基于 AHP 与信息量法的甘肃省滑坡易发性评估

申怀飞，董 雨，杨 梅，施采琦，杨欣柯
（许昌学院 城市与环境学院，河南 许昌 461000）

摘　要：甘肃省是我国滑坡灾害频发地区之一，该地居民的生命财产和生态环境遭受威胁，为降低该省受灾程度，提高人们对滑坡灾害的防范意识，对甘肃省滑坡灾害防治提供理论依据，该文参考国内外滑坡灾害风险评估指标及方法，分别从甘肃省地理环境、地质情况、人类活动等方面选取 10 项滑坡灾害风险影响指标，基于层次分析法与信息量模型得到的各指标权重值及信息量值，对该省滑坡易发性进行综合评估，得到结果如下：极高易发区面积占研究区总面积的 4.336%，滑坡灾害密度达 12.870；高易发区面积占 15.243%，滑坡灾害密度达 9.392；中易发区面积占 47.544%，滑坡灾害密度达 2.041；低易发区面积占 32.875%，滑坡灾害密度为 0.074；极低易发区面积占 0.003%，滑坡灾害密度为 0。甘肃省大部分区域滑坡易发性较小，滑坡灾害易发性空间分布呈现集中分布特征，主要集中在东南部地区，且多位于人口密度较高、交通线较密集地区。

关键词：地质学；易发性评估；层次分析法；信息量法；甘肃省
中图分类号：P954　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-3409(2021)06-0412-08

Assessment on Landslide Susceptibility in Gansu Province Based on AHP and Information Quantity Method

SHEN Huaifei, DONG Yu, YANG Mei, SHI Caiqi, YANG Xinke
(*School of Urban and Environmental Sciences, Xuchang University, Xuchang, Henan* 461000, *China*)

Abstract: Gansu Province is one of the areas where landslide disasters occur frequently in China, and the lives, property and ecological environment of residents in this area are threatened. In order to reduce the disaster degree of the province, improve people's awareness of landslide disaster prevention, and provide theoretical basis for landslide disaster prevention in Gansu Province, we selected ten landslide disaster risk impact indicators from the geographical environment, geological conditions, human activities and other aspects of Gansu Province, and comprehensively evaluated the landslide susceptibility of Gansu Province based on the AHP and information quantity value of each indicator obtained by using the analytic hierarchy process and information quantity model throught referring to the risk assessment indicators and methods of landslide disasters at home and abroad. The results are as follows. The area of extremely high prone area accounted for 4.336% of the total area of the study area, and the density of landslide disaster was 12.870. The area of high prone area accounted for 15.243%, and the density of landslide disaster was 9.392. The area of middle prone area was 47.544%, and the density of landslide disaster was 2.041. The area of low-prone area accounted for 32.875%, and the density of landslide disaster was 0.074. The area of extremely low prone area accounted for 0.003%, and the density of landslide disaster was 0. The landslide vulnerability is relatively small in most regions of Gansu Province, and the spatial distribution characteristics of landslide disaster vulnerability are concentrated. Landslide disaster vulnerability mainly concentrate in the southeast region, and most of landslide disaster vulnerabilities are located in the areas with high population density and dense transportation lines.

Keywords: geology; susceptibility assessment; analytic hierarchy process (AHP); information value method; Gansu Province

收稿日期：2020-10-24　　**修回日期**：2020-11-07
资助项目：河南省教育厅人文社会科学研究项目(2020-ZZJH-426)；河南省高等学校重点科研项目(21A170019)；许昌学院优秀青年骨干教师项目；许昌学院重点科研项目(2020ZD004)
第一作者：申怀飞(1979—)，男，河南淅川县人，博士，副教授，主要从事资源环境遥感及 3S 综合应用研究。E-mail：hfshen329@163.com

滑坡作为六大地质灾害之一,其年发生量在地质灾害中占比高达 50%～86%,严重威胁人类生命财产安全。滑坡易发性评价(又称滑坡敏感性评价),是通过研究某一地区环境中的各项影响因子对滑坡发生的影响程度,综合考虑各因子的权重,对潜在滑坡的类型、空间分布和滑坡概率进行定性或定量的评价,即解决“在何地容易发生滑坡灾害”的问题。而滑坡风险性评估不仅回答了什么地方容易滑坡的问题,还进一步估算了因滑坡对个人、群体、财产或环境造成的风险[1-2]。滑坡易发性和风险评估为当前地质灾害研究领域的热点问题。

国外学者在滑坡灾害易发性和风险评估方面开展了一系列研究,Wicaksono 等选取包括坡度曲率、坡度梯度和建筑密度等 17 个因子,采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)创建滑坡易发性图[3]。Ellen Felizardo Batista 等提出将衡量滑坡成本和评估脆弱性的方法应用于公路周边区域滑坡风险评估[4]。Pratap Ram 等采用二元统计法绘制喜马拉雅山脉附近小镇及其周边地区的滑坡易发图并进行了风险评估[5]。Abhirup Dikshit 等综合研究区实际情况和专家判断确定脆弱性因子和危险性因子的权重,绘制滑坡危险图和脆弱性图,并对由降雨引起的山体滑坡风险进行评估[6]。M.Fressard 等以法国诺曼底的奥吉高原为研究区,在详细尺度上使用多元统计建模方法对滑坡敏感性进行评估[7]。Mostafa Mousavi 等采用定量风险分析方法对伊朗北部 Emamzadeh Ali 地区由地震诱发的滑坡进行脆弱性评估[8]。Biplab Mandal 和 Sujit Mandal 应用层次分析法,以地理空间工具为基础,编制了大吉岭喜马拉雅东部利什河流域滑坡易感性图[9]。Kayastha 等采用层次分析法对尼泊尔蒂瑙流域进行分析,编制了滑坡易感图,并利用物理和统计方法对滑坡易感图进行了验证[10]。国内研究方面,吴树仁等确定了近年来对于滑坡灾害的研究逐步向以定性—定量描述为基础预测灾害发生概率的方向发展[11]。向喜琼建立了较为完善的区域滑坡地质灾害危险性评价方法体系,完善和修正了区域滑坡地质灾害风险评价和风险管理的基本框架[12]。常建娥等通过应用实例证明应用层次分析法可以确定出权重,从而为决策提供依据[13]。朱良峰等采用信息量模型对中国范围内的滑坡灾害进行危险性分析,进而进行区域社会经济易损性分析,并在此基础上进行最终的滑坡灾害风险评估[14]。孙强等基于 GIS 与层次分析法通过分析滑坡危险性评价结果、人口及财产易损性等,对龙溪流域进行滑坡风险性评价[15]。廖祥东等采用定量评价方法,开展十堰市某单个滑坡的稳定性、危险性、承灾体易损性分析评价,在此基础上进行滑坡风险分析评价[16]。上述研究中的滑坡风险评估多在中小尺度范围进行,以选取某一种方法或模型对滑坡风险进行评价为主流,且评价模型理论体系尚需进一步完善。

甘肃地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇地带,地形复杂,山脉纵横交错,海拔相差悬殊,有滑坡致灾的充分条件。本文在综合考虑各方面因素基础上,选取地形起伏度、土壤、植被、降水、地震等指标[17-25],结合层次分析法与信息量模型对甘肃省境内进行滑坡易发性评估,为研究区滑坡灾害防治提供科学依据,提高人们对滑坡灾害的防范意识,也丰富了地质灾害特别是滑坡灾害易发性评估的理论和方法[26-28]。

1　研究区概况

甘肃省位于中国西部,地处黄河上游,位于东经 92°20′—108°43′,北纬 32°36′—42°48′,东西蜿蜒 1 655 km,面积 42.59 万 km^2。甘肃省大部分地区位于中国地势第二阶梯上,海拔高程 556～5 856 m;土壤类型主要为漠土、高山土和初育土,占甘肃省总面积的60.28%;地层岩性主要为新生代的第四系和中古生代的泥盆系。甘肃省东西气候差异大,西部地区属温带大陆性气候,东部属于温带季风气候,降雨在时空分布上不均衡,西北少东南多,冬春少夏秋多,年降水量 36.6～734.9 mm。2017 年甘肃省滑坡多集中在东南部地区,共 123 处,其中小型 10 处,中型 72 处,大型 38 处,特大型 3 处。研究区位置见图 1。

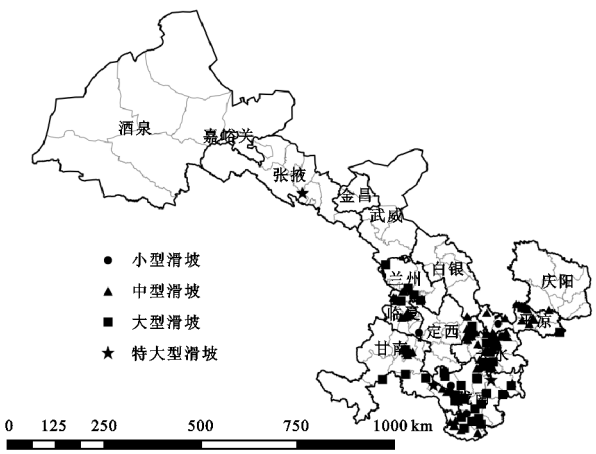

图 1　研究区位置及滑坡点分布情况

2　研究数据和方法

2.1　数据来源及预处理

进行滑坡易发性评估,基础数据的来源及其精确程度将会直接对评价结果产生影响,本论文所采用数据来源见表 1。本研究所用数据(表 1)均选用 WGS_

1984_UTM_Zone_47N 投影坐标系，避免在不同坐标系下各指标数据的偏移和变形。将统一坐标系的甘肃省 DEM(Digital Elevation Model)数据、年平均降水、地震核密度、植被覆盖度、土壤类型、地质类型、土地利用类型、道路密度及人口密度数据，基于 ArcGIS 软件分别进行剪裁、矢量化、拓扑检查、插值分析、栅格计算等处理，以便于对研究区滑坡易发性进行评估。本研究将 2017 年滑坡点数据随机分为两部分，一部分用于计算不同因子对滑坡提供的信息量值，另一部分用于滑坡易发性评估的检验。

表 1 研究区基础数据来源

数据名称	数据类型	分辨率或比例尺	数据来源及数据采集时间
DEM	栅格(.tif)	30 m	地理空间数据云 2011 年 3 月 15 日
研究区行政区划图	矢量(.shp)	1∶100 万	国家地球系统科学数据中心 2020 年 3 月 18 日
研究区范围气象站点年平均降水数据	文本文档(.txt)	—	中国气象数据网 2014—2019 年
研究区范围内历史地震列表	表格(.xlsx)	—	中国地震局 2019 年 12 月 27 日
植被覆盖度	栅格(.tif)	250 m	欧洲航天局官网 2018 年 8 月
土壤类型	矢量(.shp)	—	国家地球系统科学数据中心 2000 年
研究区范围地质图	栅格(.tif)	1∶250 万	91 卫图 2001 年
土地利用数据	栅格(.tif)	30 m	全国地理信息资源目录服务系统 2018 年
研究区交通数据	矢量(.shp)	1∶100 万	国家自然资源和地理空间基础数据库 2010 年 11 月 18 日
研究区人口数据	表格(.xlsx)	—	甘肃省统计年鉴 2018 年
中国崩塌滑坡泥石流分布图	电子文档(.pdf)	1∶500 万	地质云 2017 年 12 月 31 日

2.2 评价指标

对滑坡灾害易发性进行评估，首先确定影响滑坡灾害的重要因子。本文选取滑坡影响因素中的地形起伏度、降水、坡度、植被覆盖度、岩性、人口密度等因子(图 2)用于甘肃省滑坡易发性评估。

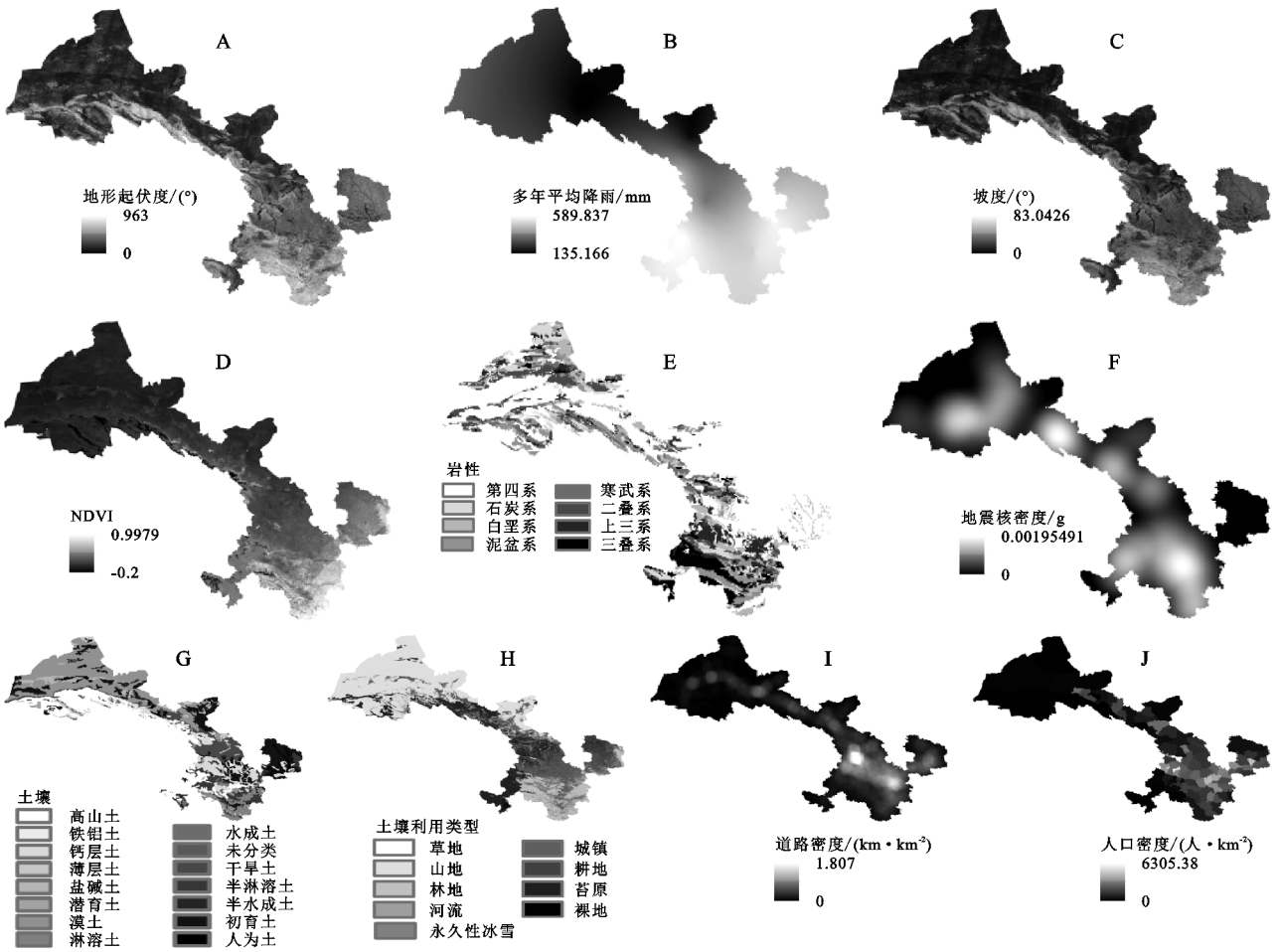

图 2 滑坡易发性评估指标

2.3　研究方法

国内外专家学者针对滑坡易发性评估提出多种研究方法。目前常用于滑坡易发性分析的方法主要为定性的层次分析法和定量的信息量模型等。定性分析法人为主观因素较强,随意性大;而定量分析法则忽略了不同因素之间的联系。本研究采用定性与定量相结合的方法对甘肃省滑坡灾害进行易发性评估。

2.3.1　*层次分析法*

(1) 建立层次结构模型。在此步骤中将问题所含要素进行分组,每组作为一个层次,并将其按目标层—准则层—措施层的次序排列起来,见图 3。

(2) 构造判断矩阵。构造判断矩阵是 AHP 决策中一个关键的步骤。从目标层开始,对同一层的各个因素重要程度进行两两比较,评定该层次中各有关元素的相对重要性(表 2)。

(3) 一致性检验。为了确定矩阵的可靠性需要检验判断矩阵的一致性,计算它的一致性指标:

$$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1) \tag{1}$$

式中:λ_{max}为判断矩阵的最大特征根;n 为判断矩阵阶数;CI 为判断矩阵的一致性指标。当 CI=0 时,判断矩阵具有完全一致性;反之,CI 越大,就表示判断矩阵的一致性越差。RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标(表 3)。

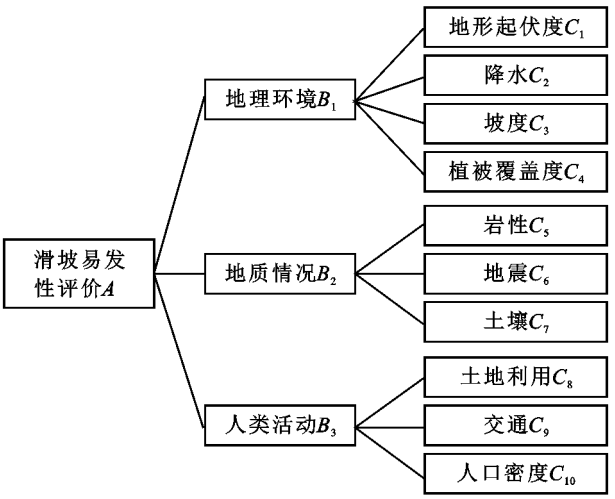

图 3　层次结构模型

表 2　判断矩阵标度说明

标度	含义
1	i 和 j 同样重要
3	i 比 j 稍微重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 强烈重要
9	i 比 j 极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若 i 与 j 重要性之比为 B_{ij},则 j 与 i 重要性之比为 $1/B_{ij}$

表 3　平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

一致性指标 CI 与同阶的平均随机一致性指标 RI 之比记为 CR。

$$CR=CI/RI$$

当 CR<0.1 时,认为判断矩阵有令人满意的一致性。

计算得各指标的权重向量 ω=(0.0618,0.0848,0.0337,0.2197,0.0783,0.1974,0.1243,0.1187,0.0499,0.0314)

2.3.2　*信息量法*　本研究选定的 10 个影响因子对滑坡灾害发生所提供的信息量各不相同。根据公式可计算出各个因子所提供的信息量值:

$$I=\ln\frac{S_{i0}/S_i}{A_0/A} \tag{2}$$

式中:S_{i0}为每个影响因子 X 中各个类别中发生滑坡灾害的面积;S_i 为影响因子 X 中每个类别的面积;A_0 为研究区内发生滑坡灾害的总面积;A 为研究区总面积。

计算得各因子对滑坡灾害发生所提供信息量值,计算结果见表 4。

将信息量值与层次分析法所得权重值进行加权求和,公式如下:

$$I_{CI}=\sum_{i=1}^{n}w_i\times I_{ij} \tag{3}$$

式中:I_{CI}为评价因子的综合信息量;w_i 为层次分析法所得各评价因子权重值;I_{ij}为第 i 个评价因子中第 j 个类别的信息量。

3　结果与分析

3.1　评价结果及精度验证

利用公式(3)计算得到整个研究区综合信息量值,进而得到甘肃省滑坡易发性区划图(图 4)。从图中可看出,在高易发区和极高易发区滑坡点分布集中,随着易发性等级降低,滑坡的数量和密度分布都随之降低,说明甘肃省实际发生滑坡情况与评估模型基本吻合。

受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC)又称为感受性曲线。ROC 曲线分析的是二元分类模型。在对滑坡进行易发性评估时通常使用 ROC 曲线分析方法对评价结果进行精

度验证。ROC曲线是以真阳性率(灵敏度)为纵坐标,假阳性率(1－特异度)为横坐标绘制的曲线[29]。试验精度与曲线下面积(Area Under Curve,AUC)取值成正比,AUC值越大,试验精度越高,即在ROC曲线图中,ROC曲线越靠近图表区域左上角,模型的预测精度越高。AUC处于[0.5,0.7]时预测可信但精度较低,AUC处于[0.7,0.9]时试验精度为中等水平,0.9<AUC<1时预测效果较好。

表4 各因子信息量值

因子	分级	信息量值	因子	分级	信息量值
地形起伏度/(°)	<25	－0.570	降/mm	135.2～201.1	0.000
	25～50	0.801		201.1～270.7	－0.861
	50～75	0.583		270.7～356.3	0.000
	75～100	－1.698		356.3～449.0	－0.308
	100～150	0		449.0～518.6	－0.410
	>150	0		518.6～589.8	1.246
坡度/(°)	<5	－1.509	植被覆盖度/%	<10	0
	5～10	－1.082		10～20	－0.207
	10～15	0.378		20～30	0.316
	15～20	－0.692		30～40	0.851
	20～25	0.148		40～50	0.631
	>25	－2.354		>50	1.825
地震核密度/g	<0.000 181	－1.169	人口密度/(人·km^{-2})	<62	－1.071
	0.000 191～0.000 475	－1.194		62～153	1.056
	0.000 475～0.000 775	－0.891		153～256	－0.332
	0.000 775～0.001 085	0.534		256～458	1.573
	0.001 085～0.001 445	1.184		458～1459	2.249
	>0.001 445	0		>1459	0
土壤类型	人为土	－1.409	土地利用	耕地	－1.377
	初育土	－0.318		林地	1.296
	半水成土	0		草地	－3.467
	半淋溶土	1.729		苔原	0
	干旱土	0		裸地	0
	未分类	0		河流	0
	水成土	1.346		城镇	0
	淋溶土	1.767		山地	－7.913
	漠土	0		永久性冰雪	0
	潜育土	0	道路密度/(km·km^{-2})	<0.100	－2.578
	盐碱土	0		0.100～0.300	0.427
	薄层土	0		0.300～0.500	0.009
	钙层土	0.977		0.500～0.700	0.910
	铁铝土	3.509		0.700～0.900	0.470
	高山土	－1.606		>0.900	1.857
岩性	第四系Q	－1.176	岩性	寒武系∈	－1.132
	三叠系T	－0.670		石炭系C	－0.927
	二叠系P	－0.541		白垩系K	－0.194
	泥盆系D	1.207		上三系N	1.455

为了对滑坡预测结果进行验证,选取2017年的123个滑坡点数据作为滑坡样本,赋值为1,创建123个随机样本点作为非滑坡样本,赋值为0。基于研究区滑坡易发性评价结果利用SPSS绘制ROC曲线,见图5,AUC值为0.884(即ROC曲线下面积),面积的标准误差为0.022,在显著性水平在0.05的情况下置信区间为0.841～0.928,由此可知评估具有较高可信度,可作为甘肃省滑坡易发性评价最终结果。

3.2 滑坡易发性空间分布特征

由甘肃省滑坡易发性区划图(图4)可知,甘肃省滑坡灾害易发等级整体空间分布特征呈现自东南向西北逐渐降低的变化规律,甘肃省滑坡灾害多以中低

等级为主,多分布在中部和西部地区;高易发区则主要分布在甘肃省东南部的陇南、天水、甘南、定西、平凉和庆阳等地,酒泉、张掖和武威等地也有零星分布;极高易发区集中分布在陇南地区。

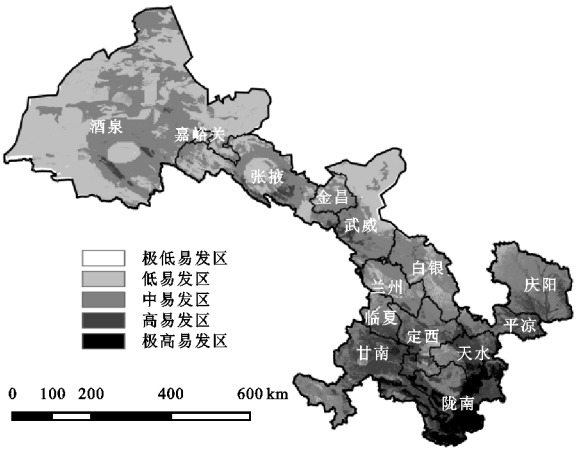

图 4　甘肃省滑坡易发性区划

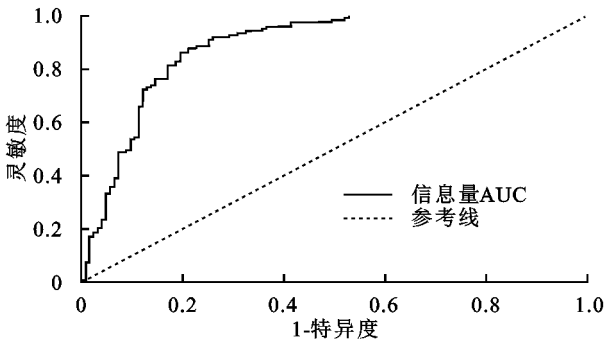

图 5　甘肃省易发性区划验证 ROC 曲线

3.3　不同等级易发性滑坡分布特征

对各滑坡易发区面积及其间滑坡点分布情况进行统计得到表 5。由表 5 和图 4 可知,甘肃省滑坡极低易发区的面积为 10 km^2,约占全区总面积的 0.003%,无滑坡灾害点分布。该易发区主要分布于甘肃省酒泉市西部及张掖市的肃南裕固族自治县、高台县、临泽县地区。区域内地形起伏度较小,地质环境好,地层岩性主要为三叠系、泥盆系;土壤主要为钙层土、高山土;植被覆盖度高,降雨量少;受人类活动影响小,交通不发达,不易发生滑坡。低易发区的面积为 1.35×10^5 km^2,约占整个研究区总面积的 32.875%,滑坡点在此区间共分布 1 个,占总滑坡数的0.813%,滑坡灾害密度为 0.074 个/万 km^2。该易发区主要分布于酒泉市西部、东南部,武威市东北部及张掖市西北部和中部。区域内地形起伏度较小,地层岩性复杂,土壤类型为漠土、初育土和高山土,虽该部分地区处于山地,植被覆盖度低,但人类活动少,交通不发达,因而滑坡易发性低。中易发区的面积为 1.96×10^5 km^2,约占整个研究区面积的 47.544%,滑坡点在此区间共分布 40 个,占总滑坡数的 32.520%,滑坡灾害密度为 2.041 个/万 km^2。该易发区分布范围广,甘肃省各市均有涉及。区内部分地区地形起伏度相对较大,土壤类型多样,包含漠土、初育土、钙层土、高山土、干旱土、半水成土、盐碱土,地层岩性复杂,人类活动相对较频繁,植被覆盖度相对较低,白银市、兰州市、定西市、庆阳市及临夏回族自治州滑坡灾害的发生受降雨量和交通影响较大。高易发区的面积为 6.28×10^4 km^2,约占整个研究区总面积的 15.243%,滑坡点在此区间共分布 59 个,占总滑坡数的 47.967%,滑坡灾害密度为 9.392 个/万 km^2。该易发区主要分布在甘肃省的东南部和南部的庆阳市、平凉市、天水市、定西市及甘南藏族自治州等地区。区内地形起伏度较大,土壤类型以半淋溶土、人为土、钙层土、初育土为主,地层岩性主要为二叠系、三叠系、上三系和白垩系,植被覆盖度较高,但相对频繁的人类活动、过高的降雨量以及发达的交通对该区域较高的滑坡易发性具有一定的影响。极高易发区的面积为 1.79×10^4 km^2,仅占研究区总面积的 4.336%,滑坡点在此区间共分布 23 个,占总滑坡数的 18.699%,其滑坡灾害密度达 12.870 个/万 km^2。该易发区主要分布在甘肃省的陇南市及甘南藏族自治州东南部地区。区内土壤类型主要为淋溶土,地层岩性以泥盆系、白垩系和第四系为主,植被覆盖度高,人类活动相对较少,地形起伏度大,交通相对发达,年均降雨量达 518.6～589.8 mm,危险性高,易发生滑坡。

表 5　甘肃省滑坡易发性评估检验表

易发性区划	灾害比例/%	分区面积/万 km^2	分区比例/%	滑坡灾害密度/(个/万 km^2)
极低易发区	0	0.001	0.003	0
低易发区	0.813	13.549	32.875	0.074
中易发区	32.520	19.595	47.544	2.041
高易发区	47.967	6.282	15.243	9.392
极高易发区	18.699	1.787	4.336	12.870

甘肃省中北部地区属温带大陆性气候,全年降水较少,雨水对土壤的冲蚀能力较弱,且该地区地形起伏度及坡度小,人类活动、交通等对地表影响较小,滑坡易发性低;甘肃省南部地区属温带季风气候,全年降水多集中夏季,短时降水多,且降水强度大,对土层冲刷力强,该地区坡度大,土层不稳定,再加之人类活动密集、交通发达,滑坡易发性较高。据此可推断出甘肃省滑坡高发地区具有年均降雨量高,地形起伏度大、人类活动频繁,交通发达等特征。

3.4　各地市滑坡易发性情况

对各地市各滑坡灾害易发区面积进行统计,由表 6 可知,天水市、陇南市和甘南藏族自治区总体上滑

坡易发程度较高，高易发和极高易发区面积分别占该市总面积的67.474%，81.937%和54.856%；平凉市和定西市中高易发区面积占比较高，分别为该市面积的98.376%和93.848%；兰州市、金昌市、白银市、张掖市、庆阳市、临夏回族自治区中易发区分布最广，分别为76.375%，78.076%，78.941%，55.430%，71.887%，65.469%；嘉峪关市中易发区和低易发区面积相当，两种易发区面积分别占该市面积的50.028%和49.959%；武威市和酒泉市大部分的地区为中低易发区，分别占该市面积的92.617%和98.839%。

综上，甘肃省滑坡易发性总体上多为中度易发，有少数地区高易发区或低易发区面积占比较大。高易发地区主要位于天水市、平凉市、陇南市以及甘南藏族自治区。这些地区人口密度相对较高，地形起伏度及坡度较大，受降水影响较大。

表6 各地市滑坡易发情况

地区	极高易发/%	高易发/%	中易发/%	低易发/%	极低易发/%
兰州	—	4.240	76.375	19.386	—
嘉峪关	—	0.013	50.028	49.959	—
金昌	—	1.106	78.076	20.818	—
白银	0.000	1.458	78.941	19.627	—
天水	16.643	50.831	29.587	2.939	—
武威	0.135	7.249	42.507	50.110	—
张掖	0.070	7.597	55.430	36.883	0.076
平凉	0.309	45.251	53.125	1.314	—
酒泉	0.000	1.159	41.065	57.774	0.028
庆阳	0.043	22.131	71.887	5.939	—
定西	2.433	41.163	52.685	3.719	—
陇南	47.182	34.755	17.874	0.188	—
临夏	0.067	29.556	65.469	4.907	—
甘南	5.776	49.080	42.349	2.796	—

4 结论

基于层次分析法和信息量法对甘肃省滑坡灾害易发性进行评估，经ROC曲线检验，本研究的AUC值为0.884，具有较高的可信水平，预测结果具有准确性。研究结论如下：

(1) 甘肃省滑坡灾害易发性呈现集中分布特征，主要集中在东南部地区，且多位于人口密度较高、交通线较密集地区。

(2) 研究区极高、高、中、低、极低易发区所占面积分别为1.787，6.282，19.595，13.549，0.001万km^2，其中极低、低、中易发区占研究区总面积的80.421%。由此可知，甘肃省大部分区域滑坡易发性较小。

(3) 甘肃省极高、高易发性滑坡的区域总面积为8.069万km^2，占全省面积的19.579%，且大部分预测滑坡点多发生在甘南地区，与实际情况相符。

研究中所用数据存在数据不完备、匹配度不高、分辨率不同等问题，对研究结果精度也会产一定影响；滑坡发生的动力因素及物质因素较为匮乏，难以全面地、客观地进行滑坡评估；影响因子的选取方面可能不够全面，忽视了其他一些因素的影响作用等，以上问题均留待进一步研究。

参考文献：

[1] 张俊.三峡库区万州区滑坡灾害风险评估研究[D].武汉：中国地质大学，2016.

[2] 石菊松.基于遥感和地理信息系统的滑坡风险评估关键技术研究[D].北京：中国地质科学院，2008.

[3] Wicaksono Y S, Sihombing F, Indra T L. Landslide susceptibility map of Bogor Area using analytical hierarchy process[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 538(1): 1-10.

[4] Batista E F, Larissa D, Kormann A. Methodologies of economic measurement and vulnerability assessment for Application in Landslide Risk Analysis in a Highway Domain Strip: A case study in the Serra Pelada Region (Brazil)[J]. Sustainability, 2019, 11(21): 1-22.

[5] Ram P, Gupta V, Devi M, et al. Landslide susceptibility mapping using bivariate statistical method for the hilly township of Mussoorie and its surrounding areas, Uttarakhand Himalaya[J]. Journal of Earth System Science, 2020, 129(1): 1-18.

[6] Dikshit A, Sarkar R, Pradhan B, et al. Spatial landslide risk assessment at Phuentsholing, Bhutan[J]. Geosciences, 2020, 10(4): 1-16.

[7] Fressard M, Thiery Y, Maquaire O. Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale? Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France)[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2014, 14(3): 569-588.

[8] Mousavi S M, Omidvar B, Ghazban F, et al. Quantitative risk analysis for earthquake-induced landslides—Emamzadeh Ali, Iran[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3-4): 191-203.

[9] Mandal B, Mandal S. Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(11): 3114-3132.

[10] Kayastha P, Dhital M R, Smedt F D. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal[J]. Computers & geosciences, 2013, 52(MAR.): 398-408.

[11] 吴树仁,石菊松,张春山,等.地质灾害风险评估技术指南初论[J].地质通报,2009,28(8):995-1005.
[12] 向喜琼.区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理[D].成都:成都理工大学,2005.
[13] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2007, 29(1):153-156.
[14] 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.
[15] 孙强,张泰丽,伍剑波,等.基于 GIS 与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价[J].华东地质,2018,39(3):227-233.
[16] 廖祥东,黄锐,杨连旗,等.十堰市某滑坡风险分析评价[J].资源环境与工程,2020,34(3):388-395.
[17] Saleem N, Huq M E, Twumasi N Y D, et al. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: a review[J]. Isprs International Journal of Geo-Information, 2019,8(12):1-27.
[18] 陈香,王瑞.福建省滑坡灾害风险管理决策系统构建[J].灾害学,2016,31(2):47-52.
[19] 裴艳茜,邱海军,胡胜,等."一带一路"地区滑坡灾害风险评估[J].干旱区地理,2018,41(6):1225-1240.
[20] 冯立,张茂省,张成航,等.四川虹口黑泥湾滑坡风险性评估[J].西北地质,2014,47(3):165-176.
[21] 黎志恒,文宝萍,贾贵义,等.甘肃省白龙江流域滑坡分布规律及其主控因素[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(6):768-776.
[22] 彭令,牛瑞卿,赵艳南,等.区域滑坡灾害风险评估:以长江三峡库区秭归县为例[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(3):891-901.
[23] 乔建平,王萌,吴彩燕.汶川 8.0 级地震灾区滑坡风险评估方法[J].灾害学,2016,31(1):55-59.
[24] 彭令,徐素宁,彭军还.多源遥感数据支持下区域滑坡灾害风险评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2016,46(1):175-186.
[25] 蓝天助,何永强,毕永辉.甘肃南部某滑坡地质灾害危险性评估[J].山西建筑,2015,41(15):59-60.
[26] 熊俊楠,朱吉龙,苏鹏程,等.基于 GIS 与信息量模型的溪洛渡库区滑坡危险性评价[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):700-711.
[27] 樊晓一,乔建平,陈永波.层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J].自然灾害学报,2004,13(1):72-76.
[28] 刘力维,程传周.基于 GIS 的滑坡泥石流风险评估及其应用[J].地理空间信息,2014,12(3):8-10.
[29] 陈齐.基于 GIS 的闽江上游滑坡敏感性评价研究[D].福州:福建师范大学,2016.

(上接第 411 页)

[6] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006,16(3):253-267.
[7] Lu C P, Ren W X, Xue B, et al. Modelling impact of climate change and air pollution in cities [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability, 2017,170(3):133-140.
[8] 闻熠,高峻,徐迪,等.基于改进参数的长三角城市生态足迹分析及其可持续性评价[J].水土保持研究,2020,27(1):312-318,327.
[9] 彭程,陈志芬,吴华瑞,等.基于 ESDA 的城市可持续发展能力时空分异格局研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):144-151.
[10] 查奇芬,段梦杰.长三角城市可持续发展能力评价研究[J].农村经济与科技,2018,29(13):269-271.
[11] 赵永超.资源型城市可持续发展能力:概念界定、提升路径与实施对策研究[J].管理现代化,2021,41(2):74-76.
[12] 牛元文.可持续发展理论的内涵认知:纪念联合国里约环发大会 20 周年[J].中国人口·资源与环境,2012,22(5):9-14.
[13] 郭荣中,申海建,杨敏华.基于改进生态足迹因子的长株潭地区可持续发展[J].水土保持研究,2019,26(5):174-180.
[14] 杨青,逯承鹏,周锋,等.基于能值—生态足迹模型的东北老工业基地生态安全评价:以辽宁省为例[J].应用生态学报,2016,27(5):1594-1602.
[15] 逯承鹏,陈兴鹏,张子龙,等.基于 MFA 的兰州市经济增长与环境压力关系变化分解分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2013,49(5):604-610.
[16] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: Methods and applications [M]. New York: Springer-Verlag,1981.
[17] Lu C P, Ren W X, Xue B, et al. Sustainability investigation of resource-based cities in Northeastern China [J]. Sustainability, 2016, 8 (10). DOI: 10.3390/su8101058.
[18] 刘笑男,倪鹏飞.中国大中城市竞争力的耦合协调度分析[J].河北经贸大学学报,2019,40(2):57-64.