

滑坡易发性评价的层次分析法研究

——以贵州省普安县为例

卢志强¹,冷洋洋²,赵 昱³

(1. 贵州地矿基础工程有限公司,贵州 贵阳 550081;2. 贵州省地质环境监测院,贵州 贵阳 550081;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 106 地质大队,贵州 遵义 563000)

[摘 要]评价方法的合理选择是获取正确滑坡地质灾害易发性评价结果的关键环节。本文以贵州省黔西南州普安县为例,在全面分析区内地层岩性、地形地貌、地质构造和水文地质等条件对滑坡灾害影响的基础上,采用层次分析法建立了具有针对性的滑坡灾害易发性评价指标体系,并开展了实际应用。评价结果在县境内划分出了极高、高、中和低易发区四个区域,对比分析显示评价结果与区内滑坡灾害发育宏观认识与实际分布情况吻合较好,证明了该方法在山区滑坡地质灾害易发性评价中的有效性与实用性。

[关键词]黔东滑坡灾害;易发性评价;层次分析法;ARCGIS;诱发因素;贵州

[中图分类号]P694;P642.22 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2022)03-287-07

1 引 言

对滑坡灾害易发区域进行分区研究目前已广泛应用于地质灾害减灾工作中(殷坤龙,2001;于晓辉等,2010;徐为等,2011;王进等,2012;任敬等,2018;黄发明等,2018;郭子正等,2019;许嘉慧等,2020;申怀飞等,2021)。层次分析法作为一种解决多目标复杂问题的半定量综合决策分析方法,虽然在一定程度上受到部分主观因素影响,但是由于是以专家知识为基础,充分考虑了各影响因素之间的相关性,因此可以有效地将人为误差降至最低,从而使所得到的滑坡灾害易发性评级结果更客观。有关文献(许冲等,2009;杜国梁等,2016)的研究结果表明,层次分析法是一种行之有效的滑坡灾害易发性评价方法。

贵州省黔西南州普安县地形起伏较大,切割

强烈,地质构造复杂,地质环境条件脆弱,属于贵州省地质灾害高易发区。本文以普安县为主要研究区,在充分认识滑坡地质灾害形成的地质环境条件、成因机理和规律的基础上,考虑地层岩性、地形地貌、地质构造和水文地质四个方面因素的综合影响,采用层次分析法构建普安县滑坡灾害易发性评价指标体系,对普安县滑坡地质灾害进行易发性区划。研究结果为普安县地质灾害防治、国土空间规划和政府决策提供相关的理论基础与数据支持。

2 研究区概况

普安县位于黔西南布依族苗族自治州北部,属于云贵高原向黔中山原过渡的梯状斜坡地带,最高处为长冲梁子,高程 2 084.6 m,最低处为北盘江河谷,高程 589 m,区内地势总体为中部高、四

[收稿日期]2022-01-13 [修回日期]2022-07-03

[基金项目]贵州省地质灾害详细调查及风险评价成果集成(中央自然灾害防治体系建设补助资金 Z195110010003)。

[作者简介]卢志强(1986—),男,高级工程师,工程硕士,主要从事水工环地质相关工作。E-mail:841223602@qq.com.

[通讯作者]冷洋洋(1987—),男,博士生,高级工程师,主要从事地质灾害调查及评价工作。E-mail:87065420@qq.com.

面低(图1)。县内地质构造复杂,北部主要褶曲有格所河背斜、白块向斜、土城向斜和高棉向斜,断裂有峰岩、白果、红星断层,中、南部褶曲主要有莲花山背斜、括磨舍背斜,断裂主要有雪浦断层、泥堡断层等。县内各类地质灾害较为发育,共有68处滑坡地质灾害。

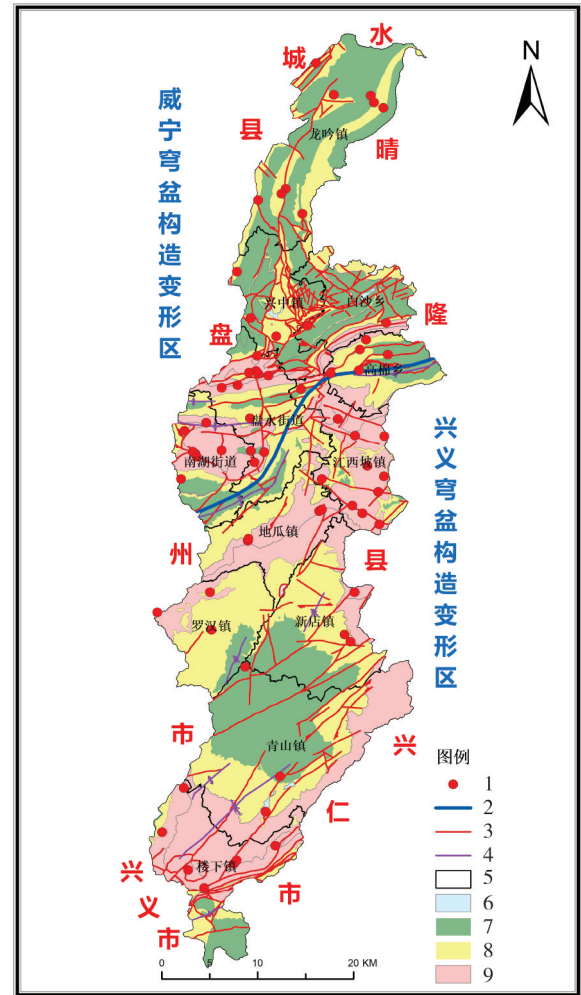


图1 普安县地质构造、工程岩组与滑坡地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of geological structure, engineering rock association and landslide geological disaster in Pu'an county

1—滑坡;2—构造单元分界线;3—断层;4—褶皱;5—行政区;6—松散岩组;7—硬质岩;8—软硬相同;9—软质岩

如表1,县域内出露的地层包括泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、第三系和第四系,缺失侏罗系、白垩系地层,其中二叠系、三叠系地层分布最广。根据岩石的力学性质、岩性及组合关系,将地层划分为硬质岩类、软硬相间、软质岩类及松散岩类四大工程岩组。

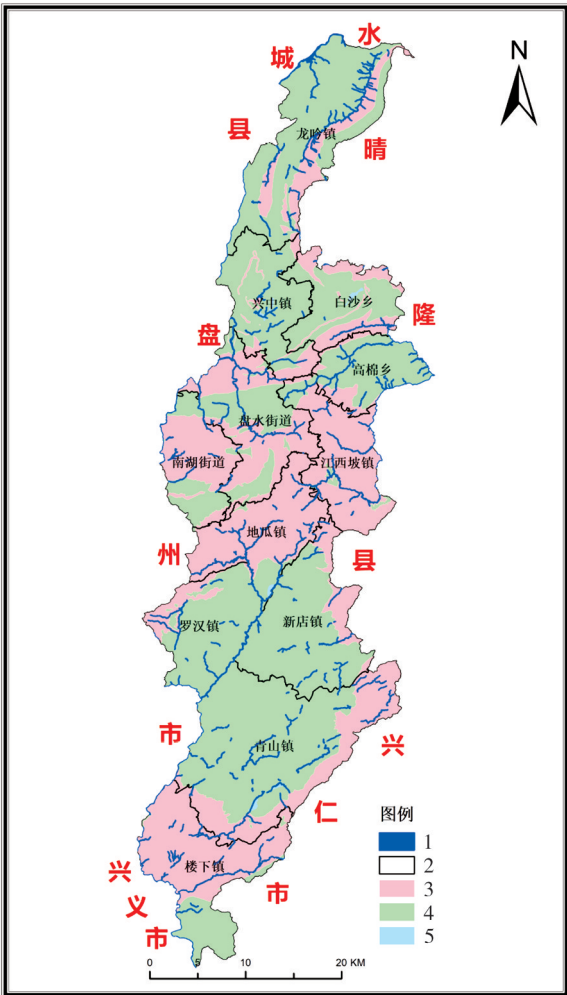


图2 普安县水文地质条件图

Fig. 2 Hydrogeology conditions of Pu'an county

1—河流;2—行政区;3—基岩裂隙水;4—碳酸盐岩类岩溶水;5—第四系松散岩类孔隙水

表1 普安县工程地质岩组分类表

Table 1 Classification of engineering rock association in Pu'an county

工程地质岩组	地层代号	主要岩性	岩土工程地质特征
硬质岩类	T_2g 、 P_2q-m 、 C_3mp 、 C_2h 、 C_1b	中厚—厚层状石灰岩、白云岩、白云质灰岩。	岩溶发育,岩石力学强度高。在坡度大、地形陡、裂隙发育的地段,崩塌较为发育。
软硬相间岩类	T_1yn 、 P_3em 、 C_1s 、 C_1sz 、 C_1z 、 D_3d 、 D_3x 、 D_2h 、 D_1l	薄—中厚层状石灰岩、白云岩夹砂岩、泥岩、页岩。	岩石力学强度较高,岩性分布不均,有软弱夹层的存在,地形坡度较陡且为顺向坡的地段,多发生顺层滑坡。

续表			
工程地质岩组	地层代号	主要岩性	岩土工程地质特征
软质岩类	E、T ₁ f、P ₃ l、P ₂ l	薄—中厚层状泥岩、砂质泥岩、砾岩层和紫红色砂岩、砂岩夹灰岩及煤层。	岩石力学强度较低,力学性质差异较大,易风化,风化深度 1~5 m,局部地区风化层常厚数米至 10 余米,同时松散风化层的边坡稳定性差,易形成滑坡及泥石流。
松散岩类	Q ^{al+dl}	粘土、砂质粘土与砾石层。	岩层具有一定的可塑性,抗压强度低,工程地质条件较差,常造成地基沉降与边坡不稳定等现象,易形成滑坡及泥石流。

如图 2,县境内有大小河流 46 条,河网密度 0.36 km/km²。以中部乌蒙山脉中段长冲梁子分水岭为界,两侧地表水及地下水分别向南、北方向汇入南盘江和北盘江。根据区内的地层岩性、含水介质及地下水动力条件,区内地下水类型可分为碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水和第四系松散岩类孔隙水三类。

3 研究方法

3.1 数据采集

本次研究所采集的数据包括地质数据、地理数据以及滑坡灾害点统计数据三大类。其中,地质数据与滑坡灾害点统计数据主要来源为:(1)ALOS DEM 12.5 m 分辨率的 DEM 数据,用于地形地貌、地表水系等信息的提取;(2)普安县 1:20 万地质构造图,用于提取地层、构造断层等信息;(3)野外调查资料及贵州省地质矿产勘查开发局 106 地质大队调查的地质灾害点资料等。

3.2 数据处理与评价单元划分

本次采用网格单元进行滑坡灾害易发性评价。以收集的资料为依托,结合图元矢量化成果,采用 ArcGIS 软件绘制与滑坡相关的评价指标图。考虑到普安县整体地形起伏较大,为了使研究结果更贴合实际,在预处理过程中所有图元网格划分均以 DEM 数据为准,网格单元大小为 10×10 m,共划分了 14536110 个网格单元。

3.3 层次分析法

(1)构建各层因子之间的重要性判断矩阵
对每层的因子,按照 1-9 标度值对因子重要性进行赋值,1 代表重要性最小,9 代表重要性最

大,构造判断矩阵如下式:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

(1)

式中,A 为判断矩阵; a_{ij} 表示因子 i 对于因子 j 的相对重要程度,当 $i=j$ 时, $a_{ij}=1$ 。

(2)计算判断矩阵的特征根及特征向量

1)对判断矩阵 A 按列进行归一化处理:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(2)

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \cdots & \bar{a}_{1j} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \cdots & \bar{a}_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{i1} & \bar{a}_{i2} & \cdots & \bar{a}_{ij} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(3)

2)对归一化后的矩阵 $\bar{A}$ 按行进行求和:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(4)

$$W = \begin{bmatrix} \bar{W}_1 \\ \bar{W}_2 \\ \vdots \\ \bar{W}_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(5)

3)对按行求和矩阵 W 进行归一化处理:

$$\bar{w}_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(6)

$$w = \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \vdots \\ \bar{w}_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(7)

4)计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{(Aw)_i}{w_i}$$

(8)

式中, n 为所构建的判断矩阵中的因子数。

(3) 一致性检验

采用一致性比率 CR 描述矩阵的一致性,并分析其一致性是否在可接受范围内。

1) 计算一致性指标 CI ;

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$

(9)

当判断矩阵具有完全一致性时, $CI=0$, $\lambda_{\max}$ 越大, CI 越大,矩阵一致性越差。

2) 计算一致性比率 CR ;

将 CI 与平均一致性指标 RI 进行比较。当 $CR<0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

(10)

4 结果与分析

4.1 评价因子选择

根据区内孕育地质灾害的控制因素,选取地形坡度、构造、地层和河流 4 个指标作为滑坡灾害易发性评价指标:

1) 地形坡度

地形坡度对斜坡应力分布、地表水径流与冲刷、地下水、松散物质堆积以及人类工程活动具有不同程度的影响和控制,是孕育滑坡的重要控制因素。区内滑坡灾害大多分布在地形坡度为 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的地区,其次为坡度处于 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 或 $>45^{\circ}$ 的区域,坡度处于 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 或 $<8^{\circ}$ 的地区滑坡分布较少(表 4)。

表 4 普安县滑坡灾害坡度孕灾条件分区表

Table 4 Slope disaster formation condition partition
table of landslide disaster in Pu'an county

坡度($^{\circ}$)	等级划分			
	25-45	15-25,>45	8-15	<8
分区面积比例 (%)	16.3	33.1	20.4	30.2
滑坡数量(个)	25	24	12	7

2) 构造

区内断层活动在导致基岩中节理裂隙发育,

构成不利于岩体稳定的组合结构面的同时,使得碳酸盐岩地层中岩溶发育,对地下水循环起着控制作用,上述两种情况共同影响着滑坡灾害的发育与发展。区内滑坡大多分布在距断裂构造 300 m 以内的地区,其次为距构造 300~600 m 或据构造 600~900 m 的区域,据构造 >900 m 的地区滑坡地质灾害分布较少(表 5)。

表 5 普安县滑坡灾害构造孕灾条件分区表

Table 5 Structure disaster formation condition partition
table of landslide disaster in Pu'an county

与断层距离 (m)	等级划分			
	<300	300~600	600~900	>900
分区面积比例 (%)	30.6	20.0	13.8	35.6
滑坡数量(个)	30	16	15	7

3) 地层

区内滑坡主要为发育在软质工程地质岩组地层上的土质滑坡,占滑坡总量的 98.5%(表 6)。残坡积土层中岁时含量较高,透水性较强,而下伏软质岩透水性差,在地下水的作用下,二者的接触带形成软弱结构面,构成滑坡的滑带土。

表 6 普安县滑坡灾害地层孕灾条件分区表

Table 6 Stratum disaster formation condition partition
table of landslide disaster in Pu'an county

地层	等级划分			
	P_3l 、 T_1f	T_1jn 、 T_2g 、 P_3em	P_2m 、 C_1b 、 C_1z 、 C_3mp 、 E	其它
分区面积比例 (%)	30.3	39.8	14.2	15.8
滑坡数量(个)	31	21	10	6

4) 河流

研究区内河流 46 条,河谷切割一般较深、河床坡降较大,对河岸斜坡的侧向侵蚀作用强烈。境内滑坡灾害大多分布在距河流 300 m 以内的地区,其次为距河流 300~600 m 或据河流 600~900 m 的区域,据河流 >900 m 的地区滑坡地质灾害分布较少(表 7)。

表 7 普安县滑坡灾害河流孕灾条件分区表

Table 7 River disaster formation condition partition
table of landslide disaster in Pu'an county

与河流距离 (m)	等级划分			
	<300	300~600	600~900	>900
分区面积比例 (%)	23.2	21.1	18.3	37.4
滑坡数量(个)	27	21	14	6

4.2 评价指标体系构建

在总结各个因子对滑坡地质灾害危险性控制作用比例的基础上,确定各因子对滑坡形成作用的综合权重和分值见表8。

表 8 滑坡易发性量化评分标准

Table 8 Quantitative rating scale landslide susceptibility

影响因子	综合权重	等级划分及得分			
		极高易发 (9)	高易发 (7)	中易发 (4)	低易发 (1)
地形坡度	0.28	25-45	15-25, >45	8-15	<8
河流	0.19	<300	300 ~ 600	600 ~ 900	>900
构造	0.19	<300	300 ~ 600	600 ~ 900	>900
地层	0.34	P_3l, Q	T_{1f}, T_{1yn}, T_{2g}	$P_2m, P_2l, P_1ly, C_{1z},$ C_{3mp}, E	其它

4.3 易发性评价结果

采用 ARCGIS 软件按照表 8 确定的因子权重进行加权分析,得到基于间断点分级法形成滑坡易发性分级图,并以相似性、相近性原理为指导,最终得到区内滑坡灾害易发性评价分区结果(表 9 和图 3)。

表 9 普安县滑坡地质灾害易发性分区表

Table 9 Susceptibility partition of landslide geological disaster in Pu'an county

内容	等级划分			
	极高易发	高易发	中易发	低易发
滑坡数量(个)	28	25	8	7
分区面积比例 (%)	14.4	38.3	26.5	20.8

如表 9 和图 3 所示,极高易发区内有滑坡灾害隐患点 28 处,面积 209.7 km²,占全区总面积的 14.4%;高易发区内有滑坡灾害隐患点 25 处,面积 557.1 km²,占全区总面积的 38.3%;中易发区内有滑坡灾害隐患点 8 处,面积 384.7 km²,占全区总面积的 26.5%;低易发区内有滑坡灾害隐患点 7 处,面积 302.1 km²,占全区总面积的 20.8%。

4.4 评价结果对比分析

如图 3 所示,对于普安县域内通过实际调查发现 68 处滑坡灾害点来说,其中绝大多数(超过 75% 以上的滑坡)位于基于层次分析法所得到

的极高易发分区和高易发分区内,说明基于层次分析法的易发性评价结果与实际滑坡分布情况吻合较高。此外,如图3至图7所示,基于层次分析法所得到的极高易发分区和高易发分区能够将县域内绝大多数地形坡度较大(25° 以上)、据构造距离较近(300 m以下)、软质岩类岩组分布集中和据河流距离较近(300 m以下)的区域完全覆盖,说明所得到的滑坡灾害易发分析结果与区内有关滑坡灾害发育规律的宏观认知是相一致的。上述两点均表明,对于山区滑坡地质灾害易发性评价而言,层次分析法是中一种行之有效的方法,具有显著的有效性、实用性与优越性。

5 结果与讨论

5.1 结论

(1) 斜坡坡度对滑坡的形成有明显控制作用, 滑坡多发生在 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的斜坡区。

(2) 地质灾害的分布与区内地质构造有明显的

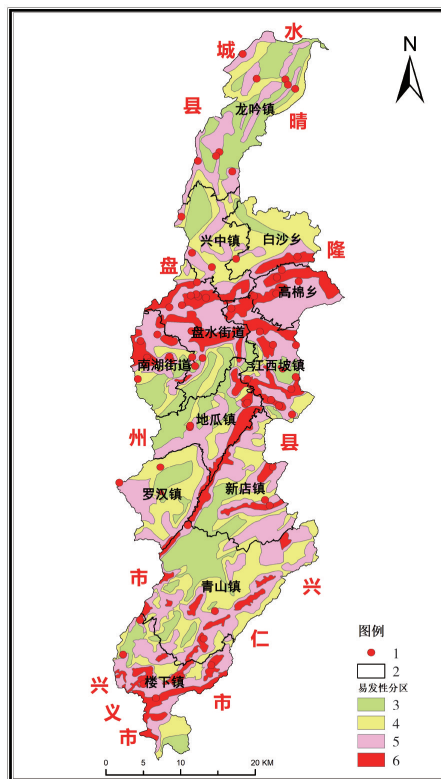


图3 普安县滑坡地质灾害易发分区图

Fig. 3 Prone partition of landslide geological disaster in Pu'an county

1—滑坡;2—行政区;3—低易发性;4—中易发性;5—高易发性;
6—极高易发性



图 4 普安县滑坡地质灾害地形坡度条件分区图

Fig. 4 Slope condition partition of landslide geological disaster in Pu'an county
1—滑坡;2—行政区;3—0~8;4—8~15;
5—15~25;6—25~45;7—45~90

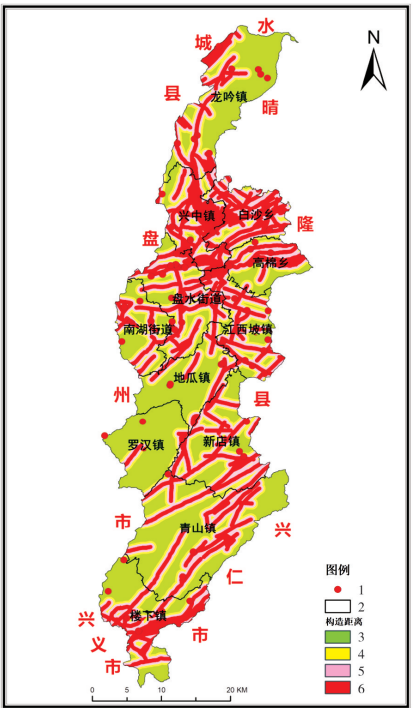


图 5 普安县滑坡地质灾害构造孕灾条件分区图

Fig. 5 Structure disaster formation condition partition map of landslide disaster in Pu'an county
1—滑坡;2—行政区;3—>900 m;4—600~900 m;5—300~600 m;
6—<300 m

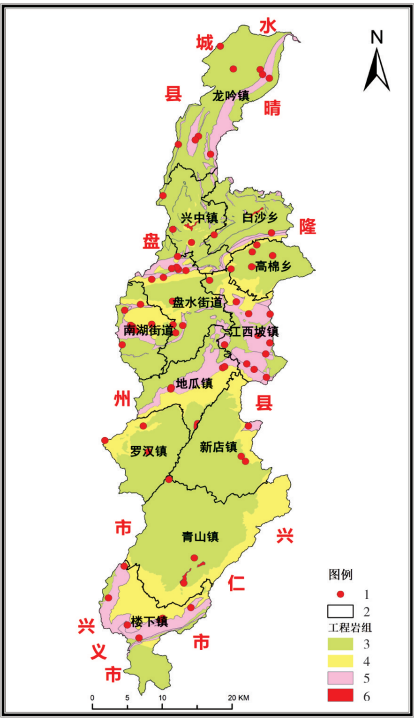


图 6 普安县滑坡地质灾害地层孕灾条件分区图

Fig. 6 Stratum disaster formation condition partition map of landslide disaster in Pu'an county
1—滑坡;2—行政区;3—硬质岩;4—软硬相同;5—软质岩;6—松散岩组

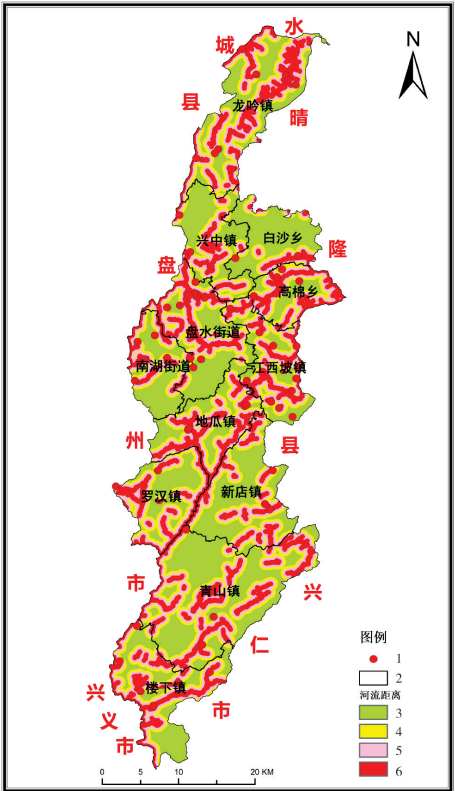


图 7 普安县滑坡地质灾害河流孕灾条件分区图

Fig. 7 River disaster formation condition partition map of landslide disaster in Pu'an county

1—滑坡;2—行政区;3—<300 m;4—300~600 m;5—600~900 m;
6—>900 m

关系,大多分布在地质构造线沿线 300 m 范围内。

(3)85%以上的滑坡地质灾害隐患分布在乌都河、石古河、竹塘河、西泌河、楼下河及泥堡河河谷斜坡地带。

(4)地质灾害与地层岩性的关系较紧密,滑坡地质灾害主要发育于 P_3l 、 T_1f 等软质岩类岩组中。

通过上述比较分析,的出如下结论:

层次分析法对滑坡地质灾害易发性评价图与实地调查结果吻合较好,是山区滑坡地质灾害易发性评价中是一种行之有效的办法。

4.2 讨论

虽然层次分析法在滑坡易发性评价中已取得了较好的应用,但是其评价因子选择与权重确定仍具有较强的主观性,对使用者提出了较高的要求。因此,在实际使用过程中,必须在认真斟酌后方可确定相关的评价因子与权值,从而避免得到错误的易发性评价结果。

[参考文献]

杜国梁,张永双,高金川,等. 2016. 基于 GIS 的白龙江流域甘肃段

滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报,22(01):1-11.

郭子正,殷坤龙,黄发明,等. 2019. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,38(02):287-300.

黄发明,殷坤龙,蒋水华,等. 2018. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,37(01):156-167.

任敬,范宣梅,赵程,等. 2018. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. 水文地质工程地质,45(05):165-172.

申怀飞,董雨,杨梅,等. 2021. 基于 AHP 与信息量法的甘肃省滑坡易发性评估[J]. 水土保持研究,28(06):412-419.

王进,郭靖,王卫东,等. 2012. 权重线性组合与逻辑回归模型在滑坡易发性区划中的应用与比较[J]. 中南大学学报:自然科学版,43(5):1932-1939.

徐为,李铁锋,胡瑞林,等. 2011. 基于 GIS 的哀牢山戛洒镇小流域滑坡易发性评价[J]. 水文地质工程地质,38(05):110-114+119.

许冲,戴福初,姚鑫,等. 2009. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报,28(S2):3978-3985.

许嘉慧,孙德亮,王月,等. 2020. 基于 GIS 与改进层次分析法的奉节县滑坡易发性区划[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),37(02):36-44+2+142.

殷坤龙,朱良峰. 2001. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘,8(2):279-284.

于晓辉,林玲玲,李静,等. 2010. 基于 GIS 的中秦岭地区滑坡灾害易发性研究[J]. 防灾科技学院学报,12(04):104-111.

Analytical Hierarchy Process in Susceptibility Assessment of Landslide Hazards

—A Case Study in the Pu'an County, Guizhou Province

LU Zhi-qiang¹, LENG Yang-yang², ZHAO Gang³

(Guizhou G&M Engineering Construction Co., LTD, Guiyang 550081, Guizhou, China;

2. Guizhou Institute of Geo-Environment Monitoring, Guiyang 550081, Guizhou, China;

3. 106 Geological Party, Guizhou Bureau of Geological and Mineral Exploration and
Development, Zunyi 563000, Guizhou, China)

[Abstract] The reasonable selection of assessment methods is the key to obtaining the correct susceptibility mapping results of landslide geological hazards. In this paper, it taken Pu'an County of Qianxinan Prefecture in Guizhou Province as an example, based on the analysis of the impact of stratum lithologies, landforms, geological structures, and hydrogeological conditions on landslide hazards in the area, the Analytical hierarchy process is used to establish the evaluation index system of landslide disaster susceptibility. The practical application is carried out accordingly. The assessment results showed that the area's susceptibility mapping of landslide hazards is divided into four levels, which agrees with the actual landslide hazard developments. It proves the effectiveness and practicability of the Analytical hierarchy process in the susceptibility assessment of landslide geological hazards in the mountain areas.

[Key Words] Landslide hazards in the eastern Guizhou; Susceptibility assessment; Analytical hierarchy process; ARCGIS; Inducing factors; Guizhou