

贵州省喀斯特地区泥石流灾害易发性评价

岳溪柳^{1,2}, 黄 玫^{1*}, 徐庆勇³, 陈昌彦⁴, 谷晓平⁵

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195;

4. 北京市勘察设计研究院, 北京 100038; 5. 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002)

摘要 贵州省独特的喀斯特山地环境对地质灾害的孕育有其特有的作用机理。本文初选了10个相关因子进行GIS的方差分析及相关性分析,以筛选喀斯特山区泥石流灾害的主要影响因子及灾害易发性评价。结果表明,研究区内土壤侵蚀因子对泥石流灾害的贡献作用最为显著,断层的影响作用不明显。土壤侵蚀、坡度、坡向、岩石性质、土地利用方式、归一化植被指数(NDVI)、到沟谷的距离及>25 mm日数8个影响因子,具有良好的独立性和代表性,是研究区内泥石流易发性评价的最佳指标;泥石流主要分布在贵州西部云贵高原边境、北部大娄山、东北雾灵山及苗岭等地带,占全省面积的29.51%,贵州中部及东南部泥石流易发程度较低;极高易发区泥石流的分布密度是极低易发区的19倍,其主要的特征表现为坡度大、植被覆盖率较低,旱地与工矿用地分布多,土壤侵蚀严重;加强旱地、工矿用地及低植被覆盖区的合理利用及管理,是减少泥石流灾害发生的有效途径。

关键词 喀斯特;泥石流;易发性评价;贵州;GIS

DOI:10.3724/SP.J.1047.2015.01395

1 引言

近年来,区域泥石流易发性评价是风险评价的重要内容,它反映了泥石流灾害的整体特征和空间异质性,为国家区域规划及重点工程建设等宏观决策提供了依据,成为相关部门和广大科研工作者关注的热点之一^[1-3]。

1981年,Hollingsworth和Kovacs采用打分方法构建了灾害评价的基本框架,为滑坡泥石流评价研究的重要方法^[4]。1991-1992年,Carrara利用GIS和RS技术开展了滑坡泥石流灾害制图技术研究^[5-6]。刘希林将定性分析与定量分析有效结合,提出泥石流灾害多因子综合评判模型,促进了国内泥石流评价的发展^[7]。随后,中国黄河上游地区^[8]、三江并流区^[9]、白龙江流域^[10]、云南各流域^[11-12]、四川省^[13]、甘肃省^[14]、北京市^[15-16]、陕西省^[17]等地区均开展过相关研究及危险区划。

多年的灾害研究工作促进了泥石流评价方法

的不断创新^[18],FCM-粗糙集方法^[16]、AHP决策分析法^[13]、模糊综合评价法^[19]、人工神经网络法^[20]、SVM法^[21]、信息量方法^[14,22]等都在泥石流风险评价中得到应用,并取得了良好的效果。然而,前期研究多注重评价方法的尝试与创新,在评价因子的选取上多沿用他人的成果^[13,15,23-25],较少依据特定环境进行影响因子分析,这是目前区域泥石流灾害评价研究工作的一个薄弱环节。

贵州省是世界喀斯特集中分布的亚洲核心区,其岩溶地貌发育强烈,分布面积广,占全省面积的62%以上^[26];其中,碳酸岩分布出露面积11.61万km²,占总面积的65%,地质灾害分布多位于碳酸岩区域^[27]。本文从地形地貌、地质构造、岩土条件、水文环境及人类活动等基础条件出发,初选了10个影响灾害发生的评价因子,结合贵州省地质环境勘察局监测的346个泥石流灾害历史数据进行分析,并利用信息量方法对研究区进行泥石流灾害易发性评价及区划,以期为贵州省整体城乡发展规划及防灾

收稿日期 2014-12-25;修回日期:2015-05-19.

基金项目:国家科技支撑计划项目“西南突发性灾害应急与防控技术集成与示范”(2012BAD20B06);贵州省山地环境气候研究所院士工作站项目(2014GZ93962)。

作者简介:岳溪柳(1988-),女,博士生,主要从事山地灾害与环境脆弱性评价研究。E-mail: yuexiliu8518@163.com

*通讯作者:黄 玫(1968-),女,博士,副研究员,主要从事气候变化对生态系统影响研究。E-mail: huangm@igsnr.ac.cn

减灾预警工作提供参考。

2 研究区地理特征与数据源

(1)贵州省(图1)位于云贵高原向东部平原过度的斜坡地带,介于 $103^{\circ}6' \sim 109^{\circ}35'E$ 和 $24^{\circ}37' \sim 29^{\circ}13'N$ 之间,最高海拔2900 m,最低海拔为137 m,地形切割强烈。全省97%的面积为高原、山地和丘陵;东北部为武陵山,由湘蜿蜒入黔,北部有大娄山,自西向东北斜贯北境,中南部为苗岭,西部乌蒙山。全境属于亚热带湿润季风气候,平均气温为 $15^{\circ}C$ 左右,常年降水充沛,降水量介于850~1600 mm之间,4~9月雨量集中,多为暴雨和大暴雨^[28]。

贵州地区地层,从早期的中元古界至晚期第四系地层均有出露,出露岩层多为碳酸岩类。珠江流域以石灰岩连片分布,占珠江流域的出露总面积的60.75%,长江流域白云岩、石灰岩及碎屑岩呈北向东互层分布,其中白云岩类岩石出露面积占31.17%,石灰岩类岩石出露面积占40.66%^[29]。贵州地壳经历过多次构造运动,全省横贯扬子地块和华南早古生代褶皱带2个一级大地构造单元^[29]。省(区)主要断层十多条,多为东北走向,断层分布密集,但少有地震发生。

(2)本研究采用的数据:

①贵州省DEM数据(分辨率100 m),贵州省2004年归一化植被指数(NDVI)数据(分辨率1 km),1999年原地矿部等单位编制并发布的1:50万地质数据,地球系统科学数据共享网西南山地分中心2002年发布的1:10万土壤侵蚀数据及1995年

的1:10万土地利用类型数据;以上数据源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心。

②1960~2006年贵州省83个气象站点的降水资料,源于贵州省气象局。

③1960~2005年贵州省历史泥石流灾害记录数据,源于贵州省地质环境监测院。

上述数据预处理包括:断层及河流矢量数据的缓冲区分析(Buffer),DEM数据的坡度和坡向提取(Surface analysis),降水量站点数据的Kriging插值及矢量数据到栅格数据的格式转换(Feature to raster)。

3 泥石流灾害易发性评价分析

3.1 影响因子的选取与分级

泥石流的形成必须具备3个基本条件:(1)利于泥石流发生和运动的地形条件;(2)丰富的松散土石碎屑等固体物质来源;(3)短期内充足的水源条件。关于泥石流灾害的影响因子的选取及应用,专家和学者已有不少成果^[7-17,30-37]。本文从地形地貌、地质构造、岩土条件、水文环境及人类活动等基础条件分析选取了土壤侵蚀程度、坡度、年均降水量、>25 mm降水日数、坡向、到断层的距离、岩性、土地利用方式、NDVI,以及沟谷的距离等影响因子。

土壤侵蚀程度(X_1)反映了地表的直接破坏程度,是人类活动、岩石风化、坡体受损等多因素的综合表现结果,为综合性的山地致灾因子^[35];坡度(X_2)对泥石流的形成和发育具有重要影响,地势陡峻、纵坡降大的地形坡体稳定性差且便于水流汇集^[36],一般而言,15~35°坡泥石流发育最为密集^[30];暴雨和大暴雨是泥石流发育的直接诱因,降水通过增加土体含水量,减少其抗剪强度,使坡体呈现不稳定状态,从而诱发泥石流^[7],贵州省内泥石流主要为暴雨型泥石流类型,降水丰富地区是泥石流的高发区。因此,>25 mm降水日数(X_3)及年均降水(X_4)被选为影响因子。

此外,部分环境条件对泥石流发育也具有一定的影响,岩石性质(X_5)直接影响岩石的风化程度,进而影响区域松散碎屑物的堆积,一般而言,泥岩、碎屑岩、页岩等较灰岩、白云岩、岩浆岩等更容易发生泥石流灾害^[38];断层(X_6)活动带附近岩层破碎,松散物质储量丰富,从物源及滑动动力角度为泥石流

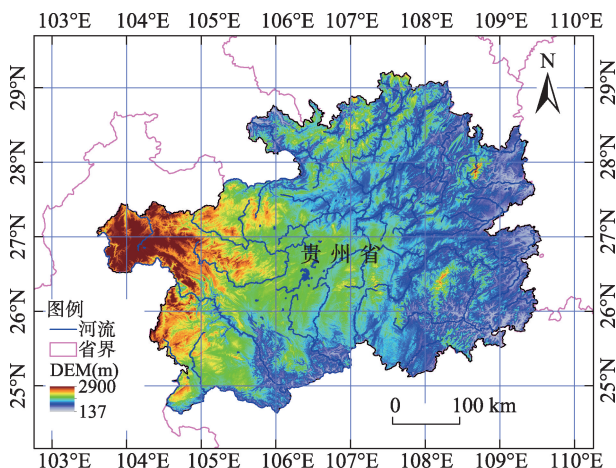


图1 贵州省行政区域图

Fig. 1 The boundary map of Guizhou Province

的发育提供了有利的条件^[7]；坡向(X_7)差异致使水热条件存在差异,进而影响降水强度和风化、侵蚀程度,在中国南坡的地质灾害发育相对北坡而言更为密集^[17],坡向作为辅助因子参与分析。土地利用方式(X_8)反映了人类对地表的干预作用,旱地、裸地、耕地土体松散,城镇、工矿用地堆积物松散容易发生泥石流,林地对泥石流的发育则具有一定的抑制作用^[27-28]；NDVI(X_9)反映了植被的覆盖程度与植被的生长状况,长势优良的植被具有良好的固土作用及雨水截留作用,利于缓解地表径流的汇集,对泥石流的发育具有抑制作用^[27-28]；沟谷是一定流域范围内的水流汇集区,离沟谷越近的地区水量汇集越多,冲刷及携带能力增强,泥石流发生的概率相对增大^[39],因此,到沟谷的距离(X_{10})选作影响因子之一。

各因子的等级划分及分级依据如表1所示。

3.2 因子筛选方法

为筛选影响泥石流灾害发育的最直接最相关的评价因子,本文运用方差分析^[40]和相关性分析进行影响因子筛选。

方差分析(Analysis of Variance)通过研究不同来源的变异对总变异的贡献大小,以确定可控因素对研究结果影响力的大小^[41]。对每个影响因子进行指标分级,并对各等级环境中泥石流的分布密度进行方差分析,进而判断泥石流在因子各等级环境中是否存在明显的差异；方差越大,表示影响因子各等级环境中泥石流分布差异性越大,因子对泥石

流的发育影响越大；反之则影响较小。其计算公式为：

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1) \quad (1)$$

式中, S^2 为单个影响因子的方差； X_i 为影响因子不同层级环境中泥石流的分布密度(各层级环境中的泥石流个数除以层级面积)； \bar{X} 为泥石流在影响因子中的分布密度均值(泥石流总数除以总面积)； n 为影响因子划分的层级数。

相关性分析是指对2个或多个变量元素进行的衡量变量因素之间相关程度的分析。相关系数越大,指标间的相关性越高,即因子之间重复交叉的信息多；反之则低,表示各因子独立性较强^[41]。在ArcGIS软件中,Spatial analyst tools 中 Create signatures 工具,可创建由输入样本数据和一组栅格波段定义的类的文件,计算栅格数据图层的相关性系数矩阵,因子间的相关系数超过0.5,则说明2个因子存在中度以上的关联性,重复交叉信息较多,可选择其中一位因子作代表,形成相互独立的易发性评价体系。

3.3 泥石流易发性评价

本研究采用信息量模型以评价泥石流的易发性,它可全面反映历史灾害的信息数据,信息量越大,表明产生地质灾害的可能性越大^[42]。信息量模型的建立过程如下^[43]：

(1)单独计算各因素 X_i 对地质灾害发生事件(L)提供的信息量。在实际计算中,采用频率来估算其

表1 泥石流灾害影响因子指标分级

Tab. 1 The classification of debris flow impact factors

影响因子		分级数	指标分级	分级方法及依据
直接影响因子	土壤侵蚀	5	一级侵蚀(轻度侵蚀),二级侵蚀,三级侵蚀,四级侵蚀,五级侵蚀(重度侵蚀)	土壤侵蚀等级数据(西南山地分中心发布)
	坡度	6	<10°, 10~15°, 15~20°, 20~25°, 25~30°, >30°	等间隔法；文献[30]
	年平均降水	6	<1000 mm, 1000~1100 mm, 1100~1200 mm, 1200~1300 mm, 1300~1400 mm, >1400 mm	等间隔法
	> 25 mm降水日数	5	<5 d, 5~8 d, 8~11 d, 11~14 d, >14 d	归一化分级
间接影响因子	岩石性质	6	软硬岩互层岩,粘土岩、泥岩、页岩、砾岩、砂岩、灰岩、白云岩、变质岩,岩浆岩	
	到断层的距离	5	<0.5 km, 0.5~1 km, 1~1.5 km, 1.5~2 km, >2 km	等间隔法；文献[15]
	坡向	5	阳坡(南坡: 157.5~202.5°), 半阳坡(东南坡: 112.5~157.5°及西南坡: 202.5~247.5°)、过渡坡(东坡: 67.5~112.5°及西坡: 247.5~292.5°)、半阴坡(东北坡: 22.5~67.5°及西北坡: 292.5~337.5°)、阴坡(北坡: 337.5~22.5°及平地区域)	ArcGIS软件默认分类
	土地利用方式	5	旱地,耕地,城镇、工矿用地,草原,林地	文献[31]~[32]
	NDVI		<0.157, 0.157~0.171, 0.171~0.183, 0.183~0.226, >0.226	自然断点法
	到沟谷的距离	5	<2 km, 2~4 km, 4~6 km, 6~8 km, >8 km	等间隔法

表示的条件概率,即:

$$I(L,X_{ij})=Ln[(N_{ij}/N)/(S_{ij}/S)] \tag{2}$$

式中, N 为研究区域泥石流灾害分布的总数; S 为研究区域评价单元的总数; X 为影响泥石流发育的因子; i 为影响因子的标号; j 为影响因子的不同分级; N_{ij} 为第*i*个因子第*j*个等级泥石流分布的个数; S_{ij} 为第*i*个因子第*j*个等级所占的单元格总数; $I(L,X_{ij})$ 为第*i*个因子第*j*个层级的信息量。

(2)计算单个评价单元内的总信息量。

$$I=\sum_{i=1}^8 I(L,X_i) \tag{3}$$

式中, I 为评价单元的总信息量值; i 为参评因子数。此环节中不同层级*j*的空间分布构成整体评价区域。

(3)用总的信息量*I*作为该单元影响地质灾害发生的综合指标,其值越大表明越有利于地质灾害的发生,该单元地质灾害易发性程度也越高。

通过对初选影响因子各等级环境中的泥石流分布密度进行方差分析(表2),土壤侵蚀因子中泥石流分布密度的差异最大,方差值达5.7774;其次为土地利用方式因子,分布密度方差值为1.6792;它们对泥石流分布具有重要影响。由于断层因子中,石流分布密度方差小,值为0.0507,远小于其他因子,即泥石流的分布在到断层的不同距离环境中基本表现为均等分布,该因子对泥石流的发育影响较小,可不参与影响评价。

相关性分析系数矩阵(表3)显示,年均降水和>25 mm降水日数的相关系数为0.9,相关性很强,即具有较多交叉重复信息,可选其中一个指标为代

表2 初选影响因子方差分析表

Tab. 2 Analysis of variance of causal impact factors

影响因子	方差	影响因子	方差
土壤侵蚀(X_1)	5.7774	到断层的距离(X_6)	0.0507
坡度(X_2)	0.2241	坡向(X_7)	0.2088
年平均降水(X_3)	0.3391	土地利用方式(X_8)	1.6792
>25 mm降水日数(X_4)	0.9318	NDVI(X_9)	0.7185
岩石性质(X_5)	0.3622	到沟谷的距离(X_{10})	0.2282

表;由于方差分析中>25 mm降水日数因子其泥石流分布密度方差值(0.9318)大于年平均降水的方差值(0.3622),因此,文中保留>25 mm降水日数作为影响因子参与易发性评价。其他各因子之间的相关性均小于0.5,通过相关性分析,具有良好的独立性。

综上所述,本文最终确定土壤侵蚀程度、坡度、>25 mm降水日数、岩石性质、坡向、土地利用方式、NDVI,以及到河流的距离8个因子,作为研究区易发性评价的最终指标。指标分级的空间示意如图2所示。

运用信息量计算方法,计算得泥石流影响因子的信息量贡献度表如表4所示。在研究区内,土壤侵蚀严重区(二级侵蚀至五级侵蚀区)、旱地、1000~1100 mm降水带、城市及工矿地、0.157~0.171的NDVI区域(中低植被覆盖区)、大于30°坡地区信息量值最大,是泥石流灾害发育的高频环境。

运用ArcGIS软件,将信息量计算融合到空间分布模式,得出单元网格的综合信息量,其最高值为3.8666,最低值为-3.6909。为更好地反映泥石流灾害易发性程度,文章运用自然断点法(Nature Breaks Classification)重分类综合信息量值,依据差

表3 影响因子相关性系数矩阵

Tab. 3 Correlation matrix of impact factors

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1.00	-0.02	-0.14	-0.14	0.02	-0.03	0.01	0.28	0.19	0.03
X_2	-0.02	1.00	0.02	0.00	0.00	-0.05	-0.01	-0.16	-0.25	0.02
X_3	-0.14	0.02	1.00	0.90	-0.14	0.04	0.01	-0.06	-0.08	-0.02
X_4	-0.14	0.00	0.90	1.00	-0.14	0.04	0.01	-0.06	-0.02	0.03
X_5	0.02	0.00	-0.14	-0.14	1.00	0.06	-0.01	0.01	0.01	-0.04
X_6	-0.03	-0.05	0.04	0.04	0.06	1.00	0.00	0.01	0.08	0.04
X_7	0.01	-0.01	0.01	0.01	-0.01	0.00	1.00	0.03	0.02	0.00
X_8	0.28	-0.16	-0.06	-0.06	0.01	0.01	0.03	1.00	0.30	0.06
X_9	0.19	-0.25	-0.08	-0.02	0.01	0.08	0.02	0.30	1.00	0.17
X_{10}	0.03	0.02	-0.02	0.03	-0.04	0.04	0.00	0.06	0.17	1.00

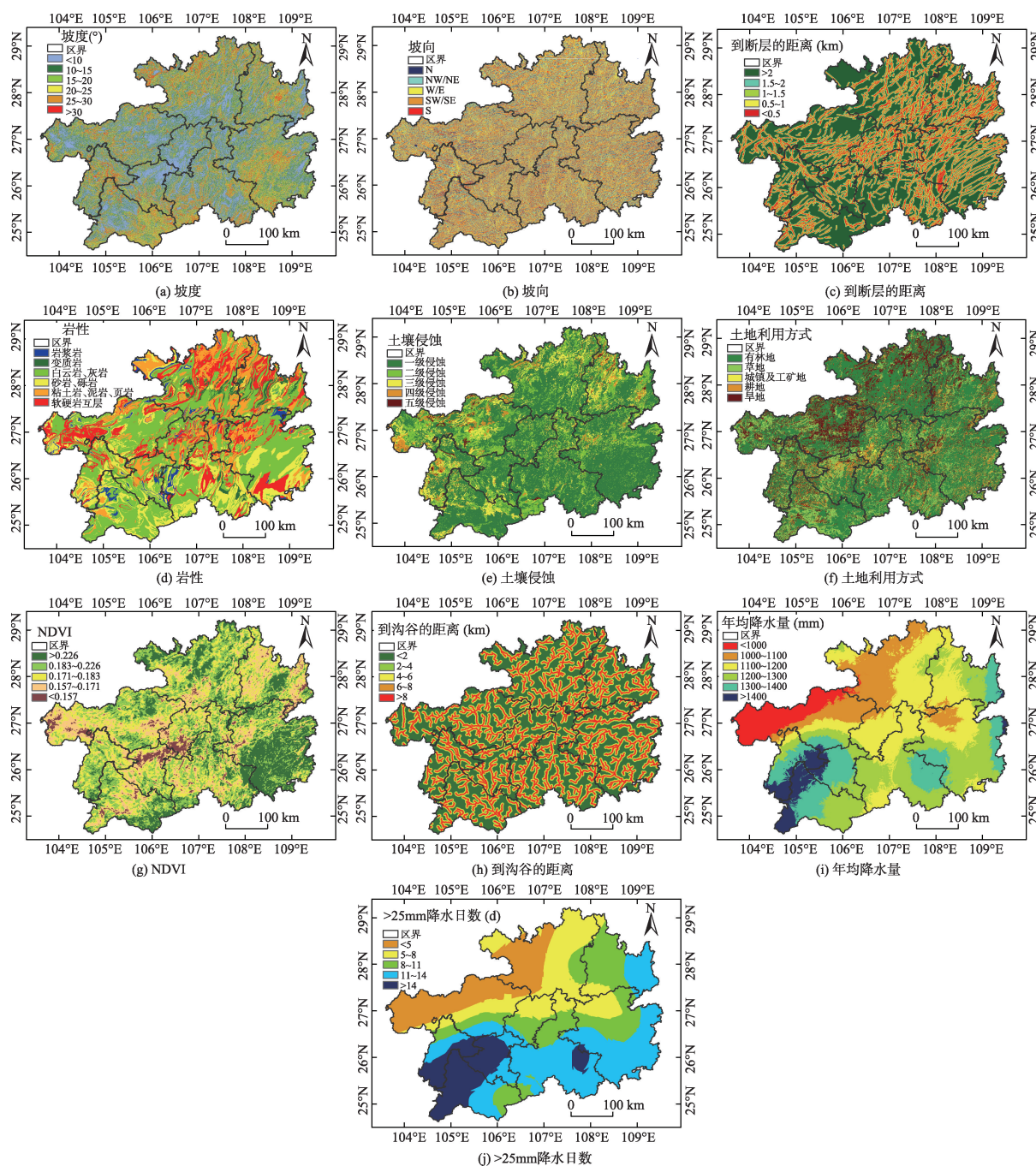


图2 各因子等级空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of impact factors according to their degrees

异最大化原理将易发性结果分级为5级(图3),其中,极低易发区的信息量值为 $(-3.6909)-(-1.8901)$,低易发区信息量值为 $(-1.8901)-(-0.8568)$,中易发区信息量为 $(-0.8568)-0.0878$,高易发区信息量为 $0.0878-1.1801$,极高易发区信息量为 $1.1801-3.8666$ (表5)。研究区内泥石流极高易发区和高易发区总计占全省面积的29.51%,灾害分布密度分别为6.70处/1000 km²和2.95处/1000 km²,是极低易发区泥石

流分布密度(0.35处/1000 km²)的19倍和8.5倍。

从空间范围来看,研究区内泥石流易发性最高的地区(图3)主要位于贵州西部云贵高原入山地的高山陡坡地带(包括毕节市东部的乌蒙山山区、六盘水大部及安顺西部地区),贵州省东北部大娄山和武陵山区域,以及黔南与黔西南交界的苗岭入缓丘地带。在行政单元上主要分布在于安顺、黔西南、六盘水、铜仁4个区市。这些地区,均具有坡度

表4 泥石流灾害易发性参评因子及信息量计算结果

Tab. 4 Assessment factors and their information quantities of debris-flow susceptibility

因子	分级	S/S	N _i	I(L,X _i)	信息量排序
土壤	一级	0.6195	107	-0.6948	41
侵蚀	二级	0.2198	106	0.3323	7
	三级	0.1098	80	0.7446	4
	四级	0.0437	44	1.0676	2
	五级	0.0072	9	1.2833	1
坡度(°)	<10	0.3313	86	-0.2873	38
	10~15	0.2217	68	-0.1205	31
	15~20	0.1845	82	0.2501	13
	20~25	0.1278	53	0.1815	17
	25~30	0.0740	28	0.0894	21
	>30	0.0607	29	0.3225	8
坡向	N	0.1221	30	-0.3424	39
	NW&NE	0.2456	70	-0.1938	33
	E&W	0.2549	87	-0.0135	25
	SW&SE	0.2542	105	0.1772	18
	S	0.1233	54	0.2357	15
岩性	岩浆岩	0.0325	9	-0.2217	35
	变质岩	0.0251	10	0.1405	19
	白云岩、灰岩	0.4406	138	-0.0996	30
	砂岩、砾岩	0.1882	51	-0.2443	36
	粘土岩、泥岩、页岩	0.1411	59	0.1895	16
	软硬岩互层	0.1725	79	0.2804	10
土地利用方式	林地	0.5815	127	-0.4600	40
	草地	0.1764	58	-0.0510	28
	城市及工矿地	0.0038	2	0.4256	5
	耕地	0.0705	25	0.0251	24
	旱地	0.1679	134	0.8359	3
NDVI	>0.226	0.2070	22	-1.1802	42
	0.183~0.226	0.3206	108	-0.0268	27
	0.171~0.183	0.2798	127	0.2713	11
	0.157~0.171	0.1526	74	0.3375	6
	<0.157	0.0400	15	0.0810	22
到沟谷的距离(km)	<2	0.4322	120	-0.2200	34
	2~4	0.1238	42	-0.0196	26
	4~6	0.1362	60	0.2414	14
	6~8	0.1465	47	-0.0752	29
	>8	0.1614	77	0.3215	9
>25 mm	<5	0.1584	71	0.2588	12
降水日数	5~8	0.2000	71	0.0259	23
(d)	8~11	0.2100	82	0.1208	20
	11~14	0.3039	88	-0.1781	32
	>14	0.1277	34	-0.2619	37

大、植被覆盖率较低,旱地与工矿用地破坏较大,降水丰沛,土壤侵蚀严重等特点。贵州中部缓平地区(贵阳市、黔南市、黔东南市),毕节市云贵高原台地、黔东南低缓丘山地区的泥石流易发性相对性较低。

4 结论

通过对贵州省泥石流影响因子分析及易发性评价,得出以下结论:

(1)在研究区内,土壤侵蚀对泥石流的分布影响显著,断层对泥石流灾害的贡献作用不明显。土壤侵蚀、坡度、>25 mm降水日数、岩石性质、坡向、土地利用方式、NDVI及到河流的距离,是研究区具有最好独立性和代表性的易发性评价因子组。

(2)贵州省29.51%的国土面积为泥石流高易发区,其分布密度是极低易发区的9~19倍。高易发区主要集中在云贵高原入贵州中部的高山区域,北部大娄山、东北雾灵山及苗岭山区;在行政区域上分布于安顺、黔西南、六盘水、铜仁4个市;贵州中部及东南部泥石流易发程度较弱。高易发区主要的环境特征表现为:坡度大、植被覆盖率较低,旱地与工矿用地破坏较大,土壤侵蚀严重;因此,加强旱地、工矿用地及低植被覆盖区的合理利用和管理是缓解研究区泥石流灾害发生的重要途径。

(3)对地质灾害易发性评价而言,评价指标的选取是影响评价结果的重要因素,详细的因子分析可为泥石流评估构建更好的评价体系。但本文方法依存在一些不足,如指标选取及数据空间化的不确定性,因子层级划分的主观性,以及数据的限制、尺度转化的影响,因此,今后需更科学完善地建立泥石流灾害评价体系和评价方法。

表5 研究区泥石流易发性分布统计

Tab. 5 The statistics of debris flow distribution in the study area

易发性分级	综合信息量区间	面积(km ²)	面积比(%)	灾害数(处)	分布密度(处/1000 km ²)
极低易发区	(-3.6909)~(-1.8901)	28 332	16.09	10	0.35
低易发区	(-1.8901)~(-0.8568)	50 700	28.78	43	0.85
中易发区	(-0.8568)~0.0878	45 132	25.62	69	1.53
高易发区	0.0878~1.1801	33 168	18.83	98	2.95
极高易发区	1.1801~3.8666	18 816	10.68	126	6.70

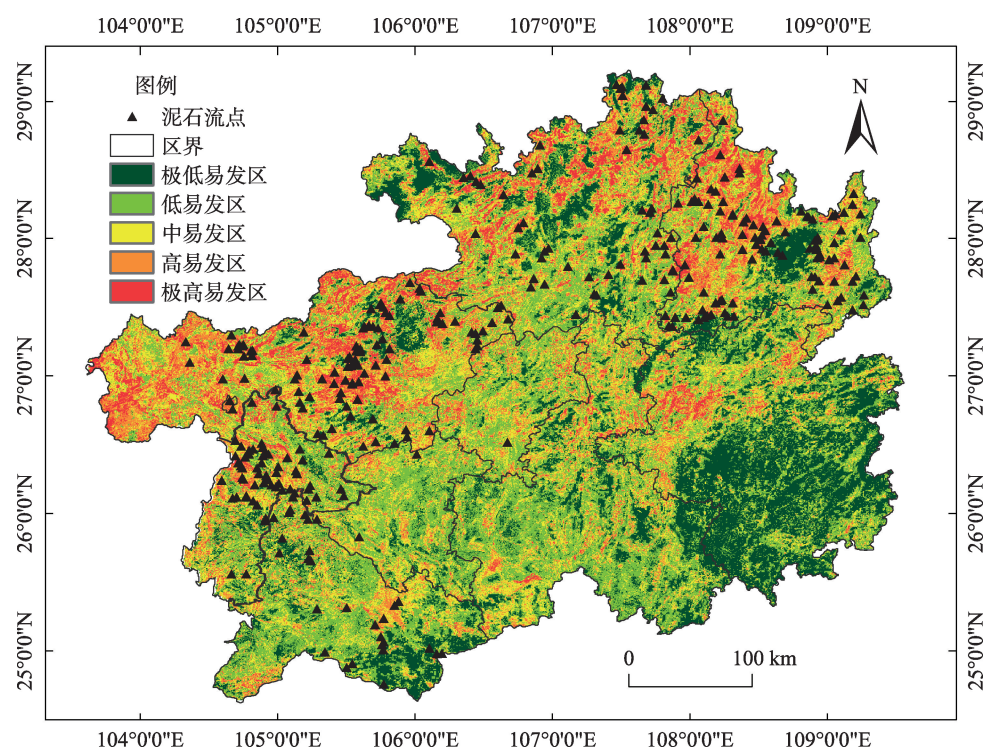


图3 贵州省泥石流灾害易发区划分

Fig. 3 Zonation of debris flow susceptibility in Guizhou Province

参考文献:

- [1] 罗元华.论泥石流灾害风险评估方法[J].中国矿业,2000,9(6):70-72.
- [2] 胡瑞林,范林峰,王珊珊,等.滑坡风险评价的理论与方法研究[J].工程地质学报,2013,21(1):76-84.
- [3] 李阔,唐川.泥石流危险性评价研究进展[J].灾害学,2007,22(1):106-111.
- [4] Hollingsworth R, Kovacs G S. Soil slumps and debris flows: Prediction and protection[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1981,38(1):17-28.
- [5] Carrara A. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991,16(1):427-445.
- [6] Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk[J]. ITC Journal, 1992,2:172-183.
- [7] Liu X L. Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, southwestern China[J]. Environmental Management, 2002,30(2):249-264.
- [8] 张春山,张业成,马寅生.黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J].地质力学学报,2003,9(2):143-153.
- [9] 丁明涛,韦方强,王欢,等.基于聚类分析的三江并流区泥石流危险性评价[J].资源科学,2012,3(7):1257-1265.
- [10] 宁娜,马金珠,张鹏,等.基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J].资源科学,2013,35(4):892-899.
- [11] 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.
- [12] 陶云,唐川,段旭.云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J].自然灾害学报,2009,18(1):180-185.
- [13] 李为乐,唐川,杨武年. RS和GIS技术在县级区域泥石流危险区划中的应用研究——以四川省泸定县为例[J].灾害学,2008,23(2):71-75.
- [14] 宁娜,田黎明,张鹏,等.甘肃南部武都地区泥石流危险性评价[J].山地学报,2013,31(5): 601-609.
- [15] 宋杨,程维明,柏延臣,等.密云水库周边山区滑坡泥石流易发区预估[J].地理科学进展,2011,30(3):343-351.
- [16] 程维明,夏遥,曹玉尧,等.区域泥石流孕灾环境危险性评价——以北京军都山区为例[J].地理研究,2013,32(4): 595-606.
- [17] 孟庆华,孙炜峰,王涛.陕西凤县地质灾害易发性评价研究[J].工程地质学报,2011,19(3):388-396.
- [18] 卢全中,彭建兵,赵法锁.地质灾害风险评估(价)研究综述[J].灾害学,2003,18(4):59-63.
- [19] Lin J W , Chen C W, Peng C Y. Kalman filter decision systems for debris flow hazard assessment[J]. Natural Hazards, 2012,60(3):1255-1266.
- [20] 赵源,刘希林.人工神经网络在泥石流风险评价中的应用

- [J].地质灾害与环境保护,2005,16(2):135-138.
- [21] 原立峰.基于SVM的泥石流危险度评价研究[J].地理科学,2008,28(2):296-300.
- [22] Xu W B, Yu W J, Jing S C, *et al.* Debris flow susceptibility assessment by GIS and information value model in a large-scale region, Sichuan Province (China)[J]. *Natural hazards*, 2013,65(3):1379-1392.
- [23] 祁元,刘勇,杨正华,等.基于GIS的兰州滑坡与泥石流灾害危险性分析[J].冰川冻土,2012(1):96-104.
- [24] 胡桂胜,陈宁生,邓虎.基于GIS的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J].水土保持研究,2012(3):195-199.
- [25] 张若琳,孟晖,连建发.基于GIS的中国泥石流易发性评价[J].成都理工大学学报,2013(4):379-386.
- [26] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.贵州岩溶区水土流失,石漠化受岩溶环境制约[J].中国水土保持,2009(1):20-23.
- [27] 罗宁,许炳南,文继芬,等.贵州大气降水的时空分布规律研究[J].贵州气象,2006,30(4):3-7.
- [28] 路洪海,冯绍国.贵州喀斯特地区石漠化成因分析[J].四川师范学院学报(自然科学版),2002,23(2):189-191.
- [29] 戴传固,王敏,陈建书,等.贵州构造运动特征及其地质意义[J].贵州地质,2013,30(2):119-124.
- [30] 曾凡伟,徐刚,李青.坡面泥石流发生的坡度阈值研究[J].地理科学,2005,25(2):244-247.
- [31] 罗林.毕节地区植被对泥石流控制作用的关联度评价[J].农业系统科学与综合研究,1997,13(1):31-33.
- [32] 施雷雷,陈宁生,杨成林,等.娃娃沟流域泥石流活动与植被关系探讨[J].水土保持研究,2008,15(3):96-99.
- [33] 苏鹏程,倪长健,孔纪名,等.区域泥石流危险度评价的影响因子识别[J].水土保持通报,2009(1):128-132.
- [34] 张红兵,金德山.影响云南省滑坡泥石流活动的几个自然因素[J].水文地质工程地质,2004(5):38-41.
- [35] 李景保,梁成军,蔡松柏.论土壤侵蚀对山地致灾因子链的复合效应——以湖南四水流域中上游地区为例[J].自然灾害学报,2002,11(4):101-105.
- [36] 朱渊,余斌,元星,等.地形条件对泥石流发育的影响——以岷江流域上游为例[J].吉林大学学报,2014(1):268-277.
- [37] 田冰,王裕宜,洪勇.泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系[J].水土保持通报,2008(2):71-75.
- [38] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [39] Lin G F, Chen L H, Lai N. Assessment of risk due to debris flow events: a case study in central Taiwan[J]. *Natural hazards*, 2006, 39(1):1-14.
- [40] Broothaerts N, Kissi E, Poesen J, *et al.* Spatial patterns, causes and consequences of landslides in the Gilgel Gibe catchment, SW Ethiopia[J]. *Catena*, 2012,97:127-136.
- [41] 薛薇主编. SPSS 统计分析方法及应用[M].北京:电子工业出版社,2013:242-256.
- [42] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等.基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J].地球科学与环境学报,2004,26(3):52-56.
- [43] 高克昌,崔鹏,赵纯勇.基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):991-996.

The Susceptibility Assessment of Debris Flow in Karst Region of Guizhou Province

YUE Xiliu^{1,2}, HUANG Mei^{1*}, XU Qingyong³, CHEN Changyan⁴ and GU Xiaoping⁵

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100101, China; 4. BGI Engineering Consultants LTD, Beijing 100101, China; 5. Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resource, Guiyang 550002, China)

Abstract: Guizhou is a typical karst mountainous province in China, which has unique geological disaster mechanism due to its unique geological environment. In this study, 10 factors were selected as the possible impact factors, and the cluster analysis and correlation analysis methods were used to identify the main risks of debris flow factors. Based on the techniques of geo-information system, information model was used to evaluate the spatial pattern of debris flow susceptibility. Soil erosion is identified as the most important factor to influence the occurrence of native debris flow, while fault has little impact on debris flow. Factors of soil erosion, slope, aspect, rock characteristics, land use, NDVI, distance to gully and days of daily precipitation greater than 25mm are proved to be independent and representative factors, and they served as indices for susceptibility assessment. The results show that 29.51% of the regions in Guizhou are heavy susceptibility regions, which were located in western Guizhou and the mountainous area, such as Dalou mountain, Wuling mountain and Miaoling in northern Guizhou. The central and southeastern Guizhou is identified as relative less susceptibility region. Heavy susceptibility areas have common characteristics of steep slope, low vegetation coverage, featuring with dry land, industrial and mining land, and are subjected to serious soil erosion. The debris flow density in heavy susceptibility region is 19 times of that in the low susceptibility region. The effective way to decrease debris flow disaster is to strengthen the management of dry land, industrial and mining land, and the area with lower vegetation cover.

Key words: karst; debris flow; susceptibility assessment; Guizhou; GIS

*Corresponding author: HUANG Mei, E-mail: huangm@igsnnr.ac.cn