

预测模拟技术在空间数据库优化开发中的应用

—专家系统类比法滑坡灾害制图案例研究

Alberto Pistocchi¹ Lucia Luzi² Paola Napolitano³ 著

朱汝烈⁴ 译校

(¹Studio di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Viale G. Garducci, 15, 47023

Cesena, Italy; ²IRRS-CNR, MiLan, Italy; ³ACTA Studio Associato, Naples, Italy;

⁴中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所, 河北保定, 071051)

[摘要] 此案例研究, 源于将不同概率的预测模型 [贝叶斯(Bayesian)概率、模糊逻辑、“与”、“或”、“总和”、“产出”、“灰度(非线性)”运算以及必然性因素等], 用于编制意大利亚平宁山脉北部的丘陵和山岳地区滑坡灾害地图而提出的。利用 7 个数据层来检验非常脆弱的领域: 岩性、与地质构造线的距离、年降雨量数值、土地覆盖类型、地形坡度和坡向, 以及与水文的网络段的距离。与用预测率指数相比较的不同预测结果, 引发了激烈的争论, 以评价这种易于运用、适宜有效的数据库在土地规划中使用价值的可能性。

[关键词] 支持性函数 整体化模拟 滑坡灾害 空间数据库

1 导言及一般论点

近几年来, 全欧洲各地方及规划部门在注意建立空间数据库方面有了长足进展。然而, 很多数据库似乎对决策支持仍然不起作用, 而且其使用的有效数据经常是纯粹本土化的。特别是, 最终数据使用者和决策者对于有关地理信息系统(geographic information systems - GIS)的模拟能力, 有几乎毫无意识的倾向。极少有地方政府机构在日常的决策采用预测模型作为其有效支撑。

地理信息系统为详细的空间特征模拟带来巨大的能力, 并且许多地方政府现在已拥有了 GIS 技术而为其使用提供了方便条件。这一重要信息, 有使人们在对自然界现象的日常习惯性观察时, 变成一种更有力方法手段的潜在可能吗?

出于参与规划和目标共享的需要, 对确定的共享资源, 已经引起地学家对其在用于规划和决策支持中做出的评估具有何等重要性的有关阐述的注意。一些人强调地球科学地图在制

定政策和土地使用规划过程中的作用。据他们的观点,灾害地图(hazard maps)的主要作用是,为决策者提供有关土地开发规章条例定义问题的正确观点。

基于自然现象之间因果关系的预测模型,已被水文工作者、地球科学家,环境分析家和工程师广泛的应用于自然风险评估、自然资源管理、污染防治与土壤改良及环境影响评估等领域。然而,就诸如滑坡这一自然灾害场合而言,要建立一个能在区域规模内可靠适用的模式似乎相当难。一些人探究产生这个困难的原因,主要是受模型和数据的限制。与其他风险管理角度不同,很少有管理者探索过有关定量模型的应用问题。

滑坡灾害制图的传统方法,依赖地质学家和地貌学家的经验观察、鉴定来解释滑坡发生(通过对现场特性的直接观察和遥远的检测报告)的特征。这样虽能适当可能的判明既往事件,但是在撇开专家主观性及定性判断的情况下,几乎不能支持任何预测。

在最近几年里,已推荐出了基于成带现象的大地构造模型。然而,基于大地构造模型的计算方法,或者说实际上是基于指数叠加的方法,由于数据不足或数据质量的低下,尽管其自然基础相当稳固,也经常是不可靠的。

另一方面,通过“客观”的可复制模型进行的预测,分析家对可能的、有限的随机选择感到兴趣。特别是下列这些情况:

- 当具有相当重要性的规划设想涉及到社会冲突时;
- 当现象不容易觉察时;
- 当对覆盖整个所关心区域的现象做详细测图过于昂贵,因而有必要对那些需更深一步了解的区域进行“筛选的范围”模拟的时候。

一般说来,模拟过程与决策很相似,而且其工作是具协调性和基础性的。灾害地图的合理的一个理由,是通过专家的专门鉴别,可用模拟方法学里的办法再现、复制,可以有助于认识的社会构成,亦即,在管理者、社区公众以及科学家之间分享正确的决策准则。

这一原因导致开展使用概率进行预测的可能性的调查研究。在这些探索过程中,充分运用有关滑坡事件的先验性知识,通过合理确定参数,用模糊的、或随机的地图套叠方法进行概率预测。

在最近几年,对这种方法做了很多探索。所有这些方法已经比较广泛的使用于敏感性分析或者不同方法的性能在相同案例的研究。这些应用的一个主要困难是不同的地图的对比。

有人提出了一种解决问题的构想,以完善绘图功能。在那些作者们的工作里,显示了概率、模糊的范畴,并可用现象发生地区最支持性的探测功能—例如滑坡或者矿藏—来证明。这些技术通过推测、校核而发挥效用;对其他诸如神经和贝叶斯(Bayesian)网络等方法,其

共通特征与一般的数学模拟近似。以这种方法，轻易的找出为比较不同预测地图的、一种称之为预测比率的独特标准，它堪称使模型具有良好性能的有效措施，对其解释如下。支持性函数的用途在于，以产生至少包含通过科学家用基于规章的判断，即可从现场经验获得到的、预测大部正确的地图为目标。当然紧接着因专家深化认识和现象理解，在评估期间要求选择许多模拟是必要的。同时，由于协调不当而产生的变量的假定概率，以及数据缺乏和不可靠，也可引起谬误的结果。不过，运用定量法，使模型的校准和确认能够支持预测的透明度和合理性。支持性函数模拟方法最近已在专门为其安排的某些案例研究中应用。

本文目的在于，探讨支持性函数模拟对用现有的数据库标准认定的滑坡事件，编制灾害地图的可应用性，并且检查这种方法将如何改进在现有的数据库里信息的运用，以与其他技术(例如，每个岩性单位的滑坡频率编图，或者纯粹的滑坡目录清单似的绘图)相比较。

支持性函数模拟也可来解释为用于构建数据库的概念计划：数据的收集严格依赖于在理论框架上对最佳可用信息的准确理解。

2 理论背景

很多作者指出，数值技术的使用，与那些对相关现象自身属性的局部价值认为值得关注的事件相联系。属性被认为是事件的证据因素，“或然性”、“可能性”、或者发现事件的“可能”程度，在一定意义上与每个相关属性的存在非常符合。假定 A 是已进行分析的定义域，而 F 是被检查的事件现象。若 r 数据层为有效数据，则对于每一个属性种类中的 m_k 来说，设定 $k = 1, r$ ，便可对每个数据层定义一个分配函数：

$$V_k: A \Rightarrow \{1, 2, \dots, nk\}$$

它将 A 的每个象素分配到 k 层序列之一层中；可以为每层确定另一个函数：

$$R_k: \{1, 2, \dots, nk\} \Rightarrow [a, b]$$

在这种情况下，地图在每个层里出现一个数值下降的间隔 $[a, b]$ 。在此， a 和 b 取决于分析者(如稍后将指出的那样)所做的进一步假定。这个数值代表支持性 (favorability) 度，即假定一旦遭遇某种特殊种类属性现象出现时的可靠程度。

对作为每个数据层的函数成分 V 和 R 被定义后，支持性函数可表示为：

$$F_k = R_k^{\circ} V_k$$

间隔极值 a, b 必须根由分析家据其“可靠性”的解释而定，若认为可靠性与“可能性”相同，则 $a = 0, b = 1$ 。若令可靠性范围等于确定性系数，则 $a = -1, b = 1$ 。如果选择不同的方法，则可能需要另外的数值。

支持性函数在本项目中的不同用法在本报告中予以陈述。

若支持性假设为与特定现象 F 相关，设定与事件的可能性一致的属性种类为 E1, …, En, , 然后根据贝斯定理，按 E1, …, En 独立条件假说，可写为：

$$\text{Probability}\{F \text{ occurs given } E_1, \dots, E_n\} = \\ = P\{F/E_1 \dots E_n\} = (pps_1 * \dots * pps_n) * (ppa_1 * \dots * ppa_n) / (\rho_s F)^{n-1} * pps_{1 \text{ to } n}$$

在 pps_i 中, I = 1, …, n, 是发生必然属性种类的优先概率，并且可用该属性种类存在的总面积的百分比进行估算。pps₁ 至 n 作为属性种类的先期共同可能性考虑；这可以作为全部种类共同发生的总面积的百分比。ppa_i, I = 1, …, n 是观察到的 F 对于属性种类 E_i 事件的可能性；这可以根据公式计算。Ppa_i = 1 - (1 - (area_i)⁻¹)^{nb(i)}, 其中 area_i 是符合 i 系列条件的面积，而 nb(i) 是 与 F 条件也符合的 i 系列的面积。ρ_s F 是所有覆盖整个区域的 F 的优先概率，并可用所有符合 F 条件面积的百分数算出。

按此法则，一张地图可以由发生的属性种类的每种组合的计算编制出。这可以通过常规交叉作业程序,在 GIS 的栅格内操作完成。

如果使用确定性系数，则运算法则作如下相应变动：

(1) 一种属性种类的确定性系数可以定义为：

$$CF_I = [P\{F/E_I\} - P\{F\}] / [P\{F/E_I\}(1 - P\{F\})] \text{ if } P\{F/E_I\} > P\{F\} \\ CF_I = [P\{F/E_I\} - P\{F\}] / [(1 - P\{F/E_I\})P\{F\}] \text{ if } P\{F/E_I\} \leq P\{F\}$$

其中 I = 1, …, n, n 是作为原因因数的主题数据种类的数量；

(2) 对两个数据种类来说，确定性系数根据下列法则计算：

当 CF₁ 和 CF₂ 均不为负的，那么 CF₁₊₂ = CF₁ + CF₂ - (CF₁ × CF₂)；

若 CF₁ 和 CF₂ 符号相反，则 CF₁₊₂ = CF₁ + CF₂ / {1 - min(|CF₁|, |CF₂|)}；

若 CF₁ 和 CF₂ 均为负号，则 CF₁₊₂ = CF₁ + CF₂ + (CF₁ × CF₂)。

(3) 程序通过首先计算 CF₁₊₂ = CF₁₂, 然后 CF₁₃ = CF₁₂₊₃ 等等，按此重复操作可获得更多的图件。

作为最后方法，采用模糊的集合论通过计算“模糊总和”、“模糊产出”，“模糊与”、“模糊或”以及“模糊非线性函数”。全员函数假设等于给定 E_i 种类条件，即，ppa_i, F 存在的可能性的计算结果。它们是：

- “模糊与” = min(ppa_i), I = 1, …, n
- “模糊或” = max(ppa_i), I = 1, …, n

- “模糊结果” = (ppa_l) , $l=1, \dots, n$
- “模糊总和” = $1 - (1 - ppa_l)$, $l=1, \dots, n$
- “模糊非线性操作” = (模糊总和)(模糊结果)¹⁻, 是 0:1 范围的参数。

按此方法,可确定编制覆盖层地图的法则,以便分析家能评价覆盖整个研究地区的不同事件属性数据差别,并有助于进一步识别存在更多现象的支持性场地。这些计算结果代表与被认为属支持性的现象相关指标的数目。必须注意到,除已描述之外,根据相应的资料证据分量、可信功能、线性回归覆盖概率以及其它诸多条件,可采用不同的技术;

必须指出,优先概率 psF 需要对确定性系数的估计测定而计算获得,但将它用于绝对边界条件是无意义的,因为要预知未来的滑坡事件的可能性实际上几乎是不可能的。预测理由根据必须在概括了全部条件,求得支持性指标后,方可确认,而不能以对灾害的数字计算结果为依据。

3 应 用

用于本案例研究的地区在意大利(图 1) 北部的萨维(Savio) 河流域。区域地质概况基本上为泥灰岩和沙岩组成的一个沉积盆地。可更详细的分为以下 3 种主要的地质岩层:

1. 托尔顿阶(Tortonian N_1) 为灰色砂质和泥质浊流沉积岩,是主要地质岩层,并出露于这条主要溪流两侧。
2. 由微晶质石膏与泥质粘土和沙层互层组成,而其基底为含硫石灰石地层。
3. 由 3 层构成:泥质岩、砂质岩和砾岩,全部含有灰岩层。

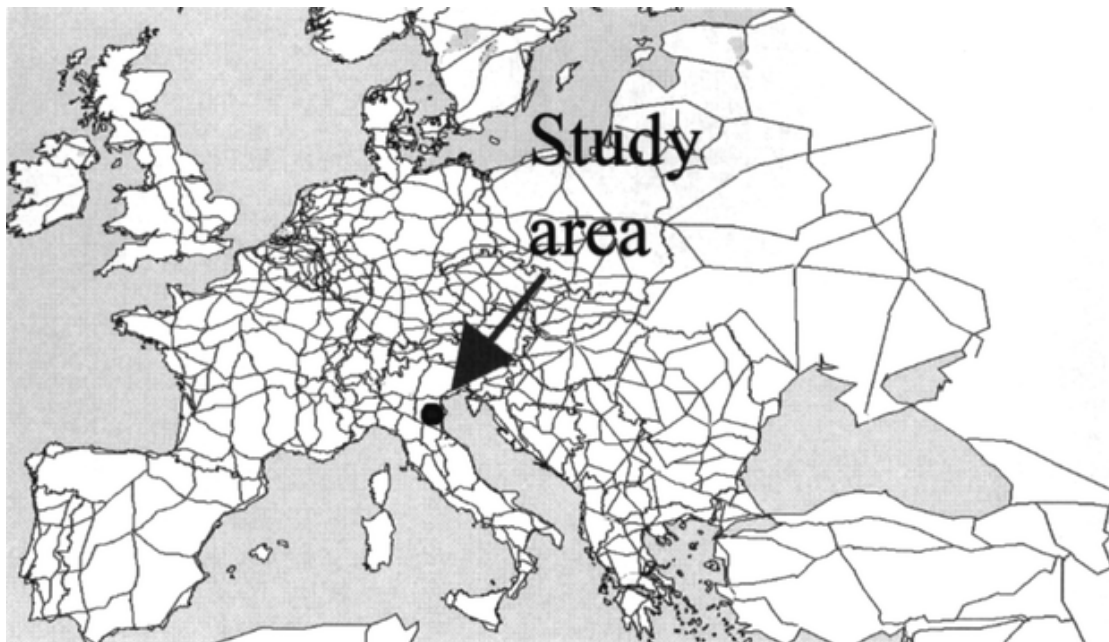


图 1 地区的位置

此外，还有淤泥质泥灰岩层、晚始新世砂岩地层、上新世粘土、以及由混杂堆积的粘土层出露地表。

该地区被大量滑坡覆盖，在不同的地质单元内，大多数情况下是以滑移型或泥石流型的运动形式发生。而且，有的地区有岩石崩落，并存在块体平移运动，然而对它们均未做过分析。研究过程中使用的数据库系由埃米利亚·罗马格纳地区地质调查所(Regione Emilia Romagna Geological Survey)提供。

用于本案例研究的数据库由若干主题层构成，它们涉及：

- 线性构造（断层，向斜和背斜），比例尺 1：50,000；
- 岩性单元，比例尺 1：50,000；
- 根据 CORINE 欧洲工程指南协议，从 TM 陆地卫星映像获得的土地覆盖情况，比例尺 1：50,000；
- 数字地形模型(DTM)，根据从当地(Regione Emilia Romagna)的地图数据库中获得的、通过计曲线内插、等高距为 50m 的等值线制成；
- 整个地区的 7 个降雨计量站的降雨测量数据；
- 数字化水文网，比例尺 1：10,000。

必须强调，数据库的分辨率非常低劣，另外，数据是在比例尺上很不均匀。有人会那么认为，特别是当与平均滑坡面积相比较时，地形信息明显很不精确，因而成为并非实际滑动的运动学的代表。这项研究的目的是评价现实世界数据库的预测能力(前面已阐述)，必须意识到，重要的不是做出可靠的灾害地图，由于最好的信息虽已被应用殆尽，没有任何更深远领域的调查和数据可捕获。正如在以下内容所强调的那样，与土地计划的预测相比较，评估的结果将为数据库的改进给予更多的输入。

从数字地形模型 DTM 中，计算了坡度和坡向地图，并分级使用了固定的数值间隔范围。

对线性构造的距离做了计算，目的在于评价构造干扰对坡体稳定性的可能影响。其结果是对一张栅格地图的栅格化。

分析了降雨资料，以查明高程与年降雨量之间的关系。从这两个变量的一个回归方程发现： $y = 0.7086x + 708.19 (R^2 = 0.66)$ ， x 为海拔高程(m)，而 y 是超过 30 年的长时间级降雨量的总平均值(mm/a)。后来用该方程式做了一幅连续降雨地图，由此明确显示，DTM 既像降雨特征的指示剂，同时也犹如位能释放的一个显示牌。

应当注意，过高的高程与降雨的相互关系相当微弱，而更进一步的分析要求更好地描述该地区的实际降雨分布情况。然而，依据现有数据，仅能说明已经适当地查明了降雨分布

的一般趋势而已。

尽管概念上的差异特性可以在滑坡的现象情况与所需的要素之间梳理出来，然而，当其他所需要特征都存在的情况下，恰恰是要素触发了滑坡。可以认为，所有这些数据层都可能具有优先意义。

至于滑坡存在的可能性的数据，只可依靠当地的土地不稳情况报表。应当着重指出，数据库适用于构建 GIS 的长时间序列分析。而且，其数据的密度和分布，按统计学来看，属具典型意义的现实滑坡分布。可以证明，事实上，当为贝叶斯程序培养的数据集不是足够大（并排列足够随机）——这关系到对分区性随机变量的获得——的时候，按定量评价的观点衡量概率综合模拟，是毫无意义的。本案例中，滑坡发生的优先总和有条件（级别—特殊）的概率 ppa_i 和 psF ，需由专家们判定。而且，选择滑坡的类型和年龄以便为培养配套是重要的，如此配套可照顾到同类滑坡。已有人进行了关于“泥石流”和“崩滑泥石流”类型滑坡的分析，认为通常发生在局部地区。在本研究项目中，仅在编制一些图件时有效地应用。

地区土地不稳定性报表记录也考虑了岩石崩落、块体滑动以及潜在不稳定的地段，但是这些没包括在分析过程中。图 2 显示了用于分析的数据层。

被考虑的全部主题的数据原则上有关联的可能性。因为多余的信息将可能导致为无效结果而做一些尝试性计算。为了分析的目的，已进行了一次对 7 个主题条件（即，降雨地图、岩石学、土地覆盖、坡度、坡向、与水文网的距离及与线性构造的距离）的联合性试验。7 个主题条件分类列入独立的图例内，并作为促使滑坡体产生活动的条件在地图上的识别标准。

对每一个地图偶对做了 4 个指数的联合计算：

- 平方(χ^2)指数；
- 克拉默(Cramers) 指数；
- 意外事故指数；
- 共同信息不确定性得分。

这里，第一个指数被确定为：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*} \quad (5)$$

当

$$T_{ij}^* = \frac{(T_{j.} T_{.i})^2}{T_{..}} \quad (6)$$

而 T = 象素的总数， T_i = 地图 1 中 i 类象素的数量， T_j = 地图 2 中 j 类象素的数量。指

数 n 和 m 分别是在地图 1 和地图 2 中的种类数目。

克拉默指数(V)和意外事故指数(C)确定如下：

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{X^2}{T \cdot M}} \\ C &= \sqrt{\frac{X^2}{T + X^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

相同符号的含义相应同前，同时 M 取 $(m-1, n-1)$ 的最小值，而 n 和 m 分别是两幅图中每一幅中的数据种类的数目。

图幅偶对 A 和 B 的共同信息不确定性得分取决于：

$$U(A, B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A, B)}{H(A) + H(B)} \right] \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} H(A) &= - \left[\sum_{j=1}^n p_j \ln p_j \right] \\ H(B) &= - \left[\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \right] \\ H(A, B) &= - \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

n 、 m 分别是在地图 A 和地图 B 里种类的数量，而 P_{ij} 则是在地图 A 和 B 的交会线上 i 和 j 种类的像素数量分别对象素总量的比率。 P_j 是地图 A 中种类 j 的像素总数量，而 P_i 表示种类 i 在地图 B 中的总像素。

上述指标可判断一个地图偶对之间的协调性尺度。平方指数给出协调性(无上边界的)绝对尺度，而对其本身没用； V 个和 C 表示区域内预防标准的尺度 $[0, 1]$ ，他们越是接近 1，则两张地图之间的联系性越强。这 3 个指标结合使用，可提供关于联系性的一个综合尺度标准，并允许我们超越一套地图，比较像对不同角度的联系性。通常，可能注意到 3 个指标呈现如期望的那样非常相似的反应。不确定性共同信息记录也可用于确定由前面的指标测定的联系性模型，并假定在 0(完全独立的地图) 和 1(完全联系的地图)之间改变。表格 1 展示了如上所述的地图计算的指标。

表 1. 数据层之间的联系性指标

岩石学	地表覆盖	坡向	坡度	降雨量	与河流距离	线性构造间距	指数
14, 323. 84	3, 896. 73	1, 316. 985	1, 122. 374	5, 638. 054	2, 015. 259	105. 83	平方
0. 2169	0. 1131	0. 0658	0. 0609	0. 1361	0. 0814	0. 0186	克拉默指数

	岩石学	地表覆盖	坡向	坡度	降雨量	与河流距离	线性构造间距	指数
滑坡	0.212	0.1124	0.0657	0.0607	0.1348	0.0811	0.0186	偶然
	0.02	-	-	-	-	-	-	不确定性
岩石学		73,615.45	23,898.36	37,642.06	225,075.7	4,254.247	106,13.059	平方
		0.2459	0.106	0.0855	0.4308	0.1182	0.1078	克拉默指数
		0.4413	0.27	0.3324	0.6528	0.1174	0.1835	偶然
		0.1	0.02	0.04	0.23	0.01	0.02	不确定性
			6,060.324	25,611.87	61,260.3	7,634.952	821.463	平方
地表覆盖		0.1398	0.1454	0.2243	0.1584	0.03		克拉默指数
		0.0706	0.2792	0.4093	0.1564	0.0519		偶然
		-	0.03	0.07	-	0.04		不确定性
坡向			6,289.839	10,158.14	1,493.088	300.815		平方
			0.0431	0.0914	0.0554	0.0182		克拉默指数
			0.1132	0.1798	0.0553	0.0314		偶然
			-	-	-	-		不确定性
坡度				41,613.68	1,230.77	1,245.942		平方
				0.1853	0.0504	0.037		克拉默指数
				0.3475	0.0503	0.064		偶然
				0.04	-	-		不确定性
					501.429	2,593.115		平方
降雨量					0.0406	0.0533		克拉默指数
					0.0405	0.0919		偶然
					-	-		不确定性
D. f. 流域						60.929		平方
						0.0141		克拉默指数
						0.0141		偶然
						-		不确定性

尽管未使用计算的指标，在严格条件下，对于确定贝叶斯条件（比非联系性质更强）的独立性，这些由全部数据层推断而得出的联系性指标，可能应当是独立的。

正如分析所指出的，必须被注意到，滑坡显示出与岩石学的某种联系（只有一个滑坡，仅仅（岩石学）主题和 U，由于共同信息的不确定性，也具有非相关性），并与海拔高程/雨量以及地表覆盖存在空间联系趋势。

应当指出，若从因果关系以外的因素看来，岩石学与海拔高程/雨量和土地覆盖是相关的，而与坡度之间的联系较弱，与其它主题的联系则极少或无联系。提供给研究项目的不甚适用的 DTM 似乎是造成这一现象的首要原因。除在坡度和降雨量/海拔高程之间的微弱的联系外，其他联系可能均未予考虑。

分析好像得出同样的结论，根据当地地质调查所，岩性的因素仅仅用于编制滑坡灾害图以及拟定作为滑坡灾害指标的每个岩性单位的滑坡频率。

在每次运算期间，只有已知滑坡（通过随意抽样选择）的一半用来生成预测地图，然而剩下的东西，应当视为同样有效的数据群。作为滑坡灾害预测尝试，最先使用潜在原因因素，而在第 2 次试验过程中，只使用了 3 个极其相关的因素，这将在后面的章节中予以解释。

结果的讨论

支持性函数的计算如以下描述的那样，是在不同的模拟假定前提下进行的。每一幅由计算生成的良好地图的预测能力，用曲线的预测比率进行测试。这种曲线，是通过研究地区的累积百分率标定分类，以支持性评定数值的递减量（遵循上面提到的各种法则）作为横坐标，反之，以滑坡地区的累积百分率作为纵坐标而做成的。据说，当预测的滑坡百分比与区域最大值的 20% 相一致时，便是对模型预测能力的良好评估。更广泛的观念是，曲线越是有规则的接近纵轴，则预测越加吻合。相反，若更多的曲线靠近 45° 直线，则说明组合因素造成预测靠近支持性数值的随机分布范围，这种预测的有用价值极小。在因果因素中，已经认识到水文的网络所起作用较小，这是因为为其所拟定的细节，要比其它因素的精密度高得多。乍看起来河流切割“遍布”各地，因而不便于将滑坡分布与它和水文网络的距离加以联系。因此，在因果因素中没有包括河流水系。

在图 3 中对已考虑的 6 个因果因素的预测比率，逐个予以显示。本项目中，预测者估计的条件频率 ppa_l ， $l = 1, \dots, n$ （发生滑坡事件的条件概率，给定的种类 i ）适于每个主题内的每一个种类。

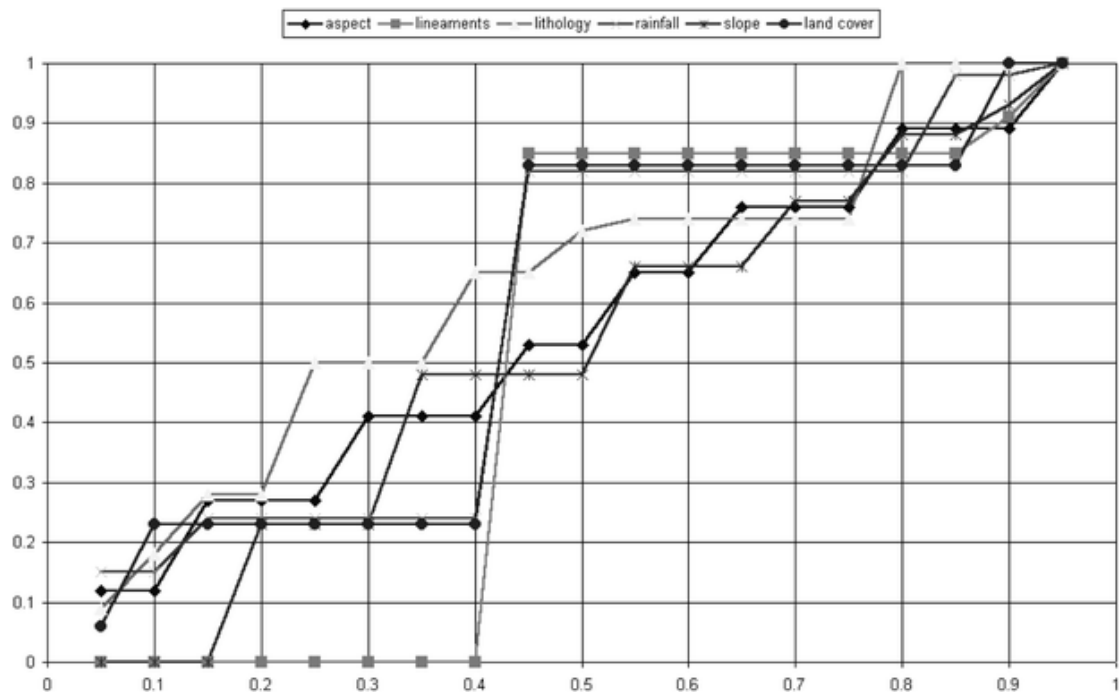


图 3。原因因素预测的比率—使用整个滑坡封闭折线和条件频率

第一步计算用作证据的数据，来自图解滑坡活动的全部封闭折线。滑坡被分解成两个随机取样组，其中一用于标定，而另一个用于证实。计算作业使用了 3 个最相关的主题(岩性、土地覆盖以及海拔高程/雨量)，遵照先前描述的指标。 预测比率曲线用图 4 显示。

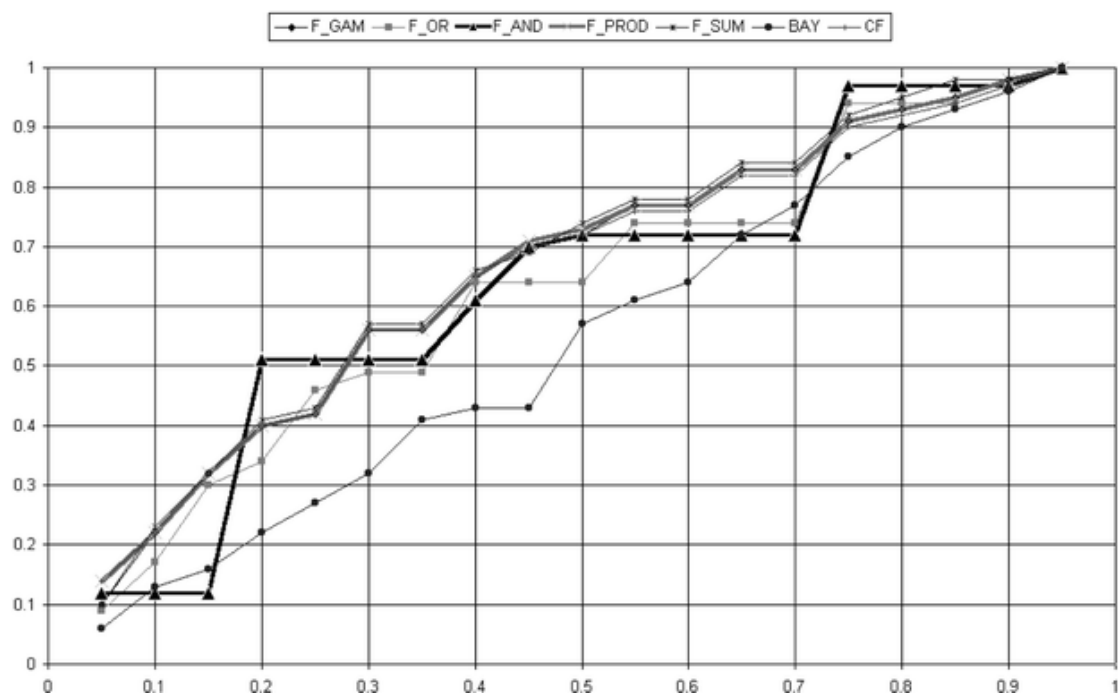


图 4。7 位预测者预测的比率—使用 3 个因果指标(岩石学，降雨量，和土地覆盖)和整个滑坡封闭折线

进一步使用所有的 6 个指标进行了计算，其预测比率用图 5 显示。

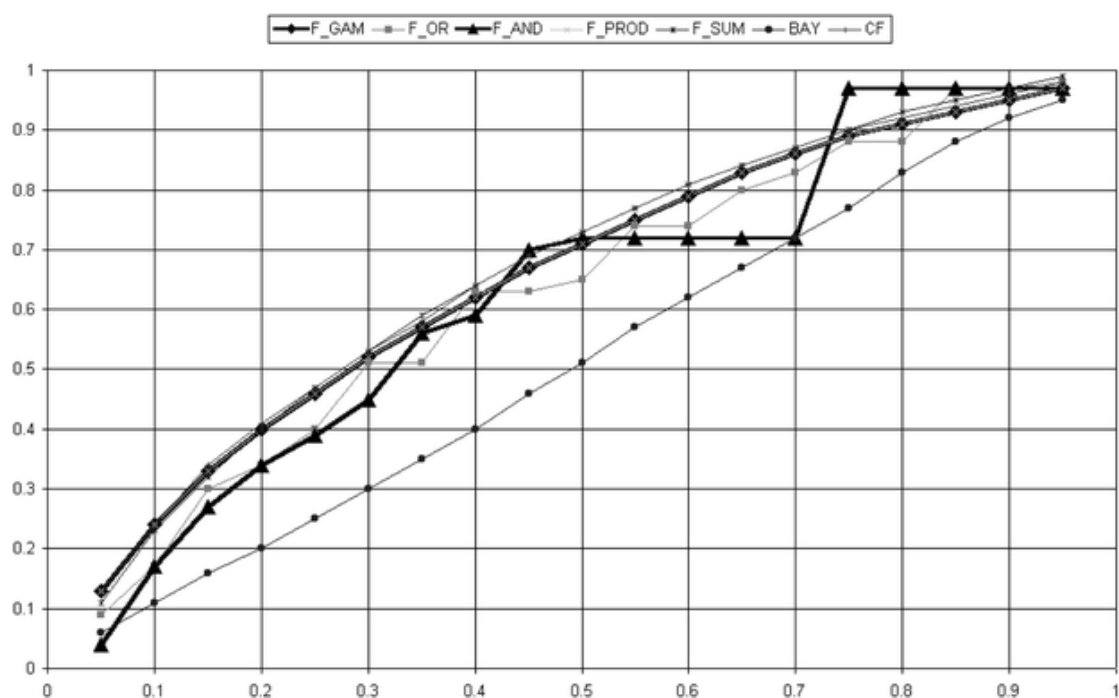


图 5。 7 位预测者预测的比率—使用所有 6 个相关的原因指标和整个滑坡封闭折线

我们注意到，由于整个滑坡体均被绘制，因而这可能会含有一些精确性的偏差，由于因果因素的集合，致使滑坡触发点和滑坡前缘不相同。因此，在每个滑坡封闭折线内预测，只使用最高点；若从物质运动的运动学原理考虑，触发点应当在最高位置。6 个因果指标在此假定前提下计算的预测比率，如图 6 所示。

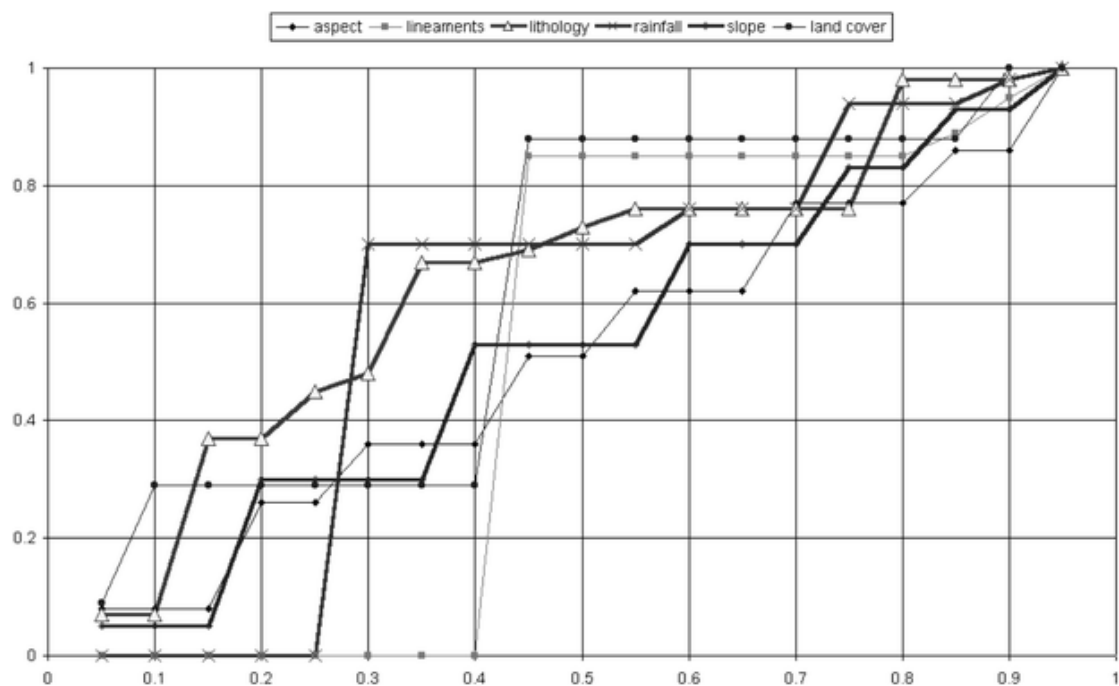


图 6。 只使用触发点因果指标预测的比率

7 位预测者使用 3 个 和 6 个 因果指标的预测比率，分别用图 7 和图 8 显示。

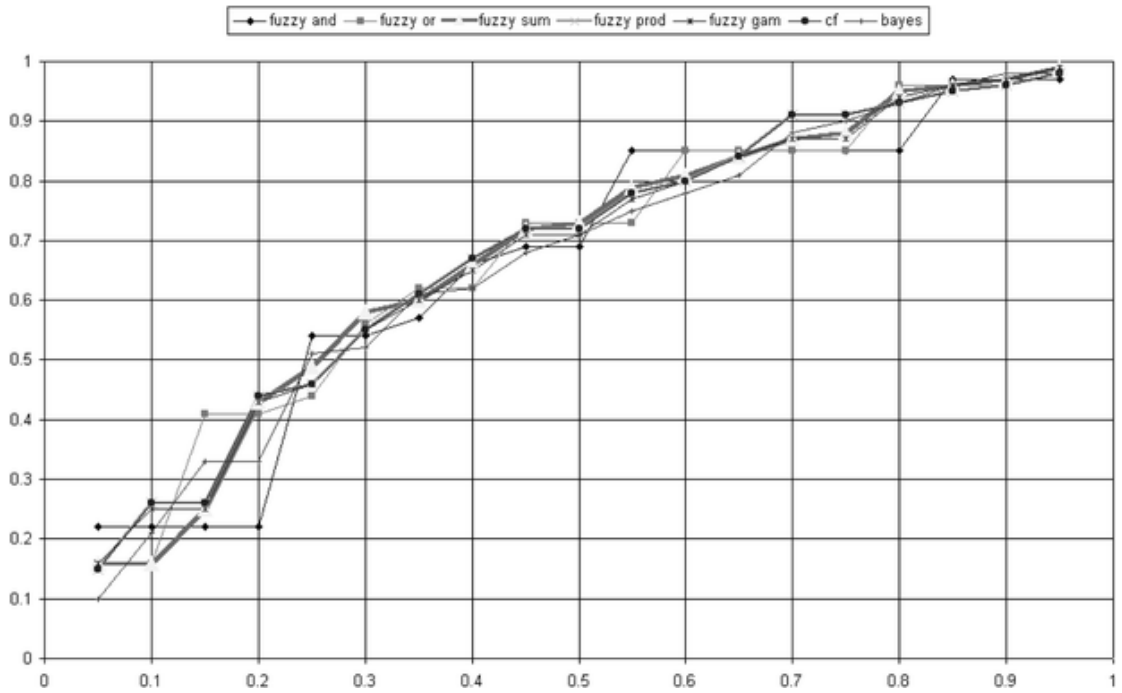


图 7。7 个预测者只使用 3 个因果指标(岩石学、土地覆盖、和降雨量)和触发点预测的比率

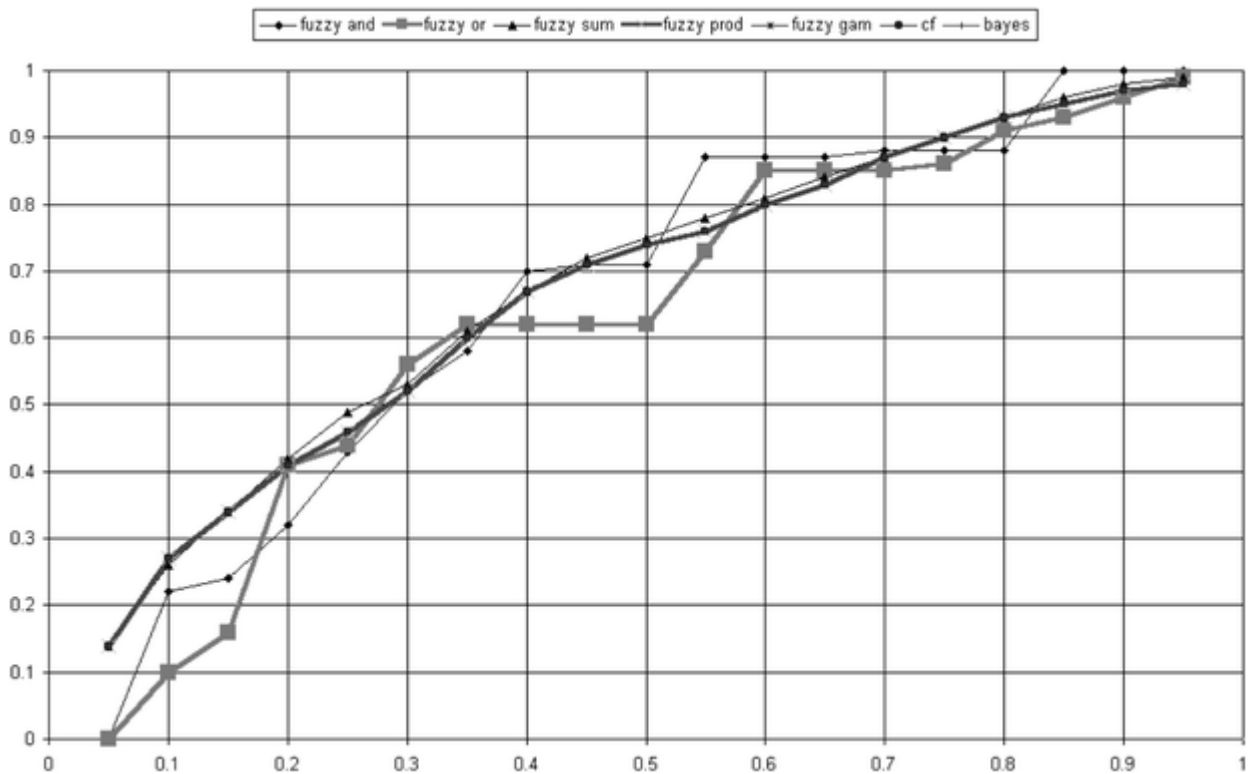


图 8。7 个预测者使用 6 个 相关因果指标和滑坡触发点预测的比率

就输入数据的相关性而论，表明使用坡度、坡向和雨量分布（即，更准确的 DTM 和雨量—由更区域化的降雨计量器获得的数据）具有更好的代表性，将使结果得到改进。一旦得到新数据，分析者们便可重新评价其对预测的潜在影响。

从预测比率的比较中可以确定：

- 当使用 6 种因果指标代替 3 种与滑坡关联性更好的指标（岩石学、土地覆盖以及雨量）时，似乎没有明显的改进；在两种情况下的预测表现得非常近似，这恰似对种类群用了修整清除器，然而更多的指标是被应用了的。

- 更进一步的清除效果可由只用触发点，而无需考虑滑坡整体来作为证据。这不至于带来地图总体预测能力的恶化；但同时也须顾忌到，过量的清除有可能会导导致绘图的可靠程度降低乃至消失。

- 岩石学在原因指标的预测比率图解中，无论如何显然具有更高的预测能力（如此则可理解，为何当地地质调查所单独选择了将这个主题层用于灾害制图），当然还包括土地覆盖和降雨。然而并非其他全部主题都与预测相关。

- 在本案例研究过程中，除贝叶斯可能性的情况外，7 位预测者所用的预测表现得极其近似。然而数据的有效分布性是非常敏感的，当整个滑坡体被用作证据——并处于模糊“或”、“与”的某些场合时，则预测均近乎为随机性的。通常，似乎确定性系数是预测者在这一具体案例的研究中最有用的手段，虽然在每种情况下，一些预测者与以预测比率曲线和预测地图做出的预测实际上相同。

图 9 显示了在本案例中，进一步显著了将 3 个因素与作为主题证据的触发点共同配合使用时的 7 种预测。这是本案例研究过程中探讨的情况之一，它显示出了更好的预测比率，并且可能对滑坡灾害成带性作出最佳的基础性思考，显现了当前的认识状态。

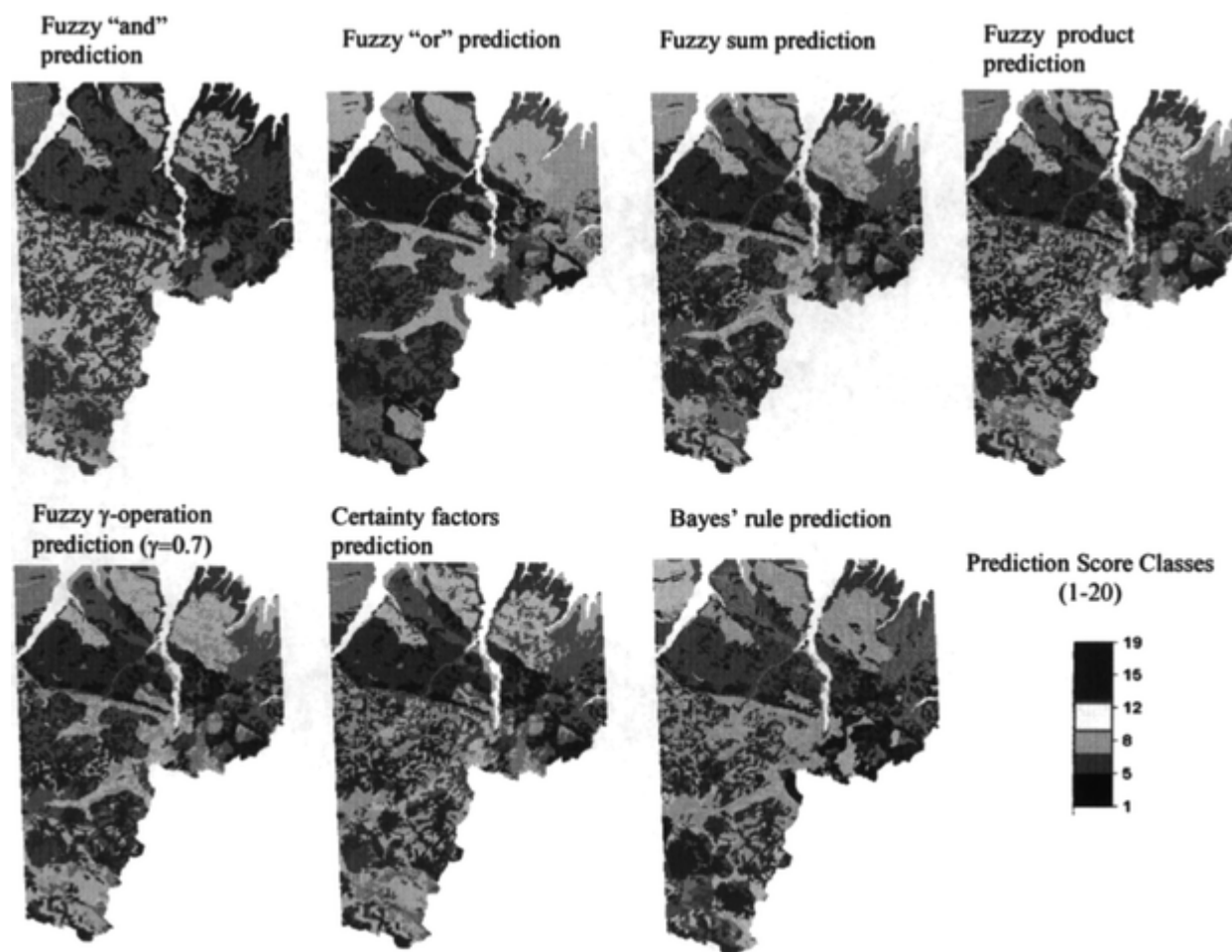


图 9。 根据 7 种预测做出的预测地图—使用降雨、岩石学和土地覆盖条件和作为论据的触发点。整个区域按根据图例中支持性的增大顺序，再分成类别相等的地区（类别 20 = 最大支持性值）。（从左至右：上行图—模糊“与”操作、模糊“或”操作、模糊“总和”操作及模糊“产出”操作；下行图—模糊“非线性”操作、确定性系数操作、贝叶斯法则操作及图例。）

结 论

这种方法，根据土地分类，使用数字模型(较少需要专家的主观判断)讨论滑坡灾害。这似乎表明，当客观预测可从空间数据库中提炼出来时，则可以说明其主题有一些“系统”增加的价值，即，全部数据都共同使用比仅只使用某些主题的效果更好。

必须强调，这种方法从现有数据库的开发入手，且保留对每个主题认识的开放、完善。在最好的预测者们各种各样的测试(确定性系数、贝叶斯可能性、模糊的操作和其他可能的技术)中，仅能根据各种测试技术的预测能力做出选择，最后则慎重地使用了预测比率曲线进行预测。

这些分析已经引发了现有的数据库尚属不健全的认识，当然，仅指为了生成预测模拟使用目的的地形数据不甚适当而言。这寄希望于未来投入进一步的调查研究并捕获数据，以确定一种更佳的数字化地形模型。只要改进的原因因素地图一旦产生，或者一个新的原因因素

被确认与现象相关,便可能重新进行计算,从而可能产生新的预测图。预测比率使用的有效性可按实际和有效改进进行检查,也可用来对数据收集和岩土工程监测的进一步努力指明方向。例如,在本案例研究中,岩性、土地覆盖以及降雨(如上所述,按高程描述)显然是滑坡的最相关的因素,因而到目前为止,分析主要致力于这些因素的调查和编图。更进一步说,准备并使用具合适解读能力的DTM显得很有必要,其目的是为了更详细的检查地形数据的影响。分析也很重视其他主题条件,例如水体高程,对用于危险绘图时,它可能就变得相当重要。

**Th use of predictive modeling techniques for optimal
exploitation of spatial database : a case study in landslide
hazard mapping with expert system-like methods**

Alberto Pistocchi, Lucia Luzi, Paola Napolitano
(意大利)