# 长江三峡库区地质灾害空间评价预警研究

刘传正　李铁锋　温铭生　王晓朋　　杨　冰

（中国地质环境监测院　　北京　100081）

**[摘要]** 通过全面野外调查，填表登录了三峡库区（19 县（区），54175km$^2$）地质灾害点 5706 处。采用数字化地形底图，通过编制三峡库区工程地质图层，建立了基于 MapGIS 的三峡库区地质灾害空间数据库和分层图形库。在研究三峡库区地质灾害分布与的统计关系基础上，筛选提取了地质灾害空间评价预警研究的发育因子（响应因子）、基础因子、诱发因子和易损因子体系。创建了区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法（AMFP）。采用网格剖分整个区域，分别计算了三峡库区地质灾害“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”（简称“四度”）分布，采用图斑合并方法分别编制了相应的“四度”区划图。根据“四度”区划结果分别提出了三峡库区地质灾害监测预警与防治区划和地质环境开发利用的对策。

**[关键词]** 三峡库区　地质灾害　MapGIS　“发育度”　“潜势度”　“危险度”　“危害度”

## 1　概述

三峡库区地质灾害综合调查项目工作范围位于东经 106°～111°，北纬 29°～31°21′，行政区划跨越重庆市和湖北省的 19 县（区），包括湖北省的宜昌、兴山、秭归和巴东 4 县，重庆市的巫山、巫溪、奉节、云阳、万州、开县、忠县、石柱、丰都、涪陵、武隆、长寿、渝北、巴南和重庆主城区等 15 县（区），总面积约 54175km$^2$（图 1）。

### 1.1　工作基础

三峡工程建设前的地质工作主要围绕三峡坝区和区域地壳稳定性开展，三峡库区地质灾害调查研究工作直到 20 世纪 90 年代随着移民工程建设遭遇地质灾害严重困扰才逐步受到重视。三峡库区重要的代表性地质工作可分为三个阶段：

（1）20 世纪 50－70 年代，以中小比例尺的区域地质调查为主，对三峡库区基础地质研究较为详细。

（2）20 世纪 80 年代，结合国家“六五”、“七五”科技攻关计划，先后开展了三峡工程库岸稳定性研究、重大崩塌滑坡监测预报及减灾对策研究、三峡工程前期论证阶段环境工程地质调查、长江三峡工程库岸调查与稳定性预测、长江三峡工程库岸典型和大型崩塌滑坡形成条件、破坏机制及稳定性研究等。

（3）20 世纪 90 年代，重点开展了城镇移民选址的地质论证、地质勘查与评价工作。如拟迁城市新址地质论证、三峡工程库岸稳态评价预测、长江三峡工程水库移民与开发环境地质研究、1∶50 万以地质灾害调查为主的区域环境地质调查和移民城市重大地质灾害防治工程研究等。

### 1.2　工作思路

依据区域地质灾害评价预警研究的递进分析理论与方法，全面研究三峡库区地质灾害发育状况、地质环境条件组合、地质灾害发生可能性和可能的危害性。基于地理信息系统（GIS）技术，实现数据和图形的实时查询或更新，实现 GIS 技术与数学模型耦合的空间评价预警递进分析[1]。

在 19 县（区）地质灾害调查成果基础上，研制完成三峡库区地质灾害信息系统（数据库、图形库），根据地质灾害分布与地质环境的相关性分析，建立地质灾害评价预测的因子体系（基础因子、回应因子、诱发因子和易损因子），进行三峡库区地质灾害空间“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”计算与区

划。

工作任务是开展地质灾害诸灾种的实地调查、分析评价及区划研究。调查灾种主要包括崩塌（含危岩体）、滑坡、泥石流、岩溶地面塌陷、地裂缝、不稳定斜坡和水库岸坡稳定性等。调查内容包括各灾种的特征、地质环境、成灾历史、目前动态和可能的危害等。

调查方法采用：(1）野外调查使用 1：5 万比例尺地形图；(2）采用目测与 GPS 技术结合定点；(3）每个点均要求填写统一制定的调查表，并及时录入计算机数据库；(4）调查方法采用专业队伍为主，地方乡镇政府配合，逐个居民点走访；(5）调查重点是 1：5 万地形图上标出的居民点或人类活动点，为保证达到一定规模或重要程度的点不被遗漏，要求使用的地形图尽可能新。

根据《县市地质灾害调查基本要求》和《地质灾害调查技术要求》(1：500000—1：2500000)，专门编制了《三峡库区地质灾害综合调查实施细则》作为工作技术标准。

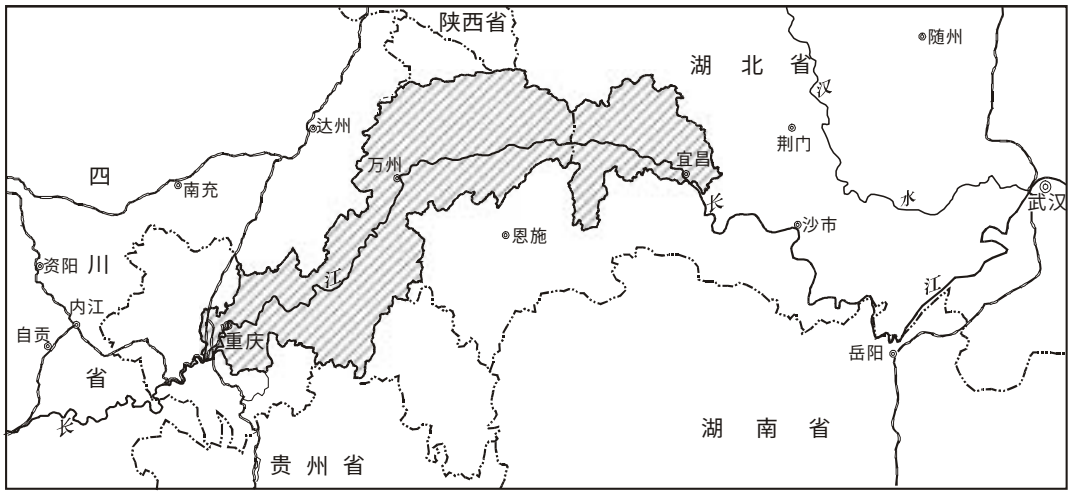



图 1　长江三峡库区地质灾害调查区位置图

## 2　三峡库区地质环境

三峡库区区域地质环境具有明显的东西分异现象，在地理、气象和地质构造等方面都存在明显特征。

(1）三峡库区位于中国三大地貌阶梯的第二级阶梯东缘，地处亚热带气候区，库区内河流水系发育，水能资源丰富。

(2）以奉节为界，三峡库区东西两侧的地形地貌和地层岩性等存在明显差异。奉节以西为川东中低山丘陵宽谷，地层主要为三迭系和侏罗系红色碎屑岩沉积，地貌形态严格受地质构造控制，背斜成山、向斜成谷，形成与构造格架一致的“窄岭宽谷”侵蚀、剥蚀中低山丘陵。奉节以东至宜昌库段，地层主要为元古界变质杂岩、震旦系和下元古界碳酸盐岩和碎屑岩，以大巴山脉和巫山山脉为骨架，形成以中山、低山和峡谷为主的侵蚀地貌景观。

(3）区域地质构造总体上呈现一系列弧形褶皱构造组合，北部大巴山弧形褶皱带、西部川东褶皱带和南部八面山弧形褶皱带分别汇聚于黄陵背斜的西侧，挤压形成秭归向斜盆地。控制性断裂构造相对稀疏，仅在库区东部较发育。主要构造形迹是黄陵背斜、秭归向斜、巴东—奉节褶皱带、仙女山断裂、九湾溪断裂、大巴山弧形褶皱带、川东褶皱带和齐岳山断裂等。

(4）三峡库区经历了三次较大的构造运动，燕山运动奠定了本区的基本构造格架，喜马拉雅运动在本区表现为在燕山运动晚期以来形成的隆起区和拗陷区发生作用，以区域性掀斜和升降运动为主。间歇式的区域性掀斜运动在库区内形成了分布广泛的五级夷平面、高陡的河谷岸坡和长江河谷内的五级阶地。黄陵背斜两侧表现为差异性的断裂活动，如仙女山断裂、九湾溪断裂等断层至今仍在活动。三峡地区有记载的最大地震震级 Ms5.1，震中烈度为Ⅶ度（秭归县龙会观，1979-5-22)。

（5）区域地下水赋存类型主要为松散岩类孔隙水、碎屑岩类层间裂隙水、碳酸盐岩类岩溶水和基岩裂隙水等四种。大气降水入渗是地下水的主要补给来源，岩溶地下水资源较为丰富。

（6）三峡地区自然生态环境条件优越，生物、能源、矿产和旅游资源丰富。随着移民迁建城镇的兴建、城市规模的扩大以及码头、公路、输电和通讯等基础设施的建设，将极大地推动三峡库区的社会和经济发展，而人类活动规模和强度的加剧，也会对自然地质环境产生不利的影响，成为三峡库区诱发地质灾害的重要因素。

## 3　三峡库区地质灾害基本特征

本项目调查发现，三峡库区地质灾害类型主要是滑坡（变形斜坡或不稳定斜坡）、崩塌、危岩体、泥石流、地面塌陷、地裂缝和库岸再造等。滑坡和崩塌是库区内最主要的地质灾害类型，其次为泥石流、地面塌陷、地裂缝等灾害。大量的不稳定斜坡属于潜在地质灾害发育点，三峡水库库岸再造主要发生在长江干流及其一级支流水系的两侧。

三峡库区地质灾害综合调查以县为单元进行，共完成调查面积 54175km$^2$，野外实际调查点 7068 个，发现并登记灾害点数 5706 个，其中滑坡 3830 处，占 67%；崩塌 549 处，占 9.6%；泥石流 90 处，占 1.6%；地面塌陷 85 处，占 1.5%；地裂缝 45 处，占 1%；不稳定斜坡 1107 处，占 19.3%。在现有的 5706 处地质灾害中以小型者居多，共登录 3658 个，占总数的 64.11%；巨型地质灾害点 93 处，占地质灾害总数的 1.6%（图 2）。

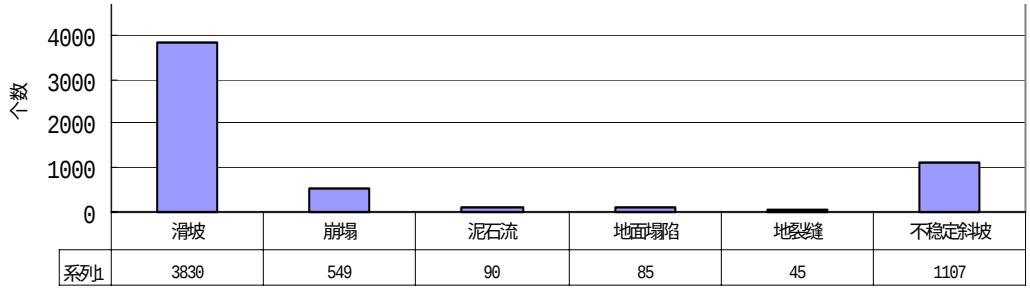



图 2　三峡库区地质灾害类型分布直方图

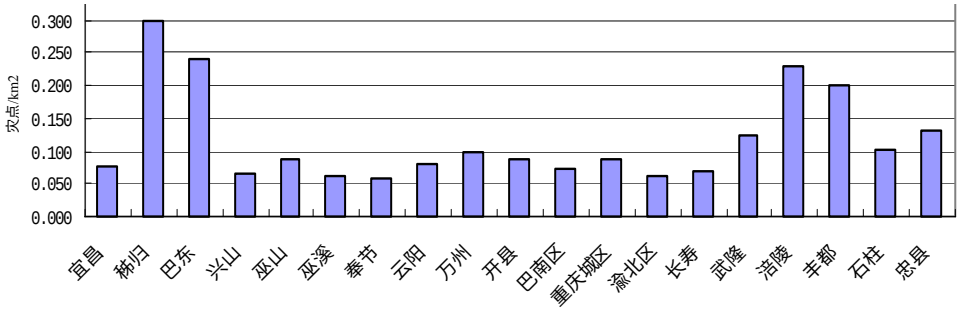



图 3　　三峡库区 19 县（区）地质灾害发育密度直方图

三峡库区地质灾害点分布频数为 0.105 个/km$^2$，秭归、巴东、涪陵、丰都和忠县等 5 县（区）地质灾害较发育（图 3）。秭归县共记录各类地质灾害点 694 处，其中滑坡 514 处，崩塌 35 处，灾害点分布占全县国土面积的 2.4%，地质灾害分布频数为 0.298 个/km$^2$。巴东县共记录各类地质灾害 586 处，其中滑坡 385 处，崩塌 90 处，地质灾害分布频数为 0.241 个/km$^2$。

## 4　三峡库区地质灾害因子分析

在三峡库区 19 县（区）地质灾害调查基础上，利用 MapGIS 的空间分析功能，编制三峡库区地形、水系、工程地质岩组、地质构造、降雨量等值线和斜坡类型等背景要素以及地质灾害点空间分布的数字图层，研究地质灾害发育、分布与地质环境和诱发因素的关系，为地质灾害空间评价预警因子的提取与赋值，确定各因子的影响程度提供依据。

## 4.1 地质灾害数据库与图形库

三峡库区地质灾害调查数据库建设按照《国家县市地质灾害调查空间数据库建设技术要求》进行。在地理信息系统的基础上结合计算机技术和网络技术开发而成，是地质灾害调查数据录入和浏览查询的专用工具平台。借助于信息系统的图形和数据处理功能，将地质灾害的空间信息及属性信息管理起来，提高图数互查和浏览的效率。同时，支持基于 GIS 的分析计算需要的数据导入导出功能。

数据信息按统一的技术要求由专业人员录入，经责任专家审查后提交使用。

## 4.2 地质灾害与地质环境图层的编制

编图采用国家标准 1:25 万数字化地形图作为地图。由于地质灾害分县调查信息系统采用 MapGIS 平台，编图前首先把基于 Arcinfor 格式的数字化地形图转换成 MapGIS 格式。完成的数字化图层比例尺均为 1:25 万，打印输出的纸质图件比例尺为 1:50 万。

根据调查结果，基于 MapGIS 编制了以下主要图层：

区域数字化地形图（整理）；

工程地质岩组图层；

地质构造形迹图层；

斜坡类型要素图层；

地质灾害点空间分布图层；

降雨量等值线图层（1、3、7 日和年平均）；

地震烈度等值线图层；

人类工程活动方式、强度图层；

……。

## 4.3 地质灾害因子分析

为研究问题方便，本文把地形地貌、地表植被、地层岩性和地质构造等孕育地质灾害的基本地质环境条件称为基础因子，把直接诱发地质灾害的自然营力或人为作用称为诱发因子。因子分析的目的是寻求地质灾害空间分布与各因子的相关性，为定量评价预测三峡库区地质灾害提供确定各因子相对重要性的量化依据。

### 4.3.1 基础因子分析

三峡库区地质灾害基础因子主要是地面高程、斜坡坡度、水系分布、地表植被、工程地质岩组、地质构造形迹和斜坡类型等。

**（1）地面高程**

统计分析地质灾害的高程分布，得出三峡库区地质灾害发育频数从大到小的高程范围（图 4）依次是<250m、（250～400）m、（400～600）m、（600～1000）m、>1000m。

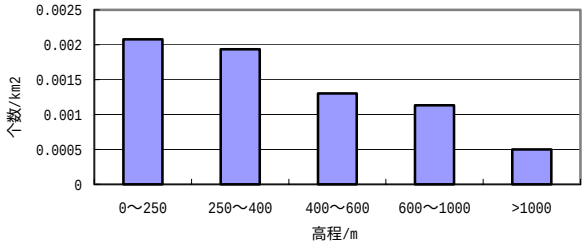


图 4 地质灾害发育密度与地面高程的关系

**（2）斜坡坡度**

三峡库区有利于地质灾害发育的坡度区间（图 5）从大到小依次是：

（10°～25°）＞（0°～10°）＞（25°～40°）＞（40°～60°）＞（60°～90°）

**（3）水系**

水系不仅是一个地区地表径流大小的体现，而且也反映了该地区的沟谷密度和斜坡的长度、高度和坡度。

以水系为中心线，向两侧按不同距离(200m，400m，600m，800m，1000m，1250m)分带后，统计各条带内地质灾害的发育程度，可确定水系对地质灾害的影响距离，简称“影响距”。统计长江干流、一级支流和二级支流附近地质灾害的分布表明，离水系越近，地质灾害密度越大；在距水系 400m 的范围内，地质灾害点数占总数的 57.72%。由此确定水系的影响距为 400m，即从水系向两侧各 400m 范围内的地质灾害与水系的关系比较密切。

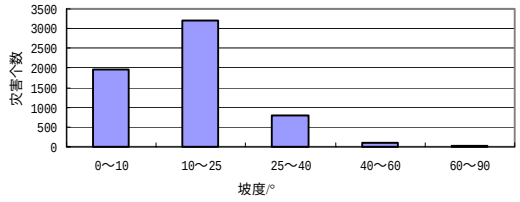



图 5 地质灾害发育密度与斜坡坡度的关系

**（4）植被**

地质灾害与植被有着一定的相关性，当植被盖度为 10%～50%时，地质灾害的分布频数最多（64%），其次为植被盖度小于 10%的区域（30%），当盖度大于 50%时，灾害分布频数最少。

**（5）工程地质岩组**

不同类型岩组地质灾害发育程度的顺序依次为软弱软硬相间层状碎屑岩岩组（SD）＞坚硬厚层状碎屑岩岩组（HD）＞坚硬较坚硬岩溶化碳酸盐岩岩组（HC）＞坚硬较坚硬块状结晶岩岩组（HM）＞软弱松散地层岩组（SQ）。

**（6）地质构造**

三峡库区褶皱轴部附近多为平坦的山脊或谷地地形，褶皱轴部山脊相对平坦的地形宽度一般为 200～300m，设定褶皱构造的“影响距”分析步长为 250m，从距褶皱轴 500m 至 2000m，分 7 个条带，随着与背斜和向斜轴部距离的加大，地质灾害的分布数量逐渐减少，但在距褶皱轴部 1250～1500m 的条带内，灾害数量转为增加的趋势，标志着进入另一个褶皱构造区内。故将褶皱构造和断裂构造的“影响距”确定为 1250m。

地质灾害发育的“影响距”区间从大到小依次是 500m＞（750～1000m）＞（500～750m）＞（1000～1250）m。

**（7）斜坡类型**

斜坡类型综合体现了斜坡坡度、坡向与地层倾向和倾角的空间状况及组合形式，在很大程度上决定了斜坡岩土体变形的方式和强度，对崩塌、滑坡的分布起着重要的作用。三峡库区不同类型斜坡分布区地质灾害点分布从多到少的顺序依次是：顺向坡/土质斜坡（Ⅳ）＞斜向/反向碎屑岩斜坡（Ⅲ）＞斜向/反向碳酸盐岩斜坡（Ⅱ）＞平缓层状斜坡（Ⅰ）＞结晶岩斜坡（Ⅴ）（图 6）

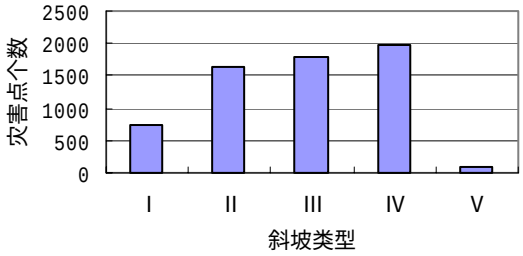



图 6　斜坡类型与地质灾害分布的关系

Ⅰ.平缓层状斜坡；Ⅱ.斜向/反向碳酸盐岩斜坡；Ⅲ.斜向/反向碎屑岩斜坡；Ⅳ.顺向坡/土质斜坡；Ⅴ.结晶岩斜坡

### 4.3.2　诱发因子分析

三峡库区地质灾害诱发因子主要是大气降水、地震活动和人类工程经济活动。

**（1）大气降雨**

从地质灾害的区域分布上看，一日最大降雨量在 250mm 以下时，灾害点累计数与降雨量关系曲线的斜率较大，一日最大降雨量超过 250mm 后，曲线的斜率变缓，说明 250mm 是地质灾害暴发的日降雨量临界值。

三日最大降雨量在 400mm 以下时，灾害点累计数与降雨量关系曲线的斜率较大，三日最大降雨量超过 400mm 后，曲线的斜率变缓，说明 400mm 是地质灾害暴发的三日降雨量临界值（图 7）。

多年平均降雨量反映了一个地区总体的大气降雨趋势，是衡量该地区干、湿程度的重要指标。多年平均降雨量在 1300mm 以下时，三峡库区地质灾害点累计数与降雨量关系曲线的斜率较大，多年平均降雨量超过 1300mm 后，曲线的斜率明显变缓，说明 1300mm 是地质灾害暴发的年降雨量临界值。

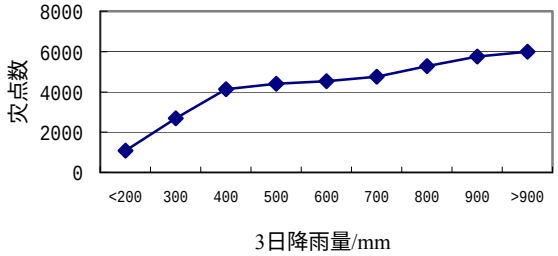



图 7　三日最大降雨量与地质灾害累计频数关系

**（2）地震活动**

三峡地区大型崩塌、滑坡事件的活动时期与区域地震活动周期具有一定的相关性，如新滩江段有史料记载的四～五期较大规模的崩滑事件，与该地区地震活跃期具有明显的时间对应性。滑坡活跃期一般滞后于地震活动期，反映了内动力的控制作用。

**（3）人类工程活动**

三峡库区人类活动主要由于移民工程迁建、道路、码头港口建设和采矿等造成削坡、填土、和开挖等大挖大填、剧烈改变天然斜坡形态。水库蓄水运营后水位从 145m－175m 反复升降变化也是诱发滑坡、崩塌等地质灾害的重要因素。

## 5　地质灾害空间预警研究

区域地质灾害“发育度”、“ 潜势度 ”、“危险度”和“危害度”等 “ 四度 ” 分层次递进分析在理论上解

决地质灾害空间预警与时间预警的工作程序，也探索建立了方法体系，整个过程形成“ 四度 ”分析的学术思想和工作方法（图 8）。

本项研究采用 1∶25 万数字化地形图及相应的地貌、地质图层，采用 2.5km×2.5km（图面 1cm×1cm）的网格剖分整个区域，共形成 9309 个网格，能够保证较高的评价精度。

### 5.1 地质灾害“发育度”

地质灾害“ 发育度 ”是指某地区在目前地质环境及人文环境共同作用下地质灾害的发育程度，具体指地质灾害的空间发生频率、面积和体积分布几率的综合表现程度，单纯采用三者中的任何一个都不足以反映实际。

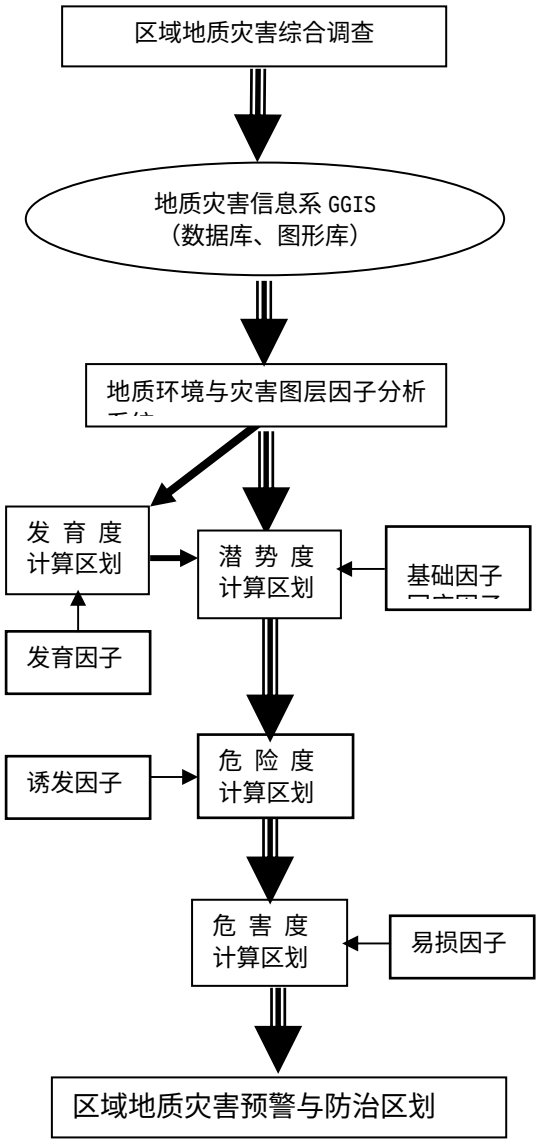



图 8　地质灾害调查与评价预警递进分析程序图

因此“ 发育度 ”（F）是代表区域灾害频率（f）、面积（S）和体积（V）等特征的函数，表示为：

$$F=f(f,s,v) \qquad (1)$$

为了建立反映实际情况的地质灾害“ 发育度 ”计算模型，首先对上述三方面指标进行无量纲化处

理，或归一划处理。

（1）地质灾害频率比

设第 i 单元内灾害频率为 $f_i$，单元面积为 $S_i$，单元内灾害的频率密度 $\rho_{fi}$；整个研究区面积为 S，灾害总数为 f，总频率密度为 $\rho_f$，则：

第 i 单元灾害频数比

$R_{fi} = \rho_{fi} / \rho_f$

其中，$\rho_{fi} = f_i/S_i$；　　$\rho_f = f/S$

（2）地质灾害面积模数比

设第 i 单元内灾害体分布面积为 $s_i$，单元面积为 $S_i$，i 单元内灾害的面积模数 $\rho_{si}$；整个研究区面积为 S，灾害点总面积为 s，总面积模数为 $\rho_s$，则：

第 i 单元面积模数比

$R_{si} = \rho_{si} / \rho_s$

其中，$\rho_{si} = s_i/S_i$；　　$\rho_s = s/S$

（3）地质灾害体积模数比

设第 i 单元内灾害点总体积为 $v_i$，单元面积为 $S_i$，i 单元内灾害的体积模数 $\rho_{vi}$；整个研究区总面积为 S，灾害点总体积为 v，总体积模数 $\rho_v$，则：

第 i 单元体积模数比 $R_{vi}$

$R_{vi} = \rho_{vi} / \rho_v$

其中，$\rho_{vi} = v_i/S_i$；　　$\rho_v = v/S$

因此，式（1）变为：

$Fi = f(R_{fi}, R_{si}, R_{vi})$　　（2）

式中，$R_{fi}$，$R_{si}$ 和 $R_{vi}$ 统称“发育因子”。

结合大量的实践和三峡库区地质灾害综合研究，可以建立一般公式（3）。

$$F_i = R_{fi} + R_{si}^{\frac{1}{2}} + R_{vi}^{\frac{1}{3}} + r \qquad (3)$$

式中，$F_i$—第 i 单元的灾害发育度；

$R_{fi}$—第 i 单元的灾害频数比；

$R_{si}$—第 i 单元的灾害面积模数比；

$R_{vi}$—第 i 单元的灾害体积模数比；

$r$—修正指数，一般取 1.5～2.0。

这个公式不但可以描述研究区的地质灾害发育现状，同时对具体地段的发育状况与整个地区的比较也可以给出明确概念。

根据区域地质灾害“发育度”评价模型，结合三峡库区实际情况，首先计算各单元发育度。根据计算结果，统计出 $F_i = 3$ 反映整个地区的平均水平（图 9）。

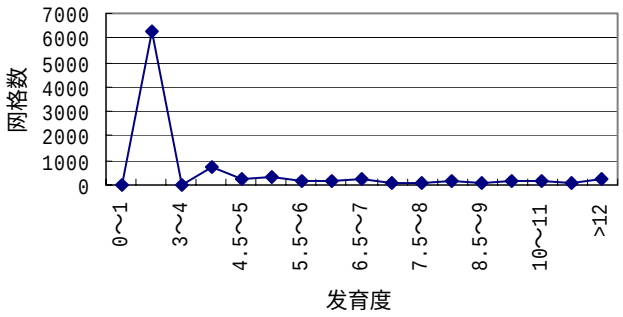



**图 9　三峡库区地质灾害“ 发育度 ”分布曲线**

根据计算结果的分布规律，综合考虑各类致灾因素和三峡库区实际情况，将三峡库区地质灾害“ 发育度 ”分为四级：

地质灾害不发育区　　$0 \leq F_i < 3$
地质灾害低发育区　　$3 \leq F_i < 6$
地质灾害中发育区　　$6 \leq F_i < 9$
地质灾害高发育区　　$9 \leq F_i$

根据以上分类，以 GIS 为辅助工具，通过逐个单元计算将三峡库区划分为地质灾害不发育区、低发育区、中发育区和高发育区。各区的面积比例、灾害点数和分布密度显示了各自不同的特点（表 1）。

高发育区主要成条形状分布，地质灾害点数占灾害点总数的 43%，灾害密度达到了 0.618 个/$km^2$。中发育区成不规则形状分布，多以椭圆形为主，地质灾害点数占灾害点总数的 28.8%，灾害点密度约为 0.3 个/$km^2$。低发育区面积约占整个研究区面积的 16%，在 19 县（区）均有分布。不发育区面积约占研究区面积的 68%，以人口稀少和人类活动相对不频繁的地区为主，地质灾害频数比低于整个研究区的平均水平，灾害点数量不足总数的 0.2%。

**表 1　地质灾害“ 发育度 ”分区特征**

| 分区 | 不发育 | 低发育 | 中发育 | 高发育 |
|---|---|---|---|---|
| 发育度 | 0－3 | 3-6 | 6-9 | >9 |
| 灾害点数 | 7 | 1599 | 1641 | 2459 |
| 密度/（个·$km^{2)}$ | 0.00019 | 0.17160 | 0.30064 | 0.61769 |
| 面积百分比①<br>% | 67.7.6 | 16.02 | 9.38 | 6.84 |

①表中面积百分比计算以网格单元为依据，部分网格跨越了调查区边界，下同。

## 5.2　地质灾害“潜势度”

地质灾害“ 潜势度 ”是指某一地区在没有任何降雨、地震和人类活动等诱发因素影响下地质环境孕育地质灾害的潜在能力。“ 潜势度 ”是各类地质灾害趋势预测的基础，可为地质灾害单因素预警或综合预警提供基础指标，具体量值是通过地质灾害基础因子与回应因子计算实现的。

计算公式可写成：

$$Q=（q_1，q_2，q_3，\ \ \ldots\ldots，q_n）\qquad (4)$$

式中，$q_1$，$q_2$，$q_3$，　……，$q_n$ 是反映地质灾害潜势的因素值。

如采用综合指数模型，（4）式可写成：

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} a_i b_j \qquad (5)$$

$i = 1，2，\cdots，m；\ j = 1，2，\cdots，n$

式中，$Q_i$ －第$i$单元的“潜势度”指数；

j－评价因子；

$a_i$ －第 j 评价因子在第 i 评价单元的赋值；

$b_j$ －第 j 个评价因子的权重；

m－评价单元数；

n－评价因子数。

此时，地质环境要素组合为基础因子，而地质灾害的频数比、面积模数比和体积模数比作为地质灾害发生潜势的一种响应，也是基础因子的组成部分，反映地质环境的脆弱性，是地质灾害发生潜能的一种响应，所以把发育因子也称响应因子。

根据三峡库区地质灾害调查的实际资料和地质灾害因子分析结果，选取基础因子（地形地貌、植被、岩组、构造）和回应因子（即发育因子，包括灾害频数比、面积模数比、体积模数比）作为地质灾害“潜势度”计算的判别因子。同时对基础因子中地形地貌和地质构造划分出二级因子（表 2）。

表 2　地质灾害基础因子与回应因子判别指标量值及权重

| 判别因子 | | | | 判别指标量值 | | | | | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 一级因子 | 二级因子 | 单位 | | | | | | |
| 基础因子 | 地形地貌 | 高程 | m | <250 | 250-400 | 400-600 | 600-1000 | >1000 | 0.06 |
| | | | 赋值 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| | | 山坡坡度 | ° | <10 | 10-25 | 25-40 | 40-60 | >60 | 0.1 |
| | | | 赋值 | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 | |
| | | 斜坡类型 | 代号 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | 0.07 |
| | | | 赋值 | 2 | 4 | 3 | 5 | 1 | |
| | | 沟谷密度 | km | 0-2 | 2-3.5 | 3.5-5 | 5-6.5 | >6.5 | 0.07 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | 植被 | 盖度 | % | <10 | | 10-50 | | >50 | 0.04 |
| | | | 赋值 | 3 | | 2 | | 1 | |
| | 岩组 | 岩组类型 | 代号 | HM | HC | HD | SD | SQ | 0.15 |
| | | | 赋值 | 1 | 3 | 2 | 5 | 4 | |
| | 地质构造 | | 发育程度 | 强烈 | 较强烈 | 中等 | 较弱 | 弱 | 0.06 |
| | | | 赋值 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| 回应因子 | 灾害频数比 | | | 0-1 | 1-2 | 2-4.5 | 4.5-8 | >8 | 0.07 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | 灾害面积模数比 | | | 0-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | >4 | 0.04 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | 灾害体积模数比 | | | 0-1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | >4 | 0.04 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

采用综合指数模型进行计算得出，“ 潜势度 ”曲线在 1.6、2、2.4 和 2.8 等四点出现跃变，以此四点作为分界点将整个三峡库区分为 5 级地质灾害潜势（度）区，据此对三峡库进行 5 级“ 潜势度 ”区划（图 10，表 3）。

“ 潜势度 ”区划结果是三峡库区的地质灾害潜在发生条件组合的体现，分区特征与地质背景、地形地貌等吻合较好，区划结果可以作为三峡库区地质灾害危险性预测和地质灾害综合预警的基础。

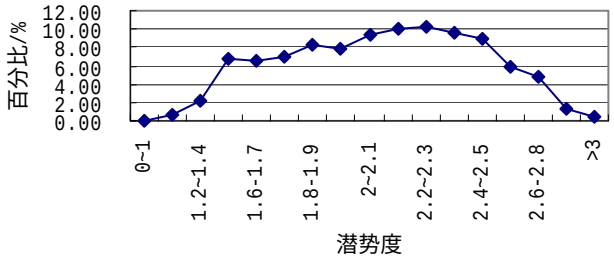



图 10　三峡库区地质灾害“ 潜势度 ”分布曲线

表 3　三峡库区地质灾害“ 潜势度 ”区划结果

| 名称 | 潜势度 | 面积百分比（%） | 注释 |
|---|---|---|---|
| 5 级潜势区 | >2.6 | 6.62 | 潜势度很大 |
| 4 级潜势区 | 2.3-2.6 | 24.41 | 潜势度大 |
| 3 级潜势区 | 2-2.3 | 29.70 | 潜势度较大 |
| 2 级潜势区 | 1.6-2 | 29.71 | 潜势度较小 |
| 1 级潜势区 | 0-1.6 | 9.56 | 潜势度很小 |

5 级“ 潜势度 ”区面积约占研究区面积的 6.62%，以重庆至长寿江岸、涪陵至万州江岸最为突出，巫山、巴东、秭归、兴山的沿江及部分地区也很突出。

4 级“ 潜势度 ”区约占研究区面积的 24.41%，主要分布在齐岳山以西的方斗山西部地区，以及巴东、秭归、兴山和宜昌的部分地区。

3 级“ 潜势度 ”区在整个研究区都有分布，占库区总面积的 29.70%，分布形式以零星分布为主，说明三峡库区地质灾害的潜在危险地段较多，是各类工程活动可能诱发地质灾害的地区。

2 级和 1 级“ 潜势度 ”区占全区面积的 39.27%，在三峡库区以零星分布为主，秭归、兴山和宜昌交界地区成片状分布，齐岳山以东和巫溪分布较多，武隆和石柱也有较多分布。

## 5.3　地质灾害“ 危险度 ”

地质灾害“ 危险度 ”是指一定时间内某空间区域在某种诱发因素作用下发生地质灾害的可能性，是在潜势度分析基础上叠加诱发因子进行的，其数学模型与“ 潜势度 ”计算模型必须一致。

如同样采用综合指数模型，则：

$$W_i = \sum_{j=1}^{p} a_i b_j \qquad (6)$$

$i = 1，2，\cdots，m；\ j = 1，2，\cdots，p$

式中，$W_i$——第$i$单元的“危险度”指数；

j——评价因子；

$a_i$——第 j 评价因子在第 i 评价单元的赋值；

$b_j$——第 j 个评价因子的权重；

m——评价单元数；

p——评价因子数。

从地质和工程地质、地质环境的角度出发，地质灾害“危险度”判别因子选取原则是，既要充分考虑地质灾害发生形成的内在基本因素（地形地貌、岩组、地址构造、植被），又要兼顾诱发其发生的外部因素，通常指降雨、人类工程活动、地震烈度等。

按照“四度”分析理论，“危险度”计算必须采用与“潜势度”计算同样的数学模型，本项研究仍采用综合指数模型进行计算。

“危险度”计算除使用基础因子和响应因子（表 2）外，需建立诱发因子体系（表 4）。

采用综合指数模型进行计算作出“危险度”指数曲线，显示 2.2-2.4、2.5-2.6、2.8-3、3.4-3.5 所对应的区间发生变化。2.8-3.4 之间所占的面积较多，占全区总面积的 62.9％。通过对该结果的分析，结合研究区“潜势度”分布情况，将全区共划分为 5 级危险区（图 11，表 5）。

表 4　地质灾害诱发因子判别指标量值及权重表

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 诱发因子 | 降雨量 | 1 日最大降雨量 | mm | <150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 | >300 | 0.05 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | | 3 日最大降雨量 | mm | <200 | 200-400 | 400-600 | 600-800 | >800 | 0.08 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | | 年均降雨量 | mm | <1000 | 1000-1200 | 1200-1400 | 1400-1600 | >1600 | 0.06 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | 地震烈度 | | 度 | 4 | 5 | 6 | 7 | | 0.03 |
| | | | 赋值 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| | 人类工程活动 | | | 弱 | 较弱 | 中等 | 较强烈 | 强烈 | 0.08 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

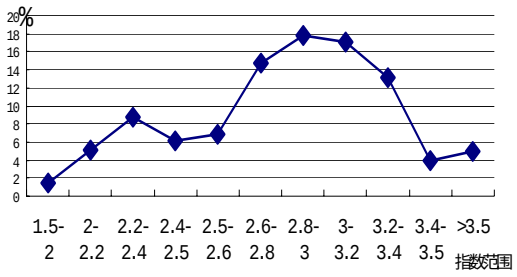



图 11　三峡库区地质灾害“危险度”分布曲线

表 5　三峡库区地质灾害“危险度”区划结果

| 名称 | 危险度指数 | 面积百分比<br>% | 注释 |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 级危险区 | >3.5 | 5 | 危险性很大 |
| 4 级危险区 | 3.2-3.5 | 17 | 危险性大 |
| 3 级危险区 | 2.8-3.2 | 35 | 危险性较大 |
| 2 级危险区 | 2.4-2.8 | 28 | 危险性较小 |
| 1 级危险区 | 1.5-2.4 | 15 | 危险性很小 |

5 级“危险度”区危险性很大，分布面积占研究区面积的 5%。区内共有灾害点 1322 个,占灾害点总数的 21.2%。

4 级“危险度”区危险性大，分布面积占研究区面积的 17%。区内共有灾害点 1709 个，占灾害点总数的 27.5%。

3 级“危险度”区危险性较大，分布面积占研究区面积的 35%。区内共有灾害点 2056 个，占灾害点总数的 33%。

2 级危险区危险性较小，分布面积占研究区面积的 28%。区内共有灾害点 920 个，占灾害点总数的 14.8%。

1 级危险区危险性最小，分布面积占研究区面积的 15%。区内共有灾害点 216 个，占灾害点总数的 3.5%。

## 5.4 地质灾害“危害度”

地质灾害“危害度”指地质灾害发生后对其影响区内各类承灾体的伤害或财产破坏损失程度，它是地质灾害社会属性的表现形式。

重点考虑地质灾害的强度与受灾区人类生命财产的易损性，并用量化指标表示，表达为：

$$R = R(r_1, r_2, r_3, \ldots\ldots, r_n) \qquad (7)$$

式中，$r_1$，$r_2$，$r_3$，……，$r_n$ 是反映地质灾害各项危害的因素值。

区域地质灾害“危害度”与“危险度”、承灾体的易损性密切相关。研究表明，承灾体易损性是一个难以确定的变量，它不仅与承灾体类型、结构功能等有关，而且与其所处的空间位置（离灾害体远近、灾害体的不同部位）有很大关系。

总体上，地质灾害对社会造成的破坏表现为人员伤亡、价值损失以及无法用货币衡量的环境破坏效应。

“危害度”单元评价模型一般写成：

$$R_i = W_i \times V_i \qquad (8)$$

式中，$R_i$ ——单元危害度；

$W_i$ ——单元危险度；

$V_i$ ——单元承灾体易损性指数；

$$V_i = \omega_1 V_{1I} + \omega_2 V_{2I} + \omega_3 V_{3I} + \Lambda\ \Lambda + \omega_n V_{nI}$$

式中，$V_{1I}, V_{2I}, V_{3I}, \mathrm{L}\ \mathrm{L}, V_{nI}$ 表示各类承灾体（共 n 类）的易损性指标；$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \mathrm{L}\ \mathrm{L}, \omega_n$ 为各自对应的权重。

本次研究工作根据研究区的实际情况，选取的易损因子为人口密度、财产、工程设施。由于财产和工程设施统计数据不全面，难以满足本次研究工作，只选取人口密度作为评价易损因子。根据人口密度的变化和已有灾害点的分布情况，把人口密度划分为 5 级，并分别赋值，人口密度最高为 5，最低为 1（表 6）。因只有一个因子，实际计算时没有进行权重的运算，而是根据人口密度的判别指针量

值从小到大分别乘以赋值的 1/10。

因此，本项研究“危害度”计算只具有象征意义，或仅体现了“以人为本”。

表 6　易损因子指标量值及权重

| 判别因子 | | | | 判别指标量值 | | | | | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 一级因子 | 二级因子 | 单位 | | | | | | |
| 易损因子 | 人口密度 | | 人/km$^2$ | <100 | 100-200 | 200-400 | 400-650 | >650 | 0.4 |
| | | | 赋值 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | 财产 | | | | | | | | 0.3 |
| | | | 赋值 | | | | | | |
| | 工程设施 | | | | | | | | 0.3 |
| | | | 赋值 | | | | | | |

在考虑三峡库区实际情况的基础上，以计算结果为基础，将研究区划分为 5 级“危害度”区（图 12，表 7）。

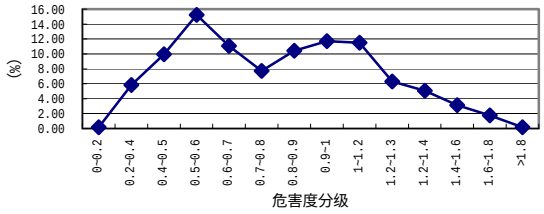



图 12　三峡库区地质灾害“危害度”分布曲线

人口因子的赋值具有很大的人为性，不同专家的赋值计算结果各不相同。此次研究中人口密度以县为单位进行计算，计算结果与实际情况有一定出入，如重庆主城区全部为“危害度”最严重的地区，万州和忠县的部分地区也达到了 5 级，但实际情况并非整个重庆主城区地质灾害“危险度”都很高。按照区划分级，三峡库区县城及以上城市的地质灾害“危害度”为 5 级区是符合实际的，沿江两岸“危害度”大符合实际情况，同时也和危险度区划结果一致。

表 7　三峡库区地质灾害“危害度”区划结果

| 名称 | 危害度指数 | 面积百分比(%) | 注释 |
|---|---|---|---|
| 5 级危害区 | >1.4 | 5.06 | 危害度很大 |
| 4 级危害区 | 1.2～1.4 | 11.37 | 危害度大 |
| 3 级危害区 | 0.8～1.2 | 33.62 | 危害度较大 |
| 2 级危害区 | 0.5～0.8 | 34.01 | 危害度较小 |
| 1 级危害区 | 0～0.5 | 15.94 | 危害度很小 |

“危害度”1～4 级的区划中能体现“危险度”的分区，兴山的人口密度最低，危害度为最低；巫溪、巫山、奉节等县的人口密度在 100～200 之间，危害度区划结果主要为 1～2 级。巴南、渝北、长寿、忠县、万州等县（区）的人口密度较大，危害度等级多在 3～5 级。

地质灾害“危害度”区划是一次尝试性的研究工作，由于易损因子选择中仅选择分县人口数据，对于工程设施和财产等危害度重要指针均无充分数据，导致“危害度”区划结果和人口密度的分布基本一

致，而对工程活动方式和强度反映不足。

# 6 地质灾害防治对策

地质灾害防治对策包括进行地质灾害防治区划、制定重大地质灾害防治预案和建立地质灾害监测预警系统等 3 个方面。

## 6.1 地质灾害防治区划

根据地质灾害的“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”计算和区划结果，结合三峡库区经济与社会发展规划、移民迁建规划等因素，进行综合分析，可以划出不同级别或不同类型的防治区。

3 级“危险度”和“危害度”分布区可作一般防范。4 级和 5 级“危险度”分布区是重点预警区，分别为 2708km$^2$和 9209km$^2$。4 级和 5 级“危害度”分布区是进行地质灾害防治重点区，分别为 2741km$^2$和 6159km$^2$。

需要实施减灾工程的重要地质灾害点 600 个，次重点 1750 个，可根据各地的具体情况，分别确定监测、搬迁避让和进行工程治理。

## 6.2 地质灾害监测预警工程

地质灾害监测预警系统包括专业监测和群测群防两种体系，三峡地区是两种体系比较完善的典型区。群测群防体系是基础，专业监测体系是核心。

三峡库区地质灾害专业监测体系包括区域 GPS 控制网和重点地质灾害体立体监测体系。地质灾害群测群防体系是县（区）、乡（镇）、村三级各负其责，落实监测责任人，并由专业人员布设监测点，指导地质灾害监测预报。区域暴发性地质灾害防灾预案主要根据政府发布的地质灾害预警预报信息和灾害事件应急反应机制做出。

对重大地质灾害隐患点，编制了地质灾害防灾预案。防灾预案内容包括地质灾害的位置、类型、规模及变形特征，地质灾害点威胁对象、范围和可能造成的经济损失，圈定了地质灾害的危险区、影响区和安全区，地质灾害的监测手段、预防措施及责任人，地质灾害预警信号、人员及财产转移路线和灾害发生时的撤离路线及临时避难场所等，并在必要时进行防灾避灾演习。

本次调查研究工作落实地质灾害群测群防县级监测点约 260 个、乡镇级监测点约 760 个和村级监测点约 3800 个。共建立防灾预案 477 处。

## 6.3 地质灾害防治工程

限于财力，目前三峡库区的地质灾害减灾工程主要集中在三峡水库水位影响带和移民工程迁建区。自 2001 年以来，二期减灾规划完成或正在实施滑坡等治理工程 185 处，搬迁避让 22 处，库岸防护 74 段，高边坡 1490 处。2003 年编制的三期减灾规划项目包括滑坡等治理工程 418 处，搬迁避让 399 处，库岸防护 35 段，高边坡 1270 处。

# 7 结语

1999 年，首批中国国土资源大调查计划地质灾害预警工程实施项目《三峡库区地质灾害综合调查和监测预警系统建设》（包括 6 个项目（Z1.1～Z1.6），19 个工作项目）正式执行，本研究组承担了项目的技术协调、业务指导和综合研究任务[2]。在国土资源部地质环境司和中国地质调查局的直接领导下，中国地质环境监测院牵头综合研究，重庆市南江水文地质工程地质队、208 水文地质工程地质队、湖北省水文工程地质大队、四川省成都水文地质工程地质中心、915 水文地质工程地质大队、中国地质科学院地质力学研究所和中国地质调查局宜昌地质矿产研究所等七个单位分别负责了 19 县（区）以县为单元的野外调查和信息系统建设，并分别提交了调查评价报告。

在此对上述单位和个人，对参与此项工作的管理人员和技术人员特别致谢！

参考文献：

[1] 刘传正，李铁锋，程凌鹏等，区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法[J].水文地质工程地质，2004，31（4）：1~9

[2] 刘传正，李铁锋等，三峡库区地质灾害调查评价综合研究报告[R].中国地质环境监测院，2003.11