

# 基于 GIS 和数量化理论 II 的滑坡危险性预测

周国云<sup>1</sup>, 陈光齐<sup>2</sup>

(1. 西日本工业大学 土木工程系, 日本 福岡 800-0394; 2. 九州大学 工学部, 日本 福岡 819-0395)

**摘要:** 使用传统的数量化理论可以把定量和定性的指标结合起来综合判断滑坡发生的危险性, 而这些方法在实际应用时面临的问题是如何高效率和高精度地定量把握各种滑坡影响因素的空间分布(如地质、倾角、土地利用、地形起伏、汇水面积等)。提出基于 GIS 的空间数据输入方法, 通过矢量数据和栅格数据变换来快速高效地解决数据的准备问题, 同时制作接口将这些数据输出, 提供给数量化理论进行计算, 并把结果反馈给 GIS 进行区域滑坡灾害预测图的制作。通过上述方法可以大大提高效率以及灾害预测图的准确度。该方法实际应用于日本熊本县水俣市地区得出的结果, 证实提出的方法只需要传统方法所需时间的 1/10 就可以高精度地完成区域滑坡灾害预测图的分析计算和制作工作。

**关键词:** 边坡工程; GIS; 数量化理论 II; 滑坡; 灾害预测图

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2008)12-2494-07

## LANDSLIDE RISK PREDICTION BASED ON COUPLING GIS AND SECOND THEORY OF QUANTIFICATION

ZHOU Guoyun<sup>1</sup>, CHEN Guangqi<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nishinippon Institute of Technology, Fukuoka 800-0394, Japan;

2. Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan)

**Abstract:** A new geographical information system(GIS)-based landslide risk prediction method using Hayashi's quantification theory is proposed and applied to a landslide prone area in Minamata City of Kumamoto Prefecture. In the past, Hayashi's quantification theory was used in slope failure hazard mapping; however, the preparation of larger spatial data is very hard; the work efficiency is low; and the reliability of the results is doubtful sometimes. A preparation method of a series of GIS-based spatial data is proposed for quantification theory analysis; and the results of the analytical results can be input into GIS to make hazard map directly. The application of the proposed method in Minamata area shows that the created hazard map agrees well with the real slope failure condition.

**Key words:** slope engineering; geographical information system(GIS); second theory of quantification; landslide; hazard map

## 1 引言

目前, 基于GIS的区域性滑坡灾害预测可以初步分为两大类: 非确定性模型(non-deterministic model)

方法及确定性模型(deterministic model)方法。非确定性模型方法是指先对滑坡发生的影响因子(地质、倾角、地形特征等)的空间分布进行定量评价, 然后采用数理统计, 如神经网络以及遗传算法等近代数学方法对滑坡的发生与影响因子的关系进行分析,

**收稿日期:** 2008-07-15; **修回日期:** 2008-09-05

**基金项目:** 日本学术振兴会科学研究基金资助项目(19310124)

**作者简介:** 周国云(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于河海大学水文地质与工程地质专业, 现任西日本工业大学教授, 主要从事地质灾害、地理信息系统应用等方面的教学与研究工作。E-mail: zhouv@nishitech.ac.jp

找出统计规律, 并对未来的滑坡发生危险性做出预测<sup>[1~8]</sup>。确定性模型方法是在大范围地区采用传统的斜坡破坏力学计算模型进行滑坡发生危险性预测<sup>[9~11]</sup>。

确定性模型方法由于采用力学模型, 因此需要掌握区域性的地质结构分布特征和各种力学参数的空间分布数据, 这种定量数据的取得往往十分不容易。而非确定性模型的滑坡预测方法, 可以根据历史滑坡的分布以及滑坡发生影响因素组合的相互关系来预测潜在的滑坡发生危险性, 是区域性滑坡预测比较现实可行的方法。非确定性模型的滑坡预测方法的最大问题在于, 对于一个地区需要事先划分网格, 然后对每个网格里面的各种滑坡影响因子建立数据库(定性或定量数据, 如地质、倾角、土地利用状况等), 之后才能进行判定分析。当研究的区域面积很大, 在考虑因素很多的情况下, 网格数据的准备就变得非常繁琐和沉重, 因而成为制约该方法实际推广应用的瓶颈。另外, 在判定计算后如何迅速制作滑坡灾害图也是很大的一个问题。在这方面, 冲村孝等<sup>[4, 6~8]</sup>做了很多代表性的工作。但是这些研究普遍使用传统的数据准备方法, 方法的效率和可靠性均存在问题。日本的研究者在滑坡危险区划方面尽管研究成果很多, 但是使用考虑定性因子的数量化理论 II 进行的研究比较少。汪茜等<sup>[12~14]</sup>在这方面做过研究。如何使用 GIS 的空间数据处理功能来高质高效地准备数据还有很多问题需要解决。

本文结合 GIS 的特点, 以反向思维提出了不事先划分网格, 先快速准确建立滑坡因子分布的 GIS 数据库, 之后再划分网格, 使用 GIS 的空间数据解析功能对网格进行数据分配的思路, 从 GIS 中输出所需格式的数据提供给数量化理论计算程序进行判定分析, 并用 GIS 快速建立滑坡灾害预测图。为检验该方法的可行性, 以日本熊本县水俣市滑坡灾害地区为对象进行了实际计算和比较研究。

## 2 研究方法概要

### 2.1 数量化理论 II

日本数理统计学者林知己夫<sup>[15]</sup>提出的数量化理论被认为是很成功的、可以分析定性和定量数据关系的方法之一。其中数量化理论 II 是判别分析方

法的一种, 可以通过各种影响因子(定性和定量)与出现的结果进行学习找到规律(线性或非线性), 根据新的影响因子组合对可能出现的结果进行预测。假设有  $g$  个母体, 每个母体有定性的变量  $m$  个(称为  $m$  个项目), 以及  $q$  个定量变量, 共计  $n$  个变量, 第  $j$  个项目有  $r_j (j=1, 2, \dots, m)$  个类目, 共有  $n$  个类目,  $n = \sum_{j=1}^m r_j$ 。如果从第  $t$  个母体中取出  $n_t (t=1, 2, \dots, g)$  个样品, 共有  $n = \sum_{t=1}^g n_t$  个样品, 可以得到如下的  $n \times (p+q)$  阶数据矩阵:

$$\begin{matrix}
 \mathbf{X} = \\
 \left[ \begin{array}{cccccccc}
 u_{11}^1 \cdots u_{1q}^1 & \delta_1^1(1, 1) \cdots \delta_1^1(1, r_1) \cdots \delta_1^1(m, 1) \cdots \delta_1^1(m, r_m) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 u_{n_1}^1 \cdots u_{n_1q}^1 & \delta_{n_1}^1(1, 1) \cdots \delta_{n_1}^1(1, r_1) \cdots \delta_{n_1}^1(m, 1) \cdots \delta_{n_1}^1(m, r_m) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 u_{11}^g \cdots u_{1q}^g & \delta_1^g(1, 1) \cdots \delta_1^g(1, r_1) \cdots \delta_1^g(m, r_m) \cdots \delta_1^g(m, r_m) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 u_{n_g}^g \cdots u_{n_gq}^g & \delta_{n_g}^g(1, 1) \cdots \delta_{n_g}^g(1, r_1) \cdots \delta_{n_g}^g(m, 1) \cdots \delta_{n_g}^g(m, r_m)
 \end{array} \right]
 \end{matrix} \tag{1}$$

式中:  $\mathbf{X}$  为原始数据矩阵。

在矩阵中前  $q$  列中的每一列是一个定量自变量在各样品中的取值, 在运算前要对数据进行正规化; 后  $p$  列是  $n$  个样品在  $p$  个类目上的反应度。数量化理论 II 可表示为如下数学模型:

$$\left. \begin{matrix}
 \mathbf{y} = \mathbf{Xb} \\
 \mathbf{Cb} = \lambda \mathbf{Db}
 \end{matrix} \right\} \tag{2}$$

$$\mathbf{y} = \{y_1^1, \dots, y_{n_1}^1, \dots, y_1^g, \dots, y_{n_g}^g\}^T \tag{3}$$

$$\mathbf{b} = \{a_1, \dots, a_q, b_{11}, \dots, b_{1r_1}, \dots, b_{m1}, \dots, b_{mr_m}\} \tag{4}$$

$$\mathbf{C} = (\overline{\mathbf{X}} - \overline{\overline{\mathbf{X}}})^T (\overline{\mathbf{X}} - \overline{\overline{\mathbf{X}}}) \tag{5}$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{X} - \overline{\overline{\mathbf{X}}})^T (\mathbf{X} - \overline{\overline{\mathbf{X}}}) \tag{6}$$

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}} =$$

$$\left[ \begin{array}{cccccccc}
 \overline{u}_1 \cdots \overline{u}_q & \overline{\delta}(1, 1) \cdots \overline{\delta}(1, r_1) \cdots \overline{\delta}(m, 1) \cdots \overline{\delta}(m, r_m) \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \overline{u}_1 \cdots \overline{u}_q & \overline{\delta}(1, 1) \cdots \overline{\delta}(1, r_1) \cdots \overline{\delta}(m, 1) \cdots \overline{\delta}(m, r_m)
 \end{array} \right] \tag{7}$$

$$\overline{\mathbf{X}} =$$

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_1^1 \cdots \bar{u}_q^1 \bar{\delta}^1(1, 1) \cdots \bar{\delta}^1(1, r_1) \cdots \bar{\delta}^1(m, 1) \cdots \bar{\delta}^1(m, r_m) \\ \vdots \ddots \vdots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \\ \bar{u}_1^g \cdots \bar{u}_q^g \bar{\delta}^g(1, 1) \cdots \bar{\delta}^g(1, r_1) \cdots \bar{\delta}^g(m, 1) \cdots \bar{\delta}^g(m, r_m) \\ \vdots \ddots \vdots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \\ \bar{u}_1^g \cdots \bar{u}_q^g \bar{\delta}^g(1, 1) \cdots \bar{\delta}^g(1, r_1) \cdots \bar{\delta}^g(m, 1) \cdots \bar{\delta}^g(m, r_m) \\ \vdots \ddots \vdots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \ddots \vdots \\ \bar{u}_1^g \cdots \bar{u}_q^g \bar{\delta}^g(1, 1) \cdots \bar{\delta}^g(1, r_1) \cdots \bar{\delta}^g(m, 1) \cdots \bar{\delta}^g(m, r_m) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{u}_l^t = \frac{1}{n_l} \sum_{s=1}^{n_l} u_{sl}^t \quad (t = 1, 2, \dots, g) \quad (9)$$

$$\bar{\delta}^t(j, k) = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \delta_i^t(j, k) \quad (t = 1, 2, \dots, g) \quad (10)$$

$$\bar{\bar{u}}_l = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^g \sum_{s=1}^{n_t} u_{sl}^t = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^g n_t \bar{u}_l^t \quad (11)$$

$$\bar{\bar{\delta}}(j, k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^g \sum_{i=1}^{n_t} \delta_i^t(j, k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^g n_t \bar{\delta}^t(j, k) \quad (12)$$

式中： $\mathbf{y}$  为各样品的类目得分； $\lambda$  为特征值； $\mathbf{b}$  为变量得分，即对应的特征向量，可表示为  $q+p$  维的向量形式； $\bar{\mathbf{X}}, \bar{\bar{\mathbf{X}}}$  均为  $n \times (p+q)$  阶矩阵。

通过以上计算可以得到每个类目的得分。类目得分是判判样品判定为什么母体的重要依据。一般是通过已知样品的所属母体和变量组合的学习，在判错概率最小或者与某母体的距离最小的情况下对待判样品进行判定<sup>[16, 17]</sup>。

### 2.2 GIS 的空间数据处理

GIS 在空间信息 (spatial information) 的取得 (capture)、储存 (storage)、表示 (display)、管理 (management) 以及解析 (analysis) 方面具有很强的优势。常用的数据格式为矢量数据和栅格数据，两者之间可以进行互相转换 (见图 1)。

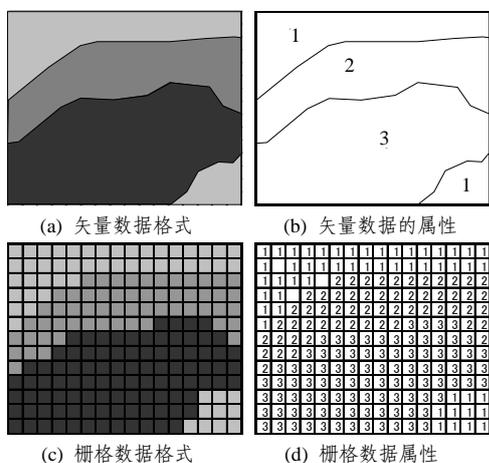


图 1 矢量数据和栅格数据格式以及属性数据

Fig.1 Modes of vector data, raster data and attributes

一般功能比较齐全的 GIS 软件 (如 ArcGIS) 在栅格数据处理方面具有很多功能。数据的输入一般采用矢量数据 (点、线、面) 来进行，输入的矢量数据转化为栅格数据后可以进行 GIS 的空间分析 (spatial analysis)，以定量掌握各个数据层的空间分布状况及各个数据层之间的关系。

### 2.3 基于 GIS 和数量化理论的滑坡灾害预测方法

本文提出先不划分网格，而使用 GIS 建立研究地区的滑坡影响因子空间数据库的思路，一般考虑的滑坡影响因子如下：(1) 土地利用；(2) 地质分布；(3) 地形起伏；(4) 地形倾角；(5) 地形倾斜方向；(6) 汇水面积；(7) 地形凹凸。

以上这些空间数据采用矢量数据格式输入 (其中倾角和倾斜方向由地形数据计算而得)。对搜集的各种地图进行扫描后，由 GIS 读入图像，所有图像均采用同一坐标系，然后使用自动追踪的方法快速输入数据。输入数据后，所有数据均转换为栅格数据格式。之后对该地区进行网格划分得到标准网格，利用 GIS 的数据处理方法对所有数据均采用该标准网格进行统计和存储，然后输出为 ASCII 格式，提供给数量化理论 II 计算。

使用数量化理论进行滑坡危险性分析时，对得到的地形倾角、汇水面积等数据进行分类，如坡面倾角  $0^\circ \sim 10^\circ$  为第 1 类， $10^\circ \sim 20^\circ$  为第 2 类等，分类后得到类目表 (见表 1，该表仅为例子，具体要结合实际研究地区的情况进行分类)，有了类目表后再对网格内的数据进行再调整。

完成数据的再调整后，使用数量化理论 II 进行计算，可以得到每个类目的得分。由于滑坡发生的定量数据设定为 1，没发生的设定为 0，类目得分越大表示该类目对滑坡发生的贡献度越大。对类目得分进行正规化，使其成为  $0 \sim 1$  的数据，由于数据比较小，一般将其放大一定的倍数 (如 20 倍)，并称为危险评价系数，其计算公式如下：

$$\text{危险评价系数} = 20[(C - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min})] \quad (13)$$

式中： $C$  为某个类目的得分， $C_{\max}$  和  $C_{\min}$  分别为最大和最小类目得分。

对每个网格里的各个类目的危险评价系数合计后，并划分成一定的等级就可以得到区域滑坡危险性分区图。图 2 是本文提出的研究方法的流程示意图。

表 1 滑坡影响因子以及类目和类目得分  
Table 1 Influential factors of landslide and their categories

起伏量			倾斜角			土质			土地利用		
数值/m	类目	类目得分	数值/(°)	类目	类目得分	分类	类目	类目得分	分类	类目	类目得分
0~5	1	0.012 4	0~15	1	0.134 1	砂岩泥岩互层	1	0.093 2	人工物体	1	0.032 5
5~10	2	0.022 3	15~30	2	0.345 3	安山岩	2	0.231 0	阔叶林	2	0.134 2
10~20	3	1.236 3	30~40	3	2.982 1	第四纪堆积层	3	1.121 3	针叶林	3	0.145 3
>20	4	0.865 4	40~90	4	0.384 2	火山岩	4	0.232 1	田地	4	0.043 1
									竹林	5	0.452 2

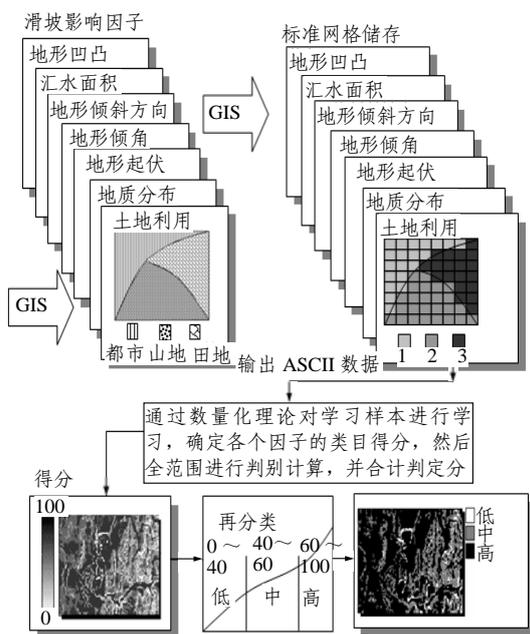


图 2 基于 GIS 和数量化理论的滑坡灾害预测方法概念  
Fig.2 Concept of landslide hazard prediction method based on GIS and quantification theory

2.4 GIS 数据的输入和处理

(1) 地质图

地质图采用面矢量数据(polygon)进行输入。对收集到的地图先扫描后, 再进行同一坐标定位, 之后进行输入, 每输入一个形状后输入其属性数据, 输入完毕后, 转换为栅格数据。

(2) 土地利用图

采用与地质图相同的输入方法处理。

(3) 历史滑坡的轮廓的分布图

采用与地质图相同的输入方法处理。

(4) 地形起伏量的计算

地形起伏量是一个网格内地形标高的最大和最小值的差。利用 GIS 的区域统计(zone statistics)功能

可以很快捷地取得这个值。利用标准网格对地形标高栅格数据基进行区域统计时, 可以得到每一个网格(面)所包含的地形栅格数据的统计值, 有最大值(MAX)、最小值(MIN)、平均值(MEAN)、偏差值(STD)、范围值(RANGE)、多数值(MAJORITY)。其中的范围值(RANGE)就是所需要的起伏量值(见图 3)。

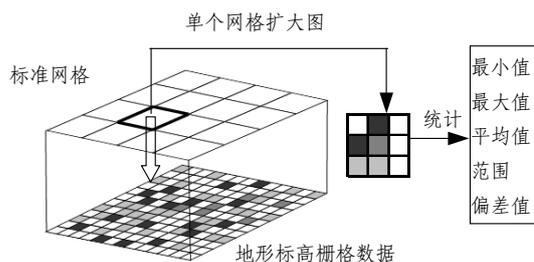


图 3 区域统计功能的概念  
Fig.3 Concept of zone statistics in GIS

(5) 地形的凹凸指标

通过某一个地点的标高和周围地形的标高进行比较, 可以知道该地点所处位置是凹、凸或者是平坦。如图 4 所示, 地形的凹凸指标是指一个网格的标高值和周围 8 个相邻网格的标高平均值的差(图中的数字代表网格的号码)。使用栅格数据的近邻分析可以得到此值。数值的正、负和零分别代表凸、

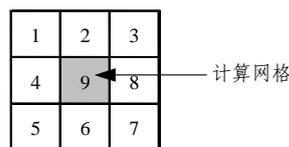


图 4 地形凹凸指标的计算概念  
Fig.4 Calculation concept of terrain concavoconvex characteristics

凹以及平坦。当然数值为零比较少，可以定一个数值区间来代表。

(6) 汇水面积

汇水面积是指在降雨时所有流入某一地点的周围地形的面积的总合。根据标高以及倾斜方向可以找出所有可能流入该点的地形。一般来说，雨水集中流入的地方滑坡发生的危险性也要大一些。

这个数值的计算是非常花费劳力的工作。使用 GIS 的水文解析专用工具，可以很容易地得到每个网格的汇水面积值。GIS 的水文解析包含了 3 个步骤：地形异常值的平均化处理、雨水的流入方向的计算及汇水面积的计算，详细可参见相关研究<sup>[18]</sup>。

(7) 标准网格的建立

标准网格是指对一个研究地区进行网格划分得到的网格，将来要用来统计和储存各种滑坡发生的影响因子数据。该网格的尺寸大小要根据历史滑坡面积的大小、收集到的数据的精度综合考虑后决定。使用 ArcGIS 网格划分工具可以很简单地对一个地区进行划分，尺寸的大小也可以随意调节，网格应为面(polygon)的格式。

以上所有数据的 GIS 处理完毕后，由标准网格储存数据后输出为 ASCII 格式的数据。编制一个转换程序，适当调整数据的列表格式就可以被数量化理论计算程序读入计算。计算判定结果再通过 ASCII 的格式导入 GIS，按节 2.2 介绍的方式就可以迅速制作出滑坡灾害预测图。

### 3 实例应用

为了检验以上方法的可行性，作者对日本熊本县水俣市滑坡灾害地区的 GIS 数据进行输入处理，进行数量化理论的计算，制作滑坡灾害预测图，并进行了效率、精度等方面的比较分析。

水俣市滑坡灾害地区位于熊本县的西南方向(见图 5)，2003 年 7 月 20 日由于暴雨引起大规模的滑坡和泥石流，导致 15 人死亡，15 栋住宅全部毁坏。该地区最下部的基岩为泥岩，其上部分布着风化的凝灰角砾岩。过去 20 a 经常发生滑坡现象，政府部门对过去的滑坡进行了调查统计，编制了历史滑坡的轮廓分布图。作者收集了相关的资料数据，进行了输入处理。

#### 3.1 数据的输入和处理

对收集的地形图(1 : 2 500)、土地利用图(1 :

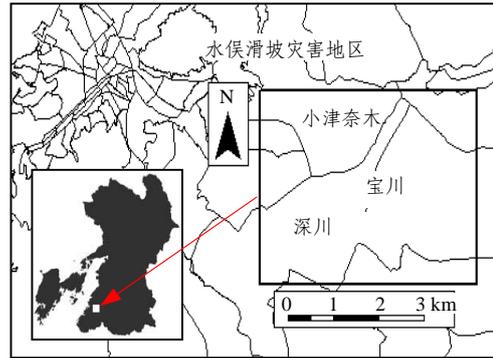


图 5 研究地区位置图  
Fig.5 Study area

50 000)、地质图(1 : 50 000)、历史滑坡轮廓图(1 : 25 000)进行扫描，做成图像文件，输入 GIS，进行各种 GIS 数据处理(地形、地质、地形起伏、汇水面积等)分析，并将矢量数据转换成栅格数据，图 6~10

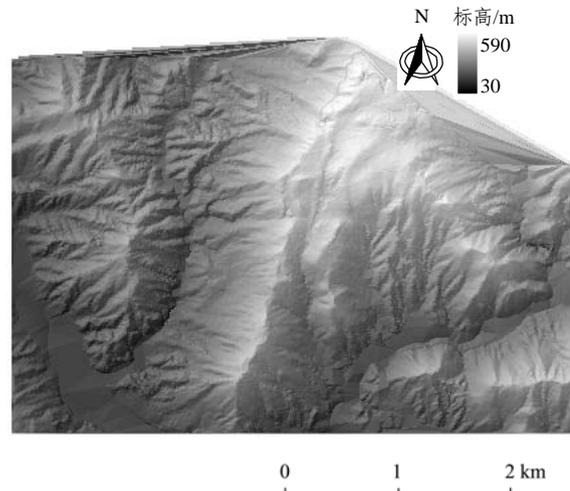


图 6 地形标高的栅格数据  
Fig.6 Raster data of terrain elevation

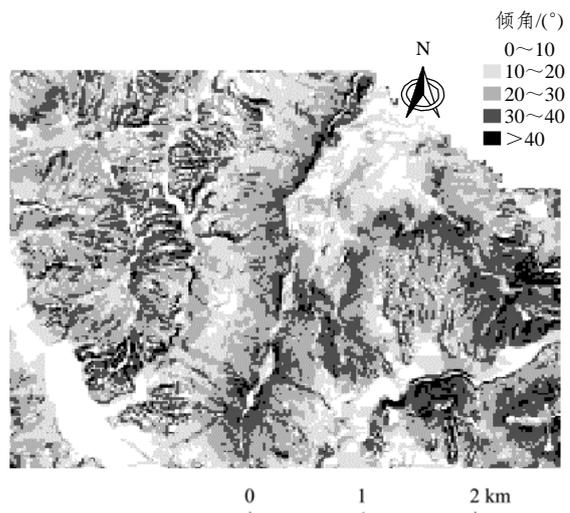


图 7 地形倾角的栅格数据  
Fig.7 Raster data of terrain dip angle



计算。各个类目的得分和危险评价系数见表 2。表中负的得分表示对滑坡贡献小，正值表示对滑坡贡献大，在研究地区的判定准确率达到 80%。判定准确率为该地区通过训练后计算判定为滑坡破坏的网格占实际破坏网格的百分数。该判定准确率可以通过改变滑坡影响因子的分类大小等来试计算进行调节改善。

把每个网格的危险评价系数进行合计后分成 5 类，相当于滑坡破坏危险性大、较大、中、较小及小，从而得到了滑坡灾害预测图(见图 11)。根据判定准确率达 80% 以及过去破坏地区的比较，确认得到滑坡危险性分区图的精度基本上满足要求。

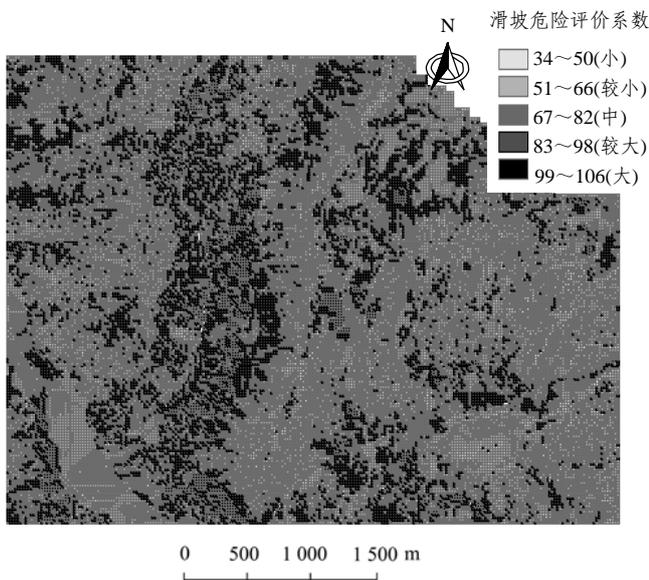


图 11 水俣地区滑坡灾害预测图

Fig.11 Landslide hazard map of Minamata area

## 4 结 论

本文提出了一种基于 GIS 和数量化理论来进行滑坡灾害预测的综合方法，可以快速高效地建立起研究范围内与滑坡有关的基础空间信息数据库，同时通过 GIS 的数据转换和分析功能迅速获得数量化分析所必须的数据，通过学习训练找到规律后对滑坡发生进行危险性预测。数量化理论的分析结果可以直接反馈回 GIS，制作区域滑坡危险性图。这样的连续数据处理和传递，实现了 GIS 内部数据与外部计算的无缝连接，提高了效率和结果的准确性。同时通过后制作标准网格的方法，可以容易地改变网格大小，实行多次尝试性分析，以达到提高精度的目的。本文的方法对传统的数量化理论用于区域性滑坡危险性分析的实用化提供了一个新的思路。

## 参考文献(References):

- [1] 久保村圭助, 武井昌博. 数量化による切り取りのり面の安全度解析[C]// 土木学会論文報告集. [S. l.]: [s. n.], 1971: 141 - 150.
- [2] 持永竜一郎, 福山俊朗. シラスのり面崩壊に関する要因分析[C]// 土木学会論文報告集. [S. l.]: [s. n.], 1972: 101 - 110.
- [3] 南部光広, 軽部大蔵, 浅野雅行. 統計的手法による道路用盛土のり面の安定解析[C]// 土木学会論文報告集. [S. l.]: [s. n.], 1975: 93 - 103.
- [4] 沖村孝, 杉本博. 統計的手法による自然斜面崩壊の研究[C]// 土木学会論文報告集. [S. l.]: [s. n.], 1979: 159 - 168.
- [5] 田尻要, 中山洋, 今泉繁良. 地盤情報データベースを用いた熊本県中部域斜面災害の解析[C]// 土木学会論文集. [S. l.]: [s. n.], 1992: 159 - 168.
- [6] CARRARA A. Multivariate models for landslide hazard evaluation[J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15(3): 403 - 426.
- [7] 大林成行, 小島尚人, 藤井克史. 衛星マルチスペクトルデータを適用した地すべり危険箇所の評価精度の向上[C]// 土木学会論文集. [S. l.]: [s. n.], 1983: 173 - 184.
- [8] 北園芳人, 仲宗根典子, 寺園忠彦. 地盤情報データベースの作成と斜面崩壊予測への対応[J]. *自然災害学科*, 2001, 120(1): 75 - 87.
- [9] 周国云, 江崎哲郎, 謝漢文, 等. GIS を用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出方法の開発と適用[J]. *応用地質*, 2005, 46(1): 28 - 37.
- [10] 周国云, 江崎哲郎, 謝漢文, 等. GIS とモンテカルロ法に基づく広域斜面崩壊確率の評価手法[J]. *GIS - 理論と応用*, 2004, 11(2): 21 - 31.
- [11] XIE M, ESAKI T, ZHOU G, et al. GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1109 - 1118.
- [12] 汪 茜, 李广杰. 数量化理论在泥石流灾害预测预报中的应用——以吉林和龙市泥石流为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 18(2): 85 - 88.(WANG Qian, LI Guangjie. Application of quantification theory in forecasting debris flows—an example of Helong City, Jilin Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 18(2): 85 - 88.(in Chinese))
- [13] 阳吉宝. 数量化理论在确定滑坡稳定性影响因素中的应用[J]. *数理统计与管理*, 1995, 14(2): 7 - 11.(YANG Jibao. Application of the theory of quantification in determining the affecting factors of landslide stability[J]. *Application of Statistics and Management*, 1995, 14(2): 7 - 11.(in Chinese))
- [14] 毕华兴, 中北理, 阿部和时. GIS 支持下的滑坡空间预测与危险等级划分[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 50 - 57.(BI Huaxing, NAKAKITA O, KAZUTOKI A. Spatial distribution prediction and hazard zonation of landslide based on GIS techniques[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(3): 50 - 57.(in Chinese))
- [15] 林知己夫. 数量化理論とその応用例[J]. *統計数理研究所報*, 1954, 2(1): 1 - 30.
- [16] 董文泉, 周光亚, 夏立显. 数量化理论及其应用[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1979.(DONG Wenquan, ZHOU Guangya, XIA Lixian. *Quantification theory and its applications*[M]. Changchun: Jilin People's Publishing House, 1979.(in Chinese))
- [17] 张许良, 张子戌, 彭苏萍. 数量化理论矿井突(涌)水水源判别中的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(3): 251 - 254.(ZHANG Xuliang, ZHANG Zixu, PENG Suping. Application of the second theory of quantification to identifying gushing water sources of coal mines[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2003, 32(3): 251 - 254.(in Chinese))
- [18] 周国云, 江崎哲郎, 邱 驎, 等. GIS を用いた三次元斜面安定評価のための単位斜面(Slope Unit)の抽出[J]. *土と基礎*, 2004, 52(4): 26 - 28.