

文章编号: 2096-1618(2021)01-0118-11

南充市滑坡灾害易发性区划与评价

何强¹, 王增武¹, 卢德全², 周耀鑫¹

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 南充市气象局, 四川 南充 637000)

摘要: 选用高程、坡度、降水量、河流影响距、道路影响距、人口密度分布、归一化植被指数、岩性、土壤类型和土地利用类型作为南充市滑坡灾害易发性区划评价因子, 并结合 85% 的历史滑坡灾害数据, 采用确定性系数模型对评价因子进行量化和权重确定; 构建二元逻辑回归模型对评价因子的贡献度进行评价以及对南充市潜在滑坡灾害发生概率进行空间预测; 逻辑回归分析结果表明, 土地利用类型、6-9 月降水量、归一化植被指数、土壤类型、岩性、道路影响距、人口密度分布和坡度是南充市滑坡灾害的主要影响因素, 其中, 6-9 月降水量对滑坡灾害易发性概率值影响最大, 其次为土地利用类型, 再次为坡度, 归一化植被指数评价因子对滑坡灾害易发性概率值影响最小; 根据南充市潜在滑坡灾害发生概率值大小, 采用自然断点法, 将南充市滑坡灾害分为低滑坡灾害易发区、较低滑坡易发区、中滑坡易发区、较高滑坡易发区和高滑坡易发区, 区划结果表明, 南充市滑坡灾害高易发区分布于仪陇县全境、营山县东部、蓬安县东南部、阆中市东北部地区和顺庆区南部地区; 利用 15% 的历史滑坡灾害数据对区划结果进行验证, 验证数据与南充市易发性区划结果吻合度较高, 说明南充市滑坡易发性区划结果可信。

关键词: 滑坡灾害; 评价因子; 确定性系数; 逻辑回归; 易发性

中图分类号: X43

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2021.01.018

0 引言

滑坡、崩塌和泥石流作为西南地区主要地质灾害, 严重制约了当地经济的可持续发展。尤其在 2008 年汶川地震之后, 坡体稳定性遭到破坏, 导致滑坡灾害的规模和频数显著增加, 南充市境内地质灾害发生频率也因此增加。据资料统计, 2008-2019 年, 南充市共发生滑坡灾害 1567 起, 占地质灾害总数的 94%, 崩塌灾害 98 起。滑坡主要发生在地震或强降水后的丘陵地区, 已经成为世界范围内的最主要地质灾害类型^[1]。因此, 确定南充市滑坡灾害易发性风险, 规避滑坡灾害, 对减少人员伤亡和经济损失有重要意义。

滑坡灾害易发性区划研究通常采用两种方式。一种是基于测绘学和地质工程学, 研究坡体的岩土类型及稳定性, 对坡体位移进行实时监测^[2]。这种方式准确度高, 对重点坡体滑坡可以有效防范, 但人力、物力投入较大, 无法在大范围研究区域实施。第二种是对滑坡的成灾机理和影响因子进行研究, 采用统计学方法, 再结合历史灾害信息, 建立有效的统计模型, 继而对研究区域的滑坡易发性概率进行宏观评价, 是一种适用于大范围区域防范滑坡灾害的措施, 但这种方法在滑坡评价因子的确定、以及评价因子的权重定量确定方面是难点^[3-4]。

文中采用确定性系数模型对滑坡灾害的评价因子进行定量分析, 研究各个评价因子对南充市滑坡灾害的影响程度, 通过建立逻辑回归模型, 确定不同的评价因子对历史滑坡灾害的贡献度, 对研究区滑坡灾害进行空间预测, 进而对南充市滑坡灾害易发性进行区划。

1 数据与方法

1.1 数据源

数据源包括南充市数字高程模型 (DEM)、夜光遥感数据、归一化植被指数、土壤类型和土地利用类型栅格数据, 历史滑坡灾害个例和降水文本类型数据, 以及河流、道路、岩性和地州界矢量数据 (表 1)。

1.2 研究方法

选用确定性系数模型对南充市滑坡灾害的评价因子的量化和不同分级区间的权重确定, 确定性系数模型 (CF) 是用来分析某一个事件发生的概率, 该模型由 Buchanan 和 Shortliffe 共同建立, Heckerman^[5-6] 在前者的基础上进行了模型优化。表达式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{pp_1 - pp_z}{pp_1(1 - pp_z)} & (pp_1 > pp_z) \\ \frac{pp_1 - pp_z}{pp_z(1 - pp_1)} & (pp_1 < pp_z) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 论文数据整理

数据名称	类型	年份	来源
南充高程	栅格	2009	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
南充坡度	栅格	2009	由高程提取
夜光遥感数据	栅格	2010–2013	VIIRS 夜光遥感数据
归一化植被指数	栅格	2013–2019	资源环境云平台 (http://www.resdc.cn/)
土壤类型	栅格	2015	资源环境云平台 (http://www.resdc.cn/)
土地利用类型	栅格	2015	资源环境云平台 (http://www.resdc.cn/)
南充历史灾害点	文本	2008–2019	四川省地质环境监测总站
南充市降水	文本	2008–2019	南充市气象局
南充河流	矢量		中国 1 : 100 万数据
南充道路	矢量		中国 1 : 100 万数据
地质岩性	矢量	1981	四川省环境科学研究院
南充市地州界	矢量		中国 1 : 100 万数据

式中 pp_1 是事件发生的条件概率,文中为某一评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值^[7](取每个滑坡面积为1000 m²); pp_2 是事件发生的先验概率,文中为整个研究区滑坡面积和研究区面积的比值; CF 是确定性系数,是指滑坡发生的概率。确定性系数 CF 的取值范围是 $[-1,1]$ 。当 CF 为正时,代表滑坡发生的概率确定性增长;当 CF 为负时,代表滑坡发生的概率确定性降低;当 CF 为 1 时,表示一定发生滑坡;当 CF 为-1 时,表示一定不会发生滑坡。采用等值划分的原则^[7],将评价因子确定性系数 CF 按照 $[-1,-0.6]$ 权值为 1, $[-0.6,-0.2]$ 权值为 2, $[-0.2,0.2]$ 权值为 3, $[0.2,0.6]$ 权值为 4 和 $[0.6,1]$ 权值为 5 进行权重划分。

国内外相关研究表明,逻辑回归模型可以解决地质灾害易发性区划中没有考虑评价因子之间相互依赖的问题^[8-9]。在南充市滑坡灾害易发性评价因子量化和不同分级区间权重确定的基础上,对各个评价因子的贡献度建立二项逻辑回归模型:

$$Z = P(Y = 1 | X_1 = x_1, \cdots, X_{10} = x_{10})$$
$$= \frac{\exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_{10} x_{10})}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_{10} x_{10})} \tag{2}$$

$$T = \frac{Z}{1 - Z} = \exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_{10} x_{10}) \tag{3}$$

$$\text{logit}(P) = \ln\left(\frac{Z}{1 - Z}\right) = \alpha + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_{10} x_{10} \tag{4}$$

其中: Z 为滑坡灾害发生的概率; Y 为是否发生滑坡灾害; $X_1 \sim X_{10}$ 为滑坡灾害的易发性评价因子; α 为回归截距; β 为回归系数; T 为滑坡灾害发生的优势比。

2 滑坡易发性评价因子的选取与分析

基于国内外滑坡灾害评价因子选取的相关研究成果^[10-16],结合研究区实际情况,选用高程、坡度、6-9 月降水、河流影响距、道路影响距、人口密度分布、归一化植被指数、地质岩性、土壤类型和土地利用类型作为滑坡灾害易发性评价因子。根据各个滑坡灾害评价因子的数值大小或者表征的类型不同,将评价因子分为

不同等级,并结合历史滑坡灾害点进行叠加分析,统计不同等级所占的面积和历史滑坡数量,应用确定性系数模型确定不同分级区间的权重等级。

2.1 6-9 月降水量

滑坡灾害最重要的诱发因素是降雨量,降雨量会直接导致坡体失稳,从而引发滑坡灾害。由于研究区雨季集中在每年 6-9 月,因此在此期间极易发生滑坡灾害。通过对南充市 2008-2019 年期间降水数据进行处理,南充市 6-9 月总降水量的年平均值在 356 ~ 715 mm。将南充市 6-9 月总降水量以 50 mm 的降水量差异等值划分为 8 个等级(图 1),各级降水区间权重等级如表 2 所示。

由图 1 和表 2 分析可知:南部县全境、西充县全境和顺庆区全境的 6-9 月总降水量普遍偏低,降水量最小值区域出现在南部县西部地区和顺庆区中部地区,降水量小于 450 mm,该地区发生的滑坡灾害数量较少;仪陇县全县境内的 6-9 月总降水量普遍较大,总降水量最高值区域位于仪陇县东北部,降水量在 650 mm 以上,该地区发生的滑坡灾害数量较多;仪陇县全县境、阆中市东北部地区的权重等级较高,较易发生滑坡灾害。

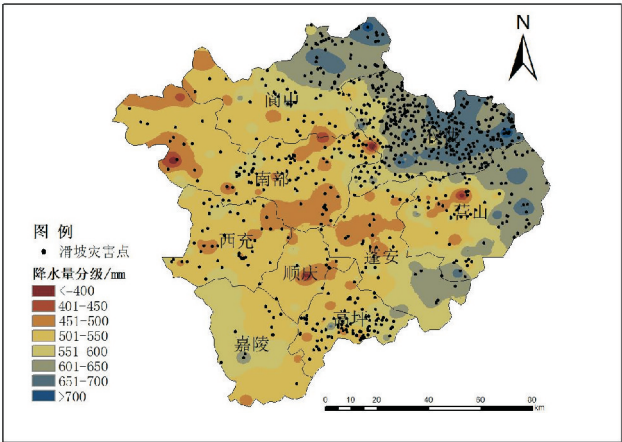


图 1 南充市 6-9 月降水量分级与滑坡灾害点分布

表 2 6-9 月降水量评价因子权重等级分析

降水量分级/mm	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
≤400	14.38	2	0.14	0.21	4
401~450	78.30	3	0.04	-0.64	1
451~500	1338.29	110	0.08	-0.27	2
501~550	5479.04	344	0.06	-0.45	2
551~600	2607.18	197	0.08	-0.27	2
601~650	2123.62	413	0.19	0.42	4
651~700	796.18	232	0.29	0.62	5
>700	27.04	21	0.78	0.76	5

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即降水量评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.2 土壤类型

由于土壤类型的不同,土壤的含水量和黏性等特性也有差异,因此受灾体与不同土壤类型地表的摩擦程度差异明显。南充市共有 10 种土壤类型,其地理分布如图 2 所示,不同土壤类型的权重等级如表 3 所示。由图 2 和图 3 分析可知:在南充市的土壤类型中,紫色土面积约为 9345 km²,水稻土的面积约为 2479 km²,这两种土壤类型广泛分布在研究区域内,是南充市最主要的土壤类型;另外,大于 84% 的历史滑坡灾害发生土壤类型为紫色土的区域,说明紫色土是南充市滑坡灾害主要的受灾土壤类型;石灰性紫色土、淹育水稻土、湖泊没有发生过历史滑坡灾害,说明这 3 种土壤类型不易发生滑坡灾害;土壤类型为黄壤

和漂洗黄壤权重等级较高更易发生滑坡灾害;南部县东北部地区和蓬安县中北部地区有黄壤和漂洗黄壤分布,这类区域较易发生滑坡灾害。

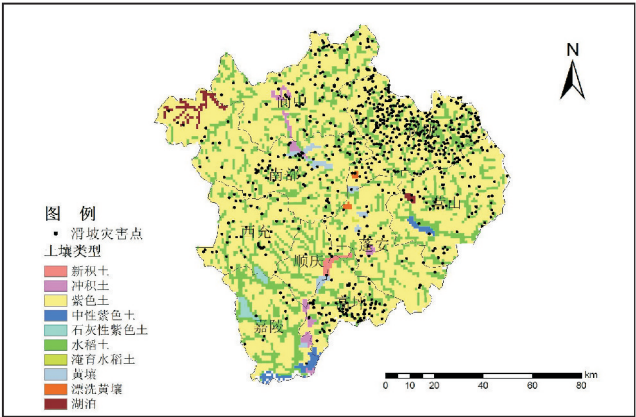


图 2 南充市土壤类型与滑坡灾害点分布

表 3 土壤类型评价因子权重等级分析

土壤类型分级	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
石灰性紫色土	61.44	0	0.00	-1.00	1
淹育水稻土	3.06	0	0.00	-1.00	1
湖泊	89.22	0	0.00	-1.00	1
中性紫色土	100.50	1	0.01	-0.91	1
冲积土	117.36	5	0.04	-0.64	1
新积土	41.10	4	0.10	-0.09	3
紫色土	9344.96	1021	0.11	0.00	3
水稻土	2479.12	272	0.11	0.00	3
黄壤	108.01	15	0.14	0.21	4
漂洗黄壤	14.59	4	0.27	0.59	4

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即土壤类型评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.3 人口密度分布

近年来,由于城市扩张、资源开采等人类活动导致滑坡灾害发生的消息屡见不鲜,因此,文中将人口密度分布也加入到滑坡灾害易发性区划的评价因子集中,以对人口密度分布对滑坡灾害的影响进行具体研究。夜光指数可以反映居民聚集情况和人类活动情况,文

中采用夜间灯光遥感数据来量化人口密度分布,选取 stable_light 类型的 2010-2013 年美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的 VIIRS 传感器夜光遥感年平均数据(该类型值为夜光观测浮点辐射值的整数计数),通过栅格计算得到 4 年的平均夜光数据,并对计算结果进行分级,分级区间为:0、1~15、16~30、31~45、46~60,南充市夜光分布情况如图 3 所示。不同人口密度

分级区间的权重分析如表 4 所示。

由图 3 和表 4 分析可知:南充市在顺庆区、高坪区和嘉陵区交界处的夜光值最高,人口密度分布最密集;在阆中市的中北部、南部县中北部、仪陇县西南部、西充县中南部、营山县西南部和蓬安县中部地区人口密度较为密集,通过对比南充市行政区划数据,夜光值较高的地区也是南充市市区和区县县城的所在地;南充市约有10154 km²的区域没有夜光值,说明这些地区人口分布较少,同时,该分级区域分布了大于 79% 的历史滑坡灾害点;南充市市区和区县县城的所在地的夜光值多在 46 ~ 60,此类地区发生滑坡灾害的权重等级较高,较易发生滑坡灾害。

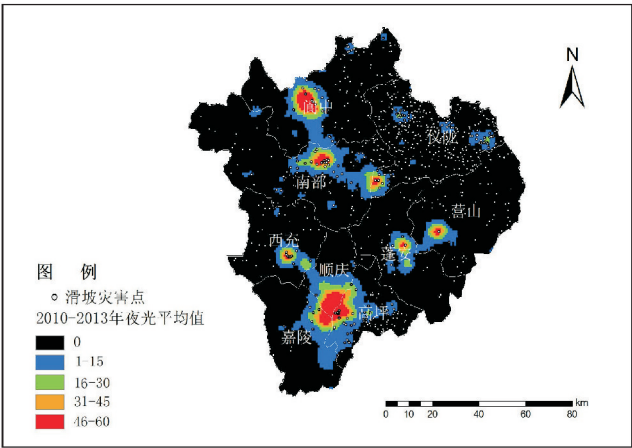


图 3 南充市夜光与滑坡灾害点分布

表 4 人口密度分布评价因子权重等级分析

人口密度分级	分级面积/km ²	滑坡数量	PP_1	确定性系数	权重等级
0	10153.92	1047	0.10	-0.09	3
1 ~ 15	1566.17	203	0.13	0.15	3
16 ~ 30	352.92	40	0.11	0.00	3
31 ~ 45	178.69	12	0.07	-0.36	2
46 ~ 60	210.40	30	0.14	0.21	4

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即人口密度分布评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.4 归一化植被指数

植被覆盖情况能反应研究区域的生态情况,归一化植被指数(NDVI)是衡量植被覆盖情况的重要指标,滑坡灾害发生的根本原因是地表水下渗,导致坡体不稳定,从而引起滑坡。在植被覆盖较为茂密的地方,植被可以有效减少地表水的下渗,植被的根须也可以巩固坡体,使坡体稳定性提高。因此,将 NDVI 作为研究南充市滑坡灾害易发性区划的评价因子之一,将 NDVI 年均值进行分级:0.55 及以下、0.56 ~ 0.70、0.71 ~ 0.75、0.76 ~ 0.80、0.80 以上 5 个区间(图 4),不同 NDVI 分级区间的权重等级分析如表 5 所示。

由图 4 和表 5 分析可知:南充市整体植被覆盖良好,只有202 km²的面积归一化植被指数在0.55以下;南充市约有11160 km²的区域归一化植被指数在0.71 以上;有493 km²的面积归一化植被指数在0.8以上,主要

分布在仪陇县东南部和营山县东北部地区;通过对比南充市河流数据可知,归一化植被指数在0.70以下的区域呈线状分布,与嘉陵江的走向重合,并且,此类地区发生滑坡灾害的权重等级较高,较易发生滑坡灾害。

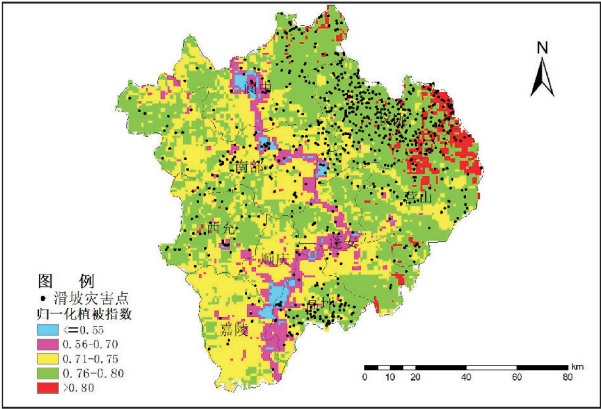


图 4 南充市归一化植被指数与滑坡灾害点分布

表 5 归一化植被指数评价因子权重等级分析

归一化植被指数分级	分级面积/km ²	滑坡数量	PP_1	确定性系数	权重等级
≤0.55	201.69	102	0.51	0.78	5
0.56 ~ 0.70	976.48	325	0.33	0.67	4
0.71 ~ 0.75	4544.91	84	0.02	-0.82	1
0.76 ~ 0.80	6120.88	785	0.13	0.15	3
>0.80	493.07	26	0.05	-0.55	2

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即归一化植被指数评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.5 土地利用类型

不同土地利用类型的土壤稳定性有所差异,会影响滑坡灾害发生的概率。根据 IGBP 分类标准将南充市土地利用情况分为 16 类(图 5),不同土地利用类型的权重等级分析如表 6 所示。

由图 5 和表 6 分析可知:南充市共有 16 种土地利用类型,分别为灌木林、低度覆盖草地、湖泊、裸岩石质地、其他林地、有林地、中度覆盖草地、农村居名点、旱地、其他建设用地、水田、疏林地、河渠、滩地、城镇用地、水库坑塘;旱地和水田分别有 7280 km² 和 3355 km²,是南充市最主要的土地利用类型,并且超过 85% 的历史滑坡灾害发生在这两种土地类型,说明南充市滑坡灾害主要的受灾土地利用类型为旱地和水田;土地利用类型为灌木林、低度覆盖草地、湖泊、裸岩石质地的区域没有发生过滑坡灾害,说明这些土地利

用类型区域不易发生滑坡灾害;土地利用类型为河渠、滩地、城镇用地和水库坑塘多分布在顺庆区和嘉陵区交界处、阆中市的中北部、南部县中北部、蓬安县中部地区,这些地区的滑坡灾害权重等级较高,较易发生滑坡灾害。

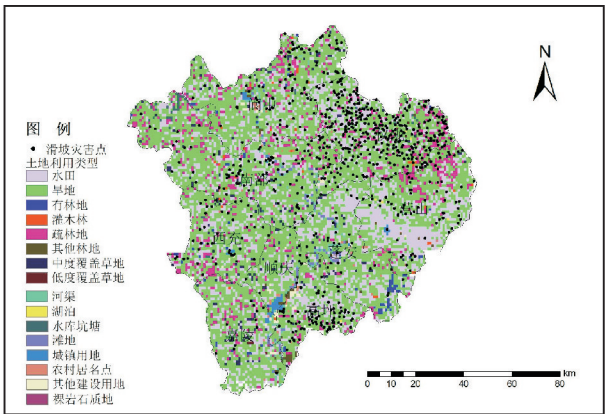


图 5 南充市土地利用类型与历史灾害点分布

表 6 土地利用类型评价因子权重等级分析

土地利用类型分级	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
灌木林	35.30	0	0.00	-1.00	1
低度覆盖草地	5.79	0	0.00	-1.00	1
湖泊	4.70	0	0.00	-1.00	1
裸岩石质地	5.13	0	0.00	-1.00	1
其他林地	56.73	1	0.02	-0.82	1
有林地	73.16	3	0.04	-0.64	1
中度覆盖草地	178.69	7	0.04	-0.64	1
农村居名点	51.56	2	0.04	-0.64	1
旱地	7279.63	757	0.10	-0.09	3
其他建设用地	59.34	6	0.10	-0.09	3
水田	3354.53	373	0.11	0.00	3
疏林地	947.55	124	0.13	0.15	3
河渠	114.40	17	0.15	0.27	4
滩地	68.54	10	0.15	0.27	4
城镇用地	60.12	10	0.17	0.35	4
水库坑塘	55.88	13	0.23	0.52	4

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即土地利用类型评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.6 岩性

岩性是指表层土壤以下的岩石或者岩层的类型。抗风化能力较低的岩土体稳定性也比较低,因此将岩

性作为南充市滑坡灾害易发性区划的评价因子之一。南充市岩性类型为洪积砂砾层、含砾黏土层、砾岩夹板岩、片麻岩和火山碎板岩(见图 6),不同岩性类型的权重等级分析如表 7 所示。

由图 6 和表 7 分析可知:南充市有洪积砂砾层、含砾黏土层、砾岩夹板岩、片麻岩和火山碎板岩 5 种岩性类型,其中片麻岩在南充市分布最广,约有10698 km²,超过 90% 的历史滑坡灾害发生在岩性为片麻岩区域内,说明南充市滑坡灾害的主要受灾岩性类型是片麻岩;含砾夹板岩分布面积约为40 km²,只在阆中市南部地区有少量分布;营山县中部、高坪区中部、蓬安县东南部、顺庆区中部和嘉陵区南部地区的岩性多是火山碎板岩,发生滑坡灾害的权重等级较低,不易发生滑坡灾害。

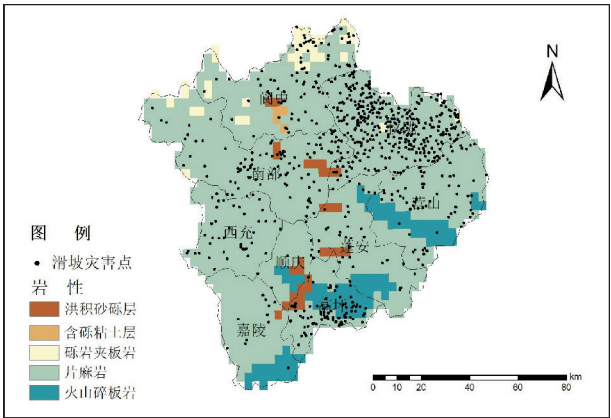


图 6 南充市岩性与历史灾害点分布

表 7 岩性评价因子权重等级分析

岩性分级	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
火山碎板岩	1074.61	48	0.04	-0.64	1
洪积砂砾层	284.56	24	0.08	-0.27	2
含砾黏土层	39.89	3	0.08	-0.27	2
片麻岩	10697.70	1205	0.11	0.00	3
砾岩夹板岩	331.64	42	0.13	0.15	3

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即岩性评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.7 坡度

坡度是地表上的某一个点的水平面和切面的夹角,即倾斜程度,物体与接触面的倾斜程度是判断物体是否稳定的重要因素。重力作用是引发滑坡的重要原因,相比于平地,坡度越大,坡体重力作用越明显,坡体稳定性更低。文中采用等值划分原则将坡度划分为:0°~5.0°、5.1°~10.0°、10.1°~20.0°、20.1°~30.0°、30.0°以上 5 个区间(图 7),不同坡度等级的权重等级分析如表 8 所示。

由图 7 和表 8 分析可知:南充市绝大部分区域的坡度在 20°以下,面积约为11663 km²;南部县西北部和东北部、阆中市西北部和东北的、仪陇县全境、营山县中部

和北部部分地区的坡度较高,坡度在20°以上,这类区域发生滑坡灾害的权重等级较高,较易发生滑坡。

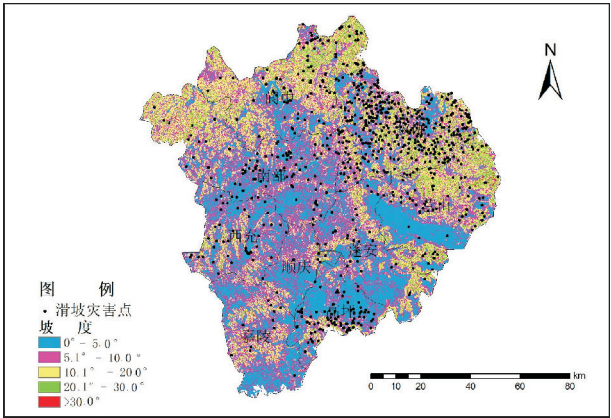


图 7 南充市坡度与历史灾害点分布

表 8 坡度评价因子权重等级分析

坡度分级/(°)	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
0~5.0	5077.14	343	0.07	-0.36	2
5.1~10.0	3241.13	415	0.13	0.15	3
10.1~20.0	3344.83	423	0.13	0.15	3
20.1~30.0	667.24	142	0.21	0.48	4
>30.0	27.06	9	0.33	0.67	5

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即坡度评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.8 道路影响距

南充市属于丘陵地形,在道路建设过程中,开挖道路边坡坡体和修筑隧道会破坏坡体稳定性,从而引发滑坡灾害。对南充市的县道、省道和国道数据按照500 m的梯度,作0~5000 m的南充市道路缓冲区(图8),不同道路影响距分级区间权重等级分析如表9所示。

有图8和表9分析可知:南充市的交通情况良好,路网较为密集;顺庆区南部和蓬安县西北部的道路覆盖最密集;道路对南充市滑坡会造成一定的影响,离道路越近的区域,权重等级越高,越易发生滑坡灾害。

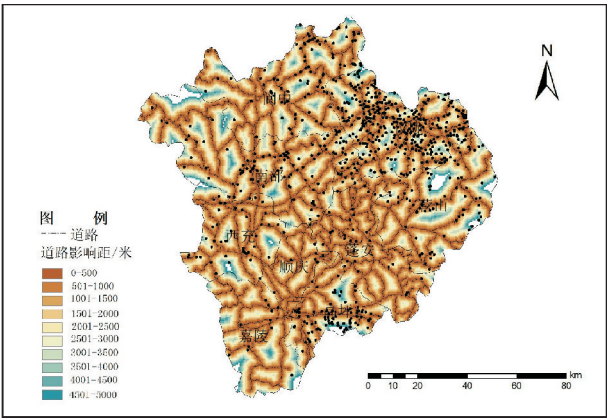


图8 南充市道路影响距与历史灾害点分布

表9 道路影响距评价因子权重等级分析

道路影响距分级/m	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
0~500	3049.45	416	0.14	0.21	4
501~1000	2434.09	278	0.11	0.00	3
1001~1500	1975.06	208	0.11	0.00	3
1501~2000	1558.03	117	0.08	-0.27	2
2001~2500	1187.81	92	0.08	-0.27	2
2501~3000	852.21	53	0.06	-0.45	2
3001~3500	560.91	74	0.13	0.15	3
3501~4000	351.40	20	0.06	-0.45	2
4001~4500	218.57	41	0.19	0.42	4
4501~5000	120.59	10	0.08	-0.27	2

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即道路影响距评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.9 高程

将高程作为滑坡灾害的评价因子之一,研究高程与滑坡灾害之间的关系。采用等值划分原则以100 m的高度差为标准对高程进行分级,将南充市高程分为300 m及以下、300~400 m、400~500 m、500~600 m、600 m以上6个区域(图9),不同高程分级区间权重等级分析如表10所示。

由图9和表10分析可知:南充市高程总体趋势呈现为由东部和北部向西部和南部递减,阆中市东北部、南部县北部、仪陇县全境以及营山县北部的海拔较高,中部和南部的地势较为平缓;南充市绝大部分区域的高程在300~400 m;高程在300 m以下和600 m以上两个区间的权值都为3,在300~500 m的权值为2,权重

系数没有随高程的变化发生较大变化,说明高程对于南充市滑坡灾害影响较小。

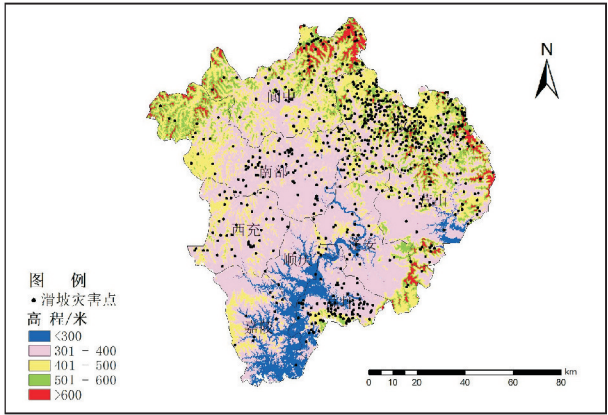


图9 南充市高程分级与历史灾害点分布

表10 高程评价因子权重等级分析

高程分级/m	分级面积/km ²	滑坡数量	pp_1	确定性系数	权重等级
≤300	904.00	92	0.10	-0.09	3
301~400	6461.35	433	0.07	-0.36	2
401~500	3400.30	218	0.06	-0.45	2
501~600	1175.55	539	0.46	0.76	5
>600	422.48	50	0.12	0.08	3

注: pp_1 是滑坡发生的条件概率,即高程评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

2.10 水系影响距

水系邻近坡体在搬运、侵蚀和堆积的作用下,其稳定性会降低,将水系影响距作为南充市滑坡灾害易发性的评价因子之一。根据南充市河流分布情况,在 0 ~ 5000 m 的河流影响距中,以梯度为 500 m 做缓冲区分析(图 10),不同水系影响距分级区间权重等级分析如表 11 所示。

有图 10 和表 11 分析可知:南充市水系较为发达,超过 86% 的区域的水系影响距在 5000 m 之内;在河流影响距 5000 m 之内共有 1137 个滑坡灾害点,占南充市滑坡灾害发生总数的 85%;不同水系影响距通过确定性系数计算的权重值没有太大差异,说明水系影响距

对于南充市滑坡灾害影响较小。

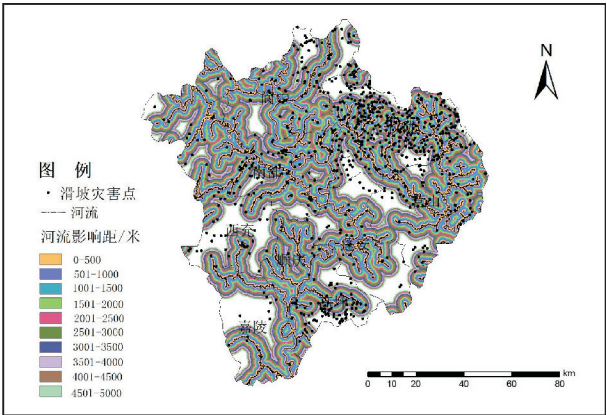


图 10 南充市水系影响距与历史灾害点分布

表 11 水系影响距评价因子权重分析

水系影响距分级/m	分级面积/km ²	滑坡数量	pp ₁	确定性系数	权重等级
0 ~ 500	2013.22	208	0.10	-0.10	3
501 ~ 1000	1571.43	154	0.10	-0.10	3
1001 ~ 1500	1373.28	147	0.11	0.00	3
1501 ~ 2000	1198.81	113	0.09	-0.20	3
2001 ~ 2500	1042.60	85	0.08	-0.30	2
2501 ~ 3000	905.85	115	0.13	0.17	3
3001 ~ 3500	796.28	116	0.15	0.30	4
3501 ~ 4000	698.82	86	0.12	0.09	3
4001 ~ 4500	596.63	69	0.12	0.09	3
4501 ~ 5000	503.93	44	0.09	-0.20	3

注:pp₁ 是滑坡发生的条件概率,即水系影响距评价因子在分类单元中的滑坡面积和单元面积的比值。

3 滑坡易发性区划与验证

2008-2019 年南充市共发生滑坡灾害 1567 起,采用分离样本法将 85% 的滑坡灾害点(1332 个)作为易发性区划建模数据,剩余的 15% 的滑坡灾害点(235 个)作为检验数据。

3.1 滑坡易发性概率预测

基于南充市滑坡灾害各评价因子评价结果,结合 1332 个建模滑坡灾害点数据,对各滑坡灾害点评价因子权重值进行提取。在没有发生滑坡灾害的区域建立 1332 个未发生滑坡灾害的随机点,并提取出每一个随

机点的评价因子权重,并用 1 来标识历史滑坡点,0 来标识未发生滑坡点,将标识结果导入 SPSS 软件进行二项逻辑回归分析。在二项逻辑回归分析中,将是否发生滑坡灾害设置为因变量,6-9 月降水量、地形高程、水系影响距、土壤类型、人类活动、归一化植被指数、土地利用类型、岩性、坡度、道路影响距评价因子权重设置为自变量。

由瓦尔德检验的显著性概率可知,在显著性概率为 0.05 的检验水准下,高程因子和 水系影响距评价因子未通过显著性检验,其他 8 个评价因子的显著性概率均小于 0.05,具有统计学意义(表 12)。根据上述结果可以建立预测概率回归函数:

$$P = \frac{\exp(-8.816 + 0.591x_1 + 0.657x_2 + 0.232x_3 + 0.088x_4 + 0.204x_5 + 0.625x_6 + 0.316x_7 + 0.295x_8)}{1 + \exp(-8.816 + 0.591x_1 + 0.657x_2 + 0.232x_3 + 0.088x_4 + 0.204x_5 + 0.625x_6 + 0.316x_7 + 0.295x_8)}$$

其中:x₁ 表示土地利用类型评价因子;x₂ 表示土壤类型评价因子;x₃ 表示岩性评价因子;x₄ 表示归一化植被指数评价因子;x₅ 表示道路影响距评价因子;x₆ 表

示人口密度分布评价因子;x₇ 表示 6-9 月降水量评价因子;x₈ 表示坡度评价因子。

表 12 SPSS 逻辑回归模型分析结果

因子类型	回归系数	标准差	瓦尔德	自由度	显著性概率	优势比
土地利用类型	0.591	0.123	22.979	1	0.000	1.806
土壤类型	0.657	0.176	13.905	1	0.000	1.929
岩性	0.232	0.083	7.717	1	0.005	1.261
归一化植被指数	0.088	0.034	6.532	1	0.011	1.092
道路影响距	0.204	0.051	16.069	1	0.000	1.227
人口密度分布	0.625	0.229	7.431	1	0.006	1.869
6-9 月降水量	0.316	0.035	82.084	1	0.000	1.372
坡度	0.295	0.070	17.845	1	0.000	1.343
高程	-	-	-	1	0.552	-
河流	-	-	-	1	0.822	-
常量	-8.816	0.968	83.013	1	0.000	0.000

根据表 12 分析可知:在 10 个滑坡灾害评价因子中,土地利用类型、6-9 月降水量、归一化植被指数、土壤类型、岩性、道路影响距、人口密度分布和坡度是南充市滑坡灾害的主要影响因素;高程和河流影响距并未留在模型中,说明这两个评价因子并不是南充市滑坡灾害的主要影响因素,应剔除;从各评价因子的瓦尔德值可以看出,6-9 月降水量对滑坡灾害易发性概率值影响最大,其次为土地利用类型,再次为坡度,归一化植被指数评价因子对滑坡灾害易发性概率值影响最小。

将回归函数结合评价因子的权重等级进行栅格计算,得到滑坡灾害易发性概率图,结果如图 11 所示。在南充市区域内,滑坡灾害易发性概率最大值为0.929,最小值为0.023;南充市绝大部分地区的滑坡灾害易发性概率值在0.5以下,这些地方不易发生滑坡灾害;南充东北部地区的滑坡灾害易发性概率值较大,特别是阆中市东北部、仪陇县全境和营山县东北部地区,概率值在0.6 以上,较易发生滑坡灾害,应注意重点防范;此外,蓬安县东部和顺庆区南部部分地区的滑坡灾害易发性概率值在0.5以上,也应当注意防范滑坡灾害。

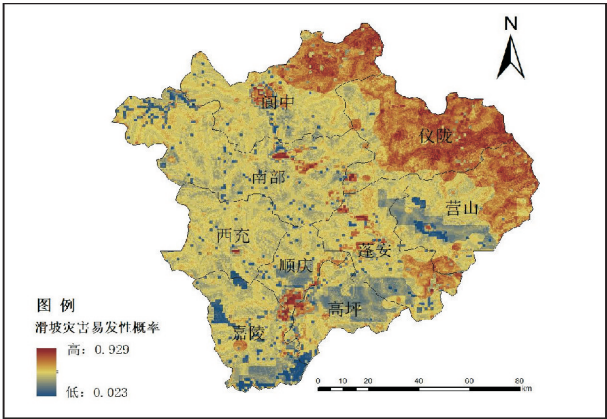


图 11 南充市滑坡灾害易发性概率图

3.2 滑坡易发性区划评价与合理性验证

按照南充市滑坡灾害易发性概率值大小,通过自然

断点法,对南充市的滑坡灾害易发性进行区划,区划标准为低滑坡灾害易发区(滑坡概率值<0.265)、较低滑坡易发区(滑坡概率值在0.265 ~0.389)、中滑坡易发区(滑坡概率值在0.390 ~0.499)、较高滑坡易发区(滑坡概率值在0.500 ~0.620)和高滑坡易发区(滑坡概率值0.620),得到南充市滑坡灾害易发性区划图如图 12 所示。

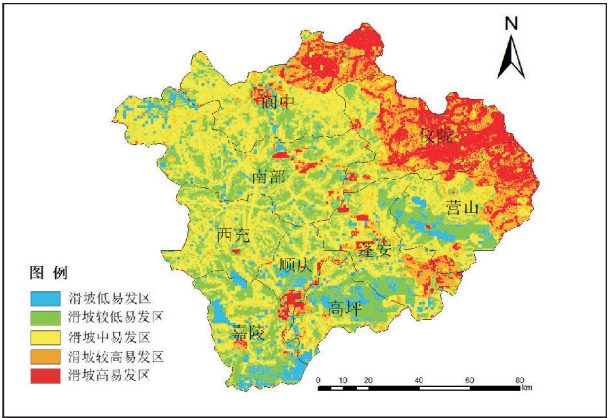


图 12 南充市滑坡灾害易发性区划图

从南充市滑坡灾害易发性区划图可以看出,滑坡低易发区主要分布在南部县北部地区、营山县中部、高坪区中部和嘉陵区西南部地区,南充市滑坡高易发区分布在南充市的东部地区,主要在仪陇县全境、营山县东部、蓬安县东南部、阆中市东北部地区和顺庆区南部部分地区。

统计各区划面积及其所占比例和各区划类型的历史滑坡灾害点数量及其所占比例,得到不同滑坡易发性分区内的滑坡灾害密度(表 13)。结果显示,滑坡高易发区占南充市整体面积的12.23%,历史滑坡灾害比重为 34.72%;滑坡低易发区占南充市总面积的 7.31%,历史滑坡灾害只有2.50%。总体来看,从易发性分区的较低区域到高易发区,历史滑坡灾害密度呈现递增关系,由此可见,滑坡灾害易发性区划结果可信度较高,有实际应用价值。

表 13 南充市滑坡灾害易发性区划结果统计

滑坡区划类型	所占面积/km ²	面积比重/%	历史滑坡数量	历史滑坡比重/%	历史滑坡密度/(个/km ²)
滑坡低易发区	909.49	7.31	33	2.50	0.036
滑坡较低易发区	3340.62	26.85	212	16.04	0.063
滑坡中易发区	4853.53	39.01	345	26.10	0.071
滑坡较高易发区	1816.86	14.60	273	20.64	0.150
滑坡高易发区	1522.48	12.23	459	34.72	0.302

文中采用 ROC 曲线来评价滑坡易发性区划预测结果的灵敏度和特异度,从 ROC 曲线图可以看出(图 13),曲线以下面积为0.702,说明预测准确性较好,标准差为0.013, $P=0.95\%$ 置信区间为(0.676,0.729),说明南充市滑坡灾害易发性区划结果对南充市是否发生滑坡灾害的敏感性高。

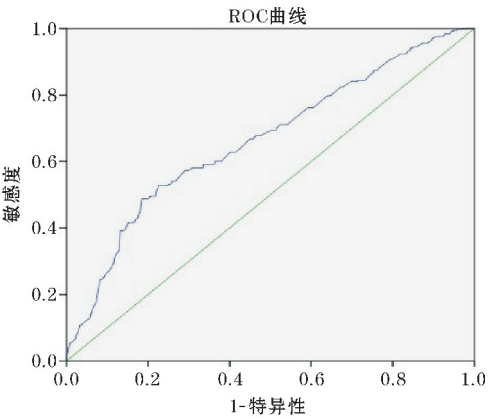


图 13 灵敏度与特异性曲线

依据分离样本法,南充市历史滑坡点的 15% (235 个)检验点验证结果显示,235 个验证点中在滑坡高易发区内的有 85 个,所占比重为36.17%;在滑坡较高易发区内的有 42 个,所占比重为17.87%;在滑坡中易发区内的有 57 个,所占比重为23.41%;在滑坡较低易发区内的有 44 个,所占比重为18.72%;在滑坡低易发区内的有 9 个,所占比重为3.83%。检验点与建模点的滑坡易发性分区比重对比结果如图 14 所示,可以看出验证数据与南充市易发性区划结果吻合度较高,说明南充市滑坡易发性区划结果可信。

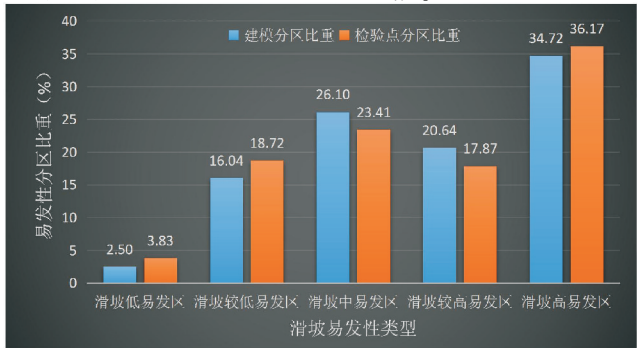


图 14 检验点与建模点滑坡易发性分区比重对比图

4 结束语

采用确定性系数法对滑坡灾害评价因子进行量化和权重分析,通过逻辑回归模型对南充市滑坡灾害易发性进行概率预测,实现南充市滑坡灾害易发性区划,得到如下结论:

- (1)土地利用类型、6-9 月降水量、归一化植被指数、土壤类型、岩性、道路影响距、人口密度分布和坡度是南充市滑坡灾害的主要影响因素,其中 6-9 月降水量对南充市滑坡灾害的影响最大,归一化植被指数对南充市滑坡灾害的影响最小。
- (2)采用确定性系数模型和逻辑回归模型对南充市滑坡易发性进行区划,通过滑坡历史灾害点空间分布与滑坡易发性区划结果比较,模型准确度较高。
- (3)区划结果表明:滑坡高易发区的面积占比为 12.23%、滑坡较高易发区的面积占比为14.60%、滑坡中易发区面积占比为39.01%、滑坡较低易发区面积占比为26.85% 以及滑坡低易发区面积占比为7.31%。南充市滑坡高易发区分布在南充市的东部地区,主要在仪陇县全境、营山县东部、蓬安县东南部、阆中市东北部地区和顺庆区南部部分地区;滑坡低易发区主要分布在南部县北部地区、营山县中部、高坪区中部和嘉陵区西南部地区。

参考文献:

[1] Dai, F C. Landslide risk assessment and management: an overview [J]. Engineering Geology, 2002,64(1):65-87.

[2] Iverson, Richard. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resources Research; WATER RESOURCES RESEARCH,2000,36(7):1897-1910.

[3] 李振,邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2006,27(12):2255-2260.

[4] 交通部公路科学研究所. JTJ051-93 公路土工试

- 验规程[M]. 北京:人民交通出版社,1993.
- [5] Heckerman D. Probabilistic Interpretations for MYCIN's Certainty Factors[J]. Machine Intelligence & Pattern Recognition, 2013, 4:167-196.
- [6] Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3):351-379.
- [7] 温铭生. 哀牢山区降雨型滑坡预警理论与方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [8] 许冲, 戴福初, 徐素宁, 等. 基于逻辑回归模型的汶川地震滑坡危险性评价与检验[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3):98-104.
- [9] 刘明学, 陈祥, 杨珊妮. 基于逻辑回归模型和确定性系数的崩滑流危险性区划[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6):1250-1256.
- [10] 焦玉国. 山东泰安市地质灾害易发性分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1):130-135.
- [11] Cross M. Landslide susceptibility mapping using the matrix assessment approach: A Derbyshire case study[J]. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 1998, 15(1):247-261.
- [12] 刘希林, 庙成, 田春山. 区域滑坡和泥石流灾害两种危险性评价方法的比较分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1):71-78.
- [13] 曹璞源, 胡胜, 邱海军, 等. 基于模糊层次分析的西安市地质灾害危险性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8):136-142.
- [14] Conoscenti, Christian. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy)[J]. Geomorphology, 2008, 94(3):325-339.
- [15] 周静静, 张晓敏, 赵法锁, 等. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4):544-553.
- [16] 骆登. 地质灾害危险性评估存在的问题与研究[J]. 华东科技(综合), 2019(1):336.

Risk Zonation and Evaluation of Landslide Geohazards in Nanchong

HE Qiang¹, WANG Zengwu¹, LU Dequan², ZHOU Yaoting¹

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Nanchong Meteorological Bureau, Nanchong 637000, China)

Abstract: We choose elevation, slope, precipitation, river influence distance, the road distance, distribution of population density, normalized vegetation index, lithology, soil types and land use type as Nanchong landslide disaster prone probability evaluation factor, combined with the 85% of historic landslide disaster data, by using the deterministic coefficient model to quantify the evaluation factors and determine the weight; We construct a binary logistic regression model to evaluate the contribution degree of the evaluation factors and made a spatial prediction of the occurrence probability of potential landslide in Nanchong city. Logistic regression analysis results showed that the land use type, precipitation from June to September, normalized vegetation index, soil type, lithology, road influence distance, the population density distribution and the slope are the main influence factors of landslide disasters in Nanchong, among them, precipitation from June to September has a largest impact on the prone probability value of landslide hazards, followed by land use type, again for slope, normalized vegetation index evaluation factors have an minimal influence on the prone probability value of landslide hazards; According to the probability of occurrence of potential landslide hazards in Nanchong city, the natural breakpoint method was used to divide the landslide hazards in Nanchong city into lowest-landslide hazard prone zones, low-landslide hazard prone zones, middle-landslide hazard prone zones, high-landslide hazard prone zones and highest-landslide hazard prone zones, regionalization results showed that the landslide hazard prone areas in nanchong city are distributed in the whole area of Yilong county, the east of Yingshan county, the southeast of Penggan county, the northeast of Langzhong city and the south of Shunqing district; The results were verified by using 15% of the historical landslide disaster data, and the results were in good agreement with the results of the prone landslide zoning in nanchong city, indicating that the results of the prone landslide zoning in nanchong city were reliable.

Keywords: landslide; evaluation factor; coefficient of certainty; logistics; risk