

宁夏回族自治区彭阳县地质灾害危险性评价

毛正君¹, 倪万魁², 杨晓华¹, 刘海松²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 宁夏回族自治区彭阳县地质灾害十分发育。选取地理信息系统技术, 选取坡度、高程、坡向、暴雨强度和距主干道距离 5 个评价指标, 利用信息量模型进行了彭阳县地质灾害危险性评价。评价结果表明, 地理信息系统和信息量模型能够很好地为地质灾害危险性评价服务, 可用来解决过去地质灾害危险性评价中自动化程度低, 效率不高, 精度差等问题, 从而实现地质灾害评价的动态化和科学化。所生成的宁夏回族自治区彭阳县地质灾害危险性评价图, 可为当地政府进行区域城乡规划与选择适宜工程建设场地提供科学依据。

关键词: 地质灾害; 危险性评价; 地理信息系统; 信息量模型; 彭阳县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0245-06

中图分类号: X43

Assessment of Geological Hazards in Pengyang County of Ningxia Hui Autonomous Region

MAO Zheng jun¹, NI Wan kui², YANG Xiao-hua¹, LIU Hai song²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Aiming at the frequently occurred geological hazards, a assessment was done in Pengyang County, Ningxia Hui Autonomous Region, China. The locations of geological hazards were identified in the county based on both remote sensing interpretation and field surveys. Using five assessment indices including slope gradient, elevation, slope aspect, rainfall intensity and the proximity to main roads, a map of geological hazard level was produced based on geographical information system(GIS) and the model of information value (IVM). The results show that the model of information value and GIS improved the automation level, efficiency, and accuracy of the assessment, and then facilitate the realization of dynamic and scientific assessment of geological hazards. The map of geological hazard assessment provides scientific references for urban and rural planning and identifying appropriate construction sites for local governments.

Keywords: geological hazard; hazard assessment; geographical information system(GIS); information value model; Pengyang County

宁夏回族自治区彭阳县地质环境条件极为脆弱, 区内黄土堆积厚度大, 结构疏松, 水土流失严重, 导致黄土丘陵区沟壑纵横, 地形破碎, 滑坡与崩塌等地质灾害频发, 是宁夏地质灾害最为发育的县^[1]。地质灾害危险性评价是地质灾害预测预警与风险评价的基础, 一般在历史地质灾害调查的基础上, 确定地质灾害形成的控制因素和诱发因素, 并预测未来研究区不同区域地质灾害发生的可能性。开展宁夏彭阳县地质灾害危险性评价工作, 将提高彭阳县国土开发和整治工作的科学性、安全性, 防止或减缓地质环境质量

的恶化, 减轻地质灾害的经济损失, 减少其所造成的人员伤亡, 促进当地社会经济的发展。

传统地质灾害危险性评价多在广泛的野外调查基础上进行, 以定性评价为主, 数据的获取和结果的图示表达主要由手工完成^[2]。随着具有强大数据管理及空间分析能力的 GIS 技术引入地质灾害危险性评价, 使其从传统的繁复手工劳作中解放出来, 缩短了评价周期, 为地质灾害危险性的动态评价提供了基础。目前, 国内外在地质灾害危险性评价数学模型方面开展了大量的探索性研究。如, Dahal R K 等^[3]在

收稿日期: 2010-09-21

修回日期: 2010-10-29

资助项目: 中国地质调查局项目“西北黄土高原区地质灾害详细调查”(1212010814013)

作者简介: 毛正君(1983-), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士研究生, 主要从事地质灾害、地质工程与岩土工程方面的研究工作。

E-mail: zhengjun_mao@163.com。

尼泊尔小喜马拉雅基于证据权重法预测了降雨诱发的滑坡灾害; Abella E A C 等^[4]基于多准则决策分析对古巴一区域进行了滑坡敏感性定性评价; Pradhan B 等^[5]基于人工神经网络模型分析区域滑坡灾害; 殷坤龙等^[6]、张桂荣等^[7]及阮沈勇等^[8]基于信息量模型进行了地质灾害危险性区划及 GIS 应用的研究。本文采用应用广且成熟的信息量模型, 并基于 GIS 实现了宁夏彭阳县地质灾害危险性评价。

1 彭阳县地质灾害特征

1.1 彭阳县地质环境概况

彭阳县位于宁夏东南部边缘, 六盘山东麓, 属温带半湿润、半干旱气候, 年际降水变化大, 年内降水分为明显的雨季和旱季, 降雨常以连阴雨和暴雨的形式出现; 境内河流属泾河水系, 主要河流有茹河、红河、安家川河; 地貌形态以黄土丘陵为主。境内出露的地层主要有寒武系、奥陶系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系; 前第四系地层零星出露于各大冲沟中, 第四系地层广泛分布。研究区位于中朝准地台与昆仑地槽褶皱区的过渡地带, 跨鄂尔多斯西缘拗陷带和鄂尔多斯台拗 2 个二级构造单元; 区内主要发育有 5 组南北向的断裂构造及 3 组褶皱构造, 其中罗洼一沟口隆起又被称为“南北古脊梁”。境内新构造运动以“南北古脊梁”为界, 东西差别极大, 东部表现为缓慢抬起, 西部活动强烈^[9]。

1.2 彭阳县地质灾害形成条件

滑坡、崩塌以及不稳定斜坡为彭阳县境内主要发育的地质灾害类型, 彭阳县地质灾害点共计 1 284 处, 其中, 滑坡 794 处、崩塌 242 处、不稳定斜坡 224 处、泥石流 23 处、地面塌陷 1 处。

1.2.1 地形地貌 彭阳县地质灾害与地形地貌有密切的依存关系。据调查统计, 大于 60° 的陡崖易形成崩塌, 随着坡度的减缓, 多发生滑坡, 由陡坡转变为缓坡, 滑坡发生概率降低, 直至不再有滑坡发生; 滑坡主要发生在坡度 20°~ 55°, 坡高 30~ 100 m 的斜坡上; 崩塌多发生在坡高 10~ 20 m 的斜坡上, 占崩塌总数的 69.2%。滑坡灾害在 0°~ 135° 和 225°~ 360° 的坡向区间相对集中; 滑坡主要发育于凸型及直线型斜坡, 其中直线型坡占滑坡总数的 38.7%, 凸型坡占 29.6%。崩塌绝大多数发育于直线型及台阶型斜坡, 其中直线型坡占崩塌总数的 35%, 台阶型占 60.3%; 不稳定斜坡主要发育于直线型及台阶型斜坡, 其中直线型坡占不稳定斜坡总数的 35.1%, 台阶型坡占 39.1%。

从地貌类型上来看, 彭阳县地质灾害主要发育于黄土丘陵区。据调查统计, 区内长城塬、刘塬、孟塬、杨塬、何塬和夏塬塬面较平坦, 受新构造运动的影响, 仅在个别残塬上出现地裂缝, 在塬边地质灾害却比较发育; 区内黄土梁均与沟谷相间, 在梁顶平缓地段基本无地质灾害发育, “V”型沟谷上游地带的黄土掌、坪、杖等微地貌单元, 地质灾害也较少发育, 主要为居民建窑建房形成的崩塌隐患, 沟谷中下游是滑坡、崩塌集中发育地段; 区内河谷平原地势平坦, 在阶地上部的残塬边坡, 极易形成崩塌、滑坡灾害。

1.2.2 地层结构 根据野外调查, 彭阳县内易滑地层为第四纪黄土, 软弱结构面为第四纪古土壤层、新近纪红色泥岩以及基岩中的泥岩与砂岩与黄土的接触面; 易崩地层为第四纪黄土。黄土结构疏松, 强度低, 遇水软化, 节理裂隙发育等特性决定了黄土是区内最主要的易滑、易崩地层。古近系、新近系地层在彭阳县内与滑坡灾害关系最为密切, 其结构较均一, 固结程度较高, 天然状态下呈坚硬状态, 强度较高, 隔水性好。但遇水易崩解软化, 降低强度, 常形成滑动面和滑床。

1.2.3 降雨 降雨是导致彭阳县地质灾害发育的主要诱发因素之一。统计资料表明, 多雨年份地质灾害发生频次明显高于正常年份, 年内的地质灾害集中发生于夏秋 7—9 月的多雨季节。彭阳县大部分为黄土丘陵区, 且由于黄土自身的工程地质特性, 在黄土构造节理、卸荷与风化裂隙、落水洞、陷穴等发育部位, 降雨可沿空隙下渗甚至灌入, 在相对隔水部位形成上层滞水或饱水带, 增大岩土体重力、甚至形成孔隙水压力, 降低岩土体强度, 从而触发黄土滑坡、崩塌的发生。彭阳县降雨常以暴雨和连阴雨的形式出现, 暴雨降雨强度高, 但通常历时较短, 而连阴雨虽然降雨强度不大, 但历时长, 雨水大部分都可渗入坡体, 使得坡体地下水位不断增高, 从而导致斜坡失稳。

1.2.4 人类工程活动 在地质灾害的控制与影响因素中, 地质环境条件变化缓慢, 降雨和人类工程活动则是最活跃的因素。彭阳县人类工程活动比较强烈, 主要表现为筑路、修建水库和水渠, 输油输气管道建设, 开挖宅基地、窑洞, 开矿、挖砂, 斜坡垦植、放牧等活动。彭阳县新滑坡和崩塌灾害无一不与人类不合理的工程活动有关。

2 基于 GIS 和信息量模型的地质灾害危险性评价方法

2.1 信息量模型简介

信息量法本质上属于统计分析方法, 在国外有学者将其归为双变量统计分析法。信息量法应用于地

质灾害危险性评价的主要思路是: 将专家的主观经验和 GIS 的客观数据分析能力很好地结合起来, 通过对已变形或破坏区域的现实情况和提供的信息, 把反映各种影响区域稳定性因素的实测值转化为反映区域稳定性的信息量值, 即通过某些因素对所提供的研究对象信息量的计算来评价, 亦即用信息量的大小来评价影响因素与研究对象关系的密切程度。信息量用概率计算, 实际计算时可用频率估计条件概率来估算^[8]。

地质灾害现象受多种因素影响, 各种因素所起作用的大小、性质是不同的。对于地质灾害而言, 影响地质灾害形成的各个因素总会存在一种“最佳组合”, 在这种情况下地质灾害发生的可能性最大。信息预测的观点认为, 地质灾害的产生与否与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关, 是用信息量来衡量的^[6,7], 即:

$$I(Y, x_1x_2 \dots x_n) = \ln \frac{P(Y, x_1x_2 \dots x_n)}{P(Y)} \quad (1)$$

根据条件概率运算, 式(1)可进一步写成:

$$I(Y, x_1x_2 \dots x_n) = I(Y, x_1) + I_{x_1}(Y, x_2) + \dots + I_{x_1x_2 \dots x_{n-1}}(Y, x_n) \quad (2)$$

式中: $I(Y, x_1x_2 \dots x_n)$ ——因素组合 $x_1x_2 \dots x_n$ 对地质灾害所提供的信息量; $P(Y, x_1x_2 \dots x_n)$ ——因素组合 $x_1x_2 \dots x_n$ 条件下地质灾害发生的概率; $I_{x_1}(Y, x_2)$ ——因素 x_1 存在时, 因素 x_2 对地质灾害提供的信息量; $P(Y)$ ——地质灾害发生的概率。

2.2 基于信息量模型的地质灾害危险性评价具体过程

(1) 计算单因素 x_i 提供斜坡失稳(H)的信息量

$I(x_i, H)$:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{P(x_i | H)}{P(x_i)} \quad (3)$$

式中: $P(x_i | H)$ ——斜坡变形破坏条件下出现 x_i 的概率; $p(x_i)$ ——研究区内出现 x_i 的概率。实际应用时往往用样本频率计算:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (4)$$

式中: S ——研究区总面积; N ——研究区所有地质灾害点的总面积; S_i ——评价指标各具体数据类的面积数; N_i ——分布在因素内具体数据类内的地质灾害点的面积数。

(2) 计算各评价单元在 n 种因素组合情况下, 提供斜坡失稳的总信息量 I_i , 即:

$$I_i = \sum_{i=1}^n I(x_i, H) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (5)$$

式中: I_i ——评价单元总信息量; n ——指标体系中指标总数, 其它参数同前。

(3) 根据信息量模型的原理, I_i 越大越有利于地

质灾害的发生。将各评价单元的总信息量值进行排序, 并划分范围, 将研究区分成不同的危险性等级。

2.3 基于 GIS 和信息量模型的地质灾害危险性评价方法

2.3.1 地质灾害机理研究 在充分发挥遥感技术信息量大、时效性强等优势的基础上, 采用点、线、面相结合的地面调查方式, 更新研究区地质灾害数据和地质灾害分布图, 完成研究区历史地质灾害编目; 在野外调查及分析研究区地质环境条件的基础上, 阐明研究区地质灾害发育特征、时空分布规律及地质灾害形成条件和机理。

2.3.2 空间数据库系统建立 为了有效地组织各类空间数据、提高数据的传输和利用效率及空间数据共享程度, 建立地质灾害危险性评价空间数据库系统是地质灾害危险性评价的基础和前提。表示地理对象位置、分布和形状等相关的空间信息数据, 如等高线、水系、公路网和历史地质灾害分布等, 通过图件扫描、定义投影坐标、图像配准、矢量化、编辑内部属性和数据检查形成图形数据库; 表示与空间位置无关的属性数据, 如滑坡规模、数量等文字资料, 通过整理数据卡片、图元编码、数据录入和数据检查形成属性数据库。图形数据库与属性数据库关联构成空间数据库。

2.3.3 评价指标体系构建 根据地质灾害发育特征、时空分布规律及形成条件, 构建合理的地质灾害危险性评价指标体系, 将有利于完成各指标的提取及提出科学的评价方法, 从而减轻地质灾害的经济损失, 减少所造成的人员伤亡, 促进当地社会经济的发展。

2.3.4 地质灾害危险性评价 基于 GIS 提取各评价指标、划分评价单元; 基于评价模型定量化实现地质灾害危险性评价, 按照相应原则和分级标准, 进行地质灾害危险性分级, 获得地质灾害危险性评价图。将地质灾害危险性评价图与历史地质灾害编目对比, 检验评价结果。

3 彭阳县地质灾害危险性评价指标体系

3.1 评价指标体系的建立原则

(1) 系统性原则。指标体系应尽可能全面、系统地反映控制和影响地质灾害发生的因素, 符合地质灾害危险性评价的目标内涵, 避免指标之间的重叠。

(2) 主导性原则。建立评价指标体系时应剔除次要指标, 筛选出有代表性的指标, 提高地质灾害危险性评价工作的效率。

(3) 科学性原则。指标体系中各项指标具有比较规范的科学解释, 包括术语表达、指标内涵界定和

具体的描述标准等^[10]。

(4) 可操作原则。所选指标易于提取,并能方便地应用于地质灾害危险性评价。

3.2 评价指标的筛选与优化

地质灾害是自然动力活动与人类社会经济活动相互作用的结果,二者是一个统一的整体,地质灾害很多特征是二者的联合体现^[11]。地层性质、结构构造和地形地貌是地质灾害形成的基本条件,其对地质灾害的发生、发展是必不可少的,对斜坡的变形破坏起着控制作用。只有当这些条件具备时,斜坡才具备了变形破坏的最大可能性;在一般的自然条件下,对于具备地质灾害形成基本条件的斜坡往往是稳定的,或者处于缓慢的蠕变过程中。但是,在一些外在因素的作用下,斜坡的稳定性会大幅度降低,从而导致崩滑流等地质灾害,这些外在因素称为诱发因素。诱发因素通过对地层性质、结构构造和地形地貌等内因的作用而起作用,主要表现在水、地震和人类工程活动 3 个方面。

根据彭阳县地质灾害详细调查统计资料,地层性质、结构构造和地形地貌是彭阳县地质灾害形成的基本条件,降雨和人类工程活动是其形成的主要诱发因素。地层性质、结构构造数据大多直接或者间接来源于地质图等平面图,即用地表二维数据代替了空间三维数据,从而不能充分真实地反映各因素对斜坡稳定性的控制和影响^[2]。因此,地层结构指标本次评价中不予考虑。依据评价指标体系建立原则,结合前人在黄土地区的地质灾害研究^[12-15],在对数据可获性、研究范围及研究精度等方面充分考虑下,确定了彭阳县地质灾害危险性评价指标为以下 5 项:坡度、高程、坡向、暴雨强度、人类活动强度。

3.3 评价指标的提取

基于 1:5 万等高线数据生成的彭阳县数字高程模型(DEM),彭阳县 DEM 二维影像图如附图 9。在 ArcGIS 平台 ArcScene 3D Analyst 下进行三维分析,生成彭阳县坡度、高程和坡向分区图(附图 10-12)。根据彭阳县气象资料,生成彭阳县暴雨强度分区图(图 1)。

地质灾害的形成发育程度与人类工程活动之间的关系是极为复杂的,对其强度量化比较困难^[16]。考虑到公路等交通建设对彭阳县地质灾害影响明显,且具有贯穿或覆盖全区的特点,本次人类工程活动的量化以彭阳县公路主干道为基准线,在 ArcGIS 下作缓冲区分析,间隔 500 m,分别向两边做 3 个缓冲区,生成人类活动强度分区图(图 2)。在此基础上,建立彭阳县地质灾害空间数据库。

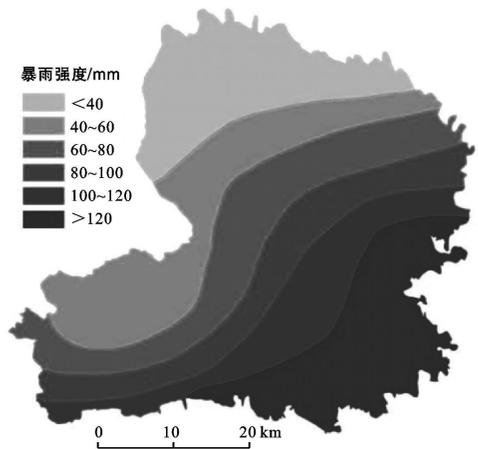


图 1 暴雨强度分区图

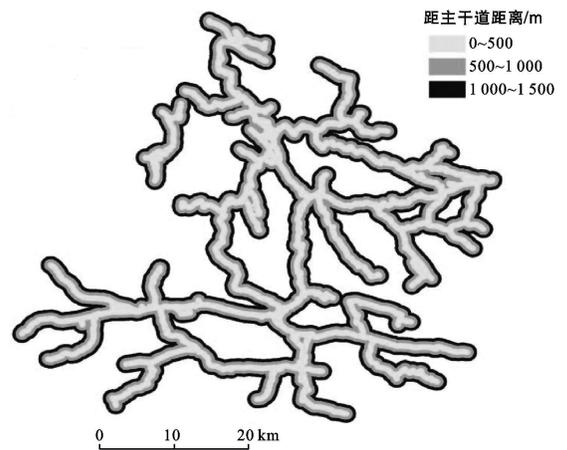


图 2 彭阳县人类活动强度分区图

4 彭阳县地质灾害危险性评价

4.1 评价单元的划分

为了保证预测结果的合理性,需将整个研究区分成若干个小图元,即评价单元。评价单元是具有相同特性的最小地域单元。同一评价单元应保持最大的一致性,而不同的评价单元之间应具有可比性。此次彭阳县地质灾害危险性评价,基于 DEM 利用 ArcGIS 的水文分析功能,获得地质环境条件突变的界线,彭阳县分水线和河谷线,从而将彭阳县划分为 905 个斜坡单元。这种划分方法不但可以在计算机上自动快速完成,而且能够充分反映彭阳县地质灾害形成的各种控制与影响因素。

4.2 基于 GIS 和信息量模型的评价过程

(1) 评价指标各数据类信息量值的计算。分别将地质灾害分布图层与各评价指标图层叠加,由公式(4)计算各评价指标每个数据类对地质灾害发生提供的信息量值。将公式(4)作如下变换得^[7]:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} = \ln \frac{N_i/S_i}{N/S} \quad (6)$$

式中: N/S ——研究区总的地质灾害分布密度, 在研究区一定的情况下, 其为定值。 N_i/S_i ——各评价指

标每个数据类内地质灾害分布密度。具体计算结果如表 1 所示, 同时得到 6 张信息量图层。

表 1 评价指标信息量值计算结果

指标	数据类	信息量值	指标	数据类	信息量值
坡度/°	0~ 10	- 0.036 368	坡向/°	< 0 (平)	0.000 000
	10~ 20	- 0.029 352		0~ 45	0.215 111
	20~ 30	0.015 076		45~ 90	- 0.056 798
	30~ 35	0.013 245		90~ 135	- 0.217 913
	> 35	0.029 270		135~ 180	- 0.041 243
高程/m	< 1 400	- 0.103 889		180~ 225	0.066 375
	1 400~ 1 500	- 0.194 591	225~ 270	0.075 637	
	1 500~ 1 600	0.319 983	270~ 315	- 0.013 158	
	1 600~ 1 700	0.318 454	315~ 360	0.040 822	
	1 700~ 1 800	- 0.668 815	< 40	- 0.486 226	
	1 800~ 1 900	- 0.245122	40~ 60	- 0.555 816	
距主干道 距离/m	> 1 900	- 1.265 666	60~ 80	0.234 193	
	0~ 500	1.494 775	80~ 100	0.198 602	
	500~ 1 000	0.934 309	100~ 120	0.151 107	
	1 000~ 1 500	0.990 399	> 120	0.252 886	
	> 1 500	- 0.137 139	暴雨 强度/mm		

(2) 评价单元总信息量值的计算。在 ArcGIS 下对 6 张信息量图层进行空间叠加分析, 得到总信息量图层, 最终将总信息量图层与斜坡单元划分图进行叠加分析, 并对各评价单元取值, 从而获得地质灾害危险性得分图。图中信息量值的范围为 - 2.212 902~ 2.312 025, 数值越大, 反映各因素对地质灾害发生的贡献率越大, 发生地质灾害的可能性越大。

(3) 地质灾害危险性分级。利用 ArcGIS 提供的自然断点分类法(Natural Breaks), 将危险性得分图重新分类, 划分为 4 级: 极高度、高度、中度以及低度。按此标准分类后的危险性等级图即最终的彭阳县地质灾害危险性评价图(见附图 13)。

4.3 评价结果分析

通过对彭阳县地质灾害危险性评价(附图 13)与该县历史地质灾害编目(图 3)进行对比, 可得评价结果分析见表 2。从地质灾害危险性分区面积及该区域内所含地质灾害点来看, 极高危险性区地质灾害点最为密集, 面积为 419 km², 占全县总面积的 16.58%, 共发现 812 处地质灾害点, 占全县地质灾害总数的 63.23%, 主要集中于人口相对密集的红河乡大部、城阳乡南部, 危害及其潜在危害大; 高危险性区面积为 840 km², 占全县面积的 33.23%, 共发现 279 处地质灾害点, 占全县地质灾害总数的 21.73%, 主要分布在冯庄乡东部、小岔乡东北部及西南部、王洼镇东部、草庙乡北部、新集乡与古城镇相邻区域、古城

镇北部, 区内居民相对集中, 危害和潜在危害较大; 中危险性区面积为 953 km², 占全县面积的 37.67%, 共发现 160 处地质灾害点, 占全县地质灾害总数的 12.45%, 主要分布于王洼镇大部、白阳镇北部、草庙乡南部、冯庄乡中部, 居民相对分散, 潜在危害中等; 低危险性区面积为 317 km², 占全县面积的 12.52%, 共发现 33 处地质灾害点, 占全县地质灾害总数的 2.59%, 主要分布于红河及茹河河漫滩、罗洼乡、交岔乡、小岔乡和王洼乡局部等人为活动相对少的地带。

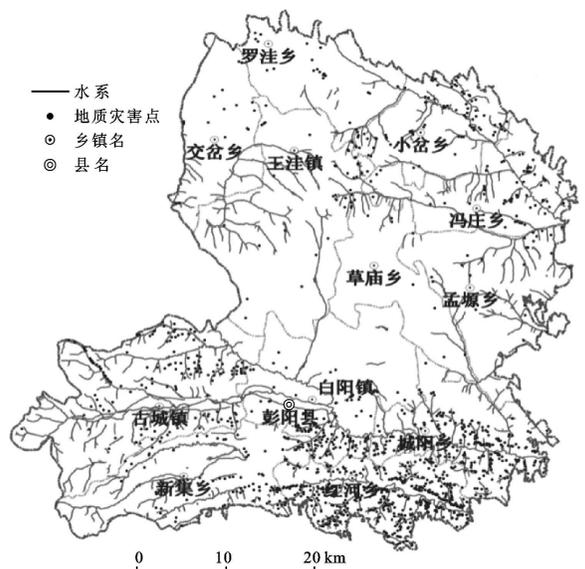


图 3 彭阳县历史地质灾害编目图

随着危险性等级的逐步提高,其所包含的地质灾害绝对数量逐步递增,同时地质灾害实际发生的比率

随之增大,极高危险性和高危险性区中包含了 84.96% 的已知地质灾害点。

表 2 彭阳县地质灾害危险性评价结果分析

危险性等级	信息量值	面积/km ²	a/%	c	b/%	b/a
极高	1.562~ 2.312	419	16.58	812	63.23	3.813 6
高	0.058~ 1.562	840	33.23	279	21.73	0.653 9
中	- 1.646~ 0.058	953	37.67	160	12.45	0.330 5
低	- 2.213~ - 1.646	317	12.52	33	2.59	0.206 9
总计		2 529	100	1 284	100	—

注: a 为各级危险性区域的面积占研究区总面积的百分比; b 为各级危险性区域内地质灾害点数占研究区内地质灾害点总数的百分比; c 为各级危险性区域内地质灾害点数。

5 结论

(1) 彭阳县地质灾害主要发育类型为滑坡、崩塌及不稳定斜坡,具有黄土地区地质灾害典型特征。从时空分布规律上来看,具有条带性与集中性;形成条件包括地形地貌、地层结构、降雨和人类工程活动。

(2) 基于 GIS 和信息量模型,建立了彭阳县地质灾害空间数据库;确定了彭阳县地质灾害危险性评价指标体系;提取了指标体系所含各指标;实现了彭阳县地质灾害危险性评价。

(3) 通过评价结果分析,本次评价较好地反映了宁夏彭阳县历史地质灾害状况,极高危险性和高危险性区中包含了 84.96% 的已知地质灾害点。由此可知,信息量模型具有更高的客观性,非常适合地质灾害危险性评价。

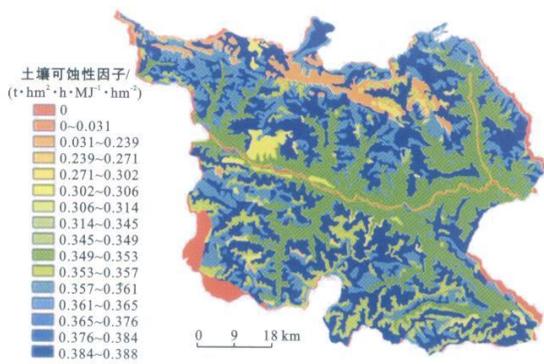
(4) 本次评价既为彭阳县防灾减灾、城市建设、资源利用以及环境保护提供科学依据,又为彭阳县地质灾害动态监测奠定了基础。

[参 考 文 献]

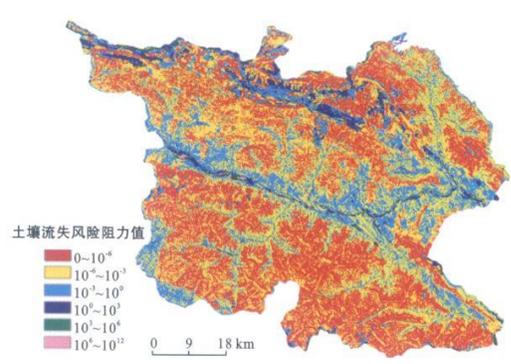
- [1] 吴学华,郁冬梅,白生明,等.论中国彭阳县地质灾害的基本特征及防治对策[J].宁夏工程技术,2003,2(2): 111-115.
- [2] 黄润秋,向喜琼,巨能攀.我国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J].地质通报,2004,23(11):1078-1082.
- [3] Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, et al. Predictive modelling of rainfall induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights of evidence [J]. Geomorphology, 2008, 102: 496-510.
- [4] Abella E A C, Westen C J V. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba[J].

Geomorphology, 2008, 94: 453-466.

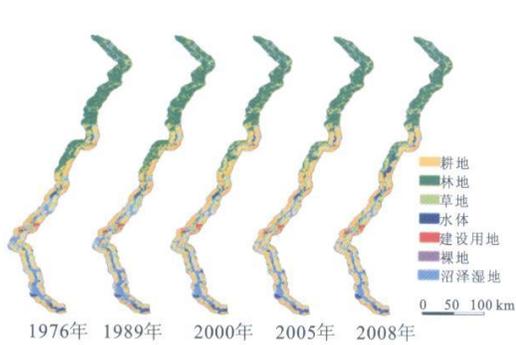
- [5] Pradhan B, Lee S. Utilization of optical remote sensing data and GIS tools for regional landslide hazard analysis using an artificial neural network model[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 143-152.
- [6] 殷坤龙,朱良峰.滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地质前缘,2001,8(2): 279-284.
- [7] 张桂荣,殷坤龙.区域滑坡空间预测方法研究及结果分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23): 4297-4302.
- [8] 阮沈勇,黄润秋.基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J].成都理工学院学报,2001,28(1): 89-92.
- [9] 吴学华,朱廉生.宁夏回族自治区彭阳县地质灾害调查与区划报告[R].宁夏银川:宁夏回族自治区地质环境监测总站,2002.
- [10] 马宗晋,高庆华,张业成,等.地质灾害对区域可持续发展影响指标体系与评价方法的初步探索[J].自然灾害学报,1999,8(2): 8-12.
- [11] 罗元华,张梁,张业成.地质灾害风险评估方法[M].北京:地质出版社,1998: 6-22.
- [12] 张茂省,校培喜,魏兴丽.延安市宝塔区崩滑地质灾害发育特征与分布规律初探[J].水文地质与工程地质,2006,33(6): 72-79.
- [13] 徐张建,林在贵,张茂省.中国黄土与黄土滑坡[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7): 1297-1312.
- [14] 雷祥义,魏青珂.陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究[J].岩土工程学报,1998,20(1): 64-69.
- [15] Derbyshire E. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China [J]. Earth Science Reviews, 2001, 54: 231-260.
- [16] Rosen A W. The impact of environmental change and human land use on alluvial valleys in the Loess Plateau of China during the Middle Holocene[J]. Geomorphology, 2008, 101: 298-307.



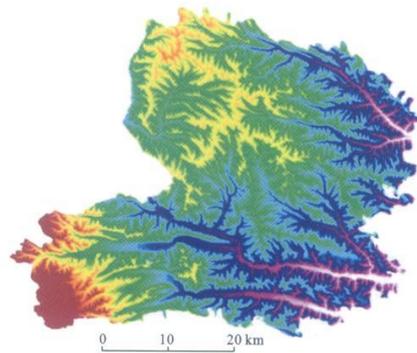
附图6 送部土壤可蚀性因子插值



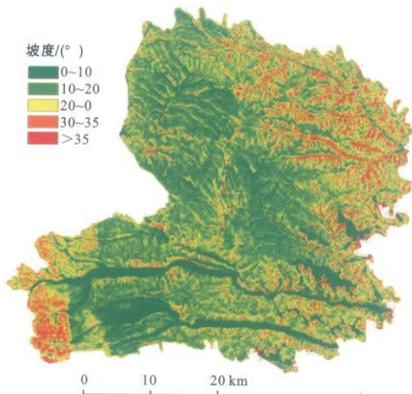
附图7 送部县土壤流失风险格局



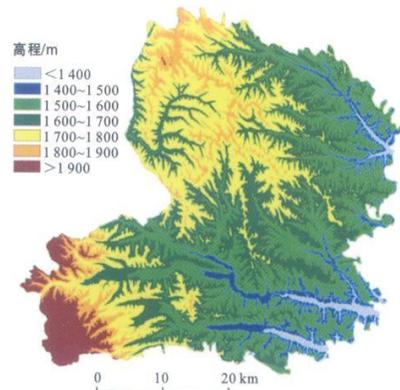
附图8 嫩江河岸带和水体景观分布



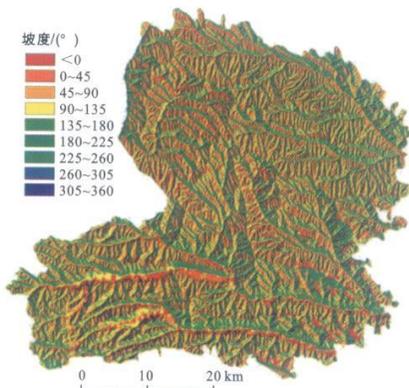
附图9 宁夏回族自治区彭阳县DEM二维影像



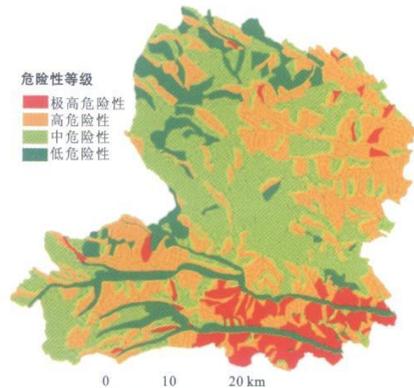
附图10 宁夏回族自治区彭阳县坡度分区



附图11 宁夏回族自治区彭阳县高程分区



附图12 宁夏回族自治区彭阳县坡向分区



附图13 宁夏回族自治区彭阳县地质灾害危险性评价