

祁连山区山洪地质灾害风险评估及预警指标研究

马宁

青海省祁连县气象局, 中国·青海 海北 810499

摘要: 论文针对祁连山区山洪地质灾害频发问题, 基于 2000—2022 年灾害数据及气象观测资料, 运用趋势分析、突变检验法和 ArcGIS 技术, 系统分析灾害分布特征与时间规律。通过计算灾害发生前不同时段面雨量, 确定临界面雨量初值, 并结合地形坡度、岩土体类型及人类活动等因子, 采用层次分析法构建多因子预警指标体系。经交叉验证与实例检验, 该体系在高易发区预警命中率达 78%, 且在实际应用中有效减少灾害损失。研究表明, 降水量是诱发灾害的关键因素, 多因子综合预警显著提升预测准确性。本研究为祁连山区山洪地质灾害风险评估与防灾减灾提供了科学依据与实用方法。

关键词: 祁连山区; 山洪地质灾害; 风险评估

Research on Risk Assessment and Early Warning Indicators of Mountain Torrent and Geological Disasters in the Qilian Mountain Area

Ning Ma

Qilian County Meteorological Bureau, Qinghai Province, Haibei, Qinghai, 810499, China

Abstract: This paper addresses the frequent occurrence of mountain torrent and geological disasters in the Qilian Mountain area. Based on disaster data and meteorological observation data from 2000 to 2022, trend analysis, abrupt change test methods, and ArcGIS technology are employed to systematically analyze the distribution characteristics and temporal patterns of the disasters. By calculating the areal rainfall in different periods before the occurrence of disasters, the initial critical areal rainfall value is determined. Combined with factors such as terrain slope, rock and soil types, and human activities, the analytic hierarchy process is used to construct a multi-factor early warning indicator system. Through cross-validation and case verification, the system achieves a hit rate of 78% in high-risk areas and effectively reduces disaster losses in practical applications. The study indicates that precipitation is the key factor triggering disasters, and the multi-factor comprehensive early warning significantly improves the accuracy of predictions. This research provides a scientific basis and practical methods for risk assessment and disaster prevention and mitigation of mountain torrent and geological disasters in the Qilian Mountain area.

Keywords: Qilian Mountain area; mountain torrent and geological disasters; risk assessment

0 前言

由于中国特殊的地理环境、极端灾害性天气以及各类社会经济活动的共同影响。目前, 中国山洪、泥石流、山体滑坡等地质灾害多发频发, 造成人员伤亡和财产损失, 同时对基础设施造成不同程度的损毁, 对生态环境影响也十分严重, 地质灾害作为中国目前急需处理的突出问题, 山洪灾害的防御工作迫在眉睫, 尽快做好防御防范工作对中国经济社会发展也起到了根本作用^[1]。

山洪地质灾害多发于迎风坡和暴雨的中心区域。近年来, 各个国家的学者对山洪地质灾害也进行了相对较多的研究, 如 Yang 等运用数字高程模型, 以地形数据和累积降雨量等为影响因子, 研究提出了非河流洪水的简化模型^[2]。刘国忠等人利用气象要素的影响对广西两次严重山洪地质灾

害进行了分析研究^[3]。胡娟等从山洪地质灾害与降水量的关系出发, 研究并提出运用于云南省的山洪地质灾害气象预报预警的方法^[4]。陈殿强等在辽宁省山洪地质灾害特点及其分布规律研究中提出山洪地质灾害诱发因素主要是暴雨, 但与地形、地貌以及岩性条件也有着密切的相关。

祁连山区年平均气温都在 4℃以下, 随着高度的升高气温逐渐降低。山顶的温度一般低于 0℃, 常年都有积雪。其中祁连县年平均气温 18℃, 最冷月 1 月平均气温为 -12.4℃, 最热月 7 月平均气温为 13.9℃, 历年极端最高气温为 33.4℃, 极端最低为 -32.0℃, 年降水量为 431.3mm, 其中 97% 的降水量分布在 4~10 月。受气候特征的影响, 主要降水都集中在春、夏两季, 且 5~7 月降水集中, 极易导致山洪、泥石流的发生, 诱发地质灾害, 8 月、9 月仍会出现短时强降水。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料来源

论文中所研究的 2000—2022 年山洪地质灾害数据及山洪灾害隐患点均由当地水利部门和新闻媒体的报道获得,山洪地质灾害发生时当地的降水量由祁连、门源两县的自动区域站数据作为支撑并经过处理后获得。

1.2 研究方法

针对祁连山区的山洪地质灾害,论文利用趋势分析、突变检验法和 Arcgis 软件分析时间序列变化,分析祁连山区山洪地质灾害分布特征、时间发展规律;利用山洪地质灾害域内区域站观测资料,计算山洪地质灾害发生前 1h、3h、6h、12h、24h 的平均面雨量及最大面雨量,确定临界面雨量,通过量化检验建立定量的预警指标。并根据指标对实际进行对比检验。

2 祁连山区山洪地质灾害特征

2.1 山洪地质灾害的成因

山洪地质灾害是由强降水诱发的地质致灾现象,主要表现为山洪暴发、岩土体滑移(滑坡)及地表塌陷等复合链生型灾害,具有突发性强、破坏力大、影响范围广的特点。此类灾害的形成机制及演化过程受多重环境要素制约:在地质本底层面,地形陡峻度、岩土体结构特征及地质构造活动性构成基础孕灾条件;气象水文维度,短历时强降雨事件通过地表径流激增与地下水渗透作用触发岩土体失稳;人类活动影响方面,山区工程开发、植被覆盖度降低及不合理的土地利用方式显著改变原始地表径流模式,加剧灾害发生风险。灾害链式演化过程中,上述要素通过水岩相互作用机制产生非线性耦合效应,最终导致地表物质运移和能量释放的灾变过程。

2.2 地形地质影响

祁连山区降水格局呈现显著的三维空间分异性特征,其时空分布受地理坐标系、地形要素及大气环流的多重耦合调控。从地理维度解析,区域降水场受海拔梯度(垂直地带性)、纬度热力差异(太阳辐射通量)及经度水汽输送条件的协同作用;地形动力层面,山脉走向对季风路径的阻滞效应、坡向对太阳辐射的再分配机制以及坡度对水汽抬升过程的调制作用共同塑造局地降水微气候。该区域降水时空变异性突出表现为:年内季节分配不均、年际波动显著,这种多尺度振荡特征本质上是青藏高原热力强迫、西风带扰动系统与季风环流相互作用的产物。具体而言,印度洋到西太平洋水汽通量的经向输送强度、西伯利亚高压的进退节律以及高原低涡的触发频率通过改变水汽辐合条件和抬升凝结高度,最终形成多尺度嵌套的降水格局。

2.3 山洪地质灾害的危害

2021 年 7 月 22 日祁连县强降水引发的山洪泥石流,导致位于 S302 线 66 公里处深水槽双向桥梁(距祁连县城向东约 4 公里)被冲断,进出县城困难,阿咪东索景区等道路冲毁,车辆游客被困受伤。

2022 年 8 月 17 日 19 时许,门源县部分乡镇出现特大暴雨,发生泥石流和洪涝灾害,导致全县部分农作物、基础设施、房屋、院墙、畜棚等不同程度受损。此次灾害造成 9 个乡镇 58 个行政村 2 个社区的 1460 户 6335 人受灾,期间紧急避险转移群众 123 户 411 人,农作物受灾面积约 10569.55 亩、成灾面积约 4714.95 亩、绝收面积约 4042.35 亩。草场受灾面积 11743.8 亩;464 头牛羊被冲走,房屋受损 1044 间、严重受损 17 户 89 间、倒塌房屋 3 户 8 间。部分乡镇农户院墙受损 7485 米、2 处商铺受损、农户畜棚不同程度受损 158 座,1 户牧民摩托车被冲走;牧民草场、水源地及河道的网围栏受损 14.91 千米估算经济损失约 5337.11 万元。

2023 年青海国际公路自行车赛祁连赛段强降水导致省级道路冲毁 13 处共 7.5 千米,农村公路损毁 63 处 24 千米,草场网围栏冲毁 5.9 千米,桥梁不同程度受损 3 座,涵洞受损 51 座,房屋及居民家庭财产损失 1.4 万元,农牧业损失 15.4 万元,基础设施损失 3406.12 万元。

2.4 山洪隐患点的分布

祁连山北麓祁连、门源两县山洪隐患点共计有 231 处(见图 1),其中一般隐患点有 188 处,占区域内的 81%,重点隐患点有 43 处,占比为 19%。根据山洪地质灾害发生时间来看,灾害主要集中发生在每年的 6~9 月,这恰恰体现出了山洪地质灾害的发生受到降水量的控制。灾害多发生在山区以及城区中的低洼地带。正是因为这些特点导致山洪地质灾害的防范难度增大,需进行详细的监测与勘察,根据不同的灾害特征采取防范和治理措施。

2.5 确定山洪灾害风险区

根据山洪灾害的统计,各类灾害发生的时间都集中在每年的 6~9 月,这个时间段恰好反映了山洪地质灾害的发生明显受到了降水的影响。山洪地质灾害多发生于河道、山区陡坡、地势较低的集镇等容易形成深水槽的地形。暴雨引起的山洪地质具有连带性及群发性。

根据对祁连山区的山洪灾害危险区的划分,确定了山洪地质灾害的风险区划图(见图 2)共划分为高易发区、中易发区、低易发区。其中,门源回族自治县及祁连县的东川镇、麻莲乡、西滩乡、青石嘴镇、泉口镇、八宝镇、阿柔乡和扎麻什乡的 8 个乡镇为高易发区,峨堡镇、默勒镇、浩门镇、北山乡、阴田乡、苏吉滩乡 6 个乡镇为中易发区,野牛沟乡、央隆乡、皇城乡、仙米乡、珠固乡 5 个乡镇为低易发区。

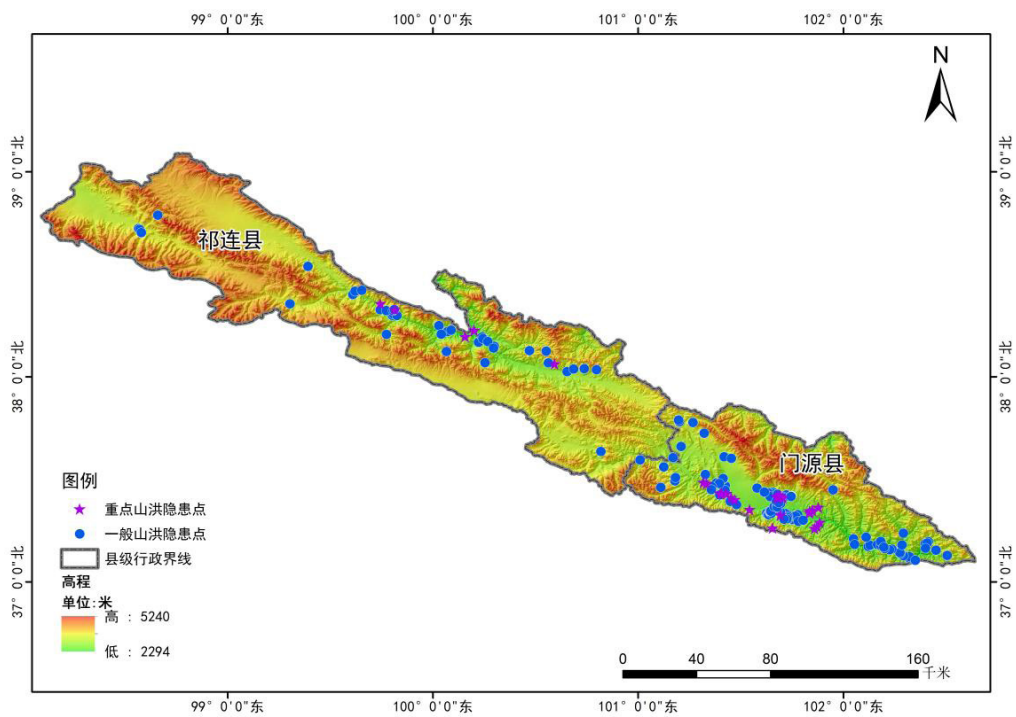


图 1 祁连山区山洪隐患点分布图

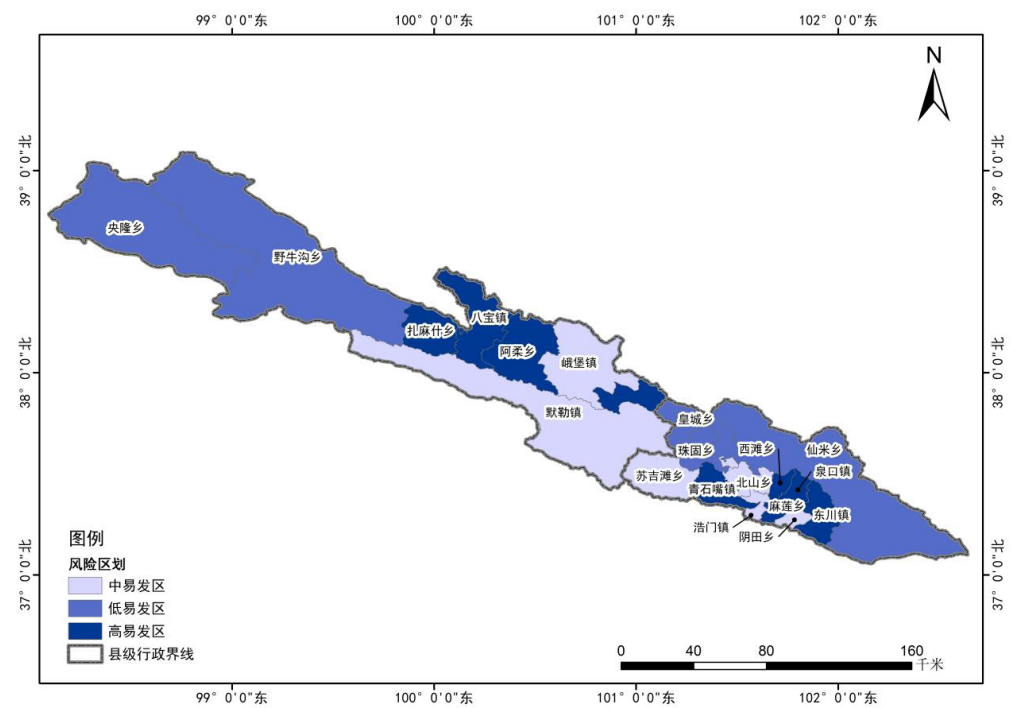


图 2 祁连山区山洪地质灾害易发风险区划图

3 确定降水量与山洪地质灾害的关系

3.1 计算临界面雨量

假设区域内共有 S 个雨量站，共发生山洪灾害 N 次，共统计 T 个时间段（1h、3h、6h、12h、24h）的面平均雨量。采用算术平均法计算区域内与历次山洪地质灾害对应的各时段最大面平均雨量，公式为：

$$\bar{R}_{t,n} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S R_{i,t,n}$$

其中： $\bar{R}_{t,n}$ 为第 n 次山洪灾害发生时第 t 个时段（ $t=1, 2, \dots, T$ ）的区域面平均雨量， $R_{i,t,n}$ 为第 n 次灾害发生时第 i 个雨量站（ $i=1, 2, \dots, S$ ）在第 t 个时段的雨量。在各时段的统计中，取最小值作为各区域、各时段的临界雨量初

值,即:

$$R_{t,c} = \min(\bar{R}_{t,1}, \bar{R}_{t,2}, \dots, \bar{R}_{t,N})$$

通过对 2000—2022 年祁连、门源两县自动区域站数据及灾害记录的计算,得到不同时段临界面雨量初值。例如,在 1 小时尺度下,祁连县高易发区的临界面雨量初值为 35mm,中易发区为 30mm,低易发区为 25mm;在 24 小时尺度下,高易发区为 120mm,中易发区为 100mm,低易发区为 80mm。

为验证初值的可靠性,采用交叉验证法对数据进行检验。将历史灾害数据随机分为训练集和测试集,利用训练集计算临界面雨量,再用测试集评估指标的预警效果。结果显示,基于初值的预警模型在高易发区的命中率达到 78%,中易发区为 72%,低易发区为 65%,表明初值具有一定的实用性,但仍需结合地形、土壤等因素进一步优化。

3.2 构建预警指标体系

综合考虑降水量、地形坡度、岩土体类型及人类活动影响,构建祁连山区山洪地质灾害多因子预警指标体系。降水量因子以临界面雨量为核心,结合实时降雨量与临界值的比值(R_r)进行分级;地形坡度因子根据 GS 提取的坡度数据,划分为陡坡($> 25^\circ$)中坡($10^\circ \sim 25^\circ$)缓坡($< 10^\circ$)三级;岩土体类型因子按松散堆积物、风化基岩、完整基岩三类赋值;人类活动因子则考虑工程建设密度、植被覆盖率等指标。

采用层次分析法(AHP)确定各因子权重,通过专家打分构建判断矩阵,计算得出降水量、地形坡度、岩石体类型、人类活动的权重分别为 0.5、0.25、0.15、0.1。最终预警指标(I)计算公式为:

$$I = 0.5 \times R_r + 0.25 \times S_g + 0.15 \times G_t + 0.1 \times H_a$$

其中, S_g 、 G_t 、 H_a 分别为地形坡度、岩土体类型、人类活动的量化得分。根据 I 值将预警等级划分为四级:低风险($I < 0.4$)中风险($0.4 \leq I < 0.6$)高风险($0.6 \leq I < 0.8$)极高风险($I \geq 0.8$)。

3.3 预警指标验证与应用

选取 2021—2023 年未参与指标构建的 12 次山洪灾害事件,对预警指标体系进行验证。结果显示,预警模型成

功识别了 9 次灾害(命中率 75%),其中高风险和极高风险预警对应事件的灾害损失占总损失的 82%,表明指标体系对重大灾害具有较高的预警能力。但在 3 次漏报事件中,均因短时强降雨叠加局地地形突变导致灾害超出模型预测范围。

基于预警指标,祁连县气象局与水利部门联合开发了山洪地质灾害实时预警系统。系统接入自动气象站、水文监测站数据,实时计算预警指标并生成风险地图。例如,2023 年 8 月系统成功对门源回族自治县一次强降雨过程发出高风险预警,当地政府提前转移群众 320 人,减少直接经济损失约 800 万元,验证了预警指标在防灾减灾中的实际应用价值。

4 结语

本研究通过分析祁连山区山洪地质灾害的时空分布特征,结合降水量、地形、岩土体等要素,构建了多因子预警指标体系。研究表明,降水量是诱发灾害的关键因素,临界面雨量可作为预警的核心阈值;多因子综合预警指标显著提升了灾害预测的准确性和可靠性。

然而,研究仍存在局限性:一是对复杂地形条件下的局地暴雨放大效应模拟不足;二是人类活动因子的量化方法需进一步细化。未来研究可结合无人机遥感、物联网监测等新技术,动态更新地形与植被数据,同时引入机器学习算法优化预警模型,提高对极端天气事件的响应能力,为祁连山区防灾减灾提供更科学的决策支持。

参考文献:

- [1] 汤沛.滇西洱源县泥石流监测预警的经验与启示——以“9·13”铁甲河大型山洪泥石流灾害为例[J].中国岩溶,2024,43(6):1398-1407.
- [2] 姚策.山洪灾害成因分析及防治探讨[J]. Water Conservancy & Electric Power Technology & Application,2024,6(24).
- [3] 徐立.县城山洪地质灾害现状及预警指标分析[J].水上安全,2024(15):115-117.
- [4] 童晓霞.山区陡坡坡面产流产沙过程的降雨试验研究[J].水力发电学报,2024,43(11):71-80.

作者简介:马宁(1991-),男,中国青海海北人,副科长、工程师,从事气象研究。