

2013年四川芦山地震次生山地灾害发育规律

张佳佳^{1,2,3}, 李海兵^{2,3}, 赵国华⁴, 李勇¹, 颜照坤¹, 王焕^{2,3}, 云镔^{1,2,3}
ZHANG Jiajia^{1,2,3}, LI Haibing^{2,3}, ZHAO Guohua⁴, LI Yong¹, YAN Zhaokun¹,
WANG Huan^{2,3}, YUN Kun^{1,2,3}

1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 核工业西南勘查设计研究院, 四川 成都 610061

1. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*
2. *State Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of land and Resources, Beijing 100037, China;*
3. *Institute of Geology, Chinese Academic of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
4. *Southwest Geotechnical & Design Institute of China Nuclear Industry, Chengdu 610061, Sichuan, China*

摘要:2013年4月20日8时02分,青藏高原东缘龙门山南部地区发生了芦山地震(Ms 7.0),此次地震诱发了大量次生山地灾害。以地震重灾区宝兴作为研究区,利用卫星遥感影像、数字高程模型和高清航拍图像,以及崩塌滑坡数据统计分析,并结合野外调查研究,对区内次生山地灾害的空间分布与岩性、断裂和坡度关系进行了分析和探讨,总结了宝兴地区地震诱发的次生山地灾害发育规律:①以中小型崩塌滑坡为主,且沿省道S210集中分布;②崩塌滑坡主要发生在宝兴杂岩区浅表强风化层及第四系松散堆积层;③研究区内发育的五龙断裂和小关子断裂不是芦山地震的同震断裂;④该区域70%的崩塌滑坡发生在坡度大于30°的区域范围内,30~40°坡度段崩塌滑坡最为集中;⑤人类工程活动是宝兴地区次生山地灾害集中发育在S210省道两侧的主要原因;⑥在汶川地震和芦山地震2次地震及其余震的频繁加载作用下,宝兴地区崩塌滑坡的活动性增加,未来几年将是中小规模崩塌滑坡发育的高峰期。

关键词:芦山地震;崩塌滑坡;坡度;宝兴地区;龙门山

中图分类号:P511.2;P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)05-0898-09

Zhang J J, Li H B, Zhao G H, Li Y, Yan Z K, Wang H, Yun K. Features of secondary mountain hazards triggered by the 2013 Lushan Earthquake, Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(5): 898-907

Abstract: At 8:02 am, 20 April 2013, the Ms 7.0 Lushan earthquake struck the southern area of the Longmen Mountain on the eastern margin of the Tibetan Plateau in Sichuan Province. A lot of geohazards followed this earthquake. Taking the hazards-prone Baoxing area as the study area and based on the remote sensing analysis, digital elevation model, statistic analysis and field investigation, the authors analyzed the distribution of the geohazards and the relationship between hazards and lithology, faults and slope gradient and, on such a basis, summarized the features of seismic geohazards in the Baoxing area: ① Hazards are mostly small or medium-sized collapses and landslides, and are mostly distributed along road S210. ② Collapses and landslides mainly occur in the highly weathered layers of the Baoxing complex and Quaternary superficial layer. ③ Wulong and Xiaoguanzi faults are not coseismic faults of Lushan earthquake. ④ In the study area, 70% of collapses and landslides occur in the areas whose slope is steeper than 30°, and the slope of most geohazards range from 30° to 40°. ⑤ Human engineering activity is the main controlling factor of the geohazards distributed along road S210. ⑥ Because the slopes impacted by the Wenchuan and Lushan earthquakes become very unstable, landslides, collapses and debris flow are more prone to occur, and hence the coming several years will be the high-incidence period.

Key words: Lushan earthquake; collapses; landslides; slope; Baoxing area; Longmen Mountain

收稿日期:2014-09-09;修订日期:2015-03-19

资助项目:中国地质调查项目(编号:1212011121267、1212011220264)

作者简介:张佳佳(1988-),男,在读硕士生,构造地质学专业。E-mail: jimjia2008@163.com

通讯作者:李海兵(1966-),男,研究员,博士生导师,从事构造地质学与活动构造研究。E-mail: lihaibing06@163.com

2013年4月20日8时02分,青藏高原东缘龙门山南部地区发生了强烈的芦山地震(图1)。据中国地震台网中心(CENC)和美国地质调查局(USGS)公布的数据,芦山地震的震级分别为Ms 7.0和Mw 6.6,震中位于四川省雅安市芦山县龙门乡、宝盛乡、太平镇交界(N30.3°、E103.0°和N30.284°、E102.95°),震源深度约13km。主震区累计发生余震8791次,其中4.0~4.9级22次、5.0~5.9级4次,强烈地震共计造成196人死亡,21人失踪。此次地震触发了大量次生山地灾害,学者们对此做了调查和研究^[1-15]。研究表明,地震诱发的地质灾害集中在龙

门—宝盛—太平—双石乡镇围成的四边形内和宝兴县的灵关—中坝—宝兴县城一线^[15],然而,对地震触发的崩塌和滑坡的分布规律、影响因素及成因没有更详细的认识,这些研究对日后重建以及今后的防震灾害具有重要的科学意义。本文以位于地震重灾区的宝兴地区为研究对象,重点对沿S210省道两侧的次生山地灾害进行详细的调查和成因分析,总结其发育规律。

1 地质背景

宝兴地区位于青藏高原东缘、龙门山南段、雅

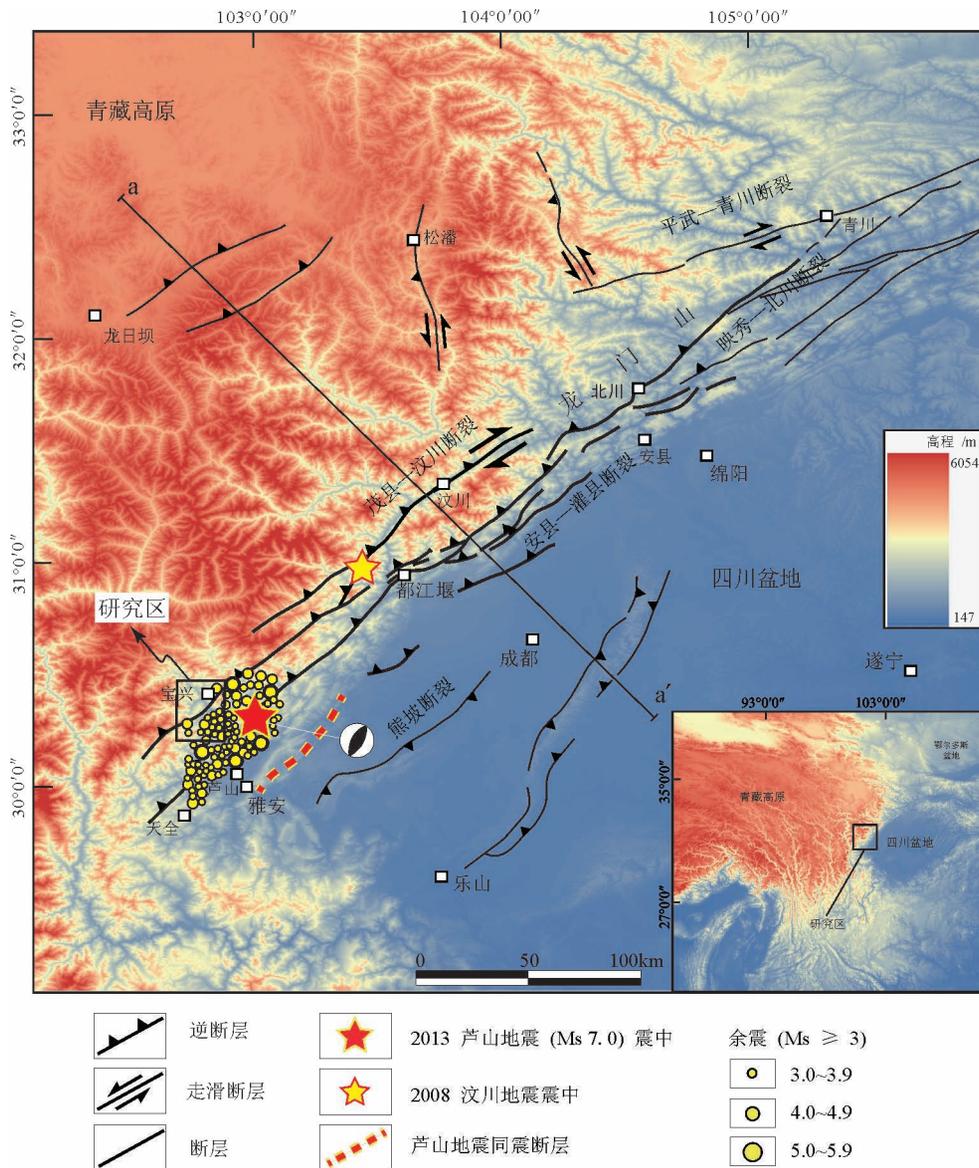


图1 龙门山地区地貌及活动构造图

Fig. 1 Geomorphology and active tectonics of Longmen Mountain area

安市西北部,地处四川盆地与青藏高原东南缘的过渡地带,地势总体西北高、东南低,地貌以山地为主,总体海拔在680m以上(图1、图2)。该地区属于以亚热带湿润季风气候为基带的山地气候,年平均气温 15° ,雨量充沛,高强度降雨较多,年均降水量993.7mm,丰富、集中和高强度的降水为山洪、泥石流、滑坡形成提供了充足的水源条件。灵关河纵贯全地区(图3),河流比降大,流速快,河水多在V形谷中流动。

该地区出露岩石单元主要包括志留系白云岩,泥盆系、二叠系石灰岩,三叠系、震旦系白云质灰岩、宝兴杂岩(图3)。其中宝兴杂岩岩石组合主要为花岗岩和花岗闪长岩^[16-18],在宝兴地区主要分布于灵关河两侧(图3)。境内发育有五龙和小关子2条主要断裂(图3),其中五龙断裂为龙门山中央断裂(映秀—北川断裂)的南段,北起映秀南侧的三江附近,向南经盐井—五龙—明礼,至泸定以东,由多条近于平行的次级断裂组成,总体走向 $NE40^{\circ}$,长约160km,断层倾向NW,倾角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ^[19-21];小关子断裂由多条近于平行的次级断裂组成,总体走向 $NE50^{\circ}$,倾向NW,变形强烈,破裂带宽^[22]。历史上该区是典型的小震频发区,震级以4.9级以下居多,大于5级的地震较少^[23-24]。

2 宝兴地区次生山地灾害发育特征

利用研究区1:50000 DEM数据,建立数字高程模型,由ARCGIS软件获取研究区指定区域的高程最大值、最小值和平均值,进而生成廊带剖面,并利用ARCGIS中surface分析工具提取坡度地形指标。通过野外实地调查,结合1:200000地质图(宝兴幅)提

取研究区域的地层、岩性、断裂等地质信息^①。利用震后灾区高清航拍图获取研究区次生山地灾害信息,在数据统计分析的基础上,对研究区次生山地灾害发育规律进行综合研究。

芦山地震发生后,笔者第一时间进入灾区,获得了大量地质灾害实地考察资料。芦山强烈地震的主震及余震导致斜坡岩土体的原有结构遭到破坏,失稳造成大量的崩塌、滑坡、落石。总体而言,宝兴地区本次地震同震激发的次生山地灾害以中小规模的崩塌滑坡为主,数量多且成群分布,集中发育在沿省道S210两侧(图版I)。灵关镇—宝兴县城的省道S210公路崩塌滑坡区长约4km,崩塌群成片发育(约30个),规模 $0.1\times 10^4\sim 2.6\times 10^4\text{m}^3$ 不等。如此集中的崩塌群对公路造成严重的损害,为震后救援工作造成极大困难。宝兴地区在芦山地震过程中,虽未出现同震激发的大型滑坡、堰塞湖、泥石流等地质灾害,但该区先后经历了2008年汶川地震和2013年芦山地震,地震扰动的叠加效应加剧了坡体的破坏程度,出现许多震而未裂的山体,一旦在降雨作用下,这些亚稳定斜坡极易失稳形成崩塌、滑坡,给灾后重建带来隐患。

3 次生山地灾害发育原因及发展趋势

3.1 崩塌滑坡与岩性、断裂、坡度之间的关系

宝兴地区本次地震同震激发的次生山地灾害以中小规模的崩塌滑坡为主,经野外实地考察,主要发生在宝兴杂岩区浅表全风化层及强风化层。因其久经风化,岩石强度变低,在地震的诱发下,易形成崩塌。该地区同震激发的滑坡数量远少于崩塌数量,滑坡主要出现在第四系松散堆积层中,余震

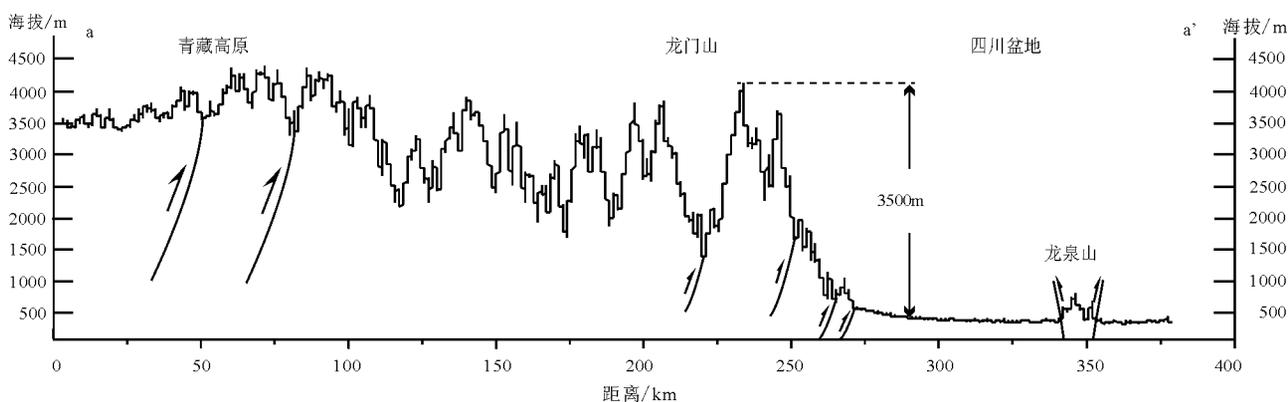


图2 横切龙门山剖面(位置见图1中a-a')

Fig. 2 Cross section of the Longmen Mountain

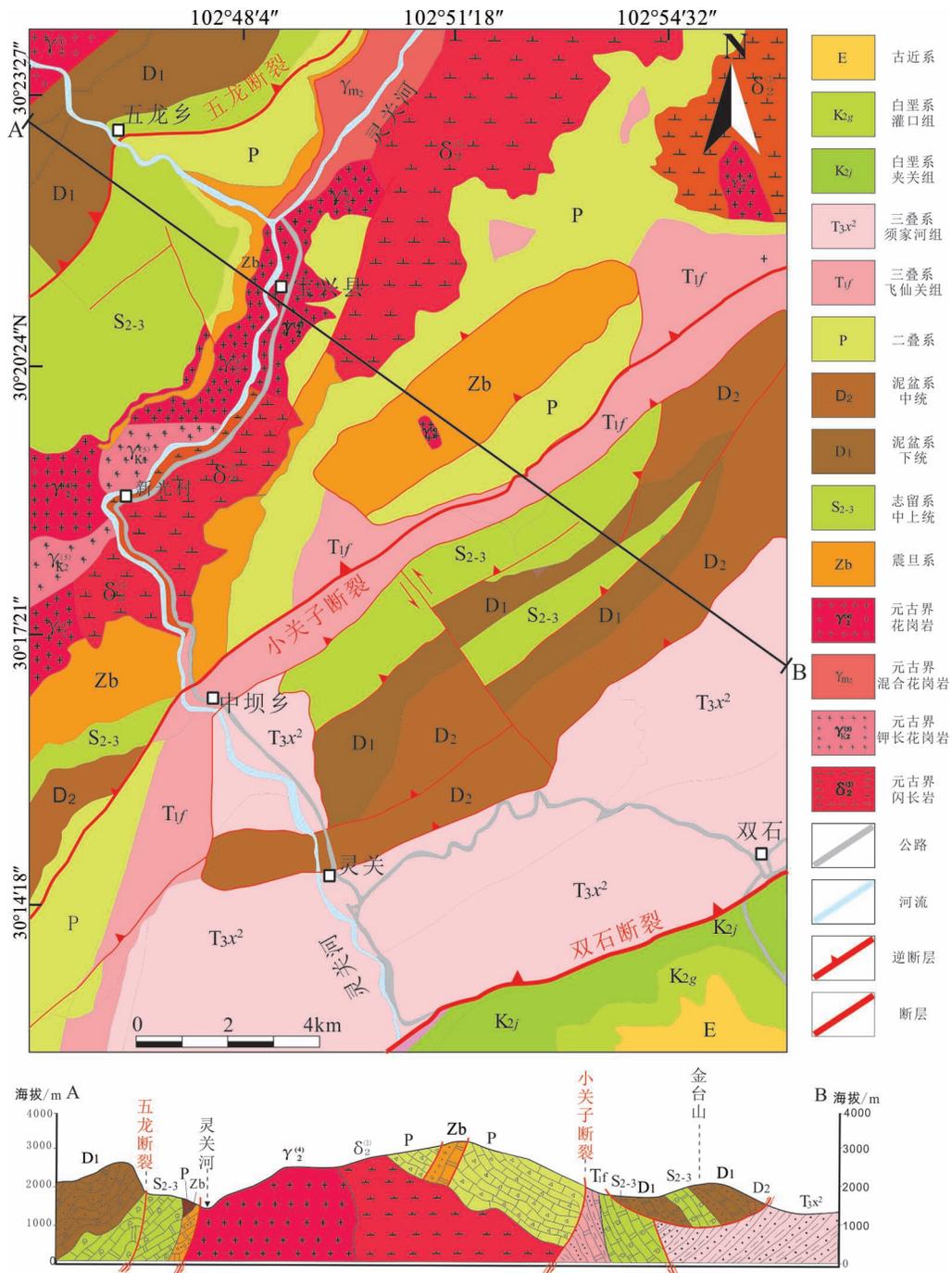


图3 宝兴区域地质图及地质剖面图(据参考文献①修改)

Fig. 3 Geological map and geological section of Baoxing area

中激发的灵关河西侧边坡和宝兴县城烈士陵园滑坡是其中较为典型的例子(图版 II)。其中灵关河西侧边坡的滑坡为4月21日下午芦山地震余震所激发,震动过程中坡体表面的松散堆积物顺坡而下,形成一处小型的滑坡群。整个滑坡群长约

100m,主体由3个小型滑坡组成,滑坡体坡向105°,坡度80°,高差约150m。

通常断裂经过的岩层多发育次级小断层、节理和裂隙,故较为破碎,在地震的诱发下容易形成崩塌滑坡等次生山地灾害^[13,25]。根据芦山地震后宝兴

图版 I Plate I



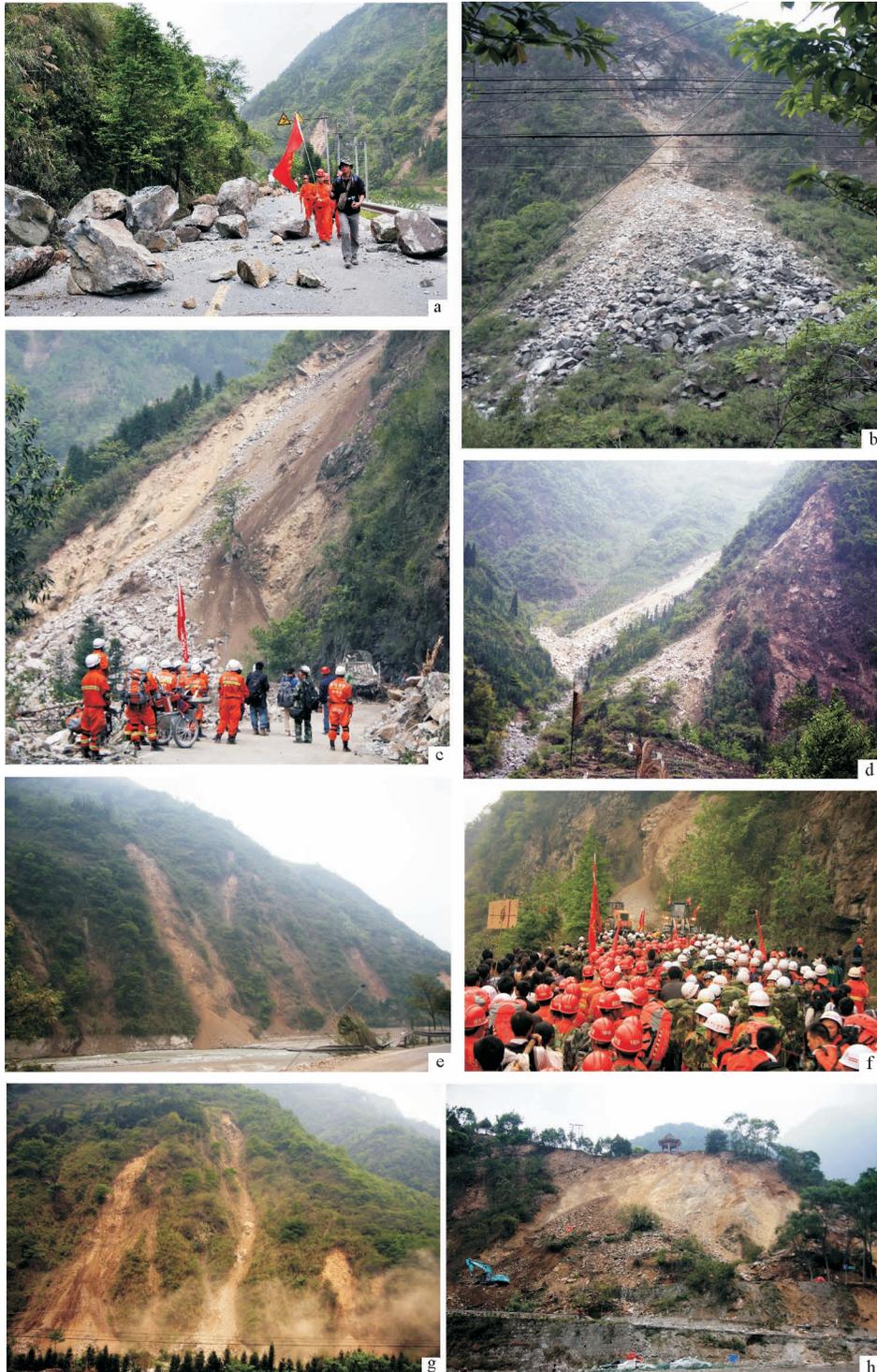
A~J.宝兴地区省道S210两侧集中发育的崩塌滑坡(影像来源于四川测绘地理信息局)(图片具体位置见图4)

地区的高清航拍图片,结合野外实地考察发现,宝兴地区的非同震断裂五龙断裂和小关子断裂两侧没有发生比其他区域更多的同震次生山地灾害(图4),分析其主要原因可能是五龙断裂和小关子断裂不是芦山地震的发震断裂,这2条老断裂经过的山体虽发育有不少裂隙,但因为该区域地势较陡,且

雨水充足、植被茂盛、风化作用强烈,再加上该区域受以往地震的影响不稳定的部分已然被激发,保存下来的多是相对稳定的部分,因此沿着断裂并没有发生更多的次生山地灾害。同时也说明非同震断裂不是次生山地灾害的主要影响因素。

坡度作为地形条件,与山地灾害的发育密切相

图版 II Plate II



a.新光村,地震诱发形成巨大落石(N 30.322°、E 102.792°);b.省道S210的东侧边坡,结构破碎的山体在地震作用下整体破裂解体,形成崩塌(N 30.303°、E 102.796°);c.灵关镇北,崩塌坡面倾角58°(N 30.282°、E 102.804°);d.灵关河西侧边坡,坡面倾角36°(N 30.312°、E 102.788°);e.宝兴县中学西,地震诱发下形成的小型滑坡;f.穆坪镇S210东侧边坡,地震诱发的崩塌阻碍救援队伍前进的道路(N 30.368°、E 102.814°);g.穆坪镇灵关河西岸边坡,斜坡表面的松散层在余震作用下,震裂、松弛,形成滑坡(N 30.349°、E 102.801°);h.宝兴县城烈士陵园,地震诱发的滑坡将城区道路毁坏



图4 宝兴地区省道S210两侧地区航空影像(影像来源于四川省测绘地理信息局)

Fig. 4 Geomorphic features along Road S210 in Baoxing area

关,坡度直接决定了山体的应力分布,是山地灾害危险性评价的重要因子^[26]。笔者对该区实际地形做了具体分析,对崩塌滑坡集中发育的S210省道做出3组1:1廊带剖面(图5),结果表明该区崩塌滑坡多数发育在30°~50°区间,只有少部分发育在坡度大于50°的坡体上。

同时利用研究区1:50000 DEM数据,建立数字高程模型,并利用ARCGIS中surface分析工具提取坡度地形指标,将坡度划分为7个等级:0°~10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°、40°~50°、50°~60°和60°~90°。通过四川省测绘地理信息局芦山县地震地理

信息发布平台(2013)获取具体次生山地灾害信息,并把此次芦山地震过程中发育的次生山地灾害点投到坡度图(图6)上,可计算出不同坡度段具体的崩塌滑坡数量(表1)。经过统计分析,最终得出宝兴地区70%的崩塌滑坡发生在坡度大于30°的区域范围内,30°~40°区间为其优选坡度段(图7)。因为坡度低于30°的坡体无论在平时还是地震过程中相对稳定,不易发生崩塌滑坡;而坡度大于40°的坡体因其不稳定性,在未发生地震时候的风化剥蚀过程中,不稳定的部分已被大量剥蚀,再加上2008年汶川地震过程中,已有大量不稳定坡体被激发形成崩

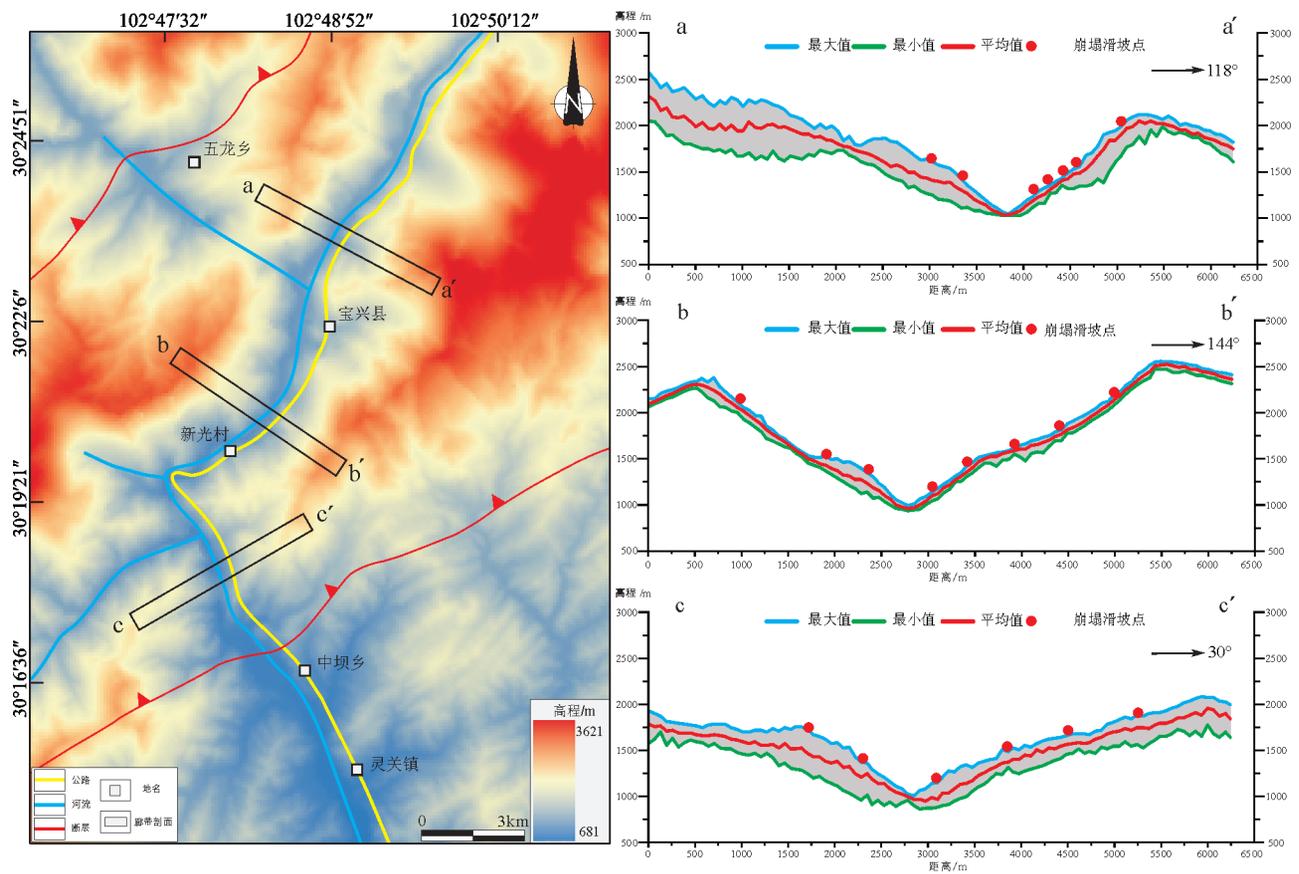


图 5 宝兴地区地貌图(左图)及其廊带剖面(右图)

Fig. 5 Geomorphologic map of Baoxing area (left) and topographic swaths of the study area (right)

塌滑坡等,保存下来的则是相对稳定的部分,故在此次地震诱发下发生崩塌滑坡的概率也较小。

3.2 沿 S210 省道集中发育崩塌滑坡的原因

如前节所述,宝兴地区的次生山地灾害集中发育在沿 S210 省道两侧,究其主要原因为:①S210 省道沿线多为深切峡谷地带,公路在修建的过程中,普遍采用挖掘的方式,人为破坏了斜坡的稳定性;②S210 省道基本横切了岩层走向,靠近公路的岩层由于后期修路过程中的机械作用发育次生裂隙发

育,为崩塌滑坡的产生提供了条件;③该区域气候湿润多雨,边坡植被生长茂盛,根系不断延伸变粗,使裂隙扩大,加之雨水渗入到岩体裂隙、孔隙内,在静水和动水压力作用下,加速裂隙发育,破坏岩体的整体稳定性,也在一定程度上促进该区域次生山地灾害的形成。

3.3 次生山地灾害发展趋势

汶川地震后的研究表明,地震时易发生崩塌的地段也是地震后易发生崩塌的地段^[27],经过汶川地震和芦山地震 2 次地震及其余震的频繁加载作用,宝兴地区的山体破坏程度加剧,出现了很多裂而未滑、松而未动的山体,加之该区雨量充沛且高强度降雨较多,在降雨的激发下崩塌滑坡的活动性会有所增加。该地区在未来的几年内将是中小型崩塌滑坡发育的高峰期,崩塌滑坡等形成的固体松散堆积物又可能引发泥石流灾害,泥石流活动会较地震之前有所增加,规模可能更大,这

表 1 芦山地震宝兴地区不同坡度区间分布的崩塌滑坡数量

Table 1 Number of collapses and landslides at different slope intervals in Baoxing area

坡度/°	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~90	总和
崩塌数量	15	16	19	70	36	12	8	176

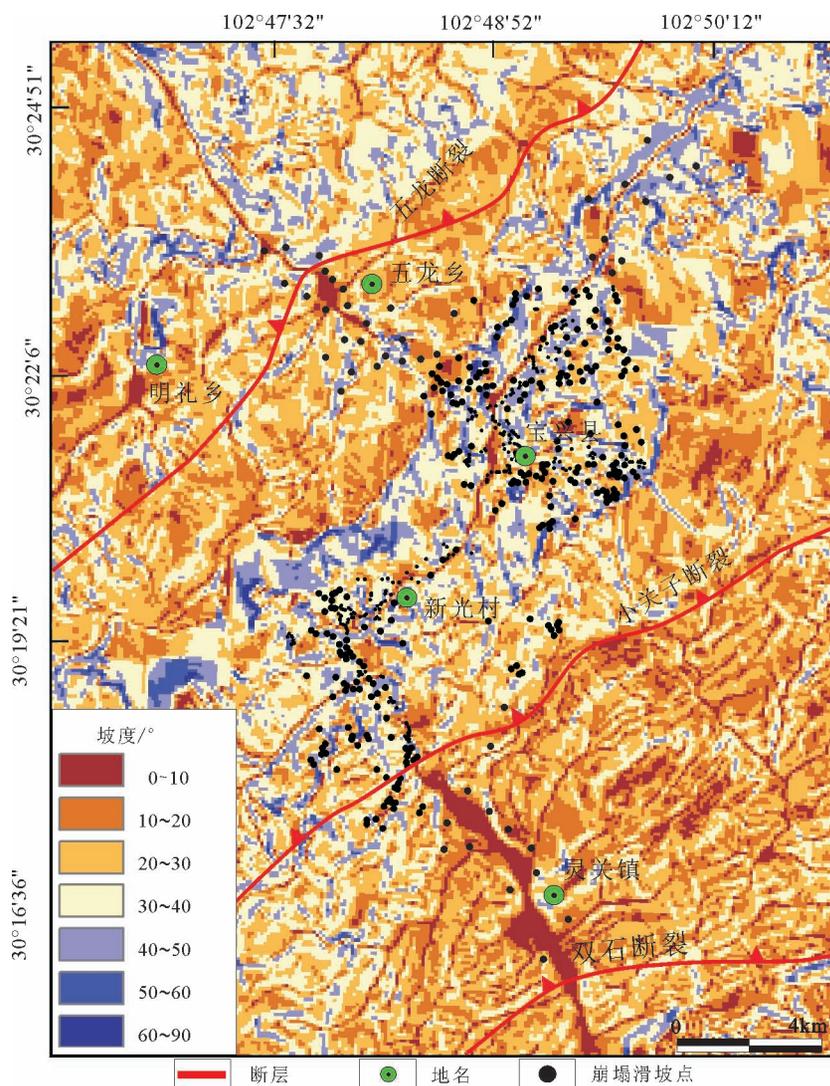


图6 宝兴地区坡度图及崩塌滑坡分布点位置
(崩塌滑坡信息来源于四川测绘地理信息局)

Fig. 6 Distribution of collapses and landslides
at different slope intervals in the study area

些地震次生灾害不仅严重威胁到震区人民的生命及财产安全,同时也破坏震区原有的生态环境。随着时间的推移崩塌滑坡等次生山地灾害会逐渐减少。

4 结论

宝兴地区地貌以山地为主,多发育深切峡谷,芦山地震过程中激发了大量的次生山地灾害。通过对研究区内次生山地灾害的空间分布特征及其与岩性、断裂和坡度关系的分析探讨,总结芦山地震宝兴地区次生山地灾害发育规律如下:

(1)以中小规模的崩塌滑坡为主,数量多且成群分布,集中发育在沿S210省道两侧,区内未见同震激发的大型滑坡、堰塞湖、泥石流等。

(2)崩塌滑坡主要发生在宝兴杂岩区浅表强风化层和第四系松散堆积层。

(3)宝兴地区的非同震断裂五龙断裂和小关子断裂两侧没有发生比其他区域更多的同震次生山地灾害,因此非同震断裂不是次生山地灾害的主要影响因素。

(4)宝兴地区崩塌滑坡发育的优选坡度段为

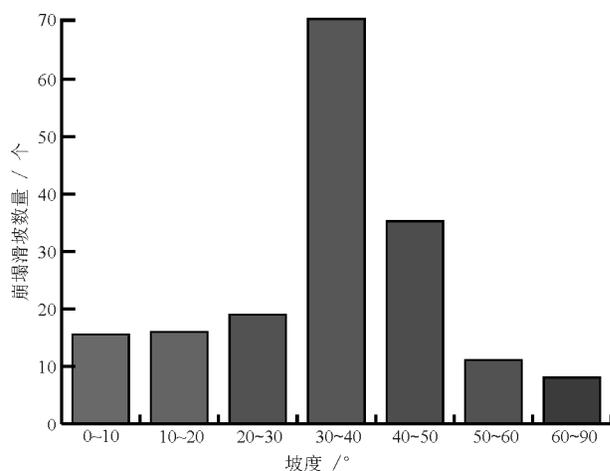


图7 芦山地震宝兴地区不同坡度区间崩塌滑坡数量

Fig. 7 Number of collapses and landslides at different slope intervals in Baoxing area

30°~40°。

(5)人类工程活动是宝兴地区次生山地灾害集中发育在S210省道两侧的主要原因。

(6)在汶川地震和芦山地震2次地震及其余震的频繁加载作用下,宝兴地区崩塌滑坡的活动性增加,未来的几年将是中小规模崩塌滑坡发育的高峰期,崩塌滑坡等形成的固体松散堆积物又可能引发泥石流灾害,泥石流活动会较地震之前有所增加,暴发规模可能增大,随着时间的推移次生山地灾害会逐渐减少。

致谢:中国地质科学院地质力学所孙知明老师、赵越工程师及四川省地矿局109地质队测绘院李宁工程师在野外实地调查工作中给予了帮助,研究团队司机吴建国、周伦在野外工作中提供了良好的后勤保障,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 崔鹏,陈晓清,张建强,等.“4.20”芦山7.0级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. 山地学报,2013,31(3): 257-265.
- [2] 李爱农,张正健,雷光斌,等.四川芦山“4.20”强烈地震核心区灾损遥感快速调查与评估[J]. 自然灾害学报,2013,22(6): 8-18.
- [3] 常鸣,唐川,李为乐,等.“4.20”芦山地震地质灾害遥感快速解译与空间分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3): 275-281.
- [4] 王运生,全清,罗永红,等.四川芦山Ms7.0级地震的地质环境影响分析[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(2): 92-98.
- [5] 兰恒星,周成虎,高星,等.四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议[J]. 地理科学进展,2013,32(4): 499-504.

- [6] 黄润秋,王运生,裴向军,等.4.20芦山Ms7.0级地震地质灾害特征[J]. 西南交通大学学报,2013,48(4): 581-589.
- [7] 罗永忠.“4.20”芦山地震震中龙门乡地质灾害特征[J]. 山地学报,2013,32(1): 124-128.
- [8] 李志强,候建盛,李洋,等.2013年4月20日四川芦山Ms7.0地震灾害特点分析[J]. 地震地质,2013,35(2): 398-410.
- [9] 陈晓清,崔鹏,游勇,等.4.20芦山地震次生山地灾害与减灾对策[J]. 山地学报,2013,20(3): 29-34.
- [10] 洪海春,许汉刚,宋峰,等.2013年芦山Ms7.0地震的震害地质灾害和发震断裂探讨[J]. 地震学报,2013,35(5): 738-748.
- [11] 高延超,陈宁生,徐如阁,等.芦山地震中G318线天全段崩塌发育规律[J]. 山地学报,2013,31(5): 632-640.
- [12] 李为乐,黄润秋,许强,等.“4.20”芦山地震次生地质灾害预测评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3): 257-263.
- [13] 杨宗佳.“4.20”芦山地震Ms7.0次生山地灾害特征[J]. 四川大学学报(工程科学版),2013,45(4): 76-83.
- [14] 张子瑜,范建容,张建强,等.芦山地震重灾区地形因子分析[J]. 山地学报,2013,31(5): 624-631.
- [15] 裴向军,黄润秋.“4.20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3): 264-274.
- [16] 许志琴,李化启,侯立炜,等.青藏高原东缘龙门—锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制[J]. 地质通报,2007,26(10): 1262-1276.
- [17] 张岳桥,杨农,施炜,等.青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用[J]. 地球学报,2008,82(12): 1668-1678.
- [18] 刘树文,杨恺,李秋根,等.新元古代宝兴杂岩的岩石成因及其对扬子西缘构造环境的制约[J]. 地学前缘,2009,16(2): 107-118.
- [19] 陶晓风.龙门山南段推覆构造与前陆盆地演化[J]. 成都理工学院学报,1999,26(1): 73-77.
- [20] 余团,何昌荣,龙学明.龙门山南段五龙断裂带构造岩特征[J]. 矿物岩石,1999,19(1): 74-80.
- [21] Chen L C, Ran Y K, Wang H, et al. The Lushan Ms7.0 earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone[J]. Chin. Sci. Bull., 2013, 58: 3475-3482.
- [22] 林茂炳.对龙门山南段宝兴—芦山地区构造格局的探讨[J]. 成都地质学院学报,1992,19(3): 33-40.
- [23] 赵友年,蒋良志,魏继格,等.雅安地区地震地质特征与地震活动性研究[J]. 四川地震,1990,2: 1-48.
- [24] 李勇,周荣军,赵国华,等.龙门山前缘的芦山地震与逆冲—滑脱褶皱作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(4): 353-363.
- [25] 黄润秋,李为乐.汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护,2009,20(3): 1-7.
- [26] 庄建琦,崔鹏,葛永刚,等.5.12汶川地震崩塌滑坡分布特征及影响因素评价——以都江堰至汶川公路沿线为例[J]. 地质科技情报,2009,28(2): 16-22.
- [27] 苏生瑞,李松,程强.汶川地震后公路边坡崩塌灾害发育规律[J]. 山地学报,2012,30(3): 321-327.
- ① 四川省地质局第二区域地质测量队.1:20万宝兴幅地质图.1971—1976.