

基于内外动力耦合成因理论的新疆 地质灾害气象预警显式统计模型

李守定^{1,2,3}, 白亚恒^{1,2}, 姜 越⁴, 王占和⁴, 魏文慧⁴, 李 晓^{2,3}, 刘丽楠^{2,3}

(1. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450045; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院
页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 3. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049;
4. 新疆维吾尔自治区地质环境监测院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:地质灾害气象预警是有效减轻地质灾害造成损失的重要手段,其核心是研究气象条件与地质灾害危险性的时空关系,即地质灾害气象预警模型。新疆地质构造复杂,内外动力作用强烈,是中国地质灾害发育严重的地区之一。基于地质灾害的地球内外动力耦合作用成因理论,建立了新疆地质灾害气象预警区划;利用地理信息系统(GIS)平台,优选内外动力地质作用指标,依据专家经验,确定各类要素权重,计算地质环境指标值,构建了基于内外动力耦合成因理论的新疆地质灾害气象预警乘积范式的显式统计模型;在此基础上,进行历史地质灾害点校验,获得了与实际地质灾害发生情况较为一致的地质灾害气象预警结果。

关键词:地质灾害;气象预警;内外动力耦合;显式统计模型;地理信息系统;地质环境指标;乘积范式;新疆

中图分类号:P694

文献标志码:A

Explicit Statistic Meteorological Early-warning Model of Geological Hazards in Xinjiang, China Based on the Genesis Theory of Endogenic and Exogenic Coupling

LI Shou-ding^{1,2,3}, BAI Ya-heng^{1,2}, JIANG Yue⁴, WANG Zhan-he⁴,
WEI Wen-hui⁴, LI Xiao^{2,3}, LIU Li-nan^{2,3}

(1. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Geological Environment Monitoring Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumchi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Meteorological early-warning is the key issue that arises during the preventions of geological hazards. A model of meteorological early-warning refers to the study of space-time relationships between meteorological conditions and risks of geological hazards, which is the core of early-warning. There are serious geological hazards in Xinjiang, which is taken as the example for the model study. Due to its own geological and geomorphological conditions, the geological hazards are controlled by strong endogenic and exogenic coupling effects. Early-warning of geological hazards in Xinjiang is divided into several zones based on the genesis theory of

收稿日期:2016-11-14

基金项目:新疆维吾尔自治区国土资源厅科研项目(XJDZFZ-XX2013);国家自然科学基金项目(41202217)

作者简介:李守定(1979-),男,河南罗山人,中国科学院大学教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lsdlyh@mail.iggcas.ac.cn.

endogenic and exogenic coupling. A explicit statistic model with selected optimum indexes is completed based on geographic information system (GIS). In the model, the weights of early-warning indexes of geological hazards are determined according to the experts' experience, and the values of geological environment indexes are calculated. Then, the model is consistently verified by historical geological hazards, namely the results of early-warning are the same.

Key words: geological hazard; meteorological early-warning; endogenic and exogenic coupling; explicit statistic model; GIS; geological environmental index; product form; Xinjiang

0 引言

中国是世界上地质灾害最为严重的国家之一,特别是崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害点多面广,严重危害人民生命财产安全。新疆处于中国西部,占全国总面积的 1/6,山脉连绵起伏,地形高差悬殊,形成复杂多样的地质环境,境内三大山系的崩塌、滑坡、泥石流突发性地质灾害普遍发育且分布广泛。截至 2010 年,新疆地质灾害点及潜在隐患点共计 8 468 处^[1]。考虑到新疆地质灾害防治的现状,地质灾害气象预警是提高全社会的防灾减灾意识、有效减轻地质灾害造成损失的重要手段^[2]。

地质灾害气象预警是一种基于气象预报对地质灾害发生的可能性进行预警预报的方法。其核心是研究气象条件与地质灾害危险性的时空关系,即地质灾害气象预警模型。美国、中国、日本、巴西等不同国家和地区曾经或正在开展以降雨为主要诱发因素的地质灾害气象预警。常用的地质灾害气象预警模型多采用统计模型,根据历史降雨数据和地质灾害资料,建立降雨与地质灾害之间经验性的统计关系,寻找临界降雨判据^[3-11]。常用的统计方法包括图表法、多元回归分析、概率方法、神经网络方法等。Campbell 等建立了临界降雨阈值预报模型^[12-15]; Au 等建立了单一降雨阈值预报模型^[16-17]; Dai 等建立了滚动雨量模型^[18];王仁乔等建立了有效雨量、降雨周期或频率模型^[19-21];兰恒星等建立了斜坡灾害危险度指数法计算模型^[22];刘传正等建立了中国区域地质灾害显式统计模型^[23]。

2003 年起,中国国土资源部和中国气象局采用临界降雨判据模型联合开展汛期地质灾害气象预警工作;2008 年,地质灾害气象预警模型升级为临界降雨判据模型与显式统计模型并行运算,相互校验与补充^[24]。中国省级地质灾害气象预警工作流程、技术约定等与国家级相似,各省、自治区、直辖市分别根据各自具体的地质环境条件,分别选取了适合自身的预警预报模型。新疆维吾尔自治区于 2004 年开始

进行地质灾害气象预警工作,由于新疆阿尔泰、天山和昆仑—阿尔金山三大山系存在冰川与常年积雪,春季常常发生由冰雪冻融产生的地质灾害,所以预警时间为每年的 3 月 31 日至 9 月 30 日,预警模型采用的是基于临界降雨判据的德菲尔预警模型^[1]。

近年来,随着人类活动加剧,新疆地质灾害的发育在规模上由局部独立向群发成片趋势发展,在空间上由以中低山区为主向高山区扩展的趋势发展,在时间上由汛期发育向以汛期为主、各个季节时有出现的趋势发展。由于地质灾害预警工作精细化与准确化的需求,结合特殊的地理地质条件,新疆山区在历次构造运动特别是新构造运动作用下持续强烈上升,沟谷深切,降水比较丰沛。基于内外动力耦合成因理论,在建立新疆地质灾害预警区划与优选内外动力地质作用指标的基础上,利用地理信息系统(GIS)平台,建立新疆地质灾害气象预警显式统计模型,在此基础上进行历史地质灾害校验,以期获得较为一致的预报结果。

1 地质灾害气象预警区划

新疆地域辽阔,山脉连绵起伏,地形高差悬殊,新构造运动强烈,气候和自然环境复杂多变。受地质构造、地理位置、地貌景观的控制以及气候和水文等因素的影响,新疆形成了复杂多样的地质环境条件。三大山系的崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害普遍发育且分布广泛,种类多,发生频率高,受灾面积广,危害严重。

新疆地质灾害的分布区域主要在北疆的伊犁谷地、天山北麓、阿尔泰山南麓地区和南疆的天山南麓、昆仑山西部中高山区;北疆伊犁谷地地质灾害主要集中在每年 4 月至 6 月,阿尔泰山南麓和天山北麓主要集中在每年 6 月至 8 月;南疆天山南麓和昆仑山西部中高山区主要集中在每年 7 月至 8 月。新疆地质灾害类型主要为崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等,崩塌约占 10%,滑坡约占 55%,泥石流约占 27%,地面塌陷约占 7%。新疆地质灾害成因规律

复杂,除地质环境条件复杂之外,还有诱发因素(包括降雨、冻融和地震)的联合作用,其中最重要的诱发因素为降雨^[1]。

根据新疆地质灾害重点发育区地质灾害调查和成灾机理分析,结合新疆气象和地质条件,将新疆 3 个一级预警区细分为 7 个预警亚区(图 1)。一级预警区为昆仑山—阿尔金山区(A)、天山区(B)和准噶

尔—阿尔泰山区(C);天山区分为 4 个预警亚区,分别为伊犁谷地(B1)、天山北麓(B2)、天山南麓(B3)、吐哈南部(B4);准噶尔—阿尔泰山区分为 2 个预警亚区,分别为准噶尔(C1)和阿尔泰(C2)。其中,B1 区是伊犁谷地山地丘陵黄土地区,不适合采用显式统计模型,而 B4 区是吐哈南部山地丘陵地区,地质灾害点较少,没有进行地质灾害气象预警的需求。

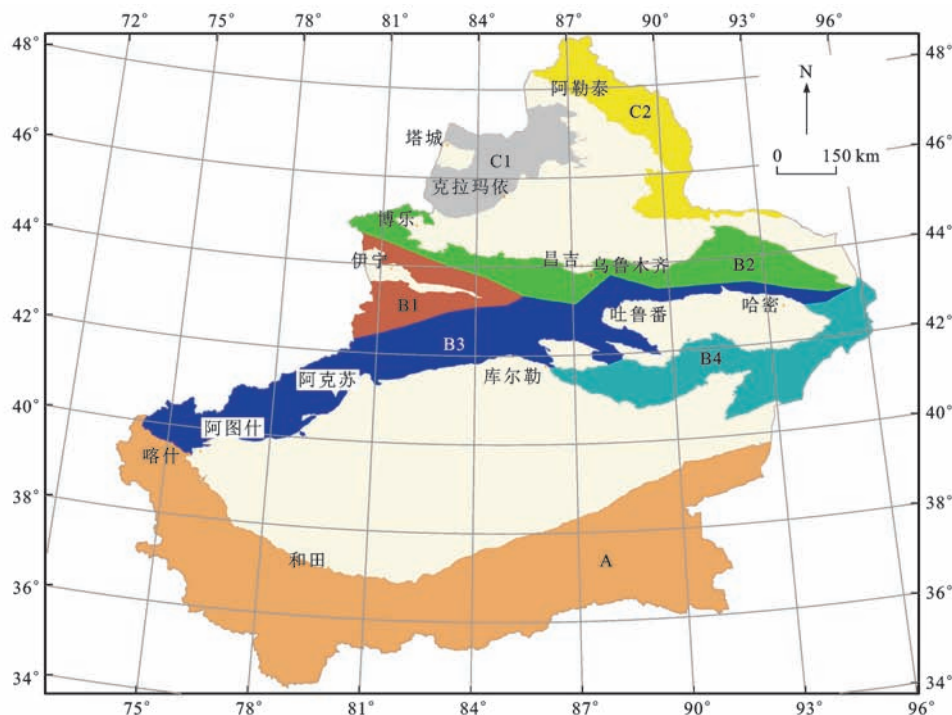


图 1 新疆地质灾害气象预警区划

Fig. 1 Zoning Map of Meteorological Early-warning of Geological Hazards in Xinjiang

昆仑山—阿尔金山区包括昆仑山北麓、阿尔金山北麓、昆仑山西部等山地丘陵地区。崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害总数为 1 607 处,其中滑坡共计 109 处,泥石流 612 处,崩塌 886 处。该区属于高山峡谷地带,地球内外动力作用非常强烈。

天山区包括天山北麓、天山南麓、伊犁谷地、吐哈南部等山地丘陵地区。崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害总数为 4 513 处,其中滑坡共计 1 372 处,泥石流 890 处,崩塌 2 251 处。天山山脉地貌、地层岩性与构造类型复杂,温度、降雨、人类活动等诱发因素多样;伊犁谷地多发黄土滑坡,岩土体结构与类型相对单一;吐哈南部丘陵地区地质灾害发生较少。

准噶尔—阿尔泰山区包括准噶尔盆地西侧、阿尔泰山南麓等山地丘陵地区。根据现有调查数据库,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害总数为 1 219 处,其中滑坡共计 106 处,泥石流 127 处,崩塌 986 处。该区地貌类型多样,地层岩性与构造单元各异,地质

灾害主要诱发因素为降雨,地质灾害发育强度低。

2 地质灾害气象预警指标选取

区域地质灾害发育控制因素一直是地质灾害成因机理研究领域的热点问题。Burbank 等通过对现代喜马拉雅地区的研究,认为该区滑坡是协调快速的基岩抬升和河流下切形成的陡坡相互作用的结果^[25];Hermanns 等发现阿根廷西北部干旱区山地的 55 处体积大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌和滑坡体主要沿山前活动断裂带分布,与第四纪期间构造运动密切相关,发育于峡谷陡壁处的崩塌受到逆冲活动断裂的控制^[26];Scheidegger 认为地貌形态的形成和演化主要是受区域构造内动力作用和剥蚀外动力作用的控制^[27];Shroder 以喜马拉雅地区为例,讨论了斜坡系统的演化形式,认为地壳抬升地区的斜坡系统演化是不同尺度的斜坡物质运动的综合效应,包括整个山脉在重力作用下的构造变形、单个

山体或大范围斜坡的岩层深部蠕动和规模最小的崩塌、滑坡破坏等^[28]。王思敬提出了“用以解释若干重大地质灾害成因的地球内外动力耦合作用理论”,对地震滑坡、边坡灾害和地面变形灾害的地球内外动力耦合机制进行了研究^[29]。李晓等以发育在三峡库区长江干流两岸的众多大型滑坡为背景,从滑坡时空分布与地球内外动力的关系、滑坡滑带形成演化的内外动力耦合过程与机制两个方面,研究和论证地球内外动力耦合作用与地质灾害形成演化的关系^[30]。

本文应用内外动力耦合成因理论来选取新疆地质灾害预警指标。影响地质灾害发育的内外动力因素主要包括地壳运动、断裂活动、地震、火山活动、降水、卸荷作用、风化作用、剥蚀作用、地表和地下水运动、冰川运动和人类活动等。从中选取关键的內动力地质作用指标、外动力地质作用指标和降雨预警指标,建立预警指标体系;并根据各指标的重要性,依据专家经验排序,确定各指标权重值。

新疆地域范围广,地貌单元多,地质构造复杂,现有的地质基础资料并不详尽,因此,以内外动力指标选取需从现有的数据出发。坡体结构控制着斜坡地形地貌,因此,采用海拔高程、斜坡坡度、斜坡坡向3个地形地貌指标来表征坡体结构;新疆岩土体类型多,还分布大量的冰川雪被和水体,因此,将地层岩性指标概化为第四系堆积物、岩体、雪被区和水体4类;地质构造指标主要是新构造运动及断层的影响,特别是最新的断层活动对地质灾害发育影响更甚,而地震是地壳内部最新地质构造运动的表现,地震参数表征中的地震动峰值加速度(指地震时地面运动的加速度)大的地方地质灾害发育较为严重,因此,综合考虑断层活动性和场地特性的综合指标,采用地震动峰值加速度参数来表征地质构造指标。对于外动力地质指标,主要考虑降雨与河流切割等作用,选取年均降雨量和水系密度作为外动力地质作用指标。降雨预警指标主要考虑有效降雨量指标,由于新疆处于中国西部内陆,降雨量相对中国中部和东部小,单日强降雨极少发生,因此,选取7天有效降雨量表征斜坡降雨入渗破坏相对合理。

2.1 内外动力因子分级

根据新疆崩塌、滑坡、泥石流的灾害特征,综合分析地质环境条件,确定影响要素,并进一步对每类要素进行划分,再依据专家经验,确定将各类要素指标值和权重值,建立符合新疆地质环境条件的地质灾害预警模型。其中,影响要素可划分为地质环境

要素和触发要素两大类。

本文选取海拔高程、斜坡坡度、斜坡坡向、地层岩性、地震动峰值加速度、水系密度、年均降雨量作为影响因子,并分别对每个因子进行分级。

2.1.1 海拔高程

单一的海拔高程因子与地质灾害并无直接的关系。兰恒星等提到海拔高程对滑坡的影响有2个方面的原因:一是地形对集水区面积有一定的影响;二是不同的高程范围具有不同的植被类型和植被覆盖度,从而间接造成滑坡与地形高程有着一定的联系^[31-32]。结合各预警亚区地质灾害调查及其发育规律分析,对各预警亚区海拔高程进行分级。海拔高程与地质灾害空间分布的关系见图2。

2.1.2 斜坡坡度

斜坡坡度是地质灾害发生的一个主要因素,与土层厚度、气候条件、水文条件、岩性条件、植被覆盖度等因素有关。斜坡的成因、形态反映了斜坡的形成历史、稳定程度和发展趋势,对斜坡的稳定性也会产生重要影响^[33]。通常来说,随着斜坡坡度的增加(包括重力在内的剪切力增大),相应的地质灾害发生概率也会增大。根据地质灾害调查成果,分析各级别斜坡坡度中地质灾害发生的频数,最终将斜坡坡度分为 $0\sim 10^\circ$ 、 $11^\circ\sim 20^\circ$ 、 $21^\circ\sim 30^\circ$ 、 $31^\circ\sim 40^\circ$ 、 $41^\circ\sim 90^\circ$ 等5个级别。地形坡度与地质灾害空间分布的关系见图3。

2.1.3 斜坡坡向

斜坡坡向表示斜坡面的走向。不同斜坡坡向的太阳辐射强度等条件不同^[33],物理风化和植被积雪等因素影响斜坡坡向岩土体结构与地下水补给条件,因而影响斜坡的稳定性。根据地质灾害发生的频率,将斜坡坡向分为 $0\sim 90^\circ$ 、 $9^\circ\sim 180^\circ$ 、 $181^\circ\sim 270^\circ$ 、 $271^\circ\sim 360^\circ$ 等4个级别。斜坡坡向与地质灾害空间分布的关系见图4。

2.1.4 地层岩性

Wang等研究认为滑坡分布与地层有一定关系^[34]。岩土体的岩性及其结构特征对滑坡变形失稳的影响显著,决定着滑坡岩土体强度、应力分布、变形破坏特征^[35]。

根据新疆地质矿产勘查开发局2000年编制完成的《新疆区域地质图》中岩石类型和断层数据,经国家科技支撑计划项目修正,将地层岩性分为岩体、雪被区、水体、第四系堆积物等4个部分。地层岩性与地质灾害空间分布的关系见图5。

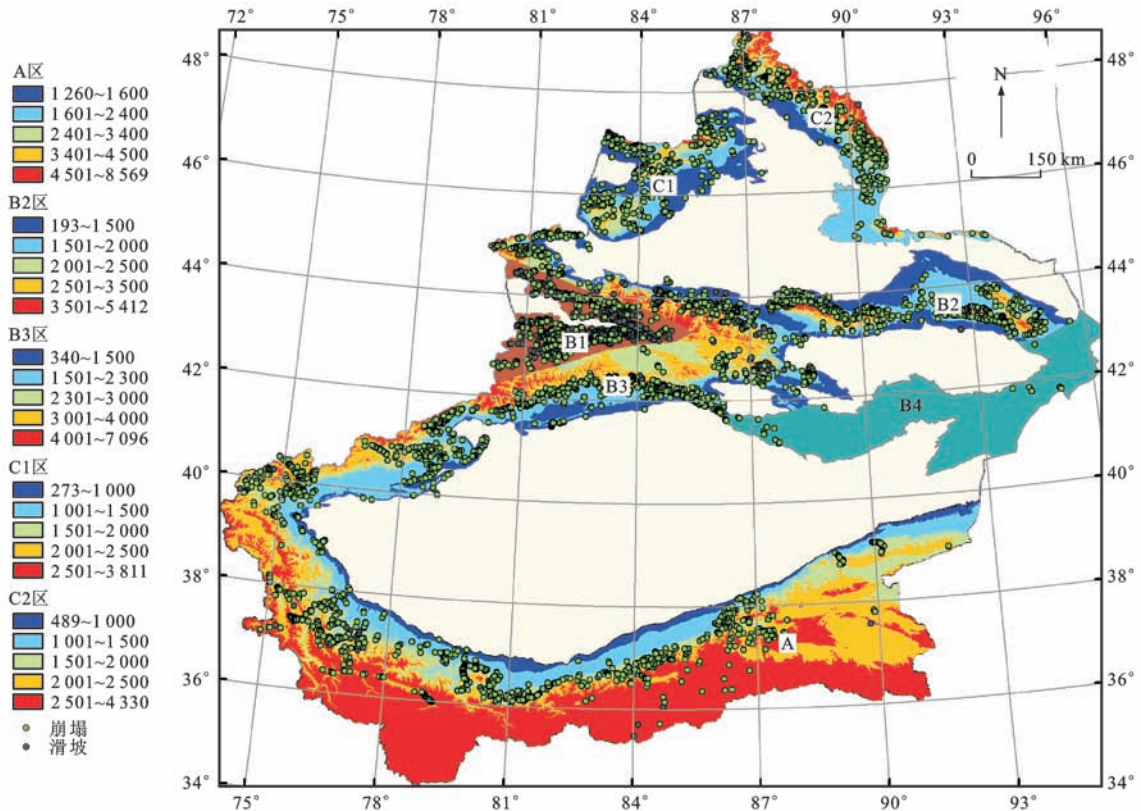


图2 海拔高程与地质灾害空间分布的关系(单位:m)

Fig. 2 Relationship Between Elevation and Spatial Distribution of Geological Hazards (Unit: m)

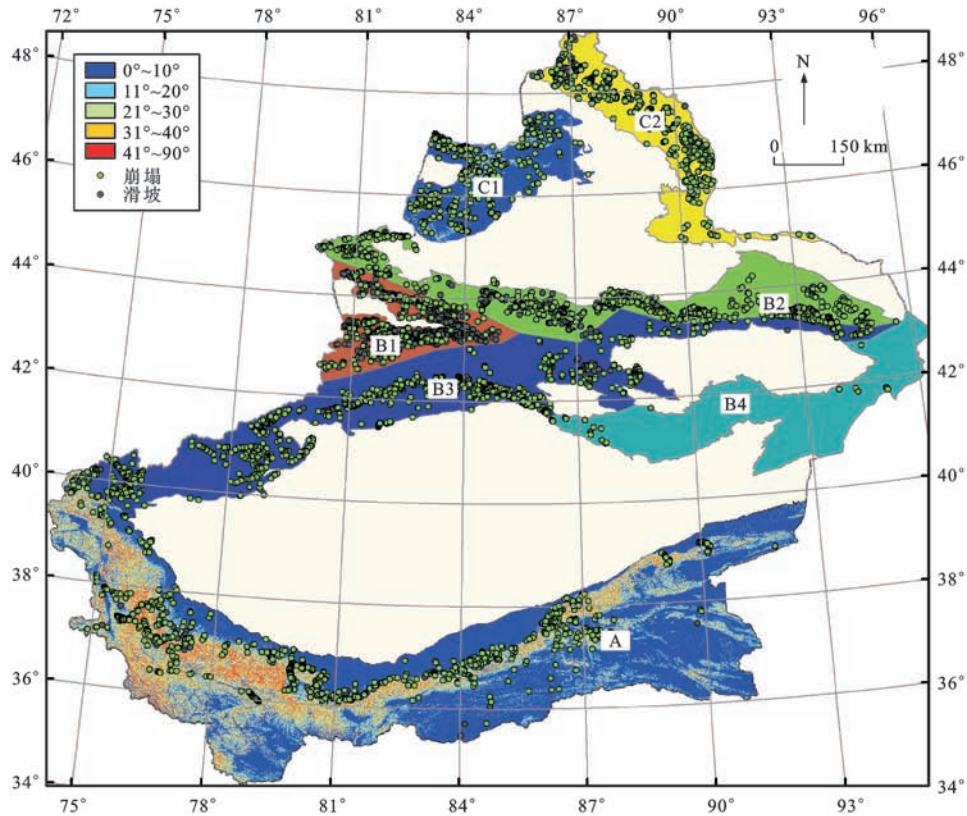


图3 斜坡坡度与地质灾害空间分布的关系

Fig. 3 Relationship Between Slope Gradient and Spatial Distribution of Geological Hazards

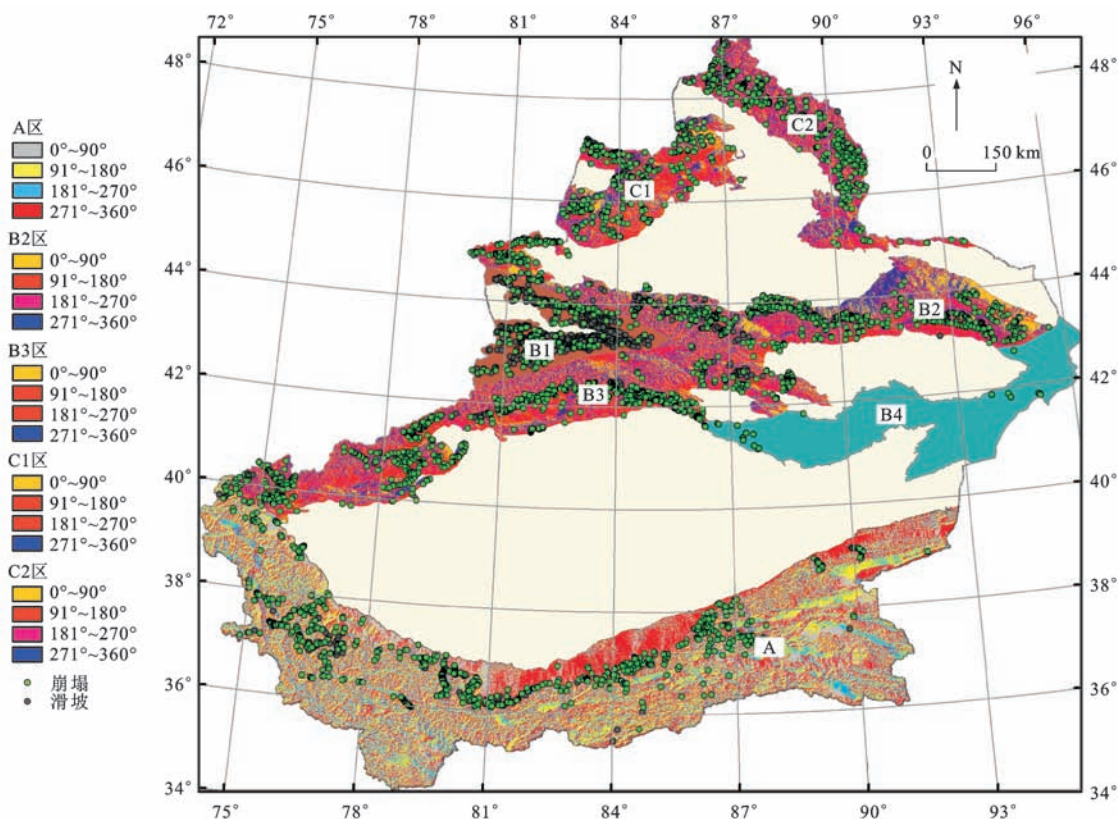


图4 斜坡坡向与地质灾害空间分布的关系

Fig. 4 Relationship Between Slope Aspect and Spatial Distribution of Geological Hazards

2.1.5 地震动峰值加速度

王恭先等认为,地震对滑坡的影响主要体现在地震动的往复运动对边坡造成的附加力破坏了边坡的平衡条件,从而导致地质灾害的发生^[36]。地震动峰值加速度作为地震记录的瞬时极大值,可以在一定程度上反映地震动的整体作用水平;另外,地震动峰值加速度是地震后可以快速获取的一个反映地震动在不同地点振动大小的量,因此,分析地震动峰值加速度与地震诱发崩塌、滑坡的关系具有内在的物理联系和现实的应用价值^[37]。在地质环境指标计算中,选取地震动峰值加速度作为地质灾害影响因子。地震动峰值加速度与地质灾害空间分布的关系见图6。

2.1.6 水系密度

地质灾害的发生与河流的分布有着十分紧密的关系。河流对地质灾害的影响一般表现在两方面:①河流通过冲刷、淘蚀和浪击作用对斜坡产生影响,使下部岩土体被搬走失去支撑,加快崩塌、滑坡的发生;②地下水位的埋深与边坡中地下水的补给、径流有着紧密联系。

当透水边坡处于地下水位以下时,将承受水的浮托力,使坡体质量减轻,利于边坡失稳;不透水边

坡处于地下水位以下时,将受静水压力的影响,地震时还会造成孔隙水压力增加,导致边坡产生永久位移^[38]。另外,水系附近往往是深切峡谷带,具有很好的滑坡发育临空面与滑动空间,因此,水系对滑坡等地质灾害的发育具有一定的控制作用^[39]。根据新疆数字高程模型(DEM),提取水系密度,经过与历年的地质灾害数据进行对比,得出地质灾害发生的密度与水系密度具有正相关关系,因此,按照水系密度对各研究区进行分级。水系密度与地质灾害空间分布的关系见图7。

2.1.7 年均降雨量

刘艳辉等在对中国地质灾害与降雨量的关系研究中得出,年均降雨量与多年来地质灾害发育密度具有非常一致的对应关系,降雨是地质灾害发生的重要诱发因素^[40]。地质灾害发生的密度最大区域年均降雨量最大。根据新疆年均降雨量数据,结合地质灾害发生的密度,将各研究区的年均降雨量分级。年均降雨量与地质灾害空间分布的关系见图8。

2.2 影响因子权重

地质灾害气象预报预警指标体系中影响因子权重值的确定采用反推法,即采用历年中部分典型地质灾害发生的样本,根据当时的降雨事件,反推地质

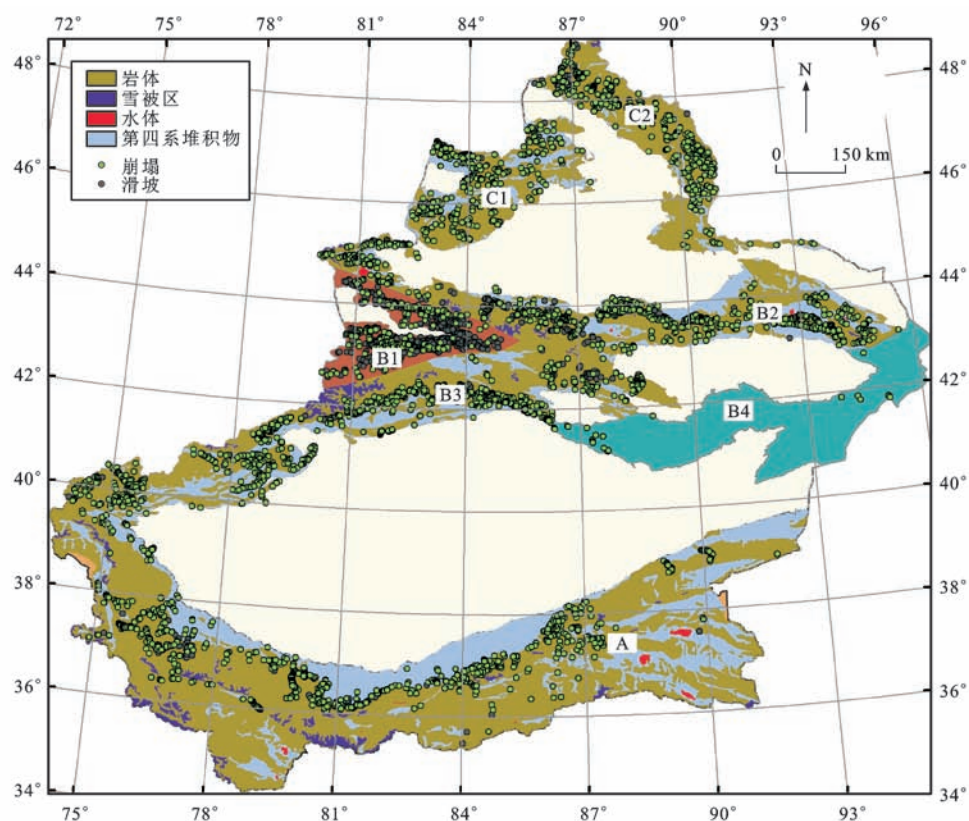


图 5 地层岩性与地质灾害空间分布的关系

Fig. 5 Relationship Between Stratigraphic Lithology and Spatial Distribution of Geological Hazards

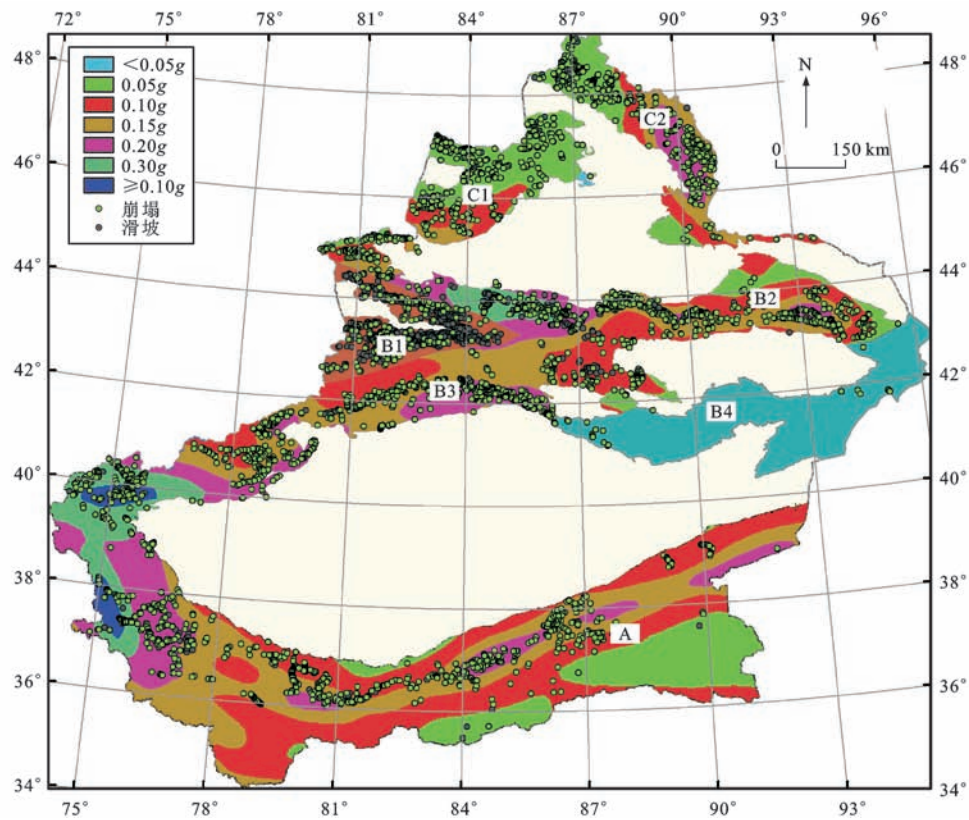


图 6 地震动峰值加速度与地质灾害空间分布的关系

Fig. 6 Relationship Between Ground Motion Peak Acceleration and Spatial Distribution of Geological Hazards

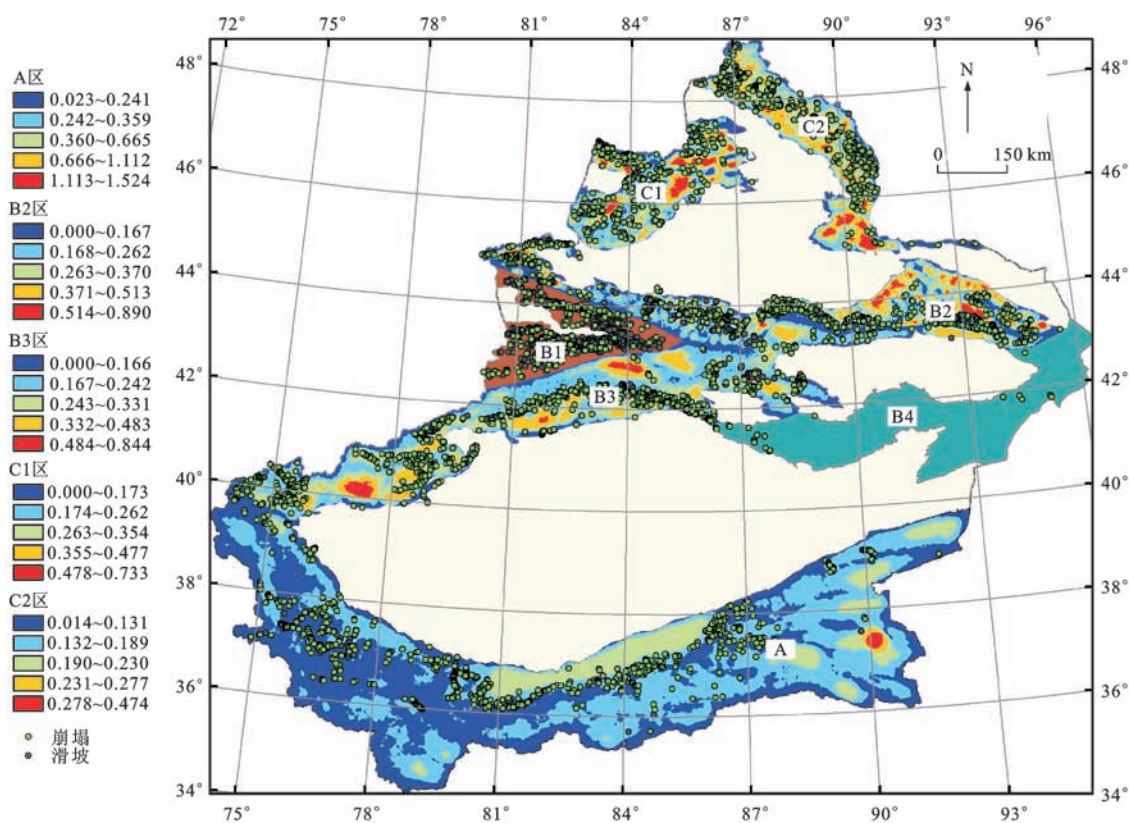
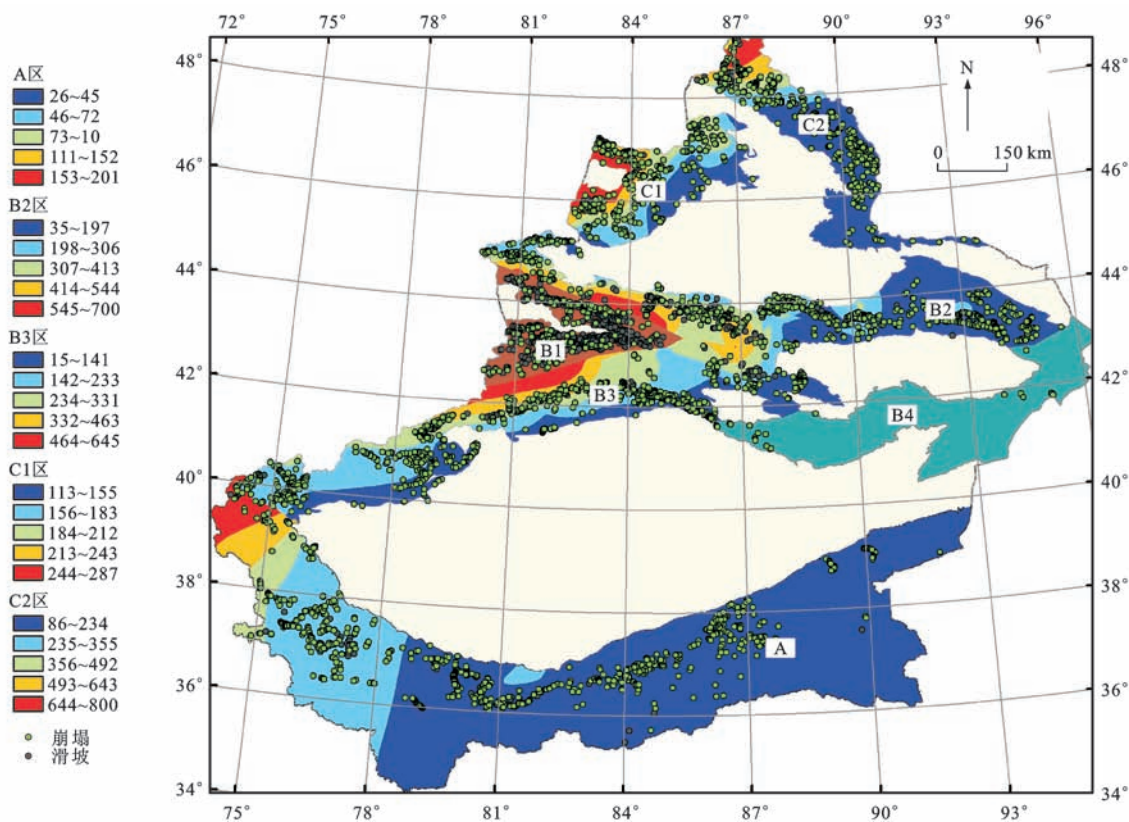
图 7 水系密度与地质灾害空间分布的关系(单位: 10^{-6} m^{-1})Fig. 7 Relationship Between Drainage Density and Spatial Distribution of Geological Hazards (Unit: 10^{-6} m^{-1})

图 8 年均降雨量与地质灾害空间分布的关系(单位:mm)

Fig. 8 Relationship Between Mean Annual Precipitation and Spatial Distribution of Geological Hazards (Unit: mm)

灾害事件与降雨量的基本相关关系,从而基本确定影响因子的权重值。

根据各影响因子对地质灾害发生的贡献大小,采用专家评分的方法给各个影响因子的权重赋值,地质灾害内外动力耦合预警指标体系及权重见表 1。

表 1 地质灾害预警指标权重

Tab. 1 Weights of Early-warning Indexes of Geological Hazards

类型	指标	影响因子	权重
内动力 地质作用	地形地貌	海拔高程	0.13
		斜坡坡度	0.15
		斜坡坡向	0.12
	地层岩性	松散堆积物、岩体、雪被区、水体	0.20
	地质构造	地震动峰值加速度	0.10
外动力 地质作用	水系	水系密度	0.18
	降雨	年均降雨量	0.12
降雨预警	降雨预警	7 天有效降雨量	

3 地质灾害气象预警显式统计模型

3.1 确定性系数

确定性系数(CF)方法是一种用来分析影响某一事件发生的各因素敏感性的方法。确定性系数方法^[31-33]为一个概率函数,最早由 Shortliffe 等提出^[41],由 Heckerman 进行改进^[42]。该方法表达式为

$$I_{CF} = \begin{cases} \frac{P_a - P}{P_a(1 - P)} & P_a \geq P \\ \frac{P_a - P}{P(1 - P_a)} & P_a < P \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{CF} 为确定性系数; P_a 为地质灾害在数据 a 类中发生的条件概率,即数据 a 类中地质灾害个数与数据 a 类面积的比值; P 为地质灾害在整个研究区中发生的先验概率,即整个研究区地质灾害个数与研究区面积的比值。

在采用确定性系数方法开展因子量化过程中,假设在与已发生地质灾害地区相似的斜坡区就有可能发生类似的地质灾害。确定性系数方法实现了地质灾害各影响因子同区间定量化,并可合并计算。

确定性系数的变化范围为 $[-1, 1]$ 。确定性系数正值代表地质灾害发生的确定性高,地质环境条件差;负值代表地质灾害发生的确定性低,地质环境条件好;确定性系数接近于 0,说明确定性居中,不能确定地质环境的优劣^[15]。

确定性系数的计算按照影响因子分级、影响因子内灾害点个数求取、条件概率求取、确定性系数求取等 4 个步骤进行:①影响因子重分类,即在 GIS

平台下,首先根据自然间断分类方法将所有崩塌、滑坡影响因子的栅格数据进行重分类;②求灾害点在影响因子分类中各个分级的个数,并统计出每个分级的栅格个数(由于是相对值,所以不必计算面积);③求取条件概率,分级的灾害点个数与所处分级的栅格数相除得到 P_a 值,然后将该区域的全部灾害点个数与该地域的栅格数相除得到 P 值;④求取确定性系数,根据式(1)计算得到各个分级的确定性系数^[39]。昆仑山—阿尔金山区地质灾害影响因子确定性系数见表 2。

表 2 昆仑山—阿尔金山区地质灾害影响因子确定性系数

Tab. 2 Certainty Coefficients of Influencing Factors of Geological Hazards in Kunlun-Altun Mountains Area

影响因子	分级范围	灾害点个数	确定性系数
海拔高程	1 260~1 600 m	60	0.20
	1 601~2 400 m	282	0.55
	2 401~3 400 m	437	0.68
	3 401~4 500 m	192	-0.21
	4 501~8 569 m	24	-0.95
斜坡坡度	0°~10°	14	-0.32
	11°~20°	256	0.33
	21°~30°	203	0.30
	31°~40°	467	0.15
	41°~90°	55	0.19
斜坡坡向	0°~90°	248	-0.17
	91°~180°	269	0.22
	181°~270°	277	0.27
	271°~360°	201	-0.29
地层岩性	岩体	803	0.17
	雪被区	0	-1.00
	水体	0	-1.00
	第四系堆积物	192	-0.35
地震动峰值 加速度	0.05g	6	-0.80
	0.10g	256	-0.17
	0.15g	327	-0.08
	0.20g	307	0.35
	0.30g	68	-0.10
水系密度	$(0.023 \sim 0.241) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	447	-0.04
	$(0.242 \sim 0.359) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	541	0.22
	$(0.360 \sim 0.665) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	7	-0.93
	$(0.666 \sim 1.112) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	0	-1.00
	$(1.113 \sim 1.524) \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$	0	-1.00
年均 降雨量	26~45 mm	678	-0.05
	46~72 mm	259	0.21
	73~110 mm	23	-0.21
	111~152 mm	16	-0.33
	153~200 mm	19	-0.23

3.2 地质环境指标

在GIS平台下,首先分别基于海拔高程、斜坡坡度、斜坡坡向、地层岩性、地震动峰值加速度、水系密度、年均降雨量等7个影响因子的确定性系数来构建影响因子对应的栅格图层,然后结合表1的地质灾害影响因子权重值,运用GIS空间分析模块计算地质环境指标值。其表达式为

$$G = \sum_{j=1}^n \alpha_j A_j \quad (2)$$

式中: G 为地质环境指标,量化地质环境条件; α_j 为第 j 个影响因子的权重, $j=1,2,\dots,n$; A_j 为第 j 个影响因子的定量化取值。

将所计算的地质环境指标值与历史灾害点的分布情况进行对比分析,校验地质环境指标是否能够体现地质环境的优劣程度(图9)。检验结果显示,随着地质环境指标值的逐步降低,地质灾害发生的密度逐步减少。这反映在地质环境指标值大的区域,地质灾害点分布概率大,地质环境指标值小的区域,地质灾害点分布概率少,即地质环境指标值的大小能够反映历史地质灾害的多少,因此,地质环境指标值能够反映地质背景环境条件的优劣。

3.3 模型计算方法

在显式统计模型中,以地质环境指标值、灾害发

生当日降雨量、前期有效降雨量作为输入因子,以历史地质灾害的实际发生情况(数量)作为输出因子,采用多元线性回归或神经网络方法,建立地质灾害气象预警计算模型,从而确定预警等级。

显式统计模型的通用函数为

$$T = f(G, R_0, R_p) \quad (3)$$

式中: T 为预警指数,据此确定地质灾害气象预警等级; R_0 为当日降雨量,指地质灾害发生当日降雨量,预警分析时为预报雨量; R_p 为前期有效降雨量,指在地质灾害发生前的有效降雨量^[15]。

本文对基于内外动力耦合成因理论的地质灾害气象预警显式统计模型进行了改进。首先,在选择地质环境指标值时,考虑地质灾害的地球内外动力耦合作用成因理论,选取关键内外动力作用因子;其次,在预警指数模型构建上,选用7天有效降雨量和当日降雨量两个降雨量指标作为地质灾害诱发因子,运用地质环境指标与诱发因子(有效降雨量和当日降雨量)分别相乘的判据模型,得到预警指标,从而实现地质环境本底条件与诱发因子的物理耦合关系。最后,在预警指数模型建立过程中,地质环境指标值与诱发因子均采用数学归一化范式,方便建立预警等级。预警指数表达式为

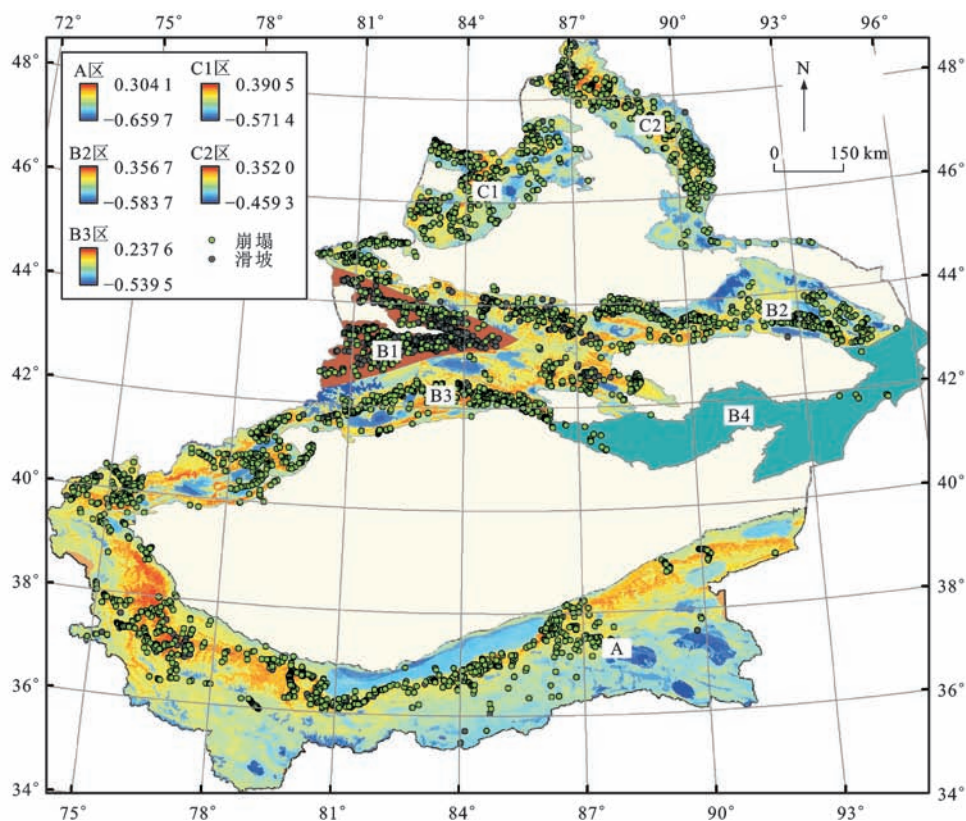


图9 地质环境指标与地质灾害空间分布的关系

Fig. 9 Relationship Between Geological Environment Index and Spatial Distribuion of Geological Hazards

$$T_1 = G'R'_c \tag{4}$$

$$T_2 = G'R'_p \tag{5}$$

式中： T_1 为 7 天有效雨量预警指数； T_2 为当日预报降雨量预警指数； G' 为地质环境指标归一化值； R'_c 为 7 天有效降雨量归一化值； R'_p 为当日降雨量归一化值。

有效 7 天降雨量采取地质灾害发生的前 7 天降雨量(含预报雨量)进行计算。其表达式为

$$R_c = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \cdots + \alpha^n R_n \tag{6}$$

式中： R_c 为 7 天有效降雨量； R_n 为前期 $n+1$ 天累计降雨量，为地质灾害发生前的累计降雨量，一般取有效降雨量($n=6$)； α^n 为前 $n+1$ 天累计降雨量权重。

3.4 预警等级

建立模型之后,需要根据已经发生的灾害点和降雨数据确定模型具体等级。首先对地质环境指标图层、7 天有降效雨量图层进行归一化,然后将归一化的地质环境指标图层与有效降雨量图层相乘可以得到预警模型等级图。地质环境指标图层采用线性归一化。有效降雨量图层的归一化需要根据不同研究区的往年降雨量进行分析,而且在进行预警的时候需要从 7 天有降效雨量和当日降雨量两个指标进行考虑(表 3),因此,需要进行不同的归一

化。将归一化的地质环境指标图层与归一化的降雨量图层进行相乘得到预警指数,运用 GIS 平台中的自然间断分级方法进行分级,即可以得到预警模型等级图(图 10)。

表 3 各预警亚区降雨量归一化计算公式
Tab.3 Normalized Formulas of Rainfall in Each Early-warning Subregion

预警亚区	降雨量归一化计算公式
A 区	$R'_c = R_c/12, R'_p = R_0/16$
B2 区	$R'_c = R_c/48, R'_p = R_0/16$
B3 区	$R'_c = R_c/48, R'_p = R_0/16$
C1 区	$R'_c = R_c/48, R'_p = R_0/24$
C2 区	$R'_c = R_c/48, R'_p = R_0/32$

红色预警,表示地质灾害发生可能性很大;橙色预警,表示地质灾害发生可能性大;黄色预警,表示地质灾害发生可能性较大;蓝色预警,表示地质灾害发生可能性较小。不同区域的预警模型等级见表 4。

4 模型校验

模型确立之后,需要选取灾害点对模型进行校验。本文选取 2004 年 5 月 22 日发生在天山北麓吉木萨尔

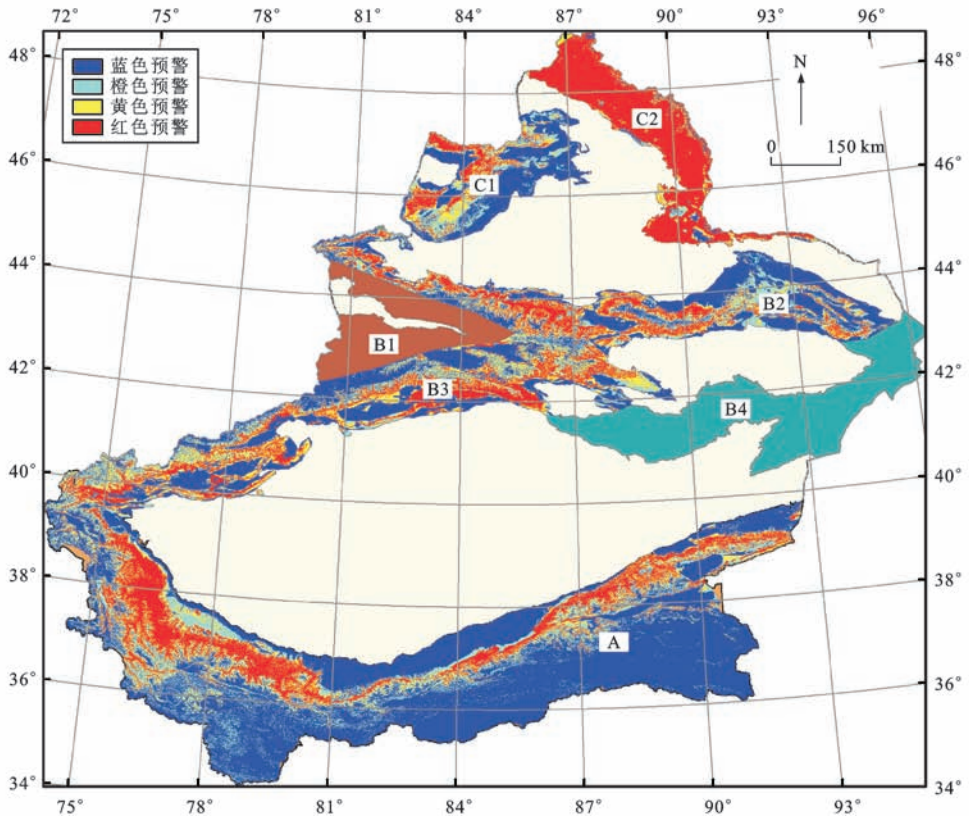


图 10 地质灾害预警模型等级
Fig. 10 Early-warning Model Grades of Geological Hazards

表 4 各预警亚区模型等级

Tab.4 Model Grades in Each Early-warning Subregion

预警等级	A 区	B2 区	B3 区	C1 区	C2 区
红色	≥ 0.385	≥ 0.353	≥ 0.396	≥ 0.361	≥ 0.162
橙色	0.354~0.385	0.311~0.353	0.355~0.396	0.312~0.361	0.312~0.361
黄色	0.320~0.353	0.268~0.310	0.315~0.354	0.263~0.312	0.263~0.312
蓝色	0.000~0.320	0.000~0.267	0.000~0.314	0.000~0.262	0.000~0.126

县大有乡贾家湾村的滑坡灾害和 2011 年 6 月 22 日发生在准噶尔地区克铁公路 S201 省道 134 km+50 m 处的滑坡灾害,对模型进行校验。分别求出这两个灾害点的有降效雨量图层和当日降雨量图层,并将两个图层进行归一化,将归一化后的有效降雨量图层和地质环境指标图层相乘,求出灾害点所在位置预警指数;根据预警模型等级范围,判断是否满足预警,只要其中有一个值满足预警范围,就说明该

地区需要进行预警。

2004 年 5 月 22 日发生在天山北麓的滑坡灾害有效降雨量图层(图 11)中,滑坡灾害点对应的 7 天预警指数为 0.459,对应红色预警,因此,证明该点的预警是有效的。2011 年 6 月 22 日发生在准噶尔地区的滑坡灾害有效降雨量图层(图 12)中,滑坡灾害点对应的 7 天预警指数为 0.335,对应红色预警,因此,证明该点的预警也是有效的。

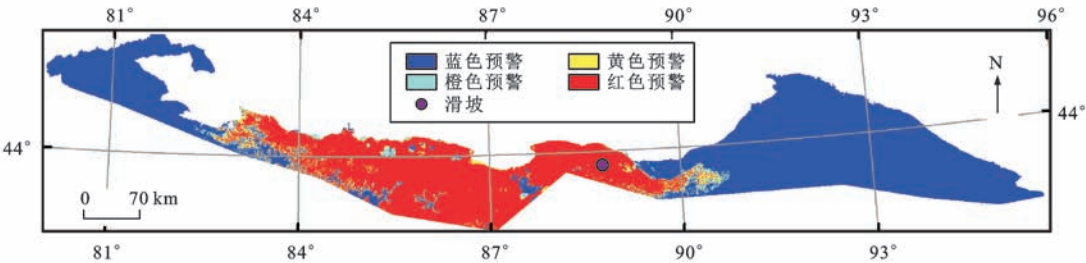


图 11 天山北麓模型校验

Fig. 11 Verification Map of Model in the North of Tianshan

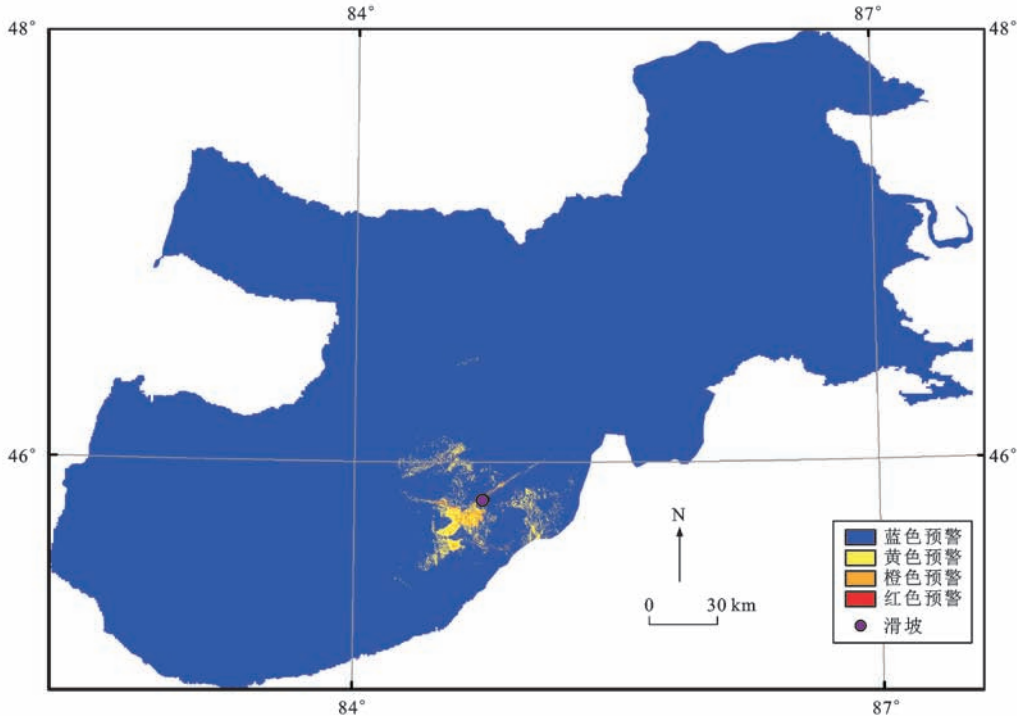


图 12 准噶尔地区模型校验

Fig. 12 Verification Map of Model in Junggar Area

5 结 语

(1)新疆是中国地质灾害发育严重的地区之一,地质灾害气象预警是有效减轻该地区地质灾害造成损失的重要手段,其核心是研究气象条件与地质灾害危险性的时空关系,即地质灾害气象预警模型。新疆在历次构造运动特别是新构造运动作用下持续强烈上升,沟谷深切,降水比较丰沛,特殊的地质地貌条件导致内外动力地质作用强烈,控制着地质灾害的发育。

(2)基于地质灾害的地球内外动力耦合作用成因理论,建立了新疆地质灾害预警区划,并优选内外动力地质作用指标,再依据专家经验,确定各类要素权重及其地质环境指标。

(3)利用地理信息系统(GIS)平台,构建了基于内外动力耦合成因理论的新疆地质灾害气象预警乘积范式的显式统计模型,在此基础上进行历史地质灾害校验,获得了较为准确的预报结果。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 邹英,王彩华,李志强,等.新疆县(市)地质灾害调查与区划综合研究报告[R].乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区地质环境监测院,2010.
ZOU Ying, WANG Cai-hua, LI Zhi-qiang, et al. Integrated Research Report on Geological Hazards in Xinjiang County (City) [R]. Urumchi: Geological Environment Monitoring Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2010.
- [2] 刘传正,刘艳辉,温铭生,等.中国地质灾害区域预警方法与应用[M].北京:地质出版社,2009.
LIU Chuan-zheng, LIU Yan-hui, WEN Ming-sheng, et al. Method and Application of Regional Warning for Geohazards in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [3] 刘艳辉,温铭生,苏永超,等.台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J].水文地质工程地质, 2016, 43(5): 119-126.
LIU Yan-hui, WEN Ming-sheng, SU Yong-chao, et al. Characteristics of Geo-hazards Induced by Typhoon Rainstorm and Evaluation of Geo-hazards Early Warning [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(5): 119-126.
- [4] 朱映橙,李益敏,魏苏杭.怒江州滑坡地质灾害气象预警模型研究[J].云南大学学报:自然科学版,2016, 38(4): 610-619.
ZHU Yi-cheng, LI Yi-min, WEI Su-hang. A Predic-

- tion Model Study on Landslide in Nujiang State [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2016, 38(4): 610-619.
- [5] 李政国,薛强,张茂省,等.陕西省延安市地质灾害气象预警信息系统研究:以“7·3”暴雨为例[J].灾害学, 2016, 31(2): 69-73, 83.
LI Zheng-guo, XUE Qiang, ZHANG Mao-sheng, et al. Study on the Meteorological Early-warning Information System of Geological Disasters in Yanan City of Shaanxi Province: Taking the Rainstorm of “7·3” as an Example [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 69-73, 83.
- [6] 刘正华,余丰华,夏跃珍,等.基于斜坡单元的地质灾害气象预警系统建设初探[J].水文地质工程地质, 2015, 42(6): 131-136.
LIU Zheng-hua, YU Feng-hua, XIA Yue-zhen, et al. Primary Exploration of the Geological Hazard Meteorological Warning System Based on Slope Unit [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(6): 131-136.
- [7] 王爽,王晴,李倩.天津市突发性地质灾害气象预警及其示范工程[J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 113-116.
WANG Shuang, WANG Qing, LI Qian. Research on the Meteorological Early Demonstration Project System for Sudden Geological Hazards in Tianjin [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 113-116.
- [8] 杨智琴.山西省地质灾害气象预警模型探讨[J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 117-121.
YANG Zhi-qin. Meteorological Early Warning Model Research Geologic Disaster in Shanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 117-121.
- [9] 郭富赞,宋晓玲,谢煜,等.甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 127-133.
GUO Fu-zun, SONG Xiao-ling, XIE Yu, et al. A Discussion on the Geological Hazards Meteorological Warning System in Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 127-133.
- [10] 魏平新,李秀娟.广东省突发性地质灾害气象预警实践[J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 138-144.
WEI Ping-xin, LI Xiu-juan. The Meteorologic Early Warning Research of Sudden Geo-hazard in Guangdong Province [J]. The Chinese Journal of Geological

- Hazard and Control, 2015, 26(1): 138-144.
- [11] 薛群威, 刘艳辉, 唐 灿. 突发地质灾害气象预警统计模型与应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(5): 1614-1622.
- XUE Qun-wei, LIU Yan-hui, TANG Can. Early Warning Statistical Model of Sudden Geological Hazards and Its Application[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(5): 1614-1622.
- [12] CAMPBELL R H. Soil Slips, Debris Flows and Rainstorms in Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1975.
- [13] CAINE N. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [14] 刘传正, 温铭生, 唐 灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 303-309.
- LIU Chuan-zheng, WEN Ming-sheng, TANG Can. Meteorological Early Warning of Geo-hazards in China Based on Raining Forecast[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(4): 303-309.
- [15] 刘艳辉, 刘传正, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 738-746.
- LIU Yan-hui, LIU Chuan-zheng, WEN Ming-sheng, et al. Study of Early Warning Models for Regional Geo-hazards in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 738-746.
- [16] AU S W C. Rainfall and Slope Failure in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1993, 36(1/2): 141-147.
- [17] FINLAY P J, FELL R, MAGUIRE P K. The Relationship Between the Probability of Landslide Occurrence and Rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 811-824.
- [18] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide Risk Assessment and Management: An Overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64(1): 65-87.
- [19] 王仁乔, 周月华, 王 丽, 等. 湖北省山洪灾害临界雨量及降雨区划研究[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 331-334.
- WANG Ren-qiao, ZHOU Yue-hua, WANG Li, et al. The Studies on Mountain Mud-rock Flow Critical Rainfall and Rainfall Zoning of Hubei Province[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 331-334.
- [20] 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1312-1317.
- ZHANG Gui-rong, YIN Kun-long, LIU Li-ling, et al. A Real-time Regional Geological Hazard Warning System in Terms of WEBGIS and Rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1312-1317.
- [21] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 101-105.
- XIE Jian-ming, LIU Li-ling, YIN Kun-long, et al. Study on the Threshold Values of Rainfall of Landslide Hazards for Early-warning and Prediction in Zhejiang Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4): 101-105.
- [22] 兰恒星, 周成虎, 王苓涓, 等. 地理信息系统支持下的滑坡-水文耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1309-1314.
- LAN Heng-xing, ZHOU Cheng-hu, WANG Ling-juan, et al. GIS Based Landslide Stability and Hydrological Distribution Coupled Model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1309-1314.
- [23] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 109-115.
- LIU Chuan-zheng, LIU Yan-hui. Early Warning Theory for Regional Geo-hazards and Design of Explicit Statistical System[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(6): 109-115.
- [24] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警实践: 2003~2012[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 1-8.
- LIU Chuan-zheng, LIU Yan-hui, WEN Ming-sheng, et al. Early Warning for Regional Geo-hazards During 2003-2012, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 1-8.
- [25] BURBANK D W, LELAND J, FIELDING E, et al. Bedrock Incision, Rock Uplift and Threshold Hillslopes in the Northwestern Himalayas[J]. Nature, 1996, 379: 505-510.
- [26] HERMANN R L, STRECKER M R. Structural and Lithological Controls on Large Quaternary Rock Avalanches(Sturzstroms) in Arid Northwestern Argentina[J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(6): 934-948.
- [27] SCHEIDEGGER A E. Tectonic Predesign of Mass Movements, with Examples from the Chinese Himalaya[J]. Geomorphology, 1998, 26(1/2/3): 37-46.
- [28] SHRODER J F. Slope Failure and Denudation in the Western Himalaya[J]. Geomorphology, 1998, 26(1/2/3): 81-105.

- [29] 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.
WANG Si-jing. Coupling of Earth's Endogenic and Exogenic Geological Processes and Origins on Serious Geological Disasters[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 115-117.
- [30] 李 晓, 李守定, 陈 剑, 等. 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1792-1806.
LI Xiao, LI Shou-ding, CHEN Jian, et al. Coupling Effect Mechanism of Endogenic and Exogenic Geological Processes of Geological Hazards Evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1792-1806.
- [31] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1500-1506.
LAN Heng-xing, WU Fa-quan, ZHOU Cheng-hu, et al. Analysis on Susceptibility of GIS Based Landslide Triggering Factors in Xiaojiang Watershed of Yunnan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1500-1506.
- [32] 兰恒星, 伍法权, 王思敬. 基于 GIS 的滑坡 CF 多元回归模型及其应用[J]. 山地学报, 2002, 20(6): 732-737.
LAN Heng-xing, WU Fa-quan, WANG Si-jing. GIS Based Landslide CF Multi-variable Regression Model and Its Application[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(6): 732-737.
- [33] 陈晓利, 冉洪流, 祁生文. 1976 年龙陵地震诱发滑坡的影响因子敏感性分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 104-110.
CHEN Xiao-li, RAN Hong-liu, QI Sheng-wen. Triggering Factors Susceptibility of Earthquake-induced Landslides in 1976 Longling Earthquake[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(1): 104-110.
- [34] WANG H B, SASSA K, XU W Y. Analysis of a Spatial Distribution of Landslides Triggered by the 2004 Chuetsu Earthquakes of Niigata Prefecture, Japan[J]. Natural Hazards, 2007, 41(1): 43-60.
- [35] 许 冲, 戴福初, 姚 鑫, 等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 2972-2981.
XU Chong, DAI Fu-chu, YAO Xin, et al. GIS Based Certainty Factor Analysis of Landslide Triggering Factors in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2972-2981.
- [36] 王恭先, 徐峻岭, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
WANG Gong-xian, XU Jun-ling, LIU Guang-dai, et al. Landslides and Landslide Control Technique[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [37] 王秀英, 聂高众, 王登伟. 汶川地震诱发滑坡与地震峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 82-89.
WANG Xiu-ying, NIE Gao-zhong, WANG Deng-wei. Research on Relationship Between Landslides and Peak Ground Accelerations Induced by Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 82-89.
- [38] 梁京涛. 遥感和 GIS 在汶川地震灾区地质灾害调查与评价中的应用研究: 以青川县为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
LIANG Jing-tao. Research on Survey of Earthquake Triggering Geohazards and Risk Assessment in Wenchuan Earthquake Stricken Areas Using RS and GIS: A Case Study of Qingchuan County[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [39] 许 冲, 戴福初, 姚 鑫, 等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2009, 18(1): 15-26.
XU Chong, DAI Fu-chu, YAO Xin, et al. GIS Platform and Certainty Factor Analysis Method Based Wenchuan Earthquake-induced Landslide Susceptibility Evaluation[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 18(1): 15-26.
- [40] 刘艳辉, 唐 灿, 吴剑波, 等. 地质灾害与不同尺度降雨时空分布关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 74-83.
LIU Yan-hui, TANG Can, WU Jian-bo, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Geohazards and Rainfall in Different Scales[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 74-83.
- [41] SHORTLIFFE E H, BUCHANAN B G. A Model of Inexact Reasoning in Medicine[J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3/4): 351-379.
- [42] HECKERMAN D. Probabilistic Interpretations for Mycin's Certainty Factors[J]. Machine Intelligence and Pattern Recognition, 1984, 4: 167-196.