

汶川地震前后崩塌和滑坡分布特征与敏感性对比分析

张建强, 范建容, 胡凯衡

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 以汶川地震活动断裂龙门山断裂带穿过的 12 个县(市)为研究区, 分析了研究区汶川地震前后崩塌和滑坡空间分布特征, 并使用统计学方法 Logistic 回归模型分别对震前震后的崩塌和滑坡敏感性进行评价, 结合崩塌和滑坡敏感性变化矩阵, 分析了汶川地震后崩塌和滑坡敏感性的空间变化特征。震前崩塌和滑坡高敏感区主要沿河谷分布, 而震后崩塌和滑坡高敏感区主要沿龙门山断裂带分布。震前的极高敏感区震后仍表现为极高敏感区, 而靠近断裂带的区域, 震前的低敏感区转换为高敏感和极高敏感区。

关键词: 汶川地震; 崩塌和滑坡; 敏感性评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0208-03

中图分类号: P642.23

Comparison of Landslide Distribution and Susceptibility Before and After the Wenchuan Earthquake

ZHANG Jian-qiang, FAN Jian-rong, HU Kai-heng

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Processes, Chinese

Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards

and Environment Research, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The distribution of landslides in the twelve counties where Longmenshan faults pass through was investigated before and after Wenchuan earthquake. Then, the logistic regressive model was utilized to assess the landslide susceptibility before and after the earthquake. Based on the susceptibility mapping and transformation matrix, the susceptibilities showed a significant spatial variation before and after the earthquake. The high susceptible zones for landslides were located along river valleys before the earthquake, while primarily along the Longmenshan faults after the earthquake. The extreme high susceptible zones did not change. The areas with low susceptibility near the Longmenshan faults turned into high susceptibility level after the earthquake.

Keywords: Wenchuan earthquake; landslide; susceptibility assessment

崩塌和滑坡是山区最主要的地质灾害之一, 位于青藏高原东缘的四川盆地西北部山区, 崩塌和滑坡尤为发育。崩塌和滑坡往往造成人员伤亡和财产损失, 同时作为剧烈的土壤侵蚀形式, 对山区的生态环境造成破坏。崩塌和滑坡的激发因素较多, 包括降水、地震、地下水位变化及人类活动等^[1]。其发生受到多种因素的制约和影响, 其中地质因素、地貌因素、激发因素及背景因子的相互耦合作用, 使得崩塌和滑坡在空间分布上具有一定的规律性。通过对崩塌和滑坡背景因子的统计分析, 获取各因子对其发生的影响程度, 从而对区域发生崩塌和滑坡的敏感程度进行评价, 而对地震前后崩塌和滑坡敏感性的对比研究, 可以探讨地震对区域崩塌和滑坡发生的影响。

1 研究区概况

选取汶川地震活动断裂龙门山断裂带穿过四川盆地西北部的青川、平武、江油、北川、安县、茂县、绵竹、什邡、彭州、都江堰、汶川、崇州等 12 个县(市)为研究区, 其中包含汶川地震 10 个极重灾县(市)。研究区内包含了汶川地震诱发的大部分崩塌和滑坡, 这对地震诱发崩塌和滑坡敏感性研究具有区域完整性。

该区地貌上位于青藏高原和四川盆地之间的过渡地带, 即我国地貌划分的第一级、第二级阶梯上, 是地貌变化剧烈的区域, 研究区内多为高山峡谷、河谷深切的高陡边坡地形, 地势海拔高, 相对高差也较大。区内断裂分布密集, 断层破碎带分布广泛, 控制着地区

收稿日期: 2011-08-06

修回日期: 2011-09-26

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“重大山地灾害综合风险分析的理论与方法”(KZCX2-YW-Q03-5-2); 国家重点基础研究发展计划“中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析”(2011CB409902)

作者简介: 张建强(1982—), 男(汉族), 河南省安阳县人, 博士, 助理研究员, 主要从事山地灾害分布规律与区域评价研究。E-mail: zhangjian-qiang82@163.com。

性地貌发育的格局^[2],这种地质地貌条件,利于滑坡崩塌的发育。汶川地震活动断裂龙门山断裂带是研究区内最主要的断裂,该断裂带由江油—都江堰断裂(前山断裂),北川—映秀断裂(中央断裂)和茂汶断裂(后山断裂)组成,其中北川—映秀断裂为汶川地震的主活动断裂。研究区基本包含龙门山断裂带的活动区域,地震中遭受严重破坏,滑坡崩塌极为发育,便于对震前震后的滑坡崩塌的分布规律及敏感性的比较研究。

该地区地层发育较全,自中远古界至第四系均有发育。区内上三叠统广泛出露,最厚可达 4 254 m,一般发育不完整,大部分地区缺失晚三叠世早期地层;发育多套滑脱层,如志留系龙马溪群(S_{11})和茂县群(S_{mx})、中三叠统雷口坡组(T_{21})、下三叠统嘉陵江组(T_{1j})等^[3]。龙门山断裂带前缘发育的中三叠世—侏罗纪地层最全,三叠统广泛出露,三叠纪以前的地层可以作为基底,三叠纪以后的主要沉积地层自下而上包括三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和第四系^[4]。

2 震前震后崩塌和滑坡区域分布特征

2.1 汶川地震前

研究区内崇州、都江堰、彭州、什邡及绵竹东南部为成都平原,地势平缓,无滑坡崩塌分布,可见坡度为崩塌和滑坡发生的控制性因素,当坡度小于 6° 时,无发生滑坡崩塌的可能。

位于青藏高原东部边缘山区,包括都江堰、彭州、什邡、绵竹以及安县的山区部分,崩塌和滑坡分布较多,该地区降雨量较为丰富,年降雨量在 800 mm 左右,随着高程的增加,年降雨量逐渐降低,特别是位于该区域西北侧的汶川、茂县则属于干旱河谷区域,气候干旱,降雨量较小,年降雨量在 500 mm 左右,且该区域的年 >50 mm 的暴雨日数约为 2~2.5 d,年暴雨日数向西逐渐减少。年降雨量大且年暴雨日数多,而降雨是崩塌和滑坡的重要激发因素之一,使该区域崩塌和滑坡的分布较广。

研究区西部,包括汶川县、茂县、北川县境内,滑坡崩塌主要位于河谷内,并沿河谷呈带状分布,如岷江河谷、通口河河谷等,滑坡崩塌分布密集(附图 5)。主要由于该区域为深切峡谷区,山体较高,在水流的侵蚀下,形成较深的河谷,而河岸的坡面在坡脚处形成临空面,易于滑坡崩塌的形成,同时在山区中,道路一般沿河流分布,道路的施工形成边坡,破坏了坡面的稳定,也促使了滑坡崩塌的发生。平武、青川和江油位于研究区的北侧,滑坡崩塌分布也较为广泛,但是由于多种因素影响程度差异较小,分布特征并不显著。

2.2 汶川地震后

2008 年 5 月 12 日,汶川映秀发生里氏 8.0 级地震,震源深度为 10 km。汶川地震诱发了大量的滑坡崩塌,这些滑坡崩塌具有分布范围广、数量多、规模大、危害严重的特点^[5],空间分布具有显著的规律性。

地震诱发的崩塌和滑坡,沿龙门山断裂带呈带状分布,崩塌和滑坡的面积及面积比例随距龙门山断裂带的距离逐渐减少。对龙门山断裂带的 3 条主断裂与滑坡的面积和面积比例进行统计分析发现,滑坡的发生与距中央断裂的距离成明显的反比例关系,位于 0~2 km 范围内滑坡面积为 8 224.7 hm^2 ,该段内滑坡的面积比例为 6.12%,均为最大值。随着距离的增大,滑坡面积和面积比例迅速减小,在距离中央断裂带 22~32 km 处,滑坡面积和面积比例有一定的上升,该区域主要受后山断裂的影响。对于后山断裂,崩塌和滑坡的面积与面积比例的最大值位于 0~2 km 和 20~22 km 处,此外,0~22 km 内的滑坡面积与面积比例均较大,此区域主要位于中央断裂和后山断裂中间,受到 2 条断裂的影响,22 km 以外面积与面积比例逐渐减少。而崩塌和滑坡与前山断裂的距离并无反比的关系,崩塌和滑坡的面积与面积比例的两个峰值位于 20 km 和 40 km 处,这 2 处分别位于中央断裂和后山断裂的位置处。

3 震前震后龙门山断裂带崩塌和滑坡敏感性对比

3.1 震前震后崩塌和滑坡敏感性建模

目前对区域崩塌和滑坡敏感性评价的方法较多,如物理模型法、专家经验法和统计学方法等,其中统计学方法通过对一定数量的崩塌和滑坡样本的影响因子进行机器学习,建立崩塌和滑坡的敏感性评价模型,进而对整个研究区进行评价,在评价过程中,人为干预较小,具有较强的客观性,且对建模精度具有完善的评估方法。本研究采用了统计学方法 Logistic 建模分别就震前、震后的崩塌和滑坡敏感性进行建模。

对震前的崩塌和滑坡发生的背景因子,选取了地貌因子和地质因子共 6 个指标。而对于地震诱发的崩塌和滑坡的敏感性评价,除考虑常规的地貌因子(高程、坡度、坡向)、地质因子(岩性)等因子外,汶川地震也具有一定的特殊性,如汶川地震的活动断裂龙门山断裂带由前山断裂、中央断裂和后山断裂 3 条断裂组成,而 3 条断裂的活动程度也不相同,且龙门山断裂带的西南端和东北端活动强度也不相同,因而选取了距前山断裂的距离、距中央断裂的距离、距后山断裂的距离及垂直于龙门山断裂带方向位置等因子作为评价的指标。建模时采集两类样本,一类为崩塌

和滑坡的样本,这类样本的敏感度设置为 1,另外一类样本为崩塌和滑坡的非敏感样本,这类样本主要选取在崩塌和滑坡发生的区域的 100 m 外(减少已有

(1) 震前崩塌和滑坡敏感性评价模型:

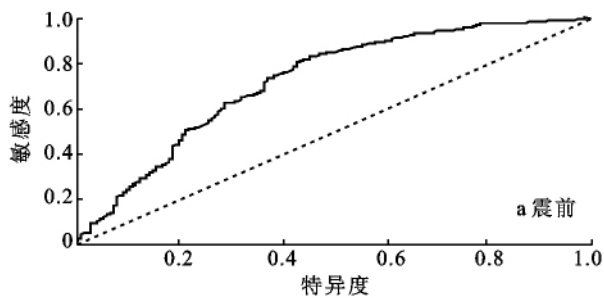
$$p = \exp(-0.5419 + 4.8330S + 0.2041L - 5.1127E + 0.6482A - 2.1849R + 0.1531F) / [1 + \exp(-0.5419 + 4.8330S + 0.2041L - 5.1127E + 0.6482A - 2.1849R + 0.1531F)]$$

(2) 震后崩塌和滑坡敏感性评价模型:

$$p = \exp(0.3775 - 5.3301E - 4.8427F_h - 3.2540F_z - 3.0276F_c - 5.5918M - 0.6950A + 11.1690S + 1.8801L) / [1 + \exp(0.3775 - 5.3301E - 4.8427F_h - 3.2540F_z - 3.0276F_c - 5.5918M - 0.6950A + 11.1690S + 1.8801L)]$$

式中: S ——坡度; E ——高程; A ——坡向; R ——距河流距离; F ——距断层距离; F_q ——距前山断裂距离; F_z ——距中央断裂距离; F_h ——距后山断裂距离; F_c ——垂直于断裂带方向位置; L ——岩性。

ROC 曲线为可视化的模型比较方法,一般使用 AUC(area under curve)评估敏感性建模的精度(图 1)。其中震前 AUC 为 0.719,震后 AUC 为 0.935,



崩塌和滑坡的影响),这些样本的敏感度设置为 0。利用统计学软件 R 软件分别对汶川地震前、后崩塌和滑坡敏感性进行建模。

均大于 0.5,故震前震后崩塌和滑坡的敏感性评价模型均可满足建模精度要求。

震后崩塌和滑坡敏感性建模的精度明显高于震前建模的精度。除了指标选取及采样造成的系统误差的影响外,地震诱发的崩塌和滑坡在空间分布的规律性更强些,这也是地震诱发滑坡建模精度更高的原因之一。

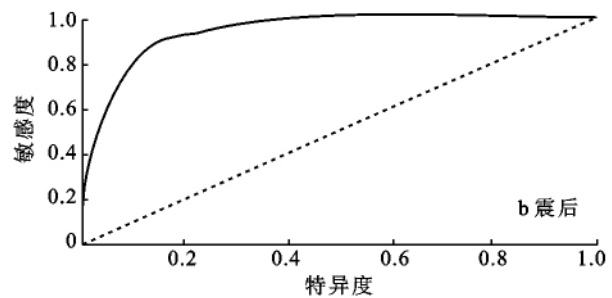


图 1 震前、震后崩塌和滑坡敏感性建模 ROC 曲线

3.2 崩塌和滑坡敏感性变化分析

对震前震后崩塌和滑坡敏感性评价模型分析得出,震前研究区崩塌和滑坡的敏感度与坡度呈正相关,且相关性最强,其次与距河流的距离呈负相关。震后研究区崩塌和滑坡的敏感度仍和坡度关系最为密切,其次为距离中央断裂的距离。对比震前震后崩塌和滑坡敏感性评价结果图(附图 6),可以看出震前崩塌和滑坡高敏感和较高敏感区域具有沿河谷分布的显著特征,而汶川地震诱发的崩塌和滑坡最为显著的特征为极高敏感和高敏感区域主要沿龙门山断裂带分布,特别是位于龙门山断裂带的西南部区域。

对震前震后的崩塌和滑坡敏感性评价结果进行叠加运算,统计建立崩塌和滑坡敏感性变化矩阵(表 1)。从表 1 中可以看出,震前的崩塌和滑坡极高敏感区在震后大部分仍为极高敏感区,震前的高敏感区,大量地转化为震后的极高敏感区和不敏感区,主要与其分布的位置相关,其中离龙门山断裂带较近的区域,震前的高敏感区等级升高,转换为极高敏感区,而对于远离龙门山断裂带的高敏感区域,受龙门山断裂

带的影响较小,崩塌和滑坡呈现出敏感,因而这些区域震前的高敏感区域转换为不敏感区域。

表 1 震前震后崩塌和滑坡敏感性变化矩阵 km²

项目	震后			
	极高敏感	高敏感	低敏感	不敏感
极高敏感	1 439.29	402.26	226.74	159.48
高敏感	2 677.41	1 651.48	1 713.23	2 488.58
低敏感	1 431.67	1 204.46	1 486.59	4 462.13
不敏感	268.67	420.06	687.75	9 095.30

在震前的低敏感区域内,约 30.71%的区域转换为极高敏感区和高敏感区,可以得出,在地震作用下,一些不易发生崩塌和滑坡的区域,发生崩塌和滑坡的可能性有所增加。而震前的低敏感区域,对于地震崩塌和滑坡呈现出不敏感,这是由于不敏感区的区域主要是由地形控制的,坡度很小,即不存在崩塌和滑坡发生的可能,因而无论是震前降雨因子的激发,还是汶川地震的激发,这些区域均对崩塌和滑坡的发生显示为不敏感。

(下转第 276 页)

广播、电视、报刊、杂志、公益性广告、画册、专栏等各种宣传媒体加强农业知识以及农业法律法规的宣传,增强珍惜和合理利用土地对维护国家粮食安全和社会稳定的重要性的认识,增强耕地的忧患意识,提高全民保护耕地的主动性和积极性。只有当节约用地和保护耕地成为全社会的共识,耕地的可持续利用才能成为可能,耕地资源保护才能真正实现。同时,耕地面积的减少与耕地的监管状况有着非常密切的关系,可以通过建立健全执法监督制度,强化对耕地的监管,还可以运用一系列先进技术,建立贵阳市耕地的动态监测系统,增强对耕地监管的准确性和时效性。

[参 考 文 献]

- [1] 李卫海,李阳兵,周炎,等. 1991—2006 年贵阳市土地利用变化及其驱动因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1890-1896.
- [2] 苏维词. 贵阳城市土地利用变化及其环境效应[J]. 地理

科学, 2000, 20(5): 462-468.

- [3] 张凤荣,王印传,齐伟. 耕地资源持续利用管理评价指标体系初探[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 50-53.
- [4] 李平,李秀彬,刘学军. 中国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 129-38.
- [5] 何蔓,张军岩. 全球土地利用与覆被变化研究及其进展[J]. 国土资源, 2005(9): 22-25.
- [6] 顾朝林. 北京市土地利用/覆被变化机制研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 307-312.
- [7] 张凤荣,薛永森. 中国耕地的数量与质量变化分析[J]. 资源科学, 1998, 20(5): 32-39.
- [8] 汪微,景高,石鹏,等. 耕地利用变化与人文驱动因素的灰色关联分析[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 2008, 42(4): 636-649.
- [9] 朱红波. 中国耕地资源安全研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008: 150-151.
- [10] 许月卿,李秀彬. 河北省耕地数量动态变化及驱动因子分析[J]. 资源科学, 2001, 23(5): 28-32.

(上接第 210 页)

4 结 论

(1) 山区崩塌滑坡主要沿河流分布,地形对其影响较大,而地震诱发的崩塌滑坡则突出显示为沿活动断裂呈带状分布,并随距断裂带的距离逐渐衰减。

(2) 坡度对崩塌滑坡的发生具有控制作用,震前为坡度较缓的崩塌滑坡不敏感区,在震后仍表现为不敏感区。

(3) 活动断裂对崩塌滑坡敏感性的影响表现在:靠近活动断裂的区域,崩塌滑坡的敏感性等级升高,甚至低敏感的区域也可以转换为极高敏感区;而远离活动断裂的区域,崩塌滑坡的敏感性等级则相应降低。

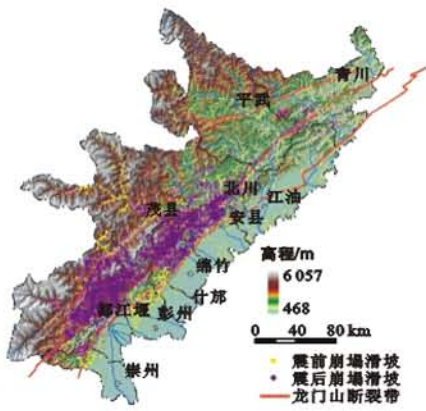
[参 考 文 献]

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 258-260.
- [2] 乔建平,蒲晓虹. 川滇地震滑坡分布规律探讨[J]. 地震研究, 1992, 15(4): 412-417.
- [3] 祁生文,许强,刘春玲,等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 39-49.
- [4] 金文正,汤良杰,杨克明,等. 川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1073-1080.
- [5] 崔鹏,韦方强,何思明,等. “5·12”汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280-282.

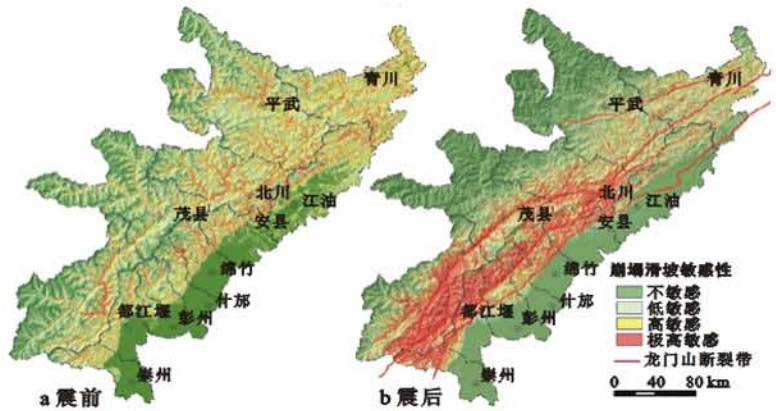
(上接第 224 页)

- [6] 宋萍,封磊,洪伟,等. 闽江口湿地主要土壤—植物系统硒的分配特征[J]. 华侨大学学报, 2009, 30(6): 673-676.
- [7] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 19-20.
- [8] 王永华,王五一,雒昆利,等. 大巴山区土壤中的硒和氟[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 61-67.
- [9] 郭宇,鲍征宇,马真真,等. 湖北恩施地区土壤—植物系统中 Se 元素的地球化学特征[J]. 地质通报, 2012, 31(1): 151-155.
- [10] 朱建宏,杨杰,何新科,等. 陕西省克山病区粮食和人群硒水平调查[J]. 中国地方病防治杂志, 2010, 25(6): 438-440.

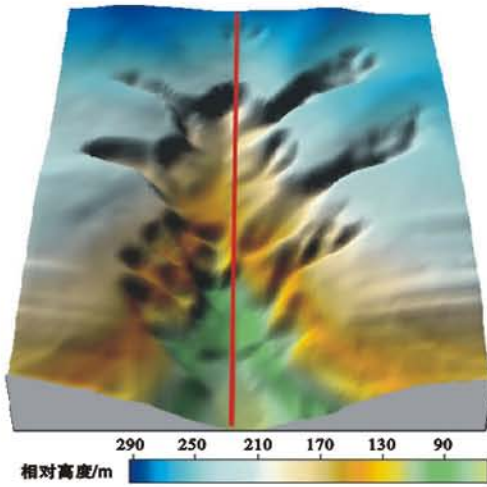
- [11] 陈金,潘根兴,王雅玲. 土壤硒水平对两种春大豆硒吸收与转化的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 428-432.
- [12] 吴永尧,卢向阳,彭振坤,等. Se 在水稻的生理生化作用探讨[J]. 中国农业科学, 2000, 3(1): 100-103.
- [13] 王美珠. 茶叶含硒量的研究[J]. 浙江农业大学学报, 1991, 17(3): 250-254.
- [14] 章海波,骆永明,吴龙华,等. 香港土壤研究: 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 404-410.
- [15] 潘金德,俞洁勤,毛春国,等. 潮土中水溶态硒和交换态硒含量变化的试验研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 96-98.



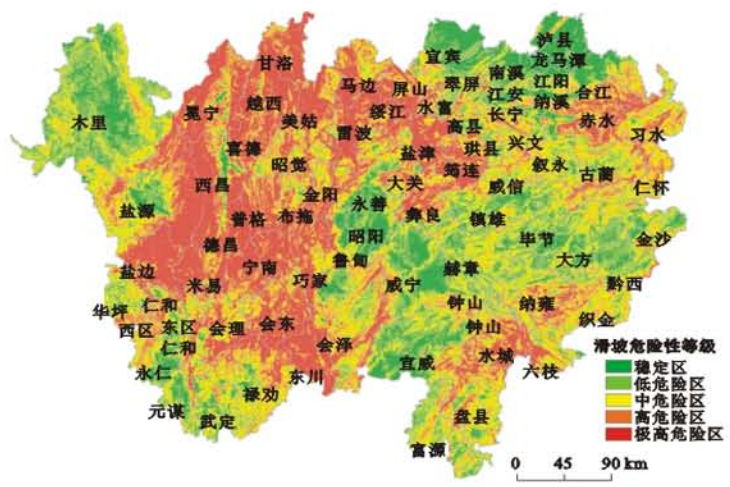
附图5 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡分布



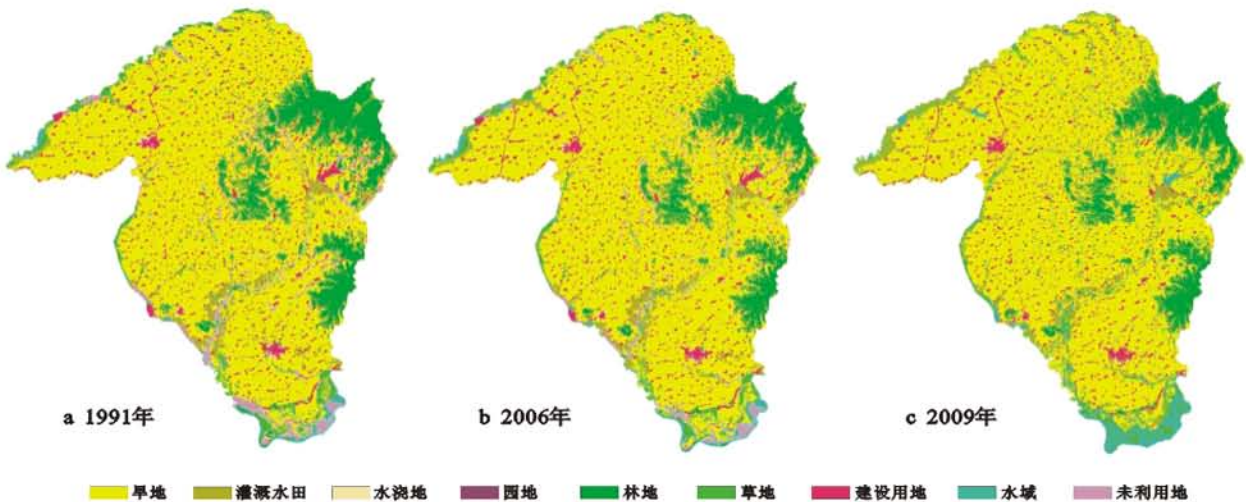
附图6 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡敏感性评价



附图7 黄土高原王茂沟小流域地形地貌



附图8 川滇黔接壤地区滑坡危险性区划



附图9 黑龙江省巴彦县土地利用/土地覆被空间格局