

2013年芦山地震滑坡空间分布样式对盲逆断层构造的反映

许冲*, 徐锡伟

中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: xuchong@ies.ac.cn

2013-05-18 收稿, 2013-10-10 接受, 2014-02-24 网络版发表

国家自然科学基金(41202235, 91214201)和中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1215, IGCEA1302)资助

摘要 2013年4月20日芦山地震后, 关于地震发震断层的判识与考察成为了地震学家关注的对象与争论的焦点. 基于野外调查与可利用的高分辨率航片人工目视解译方法, 初步建立了芦山地震滑坡空间分布图. 从地震滑坡的角度开展芦山地震发震断层的分析与讨论, 旨在为芦山地震发震构造研究提供地震滑坡方面的证据. 综合垂直可能发震断层走向的3个地震滑坡密度剖面分析的结果为: 双石-大川断裂的下盘区域发生了较多的滑坡, 滑坡丰度在双石-大川断裂附近没有发生突变行为; 滑坡在大邑断裂附近发育极少, 滑坡密度没有发生突变行为; 滑坡密度在上里西断裂NW方向1~2 km处发生了一次较明显的突变行为, 上里西断裂的上盘滑坡丰度明显高于下盘. 据此, 本文得出了初步结论: 在芦山地震中主要活动的断层既不是双石-大川断裂, 也不是大邑断裂, 更可能是两者之间的一条具有明显的线状地貌特征的上里西断层, 断层错动并没有传到地表, 为一次盲逆断层型的构造地震.

关键词

芦山地震
滑坡
空间分布样式
盲逆断层
航片

同震地表破裂与滑坡是大地震产生的2种主要的地貌改变形式, 两者关系密切. 地震滑坡往往沿着同震地表破裂带密集分布, 地表破裂带各个段落的滑坡分布情况又随着不同段落断层的几何特征与运动习性有着明显的差异. 因此, 在地震发震断层不明确的情况下, 应用地震滑坡的空间分布情况开展地震发震构造分析是一个可行的办法, 有的研究表明同震滑坡的空间分布样式可以反映地震发震构造与同震滑移的情况^[1].

2013年4月20日四川省芦山 M_s 7.0级(M_w 6.6级)地震之后, 关于地震发震构造是哪条断裂的问题成为了关注的热点. 芦山地震的震源机制解研究^[2-5]没有达成共识, 多认为是双石-大川断裂发生了逆冲错动. 野外考察的初步结果认为, 尽管本次地震产生

了一些地表破裂迹象, 但是并没有产生明显的地震地表破裂带. 这次地震属典型的盲逆断层型地震, 其发震断层尚未出露地表, 隐伏在地下^[6]. 因此, 有必要开展地震滑坡与震区几条主要的北东向断裂(如双石-大川断裂、上里西断裂、大邑断裂, 甚至可能的芦山县-龙门乡一带的隐伏断裂)的关系研究, 从地震滑坡的角度开展芦山地震发震构造分析.

本文基于野外调查与可利用的高分辨率航片目视解译的方法, 在航片覆盖范围约2885 km²的区域内初步建立了芦山地震滑坡编录图, 得到了3883处芦山地震滑坡的位置信息. 在对这些滑坡开展垂直断层错动方向的3个地震滑坡密度剖面空间分析的基础上, 讨论芦山地震的发震构造归属. 以期从地震滑坡的角度给予芦山地震发震构造的认证提供一些证据.

引用格式: 许冲, 徐锡伟. 2013年芦山地震滑坡空间分布样式对盲逆断层构造的反映. 科学通报, 2014, 59: 979-986

英文版见: Xu C, Xu X W. The spatial distribution pattern of landslides triggered by the 2013 Lushan earthquake and its implication to the seismogenic blind-reverse-fault. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0202-0

1 芦山地震滑坡空间分布样式

对芦山地震滑坡调查采用以基于高分辨率震后遥感影像目视解译为主,以实地调查验证为辅的方法.震后野外调查表明,芦山地震触发了大量的滑坡,类型各种各样,主要包括岩质崩塌、土质崩塌与岩质滑动等类型^[7].芦山地震后,我们搜集到的可利用的震后航片覆盖范围约 2885 km²,如图 1.基于航片开展地震滑坡的详细解译工作需要遵循如下标准:(1)关于解译滑坡尺度的问题,本文遵循可解译原则,只要是能够从航片上观测到的滑坡,均进行标定;(2)关于震前的滑坡,许冲等人^[8]在 2008 年汶川地震滑坡编录工作中认为如果地震前后的滑坡形态一致,则认为该滑坡不是本次地震触发滑坡,如果两者形态不一致,则认为是本次地震的滑坡.然而由于获取到的本次地震前后的遥感数据源不一致,且多数滑坡规模较小,难以从形态方面去进行是否是芦山地震触发滑坡的判别.由于震区植被覆盖厚、降雨多,

非地震触发滑坡在色调上往往较芦山同震滑坡暗淡.因此,本文基于滑坡面是否新鲜,来判别滑坡是否由芦山地震触发.需要注意的是,相当数量的滑坡虽然也破坏了植被,但是滑坡物质所过之处只是打倒了树木,岩石并没有裸露出来,在航片上需要仔细辨别.基于此,我们制作了芦山地震滑坡空间分布图(图 1).在可利用的震后航片覆盖的范围内,得到 3883 处滑坡.对部分滑坡开展野外验证,实质上,由于震后的航片分辨率是 0.6 m 的,其效果几乎可以与野外现场照片相媲美.部分滑坡野外调查与验证结果表明了通过高分辨率解译滑坡的科学性与可行性,图 2 展示了 2 组芦山地震触发滑坡的照片与航片.从图 1 中可以初步看出,同震滑坡多发生在上里西断裂的上盘区域.双石-大川断裂的两侧均发育了大量的滑坡,在双石-大川断裂附近没有明显的滑坡发育程度突变界线.

基于 500 m 的搜索半径,建立了滑坡分布点密度图(图 3),多数密度大于 5 个/km²的区域分布在震中

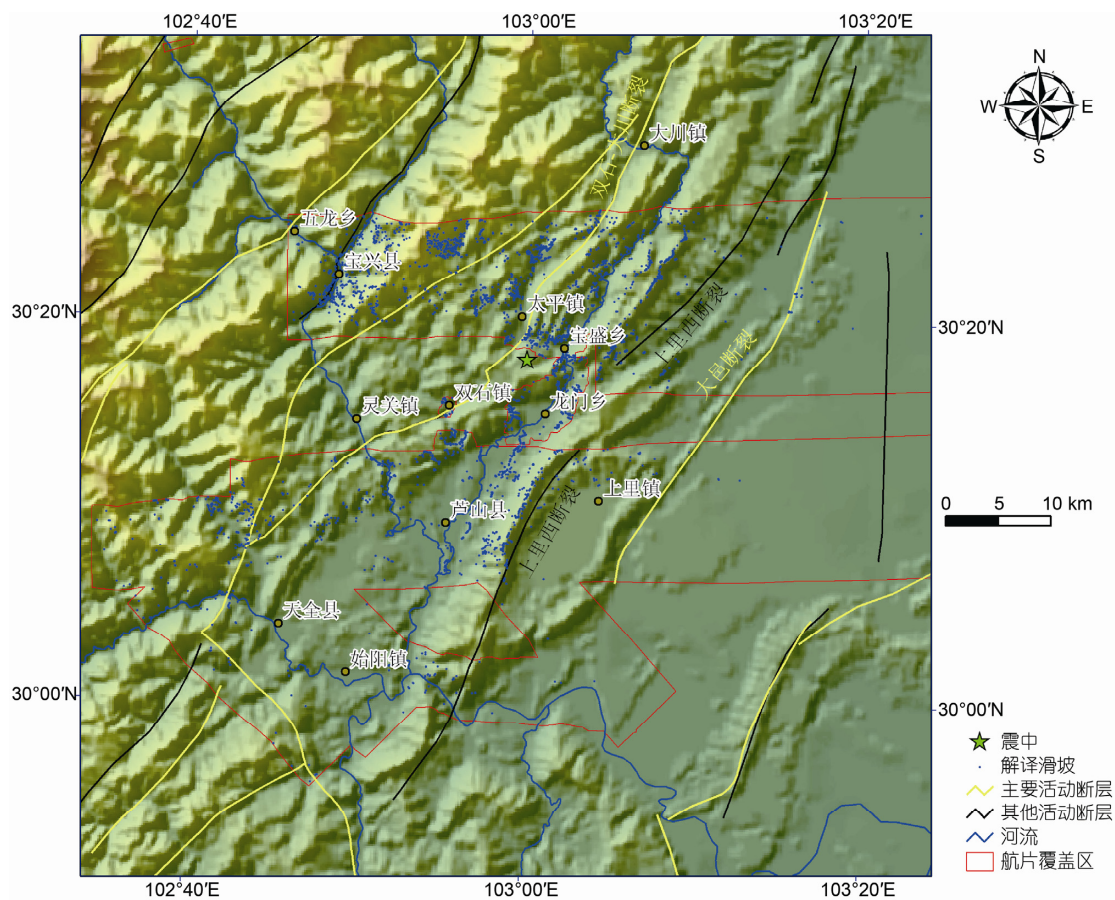


图 1 芦山地震滑坡空间分布图



图 2 芦山地震典型滑坡照片与航片对比

(a) 茶板坡滑坡照片; (b) 茶板坡滑坡航片全貌; (c) 汤家沟坪头地震远程碎屑流型滑坡照片; (d) 汤家沟坪头地震远程碎屑流型滑坡航片全貌

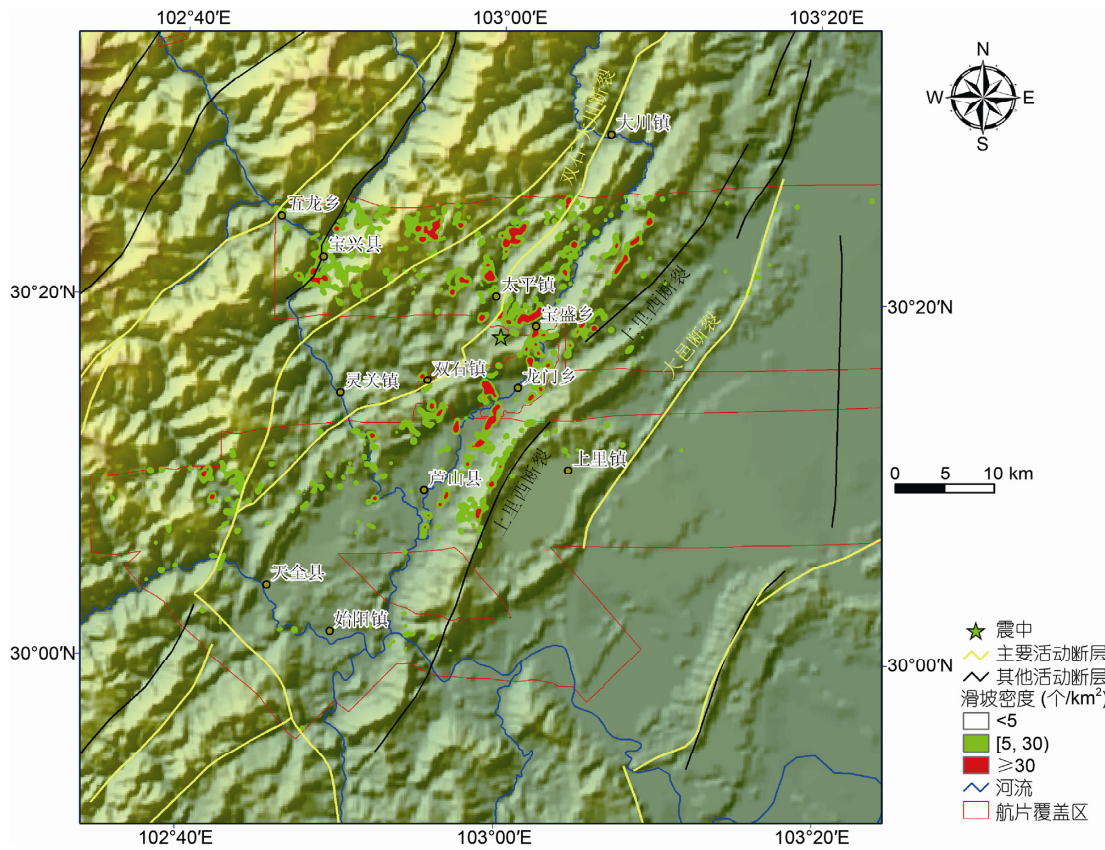


图 3 芦山地震滑坡点密度分布图

的北部与西北部山区,芦山县-龙门乡-宝盛乡一带尽管位于双石-大川断裂的下盘区域,但是滑坡密度也相当高,这暗示着芦山地震的发震断裂不是双石-大川断裂,而是双石-大川断裂东部的某条断裂。

2 地震滑坡跨逆断层地表破裂的丰度突变特性

活动断层对地震滑坡具有显著的控制作用,不同运动习性的断裂周围发生的地震滑坡分布样式各异.逆冲型地震触发滑坡多分布在断裂的上盘,且随着距离发震断裂(地表破裂)的增加,滑坡在上盘的衰减速率明显低于下盘^[8];走滑型断裂两侧的滑坡发育情况区别较小,滑坡往往沿断裂密集分布^[9-11];一些破裂机制复杂的地震,如2010年1月12日海地地震,其触发的滑坡空间分布特征相当复杂,与地震发震构造的关系不如其他地震事件触发滑坡明显^[12-14]。

逆冲断裂型地震导致的地震滑坡往往发育在断层的上盘,显示出强烈的上盘效应.如2008年汶川 M_w 7.9级地震触发的滑坡大多分布在断层的上盘^[15-19],上盘的滑坡丰度值明显高于下盘,滑坡在断层上盘的衰减速度明显低于下盘,图4表明了汶川地震滑坡平行于发震断裂的丰度(滑坡面积百分比、滑坡中心点密度与源区点密度)从上盘到下盘,在跨越了发震断裂(地表破裂)之后,丰度急剧减少,滑坡丰度在断裂(地表破裂)附近发生了明显的突变.2008年日本岩手-宫城 M_w 6.9级Nairiku逆断层型地震的滑坡空间分布表明,在发震断层的上盘触发了超过4100处滑坡,而在下盘滑坡的数量急剧减少,甚至很难发现滑坡^[20].Sato等人^[21]的研究表明,2005年10月8日克什米尔地震触发的2424处滑坡大部分发生

在发震断层的上盘,而且约47%的滑坡发生在距离地表破裂2 km的区域内,表现出了强烈的跨断层(地表破裂)突变性.2004年10月23日日本新潟县 M_w 6.6级地震是由盲逆断层触发的地震事件,地震触发的滑坡大多分布在上盘的陡峻地形区域内^[22].Wang等人^[23]的研究表明1999年 M_w 7.6级集集地震触发的滑坡大多分布在上盘,在距离发震断层20~40 km的上盘区域也是滑坡高发区,在发震断层的下盘仅发育较少的滑坡.同样表现出了地震滑坡多分布在上盘,跨断层突变性的趋势.其他如2002年美国阿拉斯加州迪纳利断层 M_w 7.9级地震^[24]、1994年 M_w 6.7级美国北岭地震^[25,26]等的逆断层地震滑坡事件也表明了地震滑坡跨逆断层(地表破裂)的丰度突变特性。

3 芦山地震滑坡的垂直断层统计

与2008年5月12日汶川地震发震背景^[27-29]类似,2013年芦山地震是巴颜喀拉块体向东南运动过程中受到华南地块的阻挡,引起两者之间龙门山构造带南段深部缓倾角逆断层黏滑错动的结果^[6],其可能是龙门山断裂带南段芦山一带破裂空段的填补^[30].芦山地震震源机制解反演结果表明发震构造为NE走向的龙门山推覆构造带内的1条断裂.区域内满足这一条件的断裂主要有3条,为双石-大川断裂、上里西断裂、大邑断裂.地震现场应急科考结果表明沿着这些断裂未发现明显的地震地表破裂带,仅在双石镇、太平镇、龙门乡等地存在一些NW-SE方向的挤压现象^[6].为统计芦山地震滑坡在各个可能的发震断层周围的发育程度,考虑几条疑似芦山发震断层的大致走向,基于北偏东41°方向的1 km条带分类统计每个条带内的滑坡密度.由于受到可利用航片的限

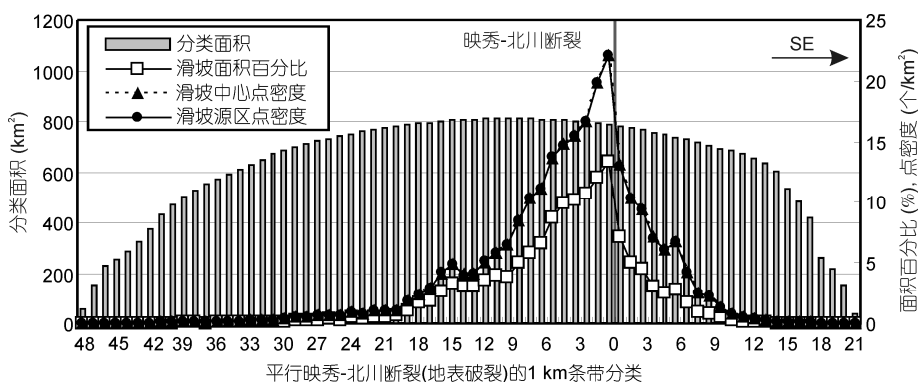


图4 汶川地震滑坡丰度的跨断层统计

制,因此本文除了统计总体的航片覆盖区的滑坡情况之外,还统计了I区与II区2条航片连续覆盖的区域内的滑坡情况(图5).

总体的统计区域见图5,由于航片覆盖的东部四川盆地,仅发生极少数的小型土质崩塌与滑动,因此将这些区域排除在外.统计的区域内发生3878处滑坡,统计结果见图6.从图6中可以看出,滑坡密度

曲线在“双石-大川断裂”附近没有发生明显的突变,表明了该断裂不是本次地震的发震断裂;在上里西断裂的NW方向1~2 km处发生较明显的突变,此处NW方向的滑坡密度较高(约大于3个/km²),而SE方向滑坡发育较少(约小于1个/km²),表明了上里西断裂在本次地震中活动的可能性较大;大邑断裂上下盘的滑坡发育均较少,表明了大邑断裂附近的区

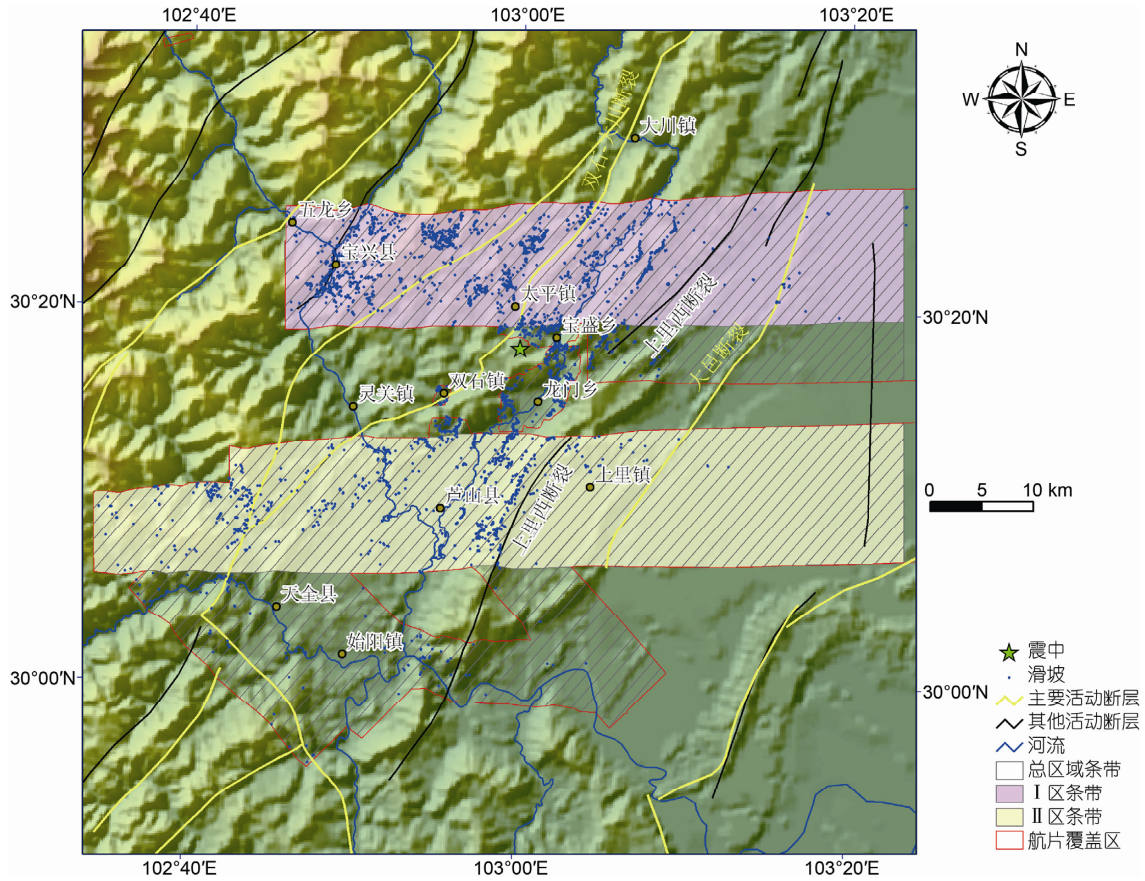


图5 滑坡密度统计的条带划分

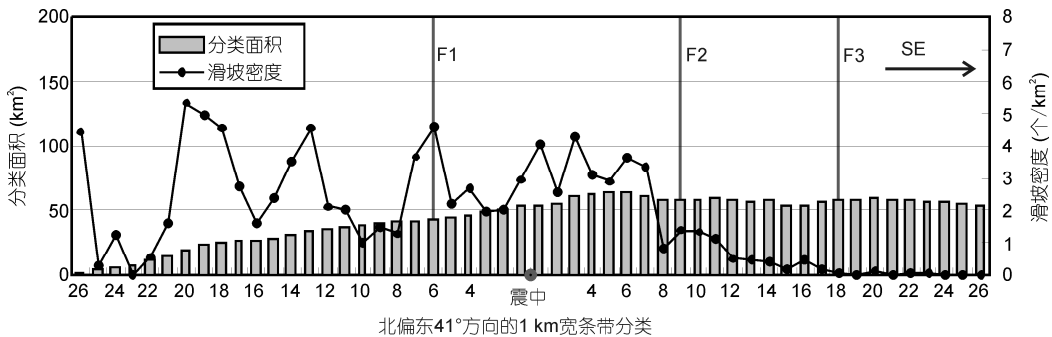


图6 航片覆盖区芦山地震滑坡跨区域NE向构造密度统计
F1, 双石-大川断裂; F2, 上里西断裂; F3, 大邑断裂

域整体位于本次地震发震断裂的下盘区域,大邑断裂没有在这次地震中发生活动。

为消除遥感影像覆盖范围不完全或者一些区域异常可能对结果产生的影响,本文选择了遥感影响连续分布2个跨断层的I区与II区2个条带区域开展研究(图5),采用同样的方法统计滑坡密度在北偏东41°方向的1 km宽条带分类内的曲线,结果见图7与8。I区内发生滑坡1869处;II区内发生滑坡1038处。与图6中滑坡密度曲线的所表现出来的趋势相似,两者在双石-大川断裂的下盘区域发育了较多的滑坡,滑坡横跨双石-大川断裂没有明显的突变,而在距离上里西断裂NW方向1~2 km的位置,滑坡密度均发生了较明显的突变。另外,尽管图6与7中的剖面均在NW方向距离双石大川断裂2,11与15 km附近发生了密度突变,但是这种突变持续的宽度并不大,且这些条带内的滑坡多是密集成片分布的,并没有在条带内均匀分布。因此,判断这些突变的原因是由于局部的坡度或者地层岩性的关系,并不是发震构造的作用。虽然本文是基于滑坡点密度统计的结果,但

前人的研究结果表明了滑坡点密度与滑坡面积百分比的统计曲线往往表现出相似的趋势^[15],因此本文基于点密度的滑坡丰度的统计结果也是可信的。

4 结果与讨论

最新的成果认为芦山地震是一次典型盲逆断层型地震^[6]。基于地震滑坡跨逆断层(地表破裂)的丰度突变特性,与双石-大川断裂的下盘区域“芦山县-龙门乡-宝盛乡”一带也发育了较多的地震滑坡的现象,可以从地震滑坡的角度初步印证发震断裂不是双石-大川断裂。然而,考虑到沿着双石-大川断裂的一系列挤压与疑似地表破裂的迹象、喷砂冒水现象^[6],不能否认该断裂在这次地震中起到了重要的作用,芦山地震应该也促使了双石-大川断裂的一些活动。再加上芦山县-龙门乡-宝盛乡一带发育的较高密度的同震滑坡(图3)与一些挤压现象^[6]。芦山地震产生的错动与能量被双石-大川断裂与可能的芦山县-龙门乡-宝盛乡一带的隐伏断裂吸收的一部分,因此没有足够的能量在上里西断裂上产生同震地表破裂。双

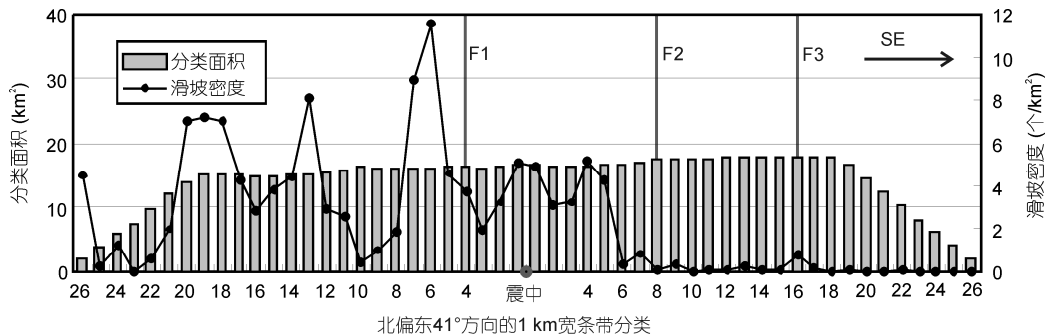


图7 I区芦山地震滑坡跨区域NE向构造密度统计
F1, 双石-大川断裂; F2, 上里西断裂; F3, 大邑断裂

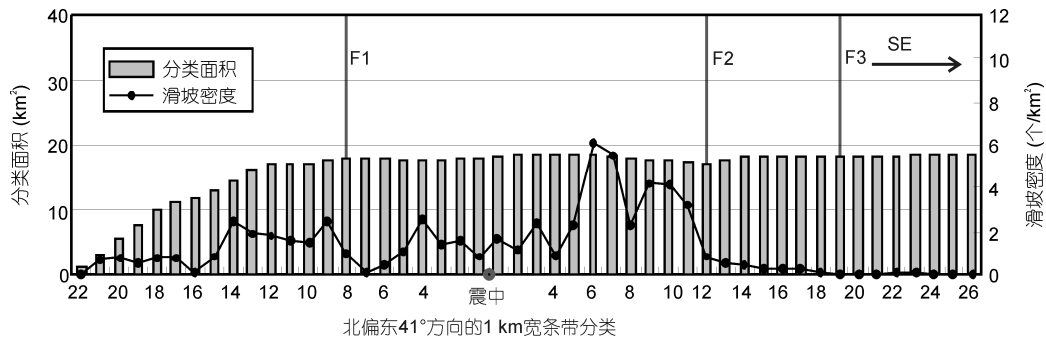


图8 II区芦山地震滑坡跨区域NE向构造密度统计
F1, 双石-大川断裂; F2, 上里西断裂; F3, 大邑断裂

石-大川断裂与上里西断裂之间区域发生的一些挤压现象与高密度的滑坡现象表明了该区域在地震时经历了相对其他区域大的形变, 这些形变的能量就来自于吸收的上里西断裂错动的部分能量. 图9简单示意了本次芦山地震的构造模型, 我们初步推断上里西断裂(F2)是本次地震的发震构造, 但是由于地震能量被双石-大川断裂与可能存在的芦山县-龙门乡-宝盛乡一带的隐伏断裂所吸收, 因此其没有在地表形成出露地表破裂的错动. 这一现象恰好可以解释滑坡的突变区发生在上里西断裂的NW方向1~2 km处, 而不是刚好在上里西断裂的穿越区域.

5 结论

基于野外实地调查与可利用震后覆盖约 2885 km² 高分辨率航片人工目视解译的方法, 得到芦山地震触发 3883 处滑坡, 滑坡主要分布在双石-大川断裂的上盘区域、双石-大川断裂与上里西断裂之间的区域. 统计了整个航片覆盖山区(发育滑坡 3878 处)以及 2 个航片连续覆盖的跨区域 NE 向构造的 2 个典型区域(分别发育滑坡 1869 处与 1038 处)的平行于区域构造方向(北偏东 41°)的 1 km 宽条带的滑坡密度变化曲线. 结果表明: 在双石-大川断裂附近, 滑坡的丰度并没有出现明显的突变; 双石-大川断裂的下盘也发育了

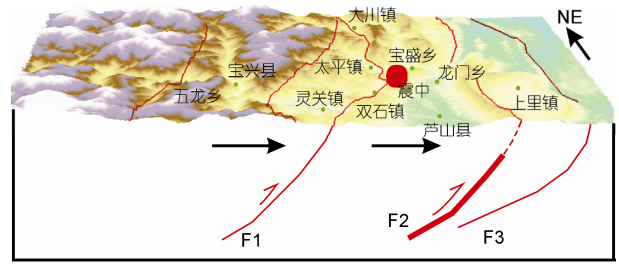


图9 芦山地震构造模型

F1, 双石-大川断裂; F2, 上里西断裂; F3, 大邑断裂. 红色粗线代表发震断层可能的错动位置

较多的滑坡; 大邑断裂附近的滑坡发育较少; 滑坡多发生在上里西断裂的上盘区域, 在上里西断裂 NW 方向 1~2 km 处, 滑坡丰度出现了明显的突变.

基于芦山地震滑坡的空间分布样式与区域构造的关系, 初步分析得到如下结论: 双石-大川断裂与大邑断裂均不是本次地震的发震构造, 最有可能是本次地震的发震构造的是上里西断裂, 由于地震的能量被双石-大川断裂与可能存在的芦山县-龙门乡-宝盛乡一带的隐伏断裂所吸收, 因此该断裂在地震时候没有出露地表, 从而造成了滑坡的丰度突变值出现在了该断裂 NW 方向 1~2 km 处. 本文结论为 2013 年芦山地震是一次盲逆断层型地震^[6]提供了地震滑坡方面的证据.

致谢 感谢中国科学院遥感与数字地球研究所、四川省测绘地理信息局、中国科学院光电技术研究所提供的震后航片, 中国地震局地震现场联合应急队发震构造科考队全体成员与高明星博士在野外工作中提供的帮助, 中国地震局地质研究所张培震研究员、高祥林研究员以及两位审稿人对本文的帮助与有益建议.

参考文献

- 1 Meunier P, Uchida T, Hovius N. Landslide patterns reveal the sources of large earthquakes. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 363: 27-33
- 2 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. *地球物理学报*, 2013, 56: 1412-1417
- 3 张勇, 许力生, 陈运泰. 芦山 4.20 地震破裂过程及其致灾特征初步分析. *地球物理学报*, 2013, 56: 1408-1411
- 4 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M_s 7.0 级地震介绍. *地球物理学报*, 2013, 56: 1404-1407
- 5 曾祥方, 罗艳, 韩立波, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M_s 7.0 地震: 一个高角度逆冲地震. *地球物理学报*, 2013, 56: 1418-1424
- 6 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. *科学通报*, 2013, 58: 1887-1893
- 7 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 2013 年四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震触发滑坡. *地震地质*, 2013, 35: 641-660
- 8 许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 等. 2008 年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析. *工程地质学报*, 2013, 21: 25-44
- 9 Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides triggered by slipping-fault-generated earthquake on a plateau: An example of the 14 April 2010, M_s 7.1, Yushu, China earthquake. *Landslides*, 2013, 10: 421-431
- 10 许冲, 徐锡伟. 走滑断裂型地震诱发的滑坡在断裂两盘的空间分布差异. *地质通报*, 2012, 31: 532-540
- 11 许冲, 徐锡伟, 于贵华. 玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制. *地震地质*, 2012, 34: 47-62
- 12 Xu C, Xu X W, Yu G H. Earthquake triggered landslide hazard mapping and validation related with the 2010 Port-au-Prince, Haiti earthquake. *Disaster Adv*, 2012, 5: 1297-1304

- 13 Gorum T, van Westen C J, Korup O, et al. Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake. *Geomorphology*, 2013, 184: 127–138
- 14 许冲, 徐锡伟. 俯冲带地区压扭断裂型地震触发滑坡及其剥蚀厚度空间分布规律分析. *工程地质学报*, 2012, 20: 732–744
- 15 Xu C, Xu X W, Yao X, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis. *Landslides*, 2013, doi: 10.1007/s10346-013-0404-6
- 16 Gorum T, Fan X M, van Westen C J, et al. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, 2011, 133: 152–167
- 17 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27: 2585–2592
- 18 Xu C, Xu X W. Comment on “Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China” by Shengwen Qi, Qiang Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu [*Engineering Geology* 116 (2010) 95–108]. *Eng Geol*, 2012, 133–134: 40–42
- 19 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述. *地质论评*, 2010, 56: 860–874
- 20 Yagi H, Sato G, Higaki D, et al. Distribution and characteristics of landslides induced by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 in Tohoku District, Northeast Japan. *Landslides*, 2009, 6: 335–344
- 21 Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery. *Landslides*, 2007, 4: 113–122
- 22 Kieffer D S, Jibson R, Rathje E M, et al. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, earthquake. *Earthq Spectra*, 2006, 22: S47–S73
- 23 Wang W N, Wu H L, Nakamura H, et al. Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-chi earthquake in central Taiwan. *Island Arc*, 2003, 12: 325–334
- 24 Jibson R W, Harp E L, Schulz W, et al. Landslides triggered by the 2002 Denali fault, Alaska, earthquake and the inferred nature of the strong shaking. *Earthq Spectra*, 2004, 20: 669–691
- 25 Harp E L, Jibson R W. Inventory of Landslides Triggered by the 1994 Northridge, California Earthquake. Reston: USGS, 1995
- 26 Harp E L, Jibson R W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake. *Bull Seismol Soc Amer*, 1996, 86: S319–S332
- 27 Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, 37: 515–518
- 28 Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 353–382
- 29 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. *科学通报*, 2009, 53: 119–124
- 30 陈立春, 冉勇康, 王虎, 等. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性. *科学通报*, 2013, 58: 1925–1932