

基于经验似然比函数模型的降水型滑坡灾害 概率风险分析与预测^{*}

胡爱军^{1,2}, 李 宁¹, 吴吉东¹, 黄炜敏³, 温玉婷¹, 黄小玉²

(1. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院 地表过程与资源生态国家重点实验室,

北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 湖南省气象局, 湖南 长沙 410007; 3. 湖南省地质环境监测总站, 湖南 长沙 410007)

摘 要:以湖南郴州地区为例,建立了降水型滑坡历史灾害空间分布、地质和地形等滑坡影响因子空间数据库;基于50×50 m的网格,选取地貌、地层岩性、土壤类型、坡度、坡向、高程等滑坡影响因子,利用经验似然比函数计算出每个网格的滑坡危险度,并进行分级,进而制作出郴州地区滑坡危险度区划图。在此基础上,利用另一组滑坡灾害空间分布数据采取交叉验证法估算每一类危险级别发生滑坡的经验概率。结果表明,应用经验似然比模型进行滑坡灾害概率风险分析评估效果较好。

关键词:滑坡;降水;经验似然比;风险评价;交叉验证;湖南郴州

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)03-0001-06

我国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一,而且滑坡灾害突发性强、发生频率高、分布广,对人们生命财产安全造成重大威胁。据统计,1998-2006年间每年因滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害造成的全国死亡人数平均在800多人,最严重的是1998年造成全国死亡人数达1573人,失踪382人^[1]。

由于滑坡危险度区划在降低滑坡所造成的危害、减少人们生命财产所受到的威胁等方面发挥着积极作用,因此受到国内外政府和学者专家的重视。滑坡危险度区划方法可以分为定性方法和定量方法。Guzzetti等人将滑坡灾害危险度区划归纳为5种方法:地貌危险度制图法,滑坡灾害危险度指数法,滑坡灾害调查分析法,统计函数模型法,地球物理模型方法^[2]。统计模型一般首先确定滑坡灾害点或分布图,在此基础上选择各类滑坡灾害影响因素并用统计方法确定各类滑坡敏感性因素指标和权重,最后把各类敏感性因素进行叠加画出滑坡灾害危险度分级区划图。数学模型方法主要是根据坡度、土壤内聚力、水饱和度、剪切力以及其他物理特性建立滑坡的确定性模型,如:Terlien et al, Soeters & Westen^[3,4]。由于统计分析方法是建立在对滑坡影响因子和滑坡灾害的

客观分析的基础之上,能最大程度客观的反映影响因子与滑坡灾害发生之间的关系,而且简单可行,因此得到了广泛使用,主要包括专家打分、层次分析、人工神经网络、信息量法、Logistic回归、多元统计、聚类分析方法等。近几年国内有关滑坡灾害危险度区划研究开始增多,主要应用统计方法,如:王志旺^[5],殷坤龙、朱良峰^[6],等等^[7-14];丛威青等^[15]、吴兴华^[16]利用地理信息系统研究滑坡、泥石流灾害危险性区划。

但是,滑坡灾害危险度区划有两个明显的不足:①Davis^[17,18]等指出,在进行滑坡灾害影响因素空间数据分析时,把所有空间数据转换成二进制形式(0,1),或者把离散数据空间数据分成若干类的基础上也凭经验把连续空间数据(如坡度、坡向、高程)划分成若干类,这样就会丢失很多有用信息,如Carrara et al^[19], Guzzetti et al^[2];②Chung^[20]指出,滑坡灾害危险度区划根据危险程度把研究区域分成若干不同级别的危险带,对决策者来说只是提供了各区域滑坡灾害发生的相对危险程度,并没有告诉决策者某区域在未来一段时间发生滑坡灾害的概率到底有多大。针对以前在滑坡灾害危险度区划中的不足, Chung、Fabbri

* 收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家科技支撑计划课题(2008BAK50B08, 2006BAD20B01);国家自然科学基金项目(40771008)

作者简介:胡爱军(1978-),男,湖南郴州人,博士研究生,主要从事自然灾害风险研究.E-mail: huaijun@ires.cn

通讯作者:李宁(1958-),女,江苏镇江人,教授,主要从事自然灾害综合风险管理研究.E-mail: ningli@ires.cn

等提出经验似然比函数模型,解决了滑坡危险度区划中离散型和连续型两种类型数据有机统一以及空间数据库分辨率不同两大难点,同时估算出不同危险级别未来滑坡发生概率^[20-22]。

本文利用湖南郴州 1997-2007 年间的滑坡灾害数据以及郴州地貌、地形、地质等空间数据,采用 Chung 提出的经验似然比函数模型,对郴州地区滑坡灾害进行概率风险分析。

1 研究区域以及空间数据库

1.1 研究区域选择

研究区域为湖南省郴州市,处于 $112^{\circ}13' \sim 114^{\circ}14' \text{ E}$ 和 $24^{\circ}54' \sim 26^{\circ}50' \text{ N}$ 之间,面积为 1.9 万 km^2 。郴州在湖南东南部,属于亚热带季风湿润气候,雨水充沛,年降雨量为 $1\,350 \sim 1\,700 \text{ mm}$,主要为山区,位于南岭山脉的北侧,地势从东南向西北倾斜,海拔在 $70 \sim 2\,042 \text{ m}$ 。覆盖层主要为古生界的寒武系、奥陶系海象沉积岩以及石炭、二叠系海陆交互相、陆相煤系地层,有中生界三叠系陆相沉积及新生界第三、第四系松散沉积物。区内断裂、褶皱均较发育。由于其地质地形条件、气候条件以及矿山开采等人类活动影响,郴州成为湖南省滑坡灾害非常严重的地区之一,1996-2007 年间每年都因遭受重大山洪与滑坡地质灾害而造成重大人员伤亡^①。2006 年 7 月中下旬“碧利斯”强热带风暴导致郴州市有 394 人死亡,97 人失踪,经济损失惨重^[23]。2007 年 8 月“圣帕”台风同样给郴州造成严重经济损失。

1.2 地理空间数据库

研究表明,滑坡一般是由环境因子和诱发因子共同作用形成的,环境因子主要包括:地形、地质构造、地貌、植被、水文条件等等。地层岩性是滑坡的物质基础。诱发因子则主要有降雨、地震或者人为因素等。薛天放等对滑坡分布的分析特征研究,认为滑坡发育与坡度、岩性、土地利用类型三个因素的敏感程度相差不大,对岩性的变化稍微敏感,对坡度的次之^[24]。郴州地区主要属于降雨型触发的浅层滑坡灾害,因此本文选取地貌类型、地层岩性、土壤类型以及坡度、坡向、高程等地形地貌因子作为滑坡灾害基本评价因子。地理空间数据库则由滑坡灾害、地貌类型、地层岩性、土壤类型分布、坡度、坡向以及高程等数据层组成。其中:

滑坡灾害数据来源于湖南省地质环境监测总站,1996-2006 年间共 182 例降水型滑坡灾害数据;地貌类型、地层岩性数据来自 1:25 万数字化地貌分布图和地质分布图,土壤类型数据来自 1:100 万数字化土壤类型分布图(由中国科学院南京土壤研究所提供);坡度、坡向以及高程等地形数据提取自 1:25 万 DEM 数据库;地貌类型数据、DEM 数据库由湖南省国土资源厅提供。

研究区域被划分成 $50 \times 50 \text{ m}$ 网格,除水域外,共有 7 495 400 个网格。每个数据层在网格上的值,称为该网格的像元值,有多少层地理空间数据层,相应每个网格就有多少个像元值,因此在本文中每个网格有地貌、岩性、土壤、坡度、坡向、高程 6 个像元值。滑坡灾害数据层由以下方式构建:把滑坡灾害分布图划分成 $50 \times 50 \text{ m}$ 网格图层后,若该网格过去发生过滑坡灾害,则赋值“1”,若没有发生过滑坡灾害,则赋值“0”,从而形成滑坡灾害数据层,有滑坡的网格共 2 103 个,没有滑坡的网格共 7 493 297 个。地貌类型、地层岩性和土壤类型等数据为离散数据,地貌类型分为剥蚀台地、大起伏山地、低海拔平原、丘陵、中起伏山地以及小起伏山地;地层岩性则分为风化花岗岩,厚层灰岩、沙岩、砾岩,中薄层灰岩、页岩,薄层粉砂岩等四类。土壤类型分为石灰(岩)土、紫色土、山地草甸土、水稻土、铁铝土、淋溶土等 7 种。坡度、坡向以及高程数据则属于连续数据类型。

2 经验似然比函数模型

经验似然比函数模型在估算滑坡灾害概率风险时,首先将历史滑坡灾害数据分为两组,一组数据用于计算滑坡危险度,另一组用于滑坡概率风险的验证,具体在估算滑坡灾害发生概率时分两步:①滑坡灾害数据以及滑坡影响因子计算研究区域滑坡发生的相对危险度;②是根据交叉验证法在第一步的基础上利用第二组滑坡灾害数据估算每一类危险区滑坡发生的实际概率。

在计算滑坡相对危险度时,先把研究区域划分为两类互斥的区域,一类是曾经有滑坡灾害发生的区域 M ,另一类为没有滑坡灾害发生的区域 \bar{M} 。用 $f\{x_1, \dots, x_m | M\}$, $f\{x_1, \dots, x_m | \bar{M}\}$ 分别表示在滑坡区域(M)和非滑坡区域

① 统计数据来源于湖南地质环境监测总站

(\bar{M}) 频次分布函数, 其中 x_1, x_2, \dots, x_m 分别为滑坡影响因子, x 为某区域。假定, 滑坡影响因子能够为识别滑坡提供非常有用的信息, 也就是说影响因子特征在滑坡区域与非滑坡区域具有明显的区别, 即影响因子在滑坡区域与非滑坡区域具有完全不同的频次分布函数。

为了突出影响因子对滑坡影响的程度, 把影响因子在滑坡区域与非滑坡区域的频次分布的比值定义为似然比。似然比函数 $\lambda(x: x_1, \dots, x_m)$ 计算见式(1)。

$$\lambda(x: x_1, \dots, x_m) = \frac{f(x_1, \dots, x_m | M)}{f(x_1, \dots, x_m | \bar{M})} \quad (1)$$

似然比 $\lambda(x: x_1, \dots, x_m)$ 值越大, 表示该网格在未来一段时间发生滑坡灾害的可能性越大, 把所有网格的似然比计算出来, 就可以绘制出滑坡灾害相对危险度区划图。

假定影响滑坡的各个因子相互独立, 则似然比 $\lambda(x: x_1, \dots, x_m)$ 可以由单个影响因子似然比的乘积计算得出, 即:

$$\lambda(x: x_1, \dots, x_m) = \lambda(x: x_1) \times \dots \times \lambda(x: x_m) \quad (2)$$

为了计算似然比 $\lambda(x: x_1, \dots, x_m)$, 必须先计算出单个影响因子似然比。单个影响因子似然比计算分为两种类型, 一种是离散型影响因子似然比 $\lambda(x: x_1)$, 近似为离散型数据样本计算出来的经验似然比 $\tilde{\lambda}(x: x_1)$, 见式(3)。

$$\tilde{\lambda}(x: x_1) = \frac{\text{影响因子 } i \text{ 中 } x_i \text{ 类别的滑坡网格比例}}{\text{影响因子 } i \text{ 中 } x_i \text{ 类别的非滑坡网格比例}} \quad (3)$$

另一种是连续型影响因子似然比 $\lambda(x: y_j)$, 近似为连续样本数据的经验似然比 $\ddot{\lambda}(x: y_j)$, 见式(4)。

$$\ddot{\lambda}(x: y_j) = \frac{\ddot{f}(y_j | M)}{\ddot{f}(y_j | \bar{M})} \quad (4)$$

式中: $\ddot{f}(y_j | M)$ 和 $\ddot{f}(y_j | \bar{M})$ 为连续型影响因子 j 在滑坡区域和非滑坡区域经验概率分布函数。

3 模型应用

3.1 滑坡灾害相对危险度制图

在进行郴州地区滑坡灾害概率风险分析之前, 首先将郴州地区 1996—2006 年的滑坡灾害数据分为两组, 一组为 1996—2005 年间发生的 88 例滑坡灾害数据, 用于制作滑坡相对危险度区划图; 另

一组为 2006 年发生的 94 例滑坡灾害数据, 用于交叉验证滑坡危险度区划图, 并计算每个危险级别的滑坡发生概率风险。

应用经验似然比函数模型, 可以计算出地貌、地层岩性、土壤三类离散数据似然比分布。根据地貌、地层岩性、土壤的似然比分布, 地貌、地层岩性、土壤类型能对识别滑坡能提供重要的信息。在郴州地区滑坡灾害最容易发生在剥蚀台地、大起伏山地和小起伏山地的地貌类型(图 1a), 最容易发生在铁铝土(黄壤、红壤)两种土壤类型(图 1b)。主要发生滑坡的地层岩性以中薄层灰岩、砂岩、泥页岩等为主的软硬相间的碎屑岩类, 容易形成顺层滑坡。

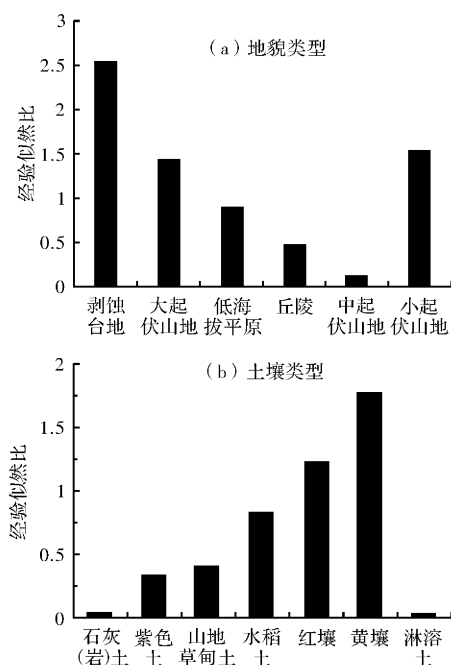


图1 不同地貌类型和土壤类型的经验似然比分布

同样, 也可以计算出坡度、坡向、高程等连续型数据经验似然比分布。图 2(a) 是坡度的经验似然比分布图, 可以看出滑坡灾害主要发生在 $15^\circ \sim 50^\circ$ 的坡度。根据坡向的经验似然比分布如图 2(b), 坡向为 $80^\circ \sim 220^\circ$ 之间, 即 SE 至 SW 方向容易发生滑坡灾害。这与郴州地区滑坡灾害致灾机理是相一致的。因为郴州地区滑坡灾害主要是由强暴雨天气过程诱发造成的, 在春末夏初受 SW 急流影响或在盛夏季节受登陆后的热带低压系统影响, 加上东南部为山区, 暖湿气流受山脉的阻挡, 并与北面南下的冷空气交汇容易形成强暴雨天气。根据高程的经验似然比分布, 得出滑坡灾害主要发生在 630~920 m 的高程, 另外 70~140 m 的高程发生滑坡灾害的概率也较高。

根据公式(2)计算出研究区所有网格滑坡经验

似然比 $\lambda(x: x_1, \dots, x_k; y_1, \dots, y_h)$, 然后依据 $\lambda(x: x_1, \dots, x_k; y_1, \dots, y_h)$ 值的大小进行滑坡危险分级。定义 $0 \leq \lambda < 1$ 为低危险区域, $1 \leq \lambda < 2$ 为中危险区域, $\lambda \geq 2$ 为高危险区域, 并制作出郴

州地区滑坡相对危险度区划图(图3)。图3颜色深的区域表示滑坡危险度相对较大, 低危险区域所占面积为50%, 中危险区域所占面积为12%, 高危险区域所占面积为38%。

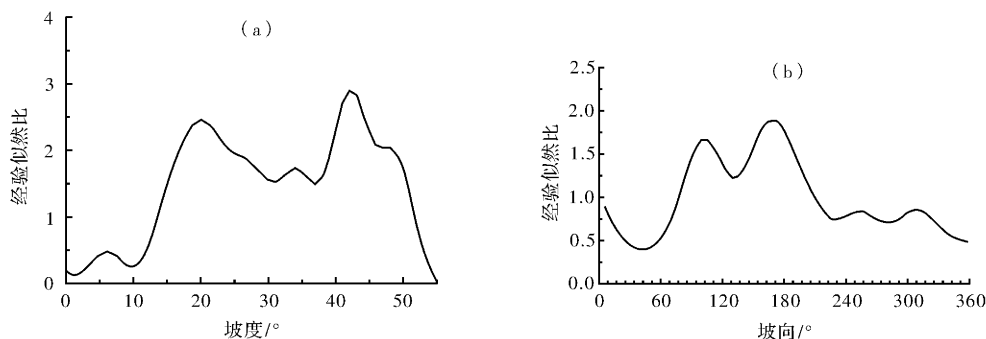


图2 不同坡度(a)和坡向(b)的经验似然比分布

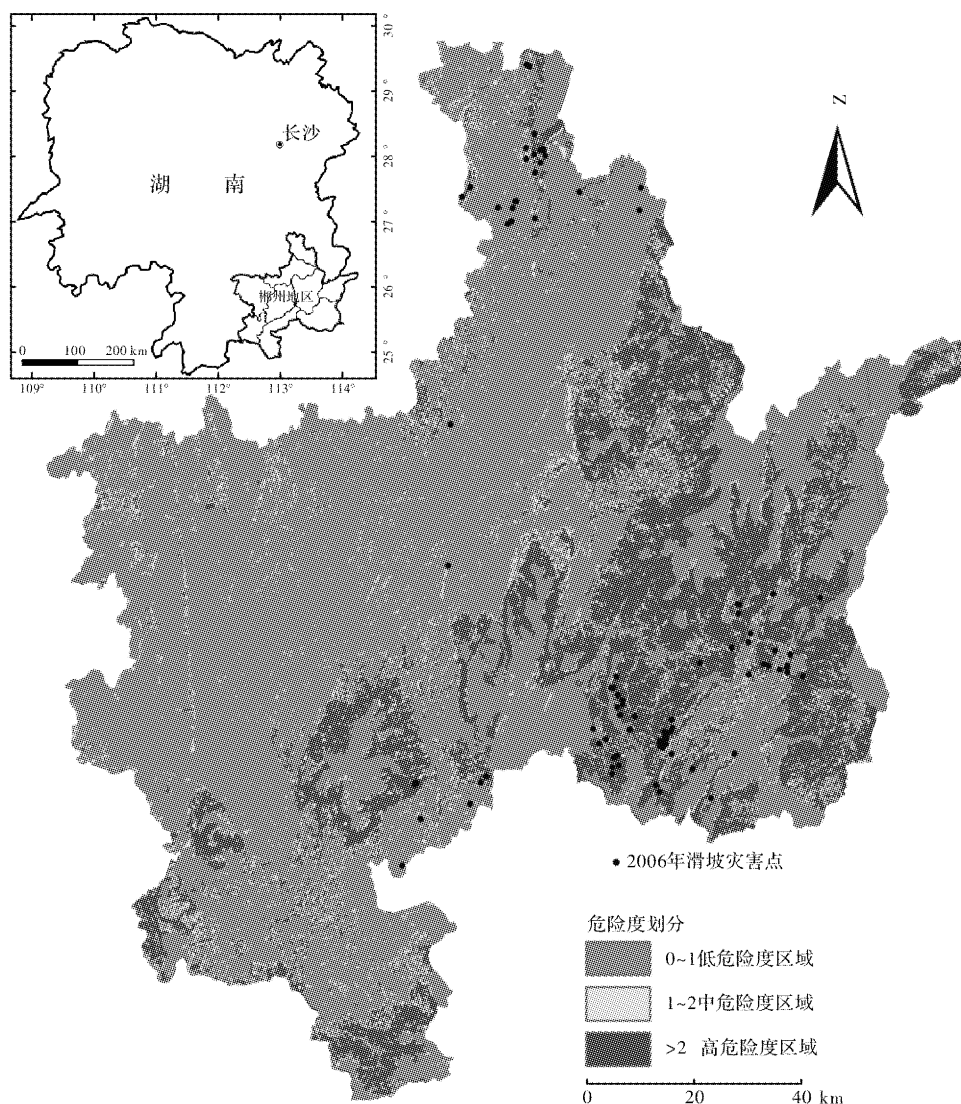


图3 郴州地区滑坡相对危险度区划图

3.2 滑坡灾害空间发生概率估算

为了进一步估算每个危险度级别滑坡发生概

率大小, 在滑坡灾害危险度区划图的基础上, 利用验证组数据(2006年94例滑坡灾害数据)估算滑

坡灾害空间发生概率。交叉验证法的思路,是把滑坡灾害空间分布与滑坡危险度区划分类进行对比,通过对比统计分析,把每一类危险级别区域中滑坡灾害的点密度作为该危险度区域未来发生滑坡的条件概率。

首先,可以简单检验滑坡灾害危险度区划图的准确性,即把2006年94例滑坡灾害发生位置全部点在滑坡危险区域图中(图3)。从统计情况看有70%的滑坡灾害点落在发生在高危险区域,有13.8%的滑坡灾害点落在中危险区域,有19.1%的滑坡灾害点落在低危险区域,可以看出滑坡绝大部分发生在滑坡危险度大的区域。

另外,在统计不同危险区域各自滑坡灾害点密度分布的基础上,可以估算出研究区域各个危险区域未来发生滑坡累积概率曲线(图4),其中 y 轴表示滑坡灾害数据中滑坡灾害所占比例, x 轴表示滑坡危险区域占研究区域的面积。在实际需求中,可以根据前面计算的 λ 值把研究区域细分更多危险级别,并计算每个危险级别区域所占面积比例,然后对照图4的滑坡累积概率曲线估算每个危险级别区域滑坡发生概率大小。可以看出,滑坡灾害危险程度高的区域滑坡发生概率比较大,20%危险区域发生滑坡灾害的概率风险可达到40%多,这也说明经验似然比函数方法在进行滑坡灾害危险度区划效果比较好,而且在危险度区划的基础上还能够估算出不同危险级别区域未来发生滑坡灾害的概率。

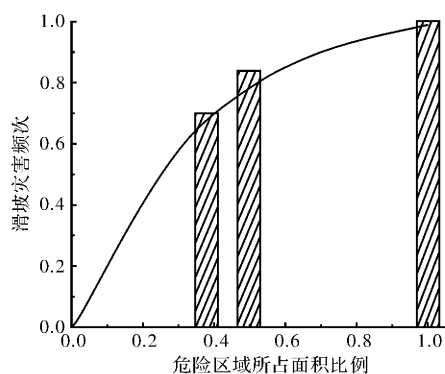


图4 滑坡灾害发生概率估算曲线

4 讨论

(1) 某一个区域滑坡灾害风险评估不仅要求能够识别该区域发生滑坡灾害的相对危险程度,更为重要的是能够提供该区域在未来一段时间发生滑坡灾害的概率有多大,这样才能为决策者进行滑坡防灾减灾规划中提供科学的决策依据。但以往在滑坡灾害风险评估中往往仅仅考虑滑坡灾害

危险度区划制图。而经验似然比函数模型能够对某区域未来一段时间滑坡灾害发生概率进行较为精确的估算。

(2) 在考虑影响滑坡灾害发生的各种因素时,各类因素的地理空间数据来源一般都存在比例尺不同的问题,如本文中土壤类型数据为1:100万,而其他地理空间数据为1:25万,这样在影响因素数据的比例精确度不同的情况,评价滑坡灾害风险时必须考虑如何统一到评价模型中。经验似然比函数模型能够很好地对不同比例尺的数据进行处理。

(3) 在评价滑坡灾害风险时,一般都会考虑地貌、地层岩性以及地形(坡度、坡向、高程)等因素,而地貌、地层岩性属于离散型数据,坡度、坡向、高程属于连续型数据。在以往滑坡灾害风险评价时,都会把通过人为的分级把坡度、坡向、高程等连续数据转换为离散型数据,这样势必会影响到滑坡灾害风险评价的精度,而经验似然比函数模型能够很好地处理离散型数据与连续型数据的问题。

(4) 应用经验似然比函数模型,在GIS软件的辅助下,制作出了郴州地区滑坡灾害危险度区划图,并利用验证数据估算了该区域不同危险类别发生滑坡灾害的概率风险,从结果来看这种方法进行滑坡灾害概率风险评估是可行的。一般来说完整的滑坡灾害概率风险评估,不仅要考虑滑坡发生的环境影响因子,而且还要考虑滑坡诱发因子,本文仅仅选取了比较典型的环境影响因子,是不全面的,需要作进一步研究。另外,利用的地理空间信息数据的分辨率不高,网格划分过细,直接影响到滑坡概率风险分析的精确度。

致谢: 湖南省气象局李寿周、林浩先生以及北京师范大学董燕生博士给予了大力帮助,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 中国地质环境公报(2006年度)[EB/OL]. 2006, www.mlr.gov.cn.
- [2] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. *Geomorphology*, 1999, (31): 181-216.
- [3] Terlien M T J, van Westen C J, van Asch T W J. Deterministic modeling in GIS-based landslide hazard assessment [C]//Carrara A, Guzzetti F (Eds.). *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995: 57-78.
- [4] Soeters R, Westen C J. Slope stability recognition analysis and zonation [C]//Turner A K, Schuster R L (Eds.). *Special Re-*

- port 247: Landslide Investigation and Mitigation. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council. 1996: 129 – 177.
- [5] 王志旺, 李端有, 王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1268 – 1273.
- [6] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 279 – 284.
- [7] 白世彪, 王建, 闫国年, 等. 基于 GIS 和双变量分析模型的三峡库区滑坡灾害易发性制图[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 85 – 92.
- [8] 闫满存, 王光谦. 基于 GIS 的澜沧江下游区滑坡灾害危险性分析[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 365 – 370.
- [9] 周翠英, 林春秀, 刘祚秋, 等. 基于 GIS 技术的区域性滑坡发生概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 911 – 914.
- [10] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报, 2003, 48(5): 507 – 512.
- [11] 吴益平, 唐辉明, 葛修润. BP 模型在区域滑坡灾害风险预测中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1409 – 1413.
- [12] 陈剑, 杨志法, 刘衡秋. 滑坡的易滑度分区及其概率预报模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2392 – 2396.
- [13] 张玉成, 杨光华, 张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 82 – 85.
- [14] 汪孔政. 时变参数模型用于滑坡位移量预测的研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 18 – 20.
- [15] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 185 – 190.
- [16] 吴兴华, 姚令侃, 张同刚. 基于 GIS 的滑坡空间特征分析[J]. 灾害学, 2006, 21(3): 22 – 26.
- [17] Davis J C, Chung C F, Ohlmacher G C. Two models for evaluating landslide hazards [C]//Computers & Geosciences, 2006, (32): 1120 – 1127.
- [18] Davis J C, Ohlmacher G C. Landslide hazard prediction using generalized logistic regression [J]. Proceedings of IAMG, 2002: 15 – 20.
- [19] Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F, Reichenbach P. GIS technology in mapping landslide hazard [C]// Carrara A, Guzzetti F (Eds.). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995: 57 – 78.
- [20] Chung C F. Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment [J]. Computers & Geosciences, 2006, (32): 1052 – 1068.
- [21] Chung C F, Fabbri A G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping [J]. Natural Hazards, 2003, (30): 451 – 472.
- [22] Chung C F, Fabbri A G. Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models [C]// Glade T, Anderson M G, Crozier M J (Eds.). Landslide Hazard and Risk. New York, NY: Wiley, 2004: 139 – 174.
- [23] 邓兴升, 王新洲. “碧利斯”台风对湖南造成的暴雨洪灾分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(4): 26 – 32.
- [24] 薛天放, 杨庆, 栾茂田. 基于 GIS 技术的滑坡空间分布的分形特征研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 347 – 354.
- [25] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 24 – 58.

Analysis and Prediction of Probabilistic Risk of Rainfall-induced Landslides Based on Empirical Likelihood Function Model

Hu Aijun^{1,2}, Li Ning¹, Wu Jidong¹, Huang Weiming³, Wen Yuting¹ and Huang Xiaoyu²

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 2. Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007, China; 3. Hunan Station of Geo-environment Monitoring, Changsha 410007, China)

Abstract: Taking Chenzhou in Hunan as an example, a spatial distribution of historical rainfall-induced landslides and a spatial database of landslide causative factors as geology and topography etc. are established. Landslide causative factors, such as landform, formation lithology, soil type, slope degree, slope direction, elevation etc. are selected in 50 × 50 m grids, and landslide hazard degree of each grid is calculated and graded by using empirical likelihood function. Then, the landslide hazard degree zoning map for Chenzhou is worked out. Using the spatial distribution data of another group of landslides, landslide empirical probability of each risk grade is estimated by using cross validation method. The results show that using empirical likelihood ratio for landslide hazard probabilistic analysis and assessment is more effective.

Key words: landslide; rainfall; empirical likelihood ratio; risk assessment; cross validation; Chenzhou of Hunan