

基于贡献率和熵值法耦合的崩塌灾害危险性评价^{*} ——以川东南盆周山地灰岩地区为例

唐红梅, 苗梦琦, 周福川

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:川东南盆周山地灰岩出露广布、崩塌灾害多发,对该区域进行崩塌灾害危险性分区评价十分必要。基于川东南盆周山地灰岩地区内地质环境的调查和分析,选取一处地跨重庆市武隆区、南川区和綦江区且以中山山地为主的灰岩地区为研究区,遴选出地层岩性、陡崖相对高差、高程、年平均降雨量、地形坡度、植被覆盖、距水系距离、距断裂构造距离、距道路距离等 9 个危险性评价指标;基于大量已发崩塌灾害并利用贡献率法定量计算单因子的贡献率,建立危险性评价指标分级赋值体系;利用熵值法计算各影响因子的权重系数,构建了贡献率法与熵值法耦合的崩塌灾害危险性评价模型,并基于 ArcGIS 系统利用等面积法实现多因子空间叠加的危险性分区与评价。结果显示:研究区极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区面积占比分别为 11%、30%、33.3%和 25.7%。研究区内位于极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区的乡镇分别有 12、6、2 和 2 个。研究结果为川东南盆周山地崩塌灾害的预警预报和防治工作提供了重要参考资料。

关键词:盆周山地;崩塌;贡献率;熵值法;危险性评价

中图分类号:P642.21

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)06-0038-14

中国西南地区岩石高边坡具有区别于一般高边坡的特征,主要表现为边坡高陡、超高系数大、地应力高和具有复杂的变形破裂演化历史^[1]。川东南盆周地区为云贵高原和四川盆地的过渡地带,地形以山地为主,岩性以灰岩为主,构造运动强烈,地质灾害频发,是大型地质灾害集中区之一,区域危险性有诸多不确定性。

危岩崩塌是山区主要地质灾害类型,具有突发性,多发于高陡斜坡处如峡谷陡坡、冲沟岸坡、深切斜谷的凹岸地带等;它的危险性是地质灾害自然属性特征的体现。地质灾害评估的核心要素是地质灾害的活动程度;从定量化评价的要求看,地质灾害的危险性需要通过具体的指标予以反映^[2]。随着地理信息技术的发展,人们提出了多种区域危险性评价方法。叶四桥等人^[3]、唐红梅等人^[4-6]将灰色系统、模糊数学、层次分析法等数学分析方法应用于地质灾害危险性评价并构建了多种评价模型;齐识等人^[7]利用 GIS 技术分别与信息量模型和贡献权重模型相结合,并比较了 2 种评价模型的准确性;马思远等人^[8]利用逻辑回归模型对九寨沟地震滑坡危险性评价,并采用 ROC 曲线对模型预测精度进行了检验;刘洋洋等人^[9]优化改进了熵权集对分析理论和 ICP 算法,基于车载激光扫描技术,将局部评价与整体评价相结合,建立了河南省修武县内公路边坡危险性评价模型。

在崩塌危险性评价中,各影响因子的危险性分级和权重计算对评价结果与实际情况的契合状况有着非常重要的影响,已有许多学者在关于影响因子权重计算方面建立了多种数学模型,但关于单个因素的定量分级算法研究尚有欠缺。王萌等人^[10]提出了贡献率评价模型,并通过对区域内地质灾害信息的统计分析得到单因素在不同状态时对灾害发育贡献作用的大小,从而划分出低、中、高和极高的贡献度范围。贡献率法是基于地理信息数据和灾害信息统计对单因素贡献度的因子分级法,它的计算源于实地数据而摒弃了主观意识,分级结果可靠,但该方法在权重计算方面还有欠缺。此外,熵值法则是一种排除人为因素干扰的客观赋权方法,它能客观反映评价指标在综合评价指标体系中的重要性^[11]。然而,利用熵值法结合地理信息技术评价区域危险性需要大量数据支持,且部分因子数据难以量化。

综上所述,现有的危险性评价限于较单一方法研究,且地质灾害评价缺乏合理性与验证,尤其在崩塌灾害评

* 收稿日期:2022-08-13 修回日期:2023-06-20 网络出版时间:2023-06-25T17:05

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51678097;No. 51378521)

第一作者简介:唐红梅,女,研究员,博士,博士生导师,研究方向为地质灾害减灾理论与防治技术,E-mail:hmtang6778@sina.com

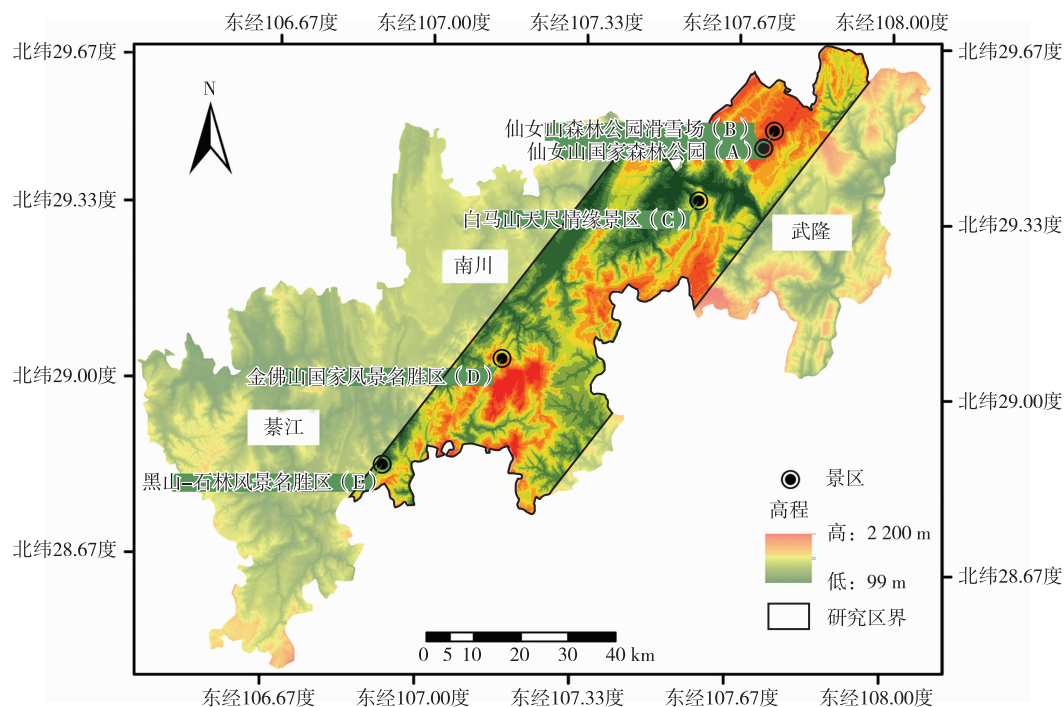
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230625.1215.010

本文为重庆师范大学建校 70 周年优秀校友特约稿件。

价时还需要考虑到这一自然灾害的发生具有随机性和复杂性。将贡献率法和熵值法耦合,即可基于地理信息数据和历史地质灾害数据分别对各影响因子进行定量分级和权重计算,且评价资料容易获取,计算方法简便效率高,因而评价结果也更为客观精确。本研究选取具有复杂地理环境和拥有较多风景名胜区的川东南盆周山地灰岩地区为研究区,利用已发崩塌灾害的贡献率法和熵值法耦合构建了崩塌灾害评价模型,采用GIS系统实现了多因子空间叠加和危险性分区评价,从而对研究区进行了崩塌灾害危险性评价并进一步通过未参与计算的灾害点实例验证了该评价模型的合理性。本研究构建的评价模型可为研究区乃至西南地区类似区域的崩塌灾害防治工作提供参考。

1 评价指标体系构建

进行崩塌地质灾害危险性评价,首先要遴选出合适的致灾危险性因子,这就需要深入分析研究区地质地理环境特点和人类工程活动的影响,从而较精确地筛选出可以量化的危险性评价指标体系。本研究选取的研究区所在的川东南盆周山地以大面积的石灰岩出露为主,该区域位于四川盆地与云贵高原的过渡地带,地质构造复杂,人类活动频繁,易发生崩塌灾害。研究区为一条走向为北偏东 40° 且地势较高的山地区域,地跨重庆市武隆区、南川区和綦江区,总面积约为 $3\,010\text{ km}^2$,其中面积占比约80%的区域海拔大于800 m,面积占比约60%的区域海拔大于1 000 m;研究区地貌以中山为主,区内旅游资源丰富(图1)。



注:底图来源于重庆市规划和自然资源局网站(<http://ghzrzyj.cq.gov.cn/>)“重庆标准地图服务”中的“南川区行政区划”(审图号:渝S(2020)070号)、“綦江区行政区划”(审图号:渝S(2022)013号)和“武隆区行政区划”(审图号:渝S(2020)065号)。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 The overview of the study area

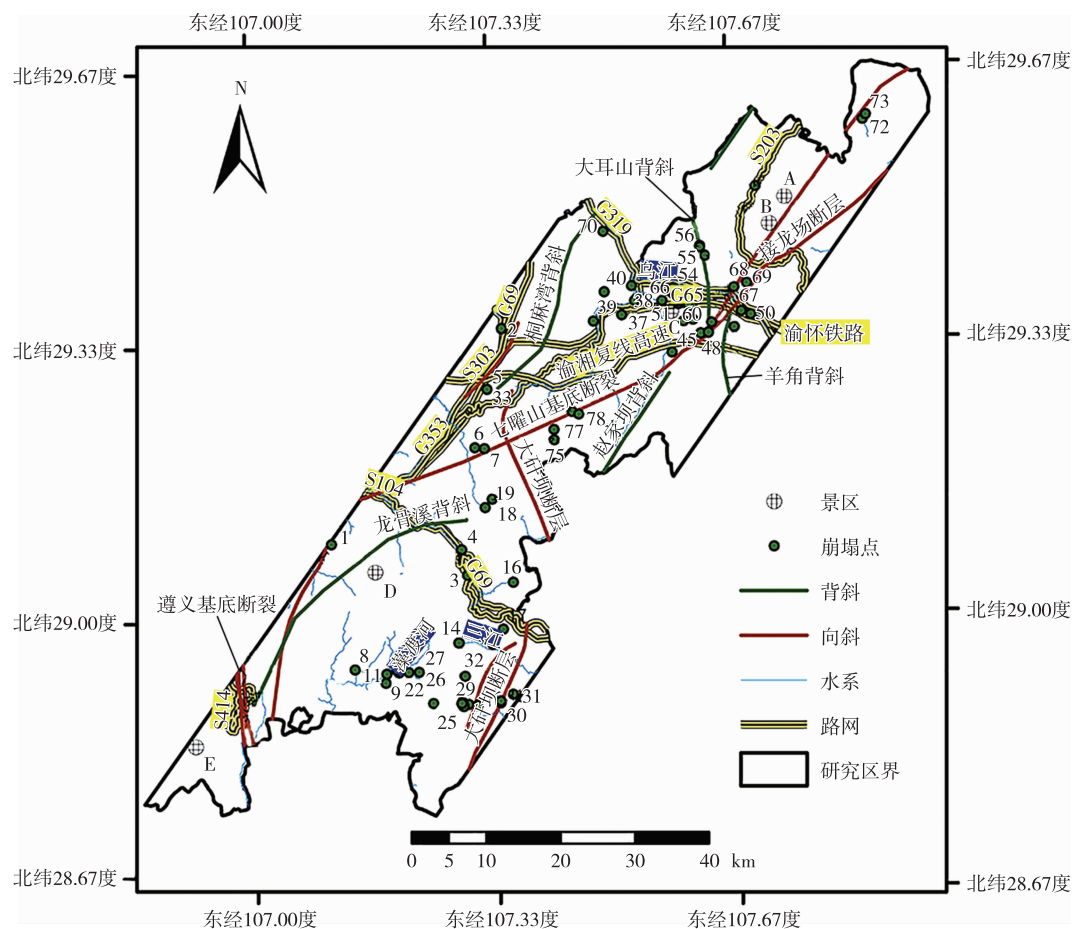
研究区构造纲要如图2所示,区域内共有崩塌点78处,它们对应的危岩信息见表1。危岩主要沿着断裂带、山地、河流深切陡高边坡和人类活动频繁区域分布。基于研究区的工程地质环境与地质灾害崩塌稳定性的影响,从以下6个方面对崩塌地质灾害危险性评价指标进行遴选。

1) 地层岩性。地层在不同的地层年代沉积了不同岩性的物质,而不同地层岩性物质的风化存在差异,不同的岩性组合存在卸荷差异回弹,加上碳酸盐岩类受到酸雨的溶蚀作用,从而导致岩体容易形成危岩,甚至失稳而形成崩塌。研究区地层以二叠系和三叠系的灰岩和页岩出露为主,此外还有志留系页岩和灰岩、奥陶系灰岩以及少量寒武纪灰岩。研究区灰岩出露面积占比达72.7%,砂岩、页岩和白云岩出露的面积占比次之。

2) 地貌类型。地貌类型是地质灾害发生的背景,是地球内力地质作用和外营力作用共同作用的结果。不同

的海拔高程、坡度和地形相对高差会影响危岩主控结构面裂隙发育和崩塌形成。研究区靠近四川盆地一侧地势稍低,靠云贵高原处的地势较高,区内山脉多由北向西南倾斜,地貌展布起伏较大。位于研究区中部的长江河谷为最低中心,靠近长江两岸的丘陵区地势稍低,且地势向长江南北两岸逐渐升高;研究区受河流切割的影响,沟深谷多,应力分异,卸荷裂隙发育,在岩体抗拉强度薄弱处产生平行于临空面的长大裂隙,易形成危岩崩塌。

3) 水文地质。岩体中的水会影响岩体内部强度,岩体与河流距离大小影响着岩体受河流冲刷、渗流作用、泥化作用、碳酸盐岩的溶蚀等作用的大小。研究区内均匀分布有乌江、大溪河、肖家河、石梁河、藻渡河、梅江和三江共 7 个主要水系,而裂隙水会随地表水的变化而变化,且裂隙水压力可促使危岩主控结构面扩展,加速着崩塌的形成。年平均降雨量反映了当地的降雨强度。研究区位于亚热带湿润季风气候区,年降水量在 1 000~1 200 mm 之间;区内降水丰沛且时间集中,这是研究区崩塌灾害频发的重要诱因。



注:崩塌点 1~78 对应的危岩名称见表 1;A~E 对应的景区名称参见图 1,下同。

图 2 研究区构造纲要

Fig. 2 Tectonic compendium of the study area

4) 地质构造。地质构造中如断裂带和背斜常常是应力容易集中地带,控制着崩塌灾害发育的分布。研究区分布有遵义基底断裂、七曜山基底断裂等 2 条大的基底断裂以及接龙场断层、大研坝断层,因受到内部地营力影响,断裂构造附近岩体节理裂隙发育,地表水入渗,致使岩体的完整性和连续性明显下降。背斜顶部受张力作用,岩体破碎,结构面发育,易为崩塌发育提供条件。

5) 人类工程活动。随着陡高边坡公路与铁路的修建,作业区域内会产生多处陡高工程边坡。对斜坡坡脚的开挖势必改变边坡处应力分布,降低斜坡稳定性;且在公路与铁路修建与使用过程中,对岩体的扰动以公路与铁路为中心向外扩散的人类活动逐渐减弱。经过研究区的公路与铁路主要有 G69、G353、G303、G65、G319、S414、S104、S203、渝湘复线高速和渝怀铁路,线性工程扰动与频繁的人类工程活动在一定程度上降低了研究区陡高边坡与危岩的稳定性。

表 1 崩塌点危岩信息

Tab. 1 Information on dangerous rocks of points of collapse

崩塌点编号	危岩名称	目前状况	灾情规模	崩塌点编号	危岩名称	目前状况	灾情规模
1	耳朵岩危岩	不稳定	小型	40	力明 8 社危岩	不稳定	小型
2	天子坟危岩	潜在不稳定	小型	41	马颈子危岩	不稳定	小型
3	风吹岭隧道崩塌	稳定	小型	42	腰线危岩	潜在不稳定	小型
4	程家沟危岩	潜在不稳定	小型	43	铜鼓危岩	不稳定	小型
5	乱石岗危岩	潜在不稳定	小型	44	河坝危岩	不稳定	小型
6	水洞危岩	不稳定	中型	45	光锋洞崩塌	不稳定	小型
7	大杉坡危岩	不稳定	小型	46	岩湾危岩	不稳定	小型
8	甑子岩铝矿厂危岩群	不稳定	特大型	47	夹层岩危岩	不稳定	小型
9	桐子坪危岩	潜在不稳定	小型	48	丰岩危岩	不稳定	小型
10	大湾危岩	不稳定	小型	49	轿子石上头崩塌	不稳定	小型
11	大柏林危岩	潜在不稳定	小型	50	观音阁崩塌	不稳定	小型
12	桃子坪危岩	潜在不稳定	小型	51	堡上危岩	不稳定	小型
13	巴岩危岩	潜在不稳定	小型	52	重岩危岩	不稳定	大型
14	黄泥塘危岩	不稳定	小型	53	庆口崩塌	不稳定	中型
15	斑竹林危岩	潜在不稳定	小型	54	观音洞危岩	不稳定	中型
16	云峰殿危岩	不稳定	小型	55	佛家岩危岩	不稳定	小型
17	安家沟危岩	不稳定	小型	56	尖坝岩危岩	不稳定	小型
18	锅厂湾危岩	潜在不稳定	小型	57	大巷危岩	不稳定	中型
19	岩上危岩	潜在不稳定	小型	58	庆丰危岩	不稳定	大型
20	何家沟危岩	潜在不稳定	小型	59	庆口危岩	不稳定	中型
21	小岩脑壳危岩	潜在不稳定	小型	60	石合危岩	潜在不稳定	中型
22	胡家湾危岩	潜在不稳定	小型	61	小湾后危岩	不稳定	大型
23	风洞危岩	潜在不稳定	小型	62	大湾后危岩	不稳定	大型
24	小湾危岩	不稳定	小型	63	小湾危岩	不稳定	大型
25	仙米坪危岩	潜在不稳定	小型	64	大湾危岩	不稳定	大型
26	石盆危岩	潜在不稳定	小型	65	大湾北危岩	不稳定	大型
27	小岩危岩	潜在不稳定	小型	66	W-XI 危岩	不稳定	大型
28	坪上危岩	潜在不稳定	小型	67	狮子岩崩塌	潜在不稳定	小型
29	回龙湾危岩	潜在不稳定	小型	68	风桶岩危岩	潜在不稳定	小型
30	张家湾危岩 2	潜在不稳定	小型	69	垛垛石危岩	潜在不稳定	小型
31	张家湾危岩 3	潜在不稳定	小型	70	鸡冠岭崩塌	潜在不稳定	小型
32	老房子危岩	潜在不稳定	小型	71	狮子岩危岩	潜在不稳定	小型
33	石岗坪危岩	潜在不稳定	小型	72	雷打石危岩	不稳定	小型
34	武马石崩塌	不稳定	中型	73	龙神庙崩塌	潜在不稳定	小型
35	上古迹台危岩	不稳定	中型	74	百果湾危岩	不稳定	小型
36	白岩湾崩塌	不稳定	小型	75	鸡尾山危岩	不稳定	小型
37	梨树坪危岩	不稳定	小型	76	瓦厂湾危岩	不稳定	小型
38	连二碛危岩	不稳定	小型	77	青岗梁子危岩	不稳定	小型
39	老鹰石危岩	不稳定	小型	78	垮沙坡危岩	不稳定	小型

6) 植被覆盖。斜坡表面的植被覆盖状况影响着斜坡的稳定性。植被覆盖率高会降低雨水对坡面冲刷的流动速度和下渗速度,减轻风化作用对斜坡表面岩体的破坏作用;但生长在裂隙中的植被会挤压岩体裂隙并产生根劈作用,使岩体裂隙扩展,加速岩体破坏。植被覆盖状况以归一化植被指数(NDVI)来衡量,该指数能反映植被的生长状况及空间分布密度,它的取值范围为 0~1。

本研究基于对危险性因子数据可获得性的考虑,从上述 6 个方面遴选出 9 个影响因子作为崩塌灾害危险性评价指标,它们分别为地层岩性、陡崖相对高差、高程、年平均降雨量、地形坡度、植被覆盖、距水系距离、距断裂构造距离和距道路距离。

2 危险性评价指标分级与相对独立性验算

采用贡献率法对遴选出的 9 个作为评价指标的影响因子进行分级,该方法利用可靠且易获得的地灾历史数据结合 GIS 技术,从而对某一因子进行定量分级,它的具体内容如下。

设选取的数个影响因子为一个数集,即:

$$U_j = g(U_1, U_2, \dots, U_m), \quad (1)$$

其中: U_j 为因子集, j 为单因子的种类且 $j=1, 2, \dots, m$; g 为关于影响因子的函数。地质灾害的形成是 m 个影响因子叠加的结果,而每个因子又可分为 k 个子类;各个子类对崩塌灾害的贡献度不同,但检验贡献度的大小需量化^[11]。首先,定义点密度为单因子中各个子类内发生崩塌点个数与子类面积的比值,并定义量密度为单因子中各个子类内发生崩塌点个数占崩塌点总数的比例;然后,分别将点密度和量密度按照对应的数值从小到大进行排序,并根据排序后的序次分别赋予 $1, 2, 3, \dots, k$ 的自然数,作为点密度贡献指数($D_k(j)_1$)和量密度贡献指数($D_k(j)_2$);最后,将赋值后的 $D_k(j)_1$ 和 $D_k(j)_2$ 进行算数平均得到综合贡献指数($D_k(j)$),即:

$$D_k(j) = (D_k(j)_1 + D_k(j)_2) / 2. \quad (2)$$

因子子类在崩塌灾害贡献的大小程度也采用贡献率评价,即:

$$D_0(j) = D_k(j) / N, \quad (3)$$

$$N = \sum_{i=1}^k D_k(j), \quad (4)$$

其中: $D_0(j)$ 为各因子子类的贡献率, N 为 k 种子类的 $D_k(j)$ 之和。

为获取崩塌灾害危险性各指标分级,采用等距法将 $D_0(j)$ 划分为低、中、高和极高共 4 种贡献等级,它们对应的贡献率指数区间范围为:

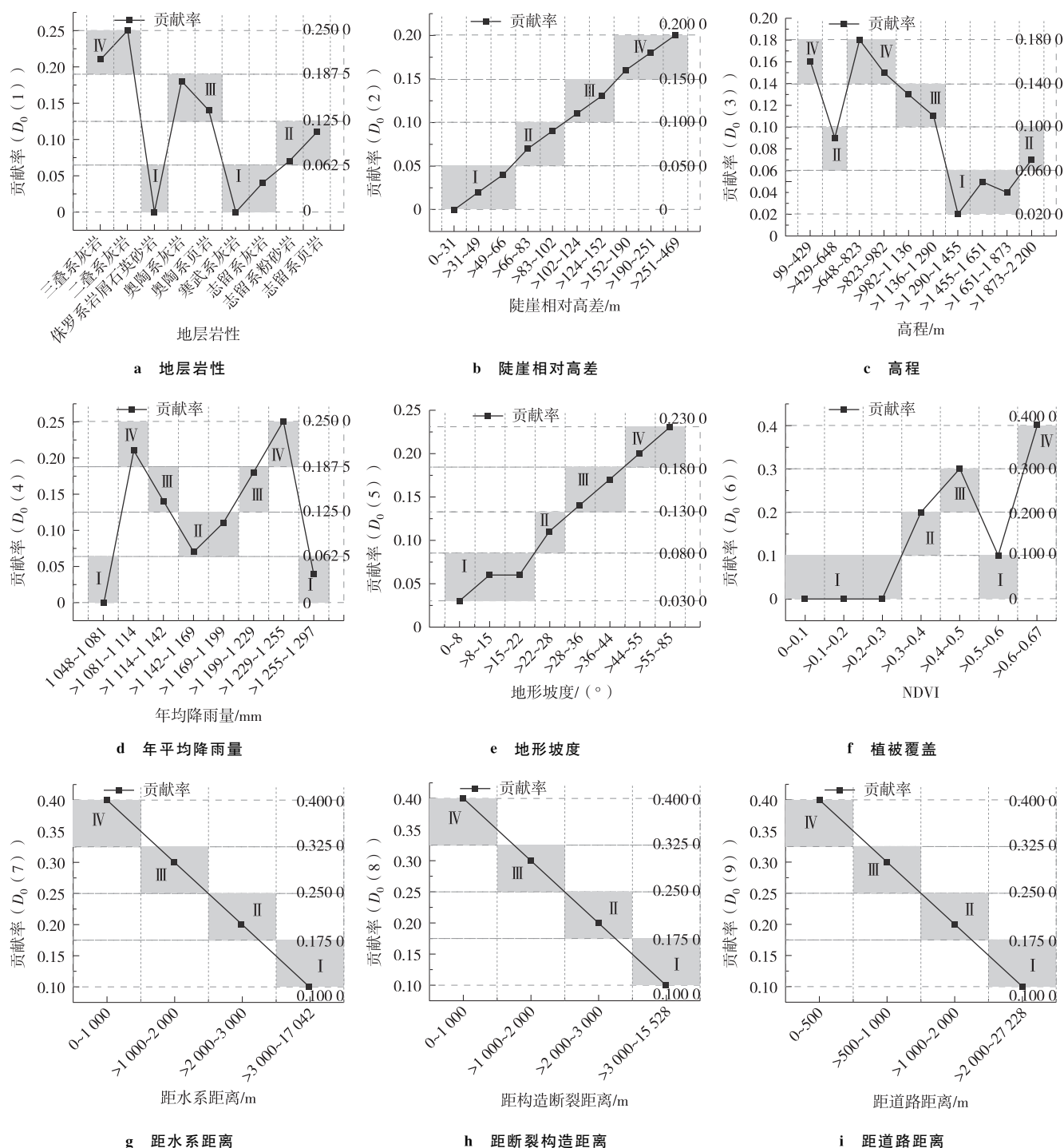
$$X_1 = [D_{0(j1)} \sim D_{0(j2)}], X_2 = [D_{0(j2)} \sim D_{0(j3)}], X_3 = [D_{0(j3)} \sim D_{0(j4)}], X_4 = [D_{0(j4)} \sim D_{0(j5)}], \quad (5)$$

其中: X_1, X_2, X_3 和 X_4 分别为低、中、高和极高贡献区, $D_{0(j1)}, D_{0(j5)}$ 分别为贡献率的最小值和最大值; $D_{0(j1)}, D_{0(j2)}, D_{0(j3)}, D_{0(j4)}, D_{0(j5)}$ 为间距为 d 的等差数列, $d = (D_{0(j5)} - D_{0(j1)}) / 4$ 。

据此完成各因子子类的定量分级,某因子子类的贡献率位于低贡献区可视为该因子子类危险性较小,故而认定为危险性低;同样地,将中、高和极高贡献区分别认定为危险性中、危险性高和危险性极高。由此得到研究区崩塌危险性评价指标分级,并对后续 ArcGIS 重分类标准进行量化。

据中国科学院地理科学与资源研究所的不完全统计,截至目前研究区内共获取有崩塌点 78 处的详实数据。根据式(1)~(5)计算得到 9 个影响因子对崩塌灾害的贡献率分布如图 3 所示,依据此图可划分影响因子的危险性等级,从而为构建崩塌危险性评价指标体系分级做好铺垫。

图 3a 显示:研究区二叠系灰岩、三叠系灰岩以及奥陶纪灰岩对崩塌灾害的贡献率最大,表明灰岩更容易发生崩塌,且常见于二叠系和三叠系;此外侏罗系岩屑石英砂岩和寒武系灰岩区域内未发生过崩塌灾害,它们所在区域内贡献率为 0。陡崖相对高差与崩塌灾害呈正相关关系,前者数值越大,崩塌灾害发生的概率就越大(图 3b)。由图 3c 可知:研究区内高程为 $>648 \sim 1\,136$ m 的区域对崩塌灾害的贡献率最高,危岩多分布在峡谷边的陡崖上。年平均降雨量的贡献率分布呈“M”形,这可能与该因素受到其他因素影响较多有关(图 3d)。地形坡度越大,它对崩塌灾害的贡献率越大,即坡面更陡的岩体易发生崩塌灾害(图 3e)。植被覆盖与崩塌灾害总体呈正相关关系,NDVI 值在 $>0.5 \sim 0.6$ 时可能受其他因素扰动,导致它对崩塌灾害的贡献率降低(图 3f)。此外,线性影响因子如距水系距离、距断裂构造距离和距道路距离均对崩塌灾害有一定影响,它们与崩塌灾害均呈负相关关系(图 3g、h、i)。



注: I、II、III和IV区域分别代表危险性低、中、高和极高。

图 3 影响因子子类贡献率

Fig. 3 Contributing rate of subclasses of influencing factors

基于各因子子类危险性等级划分结果,进而获得了研究区各影响因子危险性评价指标分级标准如表 2 所示。查明研究区 78 处崩塌点各影响因子在表 2 中的危险性等级赋值,输入到 SPSS 26.0 软件中计算获得各影响因子两两之间的 Pearson 相关系数。当 2 个影响因子的 Pearson 相关系数的绝对值大于 0.7 时,说明它们之间关系紧密。由表 3 可知,仅有陡崖相对高差和地形坡度的 Pearson 相关系数大于 0.7。这 2 个影响因子虽然在数学上存在紧密的相关关系,但是从定性分析的视角来看,地形坡度代表边坡的陡峭程度,而陡崖相对高差则代表崖顶与崖底的相对落差,它们均对崩塌灾害有重要影响;而且其他遴选的影响因子也均有相对独立性。因此,本研究中所选取的 9 个影响因子均需计算所对应的权重系数。

表 2 崩塌危险性评价指标体系分级

Tab. 2 Classification of collapse risk evaluation index system

评价指标 (影响因子)	危险性等级			
	危险性极高(4)	危险性高(3)	危险性中(2)	危险性低(1)
地层岩性	三叠系灰岩、 二叠系灰岩	奥陶系灰岩、 奥陶系页岩	志留系页岩、 志留系粉砂岩	志留系灰岩、寒武系灰岩、 侏罗系岩屑石英砂岩
陡崖相对高差/m	>152	>102~152	>66~102	0~66
高程/m	99~429,>648~982	>982~1 290	>429~648,>1 873~2 200	>1 290~1 873
年平均降雨量/mm	>1 229~1 255, >1 081~1 114	>1 199~1 229, >1 114~1 142	>1 142~1 169, >1 169~1 199	1 048~1 081, >1 255~1 297
地形坡度/(°)	>44	>28~44	>22~28	0~22
植被覆盖	>0.6	>0.4~0.5	>0.3~0.4	0~0.3,>0.5~0.6
距水系距离/m	0~1 000	>1 000~2 000	>2 000~3 000	>3 000
距断裂构造距离/m	0~1 000	>1 000~2 000	>2 000~3 000	>3 000
距道路距离/m	0~500	>500~1 000	>1 000~2 000	>2 000

注:各危险性等级后括号内数字为该危险性等级对应的赋值;植被覆盖状况以 NDVI 大小来衡量。

表 3 影响因子的皮尔逊相关性系数

Tab. 3 Pearson's correlation coefficient for influencing factors

影响因子	影响因子							
	地层岩性	陡崖相对高差	高程	年平均降雨量	地形坡度	植被覆盖	距水系距离	距断裂构造距离
陡崖相对高差	0.171							
高程	0.117	-0.072						
年平均降雨量	0.280	-0.015	0.102					
地形坡度	0.038	0.833	-0.043	-0.161				
植被覆盖	0.026	-0.138	0.089	0.105	-0.201			
距水系距离	0.025	-0.022	0.064	-0.058	0.029	0.045		
距断裂构造距离	0.443	-0.219	0.225	0.127	-0.144	0.020	-0.421	
距道路距离	0.360	0.270	0.063	-0.015	0.160	0.020	0.148	-0.384

3 崩塌灾害危险性评价模型

3.1 熵值法计算权重系数

基于研究区崩塌分布将各影响因子的分级赋值后使用熵值法计算各影响因子的权重系数,评价指标体系包括 m 个影响因子,选取 n 处崩塌点,结合表 2 中各影响因子的赋值结果,构成评价系统的初始矩阵^[12]:

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix}x_{11}&\cdots&x_{1m}\\\vdots&&\vdots\\x_{n1}&\cdots&x_{nm}\end{bmatrix}。$$

(6)

首先对现有数据 x_{ij} 进行无量纲处理,计算公式如下:

$$T_{ij}=(\max x_{ij}-x_{ij})/(\max x_{ij}-\min x_{ij})+0.000\ 1,0\leqslant i\leqslant n,0\leqslant j\leqslant m。$$

(7)

计算无量纲数据 T_{ij} 的比重 P_{ij} ,具体公式为:

$$P_{ij} = T_{ij} / \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (8)$$

计算第 j 项指标的熵值 e_j , 即:

$$e_j = - \left(\sum_{i=1}^n (P_{ij} \ln P_{ij}) \right) / \ln n \quad (9)$$

计算差异性系数 λ_j , 有:

$$\lambda_j = 1 - e_j \quad (10)$$

λ_j 越大说明系统越有序, 携带的信息越多, 它的效用值就越大。

计算各影响因子的权重系数 S_j , 有:

$$S_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) = \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j \quad (11)$$

选取研究区 60 处崩塌点, 通过表 2 查明它们在贡献率计算前提下各影响因子的危险性等级赋值, 构建危险度指标权重计算初始矩阵(表 4), 余下 18 处崩塌点的数据留作检验用。然后将表 4 中的数据构建 9×60 的矩阵, 通过式(6)~(11)计算研究区崩塌灾害各影响因子的权重系数, 结果如表 5 所示。

3.2 崩塌灾害危险性评价数学模型

建立崩塌灾害危险性评价数学模型是区域崩塌危险性评价的基础, 以此达到对崩塌灾害进行定量评价的目的。研究区崩塌灾害危险性评价数学模型如下:

$$H = \sum_{j=1}^m (S_j \omega_j) \quad (12)$$

其中: H 为研究区崩塌灾害危险性综合指数, m 为影响因子个数, ω_j 为评价对象的第 j 个评价指标的评价等级。根据表 5 的数据, 确定了研究区崩塌灾害危险性评价模型为:

$$H = 0.164\omega_1 + 0.193\omega_2 + 0.090\omega_3 + 0.077\omega_4 + 0.144\omega_5 + 0.039\omega_6 + 0.130\omega_7 + 0.104\omega_8 + 0.059\omega_9,$$

其中 $\omega_1 \sim \omega_9$ 依次分别对应表 2 中所列的地层岩性、陡崖相对高差、高程、年平均降雨量、地形坡度、植被覆盖、距水系距离、距断裂构造距离、距道路距离等 9 个危险性评价指标。

4 基于 ArcGIS 的崩塌灾害危险性评价

4.1 研究区危险性分区评价

基于栅格的评价单元划分, 确定 $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$ 精度的栅格单元, 将研究区划分为 19 135 980 个单元格。由将选取的 9 个危险性评价指标的单因素分布图按照表 2 中的分类赋值标准用 ArcGIS 软件重分类赋值, 并生成单因素崩塌灾害危险性分区评价图(图 4)。

将所选择的单因素指标通过 Arcmap 的栅格计算器工具按照式(12)进行空间叠加, 得到研究区崩塌灾害危险性综合指数图(图 5a), 指数区间为 $[1, 3.961]$ 。按照自然间断法^[13]将综合指数分为 $[1, 1.8)$ 、 $[1.8, 2.22)$ 、 $[2.22, 2.67)$ 、 $[2.67, 3.961]$ 等 4 种区间类别, 重分类后将研究区划分为低危险区, 中危险区, 高危险区和极高危险区, 如图 5b 所示。

危险性分区结果显示: 研究区内极高危险区面积占比最小, 为 11%; 低危险区面积占比为 25.7%; 中危险区和高危险区的面积占比分别为 33.3% 和 30%。极高危险区多分布在乌江水系及藻渡河水系周边, 此区域内部分危岩已初具规模, 应采取被动支护(包括如拦石网等柔性防护和如挡土墙等刚性防护)、主动支护(如锚杆锚索、清除危岩等)或主被动支护结合的措施, 同时应做好危岩监测工作, 以达到尽可能减少或彻底消除崩塌隐患的目的。在高危险区可以发现已有危岩形成, 但只需简单治理并定时巡检, 同时在暴雨、地震、人类活动等因素扰动时需加强防范。在中危险区, 可在相关地区放置警示牌, 但同时也要注意极端天气带来的不利影响。

研究区内共有 5 个风景区, 9 条公路和 1 条铁路(图 5b), 其中景区白马山天尺情缘周边多处危岩危险性较大, 且 G353、G319、G65、G69 以及渝湘复线高速部分路段均属于极高危险区, 应加以重点防范。图 6 显示: 南川区水江镇、金山镇、庆元镇(西北方)、头渡镇、古花镇(西北方), 綦江区黑山镇, 武隆区大洞河乡、白云乡、白马镇、羊角镇、土坎镇、接龙乡等 12 个乡镇位于极高危险区; 南川区三泉镇、大有镇, 武隆区长坝乡、赵家乡、和顺镇、平桥镇等 6 个乡镇位于高危险区; 南川区山王坪镇和武隆区仙女山镇位于中危险区; 南川区德隆镇和武隆区双河镇位于低危险区。

表 4 60 处崩塌点各影响因子的危险性等级评价
Tab. 4 Evaluation of risk levels of each influencing factor at 60 collapse points

崩塌点危岩名称	影响因子								
	地层岩性	陡崖相对高差	高程	年平均降雨量	地形坡度	植被覆盖	距水系距离	距断裂构造距离	距道路距离
耳朵岩危岩	1	4	1	4	1	1	2	4	3
天子坟危岩	4	4	4	2	3	2	3	3	1
风吹岭隧道崩塌	1	1	4	3	1	1	3	1	3
程家沟危岩	2	4	4	3	1	3	4	1	2
乱石岗危岩	4	4	3	2	3	1	1	3	2
水洞危岩	4	3	1	4	2	1	3	4	4
大杉坡危岩	4	4	1	3	2	3	2	4	2
甑子岩铝厂危岩	4	1	1	3	4	1	4	1	3
大柏林危岩	2	3	1	3	4	1	4	1	2
桃子坪危岩	2	3	1	3	2	4	4	1	2
巴岩危岩	1	4	1	4	2	3	4	1	3
斑竹林危岩	2	4	1	2	4	3	4	3	2
云峰殿危岩	2	1	1	2	2	3	4	1	2
安家沟危岩	2	4	2	4	2	1	3	2	3
何家沟危岩	3	4	1	2	4	1	2	4	2
风洞危岩	2	3	1	1	4	3	2	3	1
小湾危岩	3	3	1	1	1	1	2	3	1
仙米坪危岩	1	1	1	3	4	3	1	1	4
小岩危岩	1	3	1	3	1	1	4	1	2
坪上危岩	2	4	1	1	4	3	2	4	1
回龙湾危岩	2	2	1	1	4	3	3	4	1
张家湾危岩 ³	3	4	1	2	4	3	4	4	2
老房子危岩	1	1	1	4	2	1	1	2	3
石岗坪危岩	4	4	3	2	3	1	1	3	2
武马石崩塌	4	4	4	1	3	1	4	1	1
白岩湾崩塌	4	4	2	2	3	3	2	4	3
老鹰石危岩	4	2	3	1	3	2	4	1	1
力明 8 社危岩	4	4	2	1	3	3	3	1	1
马颈子危岩	4	2	3	4	3	3	4	1	4
铜鼓危岩	4	3	2	1	4	3	2	3	1
河坝危岩	2	4	2	3	3	1	1	4	3
光锋(风)洞崩塌	4	3	3	1	4	3	4	4	2
岩湾危岩	2	4	2	4	3	2	1	4	3

续表 4

崩塌点危岩名称	影响因子								
	地层岩性	陡崖相对高差	高程	年平均降雨量	地形坡度	植被覆盖	距水系距离	距断裂构造距离	距道路距离
夹层岩危岩	2	3	1	2	4	3	1	4	2
丰岩危岩	2	4	2	3	3	3	1	4	3
轿子石上头崩塌	2	4	4	1	3	3	4	4	1
观音阁崩塌	2	4	4	3	3	3	4	2	3
堡上(马家)危岩	4	3	3	2	4	4	4	1	2
重岩危岩	4	3	4	1	4	3	4	1	2
庆口崩塌	4	4	4	2	4	3	2	1	4
观音洞危岩	4	4	4	4	3	3	4	1	4
大巷危岩	4	3	4	4	4	1	2	2	4
庆丰危岩	4	4	4	3	4	1	2	2	3
庆口危岩	4	3	4	1	4	4	2	1	1
石合危岩	4	3	4	4	4	1	2	1	4
大湾后危岩	4	4	3	3	4	1	3	1	4
小湾危岩	4	4	3	4	4	3	3	1	4
大湾危岩	4	4	4	3	4	3	3	1	3
大湾北危岩	4	4	4	4	3	3	4	1	4
W-XI危岩	4	4	4	4	3	2	4	1	3
狮子岩崩塌	2	2	3	2	3	3	4	4	2
垛垛石危岩	4	4	2	3	3	1	3	4	3
鸡冠岭崩塌	4	4	3	3	4	2	4	2	3
狮子岩危岩	4	1	4	3	1	2	1	1	3
雷打石危岩	3	3	1	3	4	1	4	4	2
龙神庙崩塌	3	3	1	3	4	3	4	4	3
百果湾危岩	2	3	1	1	3	3	1	2	2
鸡尾山危岩	2	3	1	3	3	2	2	3	2
瓦厂湾危岩	4	3	1	3	3	3	1	4	2
青岗梁子危岩	2	4	1	2	3	3	1	4	2

表 5 各影响因子的权重系数

Tab. 5 Weight coefficients for each impact factor

影响因子	权重系数	影响因子	权重系数	影响因子	权重系数
地层岩性	0.164	年平均降雨量	0.077	距水系距离	0.130
陡崖相对高差	0.193	地形坡度	0.144	距断裂构造距离	0.104
高程	0.090	植被覆盖	0.039	距道路距离	0.059

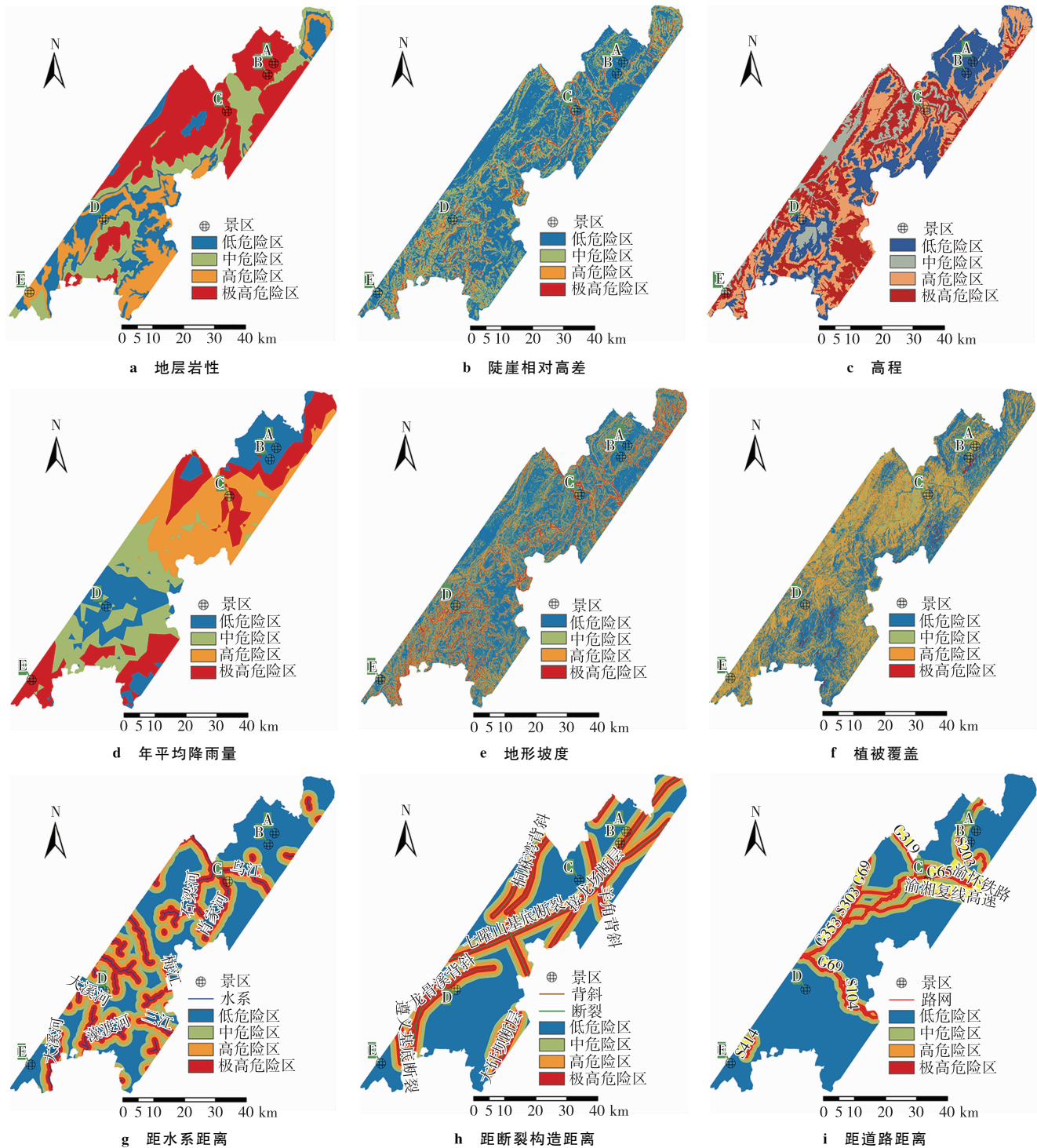


图 4 指标体系分级图

Fig. 4 Index system grading chart

4.2 结果验证

将研究区中余下 18 处崩塌灾害点投影到最终获得的危险性分区中,它们在各区域的分布如表 6 所示。按照以下公式定义模型预测准确率 Z :

$$Z = \sum_{n=1}^4 (a_n b_n) / A b_4, \quad (13)$$

其中: a_n 为第 n 区(第 1、2、3、4 区分别对应低、中、高、极高危险区)内验证点的个数, b_n 为第 n 区域在表 6 中的赋值得分, A 为验证点个数总数, b_4 为极高危险区危险性等级赋值。式(13)等号右侧部分中分母的物理意义为当

验证点全部落在极高危险区时的得分,而分子为验证点总得分。 Z 值越大,说明崩塌灾害点的发生更集中于所划分的较高危险区域,可用于反映模型评价效果的好坏。

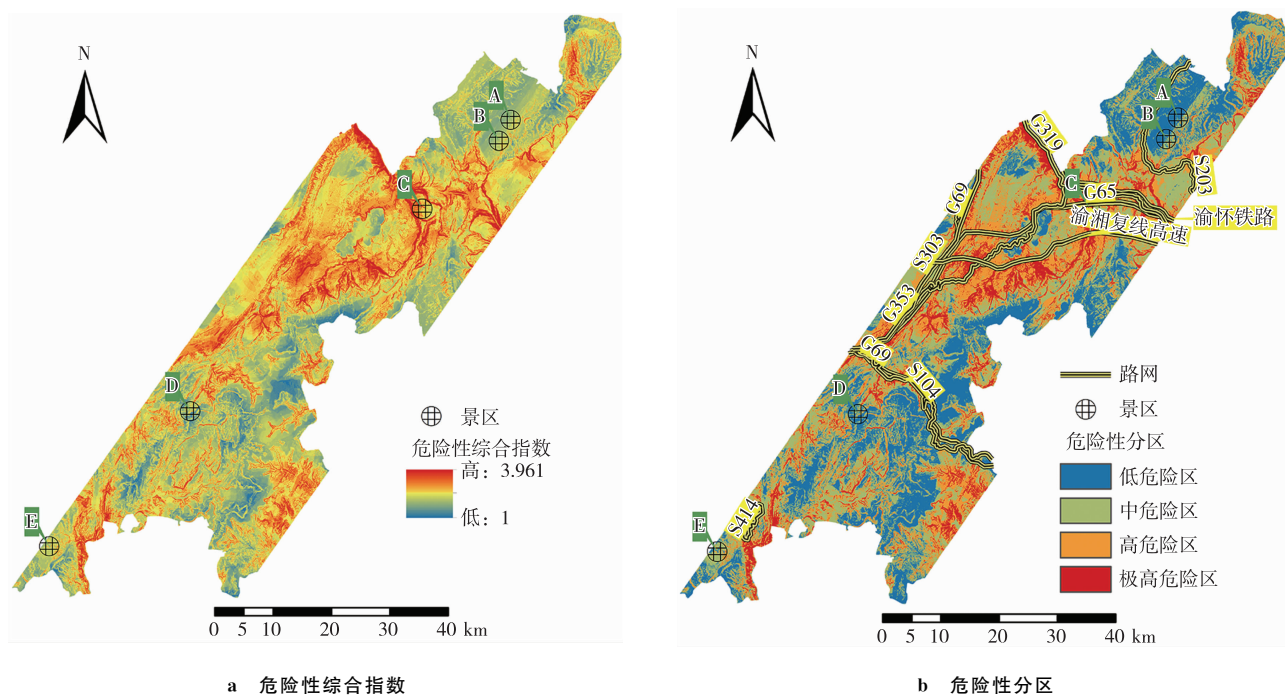


图5 崩塌灾害危险性分区评价

Fig. 5 Zoning evaluation of collapse hazard hazard

本研究将预测结果的准确性分为误差较大、基本准确和准确共3个等级,它们对应的准确率区间分别为 $[0,75]$ 、 $(75,90]$ 和 $(90,100]$ 。表6显示研究模型预测准确率达91.7%,说明本研究所划定的危险性分区是准确的。

5 结束语

本研究以川东南盆周中山山地为主的灰岩地区为研究对象,基于研究区地理环境与崩塌灾害形成条件,从地层岩性、地貌类型、水文地质、地质构造、人类活动、植被覆盖等6个方面遴选了地层岩性、陡崖相对高差、高程、年平均降雨量、地形坡度、植被覆盖、距水系距离、距断裂构造距离和距道路距离共9个主要影响因子作为评价指标,通过贡献率法和熵值法耦合构建了研究区内灰岩地区崩塌灾害危险性评价模型,并利用ArcGIS软件的等面积法实现了多因子空间叠加,获得了研究区崩塌灾害危险性分区评价图。研究区内崩塌灾害危险性区域以高危险区和中危险区为主,两者面积占比分别为30%和33.3%;极高危险区面积占比最小,为11%;低危险区面积占比为25.7%。本研究还对研究区内22个乡镇进行了危险性分区,其中12个乡镇位于极高危险区、6个乡镇位于高危险区、2个乡镇位于中危险区、2个乡镇位于低危险区。本研究最后对模型的评价结果进行了检验,结果显示该模型有较好的预测准确率。

本研究所构建的崩塌灾害危险性评价模型经检验与现实情况能够能较好贴合,可为研究区崩塌灾害预警预报和防治工作提供重要参考资料。此外,本研究所划分的极高危险区属于尺度更小的研究区域,下一步将融合

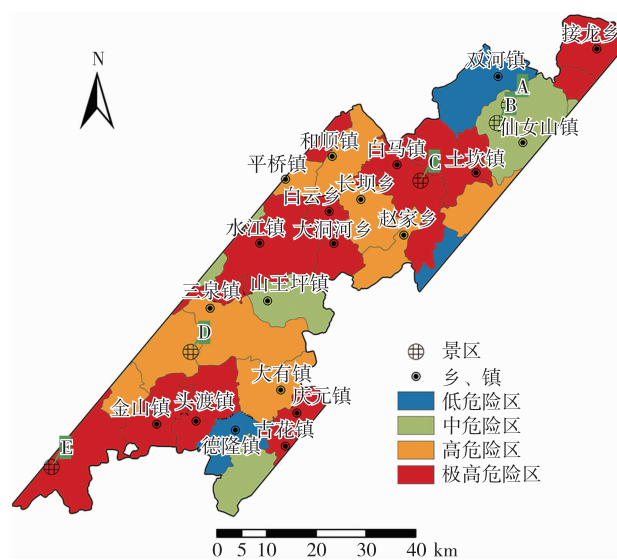


图6 乡镇崩塌灾害危险性分区评价

Fig. 6 Township collapse disaster risk zoning evaluation

具体灾害发育特征,对这类区域进行单点崩塌灾害危险性评价。

表 6 验证点分布情况
Tab. 6 Verify the distribution of points

参数	危险性分区				总计
	极高危险区(4)	高危险区(3)	中危险区(2)	低危险区(1)	
验证点个数	13	4	1	0	18
验证点得分	52	12	2	0	66
预测准确率	72.2%	16.7%	2.8%	0	91.7%

注:各危险性分区后括号内数字为该危险性分区对应的赋值。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297.
HUANG R Q. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 292-297.
- [2] 罗元华. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
LUO Y H. Risk evaluation of geological hazard[M]. Beijing: Geology Press, 2010.
- [3] 叶四桥, 唐红梅, 祝辉. 基于 AHP-Fuzzy 方法的危岩危险度评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(5): 800-803.
YE S Q, TANG H M, ZHE H. Dangerous degree estimation of perilous rock based on AHP-Fuzzy method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2006, 30(5): 800-803.
- [4] 唐红梅, 林孝松, 陈洪凯, 等. 重庆万州区地质灾害危险性分区及评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 5-9.
TANG H M, LIN X S, CHEN H K, et al. Risk zoning assessment of geological disaster in Wanzhou area Chongqing City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 5-9.
- [5] 唐红梅, 廖学海, 陈洪凯. 基于因子分析法的公路洪灾模糊概率综合评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 141-146.
TANG H M, LIAO X H, CHEN H K. Study on highway flood fuzzy probability comprehensive evaluation model based on method of factor analysis[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 141-146.
- [6] 唐红梅, 韩明明, 闫凝. 基于 GIS 的重庆巫山县崩塌灾害危险性分区评价[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(5): 72-79.
TANG H M, HAN M M, YAN N. The GIS-Based danger zoning evaluation of collapse disaster in Wushan County, Chongqing [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2019, 36(5): 72-79.
- [7] 齐识, 宁娜, 马金珠. 甘肃南部武都区滑坡危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 28-34.
QI S, NING N, MA J Z. Assessment of landslide hazard in Wudu of southern Gansu Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 28-34.
- [8] 马思远, 许冲, 田颖颖, 等. 基于逻辑回归模型的九寨沟地震滑坡危险性评估[J]. 地震地质, 2019, 41(1): 162-177.
MA S Y, XU C, TIAN Y Y, et al. Application of logistic regression model for hazard assessment of earthquake-triggered landslides: a case study of 2017 Jiuzhaigou (China) Ms 7.0 event[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(1): 162-177.
- [9] 刘洋洋, 郭增长, 李永强, 等. 基于熵权集对分析和车载激光扫描的公路边坡危险性评价模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 131-141.
LIU Y Y, GUO Z Z, LI Y Q, et al. Risk assessment model of highway slope based on entropy weight set pair analysis and vehicle laser scanning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 131-141.
- [10] 王萌, 乔建平, 吴彩燕. 基于 GIS 和本底因素贡献权重模型的区域滑坡危险性评价: 以重庆万州为例[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1802-1809.
WANG M, QIAO J P, WU C Y. Regional landslide danger assessments based on GIS and the root factor contributing weight model: a case study of the Wanzhou District, Chongqing City, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1802-1809.
- [11] 乔建平, 吴彩燕, 田宏岭. 三峡库区云阳-巫山段地层因素对滑坡发育的贡献率研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2920-2924.
QIAO J P, WU C Y, TIAN H L. Contribution rate research of stratum to landslide growth of Yunyang-Wushan segment in Three Gorges Reservoir Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2920-2924.
- [12] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2): 12-15.

ZHU X A, WEI G D. Discussion on the excellent standards of dimensionless methods in the entropy value method[J]. Statistics and Decision, 2015(2): 12-15.

[13] 罗路广, 裴向军, 谷虎, 等. 基于 GIS 的“8.8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 193-202.

LUO L G, PEI X J, GU H, et al. Risk assessment of geohazards induced by “8.8” earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 193-202.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Coupling Contribution Rate and Entropy Method for Landslide Hazard Assessment: A Case Study of the Limestone Mountain Areas around the Southeast Sichuan Basin

TANG Hongmei, MIAO Mengqi, ZHOU Fuchuan

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The limestone outcrops are widespread and landslides are frequent in the southeastern Sichuan Basin, so it is necessary to evaluate the risk zoning of landslides in this area. Based on the investigation and analysis of the geological environment in the limestone area of the southeastern Sichuan Basin, a limestone area covering Wulong District, Nanchuan District and Qijiang District of Chongqing City and mainly composed of mountainous areas was selected as the research area. Nine risk evaluation indexes were selected, including stratum lithology, relative height difference of steep cliffs, elevation, annual mean rainfall, topographic slope, vegetation coverage, distance from river system, distance from fault structure and distance from road. Then the contribution rate of single factor was calculated by using the contribution rate method of a large number of landslides, and the hierarchical assignment system of risk evaluation indexes was established. The weight coefficient of each influencing factor was calculated by using the entropy method, and the contribution weight model and entropy method were coupled to construct the landslide risk evaluation model. Finally, the multi-factor spatial superposition was realized by using the equal area method based on ArcGIS system. The results showed that the area proportions of extremely high risk area, high risk area, medium risk area and low risk area in the research area were 11%, 30%, 33.3% and 25.7%, respectively. There were 12, 6, 2 and 2 towns in the extremely high risk area, high risk area, medium risk area and low risk area in the research area, respectively. The research results provide important reference for the early warning and forecast of landslide disasters and the prevention and control of landslides in the southeastern Sichuan Basin.

Keywords: mountains areas around the basin; collapse; contribution rate; entropy method; hazard assessment

(责任编辑 方 兴)



优秀校友·本文第一作者简介

唐红梅, 女, 汉族, 研究员, 博士, 博士研究生导师, 1988年毕业于重庆师范学院地理系。长期从事中国中西部地区地质灾害(如危岩崩塌、边坡及泥石流)减灾理论与防治技术研究, 作为项目负责人获得了国家自然科学基金面上项目3次资助研究, 获得重庆市重点自然科学基金2次资助研究, 作为主研参加了多项国家重点研发项目如“973”项目、国家“十五”攻关项目、国际合作的春晖计划项目、国家的重大西部项目等。获得了省部级科学进步一等奖2项, 教育部科技进步二等奖1项, 省部级二等奖5项等多项奖励。在SCI、EI及中文核心期刊发表了科技论文150余篇, 出版专著7部。成功获得发明专利近30余项。

