

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

基于突变理论的湟水河流域崩滑易发性评价

李 彬,周金喜,吴钶桥,马建全,祁汉文

Assessment of landslide susceptibility in the Huangshui River Basin based on catastrophe theory

LI Bin, ZHOU Jinxi, WU Keqiao, MA Jianquan, and QI Hanwen

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212009

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100–109

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi 谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin 郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130-136

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province 张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104–110

安宁河流域西昌北段东岸沟谷泥石流危险度评价

Risk Assessment of Gully Debris Flow Ravine at the East Bank of the Xichang North Section in the Anning River 罗健, 郭宁, 杨峥 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 40-49



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212009

李彬,周金喜,吴钶桥,等. 基于突变理论的湟水河流域崩滑易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 116-126. LI Bin, ZHOU Jinxi, WU Keqiao, et al. Assessment of landslide susceptibility in the Huangshui River Basin based on catastrophe theory[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 116-126.

基于突变理论的湟水河流域崩滑易发性评价

李 彬^{1,2,3},周金喜²,吴钶桥³,马建全⁴,祁汉文²

 (1. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海西宁 810000;2. 青海省有色第一地质勘查院(青海省隐伏矿勘查重点实验室),青海西宁 810000;3. 青海省有色第四地质勘查院, 青海西宁 810000;4. 西安科技大学地质与环境学院,陕西西安 710000)

摘要: 湟水河流域是黄河上游重要支流, 是青海省政治经济文化中心, 也是全省地质灾害高发区域。流域内灾害种类多, 发生频率高, 经济损失和人员伤亡较大。流域内地质灾害分布有一定地域特征, 通过对湟水河流域地形地貌、地质岩 组、地质构造、水文气象、人类工程活动分析, 构建了地质灾害易发性划分标准, 将湟水河流域崩滑灾害易发性分为极高 易发区、高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区5个等级。基于 MATLAB 编程的突变级数理论平台, 充分考虑了各 评价因子的内在关系, 将单点灾害危险性评价扩展到区域灾害易发性评价。通过 ROC 对评价结果验证表明, 该方法准确 率高, 可为地质灾害防治提供理论支持。

关键词: 湟水河流域; 崩滑灾害; 突变级数理论; 危险性评价

中图分类号: P642.21; P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2023)06-0116-11

Assessment of landslide susceptibility in the Huangshui River Basin based on catastrophe theory

LI Bin^{1,2,3}, ZHOU Jinxi², WU Keqiao³, MA Jianquan⁴, QI Hanwen²

 (1. Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources in Northern Qinghai-Tibet Plateau, Xining, Qinghai 810000, China; 2. Qinghai Nonferrous First Geological Exploration Institute (Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration in Qinghai Province), Xining, Qinghai 810000, China; 3. Qinghai Nonferrous Fourth Geological Exploration Institute, Xining, Qinghai 810000, China; 4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The Huangshui River Basin, an important upstream tributary of the upper reaches of the Yellow River, serves as the political, economic, and cultural center of Qinghai Province, and is also a region with a high incidence of geological disasters. Within this basin, various types of disasters occur frequently, resulting in significant economic losses and casualties. These disasters also exhibit distinct regional characteristics. Based on the analysis of landform, geological rock group, geological structure, hydrometeorology and human engineering activities in the Huangshui River Basin, the comprehensive classification standard of geological disaster susceptibility was established, and the susceptibility of landslide disaster in the Huangshui River

收稿日期: 2022-12-22; 修订日期: 2023-07-28 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

E-mail: 55094925@qq.com

基金项目: 2021 年青海省"高端创新人才"拔尖人才计划(青人才[2021]12 号);青海省科技计划项目(2019-KY-01)

第一作者: 李 彬(1984-), 男, 地质资源与地质工程专业, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害相关工作。

通讯作者: 马建全(1984-), 男, 地质工程专业, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害相关工作。E-mail: 273838145@qq.com

Basin was categorized into five levels: extremely high, high, medium, low and very low. Using a matlab-based platform for catastrophe theory, the inherent relationships among various assessment factors are fully considered, and the single-point disaster risk evaluation is extended to regional disaster susceptibility evaluation. Validation of the assessment results through ROC analysis demonstrates the high accuracy of this method, providing theoretical support for geological disaster prevention and control.

Keywords: Huangshui River Basin; landslide disasters; catastrophe series theory; risk assessment

0 引言

随着社会的不断发展,人类工程活动不断加强,地 质灾害带来的不良影响越来越多,如何科学准确的评判 地质灾害的危险性十分重要。崩滑灾害的发生极其复 杂,受地形地貌、岩性组合、地质构造、降雨、地震和人 类活动等多种因素的影响[1]。2014年宋盛渊等[2]采用突 变级数理论的方法对岩桑树水电站库区发育的潜在单 体滑坡进行危险性评价,取得了较好的效果;尚志海等[3] 通过对梅州市地质灾害伤亡人数、直接经济损失和发 生频率的统计,引入突变理论的突变级数法,建立了地 质灾害灾度的评估指标体系和等级划分标准,并对梅州 市地质灾害灾度进行了评估; 2020年, 刘晓宇等[4]利用 突变理论选取岩性、风化程度、坡度等7个指标,对西 部山区威胁公路的10个典型滑坡进行危险性评价,评 价结果与现场调查结果具有较高的吻合度。目前,突变 理论在灾害评价中的应用,仅限于单体灾害危险程度的 研究或是某一地区灾情程度的研究上,对于区域易发性 评价研究中尚未见相关报导^[5]。本文旨在创建一种新 的基于突变理论的崩滑灾害易发性评价方法,开发一种 基于突变级数理论的崩滑灾害易发性评价平台。区别 于前人研究成果的是对整个研究区域栅格单元进行突 变级数赋值,进而对整个研究区崩滑灾害易发性进行评 价,而不是单单对单体灾害的评价。

1 突变级数理论基本原理及易发性评价平台开发

1.1 突变级数法基本原理

将研究区内的评价因子按照倒立的树枝状结构进 行多层次分解是突变级数法的基本思想^[6]。按照"互 补"或"非互补"原则,将最底层的控灾因子进行无量纲 处理(归一化),将归一化结果代入相应的突变模型中, 并计算出该层的突变级数。然后逐层向上计算各层的 突变级数,并根据最高层的突变级数将所研究的系统分 级^[7-8]。

(1)建立逐层结构模型

建立逐层结构模型是突变级数法的关键,要充分考

虑各层因子之间的关系,逐层分解,选择相对应的突变 函数,按先主后次排列成倒立的树枝状结构。常用的分 解形式如图1所示。图中,x为状态变量;u、v、w、t为 控制变量。



(2)评价指标的无量纲化处理

各参评因子的取值范围和单位量纲均不相同,无法 对各参评因子进行比较。因此,就有必要将各参评因子 转变为 0~1之间的无量纲数据。值得注意的是,所有 参评因子数据均应该转化为"越大越好"型数据,对"越 小越好"型数据可采用倒数法进行标准化处理。对于正 指标,采用式(1)进行标准化;对于负指标,采用式(2)进 行标准化^[2]。

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

$$x_i' = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中:x_i——评价指标值;

x'_----评价指标标准化值;

xmax、xmin——各评价指标的最大值和最小值。

(3)突变级数的计算

各参评因子无量纲处理后就可以选择对应的初等 突变类型(表1)。

根据不同模型的归一化公式和最底层因子的无量 纲数据,可计算出对应因子的突变级数值。在计算时, 无相关性因子取最小值,有相关性因子取平均值。逐层 向上计算突变级数,最终求出总突变级数。突变级数法 流程见图 2。 边位应本米利

农 I 初寺天支矢室						
Table 1 Primary mutation types						
类型	控制变量	势函数	归一化公式			
折迭型	1	$F(x) = x^3 + ux$	$x_u = u^{1/2}$			
尖点型	2	$F(x) = x^4 + ux^2 + vx$	$x_u = u^{1/2}$, $x_v = v^{1/3}$			
燕尾型	3	$F(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$	$x_u = u^{1/2}$, $x_v = v^{1/3}$, $x_w = w^{1/4}$			
蝴蝶型	4	$F(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$	$x_t = t^{1/2}$, $x_u = u^{1/3}$, $x_v = v^{1/4}$, $x_w = w^{1/5}$			

注:x为状态变量,即中间层C1、C2……C6;u、v、w、t为控制变量,即最底层D1、D2……D12。



图 2 突变级数法流程图

Fig. 2 Flow chart of catastrophe theory procedure

1.2 基于突变级数理论的易发性评价平台开发

开发基于突变级数理论模型的易发性评价平台采 用的是 MATLAB 语言,它是当今科研领域最常用的应 用软件之一,具有强大的符号运算、矩阵计算及数据处 理等功能^[9]。MATLAB 有包罗万象的工具箱,"草稿纸 式"的编程语言,易学易用,用户不仅可以调用其内部函 数进行计算,还可以根据自己的算法进行扩展编程^[9]。 对突变级数理论模型进行编程使其程序化,最终开发出 基于突变级数理论模型的崩滑灾害易发性评价平台,其 平台开发流程图(图 3)。

2 研究区概况及地质灾害影响因素

2.1 研究区概况

湟水流域位于青藏高原与黄土高原的过渡地带,总体为高原地貌。地势起伏较大,西北高、东南低,亦有南北高、中间低的特点(图 4)。最高海拔位于西北部的 湟水干流源区,约4350m,最低海拔位于东南部的湟水 干流河谷,约1650m。根据流域内实际,又可细分为中 高山区、丘陵区和河谷区。由于湟水流域地形地貌以 沟壑纵横的丘陵为主,气候气象具有干旱少雨但多集中 于汛期的特点,出露岩性以黄土、泥质岩等软弱岩土体 多见,植被覆盖较为稀疏且森林覆盖率低,断裂、褶皱







图 4 湟水河流域崩滑灾害分布图 Fig. 4 Distribution map of landslide disasters in the Huangshui River Basin

等构造发育,因而湟水流域地质环境脆弱,水土流失严 重,崩塌、滑坡等地质灾害多发易发;加之,流域内人口 密集、人类工程活动强烈,对地质环境的改造明显和突 出,人为因素导致的崩塌、滑坡等也越来越多。因此, 湟水流域崩滑灾害多发,特别是中下游地区的丘陵区是 青海省乃至全国地质灾害高易发区。

2.2 因子选取及建立逐层机构模型

本文参考国内外研究学者经常选取的崩滑灾害影 响因子,同时考虑所选评价因子容易量化程度^[10],最终 选择具有代表意义的12个因子作为崩滑灾害易发性评 价指标。选取因子分别为:工程地质岩组、距离城镇、 平面曲率、高程、剖面曲率、距离水系、地形地貌、距离 公路、坡度、距离断层、地形湿度指数(*TWI*)、多年平均 降水量。

将12个控灾因子作为最底层因子指标进行多层次 分解,先主后次排列成倒立的树枝状结构。逐层向下分 解,直至分解到将灾害点危险度作为目标层,以地质因 素和环境因素两个变量为准则层,地貌、地形、工程地 质岩组、地质构造、水文气象、人类工程活动6个变量 作为中间层,高程、坡度、平面曲率、剖面曲率、工程地 质岩组、地形湿度指数(TWI)、距离断层、年均降水量、 地貌类型、距离水系、距离公路、距离城镇12个控灾因 子作为最底层变量,建立逐层结构模型。其中,目标层 灾害点危险度即灾害点突变级数,各最底层变量即为控 灾因子,各层之间根据变量的不同选用不同的突变模型。表2为湟水河流域崩滑灾害危险度评价逐层结构 模型。

3 研究区崩滑灾害评价

3.1 评价指标无量纲化

由于最底层评价指标之间的取值范围和单位量纲 均不相同,各指标之间无法进行比较,需将其转变为 0~1之间的无量纲数据。利用归一化原则,将湟水河 流域内1171处崩滑灾害进行无量纲处理。表3为评 价因子无量纲处理结果表。

3.2 突变级数的计算

在对流域内1171处崩滑灾害点的各类因子进行 无量纲化后,利用突变模型的突变势函数计算各层评价 指标的突变级数。按照表2的突变模型,其中间层、准 则层及目标层的突变级数计算公式为:

中间层:

$$C_1$$
(地貌因子突变级数)= $\sqrt{D_1}$ (3)

$$C_2$$
(地形因子突变级数)= $\frac{\left(\sqrt{D_2}+\sqrt[4]{D_3}+\sqrt[4]{D_4}+\sqrt[4]{D_5}\right)}{4}$ (4)

 C_3 (工程地质岩组因子突变级数)= $\sqrt{D_6}$ (5)

$$C_4$$
(地质构造因子突变级数)= $\sqrt{D_7}$ (6)

表 2 湟水河流域崩滑灾害危险度评价逐层结构模型 Table 2 Layer-by-layer structure model for landslide hazard assessment in the Huangshui River Basin 目标层 突变模型 准则层 突变模型 中间层 突变模型 最底层

				地貌(C ₁)	折迭型	地貌(D1)
			蝴蝶型		蝴蝶型	坡度(D ₂)
		1.1. E		地形(C ₂)		高程(D ₃)
灾害点 危险度(A)	尖点型	地 <u></u> 仮 田麦(p)				平面曲率(D ₄)
		$\Box_{\mathcal{R}}(D_1)$				剖面曲率(D5)
				工程地质岩组(C3)	折迭型	工程地质岩组(D ₆)
				地质构造(C4)	折迭型	距离断层(D7)
			尖点型	水文气象(C ₅)	燕尾型	参率平均降水量(D ₈)
						距离水系(D ₉)
						$TWI(D_{10})$
		(D_2)		1米工担任社(C)	尖点型	距离公路(D11)
				八天工性值切(C6)		距离城镇(D ₁₂)

表 3 评价因子无量纲处理结果表

 Table 3
 Dimensionless processing results of evaluation factors

点号	D_1	D_2	<i>D</i> ₃	D_4	D_5	D_6	<i>D</i> ₇	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
1	0.277	0.173	0.216	0.992	0.899	0.365	0.712	0.423	0.993	0.179	0.923	0.954
2	0.277	0.056	0.489	0.919	0.918	0.470	0.773	0.621	0.799	0.268	0.809	0.974
3	0.277	0.241	0.881	0.901	0.983	0.470	0.872	0.679	0.950	0.122	0.982	0.949
4	0.181	0.356	0.429	0.291	0.416	0.365	0.674	0.648	0.875	0.499	0.900	0.941
5	0.277	0.663	0.774	0.591	0.438	0.365	0.779	0.701	0.850	0.057	0.987	0.899
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1 171	0.181	0.475	0.595	0.594	0.652	0.365	0.876	0.062	0.861	0.209	0.813	0.991

$$C_{5}(水文气象因子突变级数) = \frac{\left(\sqrt{D_{8}} + \sqrt[3]{D_{9}} + \sqrt[4]{D_{10}}\right)}{3}$$
(7)

$$C_{6}(人类工程活动因子突变级数) = \frac{\left(\sqrt{D_{11}} + \sqrt[3]{D_{12}}\right)}{2}$$
(8)

准则层:

$$B_{1}(地质因素突变级数) = \frac{\left(\sqrt{C_{1}} + \sqrt[3]{C_{2}} + \sqrt[4]{C_{3}} + \sqrt[4]{C_{4}}\right)}{4}$$
(9)

$$B_2(环境因素因子突变级数) = \frac{\left(\sqrt{C_5} + \sqrt[3]{C_6}\right)}{2} \quad (10)$$

目标层:

$$A(灾害危险度突变级数) = \frac{\left(\sqrt{B_1} + \sqrt[4]{B_2}\right)}{2}$$
(11)

根据式(3)—(11)计算得到湟水河流域崩滑灾害点 的突变级数,即各灾害点危险度(表 4)。

3.3 崩滑灾害危险性评价

对于崩滑灾害危险性等级的划分,尚未形成统一的标准。因此,选用 ArcGIS 重分类自然间断点法将研究区内 1171 处崩滑灾害点危险度进行分级,结合研究区崩滑灾害易发性实际特征,将崩滑灾害危险性划分为轻

表 4 湟水河流域崩滑灾害点危险度计算结果表

Table 4 Calculation results of landslide hazard at various points in the Huangshui River Basin

灾害点序号	灾害点危险度
1	0.961 506 589
2	0.962 988 553
3	0.968 764 08
4	0.954 702 401
5	0.965 770 092
:	:
1 171	0.958 959 487

度危险、中度危险、重度危险和极度危险4个等级,崩 滑灾害危险性评价指标划分标准见表5。

对表 4 中研究区 1 171 处崩滑灾害点突变级数按照 划分标准表 5 进行分类,其评价结果如表 6 所示。

表 5 崩滑灾害危险性评价指标划分标准 Table 5 Division standard of landslide hazard evaluation index

突变级数	0~0.883	>0.883 ~ 0.901	>0.901 ~ 0.916	>0.916 ~ 0.943
风险等级	轻度危险	中度危险	重度危险	极度危险

根据表 6 危险性评价结果可知, 研究区内 1 171 处 崩滑灾害中轻度危险点 75 处、中度危险点 201 处、重

表 6 崩滑灾害危险性评价结果								
	Table 6 Risk assessment results of rockfall disasters							
	灾害点编号	突变级数	危险性评价 (突变结果)					
	1	0.961 506 589	极度危险					
	2	0.962 988 553	极度危险					
	3	0.968 764 080	极度危险					
	4	0.954 702 401	极度危险					
	5	0.965 770 092	极度危险					
	:	÷	:					
	1 171	0 958 959 487	极度危险					

度危险点 476 处、极度危险点 419 处。根据评价结果, 研究区内灾害点以重度和极度危险为主,与实际灾情状 况一致。

0.958 959 487

按照突变级数法可以快速评价单体灾害危险性,其 优点是操作简单,评价结果可靠,但其缺点是只能进行 单体灾害危险性分析,不能进行全流域易发性评价。为 了对湟水河流域全域易发性进行评价,必须开发一套基 于突变级数理论的易发性平台,既满足单体灾害快速且 准确率高的优点,也要能满足全流域易发性评价的要 求。因此,利用 MATLAB 编程,对突变级数理论模型进 行升级,在单体灾害危险性评价基础上开发一套基于突 变级数理论模型的易发性评价平台。

4 突变级数理论易发性平台开发

4.1 平台设计流程

1 171

(1)栅格单元赋值

通过突变级数计算获得了湟水河流域内1171处 崩滑灾害的危险度,将崩滑灾害各指标中间层、准则层 及目标层突变级数值导入 ArcGIS, 利用 ArcGIS 栅格转 出工具将数据转出为 ASCII 格式。湟水河流域总面积 为 16 100.65 km², 按照 30 m×30 m 栅格单元划分, 可以 将研究区划分为 17 889 612 个栅格单元, 利用 MATLAB 编程,对每个栅格单元进行突变级数赋值。该方法的优 点是将整个流域离散化,具有比常规方法精度高、操作 简单、评价结果与实际情况符合程度高等特点。具体 步骤如下:

①构建评价因子栅格图。(加载研究区评价底图)

②对所有评价因子进行归一化处理,得到最底层 D(运用式(1)(2)对选取的高程、坡度等 12 个控灾因子 进行归一化处理,使其可以在同一维度内进行对比,得 到 12 个控灾因子的归一化结果 D)。

③根据论文中表2中逐层结构模型及突变模型,最

底层 D 的各个层进行栅格计算并叠加得到中间层 C(选 取不同的突变模型,运用式(3)-(8)对D进行栅格计 算,得到地貌、地形、工程地质岩组、地质构造、水文气 象、人类工程活动6个中间层的突变级数C)。

④根据论文中表2中逐层结构模型及突变模型,中 间层 C 的各个层进行栅格计算并叠加得到中间层 B(选取 蝴蝶型和尖点型突变模型,运用式(9)(10),对C进行栅 格叠加计算,得到地质和环境2个准则层的突变级数B)。

⑤根据论文中表2中逐层结构模型及突变模型,准 则层 B 的各个层进行栅格计算并叠加得到目标层 A, 以 此得到整个流域的灾害危险度突变级数(选取尖点型突 变模型,运用式(11)对 B进行栅格叠加计算,得到目标 层灾害点危险度的突变级数A,即得到整个流域的灾害 栅格单元突变级数)。

⑥根据论文中表 5,将计算得到的突变级数栅格图 进行重分类,得到易发性分区图5(基于表5给出的灾 害危险性评价指标划分标准,对流域内灾害危险度进行 重分类并绘图,得到流域灾害易发性分区图,见图 5)。

(2)预定义平台界面及属性

新建一个平台、定义平台的结构、对加载数据定义 到函数句柄、定义输出及平台的调用句柄、定义及更新 平台的调用句柄,输出界面见图6。

(3)读取数据并绘图

(以"D₁地貌"按钮为例)读取数据、剔除异常值、 保存数据的文本格式、构建句柄定义的坐标区窗口、展 示图像、设置颜色、保存数据、将更新后的数据和文本 数据加载到句柄中、保存句柄到指定对象中、弹出确认 提示,输出界面见图7。

(4)数据归一化并绘图

(以D₁地貌为例"归一化"按钮)恢复对象中的句柄 数据、定义"地貌归一化"值、构建句柄定义的坐标区、 展示图像、设置颜色、设置透明度、设置图名、保存数 据指定对象句柄中。设置背景色,选择对应突变函数, 对所有因子进行归一化处理,对D1-D12重复进行步 骤,输出界面见图8。

(5)突变级数计算并绘图

读取各因子归一化数据、分层计算输出目标值A、 构建坐标区、目标值A归一化、展示A归一化值的图像、 设置颜色、设置透明度、保存数据到指定对象句柄。

(6)计算结果输出

调用对象中保存得句柄信息、创建文件"YF.txt"、 将 dm 中的文本数据转换为字符串数组、将 HC 中所有



图 5 湟水河流域崩滑灾害易发分区图

Fig. 5 Landslide susceptibility zoning map in the Huangshui River Basin



图 6 预定义平台界面及属性 Fig. 6 Predefined platform interface and properties

行数据输入 YF.txt、将 Ag 所有行数据输入 YF.txt、保存 结束,输出结果。

4.2 湟水河流域危险性评价结果

在地质灾害评价中地质灾害易发分区是一项重要 内容,地质灾害易发分区是根据灾害的易发程度对研究 区进行划分等级^[11-13]。根据平台计算结果,将"YF.txt" 文件导入 ArcGIS,读取栅格单元突变级数,按照自然间 断分级法将研究区栅格单元突变级数分为五个等级,即 湟水河流域危险指数。分别是极低、低、中等、高和极 高,得到基于突变级数理论的湟水河流域崩滑灾害易发 分区图和易发分区统计表。图 5 为湟水河流域崩滑灾 害易发分区图。

根据表 7 统计结果可知, 湟水河流域崩滑灾害的极高易发区、高易发区主要分布于湟水河南北两岸以及一级支流两侧的低山丘陵区, 面积分别为 4 661.79 km² 和 5 511.44 km², 占整个研究区总面积的 28.95% 和 34.23%; 中易发区分布于湟水河南北两岸以及各大支沟两侧的构造侵蚀中山区, 面积占研究区总面积的 23.99 %; 低易发区、极低易发区主要分布在湟水河河谷平原地带及全流域中高山区, 面积占比分别占总面积的 11.80 % 和



图 7 读取数据并绘图

Fig. 7 Data retrieval and plotting





0.90%。根据评价结果, 湟水河流域以中高易发区为主, 占研究区总面积的 63.18%(图 9)。

表 7 突变理论模型危险性分区统计表

Table 7	Statistical table of hazard zoning using catastrophe
	theory model

	5		
序号	崩滑灾害易发分区	面积/km ²	占比/%
1	极低易发区	152.68	0.90
2	低易发区	1 912.61	11.80
3	中易发区	3 862.13	23.99
4	高易发区	5 511.44	34.23
5	极高易发区	4 661.79	28.95

4.3 评价结果精度验证

ROC曲线为二分类模型的预测精度提供了定量 化的研究方法^[14-15]。评价过程简单,评价结果非常直 观,以至于能仅凭肉眼进行预测效果初步判断(图 10)。 ROC 以曲线下面积判断预测精度好坏(*AUC*)。对于任 何预测试验中,*AUC* 值在 0.5~1。特征曲线的基本原 理是在崩滑危险性区划结果中随机选取了等量的崩滑 点和随机点,来绘制 ROC 曲线,并确定曲线下面积*AUC* 值^[16-17]。其评判标准如表 8 所示。

湟水河流域崩滑灾害分布特征与基于突变级数理



图 9 易发性评价因子归一化图 Fig. 9 Normalized evaluation factors for susceptibility assessment





Fig. 10 ROC accuracy validation results for the susceptibility model in the Huangshui River Basin based on catastrophe theory

表 8 AUC 值评判依据

 Table 8
 Criteria for AUC value evaluation

AUC值	>0.9 ~ 1	>0.8 ~ 0.9	>0.7 ~ 0.8	>0.6 ~ 0.7	0.5 ~ 0.6
评判标准	相当好	很好	好	差	极差

论的易发性评价结果基本一致。为了验证这一结果, 在 ArcGIS 随机抽取 30% 的灾害点并创建同等数量的 随机点,通过 SPSS 软件中的分析工具 ROC 曲线,获得 基于突变级数理论的湟水河流域易发性评价 ROC 曲 线。根据结果,基于突变级数理论的湟水河流域易发性 模型 AUC 值为 0.843,根据评判标准,表明该预测模型 精度很好,这与流域内崩滑灾害灾情状况基本相一致, 说明该模型满足评价要求。

5 结论

(1)本文以地质因素和环境因素两个变量为准则 层,地貌、地形、工程地质岩组、地质构造、水文气象、 人类工程活动 6 个变量作为中间层,高程、坡度、平面 曲率、剖面曲率、工程地质岩组、地形湿度指数(TWI)、 距离断层、年均降水量、地貌类型、距离水系、距离公 路、距离城镇 12 个控灾因子作为最底层变量,建立了 基于突变理论湟水河流域崩滑灾害危险度评价逐层结 构模型。

(2)采用 ArcGIS 重分类自然间断点法将研究区内 1171 处崩滑灾害点危险度计算结果划分为轻度危险、 中度危险、重度危险和极度危险 4 个等级,结果显示, 研究区内 1171 处崩滑灾害中轻度危险点 75 处、中度 危险点 201 处、重度危险点 476 处、极度危险点 419 处。研究区内灾害点以重度和极度危险为主,与实际灾 情状况一致。

(3)开发了一种新的崩滑灾害易发性评价平台—— 突变级数理论平台对湟水河流域崩滑灾害易发性进行 评价。结果表明,湟水河流域崩滑灾害的极高易发区、高 易发区主要分布于湟水河南北两岸以及一级支流两侧的 低山丘陵区,面积分别为4661.79 km²和5511.44 km², 占整个研究区总面积的28.95%和34.23%;中易发区分 布于湟水河南北两岸以及各大支沟两侧的构造侵蚀中 山区,面积占研究区总面积的23.99%;低易发区、极低 易发区主要分布在湟水河河谷平原地带及全流域中高 山区,面积占比分别占总面积的11.80%和0.90%。

(4)通过 ROC 曲线验证,基于突变级数理论的湟水 河流域易发性模型 ACU 值为 0.843,表明该预测模型精 度很好,其优点是操作简单,评价结果可靠,且弥补了突 变级数只能进行单体灾害危险性分析的短板,为崩滑灾 害防治提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评, 2020, 66(5): 1334-1348. [LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Research on the origins of geological disasters in China[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1334-1348. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 宋盛渊,王清,潘玉珍,等.基于突变理论的滑坡危险性 评价[J].岩土力学,2014,35(增刊2):422-428. [SONG Shengyuan, WANG Qing, PAN Yuzhen, et al. Evaluation of landslide susceptibility degree based on catastrophe theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 2): 422 - 428. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 尚志海,蔡文慧,欧先交,等.基于突变理论的梅州市地质灾害灾度评估[J].安全与环境工程,2014,21(3):55-59.
 [SHANG Zhihai, CAI Wenhui, OU Xianjiao, et al. Geological hazard degree assessment of Meizhou City based on catastrophe theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(3):55-59. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘晓宇, 樊智勇, 吴疆. 土质滑坡地表倾斜变形特征与基于 MEMS 的倾斜变形监测技术初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 69 77. [LIU Xiaoyu, FAN Zhiyong, WU Jiang. Characteristics of surface tilt deformation of soil landslide and preliminary study on tilt deformation monitoring technology based on MEMS[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 69 77. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘晓宇,任光明,刘彬,等.基于突变理论的滑坡危险性 评价[J].西华大学学报(自然科学版),2020,39(2):95-99. [LIU Xiaoyu, REN Guangming, LIU Bin, et al. Analysis of landslide hazard based on mutation series method[J]. Journal

中国地质灾害与防治学报

of Xihua University (Natural Science Edition), 2020, 39(2): 95 – 99. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 文畅平,陈毅,肖宏彬,等.基于突变级数法的岩溶塌 陷危险性评价[J].中国科技论文,2016,11(13):1539-1543. [WEN Changping, CHEN Yi, XIAO Hongbin, et al. Evaluation of karst collapse Risks based on catastrophe progression method[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(13): 1539-1543. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 梁桂兰,徐卫亚,何育智,等.突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用[J].岩土力学,2008,29(7):1895-1899.
 [LIANG Guilan, XU Weiya, HE Yuzhi, et al. Application of catastrophe progression method to comprehensive evaluation of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1895-1899. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王思齐.基于突变级数法的勉县堆积层滑坡稳定性分析 研究[D].西安:西安科技大学, 2019. [WANG Siqi. Stability analysis of Mianxian accumulated layer landslide based on catastrophe progression method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李文广.考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡突变失稳的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.[LIWenguang. Study on abrupt instability of unsaturated soil slope considering the influence of rainfall infiltration[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 易靖松, 王峰, 程英建, 等. 高山峡谷区地质灾害危险性 评价——以四川省阿坝县为例[J]. 中国地质灾害与防 治学报, 2022, 33(3): 134-142. [YI Jingsong, WANG Feng, CHENG Yingjian, et al. Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 134-142. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 许泰,鄂崇毅,蒋兴波,等.永登县苦水镇潜在地质灾害时空分布特征及易发性与危险性分区评价[J].科学技术与工程,2021,21(33):14081-14092. [XU Tai, E Chongyi, JIANG Xingbo, et al. Temporal and spatial distribution and divisional evaluation of susceptibility and risk of the potential geological hazards in Kushui Town, Yongdeng County [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14081-14092. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李怡飞,刘延国,梁丽萍,等.青藏高原高山峡谷地貌区

地质灾害危险性评价——以雅江县为例[J].水土保持 研究, 2021, 28(3): 364-370. [LI Yifei, LIU Yanguo, LIANG Liping, et al. Assessment on hazard of geological disasters in alpine and canyon landforms of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Yajiang County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 364-370. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 杜晓晨,陈莉,陈廷芳.基于GIS的凉山州德昌县滑坡危险性评价[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1206-1215.
 [DU Xiaochen, CHEN Li, CHEN Tingfang. Hazard assessment of landslide in Dechang County of Liangshan state based on GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1206-1215. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李信,薛桂澄,柳长柱,等.基于信息量模型和信息量-逻辑回归模型的海南岛中部山区地质灾害易发性研究[J].地质力学学报,2022,28(2):294-305. [LI Xin, XUE Guicheng, LIU Changzhu, et al. Evaluation of geohazard susceptibility based on information value model and information value-logistic regression model: A case study of the central mountainous area of Hainan Island[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 294-305. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王伟,袁雯宇,邹丽芳,等.基于滑坡敏感性评价的库区 水动力型滑坡区域综合预警研究[J].岩石力学与工程 学报,2022,41(3):479-491. [WANG Wei, YUAN Wenyu, ZOU Lifang, et al. Comprehensive regional-scale early warning of water-induced landslides in reservoir areas based on landslide susceptibility assessment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 479-491. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴润泽, 胡旭东, 梅红波, 等. 基于随机森林的滑坡空间易发性评价——以三峡库区湖北段为例[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 321-330. [WU Runze, HU Xudong, MEI Hongbo, et al. Spatial susceptibility assessment of landslides based on random forest: A case study from Hubei section in the Three Gorges Reservoir area[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 321-330. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李翠漫,许贵林,卢远.广西桂东南区域崩岗关键影响因子及敏感性研究[J].长江科学院院报,2020,37(3): 131-136. [LI Cuiman, XU Guilin, LU Yuan. Key influencing factors and susceptibility of collapse gully in southeast Guangxi, China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 131-136. (in Chinese with English abstract)]