

# 黄土高原小流域重力侵蚀稳定性评价

张霞<sup>1</sup>, 张振文<sup>1</sup>, 李占斌<sup>2,3</sup>, 于国强<sup>4</sup>

(1. 陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为评价黄土高原小流域重力侵蚀稳定性, 采用有限差分 FLAC3D 软件对黄土高原王茂沟小流域概化模型进行了研究。对小流域平衡状态时位移场和应力场和塑性屈服区进行数值模拟, 并结合 Rosenblueth 矩估计方法对流域重力侵蚀破坏概率可靠度进行了分析。结果表明, 剪切塑性区域主要分布于坡面和沟坡大部分区域, 张拉塑性区域主要分布于梁峁顶和梁峁坡上部; 该流域重力侵蚀处于不可接受的风险水平, 需采取有效的工程措施以提高其稳定性。Rosenblueth 法可有效地将传统安全系数与概率分布相互结合补充, 为建立流域稳定性与重力侵蚀可靠度的指标评价体系提供了一种好的方法。

**关键词:** 重力侵蚀; 流域稳定性; Rosenblueth 矩估计方法; 可靠度指标

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0236-04

中图分类号: S157.1

## Stability Evaluation of Gravitational Erosion for Small Watershed on the Loess Plateau

ZHANG Xia<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-wen<sup>1</sup>, LI Zhan-bin<sup>2,3</sup>, YU Guo-qiang<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

2. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of the MOE, Xi'an University

of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** To evaluate the stability of gravitational erosion for small watershed on the Loess Plateau, the conceptual model of Wangmaogou watershed is explored with the aid of the finite difference software, Flac3D, and the numerical simulations for stress field, displacement field and plastic yielded zone are made as the watershed system is in balance. The reliability is analyzed for the failure probability of gravitational erosion, combined with Rosenblueth moment estimation method. Results show that. The shear plastic zone is greatly located in the most area of slope and gully slope, and the tension plastic zone is mainly located on top and slope of barren hill. The gravitational erosion of watershed is in unaccepted risk level and effective engineering measures should be taken to improve its stability. Rosenblueth moment estimation method can effectively combine the conventional safety factor with probability distribution, which may offer a better approach to the building of evaluation index system for watershed stability and gravitational erosion reliability.

**Keywords:** gravitational erosion; watershed stability; Rosenblueth moment estimation method; reliability index

重力侵蚀是土壤侵蚀的主要类型, 是黄河中游区高含沙水流形成的重要来源。在黄土区土壤侵蚀分类体系<sup>[1-6]</sup>所列的主要侵蚀类型中, 坡面侵蚀研究进展较大, 而对重力侵蚀的研究一直处于滞后状态。理论研究方面, 重力侵蚀的微观及宏观力学机理尚不明晰, 计算模型的构建刚刚起步; 试验及观测方面, 至今仍未形成重力侵蚀系统观测和试验研究体系。黄河中游区水土流失治理及水保工作的快速推进对土壤

侵蚀研究提出了迫切要求, 对重力侵蚀的研究无论理论上还是应用上都具有重要的研究意义。

本研究通过 Rosenblueth 矩估计方法, 并且结合 FLAC3D 数值模拟, 对流域系统重力侵蚀的破坏部位、机理等方面进行研究, 并且对流域重力侵蚀的安全储备、破坏概率的可靠度进行了分析, 目的在于为评价小流域稳定性以及重力侵蚀可靠度提供可靠的依据。

收稿日期: 2011-08-12

修回日期: 2011-09-08

资助项目: 中国博士后基金项目“白龙江流域暴雨泥石流运动机理及数值模型研究”(2011M501445); 国家自然科学基金项目“矿渣型泥石流起动机理及临界参数研究”(40872208); 国家自然科学基金项目“基于小流域淤积信息的侵蚀产沙与侵蚀环境变化响应研究”(40971161)

作者简介: 张霞(1982—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态环境研究工作。E-mail: zhangxia20002000@sina.com。

通信作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: zhanbinli@126.com。

## 1 研究区概况

选取王茂沟流域作为研究对象。王茂沟流域是陕北地区绥德县韭园沟中游左岸的一条支沟,海拔高度 940~1 188 m,流域面积 5.97 km<sup>2</sup>,主沟长 3.75 km,沟道平均比降 2.7%,沟谷地面积 2.97 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 46.7%,流域不对称系数 41.6%。在长期水土流失影响下,地面受到严重切割,表现为支离破碎、梁峁起伏、沟壑纵横,沟壑密度 4.3 km/km<sup>2</sup>。地面坡度一般在 20°以上。地层构造表层主要是马兰黄土,厚度 20—30 m,梁峁顶均有分布;中间为离石黄土,厚度 50—100 m,多出露于谷坡上;底层主要是三叠纪砂页岩,岩层基本接近水平,多出露于干沟、支沟的下游沟床及其两侧,在黄土丘陵沟壑区具有一定的代表性<sup>[5-10]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 有限元强度系数折减法的基本原理

强度折减法中边坡稳定的安全系数定义为:当边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩土体的抗剪强度进行折减的程度,即定义安全系数为岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的折减后剪切强度的比值。强度折减法的要点是利用公式(1)和(2)调整岩土体的强度指标  $c$  和  $\varphi$ ,其中  $F_{\text{trial}}$  为折减系数,然后对边坡进行数值分析,通过不断地增加折减系数,反复分析,直至其达到临界破坏,此时的折减系数即为安全系数 FOS<sup>[10-13]</sup>,即:

$$C_F = C / F_{\text{trial}} \quad (1)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}(\tan\varphi / F_{\text{trial}}) \quad (2)$$

式中: $C_F$ ——折减后的黏聚力; $F_{\text{trial}}$ ——折减系数; $C$ ——折减前的黏聚力; $\varphi_F$ ——折减后的摩擦角; $\varphi$ ——折减前的摩擦角。

### 2.2 Rosenblueth 矩估计方法的基本原理

安全系数是边坡稳定性评价最常见、最重要的指标,它建立在确定性概念之上<sup>[14]</sup>。其最大的缺点是没有考虑岩土体中实际存在的不确定性和相关性,如材料参数的变异性、相关性,计算模型的不确定性等。为克服上述缺点,建立在不确定性概念之上的概率分析方法被引入边坡稳定性评价之中。概率方法与定值方法互为补充、相互映证,使得边坡的稳定性评价

更科学、更精确<sup>[14-17]</sup>。Rosenblueth 方法又称统计矩的点估计方法,是由罗森布鲁斯(Rosenblueth)于 1975 年提出的一种矩估计的近似方法。其基本思想是:当各种状态变量的概率分布为未知时,只要利用其均值和方差(通常由点估计给出),就可以求得状态函数的 1 阶矩(均值);2 阶中心矩(方差)及 3,4 阶中心矩,进而可求得可靠指标、破坏概率。由于 Rosenblueth 法原理简单,应用方便,对边坡及流域稳定性评价是非常实用的方法。

## 3 结果与讨论

### 3.1 小流域概化模型及有限元计算模型

附图 7 为采用 Surfer 软件绘制的王茂沟中小流域地形地貌图,附图 7 中直线为设置的剖面位置。图 1 为 FLAC3D 软件建立的小流域概化模型。计算模型除坡面设为自由边界外,模型底部( $z=0$ )设为固定约束边界,模型四周设为单向边界。概化模型土层从上到下分别为马兰黄土( $Q_3^{\text{ol}}$ )和离石黄土( $Q_2^{\text{ol}}$ ),其土层平均厚度分别为 50 m 和 150 m, $x$  方向长为 580 m, $y$  方向长为 760 m, $z$  方向 290 m。坡面坡度主要在 10°~35°,该模型有限元网格共有节点 50 895 个,单元 88 064 个,每个单元长为 9 m。

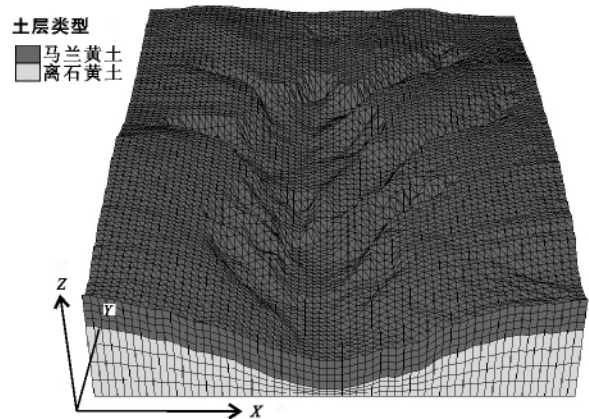


图 1 小流域概化模型

土体强度参数的选取以边坡工程经验、现场资料分析及室内岩土物理力学试验为依据。在本例中马兰黄土抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$  变异性显著,为随机变量,其均值参照相关研究经验,进行了折减和取整,方差保持不变;其他参数变异性很小,做常量处理,岩土体物理力学参数具体取值见表 1。

表 1 小流域地质参数

土层类型	体积模量 $K/$ MPa	剪切模量 $G/$ MPa	黏聚力 $c/kPa$		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		密度 $\rho/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
			均值	标准差	均值	标准差	
马兰黄土	417	149	23	13.23	21.9	7.12	1.56
离石黄土	588	226	37	—	26.5	—	1.78

### 3.2 小流域应力场分布规律

图 2—3 分别为平衡状态下小流域第 1 主应力和第 3 主应力云图(FLAC3D 中以拉应力为正,压应力为负,故以绝对值的大小判定第 1 主应力和第 3 主应力)。从边坡主应力云图来看,未出现明显的拉应力区,基本上以压应力为主,若发生破坏,是以“压—剪”破坏模式为主。最大主应力(压应力)基本顺着坡面方向,并一直延伸到坡脚,这对坡沟稳定性不利。主应力等值线平滑,相互平行,很少出现突变,仅在土体分界面附近区域和凹形处产生不甚明显的应力集中效应,这些都表明流域深部土体主要受铅垂方向的压应力作用,体现为受压屈服;凹形边坡整体几何形态能够有效降低小流域应力集中程度,从而减缓了重力侵蚀的破坏程度。

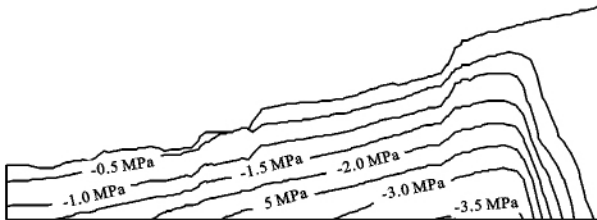


图 2 小流域剖面第 1 应力分布

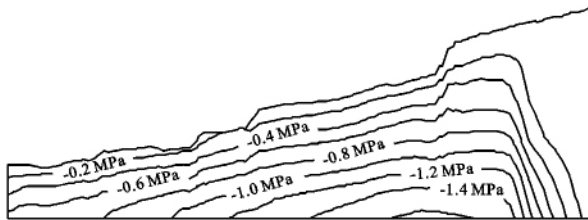


图 3 小流域剖面第 3 应力分布

### 3.3 小流域塑性区分布模拟

图 4 为平衡状态下小流域单元塑性状态指示图,在图中只获得平衡状态下,现在的(now)剪切屈服区域 (shear—n)和现在的张拉屈服区域 (tension—n),以观察屈服区域对流域的破坏程度。

可以看出,小流域屈服区域中,张拉塑性区主要分布在梁峁顶和梁峁坡上部,且分布面积较大,已连成片,说明梁峁顶和梁峁坡上部发生张拉破坏的可能性较大,破坏程度较为严重;剪切塑性区域分布范围较广,多分布于坡面和沟坡大部分区域,这些区域很容易发生水平剪切变形,且破坏程度较为严重。通过 FISH 语言编程,对模型塑性屈服区域体积进行计算,结果如表 2 所示。可以看出,流域内塑性区多以剪切塑性区为主,占全部屈服区体积的 99.5%,张拉塑性屈服区仅占 0.5%,说明流域主要以剪切破坏的塑性屈服模式为主。

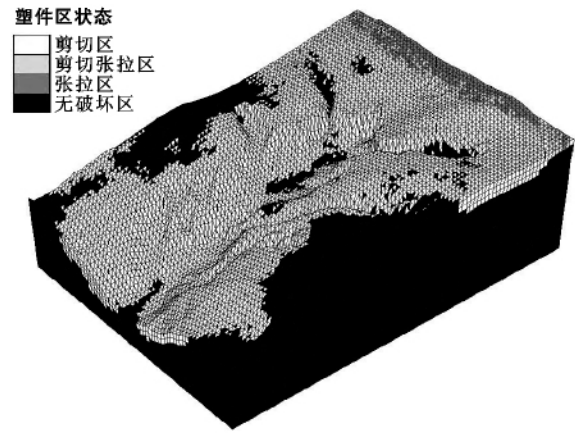


图 4 黄土高原王茂沟小流域塑性屈服区状态分布

表 2 王茂沟小流域塑性区体积分布情况

塑性状态	剪切塑性屈服区	张拉塑性屈服区	合计
体积/m <sup>3</sup>	1.52×10 <sup>7</sup>	7.34×10 <sup>4</sup>	1.53×10 <sup>7</sup>

从塑性区分布来看,它们均处于边坡坡面的浅层区域。在整个小流域中只有部分位置出现塑性区贯穿坡体的情况,这表明流域内部土体处于正常状态。但土体浅层区域的破坏也不容忽视,一旦出现塑性区贯穿坡体的情况,则会有发生浅层滑动的趋势。需要强调的是,计算结果显示的是以 Mohr—Coulomb 屈服准则为依据的塑性区分布。该准则认为材料进入屈服即破坏,事实上土体材料进入屈服并不意味着破坏,它在一定程度上还可在硬化状态下继续工作,因而边坡实际的稳定性状态要比计算结果显示的好一些。

### 3.4 Rosenblueth 矩估计方法计算结果

本研究中流域的安全系数(状态函数) $F$ 除为常量外,还是随机变量  $c$  和  $\varphi$  的函数,即

$$Z = F(c, \varphi) \quad (3)$$

式中: $c$ ——黏聚力; $\varphi$ ——摩擦角。因为  $c, \varphi$  是正态随机变量,而状态函数  $Z = F(c, \varphi)$  是  $c, \varphi$  的隐函数,所以  $F$  也是随机变量,其实质是抗滑力(矩)与下滑力(矩)的比值( $R/S$ )。由迭代计算便得到流域的安全系数。由于所考虑随机变量仅为  $c, \varphi$  这 2 个变量,所以可得到  $F$  的 4 个函数为:

$$F_{S1(++)} = F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) \quad (4)$$

$$F_{S2(++)} = F(\mu_c + \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) \quad (5)$$

$$F_{S3(-+)} = F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi + \sigma_\varphi) \quad (6)$$

$$F_{S4(--)} = F(\mu_c - \sigma_c, \mu_\varphi - \sigma_\varphi) \quad (7)$$

式中: $\mu$ ——均值; $F$ —— $\sigma$  的标准差。在 FLAC3D 中采用强度折减法求得上述 4 种组合情况下的安全系数:

$$F_{S1(++)} = 1.25, F_{S2(++)} = 1.12 \quad (8)$$

$$F_{S3(-+)} = 1.09, F_{S4(--)} = 0.86 \quad (9)$$

根据上述计算结果,假定土体抗剪强度参数相互独立,即相关系数  $\rho=0$ ,采用 Rosenblueth 法计算得到的计算结果如表 3 所示。

表3 安全储备统计参数

相关系数	安全系数	安全系数平均值	安全储备标准差	可靠度指标	破坏概率
0	1.12	1.075	0.135	0.557	71.12%

由 Rosenblueth 法求得的边坡均值安全系数(1.075)与采用状态变量均值计算出来的安全系数(1.12)非常接近,证明本次采用强度折减法与 Rosenblueth 法耦合进行三维空间流域总体可靠度计算,结果是可信的<sup>[17]</sup>。从可靠度计算结果可以看出,流域重力侵蚀处于高破坏概率范畴之内,这也与位移场和应力场分析结论一致,说明该流域处于不可接受的风险水平,重力侵蚀程度剧烈且发生概率较高,需采取适当的工程措施以提高其稳定性。可靠度分析表明该流域风险较高,与数值分析结论(流域稳定性状态较好)有一定差异,但并不矛盾,这是由于 2 种方法考虑问题的角度不同,关注的重点不同造成的。这同时也说明采用单一指标评判边坡稳定性有失偏颇,有可能造成错误的工程判断。

## 4 结论

(1) 在平衡状态下,边坡内部应力主要是由边坡岩土体自重产生,内部土体的屈服以“压—剪”屈服模式为主;凹形边坡整体几何形态有助于降低坡底应力集中程度,利于边坡稳定,从而减缓了重力侵蚀的破坏程度。

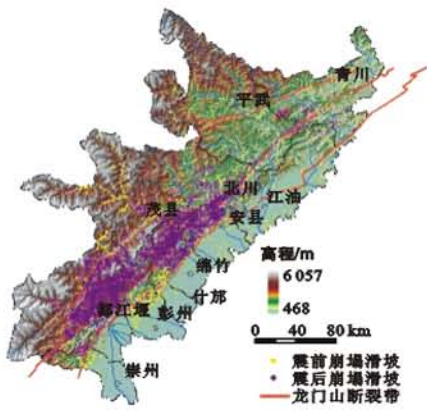
(2) 在平衡状态下,小流域剪切塑性屈服区域主要分布于坡面和沟坡大部分区域,张拉塑性屈服区域主要分布于梁峁顶和梁峁坡上部,边坡内部并未出现塑性区贯穿坡体的情况,表明边坡都处于正常状态,张拉塑性区域仅在梁峁顶零星出现,小流域的重力侵蚀塑性屈服模式均以剪切破坏模式为主。

(3) 流域重力侵蚀处于高破坏概率范畴之内,与位移场和应力场分析结论一致,说明该流域处于不可接受的风险水平,重力侵蚀程度剧烈且发生概率较高,需采取适当的工程措施以提高其稳定性。

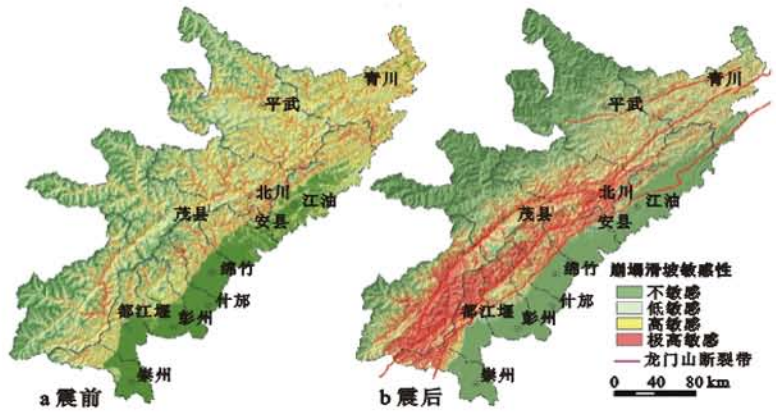
本文采用 FLAC3D 结合 Rosenblueth 方法对流域重力侵蚀稳定性进行数值模拟和安全评价,结合实际工程,可为有效建立流域安全系数与破坏概率(可靠指标)评价指标体系奠定了基础。

## [参 考 文 献]

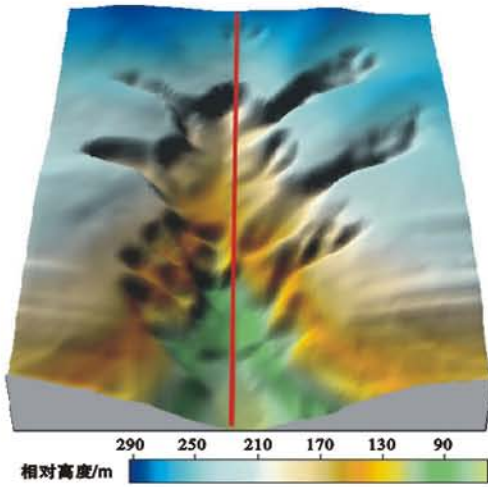
- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.
- [2] 高鹏, 刘作新, 邹桂霞. 丘陵半干旱区小流域土地资源定量评价研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 298-301.
- [3] 梁志勇, 李文学, 吕文堂, 等. 黄河下游泥沙灾害与减灾对策(I): 泥沙灾害分类与侵蚀性泥沙灾害[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 126-130.
- [4] 于国强, 李占斌, 张霞, 等. 黄土高原坡沟系统重力侵蚀数值模拟研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 809-816.
- [5] 王光谦, 薛海, 李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(4): 335-344.
- [6] 李京, 李晓兵, 宫阿都. 基于遥感方法的小流域土壤侵蚀研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 77-81.
- [7] Bagnold R A. An approach to the sediment-transport problem from general physics [R]. U S Geol. Surv. Prof. Paper, 1966: 422-437.
- [8] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面—沟道系统中的高含沙水流(I): 地貌因素与重力侵蚀的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 55-60.
- [9] 王光谦, 李铁键, 薛海, 等. 流域泥沙过程机理分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(4): 455-462.
- [10] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原小流域重力侵蚀数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 74-79.
- [11] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions), Version 3.0, User's Manual[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005: 196-203.
- [13] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.
- [14] Mellah R, Auvinet G, Masrouri F. Stochastic finite element method applied to non-linear analysis of embankments[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 15(3): 251-259.
- [15] 王家臣, 常来山, 陈亚军. 节理岩体边坡概率损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 125(7): 1396-1401.
- [16] 谭晓慧, 王建国, 吴礼年, 等. 边坡稳定有限元可靠度分析的有限步长迭代法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2901-2906.
- [17] 罗文强, 龚珏. Rosenblueth 方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 232-235.



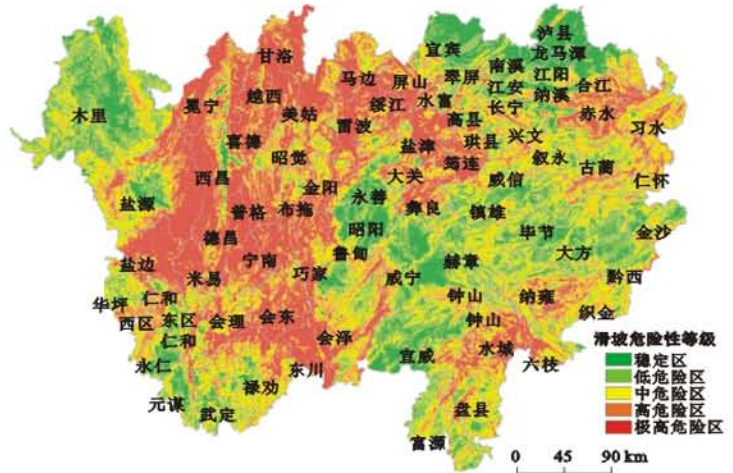
附图5 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡分布



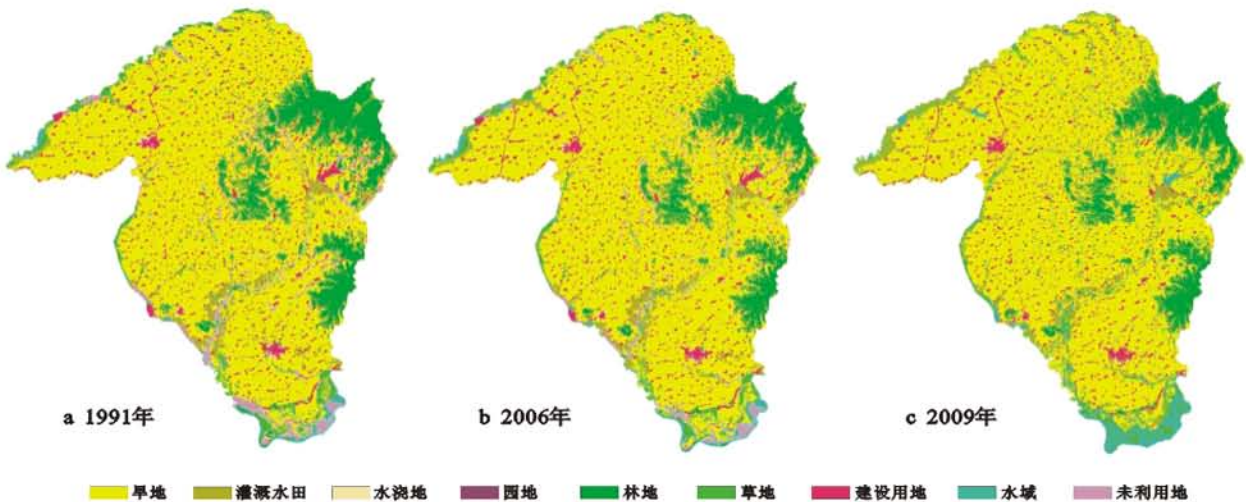
附图6 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡敏感性评价



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