

## 摘要

随着国土资源部全国县市地质灾害调查与区划工作的全面开展,如何根据大量的调查信息确定地质环境质量的优劣程度越来越重要。地理信息系统(GIS)因其具有强大的数据处理功能和空间分析功能,为区域地质环境研究提供了新的研究方法。

本文综合分析了影响区域地质环境的主要控制因素,在总结前人经验的基础上,确定了区域地质环境质量评价的指标体系,建立了针对区域地质环境质量特点的分级标准。采用向量主成分分析法以及两两比较法对各评价指标进行了筛选与优化,并运用层次分析法确定了评价指标的权重。根据本文评价模型的特点,对于定性指标,主要采用专家经验法进行指标量化;对于定量指标,依据评价分级标准,采用隶属度函数进行取值。根据区域地质环境质量评价问题的特点,本文选取模糊综合评判和信息量法两种简单实用的数学方法,建立了评价模型,并对评价结果进行了对比分析。用 C++Builder6.0 开发了评价分析模块;以 MAPGIS6.5 为平台,建立空间图形数据库,属性数据库通过外挂数据库实现,GIS 通过接口进行调用,实现图形与属性的连接,形成空间数据库;评价分析模块与 GIS 通过对中间数据文件的操作达到集成,从而实现两者数据的转换,进行空间分析。

实例分析结合陕西省凤县调查区,分析了区域地质环境背景,选取了影响其地质环境质量的主要因素,建立了凤县空间图形库和属性库。运用评价系统对凤县地质环境质量进行评价,把凤县地质环境划分为优、良、中、差四个质量级别。结果表明该系统可行,评价模型合理,具有较强的实用性。

**关键词:** 地质环境质量评价 地理信息系统 空间分析 层次分析法 模糊综合评判  
信息量法

## Abstract

As the overall development of geological hazard survey and zoning in the national counties and cities, which started by Ministry of Land and Resource, how to judge the degree of good and badness of geo-environment quality according to a great quantity of investigating information becomes more and more important. Because of powerful data tackling ability and spatial analysis function, Geographic Information System (GIS) provides a new study method for regional geo-environment research.

The thesis has analyzed main control factors influencing regional geo-environment synthetically. On the basis of summarizing predecessors' experience, the thesis has determined geo-environment quality assessment index system and established classifying standard, which aiming at the characteristic of geo-environment quality. Vector principal component analysis and paired-comparisons method have been adopted to sift and optimize assessment indexes. Hierarchy analytic process has been applied to find the weight of assessment indexes. According to the characteristic of assessment model, the thesis has adopted mainly expertise to quantify qualitative indexes, while quantitative indexes get their value through fuzzy membership function on the basis of classifying standard. According to the characteristic of regional geo-environment quality assessment, the thesis has chosen two kinds of simple and practical mathematical methods, fuzzy comprehensive assessment and information method to establish assessment models, and then the two assessment results have also been compared. The analysis module is developed with C++Builder6.0 software. Based on the development platform of MAPGIS6.5, the spatial graph database is established. By linking outside database, the property database is performed. Then GIS transfers the property database with interface, so as to achieve link between graph and property, thus forming spatial database. By middle data documents, the integration is accomplished between the assessment analysis module and GIS, thereby achieving transferring data of both sides and carrying on spatial analysis.

Taking Fengxian City of Shanxi province as example, the thesis has analyzed its geology environment background, chosen the main factors influencing geo-environment quality, and established the spatial graph database and property database of Fengxian City. Based on this system, the geo-environment quality of Fengxian City has been assessed, and the results show that the geo-environment quality can be classified into four classes: best, good, moderate, worst. So, it further indicates that the system is feasible and very practical and that the assessment models are rational.

**Key words:** geo-environment quality assessment; Geographic Information System; spatial analysis; hierarchy analytic process; fuzzy comprehensive assessment; information method

## 论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

06年4月27日

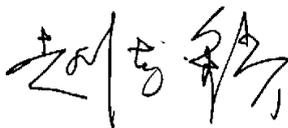
## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：

06年4月27日

导师签名：

06年4月27日

# 第一章 绪 论

## 1.1 课题的由来及研究意义 [5] [15] [21] [25] [50]

随着人类社会的发展,人类活动的空间、规模和复杂程度都在以前所未有的速度迅速扩展,在很大程度上改变着地球表面的形貌。人类活动已经成为与自然地质作用并驾齐驱,甚至在某些方面已经超过自然地质作用的表生营力,在当今全球环境变化中起着巨大的影响作用。“人—地”关系的失调,导致人类居住的岩石圈表层环境质量下降,地质灾害频繁发生,人类生命财产蒙受重大损失。因此,自上世纪八十年代以来,以岩石圈表层环境为主体的地质环境问题引起了各国政府的高度重视,成为环境问题研究的一个重要组成部分。

在我国,由于地理和地质条件的复杂性和巨大的区域差异性,地质灾害问题历来较为严重,尤其是改革开放以来,伴随着我国国民经济的飞速发展,工程活动规模和范围的迅速增大,地质环境的恶化速度和地质灾害的发生频率有日益加速的趋势。据统计,在我国由地质灾害造成的损失约占整个自然灾害损失的 30%。而这其中,崩塌、滑坡、泥石流及人类工程活动诱发的浅表生地质灾害所造成的损失约占 55%。这些灾害的一次性规模虽小于地震,但其发生频度和总的涉及范围则远远高于和广于地震,一年总的损失约 200 个亿。

地质灾害是地质环境质量低劣的表现,它的频频发生不仅反映了自然地质环境的脆弱性,而且反映了人类工程活动与地质环境之间矛盾的激化。要使人类工程经济活动与地质环境之间保持较为协调的关系,就必须对地质环境质量现状进行评价,以了解不同经济发展过程中区域地质环境发展变化的基本态势,为环境保护、人类工程活动、人民防灾减灾提供重要的依据。

目前,国土资源部全国范围内的“县(市)地质灾害调查与区划”已全面展开,陕西省的地质灾害调查与区划工作已接近尾声。陕西工程勘察研究院于 2001 年 5 月在“陕西省凤县地质灾害调查与区划”项目招标中中标,受陕西省国土资源厅委托,具体承担陕西省凤县地质灾害调查与区划项目。在工作进行中,如何充分利用调查资料对凤县地质灾害按易发程度进行准确的分区,成为一个难点。国土资源部下发的《县(市)地质

灾害调查与区划实施细则》中的方法，还是以定性为主，人为因素较多，缺乏系统的、科学的、全面的评价方法的理论论证。

实际上，上世纪八十年代发展起来的 GIS 方法在这个领域大有用武之地，我国恰恰在这方面工作非常薄弱，而国外尤其是发达国家这方面的成果及应用已较为普遍。因此，在我国地质环境质量评价领域研究推广应用 GIS 技术，对促进地质科技进步、加强地质灾害的防治与地质环境的保护具有重要的理论和实际意义。

## 1.2 国内外研究现状<sup>[4][5][15][50][52]</sup>

地理信息系统(GIS)是 20 世纪 60 年代开始迅速发展起来的地理学研究的新技术。它起源于传统的地图学，随着计算机技术的进步而不断发展。地理信息系统，是地理信息的载体，具有获取、存储、编辑、处理、分析和显示、输出地理数据的功能。国内外 GIS 技术的发展，呈现出广阔的应用前景。美国、加拿大、英国、澳大利亚等国家逐步确立了它们在这一领域的国际领先地位。我国在这方面的的工作最早始于 80 年代。

国外尤其是发达国家，在 GIS 应用于地质灾害研究方面做了很多工作。如 1986 年美国的 Brabb Earl E.在加利福尼亚 San Mateo 地区利用了 GIS 的数据处理、数据管理、绘图输出等基本功能进行了地质灾害研究；1989 年美国的 Finney Michael A.和 Bain Nancy R.运用 GIS 技术分析了滑坡灾害；1990 年印度的 R.P.CUPTA 和 B.C.JOSHI 运用 GIS 的存储、更新、网格化、空间叠加分析和面积量算等功能对喜马拉雅山麓的 Ramganga Catchment 地区进行了滑坡灾害危险性分带；1990 年荷兰 ITC 的 Van Westen C.J.和哥伦比亚 IGAC 的 Alzate Bonilla J.B.利用 GIS 空间定位及空间数据库管理以及 GIS 的 DEM 开发了斜坡稳定性分析模型和山区落石滚落速率计算模型；1991 年美国的 Campbell R.H.等利用 GIS 空间分析功能对滑坡灾害进行了空间预测；1991 年意大利的 Carrara A.等应用 GIS 空间分析技术与统计模型结合对滑坡灾害进行了评价；1993 年加拿大的 Chung C.F.和 Fabbri A.G.等基于 GIS 的专业模型扩展模块，对滑坡灾害分区进行了多因素综合分析；1994 年美国的 MARIO MEJIA-NAVARRO 和 ELLENE.WOHL 用 GIS 进行地质灾害和风险评估，并进行了灾害分区；1995 年美国的 DANIEL J.MILLER 将 GIS 与力学模型结合对深层滑坡灾害进行了评价；1996 年美国的 MARIO MEJIA-NAVARRO 等运用 GIS 及工程数学模型建立了自然灾害及风险评估的决策支持系统，并利用该系统对克罗拉多州的 Glenwood Springs 地区进行了评价；1997 年加拿

大的 TREVOR J.DAVIS 和 C.PETER KELLE 基于 GIS 用模糊分类方法及可视化技术真实再现了斜坡形态。

国内应用 GIS 技术开展地质环境与地质灾害评价的工作起步较晚，研究程度较低。姜云、王兰生 1994 年在山区城市地面岩体稳定性管理与控制中应用了 GIS，以重庆市为典型研究对象，对地面岩体变形破坏进行了时空预测预报；雷明堂、蒋小珍等 1994 年运用 GIS 技术于岩溶塌陷评价中，利用了 GIS 的距离分析、标量分析、网格叠加分析、分级分组分析等功能，完成了研究区塌陷危险性评价及分区；郑世书、孙亚军等 1994 年在煤矿地下开采工作面涌水预测及矿区岩溶水害预测中应用了 GIS 技术；曹中初、孙苏南等 1996 年在煤矿底板突水危险性预测中也应用了 GIS 技术；成都理工大学“地质灾害防治与工程地质环境保护国家专业实验室”于 1997 年承担的“山区流域地质环境评价与地质灾害预测的 GIS 系统”项目于 1999 年底完成了全部工作。并结合金沙江溪洛渡水电工程库区和长江三峡工程库区巴东—姊归段，进行了实际预测应用，结果表明，该系统从理论方法和技术途径上实现了基于 GIS 的地质环境评价和地质灾害预测，并具备了较强的评价预测功能和进一步扩展能力。

我国由于受现有技术、人力、物力、财力的限制，研究程度还远远落后于发达国家。因此，需要探索出适合我国地质环境质量评价的 GIS 技术路线和方法体系，因而把 GIS 技术应用于地质环境质量评价将具有非常广阔的发展前景。

### 1.3 本文的研究目标

本文研究的主要目标是：选择典型区域，在充分搜集调查资料的基础上，建立合理的评价指标体系，开发外部评价模块，应用 GIS 技术，建立区域地质环境条件空间属性数据库，对区域地质环境质量进行评价和分区。

### 1.4 研究技术路线

本项工作在资料搜集、整理与分析的基础上，进行系统设计，开展区域地质环境质量评价系统研究工作，其遵循的研究技术路线是：从实际出发→提出理论方法→建立理论体系→解释实际问题→实际验证理论方法体系。具体内容为：

1.4.1 资料搜集：选择研究区，通过现场调查和实地地质填图，全面搜集有关的地

质环境资料，并将资料进行整理、分类。

1.4.2 评价指标体系的建立：根据获得的资料及总结前人经验，并咨询有关专家，建立区域地质环境质量评价指标体系及分级标准，对指标进行筛选与优化；根据评价模型的特点，选择合理的指标量化方法以及指标权重的确定方法。

1.4.3 空间数据库的建立：根据现场调查资料，针对研究区的具体情况进行 GIS 图层信息和属性信息采集，建立空间信息数据库。

1.4.4 评价的理论方法研究：根据区域地质环境评价的特点，选用模糊综合评判和信息量法两种简单实用的数学方法，分别对区域地质环境质量进行评价，用 C++Builder6.0 开发 GIS 扩展评价模块。

1.4.5 实例应用：结合陕西省凤县研究区，采用该系统对研究区进行地质环境质量评价，将两种方法的评价结果进行对比分析，验证系统的可行性及实用性。

## 第二章 区域地质环境质量评价的 GIS 系统设计

区域地质环境评价 GIS 系统的建立与开发是一项复杂的系统工程，应当从系统工程的观点出发，准确分析区域地质环境评价问题的特点，明确系统设计的目标，立足于整体，统筹全局。评价系统设计应遵循软件工程的设计思想，从用户需求、系统分析、系统设计方案、系统实现到实际应用，形成规范的体系，突出专业性、实用性。

### 2.1 主要研究思路

区域地质环境质量是由多种因素决定的，这些因素包括地层岩性、地质构造、岩土体结构类型、地形地貌、水文地质条件、降雨、地震、人类工程活动等等。这些因素相互作用、相互影响、相互联系，不能把它们隔离开来或按照各因素的平均状况评价，必须考虑它们对地质环境各自的影响程度，按照一定的数学方法进行叠加组合，建立合理的评价模型。区域地质环境评价工作流程如图 2-1。

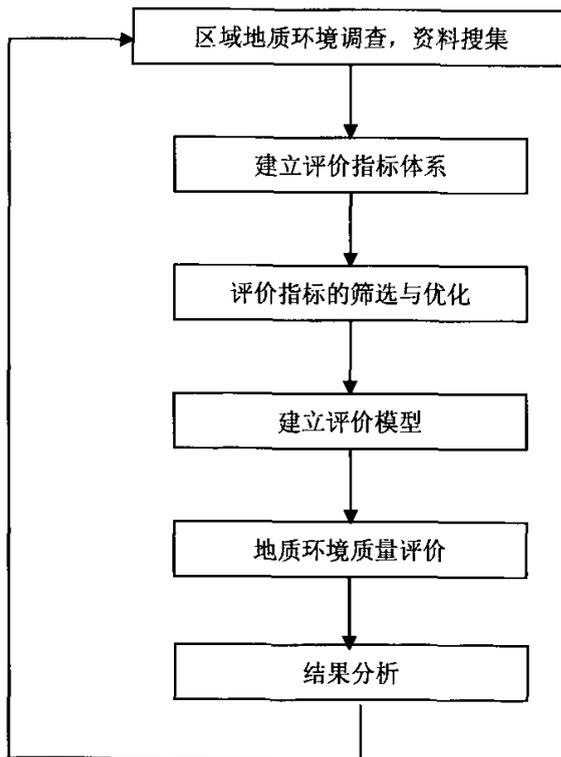


图 2-1 区域地质环境质量评价工作流程

## 2.2 系统设计<sup>[3][11][15][23]</sup>

### 2.2.1 系统目标

本文的研究目标是：选择典型研究区，建立区域空间数据库（图形数据库和属性数据库），开发与 GIS 系统链接的区域地质环境质量评价模型并进行评价。具体内容为：

- 建立研究区空间数据库；
- 建立地质环境质量评价指标体系、分级标准及量化方法；
- 建立模糊综合评判和信息量模型；
- 开发相应的评价分析模块；
- 集成 GIS 评价系统。

### 2.2.2 设计原则

本系统在设计时遵循了如下原则：

（1）实用性原则：在系统设计时，应密切结合课题的实际需要，为用户提供必要的数据库转换功能，保证已有的资料转入本系统中。

（2）规范性原则：系统要求数据采集标准化、规范化，从而达到数据共享的目的。在本系统中，空间数据库结构及内部代码遵循了中国地质环境监测院编制的“县（市）地质灾害调查与区划”项目中的《空间数据库系统建设技术要求》。属性数据库则采用了通用的 Microsoft Jet OLEDB4.0 格式，它可由 Access、Excel 等软件来读写和管理，从而使得本系统的所有源数据及结果可与其它相关软件共享。

### 2.2.3 系统运行环境

#### （1）硬件

硬件实现数据和图形输入、处理、输出等功能。在本系统运行中，要对数据进行频繁调用、处理、分析和输出，因此对硬件要求比较高。

主机：Pentium IV 2.0G，内存 256M，硬盘 80G。

外部设备：A<sub>0</sub> 幅面扫描仪、绘图仪、打印机。

(2) 软件

操作系统：Windows Xp。

地理信息系统软件：MAPGIS6.5。

(3) 开发工具

数据库系统 (DBMS)：数据库系统采用 MS Access，用于评价指标体系的管理。

二次开发工具：C++Builder6.0，用于评价模型的开发。

### 2.2.4 系统结构设计

区域地质环境评价系统包括三个子系统：空间数据库子系统、简单空间分析子系统和专题分析子系统，系统结构图如图 2-2。

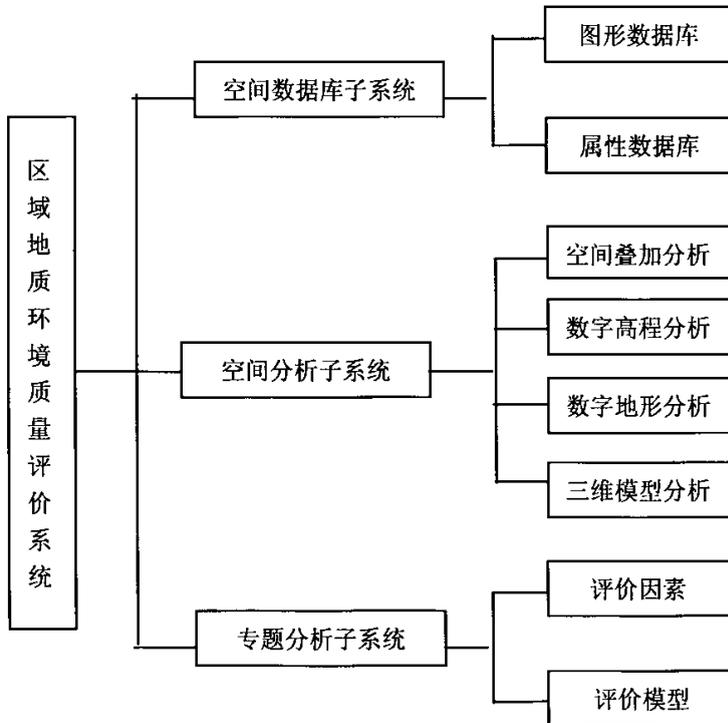


图 2-2 区域地质环境质量评价 GIS 系统结构图

#### 1. 空间数据库子系统

空间数据库子系统主要包括图形数据库和属性数据库。对野外调查成果和获取的各

类专题图件信息通过扫描矢量化输入，再进行图层定义、图层编辑，就形成了图形库。在区域地质环境质量评价 GIS 系统中，图形数据库与属性数据库是紧密联系的。图形数据库由描述不同要素空间分布特征的点、线、面或体等以不同的属性数据结构组成，在属性数据库的支持下，图形数据不再仅仅是具有几何意义的图元，而是具有地理意义的空间实体；与图形数据关联后，属性数据库也不再仅仅是传统意义上简单的关系型数据库(RDBMS)，其属性数据可以记录地理实体，如点、线、面或体，并包含了它们之间的空间相关关系。

## 2. 空间分析子系统

GIS 系统具有很强的空间分析功能，这也是区别于普通计算机地图制图系统的显著特征之一。区域地质环境质量评价系统中的空间分析子系统，对原始数据模型进行空间信息分析，发现新的数据，作为评价依据。区域地质环境评价主要用到空间叠加分析、数字高程分析和数字地形分析三种分析功能。

### (1) 空间叠加分析

空间叠加分析将有关主题层组成的数据层面进行叠加，产生一个新的数据层面，其结果综合了多层要素所具有的属性。叠加分析不仅包含空间关系的比较，还包含属性关系的比较。空间叠加分析可分为信息叠加、点与多边形叠加、线与多边形叠加、栅格图层叠加等。

### (2) 数字高程分析

数字高程模型 (DEM) 是对地理空间起伏连续变化的数字表示形式，用来描述空间中的第三维坐标—高程，也可以用其模拟二维表面上的连续变化数据，此时的 DEM，也可称为数字地形模型 (DTM)。

建立数字高程的方法一般有两种，一种是规则的高程矩阵方法，另一种是不规则三角网法 (TIN)，由于 TIN 模型能随地形起伏变化的复杂性而改变采样点的密度和决定采样点的位置，因而能够很好地表现地形特征如山脊、山谷、悬崖、海岸线等。因此，地质环境质量评价系统在进行数字高程分析时应选取 TIN 模型。

### (3) 数字地形分析

数字地形分析主要是用于坡度、坡降计算。坡度和坡向是相互联系的两个参数。坡度反映斜坡的倾斜程度，坡向反映斜坡所面对的方向。坡度和坡向的计算通常是在 DEM 的数据矩阵中采用开窗连续移动搜索，以完成整幅图的计算工作。

#### (4) 三维模型分析

地形等高线图虽然可以定量地描述地面起伏变化,但在视觉效果和信息分析上尚有欠缺。例如坡度与岩性的关系:通常情况下较陡峻的坡体,分布的岩层往往较为坚硬,而组成平缓坡体的,则是低强度或松散岩土体,这些关系在三维视图上可以更直观、形象、逼真地观察到。

#### 3. 专题分析子系统

一般的地理信息系统包含常规的空间分析方法,如空间叠加分析、DEM 或 DTM 分析等,但单一的 GIS 系统本身并不具备评价功能。对于区域地质环境质量评价,还需要基于 GIS 的空间分析模型开发出适合于地质环境质量评价的专题分析模型。专题分析子系统是本次系统开发的核心内容之一,它以 MAPGIS6.5 为平台,以 C++Builder6.0 为开发工具,以模糊综合评判和信息量法为评价模型,通过集成从而与 GIS 系统构成空间分析评价模块。

## 第三章 区域地质环境质量评价的指标体系

地质环境是一个由众多因素确定的复杂体系,而且各因素并不是平均地与地质环境发生相互作用。因此,为了保证区域地质环境评价的客观性与准确性,必须建立一套相对合理和规范的评价指标体系,一方面为工程技术人员提供一套相对标准的评价因素集;另一方面可以指导地质人员有目的地按照一定的标准进行评价因素的调查。

地质环境质量的确定是一个复杂的过程,它既包含有自然地质条件因素,又包含有社会属性的人类活动因素,不仅因素之间的相互关系极为复杂,而且,因素的量化也很困难。对这样一套具有很强不确定的因素体系,只有通过深入地分析,从繁杂的因素交错关系中,抓住问题的实质,选出代表性的指标,建立指标体系及其量化标准,才可能实现定量评价。

### 3.1 建立评价指标体系的原则<sup>[12][15][21][23]</sup>

评价指标体系是由若干个单项评价指标组成的有机整体,它既要反映地质环境质量评价的目标和要求,又要全面、合理、科学和实用,具有较强的可推广性。

#### 1. 系统性

区域地质环境是一个复杂的系统,它不但包括自然的地质环境条件因素,还包括人为的社会影响因素。有时,社会因素比自然因素更能起到决定性的作用。因此,指标体系应尽可能全面、系统地反映区域地质环境质量状况,符合区域地质环境质量评价的目标内涵,避免指标之间的重叠。评价目标与指标必须有机地联系起来组成一个层次分明的整体。

#### 2. 规范性

虽然地质环境条件具有显著的区域性,但在建立评价指标体系时,应尽量考虑避免这种区域差异,做到相对规范和通用,包括术语表达、指标内涵界定和具体的描述标准等,使指标具有区域可比性和时序可比性。

#### 3. 主导性

组成区域地质环境的各因素,对地质环境的影响和作用不是平均的,有些因素对环境质量的优劣程度起主导作用,有些因素则对地质环境的影响不是很大。因此,建立评价指标体系时应考虑主导性原则,剔除次要指标,提高区域地质环境质量评价工作的效

率。

#### 4. 可操作性

可操作性主要是指评价指标参数在实际工作中可以比较方便地获取,并能比较容易地用来对区域地质环境质量进行评价。实际工作中,如何把握指标体系的可操作性是难点之一,其矛盾就在于区域地质环境系统的复杂性。通常人们为了追求区域地质环境全面系统的描述,选择了较多的评价指标,造成指标内涵的重叠和交叉,而且给实际工作带来操作难度,对问题的解决并无好处。因此,建立区域地质环境质量评价指标体系时,在保证评价精度的前提下,应有针对性地选择有代表性的指标,避免指标之间的重叠和交叉。

### 3.2 评价指标体系的建立及分级

依据上述评价指标体系建立原则,从区域地质环境角度尽量全面的考虑影响地质环境的各种因素,这些因素在宏观上可分为两大类:基本因素和影响(诱发)因素。基本因素是指确定一个地区地质环境条件的基本地质因素,如地形地貌、地质构造、地层岩性、水文地质条件、植被发育情况等。影响(诱发)因素是指导致地质环境向不利方向演化甚至导致地质灾害发生的各种外动力和人类活动因素,如风化、侵剥蚀、降水、地震、开挖与堆填等。

区域地质环境质量评价系统评价指标的选择是一个系统分解和逐层控制的过程,是一个多层次的递阶结构。建立区域地质环境质量评价指标体系采用目标分析方法,即将目标分解,直到子目标能够用定量或定性的独立指标来衡量为止。区域地质环境质量评价指标体系的建立采用三层结构:目标层、类指标层和基础指标层,如图 3-1。

本文建立的区域地质环境质量评价指标体系及分级标准如表 3-1 所示。

### 3.3 评价指标的量化

评价指标作为区域地质环境评价的地质变量,必须赋予量化的值。一般指标可分为定量指标和定性指标两大类。定量指标,如坡度、坡高、降雨量、岩石强度等,有其自身的原始观测、试验值,但为了满足数学评价模型或计算机处理的要求,必须对其原始值作适当的数值变换。定性指标,如岩组、岩体结构、人类工程活动等,没有具体的定

量值，往往只是一种程度描述。

与评价模型相一致，本文根据工程地质类比法，给出评价指标在各种状态下对区域地质环境质量等级的模糊隶属度，实现对评价指标的量化。对于定量指标，依据评价指标分级标准，采用隶属度函数进行隶属度取值；对于定性指标，本文采用专家经验法，直接给出隶属度值（在下一章详述）。

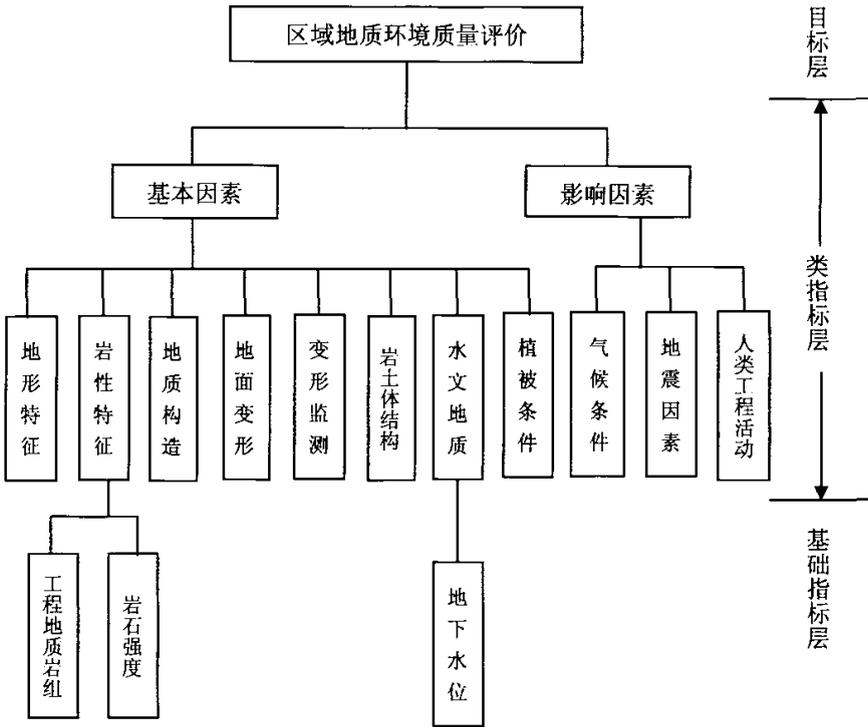


图 3-1 区域地质环境评价指标递阶层次图

表 3-1-1 区域地质环境质量评价指标体系及分级标准

类指标		基础指标	评价标准 (地质环境质量由好 → 差)			
			优 (I)	良 (II)	中 (III)	差 (IV)
地形特征	坡度	< 15°	15°-25°	25°-35°	> 35°	
	坡高 (m)	< 30	30-60	60-120	> 120	
	斜坡前缘临空情况	不临空	临空高差小	前缘临空		
岩性特征	工程地质岩组	坚硬岩体	中等坚硬岩体	软弱岩体	松散体	
	单轴饱和抗压强度 (MPa)	> 80	30-80	5-30	< 5	
地质构造	断裂活动情况	不活动	3 万-5 千年内活动 < 2 次	3 万-5 千年内间歇活动 > 2 次	3 万-5 千年内反复活动 > 3 次	
	断裂宽度 (m)	< 10	10-20	20-50	50-100	
	斜坡后缘情况	无变形迹象	断续细小拉张裂缝	1-2 条拉张裂缝	多条深大拉张裂缝	
变形监测	斜坡前缘情况	无	无明显的隆起	轻微的隆起	明显隆起	
	地面变形	无	轻微	中等	强烈	
岩土体结构	岩土体结构类型	块状	层状	碎裂	松散	
水文地质	地下水位埋深 (m)	> 50	50-35	35-20	< 20	
	植被覆盖率 (%)	50-100	30-50	10-30	< 10	
基 本 因 素						

续表 3-1 区域地质环境质量评价指标体系及分级标准

影响因素	气候条件	月平均降雨量 (mm)	< 100	100—300	300—400	> 400
		日最大降雨量 (mm)	< 50	50—100	100—200	> 200
	一次最大降雨量 (mm)	< 50	50—150	150—250	> 250	
人类工程活动	地震因素	地震烈度	< 3	3—6	6—9	> 9
		活动强度	无	较弱	中等	强烈
	交通线路开挖高度 (m)	< 10	10—20	20—50	> 50	
	地下采矿采空率 (%)	< 25	25—50	50—75	> 75	
	边坡开挖、堆积程度	无	较弱	中等	强烈	

### 3.4 评价指标的筛选与优化<sup>[7][12][35]</sup>

应该说，表 3—1 所建立的评价指标体系在现有基础上是比较完整的，基本上反映了区域地质环境的特点及其影响和控制因素。但在对某一地区的地质环境进行具体评价时，参与评价的指标太多太过全面，效果不一定好：一方面，指标太多缺乏可操作性，有些指标难以在现场取得调查资料；另一方面，指标太多，确定其权重有一定困难。因此，实际评价时有必要对评价指标进行筛选与优化，避免重复交叉，提高评价效率。本文采用以下两种方法对评价指标进行筛选与优化。

#### 1. 两两比较法

将  $m$  个评价指标作两两比较，如指标  $b_1$  比指标  $b_2$  重要，在  $b_1$  行  $b_2$  列写上 3，而在  $b_2$  行  $b_1$  列写上 1；若指标  $b_1$  与指标  $b_2$  分不出谁重要，则在  $b_1$  行  $b_2$  列、 $b_2$  行  $b_1$  列都写上 2。如此列出表来对各选定指标两两进行比较，构造比较矩阵。

例如：有 5 个指标  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  和  $b_5$ ，采用两两比较，可以构造以下的比较矩阵：

	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$\Sigma$
$b_1$	2	3	1	2	3	11
$b_2$	1	2	1	3	3	10
$b_3$	3	3	2	3	3	14
$b_4$	2	1	1	2	3	9
$b_5$	1	1	1	1	2	6

其中，“ $\Sigma$ ”号下面为同行左面各数的和，记为  $\lambda$ 。对  $\lambda$  按列归一化，得  $\lambda_1=0.22$ ， $\lambda_2=0.20$ ， $\lambda_3=0.28$ ， $\lambda_4=0.18$ ， $\lambda_5=0.12$ ，按大小排列即  $\lambda_3 > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_4 > \lambda_5$ ，从而确定了指标的相对重要程度。

#### 2. 主成分分析法

主成分分析法是在保证数据信息损失最小的前提下，经过线形变换和舍弃小部分信息，获取少数新的综合变量，取代原始的多维变量，对区域地质环境质量进行评价分析的方法。

设某个总体样本  $X$  有  $n$  个特征变量，即  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ，其均值向量为  $U$ ，协方差

阵为  $V$ ，将这  $n$  个特征变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  综合成尽可能少的几个综合变量  $y_1, y_2, \dots, y_m (m < n)$ ，综合变量要既能反映原来  $n$  个特征变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  所反映的信息，又要互不相关。

求主成分的步骤如下：

(1) 先求出协方差阵  $V$  的  $k$  个非零特征根，按大小顺序排列：

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k > 0 (k \leq n);$$

(2) 求出  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  对应的  $k$  个特征向量，将其单位化，得到单位化特征向量  $a_1, a_2, \dots, a_k$ ；

(3) 取  $y_1 = a_1^T X, y_2 = a_2^T X, \dots, y_k = a_k^T X$ ，即得第一、第二、第  $k$  个主成分，而且  $y_1, y_2, \dots, y_k$  互不相关；

(4) 以累积方差贡献率为测度，确定主成分的个数  $m$ 。累计方差贡献率的计算公式为：

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{j=1}^k \lambda_j}。通常当 \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} > 0.85 时，我们就用前  $m$  个主成分（即综合变量） $y_1, y_2, \dots, y_m$$$

代替原特征变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  对样本进行分析。

### 3.5 评价指标权重的确定<sup>[23][34]</sup>

选定评价指标后，需进一步确定各指标的权重。由于区域地质环境系统的复杂性、不可逆性、模糊性，用精确的数学模型确定评价指标的权重难度很大，如果对地质环境系统分析不够透彻，过分相信数学定权模型，反而使权值不尽合理，而根据专家的经验判断，有时其结论还比较可靠。本文采用层次分析法确定各评价指标的权重。

层次分析法是美国运筹学专家匹兹堡大学教授 T.L.Saaty 于 70 年代提出的层次排序法，原理简单，有较严格的数学依据。它结合了专家打法定性分析的优点，又采用适当的数学模型进行定量分析，弥补了定性与定量的不足之处，比较适合于既具有定性指标又具有定量指标的区域地质环境评价领域。

层次分析法确定指标权重的一般步骤为：

(1) 构造判断矩阵

设  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  为评价因素集， $u_{ij}$  表示  $u_i$  对  $u_j$  的相对重要性数值

$(i, j = 1, 2, \dots, n)$ ,  $u_{ij}$  的取值按表 3-2 进行:

表 3-2 判断矩阵标度值及其含义

标度值	含 义
1	表示因素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比, 具有同等重要性
3	表示因素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比, $u_i$ 比 $u_j$ 稍微重要
5	表示因素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比, $u_i$ 比 $u_j$ 明显重要
7	表示因素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比, $u_i$ 比 $u_j$ 强烈重要
9	表示因素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比, $u_i$ 比 $u_j$ 极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断之间的中值, 表示重要性判断之间的过渡
例 数	因素 $u_i$ 与 $u_j$ 比较得判断 $u_{ij}$ , 则因素 $u_j$ 与 $u_i$ 比较得判断 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

由此得到判断矩阵  $T$ :

$$T = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix}$$

## (2) 计算重要性排序

由线性代数知识可知, 判断矩阵  $T$  的最大特征根所对应的特征向量即为各评价因素的重要性排序, 经归一化后, 就得到了各评价指标的权重分配。一般情况下, 当矩阵阶数较高时, 可采用以下两种近似方法求解判断矩阵的特征向量。

### 1) 求根法

① 将判断矩阵按行求积:  $W_i = \prod_{j=1}^n u_{ij}$ , ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ );

② 计算  $W_i$  的  $n$  次方根  $\bar{W}_i = \sqrt[n]{W_i}$ ;

③ 对向量  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)$  作归一化处理, 即:  $a_i = \frac{\bar{W}_i}{\left(\sum_{j=1}^n \bar{W}_j\right)}$ ,

则向量  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$  即为所求特征向量;

④ 计算判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(TA)_i}{a_i}$$

2) 求和法

① 判断矩阵按列归一化:

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^n u_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

② 将归一化后的判断矩阵按行求和:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{u}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

③ 对向量  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$  作归一化处理:

$$a_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

由此得到特征向量  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$  ;

④ 计算判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(TA)_i}{a_i}$$

(3) 判断矩阵一致性检验

由于区域地质环境系统的复杂性,我们在构造判断矩阵时,可能造成矩阵偏离一致性过大,会导致指标权重分配不合理,这就需要对判断矩阵进行一致性检验,检验使用如下公式:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$$

$$CR = CI / RI$$

式中,  $CI$  为矩阵的一般一致性指标;  $\lambda_{\max}$  为矩阵的最大特征根;  $n$  为矩阵阶数;  $RI$  为矩阵的平均随机一致性指标,由大量试验确定(其值见表 3-3);  $CR$  为矩阵随机一致性比率。只有当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵才具有满意的一致性。

表 3-3 RI 取值表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.58	1.59

层次分析法程序设计流程见图 3-2。

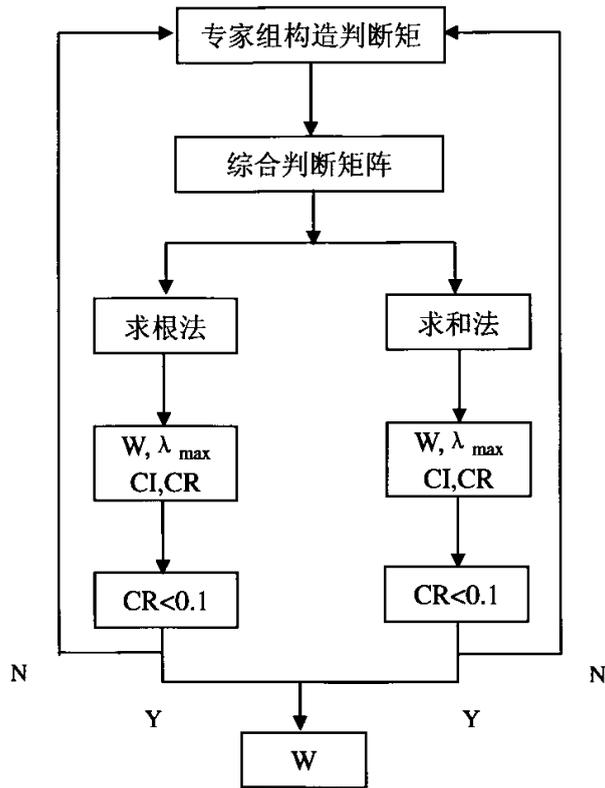


图 3-2 层次分析法求指标权重程序流程图

## 第四章 区域地质环境质量评价模型

### 4.1 概述

区域地质环境质量是一个复杂的系统,由多种因素共同决定。区域地质环境质量评价属于多变量的目标评价问题,必须综合考虑多种因素对区域地质环境的影响,为了客观、全面、准确地评价区域地质环境质量,必须建立合适的数学评价模型。

本文第二章建立了区域地质环境质量评价指标体系的分级标准,但由于地质环境质量是地质环境各要素优劣程度的综合,同一指标可能同时属于几个质量级别,只是对各级别的隶属程度不同而已,因此很难用经典的数学模型划分统一的标准进行度量。模糊数学方法能对大量的资料进行判断识别,从中提取对区域地质环境质量影响最大的因素,进行模糊综合评判,从而很好地解决了地质环境质量评价这一模糊概念。根据所解决问题的特点,本文采用了模糊综合评判方法。

信息量法早期常用于地质找矿,近年来逐步引入到地质灾害危险性区划与预测领域中(毕海良,1998,1999;阮沈勇,黄润秋,2001;吴益平等,2003;张桂荣等,2003;),但对于直接应用信息量模型评价区域地质环境质量的研究,目前国内尚不多见。本文尝试引入信息量模型对区域地质环境质量进行评价,作为对模糊综合评判模型的补充。

### 4.2 模糊综合评判模型<sup>[8][12][16][17][42]</sup>

#### 1. 模型的建立

具体步骤如下:

1) 设因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}^T$ , 评价集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 因素论域与评价论域之间的模糊关系用评判矩阵  $R$  来表示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$r_{ij} = \mu(u_i, v_j)$  ( $0 \leq r_{ij} \leq 1$ ) 表示因素  $u_i$  被评为  $v_j$  的模糊隶属度, 矩阵  $R$  中第  $i$  行  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$  为因素  $u_i$  的单因素评判;

2) 将因素权向量  $A$  与模糊评判矩阵  $R$  进行“合成”,  $B = A \cdot R$  ( $M(\cdot, +)$  合成形

式), 求出评价结果集  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ , ( $0 \leq b_j \leq 1$ );

3) 根据单元最大隶属度  $b_i = \max_{1 \leq j \leq n} \{b_j\}$  所对应的值, 确定单元地质环境质量等级为  $i$ 。

## 2. 模糊评判矩阵的确定

模糊评判矩阵  $R$  的元素由因素对评价集的各级隶属度值组成。对于定性因素, 可依据评价分级标准, 采用专家经验法, 直接给出隶属度值, 见表 4-1。

表 4-1 部分定性因素隶属度经验值

岩性组合	坚硬岩体 (1)	中等坚硬岩体 (2)	软弱岩体 (3)	松散体 (4)
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$
人类工程活动	无 (1)	轻微 (2)	中等 (3)	强烈 (4)
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$

1、2、3、4 为依据分级标准对定性因素的专家经验量化取值, 其它定性因素可类似考虑。

对于评价区域地质环境质量的定量因素, 其隶属度函数可取为梯形函数。通常定量因素可分为两大类: (1) 递增型: 从 I 级到 IV 级因素标准特征值增加; (2) 递减型: 从 I 级到 IV 级因素标准特征值减小。

对于第 (1) 类因素, 其隶属度函数图形为:

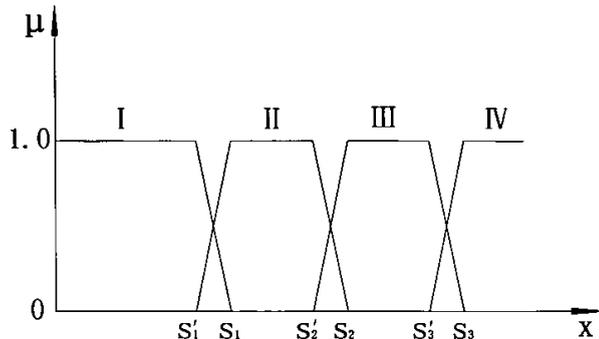


图 4-1 递增型定量因素隶属度函数示意图

其中,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为因素分级阈值, 与本文第二章所建立的指标分级标准对应,

$S'_1$ 、 $S'_2$ 、 $S'_3$ 为模糊考虑下各分级阈值的修正值， $\mu$ 为隶属度， $x$ 为因素实测值（原始观测值）。

隶属度函数表达式如下：

$$\mu_I = \begin{cases} 1 & x < S'_1 \\ \frac{S_1 - x}{S_1 - S'_1} & S'_1 \leq x \leq S_1 \\ 0 & x > S_1 \end{cases} \quad (4-1)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq S'_1 \\ \frac{x - S'_1}{S_1 - S'_1} & S'_1 < x < S_1 \\ 1 & S_1 \leq x \leq S'_2 \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S'_2} & S'_2 < x < S_2 \\ 0 & x \geq S_2 \end{cases} \quad (4-2)$$

$$\mu_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq S'_2 \\ \frac{x - S'_2}{S_2 - S'_2} & S'_2 < x < S_2 \\ 1 & S_2 \leq x \leq S'_3 \\ \frac{S_3 - x}{S_3 - S'_3} & S'_3 < x < S_3 \\ 0 & x \geq S_3 \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\mu_{IV} = \begin{cases} 0 & x \leq S'_3 \\ \frac{x - S'_3}{S_3 - S'_3} & S'_3 < x < S_3 \\ 1 & x \geq S_3 \end{cases} \quad (4-4)$$

对于第(2)类因素，其隶属度函数图形为：

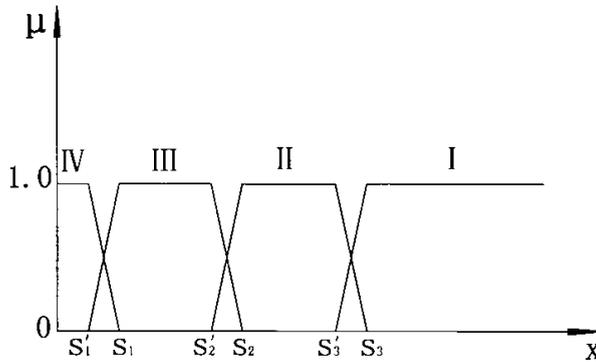


图 4-2 递减型定量因素隶属度函数示意图

图中  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ， $S'_1$ 、 $S'_2$ 、 $S'_3$ ， $\mu$ 、 $x$ 意义同图 4-1。

隶属度函数表达式如下：

$$\mu_I = \begin{cases} 0 & x \leq S'_3 \\ \frac{x-S'_3}{S_3-S'_3} & S'_3 < x < S_3 \\ 1 & x \geq S_3 \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq S'_2 \\ \frac{x-S'_2}{S_2-S'_2} & S'_2 < x < S_2 \\ 1 & S_2 \leq x \leq S'_3 \\ \frac{S_3-x}{S_3-S'_3} & S'_3 < x < S_3 \\ 0 & x \geq S_3 \end{cases} \quad (4-6)$$

$$\mu_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq S'_1 \\ \frac{x-S'_1}{S_1-S'_1} & S'_1 < x < S_1 \\ 1 & S_1 \leq x \leq S'_2 \\ \frac{S_2-x}{S_2-S'_2} & S'_2 < x < S_2 \\ 0 & x \geq S_2 \end{cases} \quad (4-7)$$

$$\mu_{IV} = \begin{cases} 1 & x < S'_1 \\ \frac{S_1-x}{S_2-S'_1} & S'_1 \leq x \leq S_1 \\ 0 & x > S_1 \end{cases} \quad (4-8)$$

由此确定因素集  $U$  对评价集  $V$  的模糊关系，确定评判矩阵  $R$ 。

### 4.3 信息量模型 [5] [6] [7] [48]

信息量法是由信息论发展起来的一种评价方法，属于统计分析方法。组成区域地质环境的各因素对环境质量的影响有大有小，依据已发生地质灾害区域提供的现实信息，把各种反映区域地质环境质量的因素实测值转化为影响地质环境质量的信息量值，用信息量值来表征各因素对地质环境质量影响的大小，进而评价区域地质环境质量，这就是应用信息量模型评价区域地质环境质量的思路。

应用信息量法评价区域地质环境质量时，认为各因素是通过地质灾害发生“提供”信息来影响地质环境、决定环境质量的。信息量用条件概率计算，实际计算时，可用频率估计条件概率。信息量法原理如下：

$$I(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \lg \frac{P(y|x_1, x_2, \dots, x_n)}{P(y)} \quad (4-9)$$

上式可写成：

$$I(y, x_1, x_2, \dots, x_n) = I(y, x_1) + I_{x_1}(y, x_2) + \dots + I_{x_1 x_2 \dots x_{n-1}}(y, x_n) \quad (4-10)$$

式中：

$I(y, x_1, x_2, \dots, x_n)$  为具体因素组合  $x_1 x_2 \dots x_n$  对地质灾害发生所提供的信息量;

$P(y|x_1 x_2 \dots x_n)$  为因素  $x_1 x_2 \dots x_n$  组合条件下地质灾害发生的概率;

$P(y)$  为地质灾害发生的概率;

$I_{x_1}(y, x_2)$  为因素  $x_1$  存在条件下, 因素  $x_2$  对地质灾害所提供的信息量。

式(4-10)说明, 因素组合  $x_1 x_2 \dots x_n$  对地质灾害所提供的信息量等于因素  $x_1$  提供的信息量, 加上  $x_1$  确定后  $x_2$  对地质灾害所提供的信息量, 直至  $x_1 x_2 \dots x_{n-1}$  确定后,  $x_n$  对地质灾害所提供的信息量。

在具体运算时, 假定评价区共有单元数为  $N$ , 已知发生地质灾害的单元数为  $S$ , 存在某因素状态的单元数为  $N_i$ , 该状态标志条件下已发生地质灾害的单元数为  $S_i$ , 则该标志对地质灾害所提供的信息量为:

$$I_i = \lg \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (4-11)$$

某一单元的总信息量为:

$$I = \sum_{i=1}^m I_i = \sum_{i=1}^m \lg \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (4-12)$$

式中:  $m$  为单元状态标志总数。

单元总信息量  $I$  的大小反映了该单元发生地质灾害的可能性,  $I$  值越大表明评价单元越易发生地质灾害, 从而地质环境质量也就越差。对  $I$  值进行统计分析(主观判断或聚类分析), 找出突变点作为分界点, 对区域地质环境质量进行评价分区。

## 第五章 区域地质环境质量评价 GIS 系统的实现

### 5.1 空间数据库的建立<sup>[10][15][22][23][33][39][45]</sup>

#### 5.1.1 图形数据库

##### 1. 采集图形数据

目前,全国范围内的小比例尺,如 1:20 万,1:50 万的数字化地形图已实现数据共享。但区域地质环境调查常用的是大比例尺,如 1:5 万的地形图,这些图件的数字化地图只有局部地区才有,而且数据尚未共享。因此,工程实践中,大多仍沿用传统纸质印刷品图件,对图件进行数字化,采用人工读取数据的方法进行图形数据的采集。图件数字化主要有以下两种实现形式:

**数字化仪矢量化:**数字化仪可直接读取图形坐标数据,用数字化仪采集空间数据是 GIS 最常用的数据采集方式,方便快捷,但人为误差较大,当对图件精度要求不高时,可采用此法。

**扫描矢量化:**采用大幅面、高精度的扫描仪,为降低系统误差,要尽量减少拼图次数。扫描底图常包含多种信息,系统难以一一自动识别分辨,这就导致全自动扫描矢量化的结果不“可靠”,实际应用中,常采用交互跟踪矢量化。这种方法精度较高,对反差较大的线条、图案等也能较准确地反映,当对图件质量要求较高时,可采用此法。

##### 2. 建立图层

区域地质环境质量评价系统数据可分为空间数据和属性数据两大类。空间数据主要有点、线、面等表达形式,例如居民点、高程点、各类注释等为点图元表达形式;地形等高线、构造线、地层分界线等为线图元表达形式;地层岩性、河流、植被类型分布等为面图元表达形式。属性数据是描述实体特征的数据,多为文本型,例如高程值、分区面积、断层产状等。

为了有效地利用管理和利用空间数据,将一类或一组性质相近图素的空间数据放在一个图层中,同一图层具有相同的属性结构,每个图层分别存放于不同的文件中。图层是空间数据处理和分析的基本单元,进行区域地质环境质量评价时,要区分评价图层与参考图层之间的关系。评价图层用于地质环境质量评价,参考图层只作为参考信息,出

图时可形成一幅完整的图件。图层数据类型可以是矢量数据类型或栅格数据类型，矢量数据类型的图层多用于高精度图形显示、快速查询等，栅格数据类型的图层多用于空间分析和模拟分析等。

### 3. 进行投影变换

区域地质环境质量评价涉及到的原始资料众多，同一工作区可能利用不同比例、不同投影方式的地图数据，或者同一比例尺不同分度带的地图数据，利用这些数据时，应先进行投影变换，将各类数据统一为同一投影同一比例尺，实现不同比例尺地图的合成，以及跨分度带地图的拼接。

### 4. 图幅拼接

当评价工作区由多幅图构成，又要以整幅图的形式来表示时，就需要进行图幅拼接。具体做法是：对各相邻图幅进行分层拼接，各图层同一类型的图元拼接后，编号要统一格式，对其属性数据也要进行合并，对于一些图面标注的内容要作相应的调整。

### 5. 图形编辑

图形编辑主要是图形参数的编辑和图形几何数据的编辑。图形元素主要分为点、线、面三类。每种图形元素都有各自的图形参数、图层号，具有独立的属性代码。属性代码用于该图形元素与属性数据库中相应的属性数据的连接，图层号决定该图形元素属于那个图层，用户可以按照地图要素的性质划分图层。系统允许按层显示地图要素，以便控制图面负担，突出专题信息。

### 6. 图形整饰

每一幅图数字化、编辑等工作完成之后，要将图面标注内容逐一添加到图面上。对图框、经纬线或公里网格线、比例尺、图例以及图解注释等内容进行整饰后，才能输出成果图。

## 5.1.2 属性数据库

区域地质环境质量评价系统中的属性数据与空间位置没有直接关系，是代表实体特定涵义的数据，既可以是独立于专题地图的社会经济统计数据，也可以是与专题地图关系的表示地图类别、数量、等级的字符串或数字。本次采用 Microsoft Access 数据库对属性数据进行录入和管理，空间图形数据库通过 ODBC 接口调用，在 MAPGIS 中形成其内部属性数据库，使空间数据图形与属性联系在一起，形成空间数据库，空间数据

库实行分层式管理。

空间数据库建立流程如图 5-1。

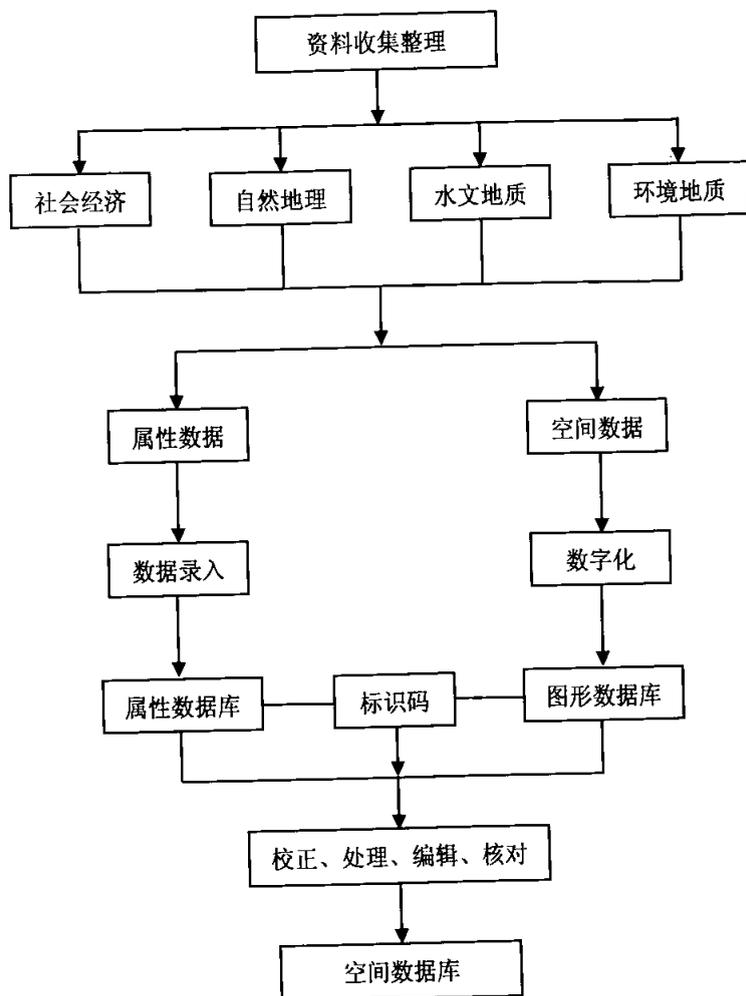


图 5-1 区域地质环境质量评价系统空间数据库建立流程

## 5.2 空间分析子系统

区域地质环境评价主要用到空间叠加分析、地形分析和三维分析功能,现介绍如下:

### 1. 空间叠加分析

区域地质环境评价空间数据库实行的是分层式管理,性质相同或相近的数据存放在一个图层中。进行特定目标的空间数据层拓扑分析时,可以对不同数据层进行叠加,产生新的数据层,使其具有多重属性,以确定它们之间的空间关系。空间叠加操作还可以

用来分析单因素对于评价目标的重要程度。

在进行区域地质环境质量评价时，如果直接对不同类型的数据层进行空间叠加，或将各数据层的属性直接进行数学运算，得到的叠加结果将是毫无意义的。因此，在进行叠加前，必须对各层数据进行转换处理，包括数据类型及属性意义的转换。

区域地质环境质量评价常用到多因素叠加分析、因素一权重叠加分析等空间叠加分析功能。

## 2. 地形分析

GIS 系统的数字高程模型具有强有力的空间分析功能，可以获得多种派生产品，用于进行地形分析。地形分析主要用来计算坡度、坡向等，输出值不仅可以是数字形式，而且还可以派生出坡向分布图和坡度分布图。坡度和坡向在区域地质环境质量评价中是非常重要的因素，可通过 DEM 自动提取坡度、坡向评价因素数据层，尽量减少人为操作，降低人为误差。

## 3. 三维分析

二维数字高程模型中的 Z 值（即高程值）仅仅用颜色来进行可视化表达，视觉效果不够理想。三维数字高程模型中的 Z 值则反映实际高度值（可以乘上比例系数），并可从不同的视角来观察地形地貌特征，效果形象逼真，还可以与其它专题地图进行复合，形成虚拟现实的视图。

# 5.3 评价模型的实现

模糊综合评判模型的评价步骤为：

1. 评价指标的选取与量化：对研究区进行深入调查研究后，经过指标筛选与优化，确定最终评价指标，采用专家经验取值和隶属度函数进行量化。

2. 确定指标权向量：根据层次分析法，建立指标综合判断矩阵，用求根法与求和法求解指标权重，取平均值求得指标权向量。

3. 建立模糊评判矩阵：模糊评判矩阵元素由指标对地质环境质量各等级（优、良、中、差）的隶属度值组成，由指标量化结果确定。

4. 模型求解：将模糊评判矩阵与权向量进行合成，利用最大隶属度原则确定单元地质环境质量等级。

模糊综合评判模型的实现流程如图 5-2。

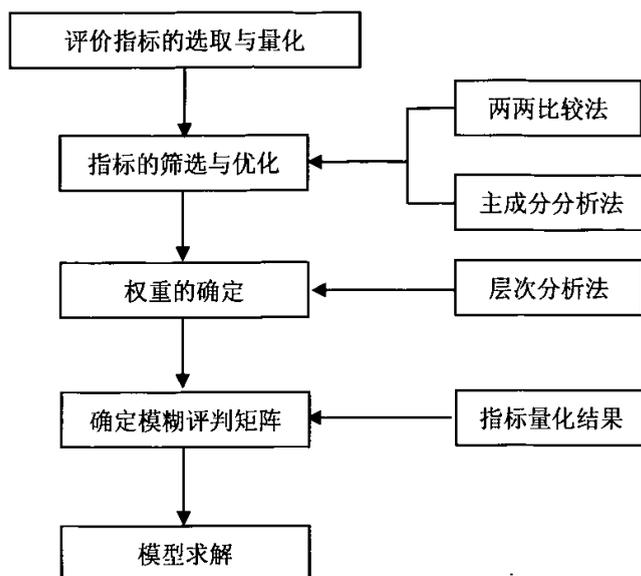


图 5-2 模糊综合评判模型实现流程图

信息量模型的评价步骤为：

1. 利用 (4-11) 式计算单因素 (指标) 提供地质灾害的信息量。
2. 利用 (4-12) 式计算某一单元  $m$  个评价因素组合条件下, 提供地质灾害的总信息量。
3. 对单元总信息量值进行统计分析 (主观判断或聚类分析), 找出突变点作为分界点, 对区域地质环境质量进行等级划分。

#### 5.4 系统的集成 <sup>[4][10][15][32]</sup>

区域地质环境质量评价系统以 MAPGIS6.5 为平台, 采用 C++ Builder6.0 语言实现专业模块的开发, 最后实现系统的集成。

系统的集成方式有多种形式, 如源代码, 动、静态函数库, 可执行程序, DDE 或 OLE 等。现有应用模型的主要形式有四种: 源代码、函数库、可执行程序与模型库。根据实际情况, 本文采用独立可执行程序方式实现系统的集成, 即 GIS 系统与专业模型均以应用程序的方式独立存在, 二者的内部、外部结构均不变, 二者之间的数据交换通过对共同的统一格式的中间数据文件 (通用数据库文件) 的操作实现, GIS 系统进一步将中间数据转换为空间数据, 以实现 GIS 本身的空间数据操作功能。

## 第六章 实例分析

### —— 以陕西省凤县为例

凤县,古称“凤州”,位于陕西省西南部,北依秦岭主峰,南接紫柏山。境内山峦重叠、群峰突兀,土石之山林立。地质构造复杂,地应力相对集中,地壳稳定性较低,岩体较破碎,促使各种地质灾害频繁发生。夏末秋季阴雨绵绵,时降大雨、暴雨。沿江河两岸人类工程经济活动频繁,易发地质灾害,损失严重。特别是近年来,矿区建设发展较快,尤其是一些小煤窑的乱采乱挖,严重破坏了地质环境,再加上人类其他不合理的工程活动,如因修筑公路而造成对坡脚的开挖及引、排水管(渠)道渗漏而改变了坡体的原有应力条件等,进一步加剧了本区地质环境的恶化。为了减少或避免地质灾害造成人、畜伤亡和财产损失,国土资源厅下文将凤县列为陕西省地质灾害多发及易发县之一做地质灾害调查与区划工作。作者在对大量实地调查资料进行深入分析的基础上,应用本系统对该区进行了地质环境质量综合评价,划分了地质灾害易发区,提出了针对凤县的地质灾害防治措施和建议。

### 6.1 区域自然地理及地质背景<sup>[47]</sup>

#### 6.1.1 自然地理概况

凤县位于秦岭西段南麓、嘉陵江源头。地理座标:东经 106° 24' 54" —107° 07' 30", 北纬 33° 34' 57" —34° 18' 21"。东邻太白县,南连留坝、勉县,西接甘肃天水市和两当县,北倚宝鸡市区及宝鸡县,南北长 80.5km,东西宽 70.9km,总面积 3163.97km<sup>2</sup>(据《凤县水利志》1989 年资料)。行政区划归陕西省宝鸡市管辖。

境内有宝成铁路和西汉公路沿嘉陵江南下,316 国道穿过县境南部。川陕和华双公路,在境内长 136.2km。地方公路 773.4km,交通条件较为方便。

凤县属暖温带湿润大陆性季风气候,具明显的山地气候特征。表现在垂直分带明显,光热资源不足,降雨集中。年日照时数 1940.5 小时,年日照百分率 42%。年平均气温 11.4℃,七月最热,平均气温 22.7℃,极端最高气温 37.3℃,一月最冷,平均气温-1.1℃,极端最低气温-16.5℃。年平均降雨量 613.2 mm,夏秋多雨占全年降雨量的 80%左右,冬春干旱。平均无霜期 188 天,早霜始于 10 月 20 日,晚霜终于 4 月 16 日。

## 6.1.2 地质环境概况

### 1. 地形地貌

凤县属中山地貌。总体地势东北高，西南低，高山挺拔，山川相间，山间盆地镶嵌其中。西北部透马驹高程 2738.7m，东北部代王山高程 2598m 和南部紫柏山高程 2538.4m，构成凤县地形的骨架。一般高程在 1000m 以上，最高点透马驹高程 2738.7 m，最低点费家庄高程 905m，相对高差一般为 400-700m，最大高差 1834m，县城所在地双石铺高程 960m。沟壑密度  $0.73\text{km}/\text{km}^2$ ，侵蚀模数  $974\text{T}/\text{km}^2$ ，水土流失面积 32.3%。

按地貌成因类型，可将境内地貌划分为构造剥蚀山区和侵蚀堆积河谷区。构造剥蚀山区再按绝对高程和相对高差，分为高中山区、中山区、低中山区。

#### (1) 构造剥蚀山区

A. 高中山区 高程 $>2000\text{m}$ ，分布于黄牛铺镇东部、岩湾乡和平木镇北部、唐藏镇西北部、三岔镇中部、瓦房坝乡北部、温江寺乡南部。面积  $734.26\text{km}^2$ ，占总面积 23.2%。河流切割强烈，陡崖发育，人烟极其稀少，植被良好，致灾作用极其微弱。

B. 中山区 高程  $1500\text{---}2000\text{m}$ ，全境所有乡镇皆有分布。面积  $1909.69\text{km}^2$ ，占总面积 60.4%。该区人员居住零星分散，森林分布不均，致灾作用较弱。

C. 低中山区 高程  $1000\text{---}1500\text{m}$ ，面积  $391.67\text{km}^2$ ，占总面积的 12.4%。山脊一般平缓，山坡坡度  $10^\circ\text{---}30^\circ$ ，山崩浑圆，河流下切作用有所减弱，侧蚀作用有所加强，河谷多呈“U”型。植被较差，以灌木为主，居住人口较多，致灾作用较强。

#### (2) 侵蚀堆积河谷区

高程  $905\text{---}1000\text{m}$ ，面积  $128.35\text{km}^2$ ，占全县总面积 4%。嘉陵江、安河、小峪河、旺峪河、西河等河床、漫滩、阶地区，河谷多呈现“U”型，形成山间宽谷盆地。该区人口相对集中，人类活动频繁，致灾作用强烈。

### 2. 地质构造

凤县处于一级大地构造单元北秦岭优地槽带西部，经历加里东、华力西和印支三个旋回，于印支期最终回返，为多旋回褶皱系。沉积岩巨厚，岩浆活动频繁，变质作用复杂，褶皱、断裂发育。

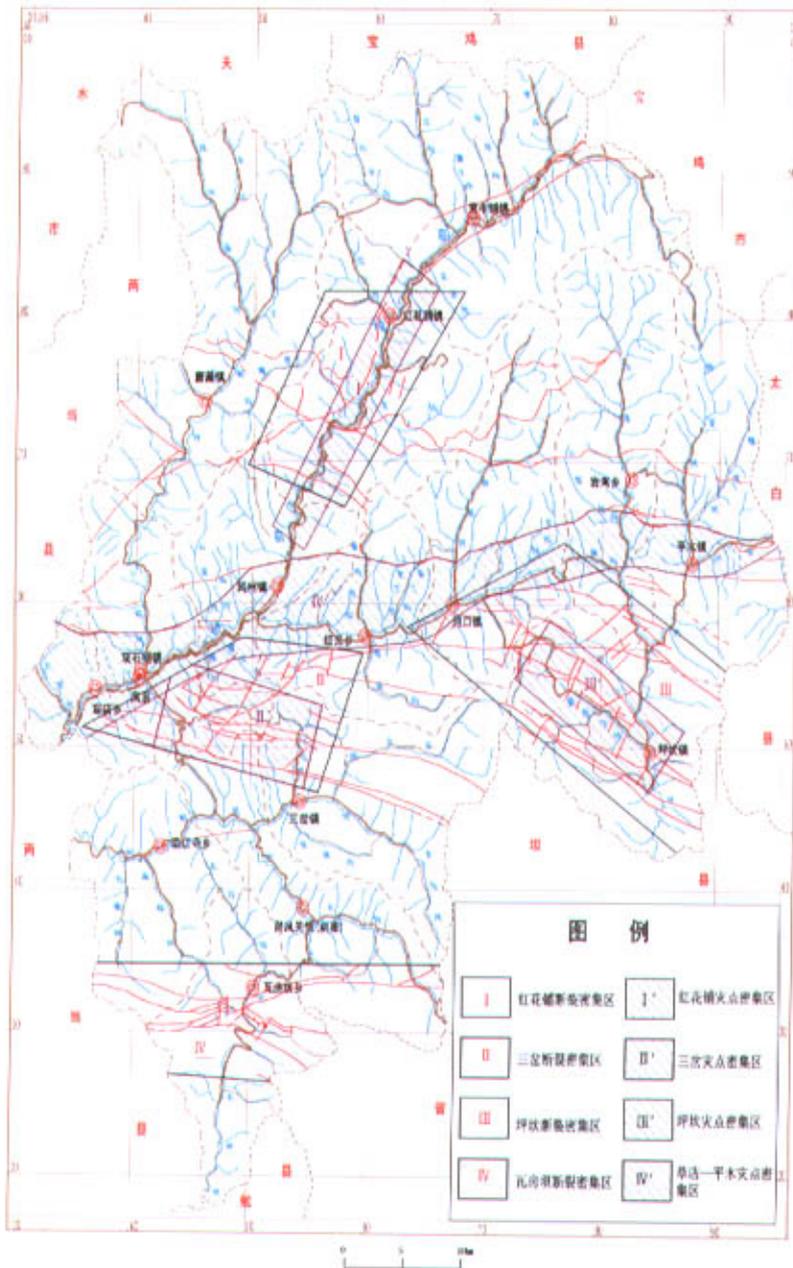


图2-1 凤县灾点密集区与构造关系图

## (1) 断裂

境内断裂按走向大致分为东西向，北西西向和北东向三组（见图 1-6）。现将区域控制性深大断裂简述如下：

### A、油房沟——皇台断裂（F<sub>1</sub>）

该断裂始生于元古代晚期，为一先张后压性多期活动的深大断裂带。该断裂自鼻梁经杨家庄、熊家院、野草坪、裘子坝、至大王庙为侵入岩体所截，主体走向近东西，境内略向南凸呈弧形，倾向北，倾角 60°-80°，推测断距达数公里。该断裂控制了秦岭群的分布和北秦岭早古生代地槽的形成演化和展布，是秦岭褶皱系三级构造单元的分界断裂。

### B、唐藏——商南断裂（F<sub>2</sub>）

该断裂始生于晚元古代，为一多期反复拉张与挤压的深断裂带。该断裂自唐藏的马家窑向东经、前山、鹿母寺、罗家坪、黑湾庄、两河口至前岭向东延出境外，主体走向近东西，倾向北，倾角 60°-80°，断裂带宽近千米，岩层破碎。该断裂为北秦岭优地槽与南秦岭冒地槽二级单元分界断裂。

### C、酒奠梁——板岩镇断裂（F<sub>3</sub>）

该断裂始生于晚元古代前，为一压性断裂，控制三级构造单元。该断裂西自包院里向东经石山坪至稿坪沟延出境外，走向北西西，倾向北，倾角 50°-60°，破碎带明显，断裂两侧泥盆系、石炭系岩性与厚度有明显差异。

### D、紫柏山——江口断裂（F<sub>4</sub>）

该断裂始生于晚元古代，为先张后压性断裂，沿断裂带脉岩发育。该断裂西自毛狗沟向东经青龙寺、店子河至樵云沟，东西两端延出境外，主体走向东西，倾向南，倾角 50°-60°。

从图 2-1 可见，除上述四条控制性深大断裂外，还有许多纵横交错的断裂分布，其中北西西向断裂往往被北东向断裂所截切错动。这些断裂大致形成四个密集区，它们是红花铺断裂密集区、三岔断裂密集区、坪坎断裂密集区、瓦房坝断裂密集区。在断裂密集区内，节理裂隙发育，岩层极为破碎，为地质灾害的发育提供了有利条件。

## (2) 节理裂隙

在白垩系中主要发育北东 20°-40° 和北西 70°-80° 两组共轭节理，在前白垩系中主要发育北东 30°-50° 和北西 70°-80° 两组共轭节理，在岩浆岩中，则主要发育北东 50°-70°

和北西 30°-50° 两组节理。

从上述断裂结构面力学性质和节理裂隙组合规律来看，分析其压应力方向来自南北，且以北为主。

### 3、地层岩性

凤县自下元古代以来地层发育较全，除缺失寒武系外，其余各系均有分布。地层走向与区域控制性断裂走向基本一致，呈东西走向（见图 1—6）。

#### （1）元古界（Pt）

##### A、下元古界（Pt<sub>1</sub>）

分布在五星台—桃园——岩湾一带。为一套变质岩系，岩性主要为灰黑色黑云斜长片麻岩、角闪绢云斜长片岩、角闪黑云斜长片岩、石英片岩、硅化灰岩和石墨大理岩，以及变质砂岩，局部具混合岩化，有加里东期片麻状黑云母二长花岗岩侵入。岩层因受频繁挤压变动节理裂隙发育而比较破碎。

##### B、上元古界（Pt<sub>2</sub>）

分布在唐藏——白家店一带。为一套变质岩系，岩性主要为安山玢岩、凝灰岩与千枚岩、板岩、绿泥片岩、大理岩互层。节理裂隙发育岩层破碎。

#### （2）古生界（Pz）

##### A、奥陶系（O）

分布在红花铺、草凉驿、安王山、下坪一带。岩性为灰—灰绿、蓝绿色酸性熔岩、凝灰岩、钙质粉砂岩、粉砂质板岩、夹砂质灰岩、灰岩等。有华力西期石英二长闪长岩侵入。

##### B、志留系

分布在县境最南端的朱家坪、春树坪、严家坪一带。岩性为硅质岩、含碳千枚岩夹变质粉砂岩、砂质灰岩、燧石条带灰岩、结晶灰岩。

##### C、泥盆系（D）

主要分布在酒奠梁——板岩镇断裂（F<sub>3</sub>）以北至安河以南的区域，以及庞家河——吉和园一带，其次在紫柏山——江口断裂（F<sub>4</sub>）以南也有出露。中泥盆统以古道岭组为代表，岩性以灰——深灰色灰岩、生物灰岩为主夹泥灰岩、泥岩、板岩等。上泥盆统以星红铺组为代表、岩性为灰色千枚岩为主夹薄层泥灰岩、砂岩、页岩等，有燕山期和印支期花岗闪长岩侵入。该组岩层易风化破碎，为滑坡泥石流提供了基础条件。该两组岩

性的接触带往往发育铅锌矿带。

#### D、石炭系(C)

主要分布在小峪河的文家店、徐家崖一带和紫柏山——江口断裂(F<sub>4</sub>)以南的水磨坪一带。

#### E、二叠系(P)

分布在酒奠梁——板岩镇断裂(F<sub>3</sub>)南侧附近和紫柏山——江口断裂(F<sub>4</sub>)北侧附近。岩性为炭质砂质板岩、砂岩与灰岩、砾状灰岩互层。

### (3) 中生界(Mz)

#### A、三叠系下统(T<sub>1</sub>)

分布在酒奠梁——板岩镇断裂(F<sub>3</sub>)和紫柏山——江口断裂(F<sub>4</sub>)之间地带。岩性为具有复理石韵律的钙质粉砂岩，粉砂质板岩与薄层灰岩互层。有白云岩矿脉。

#### B、侏罗系中统(J<sub>2</sub>)

分布在青峰院——胡家窑一带。岩性为粉砂质泥岩、粉砂岩夹砂砾岩、炭质泥岩及煤线(或薄煤层)。

#### C、白垩系下统东河群(K<sub>1</sub>dh)

分布在草店子——凤州——烈士崖沟——唐沟口——平木一带。岩性：下部以红色巨厚层砾岩为主，中上部为杂色砂砾岩夹砂质泥岩、砂质及炭质页岩、泥质粉砂岩，局部含劣质煤层。

### (4) 新生界(Kz)

#### 第四系(Q)

第四系为一套松散堆积层，按成因可分为冲积层、洪积层、风积层、坡积层及残积层。

冲积层，主要分布在河床、漫滩及各级堆积阶地部位。岩性为砂砾卵石及粉质粘土、粉土。

洪积层，主要分布在各大冲沟口，岩性为砾卵石与砂、泥的混合物。

风积层，主要保留分布在双石铺——凤州及安河北侧一带的平缓山坡及河流二级以上的阶地表面。岩性为淡黄色黄土夹多层古土壤层，具垂直节理和大孔隙。

残积层，为留存在原地的岩质风化产物，岩性主要为碎石土。

坡积层，分布在斜坡的坡麓或缓坡地带。为残积碎石土或风积黄土风化产物经重力

或坡面流水搬运再沉积的产物，岩性为碎石土和黄土状土。

#### (5) 侵入岩 (Y)

主要分布在瓦窑湾——红花铺——沙巴街一线以北广大地区，其次是侵入于上述下元古界、奥陶系、泥盆系之中。为各期侵入岩，岩性主要为斑状黑云母二长花岗岩、似斑状黑云角闪二长花岗岩、片麻状黑云母二长花岗岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等。

#### 4. 新构造活动

喜马拉雅运动，以断块运动为主，秦岭主脊急骤上升，渭河谷地相对下陷，秦岭山地作北仰南俯的倾斜变动，凤县地区有抬升变慢特点。主要表现在以下两方面：

(1) 从地貌看，总体上北高南低。北部河流下切作用强烈，形成“V”型和“U”型谷，南部河流的侧蚀作用有所增强，蛇曲增大，河谷多呈现“U”型和“U”型谷，宽谷盆地及堆积阶地发育。

(2) 从构造看，断陷作用形成了白垩系断陷盆地。

#### 5. 地震

凤县处于渭河及汉水流域地震活动带之间，地震活动相对较弱。元代至今有记载的地震 23 次，多系外省或邻县波及，历史上未发生过地震引起的重大伤亡。在全国地震烈度区划图上，凤县境内的地震基本烈度为 VI-VII 度。

#### 6. 水文地质条件

境内水系属长江水系。八方山将境内水系又分成汉江水系和嘉陵江水系。嘉陵江由北东向南西斜贯县境，河床纵比降 66%，境内流长 72km，流域面积 2494.03km<sup>2</sup>，占全县面积的 78%，年平均流量 18.41m<sup>3</sup>/s，年径流量 5.81×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

中曲河(西河)系汉江水系褒河一级主要支流，境内流长 35km，流域面积 669.94km<sup>2</sup>。

根据地下水的赋存状态，可以将境内含水岩组分为第四系松散岩类孔隙含水岩组和前第四系基岩裂隙含水岩组两大类型。

#### 7. 人类工程活动

凤县地处秦岭山区，人们沿江河、沟道居住，以高程<1500m 的低中山和河谷区为主要活动区；>1500m 的中山、高中山区，有采矿和林业活动。与地质灾害相关的工程活动类型主要有农耕、建房、修路、矿山开采等。

## 6.2 研究区地质环境质量评价

陕西省凤县是陕西省“县(市)地质灾害调查与区划”项目重点调查县(市)之一。2001年7月~10月,陕西工程勘察研究院对其完成了野外调查工作,本次野外调查工作手图比例尺为1:50000,数字化地图比例尺为1:100000,作者部分参加了该项工作。

### 6.2.1 工作流程

根据本项工作的野外调查、有关研究报告,在对资料进行分析后,经过指标筛选优化,选取地形坡度、工程地质岩组、岩土体结构类型、地下水位、植被发育情况、月平均降雨量以及人类工程活动强度作为主要评价指标,将地质环境质量分为优、良、中、差四个等级,建立评价指标体系。根据凤县年降雨量月分配及地质灾害受雨量影响的特点,降水集中在7、8、9月,而且并非每年地质灾害全境群发,故可初步认为月降水量<133mm,一般不会出现群发性地质灾害。选取7、8、9月月平均降雨量作为评价指标,并将表3-1的分级标准适当下调,如表6-1所示。

表6-1 凤县月平均降雨量分级标准

地质环境质量 分级标准	优(I)	良(II)	中(III)	差(IV)
月平均降雨量 (mm)	<80	80-133	133-224	>224

通过层次分析法计算,计算各指标的权重,取平均值得到最终权值,见表6-2。

表6-2 凤县地质环境质量评价指标权重表

指标	地形坡度	工程地质岩组	岩体结构类型	地下水位	植被覆盖率	月平均降雨量	人类工程活动强度
权重	0.1048	0.3510	0.1593	0.0687	0.0313	0.0455	0.2393

层次分析法计算界面见图6-2、6-3。

凤县地质环境质量评价的具体工作流程为:

#### 1. 数字化处理

采用MAPGIS对研究区基础资料进行数字化处理,然后对基础图件进行分层式管理。

#### 2. 建立凤县地质环境评价空间数据库

- 图形数据库

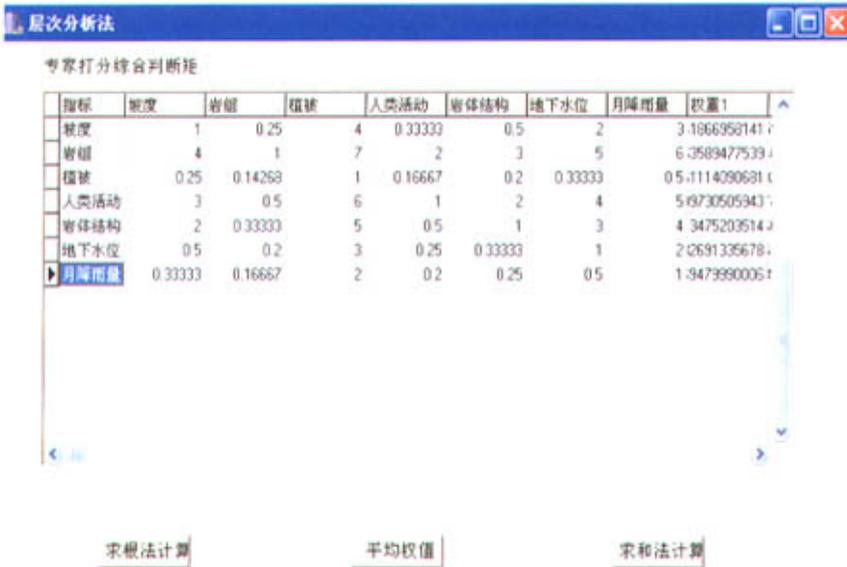


图 6-2 层次分析法指标评判矩阵



图 6-3 层次分析法指标权重计算结果

将基础资料划分成以下图层：

- 1：100000 凤县基本地理图层（线文件）
- 1：100000 凤县基本地理图层（点文件）
- 1：100000 凤县地形等高线图层（线文件）
- 1：100000 凤县地貌图层（区文件）
- 1：100000 凤县地层岩性图层（区文件）
- 1：100000 凤县地质构造图层（线文件）
- 1：100000 凤县矿产分布图层（区文件）
- 1：100000 凤县灾害分布图层（点文件）
- 1：100000 凤县灾害分布图层（线文件）

• 属性数据库

属性数据包括对图形进行描述或说明的数据及用于进行评价的基础数据，如高程信息、地质灾害点描述等（见图 6-4、6-5），属性数据通过 Access 数据库进行录入、管理，MAPGIS 通过接口进行调用。

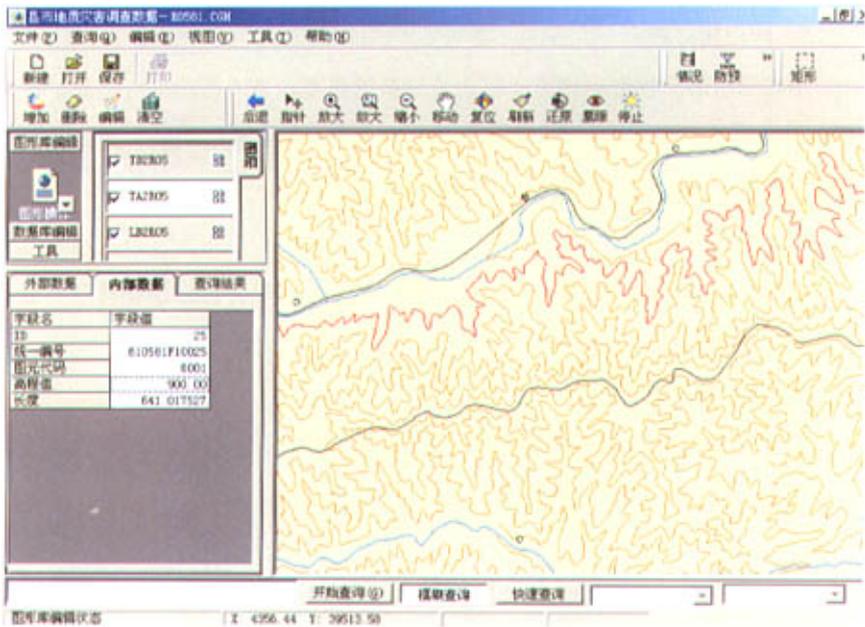


图 6-4 等高线属性与图形数据互动界面

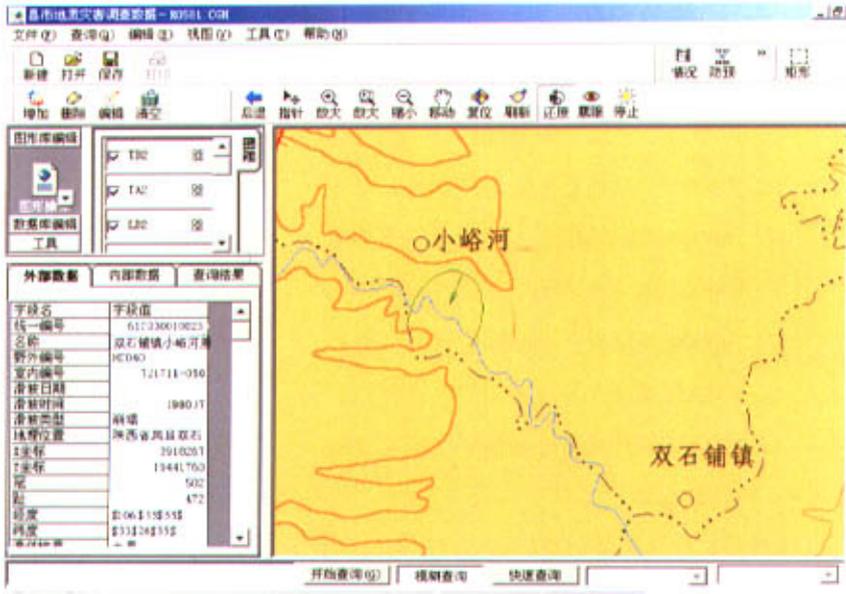


图 6-5 灾害信息与图形数据互动界面

### 3. 网格化处理

基础图层的空间数据模型往往为矢量数据模型，当进行地质环境质量评价时，需要将矢量模型转换为栅格模型，即进行网格化处理。本文采用  $2\text{km} \times 2\text{km}$  的单元网格作为评价分析的计算单元，把凤县分为 859 个单元网格。

### 4. 评价分析

完成上述步骤后，用评价模块进行分析计算，两种评价模型计算分析过程如下：

#### (1) 模糊综合评判模型

##### ① 评价指标量化

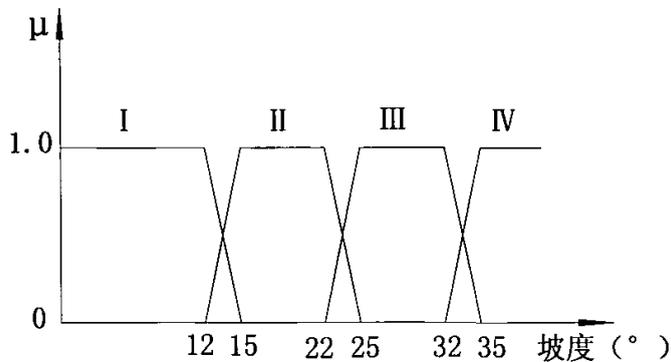
对于定性指标，依据分级标准，采用专家经验法，直接给出指标隶属度值，为简化计算，将地下水位也作为定性指标进行处理，见表 6-3。

表 6-3 凤县地质环境质量评价定性指标量化取值表

工程地质岩组	坚硬岩体 (1)	中等坚硬岩体 (2)	软弱岩体 (3)	松散体 (4)
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$
岩体结构类型	块状	层状	碎裂状	散状
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$
人类工程活动	无 (1)	轻 微 (2)	中 等 (3)	强 烈 (4)
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$
地下水位	滑面以下较深处 (1)	滑面以下较浅处 (2)	滑面附近 (3)	滑体 1/2 厚度处 (4)
隶属度	$\mu_I=1 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=1$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=1 \mu_{IV}=0$	$\mu_I=0 \mu_{II}=0$ $\mu_{III}=0 \mu_{IV}=1$

对于定量指标，利用隶属度函数将实测值转化为隶属度值，由（4-1）~（4-8）式计算。凤县地质环境质量评价定量指标中，地形坡度、月平均降雨量为递增型指标，植被覆盖率为递减型指标，其隶属度函数图形及计算公式分别如下：

地形坡度：



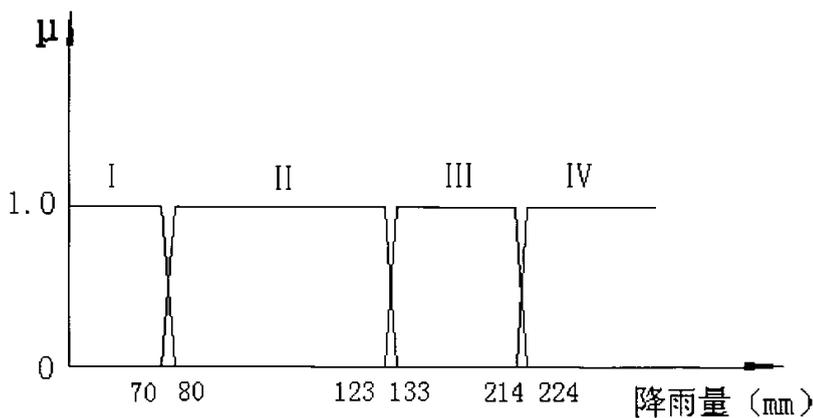
$$\mu_I = \begin{cases} 1 & x < 12 \\ \frac{15-x}{3} & 12 \leq x \leq 15 \\ 0 & x > 15 \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 12 \\ \frac{x-12}{3} & 12 < x < 15 \\ 1 & 15 \leq x \leq 22 \\ \frac{25-x}{3} & 22 < x < 25 \\ 0 & x \geq 25 \end{cases} \quad (6-2)$$

$$\mu_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 22 \\ \frac{x-22}{3} & 22 < x < 25 \\ 1 & 25 \leq x \leq 32 \\ \frac{35-x}{3} & 32 < x < 35 \\ 0 & x \geq 35 \end{cases} \quad (6-3)$$

$$\mu_{IV} = \begin{cases} 0 & x \leq 32 \\ \frac{x-32}{3} & 32 < x < 35 \\ 1 & x \geq 35 \end{cases} \quad (6-4)$$

月平均降雨量:



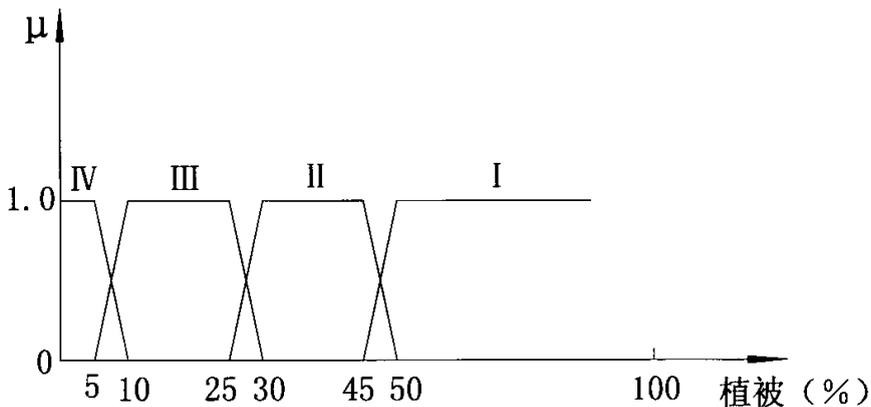
$$\mu_I = \begin{cases} 1 & x < 70 \\ \frac{80-x}{10} & 70 \leq x \leq 80 \\ 0 & x > 80 \end{cases} \quad (6-5)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 70 \\ \frac{x-70}{10} & 70 < x < 80 \\ 1 & 80 \leq x \leq 240 \\ \frac{250-x}{10} & 240 < x < 250 \\ 0 & x \geq 250 \end{cases} \quad (6-6)$$

$$\mu_{\text{III}} = \begin{cases} 0 & x \leq 240 \\ \frac{x-240}{10} & 240 < x < 250 \\ 1 & 250 \leq x \leq 340 \\ \frac{350-x}{10} & 340 < x < 350 \\ 0 & x \geq 350 \end{cases} \quad (6-7)$$

$$\mu_{\text{IV}} = \begin{cases} 0 & x \leq 340 \\ \frac{x-340}{10} & 340 < x < 350 \\ 1 & x \geq 350 \end{cases} \quad (6-8)$$

植被覆盖率:



$$\mu_{\text{I}} = \begin{cases} 0 & x \leq 45 \\ \frac{x-45}{5} & 45 < x < 50 \\ 1 & 50 \leq x \leq 100 \end{cases} \quad (6-9)$$

$$\mu_{\text{II}} = \begin{cases} 0 & x \leq 25 \\ \frac{x-25}{5} & 25 < x < 30 \\ 1 & 30 \leq x \leq 45 \\ \frac{50-x}{5} & 45 < x < 50 \\ 0 & x \geq 50 \end{cases} \quad (6-10)$$

$$\mu_{\text{III}} = \begin{cases} 0 & x \leq 5 \\ \frac{x-5}{5} & 5 < x < 10 \\ 1 & 10 \leq x \leq 25 \\ \frac{30-x}{5} & 25 < x < 30 \\ 0 & x \geq 30 \end{cases} \quad (6-11)$$

$$\mu_{\text{IV}} = \begin{cases} 1 & x < 5 \\ \frac{10-x}{5} & 5 \leq x \leq 10 \\ 0 & x > 10 \end{cases} \quad (6-12)$$

② 按上述方法求得评价指标量化取值后, 构造模糊综合评判矩阵  $R$ 。  $R$  矩阵中每

一行元素对应一个指标的单因素评判，每个计算单元对应一个具体的评判矩阵。

③ 将指标权向量  $A$  与模糊评判矩阵  $R$  合成，计算评判结果矩阵  $B = A \cdot R$ ， $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ，( $0 \leq b_j \leq 1$ )。

④ 根据单元最大隶属度  $b_i = \max_{1 \leq j \leq n} \{b_j\}$  所对应的值，确定单元地质环境质量等级为  $i$ 。

模糊综合评判模型计算界面如图 6-6 所示。



图 6-6 模糊综合评判模型计算界面

## (2) 信息量模型

① 选择评价因素，并按差异性原则将因素进行不同状态的划分，确定评价变量：

② 利用 (4-11) 式计算各变量提供地质灾害的信息量，结算结果见表 6-4：

③ 利用 (4-12) 式计算某一单元多个评价变量组合条件下，提供地质灾害的总信息量：

④ 根据评价区信息量综合评价值的分布特点，依据信息量值的大小将评价区域地质环境质量划分成四个等级：

地质环境质量优区： $I < -1.7$ ；

地质环境质量良区： $-1.7 \leq I < -0.7$ ；

地质环境质量中区： $-0.7 \leq I < 0.7$ ；

地质环境质量差区： $I \geq 0.7$ 。

表 6-4 评价变量信息量值计算表

因素	状态	变量	信息量值
岩性	松散软弱岩类	$X_1$	0.129
	层状中等坚硬岩类	$X_2$	0.416
	层状较坚硬岩类	$X_3$	-0.811
	块状坚硬岩类	$X_4$	0
坡度	$<15^\circ$	$X_5$	0
	$15-25^\circ$	$X_6$	-0.912
	$25-35^\circ$	$X_7$	-0.775
	$>35^\circ$	$X_8$	0.067
人类工程活动	强烈	$X_9$	0.523
	中等	$X_{10}$	0.319
	轻微	$X_{11}$	-0.289
	无	$X_{12}$	-0.797
地下水作用	有	$X_{13}$	0.302
	无	$X_{14}$	-0.214

### 6.2.2 评价结果分析

两种评价模型评价结果分别如图 6-7、6-8、6-10、6-11：

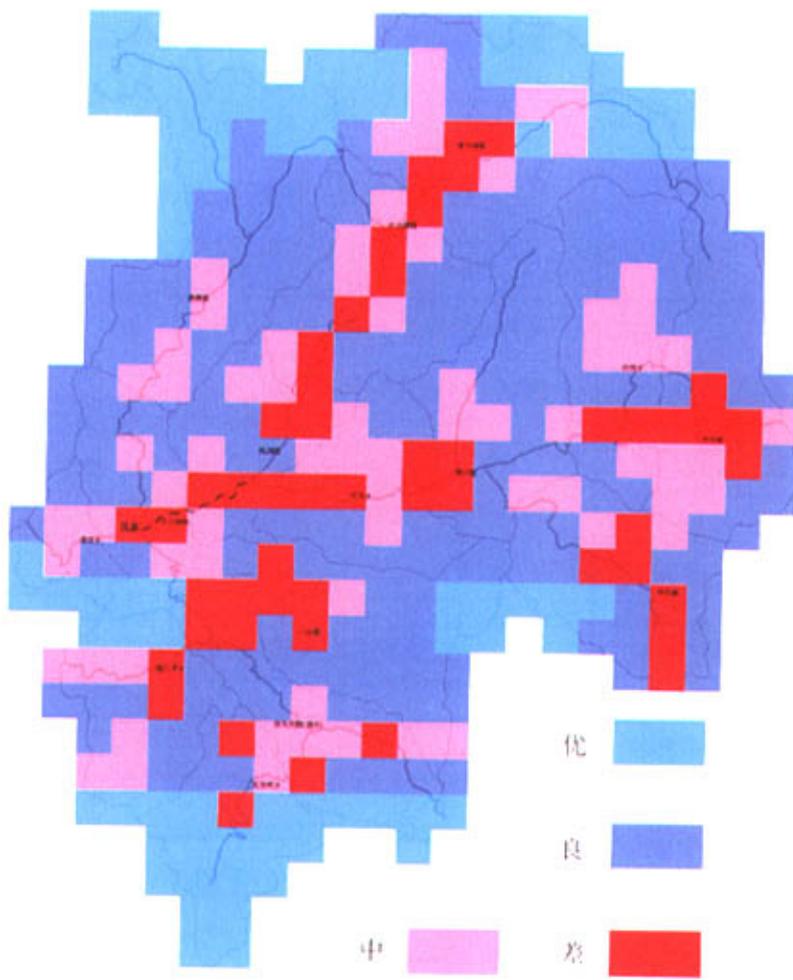


图 6-7 模糊综合评判模型评价结果

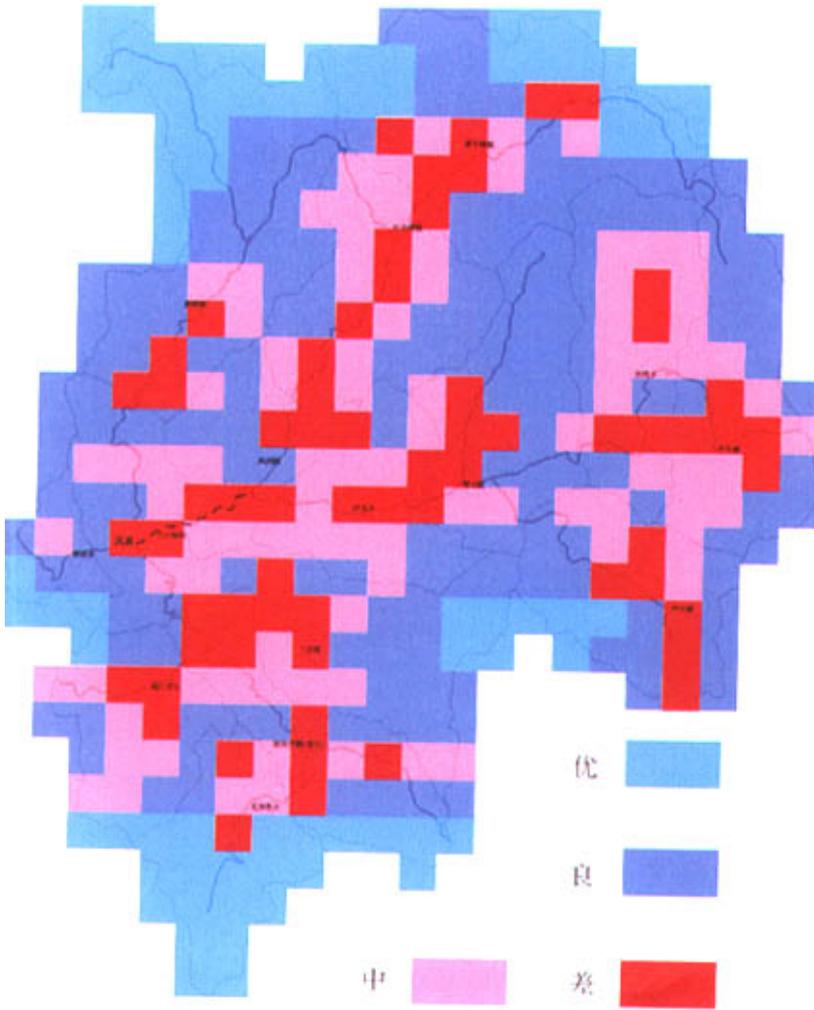


图 6—8 信息量模型评价结果

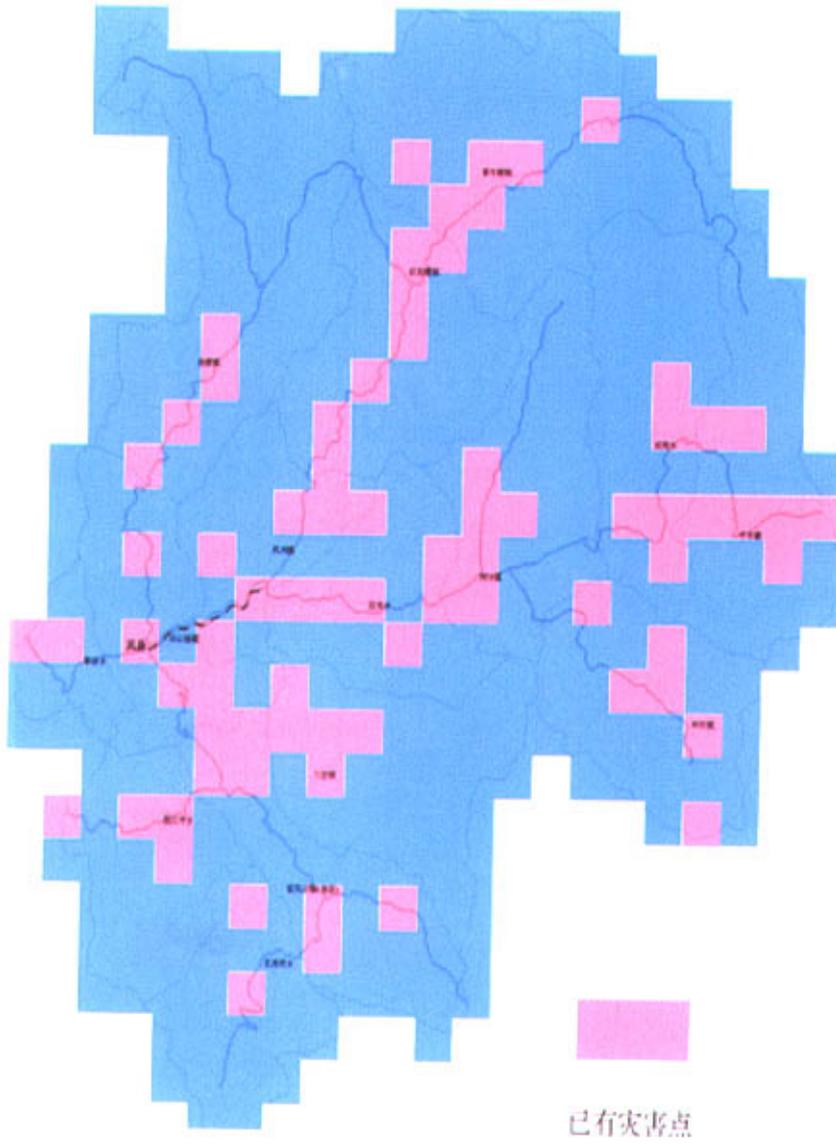


图 6-9 凤县已有地质灾害分布图

由两种分区图可以得出如下结论：

- 地质环境质量较差的地段与已有地质灾害分布位置具有较好的对应关系，这同时也说明了评价结果的准确性；
- 从分析评价结果看，两种模型得出的结论比较接近，模糊综合评判模型较合理地反映了凤县地质环境质量状况；由于夸大了人类工程活动的影响，信息量模型对局部地段的评价失真，但地质环境质量较差的地段与实际调查基本吻合；
- 如果网格数量过大，即评价单元太多的话，评价预测模型的分析运算需要花费大量的时间，本次评价设定  $2\text{km} \times 2\text{km}$  的计算网格，将评价区分为 859 个单元，所以计算精度不是很高。

## 第七章 结论与建议

区域地质环境质量定量评价一直是环境地质学研究的难点，GIS 系统的引入为解决这一问题提供了新的技术手段和方法，本文通过对区域地质环境质量评价 GIS 系统的研究，得出了以下结论与建议：

1. 区域地质环境质量是一个由众多因素确定的复杂系统，要对其进行评价，首先必须建立一套全面、合理的指标体系和分级标准。本文在前人研究成果的基础上，建立了区域地质环境质量评价的指标体系和分级标准。

2. 对区域地质环境质量进行评价时，若选取的指标过多，缺乏可操作性，指标太少，评价会失真，因此评价指标体系建立之后，必须有针对性地进行指标的筛选与优化。本文采用两两比较法和主成分分析法对评价指标进行筛选与优化。

3. 要实现对区域地质环境质量的定量评价，必须对评价指标进行量化。依据评价模型的特点，本文主要采用模糊隶属度对评价指标进行了量化：对于定量指标，采用模糊隶属度函数将原始观测值转化为隶属度，对于定性指标，采用专家经验隶属度取值。

4. 对评价指标进行量化之后，要根据区域地质环境质量评价的特点，选取合适的数学模型进行评价。本文选取了模糊综合评判及信息量两种模型。

5. GIS 系统本身不具备评价分析功能，必须开发外部评价模块进行系统集成。本文以 MAPGIS6.5 为平台，采用 C++Builder6.0 开发外部评价模块，以独立可执行程序方式实现系统的集成。

6. 系统集成之后，要通过一定的实例分析验证系统评价的准确性。本文结合陕西省凤县调查区，在大量野外实地调查资料的基础上，建立了凤县地质环境质量评价空间数据库，并对其进行了评价分析，结果表明系统评价结论可靠，可为凤县地质环境开发、利用和保护提供一定的参考依据。

## 参考文献

- [1] 邬伦, 刘瑜等. 地理信息系统原理、方法和教程. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 张超等. 地理信息系统实习教程. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] 陈佳. 信息系统开发方法教程. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 张犁. GIS 系统集成的理论与实践. 地理学报, 1996(7).
- [5] 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. 成都理工学院学报, 2001, Vol.28(1).
- [6] 张桂荣, 殷坤龙等. 基于 GIS 的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划. 中国地质灾害与防治学报, 2003, Vol.14(4).
- [7] 毕海良. 信息量法在西宁市斜坡稳定性评价中的应用. 水文地质与工程地质, 1998 (4) .
- [8] 周旭章, 范真祥等. 模糊数学在化学中的应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [9] 刘增良等. 模糊逻辑与神经网络—理论研究与探索. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [10] 李德仁等. 空间信息系统的集成与实现. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.
- [11] 陈述彭等. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 郝洪强, 刘志刚. 模糊数学综合评判法在区域地质环境质量评价中的应用. 水文地质与工程地质, 1995 (6).
- [13] 盛骤, 谢式千等. 概率论与数理统计 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [14] 同济大学数学教研室编. 线性代数 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [15] 黄润秋, 沈芳等. 山区流域地质环境评价与地质灾害预测的 GIS 系统. 成都理工学院, 2000.
- [16] 胡秀芳. 基于 GIS 的草原生态安全模糊评价研究 (硕士论文). 西北师范大学, 2004.
- [17] 冯保成编. 模糊数学实用集粹. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [18] 李凤全, 林年丰. 神经网络和地理信息系统耦合方法在地下水水质评价中的应用. 长春科技大学学报, 2001, Vol.31(1).
- [19] 王珊, 陈红. 数据库系统原理教程. 北京: 清华大学出版社, 2001

- [20] 龚健雅等. 矢量与栅格集成的三维数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, Vol.22(1).
- [21] 鹿爱莉等. 建立地质灾害调查项目社会评价指标体系. 资源·产业, 2003.
- [22] 沈芳. 山区地质环境与地质灾害危险性区划的 GIS 系统 (博士论文). 成都理工大学, 2001.
- [23] 宋飞. 基于 GIS 的地质环境质量评价 (硕士论文). 长安大学, 2002.
- [24] 毋河海等. GIS 空间数据结构与处理技术. 北京: 测绘出版社, 1997.
- [25] 王存玉. 人为地质灾害和地质环境. 工程地质学报, 1997, Vol.5(4).
- [26] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理. 北京: 地质出版社, 1990.
- [27] 王士同. 模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1998.
- [28] 吕凤翥. C++语言基础教程. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [29] 曾满平, 刘华. C++Builder4.0 数据库开发实例精解. 北京: 北京希望电子出版社, 2000.
- [30] 杨宗志. C++Builder 数据库程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [31] 李亚美, 陈国勋等. 地质学基础. 北京: 地质出版社, 1993.
- [32] 陈明辉. GIS 数据接口的研究与应用 (硕士论文). 中南大学, 2004.
- [33] 乔晓英, 王文科. 基于 GIS 的冯家山灌区地质环境评价研究. 西安工程学院学报, 2002, Vol.24(1).
- [34] 蔡鹤生, 周爱国, 唐朝辉. 地质环境质量评价中的专家一层次分析定权法. 中国地质大学学报, 1998, Vol.23(3).
- [35] 陈述云, 张崇甫. 多指标综合评价方法及其优化选择研究. 数理统计与管理, 1994.
- [36] 陈伟海等. 桂林市三维地形立体显示与分析系统. 国土资源遥感, 2000 (3).
- [37] 胡金星等. 三维地学模拟体可视化技术的应用研究. 煤炭学报, 1999, Vol.24(4).
- [38] 郭际元, 曾文. MAPGIS 地理信息系统的二次开发. 测绘信息与工程, 2000 (1).
- [39] 中国地质大学(武汉)信息工程学院等. MAPGIS6.5 参考手册. 武汉, 2003.
- [40] 中国地质大学(武汉)信息工程学院等. MAPGIS 地理信息系统使用手册 (空间分析篇). 武汉, 2001.
- [41] 中国地质大学(武汉)信息工程学院等. MAPGIS(32 位版)开发手册. 武汉, 1998.

- [42] 赵建军. 金沙江下游(向家坝—溪落渡段)河段岸坡稳定性量化评价(硕士论文). 成都理工大学, 2004.
- [43] 林年丰, 李昌静等. 环境水文地质学. 北京: 地质出版社, 1990.
- [44] 王成良. 图形关联信息的数据库查询及应用. 重庆大学学报, 2002, Vol.25(1).
- [45] 中国地质环境监测院. 《县(市)地质灾害调查与区划》项目空间数据库系统建设技术要求. 北京, 2001.
- [46] 李相然. 滨海城市工程地质环境质量评价理论与应用研究(博士论文). 西安工程学院, 1998.
- [47] 林斌, 宋飞. 陕西省凤县地质灾害调查与区划报告. 长安大学, 2003.
- [48] 相建华. 基于 GIS 的中国区域地壳稳定性评价(硕士论文). 长安大学, 2004.
- [49] 古天锋. GIS 支持下的城市地质环境评价研究(硕士论文). 西北大学, 2004.
- [50] M.CANCES, F.FONT, M.GAY. Principles of Geographic Information Systems Used for Earth observation Data. Surveys in GeoPhysics, 2000(21).
- [51] CEES j.VAN WESTEN. The Modelling of Landslide Hazards Using GIS. Survey in Geophysics, 2000(21).
- [52] F.C.Dai, C.F.Lee, X.H.Zhang. GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use Planning:a case study. Engineering Geology, 2001(61) .
- [53] Chung, C-joF, Fabbri AG, Van Westen C J. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation[A].carrar A and Guzzetti F.Geographical information system in assessing natural hazards. Academic Publishers, 1995.
- [54] G.FERRIER, G.WADGE. An integrated GIS and knowledge-based as an aid for the geological analysis of sedimentary basins. INT.J.Geographic Information Science, 1997, Vol.11(3).
- [55] Armstrong MC, Densham PJ. Database organization strategies for spatial decision support systems. Geographic information, 1990, Vol.4(1).

## 致 谢

在论文完成之际，特向关心、支持和帮助过我的老师、朋友和同学表示衷心的感谢！

本文是在导师赵法锁教授的悉心指导下完成的，从论文的选题、研究思路、野外调查到论文的撰写、修改、完成都倾注了赵老师的心血。三年以来，赵老师在学习、生活上给予了我无微不至的关心和照顾，使我能够顺利完成学业；赵老师严谨的治学作风、精湛的学术造诣和崇高的思想品德使我深受教益，也是我今后学习的楷模。师母张春风老师乐观豁达的生活态度以及无微不至的关怀使我终生难忘。

感谢单位对我学习的支持，感谢地质高级工程师刘湛省对我工作和学习上的无私帮助和支持。

感谢学校陈志新、史澎海、张惠侠、倪万魁等老师对我学习和工作上的谆谆教诲和无私帮助。

感谢研究生部张骏、刘社华二位老师对我学业上的关心和帮助。

特别感谢同门南亚林、史春梅、娄月红、曹军、程传录、李剑、李亚军、柳小燕、王东红、张高明、张景春、巨天力、张成增、谷峪等在学习上给予过本人的支持与帮助。

衷心感谢我妻魏兴丽和李永红、苗壮等同学对论文提供的建议和帮助。

最后，我要特别感谢我的家人，正是他们无私的奉献，支持着我在工作和求学路上不断前行。