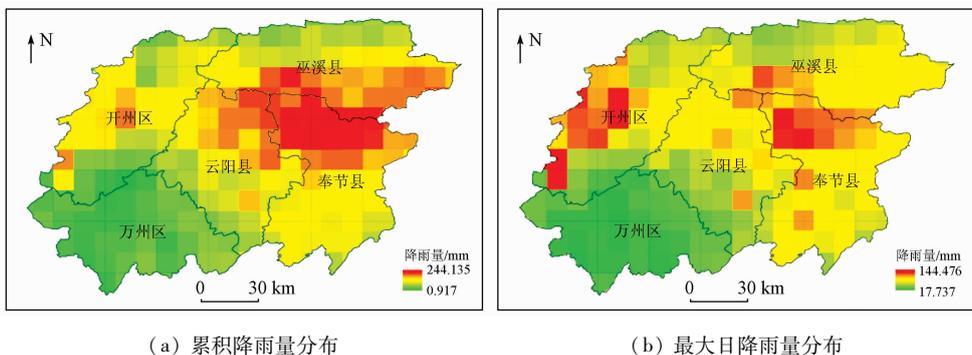


图1 渝东北地区2014年“8·31”极端降雨分布

Fig.1 Precipitation distribution of northeast Chongqing on August 31, 2014

TRMM 是美国航空航天局和日本航空航天探索机构之间的一个联合任务,旨在监测和研究热带地区降雨。其产品包含网格化、TRMM 调整、合并的红外降雨(mm/h)和 RMS 降雨误差估计,具有3h的

时间分辨率和0.25°的空间分辨率,卫星降雨产品在气候和水文研究中得到了大量应用^[13]。GPM 是基于TRMM的新一代全球卫星降雨观测计划,能够统一其卫星群框架内各卫星的观测成果,提升微波

降雨观测能力,其观测方法及降雨反演也为太空卫星降雨观测设立了新标准^[14]。从“8·31”极端暴雨的累积降雨量分布可以看出,暴雨范围涉及重庆的奉节县、巫溪县、云阳县和开州区等地。最大累积降雨量为244.135 mm(图1(a)),最大日降雨量为144.476 mm(图1(b))。其中最大累积降雨量发生在奉节北部、云阳东北部和巫溪南部区域。

1.2 渝东北极端天气形成原因分析

此次暴雨主要集中在渝东北云阳县、奉节县、巫溪县一带,处于大巴山弧形构造与八面山弧形构造交汇地区,北部为巫溪凹褶束向南凸出的弧形构造,而南部为八面山弧形构造向北凸出的弧形构造,山势形成喇叭状地貌。地势上,北部、东部和南部地势高,西部地势低。北部大巴山和南部八面山高程在1500 m以上,东部山势高程在1300~1500 m。

山区复杂下垫面的热力和动力作用对暴雨有触发、加强或削弱、消亡的影响,地形性强迫抬升和辐合是触发暴雨和使之加强的重要机制,喇叭口地形的影响程度是单纯迎风坡地形的2~3倍,对暴雨的增强程度可达地上的9~10倍^[15]。地形强迫的垂直运动在迎风坡较强,以地形抬升作用为主,但边界层摩擦辐合作用也有贡献,在迎风坡形成一个局地垂直环流圈,降雨量大值中心位于上升运动中心以南^[16]。

依据山区地形对暴雨的影响分析,从区域构造的角度可以很好地解释渝东北暴雨成因。从构造及形成的山势走向看(图2),西南季风暖湿气流遇到渝东北口袋状山脉限制,沿着宽广向斜(低地形)向东北方向运移,在开州区、云阳县北部、奉节县北部和巫溪县区域汇聚,受到向斜扬起端形成较高地势阻挡而沿坡爬升,出现地形性强迫抬升和辐合,使对流旺盛,雨量加大,且移动缓慢,形成强降雨。

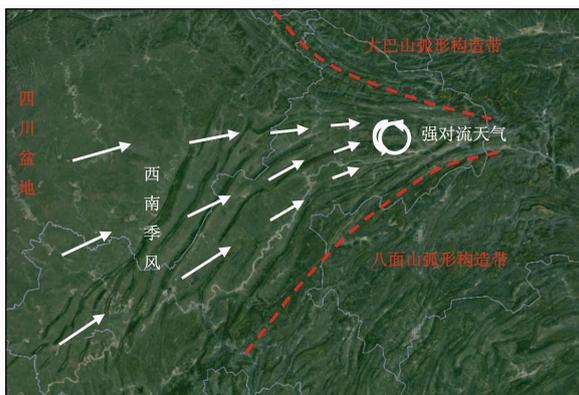


图2 地质构造控制下的渝东北地区暴雨形成示意图
Fig. 2 Sketch map of rainstorm formation in northeast Chongqing under the control of geological structure

2 极端降雨引发滑坡遥感解译

2.1 滑坡遥感解译

利用渝东北地区2014年“8·31”暴雨前后的卫星遥感影像,解译此次暴雨过程诱发产生的滑坡。在暴雨后的高空间分辨率遥感影像上,发生大规模滑移的斜坡区域,其滑坡特征十分明显,包括:滑坡区域卫星影像色调较浅,植被、房屋、公路等破坏;滑坡体上不同性质的裂缝明显,如后缘出现拉裂缝,岩土体下错形成圈椅状裂缝或者滑坡后壁;前缘向河谷伸出,拥塞河谷,甚至形成堰塞湖;部分滑坡前缘形成滑坡泥石流,滑动岩土体形成泥石流运移数百米甚至更长。利用“8·31”暴雨前后的卫星遥感影像对比分析,可以消除人类工程活动对滑坡解译的干扰,进一步提高解译精准度。

遥感解译是在Google Earth软件中进行,充分利用了该软件中所展示的不同时期的历史遥感数据,可以较为准确、高效地解译出渝东北地区“8·31”暴雨诱发的地质灾害。利用软件提供的工具,可以对滑坡长度、宽度和面积等基本特征进行量测。

经遥感影像解译,得到该区域589处滑坡,主要分布于长江以北的奉节县和云阳县的北部区域、开州区东部、巫溪县南部地区,面积约2000 km²范围内(图3)。在规模上,以中小型滑坡为主,占滑坡总数的90.7%。且以新生型滑坡为主,占滑坡总数的71.9%;部分为老滑坡在暴雨作用下,也出现较大变形甚至发生大规模滑移。

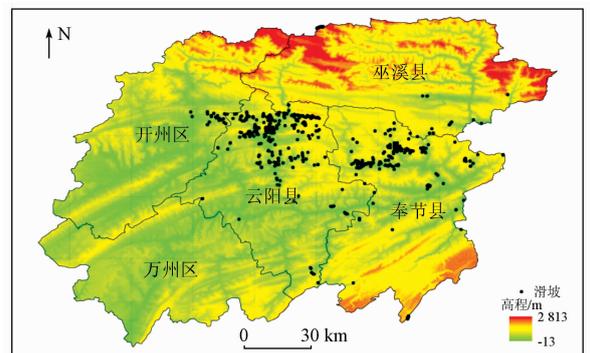


图3 “8·31”暴雨诱发滑坡遥感解译分布
Fig. 3 Remote sensing interpretation distribution of landslides induced by extreme rainfall on August 31

2.2 降雨型滑坡解译

2.2.1 奉节县桂坝滑坡

桂坝滑坡位于奉节县公平镇桂坝7社,该滑坡发生在2014年9月1日。从Google Earth软件上,可以查询到滑坡发生前后时间间隔较近的2期遥感影像(图4),其获取时间分别是2014年8月20日

和2014年10月11日。



(a) 2014年8月20日 (b) 2014年10月11日

图4 奉节县桂坝滑坡前后遥感影像

Fig. 4 Remote sensing images before and after Guiba landslide in Fengjie County

经过滑坡地质调查以及叠加数字高程模型数据分析,滑坡后缘高程为720 m,形成圈椅状后壁,后壁高度在25 m左右,可以看到多条拉裂缝。滑坡的剪出口位于公路以上,高程约610 m,滑坡面积约 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,估算滑体厚度在20 m左右,滑坡体积约为 $92 \times 10^4 \text{ m}^3$,为中型土质滑坡。滑坡毁坏房屋10余间。滑坡滑动后转化为滑坡泥石流,沿着冲沟泄流而下1.3 km,淤积于梅溪河河床。在此次暴雨诱发的滑坡中,滑动后形成泥石流是比较常见的类型,如奉节县青莲乡白果寨特大型顺层岩质滑坡。

2.2.2 奉节县下横旦滑坡

下横旦滑坡位于奉节县大树镇槽木村1组,2014年9月2日发生大规模滑动。从2015年5月8日遥感影像(图5)可以看出滑坡边界清晰,右侧边界为冲沟,左侧边界可以看到清楚的侧壁,后缘出现圈椅状滑壁。经过滑坡地质调查以及叠加数字高程模型数据分析,滑坡壁长度约40 m。滑坡前缘抵达河床,其右侧前缘岩土体堆积造成河床壅塞抬高,形成小的堰塞湖,滑坡后缘宽度为160 m,前缘宽度为500 m,纵长为450 m,面积为 $13.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,为一大型滑坡,属于降雨作用下古滑坡复活。



图5 2015年5月8日奉节县下横旦滑坡遥感影像

Fig. 5 Remote sensing images of the Xiahengdan landslide in Fengjie County on May 8, 2015

3 降雨诱发滑坡发育特征分析

3.1 滑坡发生时的降雨分析

降雨卫星数据和雨量站测站数据是降雨分析的2种不同类型的数据源。测站数据是点状数据,在单点测量精度上更有优势。相比测站数据,降雨卫星数据覆盖面更广,获取难度相对较低,更适于做区域性的分析计算。不可否认,低空间分辨率的降雨数据与高分影像解译得到的滑坡数据进行叠加会造成一定的分析误差。作为改进方案,利用测站数据对低空间分辨率的降雨卫星数据进行修正,有望提高滑坡与降雨关系分析的准确度。

本文将遥感解译获得的滑坡分布与美国航空航天局全球降雨观测数据叠加,统计分析滑坡所在位置的最大单日降雨量(图6(a))和累积降雨量(图6(b))之间的关系。由图6(a)可知,当最大单日降雨量为50 mm时,有滑坡开始发生;当最大单日降雨量为80 mm,滑坡开始持续发生,且随着降雨量的增大,滑坡数量增多;最大单日降雨量为90 mm的区域,滑坡开始大量出现;最大单日降雨量为100 mm的区域,滑坡发生数量最多,共有270处,占解译滑坡数量的45.84%;其次是最大单日降雨量为120 mm的区域,解译滑坡164处,占解译滑坡数量的27.84%。从图6(b)可以看出,当累积降雨量为110 mm时,有滑坡开始发生;当累积降雨量为160 mm,滑坡开始持续发生;当累积降雨量为200 mm区域,滑坡大量出现,且随着累积降雨量的增大,滑坡数量增多;累积降雨量为210 mm区域共发生滑坡176处,占滑坡解译数量的29.88%;其次是累积降雨量为240 mm区域,解译滑坡117处,占19.86%。

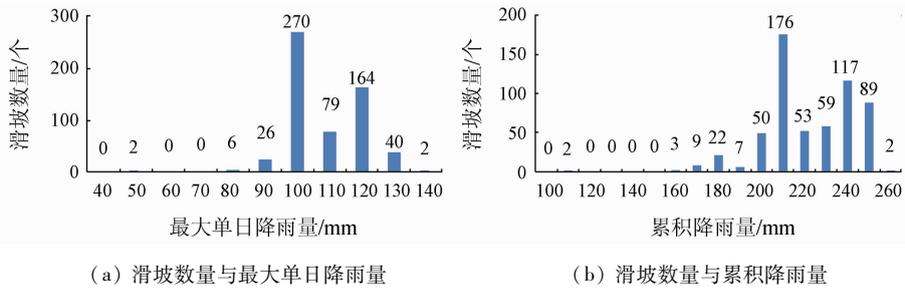


图6 渝东北地区“8·31”暴雨诱发滑坡区域的雨量统计

Fig. 6 Rainfall statistics of the August 31 rainstorm – induced landslide area in northeast Chongqing

由图6可知,最大单日降雨量和累积降雨量在诱发滑坡的趋势具有较好的一致性,即累积降雨量大致是最大单日降雨量的2倍。如当最大单日降雨量和累积降雨量分别超过80 mm和160 mm时,此区域开始持续发生滑坡;当最大单日降雨量和累积

降雨量分别超过100 mm和210 mm时,此区域开始发生大量滑坡。

3.2 滑坡发生处的斜坡地形分析

以滑坡中心点的高程统计(图7),200~1350 m高程范围均有滑坡发生。

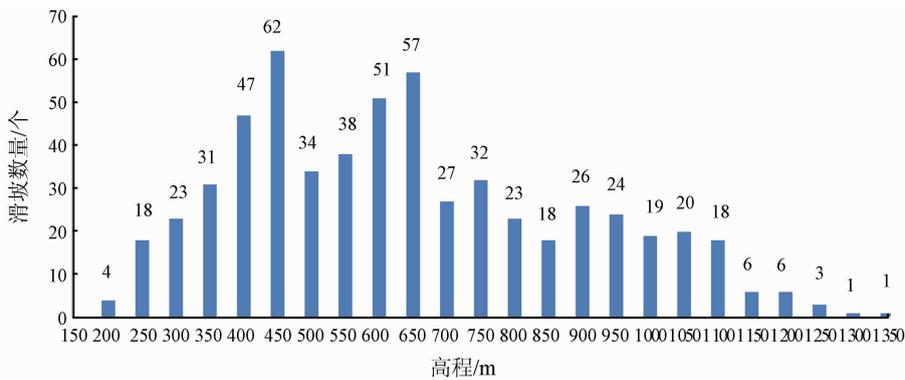


图7 渝东北地区“8·31”暴雨诱发滑坡高程分析

Fig. 7 Elevation analysis of rainstorm – induced landslide on August 31 in northeast Chongqing

总体上,在数量上,随着高程增大,滑坡数量有先增大后减少的变化趋势。高程在500 m以下,滑坡数量随着高程的增加而增多。而高程在600 m以上,滑坡数量随着高程增加而减少。以高程在400~700 m之间分布较为集中,共有289处,占解译滑坡总数的49.06%。从滑坡发育斜坡的山顶高程统计

可以得出,本次暴雨诱发大量滑坡发生的区域,其斜坡山顶高程在1000~1400 m之间。当斜坡山顶高程大于1000 m时,对气流输送具有较大的阻挡作用,由水平运动为主转为沿坡爬升,形成强对流天气而产生暴雨。

诱发滑坡的坡度和坡向分析如图8所示。

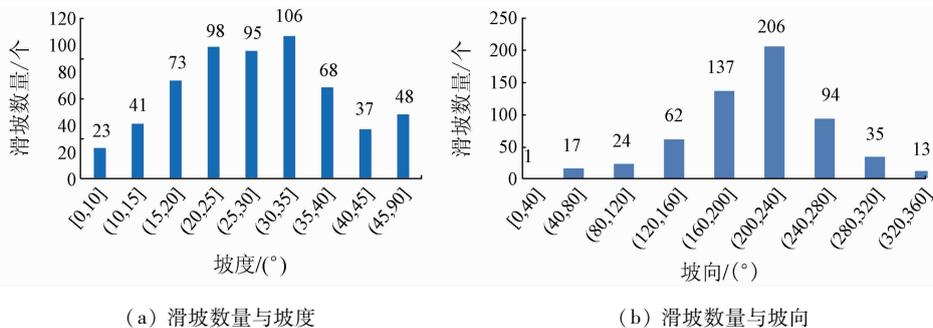


图8 渝东北地区“8·31”暴雨诱发滑坡坡度和坡向分析

Fig. 8 Slope and aspect analysis of rainstorm – induced landslide on August 31 in northeast Chongqing

从滑坡发生的斜坡地形坡度统计可以得出(图8(a)),滑坡坡度在10°~90°范围均有滑坡发生,以30°左右坡度滑坡发生数量最多。其中地形坡度在

30°~35°的斜坡上发生滑坡数量为106处,占滑坡解译数量的18.00%;其次,坡度为20°~25°的斜坡上发生滑坡数量为98处,占解译滑坡数量的16.64%;

20°~35°的斜坡中,发生滑坡数量为299处,占解译滑坡数量的50.76%。

从滑坡发生的斜坡坡向统计可以看出(图8(b)),此次降雨过程诱发的滑坡主要分布在以西、南朝向的斜坡上,属迎风坡。斜坡朝向在160°~280°之间斜坡上,发生的滑坡数量为437处,占解译滑坡总数的74.19%。其中西南朝向斜坡发生滑坡数量最多,占解译滑坡总数的34.97%。

3.3 滑坡发育地层岩性分析

从地层岩性角度看,该区域广泛分布碎屑岩类和碳酸盐岩地层。其中暴雨诱发滑坡集中在侏罗系和三叠系碎屑岩地层,为软硬相间的层状砂岩与黏土岩互层,包括侏罗系上沙溪庙组(J_2s)、蓬莱镇组(J_3p)、自流井组(J_{1-2z})、新田沟组(J_2x)、珍珠冲组(J_1z)、遂宁组(J_3s)、下沙溪庙组(J_{1xs})以及三叠系巴东组(T_2b)等地层(表2),主要岩性为砂岩、粉砂岩、泥灰岩等与层厚不等的泥岩、页岩,呈互层状,为软岩和软硬相间岩层。地层岩石强度低,易风化,形成厚度不等的第四系崩坡积物,属于滑坡易发地层。

表2 渝东北地区“8·31”暴雨滑坡地层岩性分析
Tab.2 Formation and lithology analysis of rainstorm-induced landslide on August 31 in northeast Chongqing

序号	滑坡	地层岩性	坡度/(°)	是否新增
1	云阳县双龙镇老药铺滑坡	J_2s 上沙溪庙组	25~39	新增点
2	云阳县双龙镇长兴村滑坡	J_2s 上沙溪庙组	35~40	新增点
3	云阳县江口镇黄沙包滑坡	T_{3x} 须家河组	30~46	新增点
4	云阳县江口镇向家坪场镇后滑坡	J_{2xs} 下沙溪庙组	21~31	新增点
5	云阳县鱼泉镇填山梁滑坡	T_2b 巴东组	23~45	新增点
6	云阳县鱼泉镇小垭口滑坡	T_{3x} 须家河组	36~41	新增点
7	云阳县沙市镇肖洞滑坡	T_2b 巴东组	31~40	新增点
8	奉节县康乐镇杨柳坪滑坡	T_2b 巴东组	26~43	新增点
9	奉节县罗黄坪滑坡	J_1z 珍珠冲组	29~43	新增点
10	巫溪县上黄镇罗家坡滑坡	J_1z 珍珠冲组	29~43	新增点

4 结论与讨论

本文利用高空间分辨率卫星遥感影像及美国航空航天局全球降雨观测数据,对渝东北地区2014年“8·31”暴雨诱发滑坡进行遥感解译,并分析了此次降雨诱发的滑坡与降雨、地形等的关系。

1)渝东北“8·31”极端暴雨区地处四川盆地东沿,区域构造为大巴山和八面山弧形构造带的交汇部位。西南季风运移过程中山脉限制,运移通道呈现喇叭状山势逐渐收窄,在开州区、云阳县北部、奉节县北部和巫溪县南部区域汇聚后,受到褶皱形成的较高地势(1000 m以上高程)阻挡后,沿斜坡爬升,形成强对流天气而产生暴雨。因此,由构造形成的地貌和山势是该地区成为暴雨中心的主要原因。

2)据滑坡与降雨关系统计分析,当最大单日降雨量和累积降雨量分别超过80 mm和160 mm时,滑坡开始持续发生,应发布区域性滑坡红色预警;当预报最大单日降雨量和累积降雨量分别在100 mm和210 mm时,应做好应对滑坡大量发生的准备。且暴雨诱发滑坡开始发生和大量发生时的最大单日降雨量和累积降雨量大体上呈2倍关系。

3)此次强降雨过程诱发滑坡以新生的中、小型滑坡为主,滑坡区域的斜坡地形坡度相对较陡,坡度在25°左右居多,且30°~45°斜坡仍有滑坡发生。暴雨诱发滑坡区的地形坡度相对较陡,尤其是新生的滑坡,且暴雨诱发滑坡主要发生在西、南朝向的迎风坡上。

本文研究认为,渝东北地区复杂的地质构造条件,以及由其产生的构造侵蚀地貌不仅使得该区域成为暴雨中心,也导致了降雨型滑坡多发、频发。首先是地区滑坡易发地层广泛分布,主要为侏罗系软岩和软硬相间岩层,且岩石易风化,第四系崩坡积物较厚;其次区域构造与河流侵蚀切割作用使得地形起伏大、坡度较陡,为滑坡发育和发生提供有力地形条件;再次是由构造形成的山势特点使得该区域成为暴雨中心,极端天气频发,暴雨成为该地区滑坡大量发生的主要诱因。因此,笔者认为在降雨诱发地质灾害易发性分析和预测预报中,应该考虑地质构造形成的地形地貌格局对局地降雨强度及分布的影响,这有助于提高时间和空间预测分析精度。

参考文献(References):

- [1] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.中国年极端降水事件的时空分布特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):75-83.
Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 75-83.
- [2] 顾西辉,张强,孔冬冬,等.中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J].地理科学,2017,37(6):929-937.
Gu X H, Zhang Q, Kong D D, et al. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation distributions with annual and seasonal scales and potential impact of tropical cyclones in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(6): 929-937.

- [3] 张俊,高雅琦,徐卫立,等. 长江流域极端降雨事件时空分布特征[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 81-86.
Zhang J, Gao Y Q, Xu W L, et al. Spatial and temporal analysis of extreme precipitation events in Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 81-86.
- [4] 王兰生, 李曰国, 詹铮. 1981年暴雨期四川盆地岩质滑坡的发育特征[J]. 大自然探索, 1982(1): 44-51.
Wang L S, Li Y G, Zhan Z. Distribution of rock landslide failed in 1981 triggered by torrential rain in Sichuan Basin [J]. Discovery of Nature, 1982(1): 44-51.
- [5] 柳源. 滑坡临界暴雨强度[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 43-45.
Liu Y. Critical rainstorm intensity of landslide [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998(3): 43-45.
- [6] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 444-450.
Huang R Q. Mechanism of large scale landslides in Western China [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 444-450.
- [7] 赵鹏, 杨沛霖, 蒋莉, 等. 渝东北地区强降雨诱发地质灾害险情分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10): 50-56.
Zhao P, Yang P L, Jiang L, et al. Situation of geologic hazards induced by heavy rainfall in northeast Chongqing [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(10): 50-56.
- [8] 陈洁, 高子弘, 王珊珊, 等. 三峡库区航空遥感地质调查技术发展综述[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 1-10. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 01.
Chen J, Gao Z H, Wang S S, et al. A review on the development of aerial remote sensing geological survey technology in the Three Gorges Reservoir area [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 1-10. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 01.
- [9] Mantovani F, Soeters R, Westen C V. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe [J]. Geomorphology, 1996, 15: 213-225.
- [10] 宋英旭. 基于空天地一体化监测的滑坡风险动态评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
Song Y X. Research on dynamic evaluation of landslide risk based on integrated air-space-ground monitoring [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2019.
- [11] 文广超, 张哲玮, 肖学军, 等. 基于遥感数据的灾后滑坡信息快速提取方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 84-90.
Wen G C, Zhang Z W, Xiao X J, et al. Rapid extraction method of post-disaster landslide information based on remote sensing data [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 84-90.
- [12] Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with space-borne synthetic aperture Radar (SAR) interferometry [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3-4): 173-199.
- [13] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(2): 809-817.
- [14] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615.
Tang G Q, Wan W, Zeng Z Y, et al. An overview of the globe precipitation measurement (GPM) mission and its latest development [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 607-615.
- [15] 陈明, 傅抱璞, 于强. 山区地形对暴雨的影响[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 256-263.
Chen M, Fu B P, Yu Q. Influence of topography on storm rainfall [J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 256-263.
- [16] 王沛东, 李国平. 秦巴山区地形对一次西南涡大暴雨过程影响的数值试验[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 418-429.
Wang P D, Li G P. Numerical experiments of the impact of Qin-Ba mountainous terrain on a rainstorm caused by southwest vortex [J]. Journal of Yunnan University, 2016, 38(3): 418-429.

An analysis of rainstorm-induced landslides in northeast Chongqing on August 31, 2014 based on interpretation of remote sensing images

LIU Zhizhong¹, SONG Yingxu², YE Runqing³

(1. China Railway 11th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhan 100855, China; 2. Jiangxi Engineering Laboratory on Radioactive Geoscience and Big Data Technology, School of Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China)

Abstract: A rainstorm struck northeast Chongqing from August 31 to September 2, 2014. It triggered extensive landslides and resulted in casualties and serious economic losses. To learn the condition of the landslides induced by the rainstorm and analyze the relationship between the landslides and rainfall, this study obtains the distribution of the landslides through the interpretation of high-resolution satellite remote sensing images before and after the rainstorm using RS and GIS techniques. It can be concluded that complicated geological tectonic conditions and corresponding unique tectonic erosion landform pattern make northeast Chongqing become the center of the rainstorm and also lead to the frequent occurrence of rainfall-triggered landslides in this area. Landslides will

continuously occur when the maximum daily rainfall and accumulated rainfall exceed 80 mm and 160 mm, respectively, and extensive landslides will occur when the maximum daily rainfall and accumulated rainfall exceed 100 mm and 210 mm, respectively. Furthermore, landslides are the most liable to occur in windward slopes with a gradient of about 25° . Therefore, the regional topography should be taken into account in the analysis and prediction of rainfall – induced geological disasters to improve the accuracy of spatial and temporal prediction and analysis of geological hazards.

Keywords: extreme rainstorm; landslide; remote sensing image interpretation; northeast Chongqing

(责任编辑: 陈 理)