

汶川 5.12 大地震地表次生灾害评价与分析

孙晓宇^{1,2)}, 周成虎¹⁾, 郭兆成¹⁾, 张俊¹⁾, 苏奋振¹⁾, 仇天宇²⁾, 张丹丹¹⁾, 吕婷婷^{1,3)}

1) 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101; 2) 国家海洋局海洋环境预报中心, 北京, 100081; 3) 北京师范大学资源学院, 北京, 100875

内容提要:针对汶川 5.12 大地震, 对由地震引起的地质次生灾害发生的坡度和坡向进行了统计, 分析了地表破坏的易发坡度、坡向及其与震中的关系等。另外, 分别以不同震中距为缓冲区、以平行中央断裂带的各级缓冲区、以等烈度区为缓冲区对地震引起的地表破坏的空间分布以及发生地表破坏的坡度在各级缓冲区中的变化进行了分析。结果表明: ①地震引发的滑坡及滑坡群共 5093 个, 总面积大约 958 km²; ②在 30°~44°坡度区间地表破坏发生的数量最大, 42°坡度为地表破坏发生概率的拐点。主要的地表破坏发生在迎着地震波传播的坡向上; ③随着震中距的增加, 地表破坏的发生概率逐渐减小, 震中距 40km 以内的速度减小非常迅速, 40km 以外则整体上缓慢减少, 局部略有起伏。各缓冲区中发生地表破坏的平均坡度比缓冲区内的地形平均坡度大 4°左右。④地震引发的地表破坏主要受到断裂带的控制, 有 64.17% 的地表破坏发生在中央断裂带两侧 10km 范围内。⑤高地震烈度区域引发的地表破坏率远远大于低烈度区域, 在烈度为Ⅺ度的区域内发生地表破坏率达到 14.5%, 而Ⅶ度烈度带上引发地表破坏率仅为 0.01%。

关键词: 地震; 汶川; 次生地质灾害; 缓冲区; 空间分析

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分四川省汶川县映秀镇附近发生了 Ms8.0 级大地震, 震中位于北纬 31.0°, 东经 103.4°, 地震深度为 14km (中国国家地震局网, 2008)。NE 走向的龙门山断裂带是此次地震的发震构造, 龙门山断裂带由前山断裂 (江油-灌县断裂)、中央断裂 (映秀-北川断裂) 和后山断裂 (茂县-汶川断裂) 三条近平行的断裂组成 (Wu Zhenhan, 2009; 邓志辉等, 2008; 周荣军等, 2008; 李海兵等, 2008; 黄润秋, 2008)。其地震发生机制为中央断裂的右行走滑逆冲, 地层断层错动引起相应地表破裂, 其中沿中央断裂展布的地表破裂带长约 240 km。由于汶川地震震区所处的地质背景和自然地理条件, 地震引发了大量的次生地质灾害, 如山体滑坡、山体滑塌、岩块崩塌、局部产生泥石流等, 不仅造成了极为惨重的人员伤亡和财产损失, 也使得道路、河流、工程、农田、森林、野生动物保护区等遭到了严重的破坏 (郭华东, 2008; 吴珍汉等, 2008)。地震发生之后很多学者从地震次生灾害的机理 (王振荣等, 2008; 乔彦肖等, 2009; 张国民等, 2009; 李勇等, 2009)、次生灾害的数量及区域分布 (乔建平, 2009; 谢洪等, 2008; 姚文波等, 2008; 许冲等, 2009)、生态环境破坏 (王智等, 2009; 刘汉湖等, 2009) 等诸多方面进行了研究, 但由于时间短促以及天气情况的影响, 使得难以获取较高质量的覆盖全区的遥感数据, 使得研究主要以小区域分析为主, 缺乏对地震引起的地质次生灾害的全面综合分析。本文采用覆盖灾区的多传感器灾后遥感影像进行了地质次生灾害的提取, 并利用缓冲区的方法对次生灾害的数量分布、发生区域的坡度、坡向等进行了空间分析。

1 数据及方法

1 数据及方法

1.1 数据情况

本研究所采用的地震滑坡数据主要是利用“北京 1 号”小卫星影像、CBERS 影像, 并参照灾前的 Landsat ETM 影像进行目视解译获取的, 局部区域配合使用了 SPOT5 影像。地形数据采用了美国太空总署 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合进行的航天飞机雷达拓扑测绘任务 (SRTM) 采集的 DEM 数据。地震等烈度数据由中国国家地震局网获取 (中国地震局网: <http://www.cea.gov.cn>)。

注: 本文为国家自然科学基金重点项目 (编号 4083-0529) 资助的成果。

收稿日期: 2009-12-09; 改回日期: 2010-06-28; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 孙晓宇, 男, 1977 年生。博士。从事基于 GIS 与 RS 的土地利用时空变化研究以及海岸带土地开发利用强度评价研究等。

Email: sunxy@lreis.ac.cn。

地名、行政界线等辅助数据由国家基础地理信息中心共享网站提供,所有数据均采用 WGS84 坐标系,UTM 投影。

地震引发的地质次生灾害的主要特点是规模和分布范围通常很大,且常以灾害群或灾害链的形式出现(李树德等,2001;张永双等,2008),汶川 5.12 大地震同样具有这一特点,受遥感影像空间精度限制,解译过程中对于近距离相邻的、边界不清晰、难以单独提取的地质灾害体以灾害群的形式进行提取,这样所提取的地质灾害群中会有少部分非灾害区域被误分,因此,为了提高解译的面积精度,对解译斑块中的次生灾害所占比重进行目视判读,并据此赋予相应权重,规定次生灾害占斑块面积 95% 以上则赋予权重 10,占 85%~95% 的则赋予权重 9,占 75%~85% 的

则权重为 8。这样通过加权的形式可以减少灾区地质次生灾害面积统计中的误差。本文选取空间分辨率为 2.36m,轨道号为 11-65-C-1 的 CBERS-HR 影像为实验区对解译结果进行精度验证,结果表明加权后解译数量精度可以提高 8.56%,最终解译精度为 90.088%。另外,本文作者选取近百个验证点进行了野外验证,除个别影像阴影区的小面积灾害体有漏提外,基本没有错分漏分现象,验证区遥感影像与部分验证照片如图 1 所示。

1.2 研究方法

利用解译结果和 DEM 衍生数据对由地震引起的地质次生灾害发生部位的地形条件进行了统计分析,并分析在地震外力作用下地表破坏的易发坡度、坡向及其与震中的空间关系等。另外,分别利用震

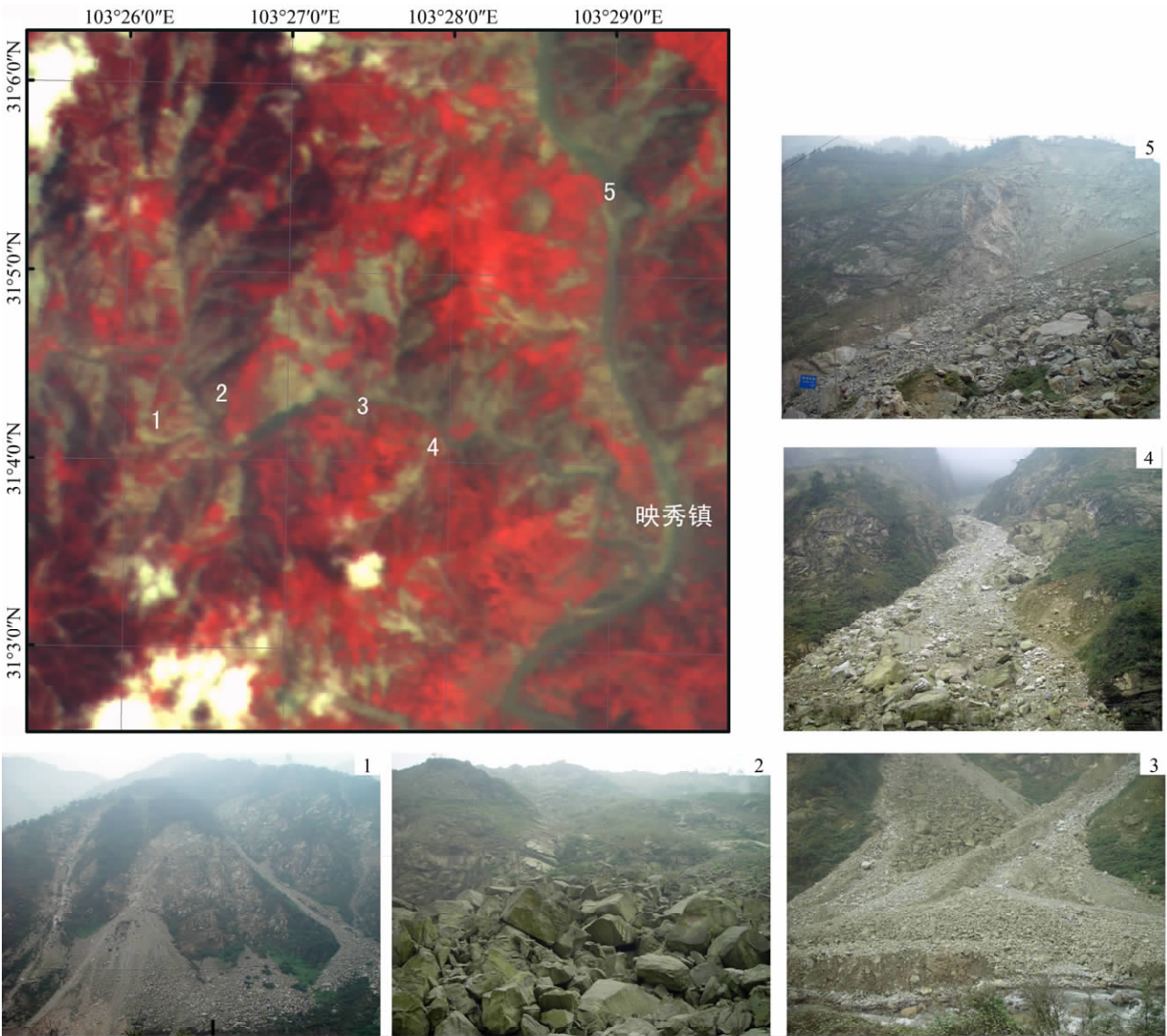


图 1 实地验证点
Fig.1 Field verification points

中距缓冲区(图 5)、平行与中央断裂带的距离缓冲区(图 8)、等烈度缓冲区(图 11)对地震引起的地表破坏的空间分布规律进行了分析。震中距分析中缓冲区间距为 10km;在平行断裂带的缓冲区分析中,各缓冲区间距为 20km,其中第三缓冲区的中心线大致与中央断裂带重合;地震等烈度缓冲区采用国家地震局网提供的汶川地震烈度分布图。

2 地震引发次生灾害的评价与分析

由解译结果可见,地震所引起地表破坏由震中沿着中央断裂带呈 NE 向展布,主体分布范围由汶川的卧龙至青川(图 5),共有大小次生灾害 5093 起,其中四川境内为 4406 起(由于部分以灾害群的方式进行提取,故数量略低于国土资源部统计值 5563 起)(中华人民共和国国土资源部网,2008),地表破坏总面积大约为 958.13 km²。

地震诱发地质灾害有别于暴雨诱发的地质灾害,前者在运动过程中大多不具备较高正压力作用与滑床的剪切作用,故地震诱发地质灾害大多没有典型的滑面和滑带(王运生等,2008),所以本研究的目视解译数据表达的是次生灾害体,而没有对次生灾害体的各部位进行单独提取,另外,由于地震诱发的地质灾害主要包括滑坡、崩塌、碎屑流,他们的共同特征为地表物质的空间位移,且对所触及区域的建筑物、植被等具有毁灭性作用力。本文根据其相似的影像特征及作用结果,未对其做进一步区分,统称为地表破坏。

2.1 地形条件对地震引发地质次生灾害的影响

(1) 坡度分析。图 2 中的曲线为地震引发的地表破坏在不同坡度范围上的分布数量统计,可以看出此次地震引发的滑坡、崩塌等地表破坏在坡度小于 30°的情况下随着坡度的增加数量呈线性增加的趋势,30°坡度上的地表破坏数量最大,达到 36.28 km²,30°~44°地表破坏的数量基本稳定在 35±2 km²,44°成为又一个拐点,由此随着坡度的增加地表破坏数量迅速减少,60°时地表破坏数量已经下降到 3.96 km²,大于 67°时各坡度地表破坏数量均不足 1km²,且仍然随着坡度的增大而逐渐减少。

如图 2 中柱状图所示,研究区内不同坡度上土地总数量有所差别,所以不同坡度上发生地表破坏的数量不能表达不同坡度上发生震后地表破坏的概率,因此本文利用不同坡度上发生地表破坏的数量与该坡度土地总数量做比值运算便可以获取不同坡度上的地表破坏率,见图 3。可以看出随着坡度的

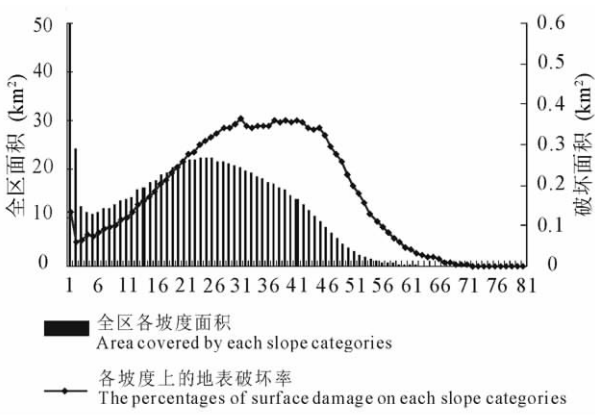


图 2 地表破坏面积随坡度的变化
Fig. 2 Ground damage occurred on each slope categories

增长由地震引起的地表破坏率平缓增长,42°坡度可以看做一个拐点,由此处随着坡度的继续增长,发生地表破坏概率的提升速度明显提高。而由于大于 60°的土地数量基数较小,所以大于 60°坡度上发生地表破坏的统计中偶然因素较大,对评价结果产生了一定的影响,但整体上随着坡度的增加,地表破坏率呈上升趋势。

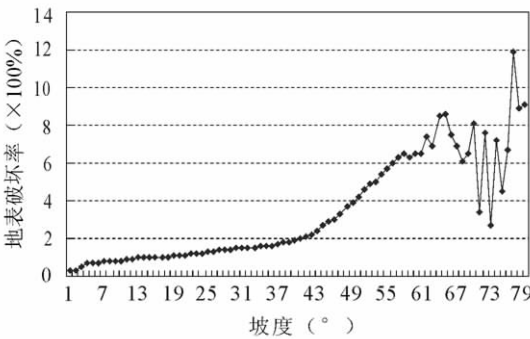


图 3 各坡度上的地表破坏率
Fig. 3 The percentage of ground damages on each slope categories

(2) 坡向分析。本研究采用八方向进行坡向分析,以正北向为 0°,337.5°~22.5°为北,22.5°~67.5°为东北,67.5°~112.5°为正东,这样以 45°顺时针递增,直到西北向为止,如表 1 所示。由地震引起的地表破坏在各个坡向上的数量分布如图 4 所示。由图可见地表破坏主要分布在南、东南和东三个坡向上,其中东坡上地表破坏面积大约为 217.47 km²,东南坡地表破坏面积大约为 212.7 km²,南坡大约为 208.92 km²,分别占全部地表破坏的 19.14%、18.73%、18.39%。北坡和西北坡向上分

布的地表破坏数量最少,其中西北坡只有 64.55 km²,而北坡也只有 80.05km²,分别只占全部地表破坏的 5.68%和 7.05%。

龙门山为北东-南西走向,位于青藏高原东缘与四川盆地的结合带,龙门山中部的映秀-北川断裂是此次地震的主断裂,震中处在汶川县境内,地震波主要沿着中央断裂带向北东向传播(许志琴等,2008,张培震等,2008),由解译结果可见地表破坏主要分布在中央断裂带以西的川西高原一侧。而在该区域东、东南、南坡均为迎着地震波传播的方向,北、西北、西均为背着地震波传播的方向,可见,汶川 5.12 地震所引起地表破坏主要发生在迎着地震波传播的方向上,而背向地震波的坡向上发生的地表破坏相对较少。

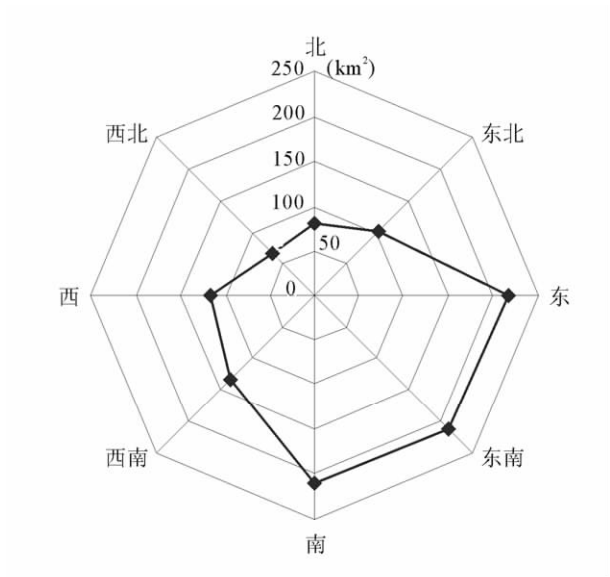


图 4 各坡向上地表破坏分布情况

Fig. 4 The area of ground damage on each aspect categories

表 1 不同坡向上地表破坏的分布

Table 1 The distribution of ground damage on each aspect categories

坡向	坡向范围	面积(km ²)	(%)
平坦	无	2.43	0.21
北	337.5°~22.5°	80.05	7.05
东北	22.5°~67.5°	100.02	8.81
东	67.5°~112.5°	217.47	19.14
东南	112.5°~157.5°	212.70	18.73
南	157.5°~202.5°	208.92	18.39
西南	202.5°~247.5°	132.97	11.71
西	247.5°~292.5°	116.81	10.28
西北	292.5°~337.5°	64.55	5.68

2.2 地震引发的地表破坏的缓冲区分析

地震引发的地表破坏除了受到地形因素的影响外,还与相对空间位置有着密切的关系,震中距的大小、与断裂带的距离、不同的地震烈度都对地表破坏的空间分布有着重要的影响。针对以上三种空间关系本文分别进行了地表破坏的空间分布规律研究。

2.2.1 震中距分析

如图 5 所示,以 10km 作为震中距的递增距离,进行缓冲区分析,获取了每个递增区间内地表破坏的分布情况。图 6 为对各个缓冲区内地表破坏的面积统计。可见地震所引发的地表破坏主要集中在距震中 100km 的范围内,面积达到 738.94 km²,占了所有地表破坏的 77.57%,其中第 6 缓冲区,即 50~60km 范围内的地表破坏数量最大,达到 113.2 km²。图 7 为各缓冲区内地表破坏率(地表破坏面积与该缓冲区面积之比)。从该图可以看出随着震中距的增加,地表破坏率逐渐减小。震中距为 10km 的范围内受到的破坏最为严重,地表破坏率达 11.44%,随着震中距的增加,地表破坏率逐渐减小,其中以距震中 40km 范围内的破坏率下降的速度最快,10~20km 区间内地表破坏率为 8.8%,20~30km 区间降到了 6.1%,30~40km 区间下降到 3.8%,降幅接近 3%。40~100km 的地表破坏率整体上呈下降趋势,但变化幅度不大,地表破坏率基本保持在 3%左右,100km 以外的区域地表破坏率相对与 100km 以内整体上又有较大幅度的下降,并且随着震中距的增加地表破坏率呈继续逐渐下降趋势,在 220km 附近由于受江油-广元等断裂的影响产生了规律性的微弱起伏。

2.2.2 平行断裂带方向上的缓冲区分析

地震所引发的地表破坏在垂直中央断裂带的方向上的分布跨度大致为 80km,以中央断裂带为轴,做平行于中央断裂带的 20km 间距缓冲区,如图 8 所示。其中第三带为覆盖中央断裂带的 20km 范围,第四带为后山断裂带,而第二带则覆盖了前山断裂带。经过缓冲区统计分析可见地震引发的地表破坏主要分布在覆盖中央断裂带的第三带(图 9),分布面积为 611.37km²,占有地表破坏的 64.17%;其次是覆盖后山断裂带的第四带,分布面积大约为 220.24 km²,占有地表破坏的 23.12%;覆盖了前山断裂带的第二带的地表破坏面积大约为 53.3 km²,占全部地表破坏的 5.59%;第五带仅次于第二带,地表破坏面积约为 47.28 km²,所占比重为 4.96%。随着远离中央断裂带,地表破坏的数量逐

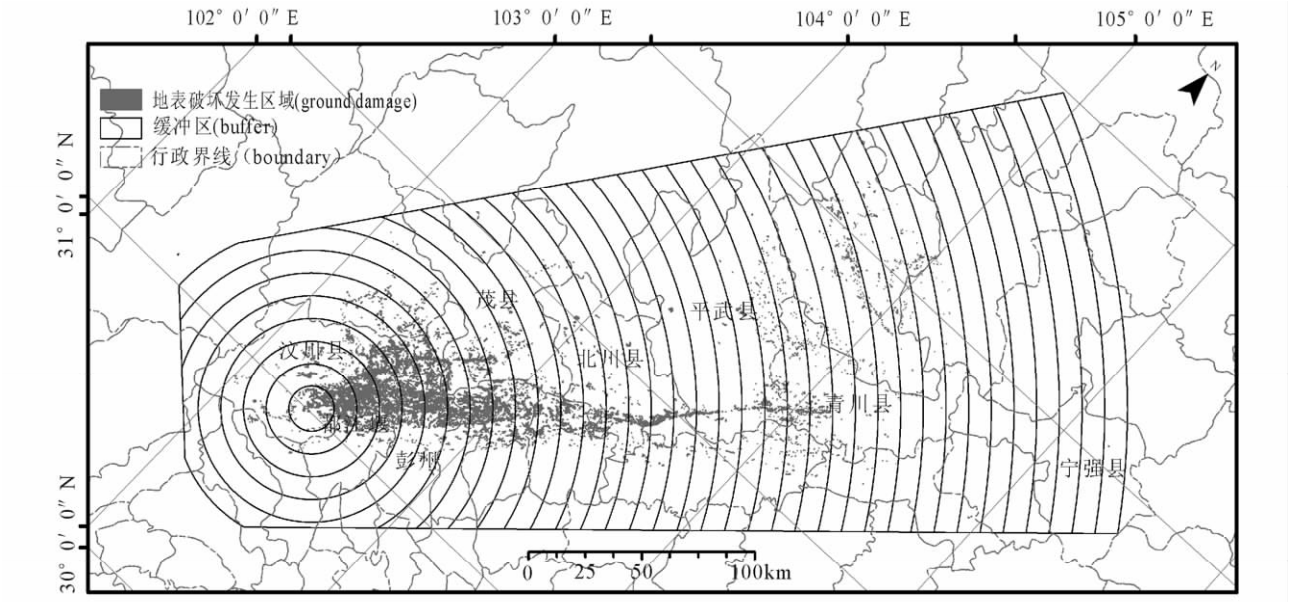


图 5 地表破坏的震中距分析

Fig. 5 Ground damage induced by Wenchuan earthquake according to epicenter distances

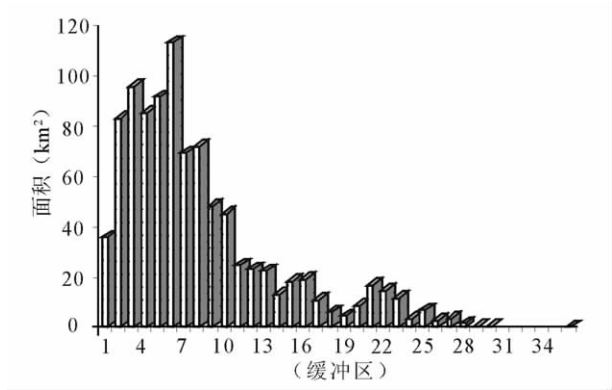


图 6 地表破坏数量随着震中距的变化

Fig. 6 Analysis of area of ground damage induced by Wenchuan earthquake according to epicenter distances

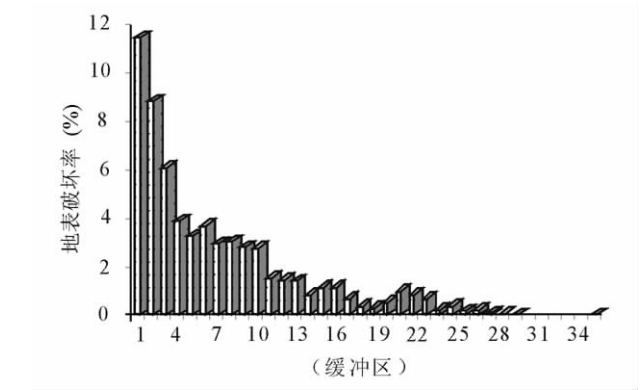


图 7 地表破坏率随着震中距的变化

Fig. 7 Analysis of frequency of ground damage induced by Wenchuan earthquake according to epicenter distances

渐减少,其余四个缓冲区内所发生的地表破坏之和只占有地表破坏的 2%。由于整个灾区地势呈现西北高东南低的格局,断裂带的下盘由坚固的扬子板块构成,地势相对平坦,而上盘则是川西高原的隆起,地势陡峭(Chen Jianping 等,2009),所以地表破坏由中央断裂带向南东向的速度减少远远快于北西向的速度减少,过了前山断裂带进入扬子板块后基本没有较大规模的地表破坏发生。

由于各缓冲区的面积相同,所以各缓冲区内地表破坏率与地表破坏的数量分布有着相同的变化规律,由图 10 可见,第三带的地表破坏率最大,达到 7.3%,第四带为 2.6%,第二和第五带分别为

0.63%和 0.56%,第六带为 0.16%,其余各带均不足 0.1%。

2.2.3 地表破坏在不同烈度带上的分布分析

地震烈度具有一定规律的衰减性,在最小烈度为 V 的区域即可引起滑坡(李忠生,2003),汶川 5.12 地震的最高烈度达到 XI 度,如图 11 所示,两个高强度烈度区域,分别分布在映秀镇以及北川县境内。各烈度带整体呈以中央断裂带为主轴的椭圆形,烈度向四周逐渐衰减。由各烈度缓冲区内地表破坏面积的统计结果可见(图 12),烈度为 XI 度的区域引发的地表破坏面积为 325.67 km²,虽然仅比烈度为 X 度的区域多 1.09km²,但是其地表破坏率高达

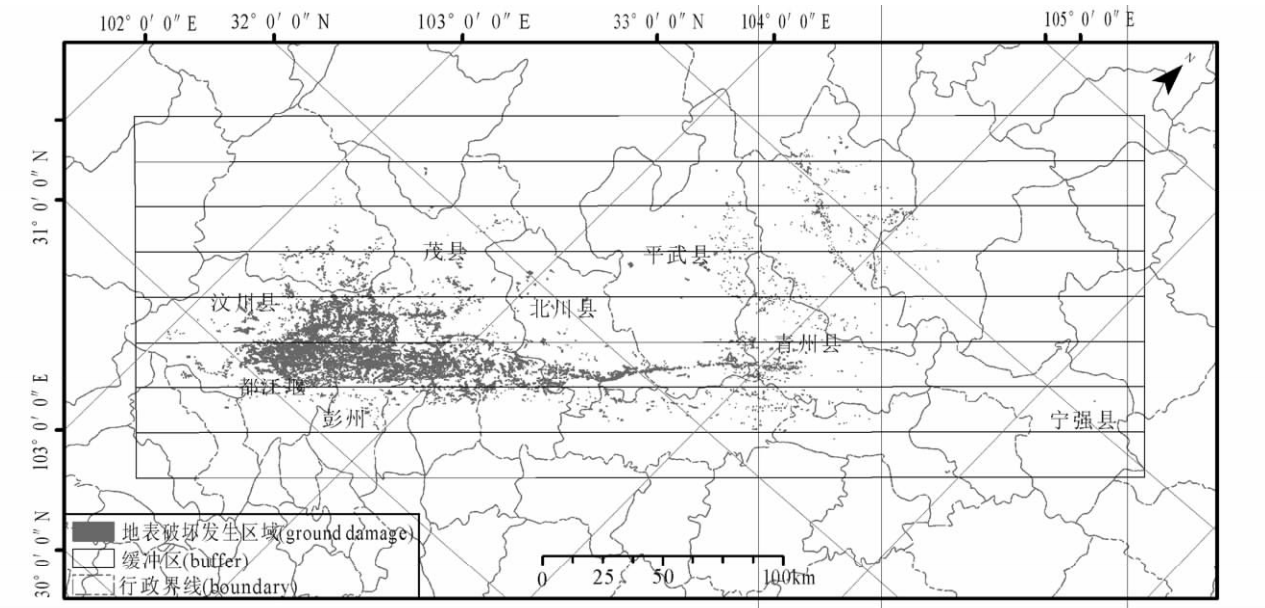


图 8 平行中央断裂带的缓冲区分析

Fig. 8 Analysis of the ground damage distribution parallel to the central fault zone

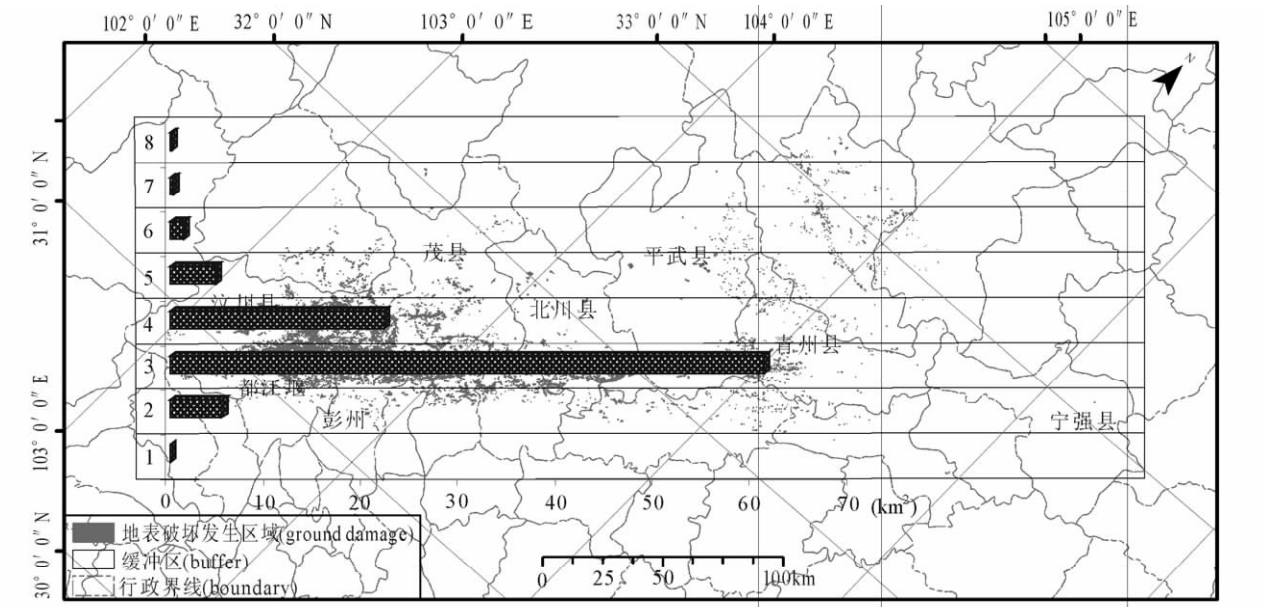


图 9 地表破坏数量在不同缓冲区中的分布

Fig. 9 The distribution of the ground damage in different regions defined by the distances from the central fault zone

14.5%，而Ⅹ度烈度区域上的地表破坏率却仅为9.4%；烈度为Ⅸ度的区域内分布的地表破坏为140km²，地表破坏率只有1.8%；烈度为Ⅷ度的区域分布的地表破坏为153.6km²，虽然面积大于Ⅸ度的区域，但其地表破坏率仅为0.57%；而烈度为Ⅶ的范围内分布的地表破坏最少，只有8.8 km²，相应的地表破坏率也只有0.01%。这种地表破坏率与地

震烈度的相关性也显示了地震引发的地表破坏空间分布的区域规律。

3 结论

本研究以 DEM 数据衍生的坡度、坡向数据为本底数据，以缓冲区分析为主要研究方法对 2008 年四川 5.12 大地震所引发的地质次生灾害的空间分

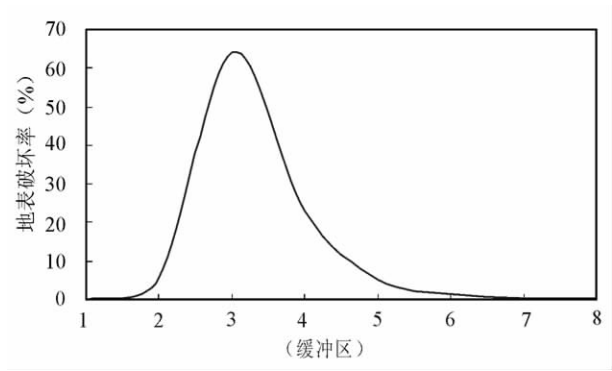


图 10 地表破坏在 8 个缓冲区中的分布比重(%)
Fig. 10 The percentage of the ground damage in different regions defined by the distances from the central fault zone

布进行了分析,得到以下结论:

(1)在小于 30°坡度上地震引发的地表破坏随着坡度的增加而稳定增长,30°~44°坡度上发生的数量最大,大于 44°则数量逐渐减少。从地表破坏发生概率上分析,坡度小于 42°时,随着坡度的增加,地表破坏发生概率缓慢增长,42°以后的发生概率增长速度迅速提高。

(2)受发震地区地形的控制,主要的地表破坏发生在迎着地震波传播的坡向上,南、东南和东三个坡向上分布的地表破坏分别占全部地表破坏的 19.14%、18.73%、18.39%。

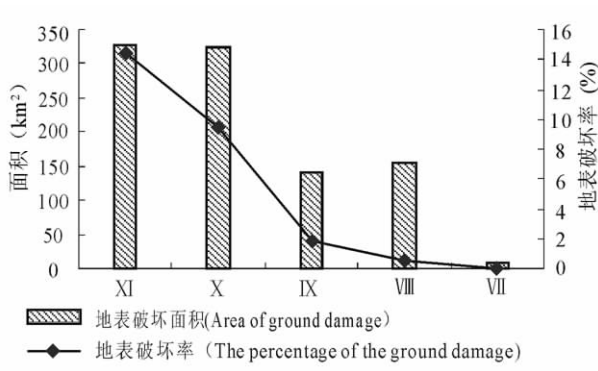


图 12 不同烈度区中的地表破坏率
Fig. 12 Frequency of ground damage in different intensity region

(3)随着震中距的增加,地表破坏的发生概率逐渐减小,震中距 40km 以内的范围速度减小非常迅速,40km 以外的区域整体上缓慢减少,但受其它断裂带的影响局部略有起伏。

(4)此次地震引发的地表破坏主要受到断裂带的控制,有 64.17%的地表破坏发生在中央断裂带两侧 10km 范围内,另外有 23.12%发生在后山断裂带两侧,随着远离中央断裂带,地震引起的地表破坏逐渐减少,受地形影响,向四川盆地方向的速度减少明显高于向川西高原方向的速度减少。

(5)高地震烈度区域引发的地表破坏率远远大于低烈度区域,在烈度为 XI 度的区域内地震引发的地表

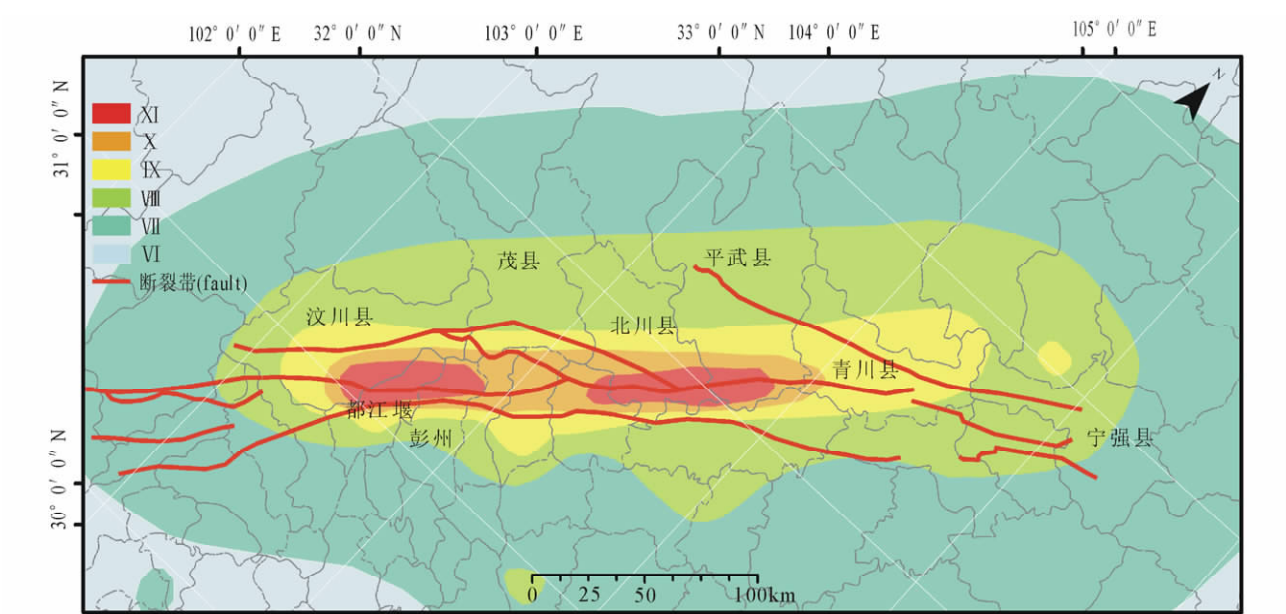


图 11 等烈度缓冲区(中国国家地震局网)
Fig. 11 Regions defined by intensity of earthquake

Assessment and Analysis of the Secondary Geological Disasters Induced by the
5.12 Wenchuan Earthquake

SUN Xiaoyu^{1,2)}, ZHOU Chenghu¹⁾, GUO Zhaocheng¹⁾, ZHANG Jun¹⁾, SU Fenzhen¹⁾,
ZHANG Tianyu²⁾, ZHANG Dandan¹⁾, LÜ Tingting^{1,3)}

1) *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101;* 2) *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing, 100081;* 3) *College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing, 100875*

Abstract

The devastating Ms8.0 earthquake struck Wenchuan, China on 12 May 2008. It caused considerable damage and lots of secondary geological hazards such as landslides, collapses, mud-rock flows etc. Based on the interpretation of remote sensing images, this study built the geological hazards database. The areas in different slopes and aspects vulnerable by geological hazards were calculated using GIS tools, and the relationship between the ground damage induced by 5.12 Wenchuan earthquake and slopes was also analyzed. In addition, three kinds of buffer analysis methods were employed in this paper in order to identify the spatial distribution patterns of the ground damage. The results shows that: ① the number of the secondary geological hazards interpreted by RS images in the study area was more than 5093 and the total area of ground damage induced by the Wenchuan earthquake was more than 958 sq. km. ② Most of the ground destruction occurred in the slope gradient ranging from 30° to 44°. Geological hazards distribution also shows a correlation with the orientation of mountain slopes, the geological hazards mainly happened at the aspects that faced the seismic wave. ③ With the increasing of epicenter distance, the probability of occurrence of geological hazards decreased gradually. The percentage of geological hazards within the 40km epicenter distance deceased greatly, and the average slope of geological hazards in every buffer was about 4 larger than the average slope of the buffer they located. ④ The geological hazards were distributed mainly around the seismic faults, and about 64.17% of them was distributed within the 10km range around the main seismic fault zone. ⑤ The geological hazards happened most frequently in the regions with high seismic intensity than in regions with low seismic intensity. The percentage of geological hazard was happened in region with VII degree of intensity was about 14.5% while it was only about 0.01% in region with VIII degree of intensity.

Key words: earthquake; Wenchuan; secondary geological disaster; buffer; spatial analysis