

# 地震滑坡危险性评估模型及初步应用\*

白仙富<sup>1</sup>, 戴雨茨<sup>2</sup>, 余庆坤<sup>1</sup>, 邵文丽<sup>1</sup>

(1. 云南省地震局 云南 昆明 650224; 2. 昆明市西山区防震减灾局, 云南 昆明 650118)

**摘要:** 统计分析了汶川地震滑坡在不同影响因子下数量和密度, 然后采用归一化方法确定影响地震滑坡的关键因子。基于关键因子建立了地震滑坡密度数学模型。结果表明: 从滑坡数量看, 滑坡主要集中在(10°~20°)至(40°~50°)的坡度(90 m 栅格)区间, 主体集中在35°附近, 在3°~7°之间有一个滑坡分布的小峰值; 滑坡密度随着坡度的增加而增加, 在3°~7°的低坡地带有一个滑坡密度小峰值, 在坡度一定的情况下, 除了烈度外, 其他影响因子下滑坡密度并没有表现出足够明显的规律性变化; 归一化计算结果表明: 坡度和烈度是地震滑坡的关键因子; 根据逻辑斯蒂模型计算的结果, 将地震滑坡危险性分为几无( $\leq 0.01$ )、轻微(0.01~0.03)、中等(0.03~0.09)、严重(0.09~0.27)、特重( $\geq 0.27$ ) 5个等级。地震滑坡危险性预测数据在鲁甸地震等地震应急中发挥了较好作用。

**关键词:** 地震滑坡; 危险性; 逻辑斯蒂模型; 汶川地震; 鲁甸地震

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)02-0301-12

## 0 引言

地震活动除直接造成损毁外, 还会诱发一系列次生灾害, 如海啸、火灾、瘟疫、滑坡、泥石流、堰塞湖等。有时地震次生灾害造成的损失甚至远远超过地震本身造成的直接损失。在山岳地区, 地震滑坡是最常见也是破坏最严重的次生灾害之一。我国有大量地震滑坡造成严重人员伤亡和财产损失的案例, 如1917年云南大关地震时大关北部“山岳崩颓, 居民死者数千”(谢毓寿, 蔡美彪, 1985); 1920年12月16日宁夏海原8.5级大地震, 引发大量滑坡, 分布面积约5万平方米, 大量房屋、窑洞被覆埋, 死亡不计其数(牛中齐等, 2006); 1933年8月25日, 四川叠溪发生7.5级地震, 引起大量滑坡, 叠溪镇被两座崩塌的山掩埋, 全镇500多人仅5人幸免于难(常隆庆, 1938); 1952年8月15日, 西藏墨脱发生8.5级大地震, 极震区内房屋全部倒平, 山川移易, 地形改变, 多处山峰崩塌堵塞雅鲁藏布江, 山体滑坡将5处村落推入江中, 贡布县580名喇嘛被滑坡埋

压而死(游泽李等, 1991); 1966年云南东川6.5级地震滑坡, 阻塞小江形成短时地震湖(李世成等, 2001); 1970年云南通海7.8级地震, 极震区内曲江右岸高大一曲江间昆阳群板岩破碎带内连片崩滑, 阻断交通, 形成的地震堰塞湖还淹没了大片良田(许国昌, 1981); 1974年云南昭通7.1级地震, 极震区内手扒崖发生了巨大的山崩(孙崇绍, 蔡卫红, 1997), 使该居民点全村被埋, 居民无一幸免(朱海之等, 1975); 1988年云南澜沧—耿马地震山体滑坡和崩塌破坏公路阻塞河流; 1996年云南丽江7.0级地震, 在约12 000 km<sup>2</sup>范围内诱发了至少420处中小型崩塌和30处大中型滑坡, 造成房屋倒塌、桥梁毁坏和公路堵塞(唐川等, 1997); 2006年7月22日云南昭通盐津5.1级地震共死亡22人, 其中18人被地震引起的山坡石块滚落砸死; 2008年5月12日汶川8.0级地震诱发了大规模滑坡、崩塌, 造成严重的生命财产损失(乔建平等, 2009; 袁一凡, 2008); 2012年9月7日云南昭通彝良5.7级、5.6级地震死亡81人, 其中60人死于地震滑坡(白仙富等, 2013)。

由于我国大陆所处的地理位置和构造环境,

\* 收稿日期: 2014-12-13.

**基金项目:** 地震行业科研专项: 中国地震应急救援的区域差异性分析(201208018) 和国家科技支撑计划: 地震灾情服务与应急决策支撑平台研究(2012BAK15B06) 共同资助.

受到西南面印度洋板块和东面太平洋板块的双重挤压,导致我国地震多、山地广,地震滑坡严重。因此,有必要对地震滑坡危险性进行深入研究和采取必要措施。

在科学研究与工程应用领域,地震滑坡灾害的研究主要致力于确定并降低地震引发滑坡灾害的风险程度方面 (Marzoratis, De., 2002; Koit *et al.*, 2006),地震滑坡危险性分析是地震滑坡危害性评估的前提基础。本文所说的地震滑坡危险性指地震滑坡发生的可能性,是地震滑坡发生的倾向程度,而不包含地震滑坡带来的影响。汶川地震发生之后,国内学者对地震滑坡危险性的研究越来越多,采用的方法包括信息量 (庄建琦等, 2010) 与逻辑回归方法 (陶舒等, 2010)、层次分析法 (许冲等, 2009; 王秀英等, 2012)、模糊数学方法 (王秀英等, 2011)、人工神经元网络法 (许冲等, 2012) 及影响因子确定性系数法 (许冲, 徐锡伟, 2010)。笔者主要针对群体性地震滑坡事件的可能性进行研究,根据汶川地震的大量翔实的滑坡样本,统计分析不同因子下地震滑坡数量和滑坡密度等来分析地震滑坡与各影响因子的统计关系,并进一步区分影响地震滑坡的关键因子和一般因子;在确立影响地震滑坡的关键因子后,选取关键因子建立地震滑坡密度 (单位面积内的滑坡数量) 数学模型,根据模型计算结果进行地震滑坡危险性等级划分,并制作 VI ~ XI 度下我国地震滑坡危险性预测数据。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据收集

2008 年汶川 8.0 级地震诱发了大量山体滑坡,为地震滑坡的深入研究提供了珍贵的研究资料。地震发生后,诸多科研单位对地震灾区的滑坡进行了多方考察研究,其中中国地质调查局公开发布了详细的调查结果 (秦绪文等, 2008),其发布的 8 087 条次生地质灾害属性数据中,7 751 条属于地震滑坡的数据,数据内容包括滑坡 (点) 的经纬度、滑坡影响的对象以及滑坡附近的地名。根据研究需要,笔者收集了中国岩性矢量化数据,中国公里格网的降水栅格数据、公里格网的土地利用/覆盖类型栅格数据、中国 90 m 的 DEM 数据、

SLOP 数据,以上数据由中国科学院地理所提供;此外,还收集了汶川地震的烈度图,为面图层的 shape 数据。

### 1.2 数据分析与评价

2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震后,我国地震工作者对地震灾区烈度开展了深入的实地考察,获得了完整的地震烈度 (VI ~ XI 度) 资料,这是我国少有的一次地震有 VI ~ XI 度 6 个等级的地震烈度的震例。地震灾区地形复杂多样,从海拔 500 m 的成都平原到海拔数千米的云贵高原、黄土高原和青藏高原,高山、中山、低山、丘陵和平原呈阶梯状分布。从水文条件看,汶川地震灾区基本上涵盖了我国从湿润地区到半湿润半干旱地区降水类型和相应的土地利用/覆盖类型。中国地质调查局公布的汶川地震滑坡数据 (图 1) 是地震发生后为了迅速查明汶川地震灾区地质灾害分布状况,利用多类型、多分辨率遥感数据及其他多元数据,在地理信息系统支持下,采用人机交互解译与计算机自动信息提取相结合的方式完成,解译范围涵盖整个地震灾区,解译人员专业知识构成合理、经验丰富、解译精准 (秦绪文等, 2008)。这样大量、连续、翔实、制作一致、覆盖范围广袤的数据,非常适合进行群体性地震滑坡危险性建模,建模结果也适宜外推到其他区域。

### 1.3 数据预处理

笔者所收集的数据格式多样,有属性形式的表格数据、空间形式的矢量数据和栅格数据,其中空间数据投影坐标系统也不完全一致,需要进一步处理。为了数据分析和最终滑坡危险性数学建模的方便,需要将数据处理到统一的平台上。首先将全国范围所有数据统一到相同的坐标和投影系下,其中矢量数据均统一为 shape 格式,栅格数据均统一为 grid 格式。数据平面坐标系采用 1954 年北京坐标系,高程系统采用 1956 年黄海高程。投影方式为等面积割圆锥投影,选择全国统一的中央经线和双标准纬线,中央经线为 105°E,双标准纬线分别为 25°N 和 47°N,采用 Krasovsky 椭球体,投影在 Arc/Info 中完成。然后把中国地质调查局公布的所有滑坡属性数据转化为空间的 shape 格式数据 (点图层),再把生成的汶川地震滑坡数据和烈度数据与全国范围的其他数据定义为相同的投影和坐标系。

#### 1.4 思路和方法

各种类型的滑坡都是在一系列因子的作用下发生的，地震滑坡也不例外，作用于地震滑坡的这些因子就称为影响因子，通常情况下，对地震滑坡起决定性作用的属于关键因子，影响地震滑坡的程度的属于从属因子。本研究的一个关键技术点就是通过收集到的数据，分析不同影响因子对地震滑坡的作用状况，并选取关键因子建立地震滑坡密度数学模型，再根据模型计算值划分地震滑坡危险性等级。危险性研究过程中，首先将

滑坡点所在位置的影响因子属性提取到滑坡点中，为每一个滑坡点赋予所在位置的烈度、坡度、岩性、土地利用/覆盖、多年平均降水值等属性。在研究过程中对坡度、降水等这些连续变量进行分段，然后逐步统计不同影响因子下的滑坡数量 and 不同影响因子下单位面积内的滑坡数量（即滑坡密度）。为了进一步确定影响滑坡的关键因子，对滑坡密度进行归一化处理，最后按照建模原则选取关键指标进行地震滑坡密度建模，依据滑坡密度模型计算值对地震滑坡危险性进行分级。

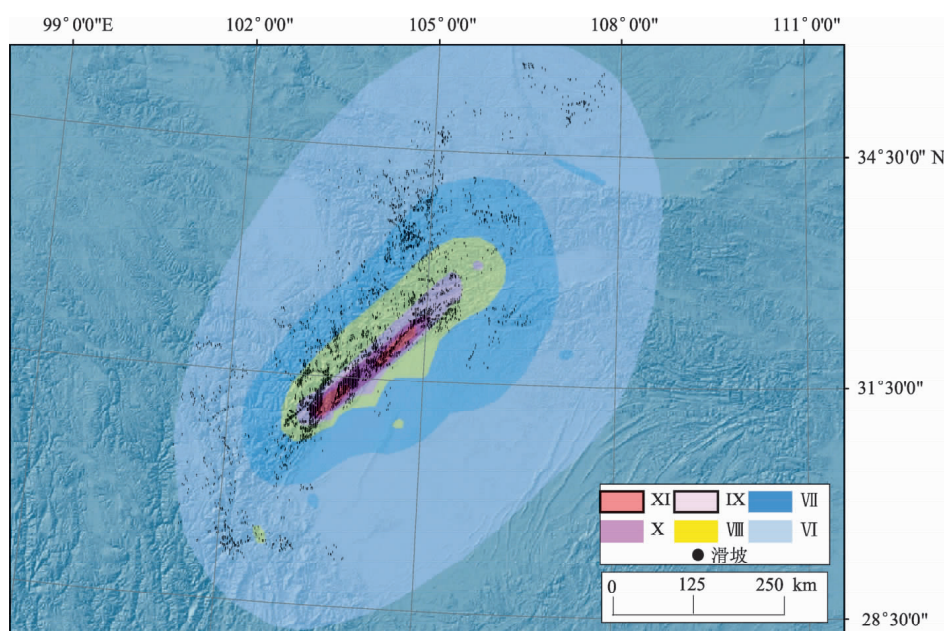


图1 汶川地震滑坡分布图

Fig. 1 Distribution map of Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake induced landslides

## 2 地震滑坡影响因子分析

影响地震滑坡的因子较多，有自然因子也有人文因子，结合收集的数据状况，笔者重点讨论地形因子（主要是坡度）、水文因子（主要为降水量）、地质因子（主要考虑岩性）、地表覆被因子、地震因子（本文选取烈度）5个自然因子。从滑坡的本质看，坡度是滑坡产生的必要条件，在平坦的地方不可能产生滑坡；其他因子是滑坡产生的充分条件，这些因子共同作用后诱发滑坡。作为充分条件的因子中，有些起着关键作用，有些起一般作用，不同类型的滑坡，在坡度一定的情况下，起关键作用的因子可能还会不一样。地震滑

坡也一样，研究的关键在于分析充当充分条件的因子及其在地震滑坡中的贡献率或主导状况。基于坡度是滑坡发生的必要条件的认识，笔者以坡度为基本条件，通过坡度一致时不同因子下的滑坡数量、滑坡密度、滑坡密度归一化分析等来逐渐确定地震滑坡充分条件中的关键因子。

### 2.1 滑坡数量分布统计

在统计滑坡数量分布时，对影响因子进行了分段，经过反复测试后初步将坡度分为 $\leq 1^\circ$ 、 $1^\circ \sim 3^\circ$ 、 $3^\circ \sim 7^\circ$ 、 $7^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $> 50^\circ$ ；年平均降水量为扩大10倍的栅格数据，分为 $\leq 6\,000$  Pa、 $6\,000 \sim 75\,000$  Pa、 $75\,000 \sim 9\,000$  Pa、 $9\,000 \sim 10\,500$  Pa、 $> 10\,500$  Pa；岩性采用唐川等（2011）的分类方法，

分为4类,根据滑坡难易程度从低到高分1、2、3、4共4个等级;根据土地利用/覆盖分为耕地、灌木、混交林、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、城市及建设用地、水体、湿地、冰川雪被、沙漠、裸露岩石、荒漠、青藏高原林地、常绿针叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林18个大类,汶川地震的烈度从Ⅵ度到Ⅺ度均有连续分布,分为6个等级。从滑坡数量的分布看(图2),随着坡度变化滑坡数量有很大的变化,主要集中在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 和 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间,主体集中在 $35^{\circ}$ 附近,这与许冲等(2011)的研究结果一致,造成具体数值差异的原因可能是使用的坡度数据的栅格单元值不一

样;但在 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 的低坡地带有一个滑坡数量分布的小峰值,这与前人统计的结果有很大不同。从滑坡数量与滑坡因子之间的统计结果看,难以根据各影响因子下的滑坡数量分布来建立地震滑坡模型,一方面,因为某一影响因子下滑坡的数量可能还和这一影响因子所占的面积有关,一般若其他条件一定,面积越大,滑坡数量也越多;另一方面,滑坡数量随坡度和其他影响因素的变化并不完全表现出规律性的变化,以降水影响因子为例,虽然在有的坡度段下,随降水量的增加滑坡数量增加,但在其他坡度段却发生变化,这种变化的不规律性在土地利用和烈度因子下随坡度的变化表现得更为明显。

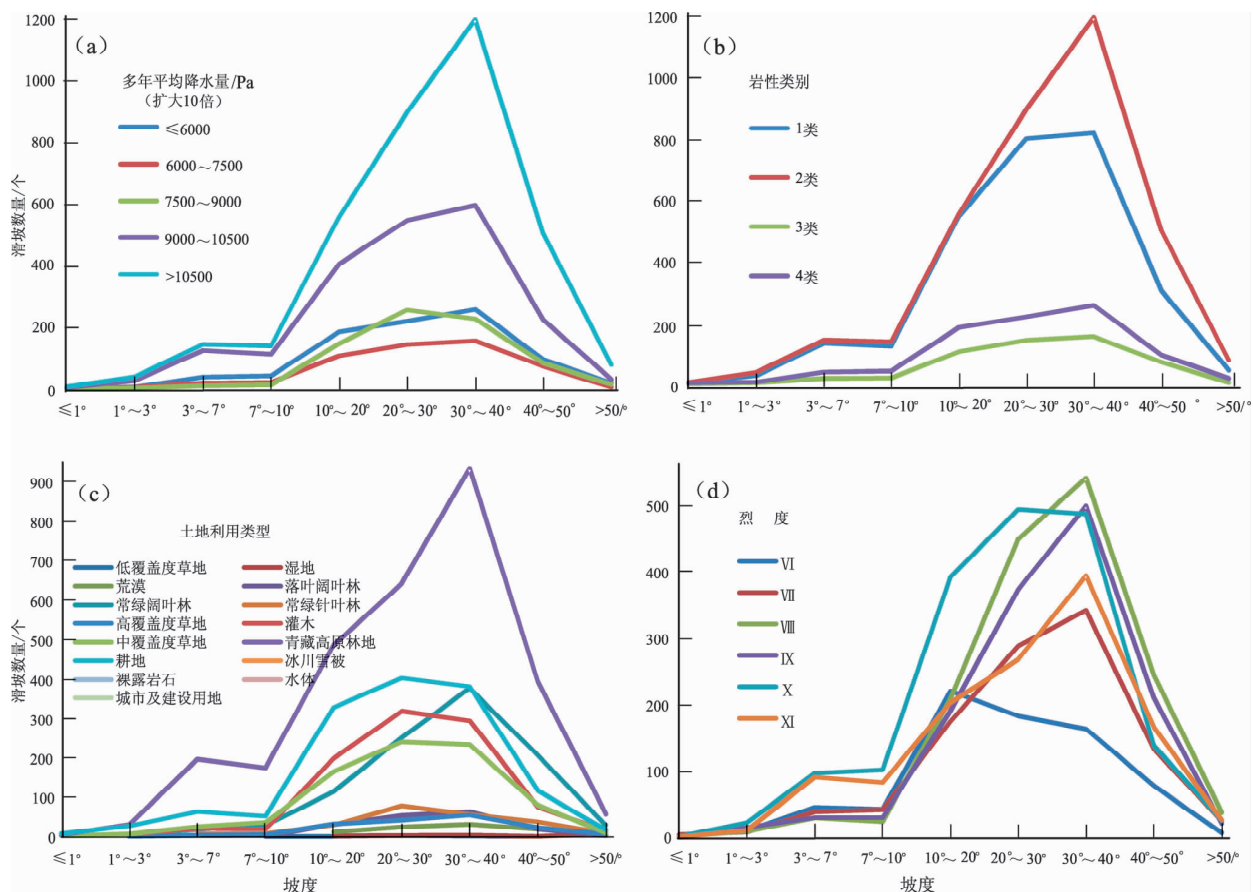


图2 各影响因子下滑坡数量统计

Fig. 2 Landslides quantity statistics under the influence of different factors

## 2.2 滑坡密度分布统计

考虑到不同影响因子下滑坡数量的分布统计还不足以反映出地震滑坡的规律特性,在2.1节的基础上,对滑坡密度分布进行统计,计算相应条件下单位面积内的滑坡数量,得到滑坡密度指数

(将计算得到的密度值扩大1 000倍)。在计算时,为了结果的一致性和可比性将所有要素统一到90 m栅格单元的基础上。从统计结果(图3)看,总体上,滑坡密度随着坡度的增加而增加,在 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 的低坡地带有一个滑坡密度小峰值。从滑坡密



度与影响因子之间的关系看,在同一坡度条件下,除了烈度外,其他因子并没有表现出足够明显的规律性变化,以降水为例,在一些坡度段,随降水量的增长滑坡密度增加,但在其他坡度段这种趋势又被打破;土地利用因子下的这种离散现象更为明显。从坡度和烈度的分布看,总体上,滑坡密度随着烈度和坡度的增加而增加,在 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$

的低坡地带有一个滑坡密度小峰值。在低坡度带有一个滑坡密度小峰值的统计结果也是和以往的研究者有很多不一致的地方,这一现象可能表明坡度在某种程度上体现了岩性的部分作用,因为在这些低坡度带内恰好往往有大量松散的坡积物堆积,地表岩石相对破碎,原有的准静止状态更易于被地震动力扰乱而发生滑坡。

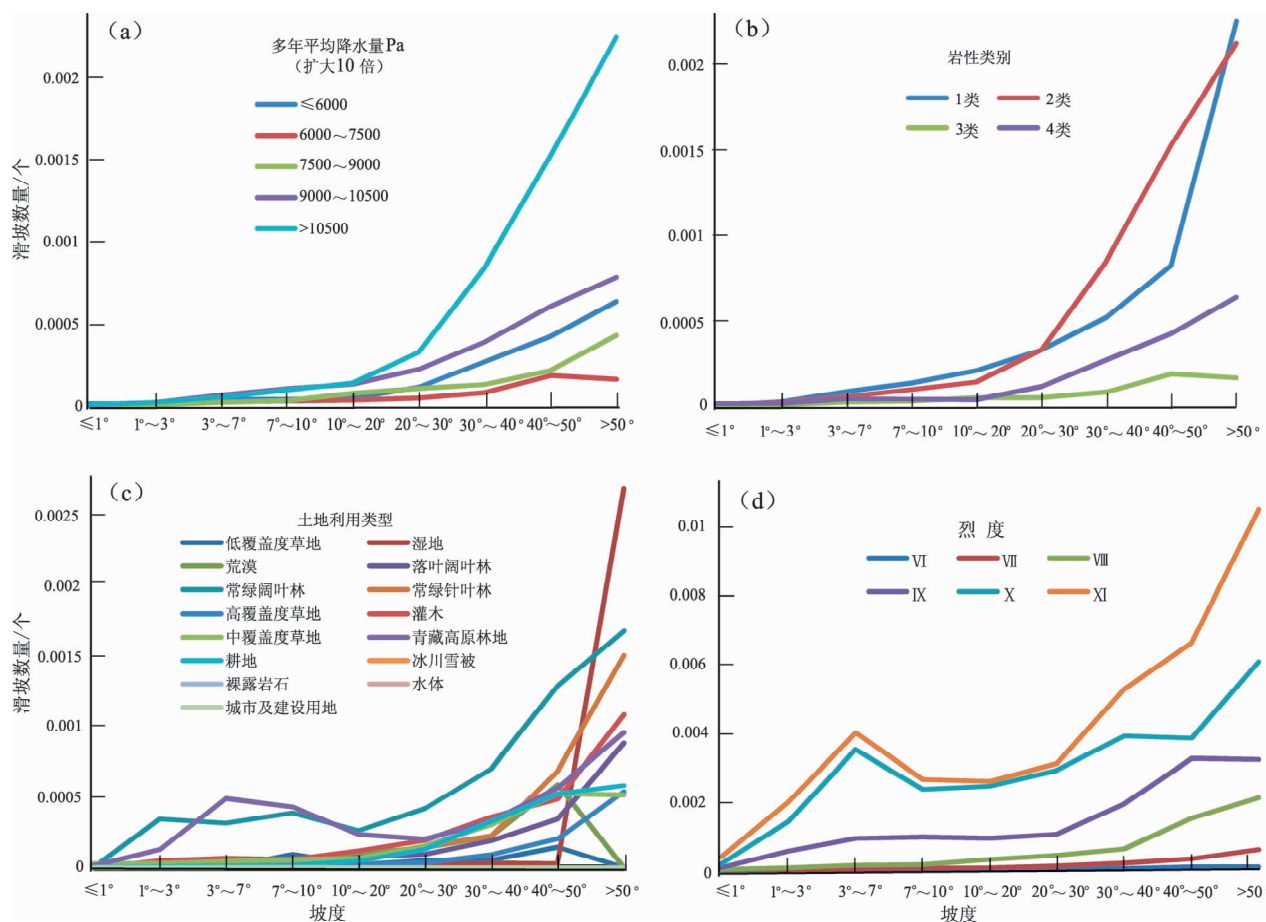


图3 各影响因子下地震滑坡密度指数

Fig. 3 Density index of earthquake induced landslides under the influence of different factors

### 2.3 滑坡密度归一化分析

为了进一步分析在坡度一定条件下其他影响因子对地震滑坡的影响作用,以筛选出最为关键的影响因子,在2.2节的基础上,对地震滑坡密度指数进行归一化处理,从结果看,在坡度一定的情况下,除了烈度影响因子外,其他影响因子下的归一化值都是比较离散的,特别是土地利用类型下的归一化值更显得杂乱(图4);相反,烈度和坡度共同作用下的归一化值却表现的颇有规律,即在坡度一定的情况下,总体上随着烈度的增加

归一化值随之增加。这说明,在坡度一定的条件下,地震动力越大越容易发生滑坡,之所以出现各烈度下的归一化值会随坡度变化而有波动,笔者认为这恰好说明岩性、降水、土地利用等其他因子对地震滑坡起胁迫作用,在坡度和烈度一定的条件下,因岩性、降水、土地利用等影响因子分布的不均衡导致了滑坡的不均匀。从滑坡密度指数分布特征和滑坡密度归一化分析可以进一步确定坡度和烈度是地震滑坡的关键因子,其他因子为从属因子。

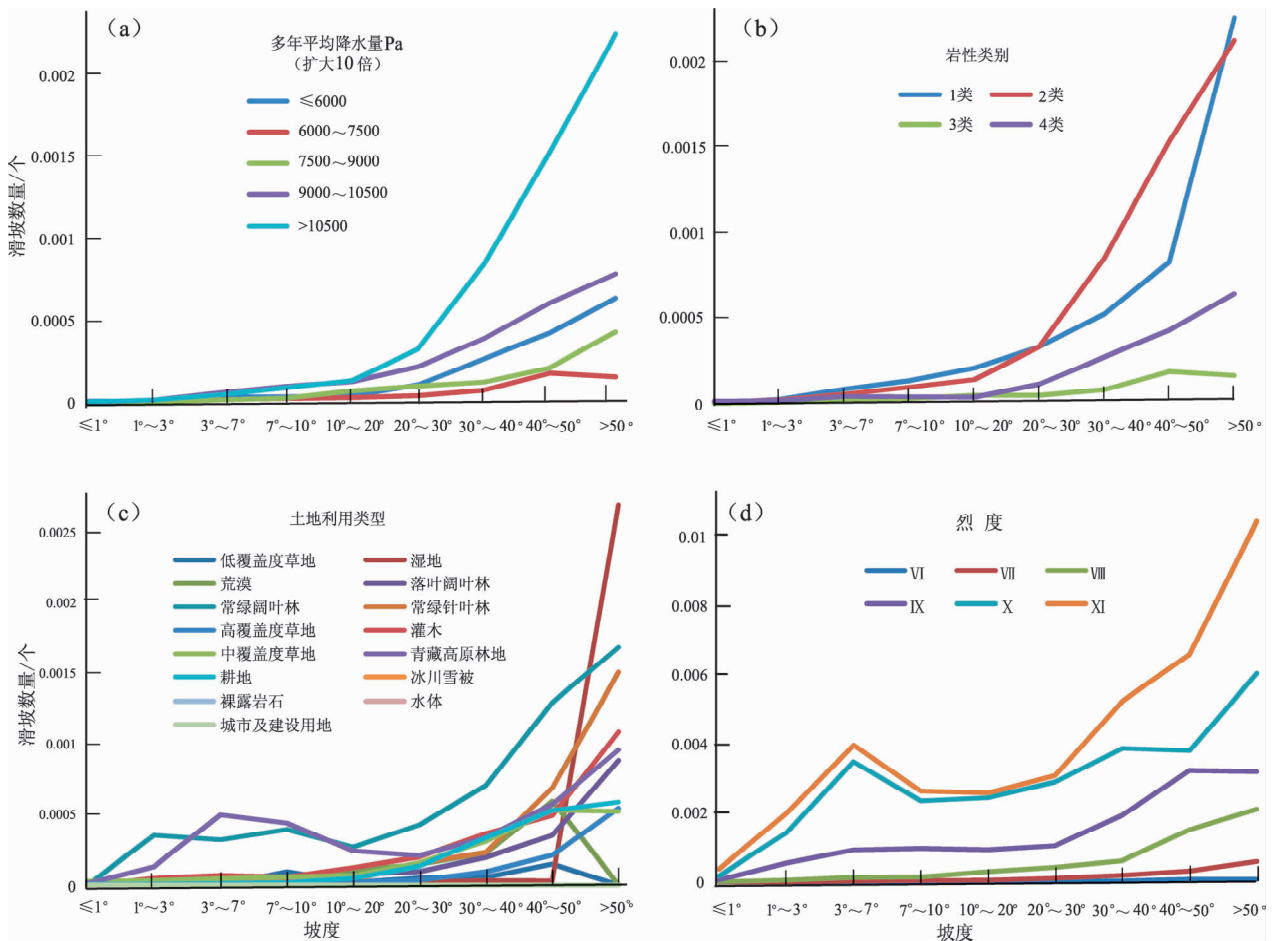


图4 地震滑坡密度归一化值

Fig. 4 The normalized value of earthquake landslides frequency

### 3 地震滑坡危险性模型

#### 3.1 建模原则

地震滑坡建模就是用数学语言描述地震滑坡现象的过程,通过模型能计算出区域内地震滑坡发生的可能性大小。地震滑坡危险性建模遵循以下3个原则:(1)科学性原则:地震滑坡危险性模型的建立要符合一般数学模型建模的原则和基本流程,建模的数据真实源于本研究的统计结果;(2)实用性原则:模型要能反映地震滑坡与影响因素之间的作用关系,更为关键的是模型的计算结果要与实际接近,模型要能在地震风险评估、地震应急等工作中起到减灾实效,能推广到未来的防震减灾实践中;(3)简洁性原则:建模过程要抓住事物的主要矛盾,解决关键问题,在能满足实用性的要求下,模型力求简单,模型因子宜少则少。

#### 3.2 地震滑坡密度模型

基于对汶川地震滑坡数据影响因子的统计分析结果,按照上述的建模原则,选取坡度和烈度因子进行地震滑坡密度建模。从地震滑坡密度指数(图3)看,我们难以用一个包含很多个参数的模型来计算地震滑坡密度,因此采用分段的方式进行建模,也就是针对不同的坡度段给出滑坡密度数学公式。为了充分反映地震滑坡密度与地震烈度和坡度之间的关系以更精细地刻画地震滑坡的本质,对 $10^\circ$ 以后的坡度采用 $5^\circ$ 步长的等距,即将坡度分为 $\leq 1^\circ$ 、 $1^\circ \sim 3^\circ$ 、 $3^\circ \sim 7^\circ$ 、 $7^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 50^\circ$ 、 $> 50^\circ$ 共13个等级。从各坡度段内滑坡密度与烈度的统计看,指数模型和逻辑斯蒂模型都适合构建地震滑坡密度与烈度和坡度的数学模型,因此笔者建立了各坡度段内地震滑坡密度与烈度的指数模型和逻辑斯蒂模型(表1)。从数学检验的角度看,

两个模型都能满足数学建模检验要求，因此对两个模型的实用性进行检验。从图 5a ~ m 可以直观地看出，总体上，基于逻辑斯蒂模型的计算值比基于指数模型的计算值更加接近实际值，特别是在高坡度段和高烈度区，逻辑斯蒂模型的计算值远比指数模型的计算值更接近实际值。为了进一步确定哪个模型更符合滑坡密度与坡度和烈度的统计关系，对模型进一步进行误差检验，将模型的计算值减去基于汶川地震统计的实际值的结果作为绝对误差，将模型的计算值减去实际值再除以模型的计算值加上实际值的结果作为相对误差。无论是绝对误差还是相对误差，绝对值越小，说明与实际差别越小，对应的模型越能反映

地震滑坡密度的实际情况。从图 5n 可以看出，逻辑斯蒂模型的计算值与实际值绝对误差在 -0.08 ~ 0.06 之间，主体绝对误差在 ±0.02 之间；指数模型的计算值与实际值绝对误差在 -0.39 ~ 0.03 之间，主体绝对误差在 -0.05 ~ 0.03 之间。从图 5o 可以看出，逻辑斯蒂模型的计算值与实际值相对误差在 -0.2 ~ 1 之间，主体相对误差在 ±0.2 之间；指数模型的计算值与实际值相对误差在 ±1 之间，主体相对误差在 ±0.5 之间。显然，逻辑斯蒂模型的绝对误差和相对误差总体比指数模型的小。因此可以确定，逻辑斯蒂模型更能描述地震滑坡现象，地震滑坡密度值更适宜采用逻辑斯蒂模型进行计算。

表 1 不同坡度下的地震滑坡密度模型  
Tab. 1 Earthquake induced landslides density model under different slope range

坡度范围	指数模型		逻辑斯蒂模型	
≤1°	$y = 2E - 10e^{1.5508x}$	$R^2 = 0.1664$	$y = 1 / (1 + \exp(8.22178 - 0.34329x))$	OR = 1.409577
1° ~ 3°	$y = 2E - 07e^{1.2596x}$	$R^2 = 0.9439$	$y = 1 / (1 + \exp(9.27905 - 0.633448x))$	OR = 1.884096
3° ~ 7°	$y = 3E - 07e^{1.2683x}$	$R^2 = 0.9684$	$y = 1 / (1 + \exp(11.3983 - 0.916239x))$	OR = 2.499872
7° ~ 10°	$y = 1E - 06e^{1.1574x}$	$R^2 = 0.9555$	$y = 1 / (1 + \exp(10.6025 - 0.849128x))$	OR = 2.337608
10° ~ 15°	$y = 2E - 06e^{1.1368x}$	$R^2 = 0.9525$	$y = 1 / (1 + \exp(10.3517 - 0.852482x))$	OR = 2.345462
15° ~ 20°	$y = 3E - 06e^{1.0869x}$	$R^2 = 0.9524$	$y = 1 / (1 + \exp(10.0078 - 0.847624x))$	OR = 2.334094
20° ~ 25°	$y = 6E - 06e^{1.0558x}$	$R^2 = 0.9406$	$y = 1 / (1 + \exp(9.19721 - 0.789875x))$	OR = 2.203122
25° ~ 30°	$y = 1E - 05e^{1.013x}$	$R^2 = 0.952$	$y = 1 / (1 + \exp(9.68142 - 0.852073x))$	OR = 2.344501
30° ~ 35°	$y = 2E - 05e^{0.9709x}$	$R^2 = 0.9518$	$y = 1 / (1 + \exp(9.65106 - 0.8847x))$	OR = 2.422259
35° ~ 40°	$y = 4E - 05e^{0.9081x}$	$R^2 = 0.9617$	$y = 1 / (1 + \exp(10.1154 - 0.968573x))$	OR = 2.634182
40° ~ 45°	$y = 6E - 05e^{0.8946x}$	$R^2 = 0.9497$	$y = 1 / (1 + \exp(10.1773 - 1.012792x))$	OR = 2.753278
45° ~ 50°	$y = 9E - 05e^{0.8621x}$	$R^2 = 0.9388$	$y = 1 / (1 + \exp(9.89683 - 1.007739x))$	OR = 2.7394
>50°	$y = 3E - 05e^{0.9743x}$	$R^2 = 0.9071$	$y = 1 / (1 + \exp(9.80003 - 0.989653x))$	OR = 2.690301

注：式中：y 表示滑坡频度；x 表示地震烈度。

3.3 地震滑坡危险性分级

笔者建立并确定了基于坡度和烈度的逻辑斯蒂地震滑坡密度模型，但是，其计算结果仅是一个 90 m 栅格单元内的滑坡密度，反映的是地震滑坡概率的高低而不是地震滑坡的危险性，与地震滑坡危险性的要求还有距离。也就是说，要根据地震滑坡密度值给出对应的地震滑坡危险性等级，才算建立了完整的地震滑坡危险性模型。对地震滑坡危险性等级的确定难以找到统一的标准，可以分 3 级或 6 级，划分的界线采用不同的依据结果就会不一样。笔者根据地震应急的实践，给出一个地震滑坡危险等级和划分标准的粗略标尺。依据地震滑坡密度从低到高将地震滑坡危险等级分为几无、轻微、中等、严重、特重共 5 个等级。在基于地震滑坡密度进行地震滑坡危险性分级时采

取 3 倍等比的划分尺度，划分标准为滑坡密度值在 (0 ~ 0.01] 为滑坡几无危险等级，表示这一危险等级下基本不出现滑坡现象；滑坡密度值在 (0.01 ~ 0.03] 为滑坡轻微危险等级，表示这一危险等级下发生滑坡的可能性不大，有些零星的落石、塌方现象，个别地方可能造成短暂的交通破坏，地震滑坡造成人畜伤亡的可能性很低，地震滑坡影响的道路、河流、电力、通信等设施在简易处置后可以很快恢复使用；滑坡密度值在 (0.03 ~ 0.09] 为滑坡中等危险等级，表示这一危险等级下可能有一定规模的滑坡现象，并有可能造成交通破坏和房屋受损，有出现地震滑坡造成人畜伤亡的可能，受地震滑坡影响的道路、河流、生命线工程等可以快速抢通，通常情况下 1 天内能大部分恢复使用；滑坡密度值在 (0.09 ~ 0.27]

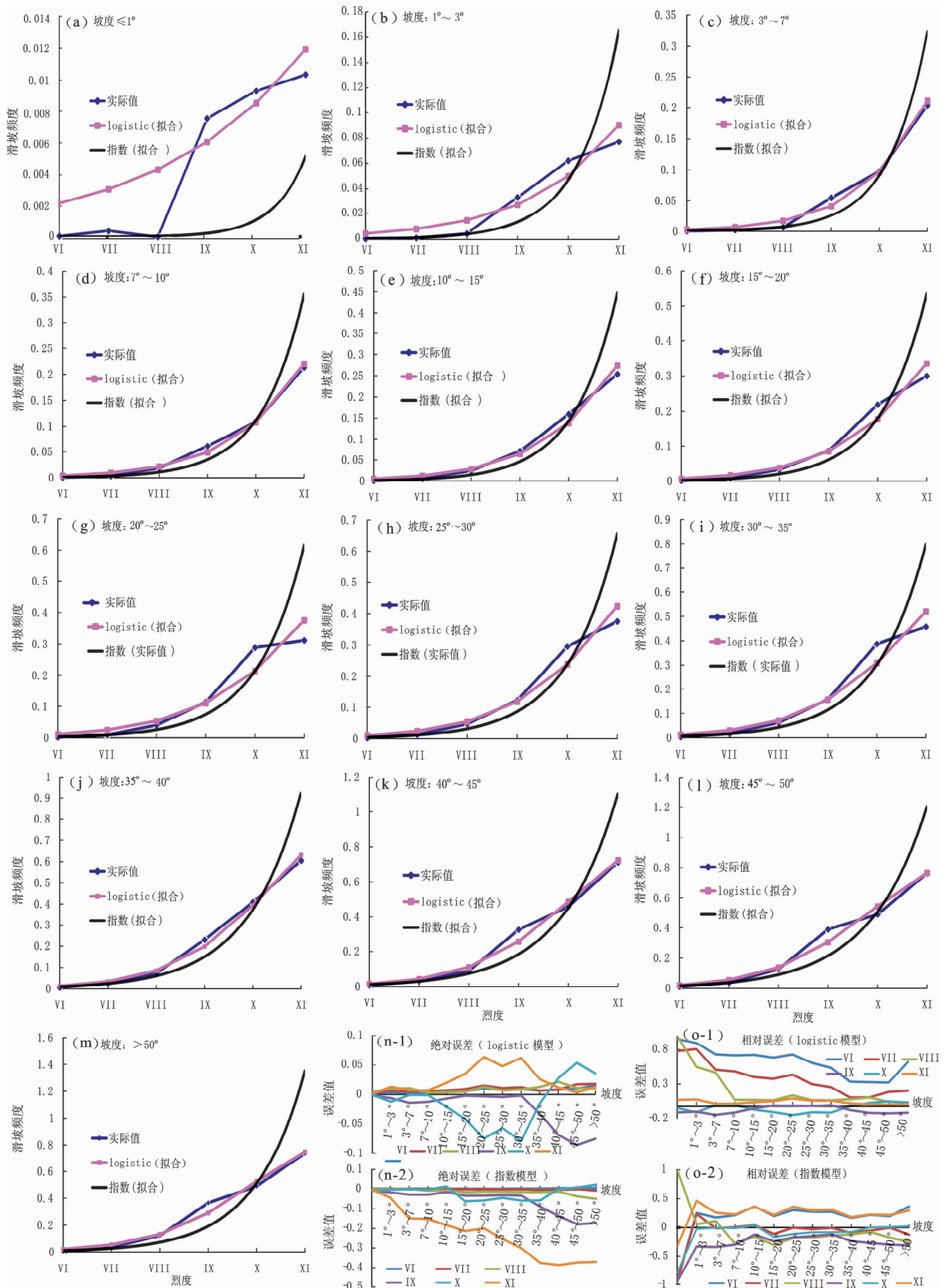


图5 地震滑坡密度模型计算值与实际值对比图

Fig. 5 Comparison diagram between actual value and calculation value by earthquake induced landslides density model



为滑坡严重危险等级，表示这一危险等级下滑坡现象普遍，滑坡规模较大，滑坡造成严重的交通中断、房屋受损的较大可能性，甚至出现滑坡造成大量人员死亡的可能，受地震滑坡影响，可能需要数天的抢修才能基本恢复交通，在降水丰富和河流密集地区出现地震滑坡—堰塞湖、地震滑坡—泥石流等次生灾害链的可能性也较大，有关部门应该根据地震影响区域人口密度等因素考虑是否提高启动的应急响应等级；滑坡密度值大于 0.27 为滑坡特重危险等级，表示这一危险等级下滑坡现象特别普遍，滑坡规模特别巨大，并由此

可能造成特别严重的交通中断、房屋受损和人员伤亡，在降水丰富和河流密集地区出现地震滑坡—堰塞湖、地震滑坡—泥石流等次生灾害链的可能性特别大，地震滑坡造成的交通、河流、电力、通信等破坏往往需要十余天甚至数十天才能修复，有关部门应该考虑提高启动的应急响应等级。根据 3 倍等比的滑坡危险性等级划分标准，我们计算了从 VI ~ XI 共 6 个烈度等级下全国 90 m 栅格单元的地震滑坡危险性预测数据（图 6），用于年度风险区地震滑坡危险性和危害性评价、震后地震滑坡危险性和危害性应急评估等。

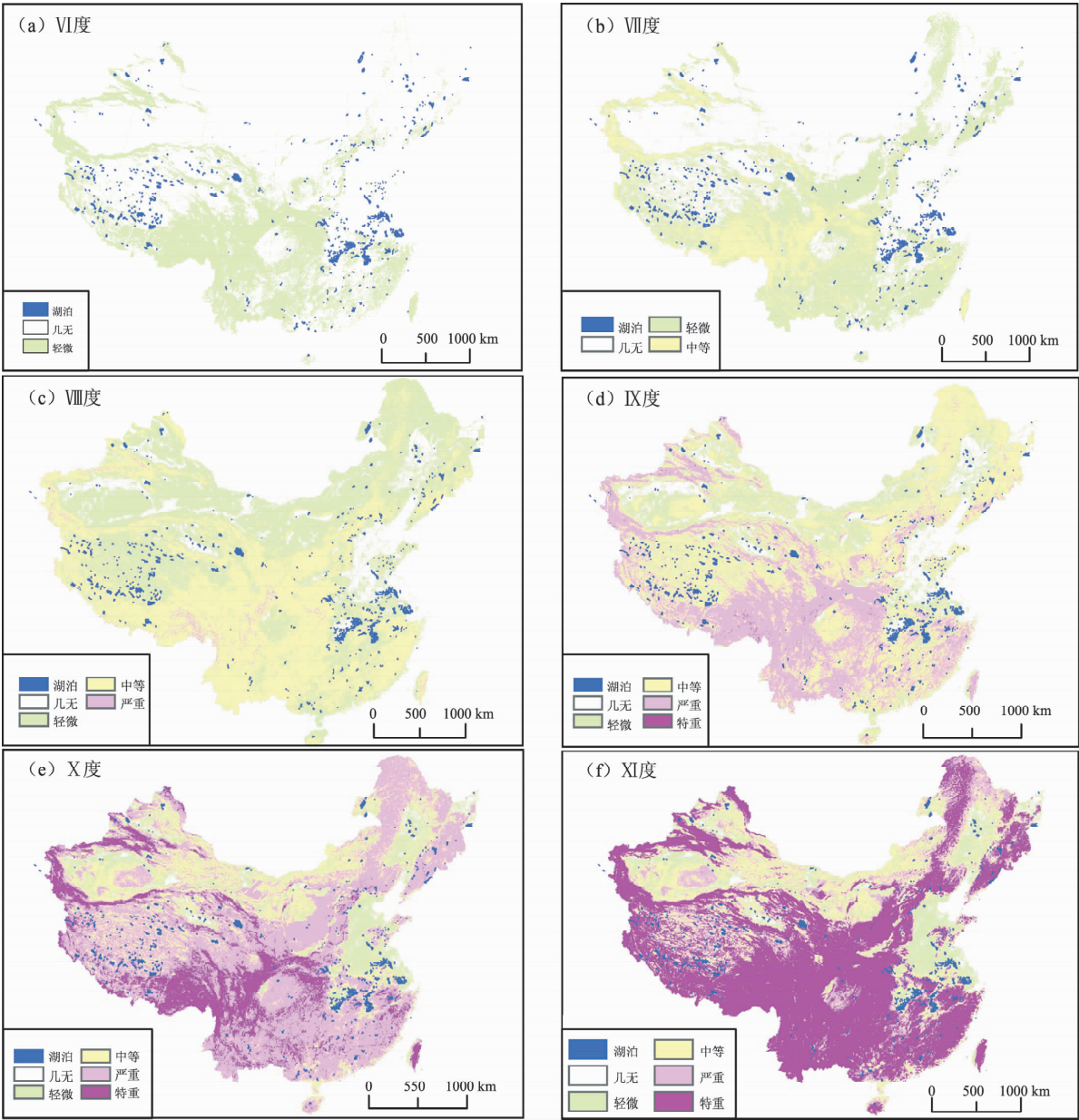


图 6 VI ~ XI 度下我国地震滑坡危险性预测

Fig. 6 Risk prediction of earthquake induced landslides in the intensity from VI to XI in China

#### 4 地震滑坡危险性评估模型初步应用

在近3年来云南年度危险区地震滑坡风险评估、云南省地震局地震应急评估、芦山地震和漳县岷县地震应急评估中都使用了基于本文建立的地震滑坡危险性评估模型计算的地震滑坡预测数据并取得了较好效果。为满足当前正在部署的国家社会服务工程应急分项软件系统(含基础数据库)需要而提供给各省(直辖市)地震局的地震滑坡预测数据也正是基于本文提出的模型计算的成果。无论是年度危险区滑坡危险性评估还是地震应急地震滑坡危险性评估,其基本方式为按照坡度进行各烈度区滑坡密度计算,将滑坡密度分级后形成滑坡危险性等级数据,在此基础上可根据需要叠加交通、水系、居民点等要素来进一步分析地震滑坡的危害性。在储备了区域内不同烈度下的滑坡危险性预测数据时,则只要根据评估的烈度数据提取对应的滑坡危险性数据最后形成评估区的地震滑坡危险性等级数据即可。

2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震发生后10 min,根据地震影响场应急评估方法(白仙富等,2014)开

展本次地震影响场的初步评估。根据地震影响场初步评估结果从基础数据库中提取各烈度下的地震滑坡危险性预测数据,形成鲁甸 $M_s6.5$ 地震滑坡危险性评估(初评估)(图7a),又根据地震滑坡危险性评估图确定本次地震将造成严重地震滑坡,滑坡主要分布在店子上村到董家田坝村的牛栏江沿线一带,以及店子上村—雷家坪子—二家村—新波—大山—青山湾子—殷家梁子—线范围内的地区。通往灾区的道路可能因地震滑坡无法通行,需要数日抢修才能通行,建议考虑直升飞机运送物资;店子上村到董家田坝村的牛栏江沿线一带可能出现地震滑坡—堰塞湖次生灾害链,建议相关部门查看;灾区有数十个自然村可能受到严重到特重危险等级的地震滑坡威胁,可能造成大量人员死亡(结合彝良地震实践评估鲁甸地震滑坡可能造成百余人死亡)。根据昭通地震灾害的区域性特征(白仙富等,2013)判断, $M_s6.5$ 地震可以造成昭通地区400余人死亡,综合地震滑坡可能造成百余人死亡,最终给出此次地震造成400~600人死亡的初步评估结果,建议有关部门提高应急响应等级。震后1 h,根据地震影响场应急评估方法(白仙富等,2014)利用余震信息完成地震

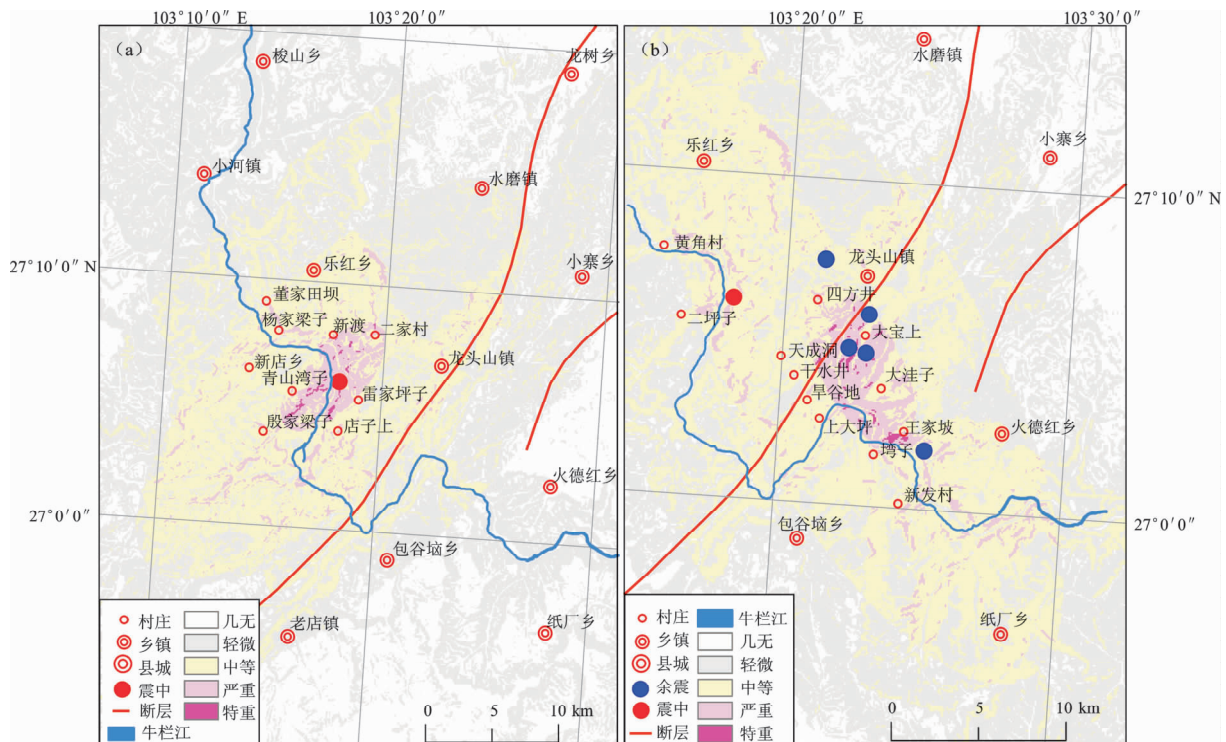


图7 鲁甸 $M_s6.5$ 地震滑坡危险性初评估图(a)及修正图(b)

Fig. 7 Initial evaluation map (a) and correct map (b) of Ludian  $M_s6.5$  earthquake induced landslides risk

影响场的动态修正,再根据修正的影响场完成地震滑坡危险性修正评估图7b,即鲁甸 $M_s6.5$ 地震滑坡危险性评估(修正)。根据动态修正评估的结果,认为鲁甸地震诱发严重地滑坡,滑坡主要分布在牛栏江沿岸的二坪子村—黄角村和新法村—旱谷地村一带,以及王家坡—大洼子—大宝上一四方井—天成洞—干水井—上大坪—垮子一线范围内的地区。牛栏江沿线发生地震滑坡—堰塞湖灾害链的可能性特别大,特别是红石岩—旱谷地沿线的牛栏江段形成堰塞湖的危险性更高;滑坡严重区域内有数十个自然村受到威胁,因地震滑坡可能造成100~200人死亡;因地震滑坡可能造成交通、电力、通信严重破坏,需要数日才能恢复,进入灾区困难,建议对志愿者进行准入管制。震后调查表明<sup>①</sup>:滑坡发生范围与评估的“严重”和“特重”区域几乎完全一致。

## 5 结论和讨论

(1) 影响地震滑坡的因子较多,有自然因子也有人文因子,从滑坡的本质看,坡度是滑坡产生的必要条件,坡度是地震诱发滑坡的必要条件,其他因子是诱发滑坡的充分条件。

(2) 从大范围大样本的汶川地震滑坡数据统计结果看,坡度、烈度、岩性、降水、地表覆被等因素对地震滑坡都有不同程度的影响,但在坡度一定的前提,烈度对地震滑坡的影响最为突出,规律性最强。

(3) 从数学建模结果看,尽管指数模型和逻辑斯蒂模型都能很好地拟合地震滑坡密度与坡度和烈度之间的统计关系,但从模型反演和检验看,逻辑斯蒂模型的相对误差总体比指数模型的相对误差小。说明逻辑斯蒂模型更能描述地震滑坡现象,地震滑坡密度值更适宜采用逻辑斯蒂模型进行计算。

(4) 地震滑坡危险性模型包括地震滑坡密度模型和危险性分级,无论是地震滑坡密度模型还是地震滑坡危险性分级都需要不断地加以完善和发展。而地震滑坡危险性模型又是地震滑坡危害性模型研究的基础,今后的工作,应加快地震滑坡危害性的研究和产出地震滑坡危害性预测数据,

以满足当前社会经济发展的需要。从关注的重点看,优先建立地震滑坡人员伤亡评估模型、地震滑道路中断评估模型、地震滑坡房屋埋压评估模型、地震滑坡经济损失评估模型、堰塞湖评估模型等。在地震滑坡危险性模型暂没有更进一步完善时,可以以当前的危险性模型为基础,从建立地震滑坡危害性的概念模型开始进行地震滑坡的空间运算并初步产出地震滑坡危险性预测数据;或进一步收集地震滑坡危害性数据,从统计的角度建立地震滑坡的危害性模型产出地震滑坡危害性预测数据,并尽快在地震事件中进行检验和推出产品。

### 参考文献:

- 白仙富,戴雨茨,戴靖,等. 2013. 昭通地区地震灾害区域性特征分析[J]. 地震研究,34(4):514-523.
- 白仙富,戴雨茨,赵恒. 2014. 地震影响场应急评估方法研究[J]. 自然灾害学报,23(4):91-102.
- 常隆庆. 1938. 四川叠溪地震调查记[J]. 地质评论,(3):251-292.
- 李世成,崔建文,乔森,等. 2001. 云南山地地震地质灾害对河流综合开发的影响[J]. 地震研究,24(2):140-145.
- 牛中齐,填海波,高武,等. 2006. 在山走动的地方[M]. 银川:宁夏人民出版社.
- 乔建平,蒲晓虹,王萌,等. 2009. 汶川地震滑坡的分布特点及最大震中距分析[J]. 自然灾害学报,18(5):10-15.
- 秦绪文,杨金中,张志,等. 2008. 汶川地震灾区航天遥感应急调查[M]. 北京:科学出版社.
- 孙崇绍,蔡红卫. 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征[J]. 自然灾害学报,6(1):25-30.
- 唐川,黄楚兴,万晔. 1997. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J]. 自然灾害学报,6(3):76-84.
- 唐川,朱静,张翔瑞. 2001. GIS支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. 地震研究,24(1):73-81.
- 陶舒,胡德勇,赵文吉,等. 2010. 基于信息量与逻辑回归模型的次生滑坡灾害敏感性评价[J]. 地理研究,29(9):1594-1605.
- 王秀英,聂高众,马牧军. 2012. 地震滑坡灾害评估中地震影响因素的联合应用[J]. 地震学报,34(1):76-84.
- 王秀英,聂高众,王松. 2011. 利用模糊数学方法建立汶川地震滑坡灾害评判标准[J]. 岩土力学,32(2):403-410.
- 谢毓寿,蔡美彪. 1985. 中国地震历史资料汇编(第四卷)[M]. 北京:科学出版社.
- 许冲,戴福初,肖建章. 2011. “5·12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析[J]. 自然灾害学报,20(4):147-153.
- 许冲,戴福初,姚鑫,等. 2009. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,28(z2):3978-3985.
- 许冲,戴福初,姚鑫,等. 2010. 基于GIS的汶川地震滑坡灾害影响因

① 云南省国土资源厅震后滑坡调查内部资料.

- 子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(1): 2972-2980.
- 许冲, 徐锡伟. 2012. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划[J]. 地质科技情报, 31(3): 116-121.
- 许国昌. 1981. 强震区人工岩质路堑边坡的破坏及稳定性分析[J]. 西北地震学报, (3): 18-22.
- 游泽李, 吴芝雄, 谢乐今. 1991. 西藏察隅 8.6 级地震的烈度分布[J]. 东北地震研究, 7(1): 94-102.
- 袁一凡. 2008. 四川汶川 8.0 级地震损失评估[J]. 地震工程与工程振动, 25(5): 10-19.
- 朱海之, 王克鲁, 赵其强. 1975. 从昭通地震破坏看山区地震地面破坏特点[J]. 地质科学, (3): 230-243.
- 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 2010. “5·12”汶川地震崩塌滑坡危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 29(2): 3735-3742.
- Koizumi, Hotta N., Ishigaki I., et al. 2006. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: the Tanzawa region, Japan[J]. Geomorphology, 81(1/2): 166-184.
- Marzoratis, Luzil., De A. M. 2002. Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake engineering, 22(7): 565-577.

## Risk Assessment Modeling of Earthquake-induced Landslides and its Preliminary Application

BAI Xian-fu<sup>1</sup>, DAI Yu-qian<sup>2</sup>, YU Qing-kun<sup>1</sup>, SHAO Wen-li<sup>1</sup>

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Xishui District of Kunming Multiple, Kunming 650118, Yunnan, China)

### Abstract

In order to quickly and accurately predict the risk of earthquake induced landslides after the earthquake, we count and analyze the quantity and the density (which means the number of the landslide per unit area) of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake induced landslides in different impact factor, and determine the key factors of earthquake induced landslides by normalization method. Then based on the key factors, we develop a mathematical model for the earthquake induced landslides frequency. Taking the landslides number as the main statistical standards, we find that the landslides are mainly concentrated in the slope of  $10^\circ - 20^\circ \sim 40^\circ - 50^\circ$  (based on the grid of 90 m), most landslides are concentrated in the slope of  $35^\circ$  and its nearby, and there is a small peak with landslides distribution in the slope of  $3^\circ \sim 7^\circ$ . The density of landslides increases with the increase of the slope, and there is a small peak of landslides density during the slope of  $3^\circ \sim 7^\circ$ . If the slope remains unchanged, we find that landslides density do not show a regular variation with other factors except intensity. The normalized calculation results show that the slope and the intensity are the key factors of earthquake induced landslides. According to the calculation result of Logistic model, we divide the risk of earthquake induced landslides into 5 grades: Few ( $\leq 0.01$ ), Low ( $0.01 \sim 0.03$ ), Medium ( $0.03 \sim 0.09$ ), Critical ( $0.09 \sim 0.27$ ) and Extra-heavy ( $\geq 0.27$ ). Now, the predicting data of the risk of earthquake induced landslides has played a good role in Ludian  $M6.5$  earthquake emergency.

**Key words:** earthquake induced landslides; risk; Logistic model; Wenchuan earthquake; Ludian earthquake