

引用格式: 韩用顺, 孙湘艳, 刘通, 陈勇国. 基于证据权-投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价[J]. 山地学报, 2021, 39(5): 672-686.
HAN Yongshun, SUN Xiangyan, LI Tong, CHEN Yongguo. Susceptibility evaluation of geological hazards based on evidence weight-projection pursuit model in Southeast Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 672-686.

基于证据权-投影寻踪模型的藏东南 地质灾害易发性评价

韩用顺^{1,2}, 孙湘艳¹, 刘通², 陈勇国^{3*}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 湖南科技学院 土木与环境工程学院, 湖南 永州 425199)

摘要: 藏东南地区是我国海洋性冰川集中区、重大工程建设区和地质灾害易发区, 高原地质灾害易发性评价是该区防灾减灾的重要技术基础和热点难点之一。本文考虑了气候变化和冰川积雪活动对高寒山区地质灾害形成发育的影响, 引入了积温和冰川积雪消融量两个特色因子, 提出了距平差气象插补法和冰川积雪消融量概化模型, 并从孕灾环境、动力条件和人类扰动等方面共选取了 13 个因子, 建立了藏东南地质灾害易发性评价指标体系, 构建了证据权-投影寻踪模型, 实现了灾害易发性评价计算、分级区划和精度验证。结果表明: (1) 冰川积雪消融量和积温对高寒山区地质灾害易发性影响显著, 其最佳向量值达 0.088 和 0.579; (2) 提出的距平差法气温插补模型对气温预测效果优于平均值法和线性插值法, 可有效解决气象数据缺失和插补值被放大的问题; (3) 大部分研究区为中度及以上灾害易发区, 占总面积的 65.98%, 其中极高易发区集中在深大活动断裂带和干流水系两侧 2 km 区域内, 高易发区集中在干流水系两侧 2~5 km 的近似环状区域, 中易发区主要分布在峡谷和干流水系两侧 5~10 km 地带以及大江大河的支流区域; (4) 建立的证据权-投影寻踪模型能更好地实现研究区地质灾害易发性评价, 其成功率曲线检验值达 0.884, 具有较好实用性。本研究成果可以丰富区域地质灾害易发性评价理论和方法, 并为藏东南地区地质灾害易发性的客观快速评价提供借鉴和参考。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 指标体系; 证据权-投影寻踪模型; 藏东南

中图分类号: X43

文献标志码: A

藏东南地区是世界内陆上海洋性冰川集中分布区^[1], 区域气候复杂多变, 水汽交换和冰川消融强烈, 深大断裂与活动构造发育, 地震活动频繁, 是我国崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害最为发育和严重的地区之一^[2]。区内地质灾害发育受青藏高原东缘高陡急变带的斜坡动力过程控制, 并受冰川

积雪消融与人类工程扰动影响, 具有鲜明的高寒山地垂直分带特征。在全球气候变化、极端天气事件和人类活动叠加影响下, 该区地质灾害活动日益频繁且危害日趋严重, 而区内社会经济发展和铁路、公路、电站等重大工程建设及公共安全对防灾减灾提出了更高要求。由于自然条件恶劣, 交通不便, 监测

收稿日期 (Received date): 2021-05-20; **改回日期** (Accepted date): 2021-09-10

基金项目 (Foundation item): 湖南省自然科学基金(2020JJ4295); 交通运输部科技计划项目(2015-316-T19-060); 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(HNJG-2020-0481)。[Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ4295); Ministry of Transport Science and Technology Program (2015-316-T19-060); Research Project on Teaching Reform of Colleges and Universities in Hunan Province (HNJG-2020-0481)]

作者简介 (Biography): 韩用顺(1974-), 男, 河南信阳人, 博士, 教授, 主要研究方向: 灾害监测评估与 3S 技术及应用。[HAN Yongshun (1990-), male, born in Xinyang, Henan province, Ph.D., professor, research on disaster monitoring assessment, 3S technologies and applications] E-mail: yongshunhan@126.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 陈勇国(1991-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 灾害遥感与 3S 技术及应用。[CHEN Yongguo (1991-), male, M.Sc., lecturer, specialized in disaster remote sensing, 3S technology and application] E-mail: chenongguo827@163.com

台网和站点不足,防灾减灾基础和能力薄弱,数据资料匮乏,灾害调查与监测困难,适用于该区域的地质灾害易发性评价理论与方法仍不完善^[3]。

自 20 世纪 60 年代开始,国外学者开展了大量的区域地质灾害调查和易发性评估研究^[4],在评价单元^[5]、指标体系^[6]、因子处理^[7]、评价模型^[8]、区划制图^[9-10]等方面取得了显著成果。在国内,地质灾害易发性评价始于 20 世纪 80 年代^[11],在川黔铁路、青藏铁路等重大工程建设中发挥了重要作用;随着区域灾害调查与研究的深入^[12]和数理统计方法^[13]、计算机与现代信息技术、非线性科学^[14]、人工智能^[15]的发展,我国区域地质灾害易发性评价理论、技术与方法^[16]已有极大发展;近 10 年来,有学者开展了藏东南^[17-18]及其区内川藏公路^[19]、墨脱公路^[20]等工程区地质灾害易发性评价研究,建立了较为系统的评价指标体系和量化评价方法^[21]。总体而言,区域地质灾害易发性评价针对不同的灾害类型、区域特点和应用目的,建立了各具特色或各有侧重的评价指标体系,评价方法已经从定性或半定量评价发展到定量化和智能化评价^[22],但仍存在如下不足:(1)缺少能客观反映高寒山区地质灾害形成及演化特征的评价指标体系,且评价因子分级赋值与量化处理具有较强主观性;(2)评价模型多依赖专家经验或先验知识,未能充分挖掘出因素和数据之间非线性关系及可用信息,缺少学习与泛化能力,且存在对样本数据要求较高、受主观干扰和模型条件限制的现象,从而导致评价结果不甚理想。因此,如何结合特定区域地质灾害成因机制建立科学的评价指标体系并构建有效的评价模型仍是区域地质灾害易发性评价的两个关键科学问题。本文针对藏东南冰川积雪活动和气候变化的特殊作用与影响,提出积温和冰川积雪消融量计算方法,构建高寒山区地质灾害易发性评价指标体系,耦合证据权模型与投影寻踪方法,建立具有学习与泛化能力的地质灾害易发性评价模型,避免传统评价方法中的评价因子分级赋值及其权重确定的主观性,实现评价因子状态分级差异最大化,解决评价因子内部不同分级对地质灾害易发程度贡献率的问题^[23],消除多因素的高维、非线性和非正态等数据结构问题,且对样本数据要求不高^[24]。相关研究成果可以丰富区域地质灾害易发性评价理论和方法,并为高寒山区地质灾害易发性客观快速评价提供借鉴和参考。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区概况

藏东南即青藏高原东南部,包括西藏自治区的林芝、昌都两市的 18 个县及四川省甘孜州的 3 个县(92°9'42"~99°56'57" E、27°33'34"~32°43'56" N),地处第二阶梯到第三阶梯的急变过渡带。区内平均海拔约 4000 m,地势西北高、东南低,主要有嘉黎断裂、雅鲁藏布江断裂、怒江断裂、澜沧江断裂等区域性深大断裂带,褶皱断裂发育,新构造活动强烈,强震多发。地层岩性主要为火成岩、变质岩和第四纪松散堆积物,在山体上部、中下部和河谷地带分别以现代冰积物与残积物、残坡积物、冲洪积物为主,造成该区崩塌、滑坡、冰川堆积等不良地质现象及松散土层较多。雅鲁藏布江、怒江和澜沧江等江河纵横,山高坡陡,沟谷深切,沟床纵坡比降大,地表破碎,卸载强烈。该区是我国生态环境脆弱区和世界上海洋性冰川最为集中的分布区,受印度洋孟加拉湾暖湿气流影响大,气候干湿分明,降水丰富且集中在 4—10 月,气温日较差和年较差较大,导致冰川积雪积累与消融及冻融循环活动强烈、径流量大、流速快,成为地质灾害形成发育的重要水动力条件。

川藏铁路、川藏高速、川藏公路、电站、城镇等重大工程建设活动,造成岩土体损伤破坏,诱发了大量崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。特殊的自然环境和强烈的人类活动,使得该区成为我国地质灾害易发区和多发区。据调查,区内发育地质灾害 2091 处(图 1),其中崩塌 293 处、滑坡 802 处、泥石流 992 处,造成了严重危害。1988 年 7 月米堆沟冰湖溃决型泥石流冲毁川藏公路,断道阻车 1 年之久;1991 年 6 月川藏公路 102 滑坡群发生大规模滑动,体积达 510 万 m^3 ,影响公路长达 550 m,之后每年均发生多次滑动,停车断道时有发生^[17];2000 年,易贡藏布流域扎木弄沟源头发生体积达 $2 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的巨型滑坡,最大滑动距离达 7 km,形成的堰塞湖发生溃决,导致成雅鲁藏布江大峡谷下游的印度布拉马普特拉河沿岸 7 个邦遭受特大洪水灾害,造成 94 人死亡、250 万人无家可归;2015 年西藏排龙段、2018 年西藏仁布段、2020 年西藏通麦段等大规模泥石流灾害造成 G318 中断。该区内外力作用强烈,极端天气事件频发及其灾害效应敏感,加

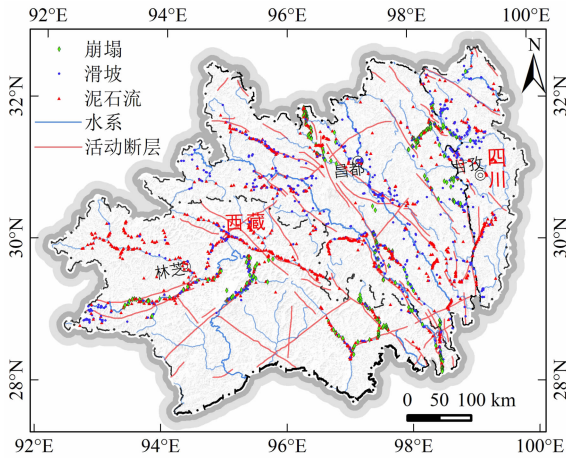


图 1 藏东南地区地质灾害分布

Fig.1 Geological hazards of Southeast Tibet, China

剧了地质灾害的频率、规模、复杂性和易发性^[3],严重威胁着当地人民生命财产安全和社会经济可持续发展。

1.2 数据源与评价指标

区域地质灾害形成与演化是地质、地震、地形地貌、气象、水文、人类活动等多因素耦合作用的结果。新构造运动和地震是地质灾害发育的内营力条件,控制着灾害的形成和演化并为其活动提供内动力和物质基础^[13]。地层、岩性等地质因素决定着岩土体物理力学特性和抗风化能力^[2],为地质灾害发育提供物源条件^[17]。地形地貌反映地表高低起伏形态,既是内外营力作用的结果,也是气象水文的标志性载体和地表物质赋存与运移的场所,为地质灾害提供位能、运移条件和一定的水动力,制约灾害的形成和发育,影响灾害的运动和规模^[25]。气温、降水、冰川积雪融水、径流等气象水文因素,是高寒山区地质灾害发育的重要水动力和激发条件,决定着灾害的时空分布规律并影响其发育特征。植被通过其叶冠、根茎改变坡面水文过程和坡体力学强度,进而影响地质灾害发育程度^[18]。道路、城镇、电站、矿山、

垦殖等工程建设及人类活动强烈扰动岩土体结构和坡体稳定性,是地质灾害的重要诱发因素。根据研究区地质灾害孕灾条件、发育特征、区域特点、数据可获得性和因素独立性检验结果,本文选取高程、距断裂带距离、积温、年均降雨量、冰川积雪消融量等 13 个因子建立藏东南地质灾害易发性评价指标体系(图 2)。

主要数据源如下:(1)地形数据为 30m 分辨率 DEM,来源地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),经 ArcGIS10.7 的地形分析提取高程、高差和坡度因子;(2)地质灾害数据来源于县(市)1:5 万地质灾害调查资料,结合项目组多年野外考察数据,并利用 Landsat 8 影像(<http://www.gscloud.cn/>)进行支持向量机方法和多尺度分割技术提取的地质灾害点作为补充;(3)冰川积雪数据为高亚洲逐日积雪覆盖度数据集与中国雪深长时间序列数据集,来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)和国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),用于建立冰川积雪消融量模型并计算冰雪消融量;(4)积温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)和 NCEI(<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncEI>),通过距平差法插补缺失气温,再采用克里金插值法建立积温插值计算模型,反演并制作研究区近 20 年 0℃ 以上的积温分布图;(5)土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,用于提取研究区高精度道路、居民点和植被;(6)地质地震数据包括地层、岩性、构造、工程岩组、地震峰值加速度等,来源于 1:50 万地质图、文献和灾害图集,经 ArcGIS10.7 配准并矢量化制作相应的专题图。

2 研究方法

2.1 冰川积雪消融量

研究区内冰川消融、雪线上移、冻土退化等生态

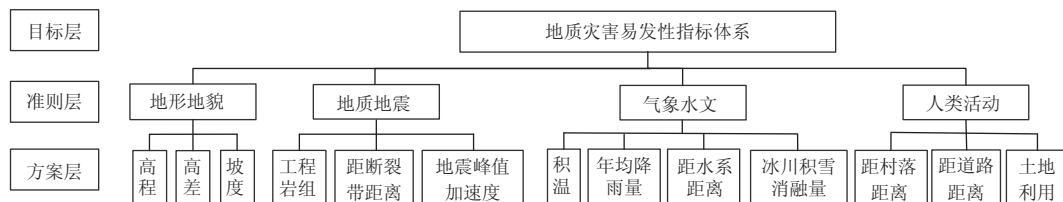


图 2 地质灾害易发性评价指标体系层次结构

Fig.2 Hierarchy diagram of assessment index system of geological hazard susceptibility

水文过程强烈,改变了高寒山区水循环过程^[26],导致地质灾害活动日趋频繁^[3]。目前尚缺少计算冰川积雪消融量的方法,本文基于遥感反演的积雪覆盖面积和雪深监测数据构建了冰川积雪消融量概化模型,计算公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^n (S_{i+1} * H_{i+1} - S_i * H_i) \quad (1)$$

式中, V 为年冰川积雪消融量(m^3); i 为一年中的第 i 天; n 为一年的天数; S 为冰川积雪覆盖面积(m^2); H 为雪深(m)。

计算结果表明,冰川积雪消融集中在研究区的中西部和北部,主要分布在降水密集、积温高的丁青、米林、波密和察隅四地,察隅为强烈消融区,研究区西北部次之;在冰雪消融区内发生的地质灾害为2019处,占研究区灾害总数的96.74%(图3)。

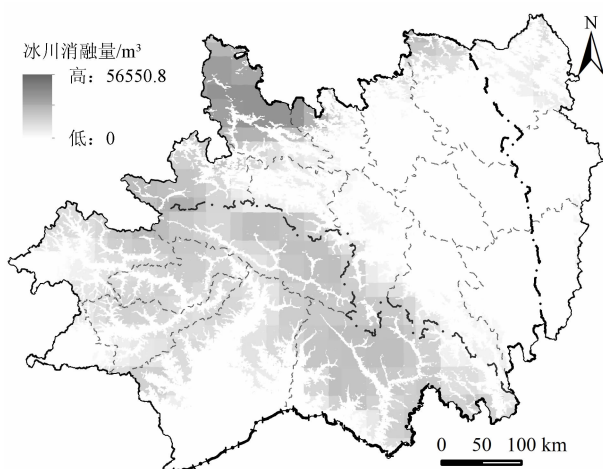


图3 研究区冰川消融量分布

Fig. 3 Distribution of glacier ablation in the study area

2.2 气象数据插补

研究区气象观测站点少,部分站点建站时间晚,且存在部分时段数据缺失,包括缺失单日、连续多日甚至整月的观测数据。为有效利用有限信息,降低数据插补误差,需要针对不同的数据缺失情况采用不同的插补方法。

(1)缺失单日观测数据的插补方法。针对日气温变化时间相对连续且一致性高的特点,采用均值法对缺失的日气温数据进行插补,即选用前后2天内的气温均值来代替缺失值(T_i),用来插补研究区气象站点缺失的日气温资料。计算如下:

$$T_i = \frac{T_{i-2} + T_{i-1} + T_{i+1} + T_{i+2}}{4} \quad (2)$$

式中, T_i 表示第 i 天的日均气温值($^{\circ}\text{C}$); $i-2$ 、 $i-1$ 、 $i+1$ 、 $i+2$ 分别表示一年中的第 $i-2$ 天、 $i-1$ 天、 $i+1$ 天、 $i+2$ 天, T_{i-2} 、 T_{i-1} 、 T_{i+1} 、 T_{i+2} 分别表示其对应的日均气温值($^{\circ}\text{C}$)。

(2)缺失连续多日、整月甚至多月的长时段观测数据的插补方法。研究区内各气象站点之间海拔差异显著,导致其时空分异强、区域高程变化连续性差,因此本文采用一种顾及区域气温年际变化的距平差法进行长时段缺失观测数据插补,即采用周围各站点同时段或相邻时间段的距平差对于缺失的月气温值进行插补,从而计算缺失月的气温值 $x_{y'}(m')$ 。计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta x(m) = \frac{1}{y}(x_y(m) - \frac{1}{p} \sum X) \\ x_{y'}(m') = \frac{1}{y} \sum X + \Delta x, y \neq y', m \neq m' \end{cases} \quad (3)$$

式中, $X = \{x_1(m), x_2(m), \dots, x_y(m)\}$ 为各站点每年的缺失月气温数据($^{\circ}\text{C}$); Δx 为改正值,也是各站点缺失月气温的距平均值($^{\circ}\text{C}$); y 为观测年份; m 为观测月份; $x_y(m)$ 为站点在第 y 年第 m 月的观测值($^{\circ}\text{C}$); $\Delta x(m)$ 为第 m 月的偏移值($^{\circ}\text{C}$); $x_{y'}(m')$ 为缺失气象数据插补后的气温值($^{\circ}\text{C}$)。针对林芝站点2014年缺失9月份气象观测数据,随机选取该月前后11个月份,通过公式(3)插补林芝的月均温值,采用平均绝对误差、方差和均方差作为该方法的预测精度评估标准,并与传统的线性插值方法计算结果进行对比分析。由表1可知,距平差法对缺失值月份气温的插补仍存在一定误差,但与传统线性插值方法相比,月气温插值的平均误差减少至 0.58°C ,表明本文方法具有较好的适用性。插值的目标站点月平均气温距平值与实测月平均气温距平值之间的平均误差较小,且误差波动较稳定,故可运用公式(3)对缺失的长时间气象数据进行插补和延长,以建立起完整观测数据序列并计算缺失月的气温数据,从而极大降低了气温插值的不确定性。

2.3 积温计算

积温是制约冰川积雪消融速度和规模以及冻土退化的重要气象参数,积温变化增大了冰雪融水与高强度降雨的叠加概率^[3],并导致冻土退化,使高寒山区冻土的活动层深度增大,地下水储水空间增加,固体松散物质动储量增强,改变着坡面水文过程和坡体力学强度,增加了地质灾害发生频率与强度。

表 1 气温插补模型预测结果

Tab. 1 Prediction results of temperature interpolation model (单位:℃)

编号	年/月	真实值	平均值法 预测值	线性插值 法预测值	距平差法 预测值	平均值法 绝对误差	线性插值法 绝对误差	距平差法 绝对误差
1	2000/03	5.26	6.62	6.62	5.47	1.36	1.36	0.21
2	2001/05	12.43	12.61	12.40	12.47	0.18	-0.04	0.04
3	2002/06	15.65	15.55	15.38	15.35	-0.10	-0.27	-0.31
4	2004/08	16.11	16.04	15.92	15.69	-0.07	-0.19	-0.42
5	2006/09	14.57	14.33	14.27	14.54	-0.24	-0.30	-0.03
6	2010/02	3.15	3.74	3.74	4.04	0.58	0.59	0.89
7	2011/04	9.63	9.54	9.55	9.36	-0.09	-0.08	-0.27
8	2013/07	17.03	16.55	16.68	16.08	-0.48	-0.35	-0.96
9	2015/08	15.43	16.61	16.75	14.67	1.18	1.32	-0.76
10	2017/11	3.55	6.31	10.59	1.92	2.77	7.04	-1.63
11	2018/10	9.04	10.69	10.59	9.95	1.65	1.55	0.91
平均绝对误差				0.79	1.19	0.58		
方差				1.02	4.60	0.56		
均方差				1.01	2.14	0.75		

基于气象观测站点数据的积温计算需要有长时间连续的气象资料,因受环境条件、人为因素和设备故障等影响而导致部分数据缺失,造成放大气象插值的不确定性现象^[27],但现有的经典时间序列气象插值方法大多从时间^[28]或空间^[29]上考虑插补问题,虽能取得较好结果却不可避免地造成了信息损失,且会造成极端气象参数因平滑处理而失真,不能有效解决缺失的气象数据。本文结合时空连续性建立气象观测站点与其相邻已知气象观测站点气温之间的关系式,反演出较为完整的时空气象观测数据序列并计算各目标站点的温度大于 0℃ 的正积温值,在此基础上制作研究区年均正积温分布图。

选取研究区内 9 个国家基准站和研究区外 20 个辅助站点(包含 1 个印度的气象站点)近 20 年的逐日气温数据。按公式(2)和公式(3)插补出各气象站点缺失的气温数据,形成完整的气温数据序列,并统计插值后的各气象站点年均气温 > 0℃ 的积温 PDD,计算如下:

$$PDD = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_i \tag{4}$$

式中,PDD 表示第 m 年的年均正积温(a·℃);
W_i 为逻辑变量(当 T_i > 0 时,W_i = 1,当 T_i ≤ 0 时,W_i = 0);T_i 为第 i 天的日平均气温(℃)。

利用站点数据进行克里金插值获得研究区全年 > 0℃ 气温累积图(图 4)。

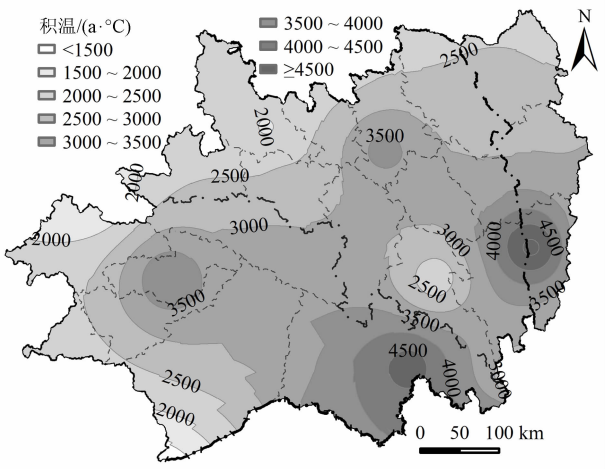


图 4 研究区 2000—2019 年年均正积温分布

Fig. 4 Distribution of annual average positive accumulated temperature from 2000 to 2019

2.4 评价模型

2.4.1 基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型

投影寻踪能充分发现数据内在特征,排除与数据结构特征无关或关系较小的变量干扰,克服高维数据的“维数祸根”,减少人为主观判断,从而在

一定程度上解决多指标数据分类的非线性问题。此外,基于实码加速遗传算法的投影寻踪模型(Real Coded Accelerating Genetic Algorithm-Projection Pursuit Model, RAGA-PP)消除了标准遗传算法早熟收敛、计算量大和精度差等问题^[30]。RAGA-PP模型将与问题有关的高维数据向低维空间投影,随后构造投影目标函数,采用实码加速遗传算法优化投影函数,获取反映其综合指标特性的最优投影特征值,以最佳投影方向向量为权重,与相应评价指标标准化值相乘后累加求和,最终得到投影值。根据投影值的大小进行排序,最佳投影方向向量值越高,则意味着该指标权重越大,对系统影响程度越大。计算如下:

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z(i) - E(Z))^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i,j) * u(R - r(i,j))) \quad (6)$$

式中, S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; $E(Z)$ 为序列 $\{Z(i), i=1 \sim n\}$ 的平均值; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度; R 为局部密度的窗口半径, R 值的大小关系到投影点的搜索范围; $r(i,j)$ 表示样本之间的距离, $r(i,j) = Z(i) - Z(j)$; $u(t)$ 为单位阶跃函数,一般设定为当 $t \geq 0$ 时,其值为1,当 $t < 0$ 时其值为0。

2.4.2 证据权模型

证据权法是以贝叶斯统计模型为基础的多元统计方法,证据图层用二态变量来表示,1表示证据存在,0表示不存在。该模型根据因子的敏感性分析结果计算其正相关权重 W_i^+ 和负相关权重 W_i^- ,最终获取其因子权重 W_{fi} ,在一定程度上避免了因子权重赋值的主观性^[31]。计算如下:

$$W_i^+ = \ln\left(\frac{P\{B/L\}}{P\{B/\bar{L}\}}\right) = \ln\left(\frac{P(B \cap L)/P(L)}{P(B \cap \bar{L})/P(\bar{L})}\right) \quad (7)$$

$$W_i^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{B}/L\}}{P\{\bar{B}/\bar{L}\}}\right) = \ln\left(\frac{P(\bar{B} \cap L)/P(L)}{P(\bar{B} \cap \bar{L})/P(\bar{L})}\right) \quad (8)$$

$$W_{fi} = W_i^+ - W_i^- \quad (9)$$

式中, W_i^+ 表示在该二级因子影响下灾害发生的概率,其值越大,灾害的易发性程度越高; P 表示概率, $P\{B/L\}$ 表示在 L 发生的前提下 B 发生的概率; B 表示二级因子中发生灾害的面积栅格数; L 表示灾害的总面积栅格数, \bar{L} 表示研究区内未发生灾害的栅

格数; W_i^- 表示没有该二级因子影响下灾害发生的概率,其值越小,灾害易发性程度越低; \bar{B} 表示二级因子中未发生灾害的面积栅格数; $W_i^+ = 0$ 或 $W_i^- = 0$ 时表示该二级因子与在发生无关; W_{fi} 表示该二级因子对灾害发生的权重值,反映了影响因子对滑坡的重要性^[18]。

2.4.3 证据权-投影寻踪模型

应用投影寻踪模型对各类指标进行归一化处理时大多通过主观判定,缺乏数据支撑^[32],常存在确定出的权重与主观认知和灾害特征明显不一致的情况,且无法区别各评价指标的作用强弱(贡献率);而证据权模型则较好地考虑了评价因子对灾害评估的敏感性和关联度,在对各评价指标进行归一化时,无论是离散的还是连续的评价指标,均能通过计算将其转换为不同分类级别下的证据权值^[31],从而解决了投影寻踪模型多维指标数据输入时的正反归一化问题,并能客观真实地反映出各评价因子的重要性和方向性。本文耦合证据权模型和基于实码加速算法的投影寻踪模型,构建基于证据权-投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价方法,以解决评价因子归一化、贡献率、权重确定和结果分级与区划的问题,其算法思路与流程如图5所示。

3 结果分析

3.1 评价因子归一化

为消除各因子类型差异、数值差距、分级赋值大小和量纲的影响,需要对各评价因子进行归一化处理,且某一因子对地质灾害具有相同或相似影响程度的范围最适宜划分为一个等级。对于离散型数据,因其自身不同类别或等级就代表了不同的性质或影响能力,因此未对其进行等级划分,故直接根据其类别进行权值计算。而对于连续型数据,则先将其离散化,对比分析灾害个数比、分级面积比及证据权对比度,综合评价各状态对于地质灾害的影响程度,并以灾害个数比和分级面积比的相对大小变化点和对比度的特征点作为临界值,完成评价因子二级状态的分级赋值(图6)。

3.2 权重计算

原始评价指标与地质灾害易发性之间的内在关系差异大且规律不明显,而经过证据权模型划分投影指标二级状态,则明显增大了投影指标间的差异

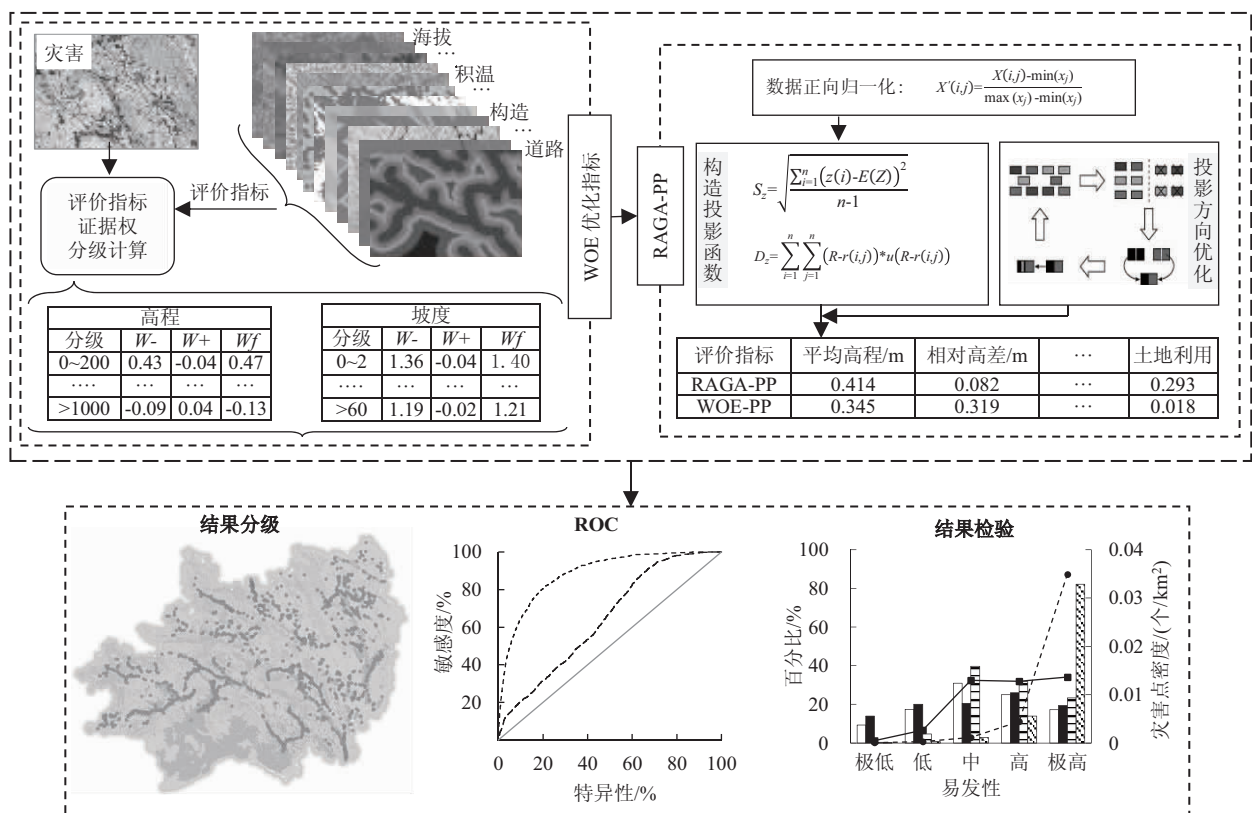


图 5 证据权 - 投影寻踪评价模型计算思维图

Fig.5 Mind map of algorithm flow of WOE-PP model

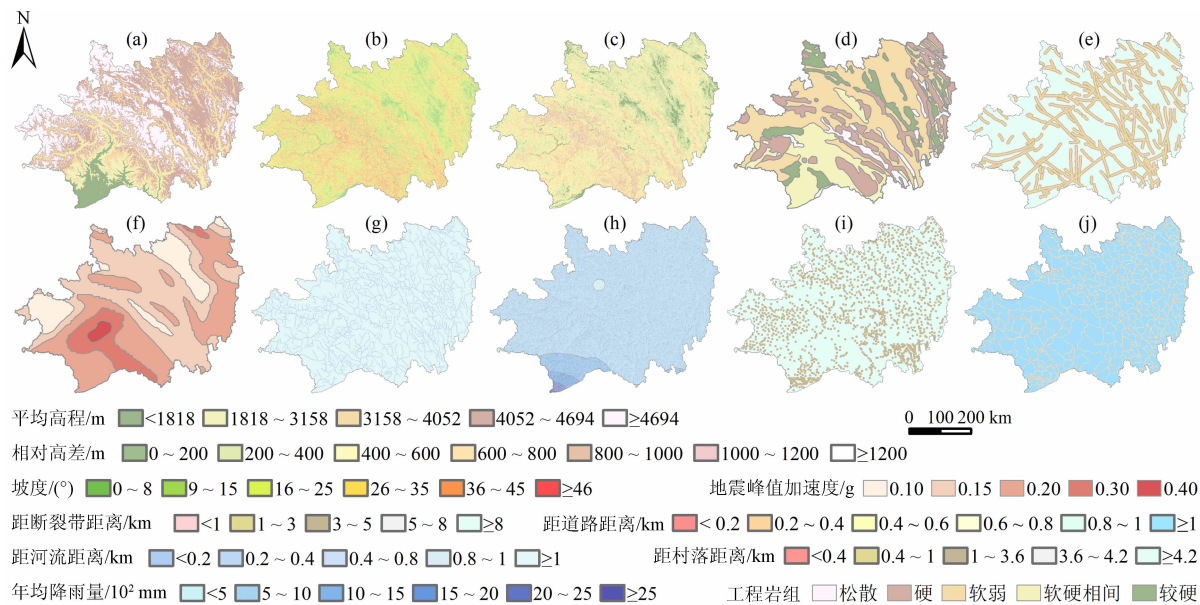


图 6 地质灾害易发性基础评价因子分级图: (a) 平均高程; (b) 坡度; (c) 相对高差; (d) 工程岩组;

(e) 距断裂带距离; (f) 地震峰值加速度; (g) 距河流距离; (h) 年均降雨量; (i) 距村落距离; (j) 距道路距离

Fig. 6 Classification map of evaluation factor for geological hazard susceptibility: (a) average elevation;

(b) slope; (c) relative elevation difference; (d) engineering rock group; (e) distance from fault zone; (f) seismic peak acceleration;

(g) distance from river; (h) average annual rainfall; (i) distance from residential area; (j) distance from road

性,进而获取更佳数据投影方向。以工程岩组和积温为例,对其原始数据进行分类分级,经证据权模型计算其各级证据权值(表2)。其中,灾害个数比和分级面积比的相对大小表征了该指标因子的各状态分级对地质灾害易发性的重要程度。如果前者大于后者,则说明在该状态分级内地质灾害较易发生,反之则说明地质灾害不易发生。

证据权值的大小反映了评价指标的各级因子对地质灾害的影响程度,例如在工程岩组指标中,松散岩土体易发地质灾害,其次是软弱岩组、较硬岩组、软硬相间岩组,硬岩不易发生地质灾害(图7)。研究区自然条件与人类活动的空间分异性导致同一评价指标的不同等级因子对地质灾害的作用关系与程度变化明显,且相同评价指标体系在

同一模型计算下得到的结果也可能差别巨大。未引入证据权模型时,用经验判断和处理评价指标的归一化只是机械的线性过程(如默认距离断裂带越远地质灾害发生的可能性越小),而引入证据权后则使评价指标的处理呈非线性变化过程,且评价指标间的差异性更加明显,从而较好地解决了评价指标及其内部不同级别因子对地质灾害易发性的影响程度(贡献率)。

3.3 评价结果

采用证据权-投影寻踪模型(Weight of Evidence-Projection Pursuit Model, WOE-PP)将各评价指标原始数据经证据权模型处理为二级状态,结合基于实数加速遗传算法优化的投影寻踪方法计算其最佳投影向量(表3)。结果表明,冰川积雪消融量、平均高

表2 评价指标因子分级及其证据权值计算结果

Tab.2 Classification of assessment index factors and their related weight of evidence

指标因子	分类分级	类型	栅格数量/个	分级面积比/%	灾害数量/个	灾害个数比/%	证据权值
工程岩组	软弱	离散	106 882	42.13	1242	48.52	0.26
	软硬相间		46 695	18.40	391	15.27	-0.22
	较硬		28 615	11.28	326	12.73	0.14
	硬		57 716	22.75	344	13.44	-0.64
	松散		13 808	5.44	257	10.04	0.67
积温/ (a·℃)	<2000	连续	6680	2.63	37	1.45	-0.62
	2000~2200		16 827	6.63	132	5.16	-0.27
	2200~2400		19 237	7.58	241	9.41	0.24
	2400~2600		25 489	10.05	263	10.27	0.03
	2600~2800		28 229	11.13	336	13.13	0.19
	2800~3000		26 117	10.29	267	10.43	0.02
	3000~3200		38 177	15.05	355	13.87	-0.10
	3200~3400		37 106	14.63	411	16.05	0.11
	3400~3600		18 930	7.46	192	7.50	0.01
	3600~3800		11 807	4.65	111	4.34	-0.07
	3800~4000		8373	3.30	75	2.93	-0.12
	4000~4200		6299	2.48	34	1.33	-0.64
	4200~4400		4297	1.69	57	2.23	0.28
	4400~4600		3273	1.29	30	1.17	-0.10
	4600~4800		1734	0.68	15	0.59	-0.16
	4800~5000		825	0.33	3	0.12	-1.03
	≥5000		316	0.12	1	0.04	-1.17

注:灾害个数比=指标因子分级区间内发生的灾害数量/全区灾害总数量;分级面积比=指标因子各二级状态面积/指标因子总面积。

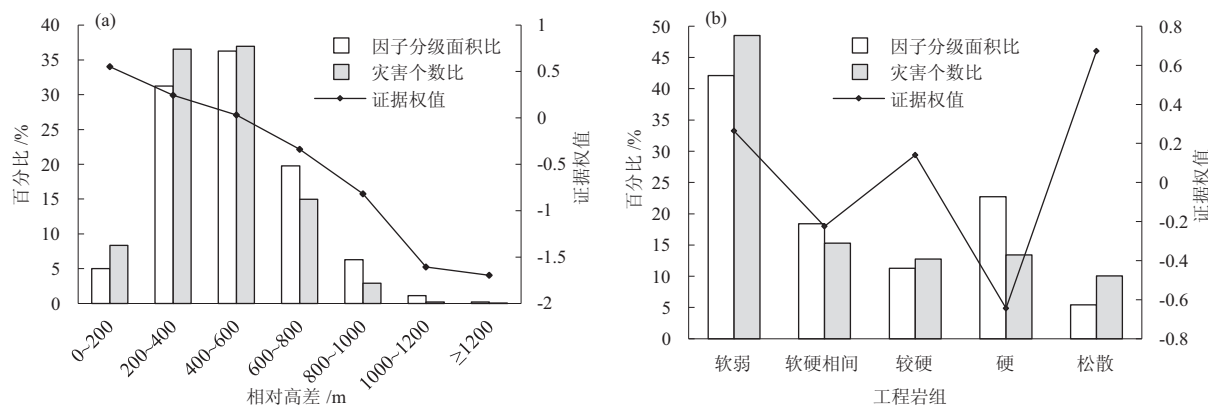


图 7 评价指标证据权值计算结果:(a) 相对高差;(b) 工程岩组

Fig.7 Results of weight of evidence for assessment indicators: (a) relative elevation difference; (b) engineering rock group

表 3 证据权改正前后的投影寻踪模型计算评价指标最佳投影向量的结果

Tab.3 The best projection vector of the assessment index calculated by RAGA-PP and WOE-PP models

评价模型	平均高程/m	相对高差/m	坡度/°	工程岩组	地震加速度/g	距断裂带距离/m	积温/(a·℃)	冰雪消融量/m ³	年均降雨量/mm	距河流距离/m	距居民点距离/m	距道路距离/m	土地利用
RAGA-PP	0.414	0.082	0.086	0.130	0.101	0.400	0.088	0.579	0.061	0.237	0.276	0.251	0.293
WOE-PP	0.345	0.319	0.153	0.196	0.326	0.058	0.469	0.264	0.170	0.353	0.403	0.048	0.018

程和距断裂带距离在研究区地质灾害发育中起主要控制作用。研究区地质灾害主要受气候升温、人类活动、地质构造和地形地貌的影响^[3],与单一实数加速遗传算法优化的投影寻踪模型(RAGA-PP)计算的最佳投影向量相比,WOE-PP模型的计算结果更为合理,主要控制因子均与研究区地质灾害形成机制与发育特征基本吻合。

采用 1 km × 1 km 网格先将研究区划分为 253 716 个评价单元,运用证据权模型划分 13 个多维指标因子的等级状态,再将其结果作为参数输入投影寻踪模型,计算各评价单元的地质灾害易发性大小,并结合研究区地质灾害发育特征和分布规律,采用自然断点法进行地质灾害易发性分级区划与制图(表 4、图 8)。计算结果表明:(1)本文的 WOE-PP 模型评价结果明显优于传统 RAGA-PP 模型的评价结果。随地质灾害易发性等级从低到高,WOE-PP 模型对应区间内灾害数量和灾害密度均逐渐增加,但 RAGA-PP 模型评价结果的高易发区和极高易发区内的灾害数量和灾害密度反而逐渐减少,与实际情况不符。这说明 RAGA-PP 模型并不适用于研究区地质灾害易发性评价,而改进后的 WOE-PP 模型则能较好地评价和预测研究区地质灾害易发程

度。(2)研究区内地质灾害易发性与地质灾害发育具有显著的正相关关系,随着地质灾害易发性等级增高,其地质灾害数量和密度随之快速增大,可根据评价结果选择高易发区和极高易发区作为地质灾害防治规划重点区及重大工程建设与社会经济布局的高风险区。(3)极高易发区占研究区总面积的 19.392%,主要沿嘉黎断裂、怒江断裂和澜沧江断裂等区域性深大活动断裂带和主干河流两侧分布,集中在德格、巴宜、朗县、卡若区、察雅、类乌齐、左贡等 7 个县中的更庆、俄支、俄南、米瑞、仲达、城关、新卡、加桑卡、尚卡、东坝等 10 个乡镇。区内新构造运动活跃,强震多发,岩体十分破碎,临空面卸载强烈,主要分布于坡度 30°~40°,海拔 4000~4500 m、相对高差 800~1200 m,大型群发性崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害广泛发育且规模大,现分布地质灾害 1717 处、占研究区灾害总数的 82.114%,人类工程活动频繁。该区既是研究区人口、社会经济和工程建设集聚区,也是地质灾害防治重点区,不宜开展规模以上工程建设和开发项目。(4)高易发区占研究区总面积的 25.979%,主要沿雅鲁藏布江、怒江、澜沧江等主干河流两侧分布,主要集中在贡觉、芒康、德格、白玉、类乌齐、巴塘、察雅、芒康、墨脱、江达等

表 4 研究区地质灾害易发性评价结果

Tab. 4 Susceptibility assessment results of geological hazards in the study area

模型	易发性 分区	分区 编号	分级 标准	栅格 数量	栅格 占比/%	灾害 数量/处	灾害 占比/%	灾害密度/ (个/km ²)
证据权-投影 追踪模型	极低	I	0.175 ~ 0.973	35 263	13.899	3	0.143	0.001
	低	II	0.973 ~ 1.366	51 059	20.124	16	0.765	0.001
	中	III	1.366 ~ 1.739	52 278	20.610	62	2.965	0.001
	高	IV	1.739 ~ 2.068	65 912	25.979	293	14.012	0.004
	极高	V	2.068 ~ 2.888	49 204	19.392	1717	82.114	0.035
投影追踪模型	极低	I	0.673 ~ 1.098	23 524	9.272	8	0.383	0.001
	低	II	1.098 ~ 1.330	44 434	17.513	85	4.065	0.002
	中	III	1.330 ~ 1.580	78 403	30.902	798	38.164	0.010
	高	IV	1.580 ~ 1.838	63 658	25.090	626	29.938	0.010
	极高	V	1.838 ~ 2.314	43 697	17.223	574	27.450	0.013

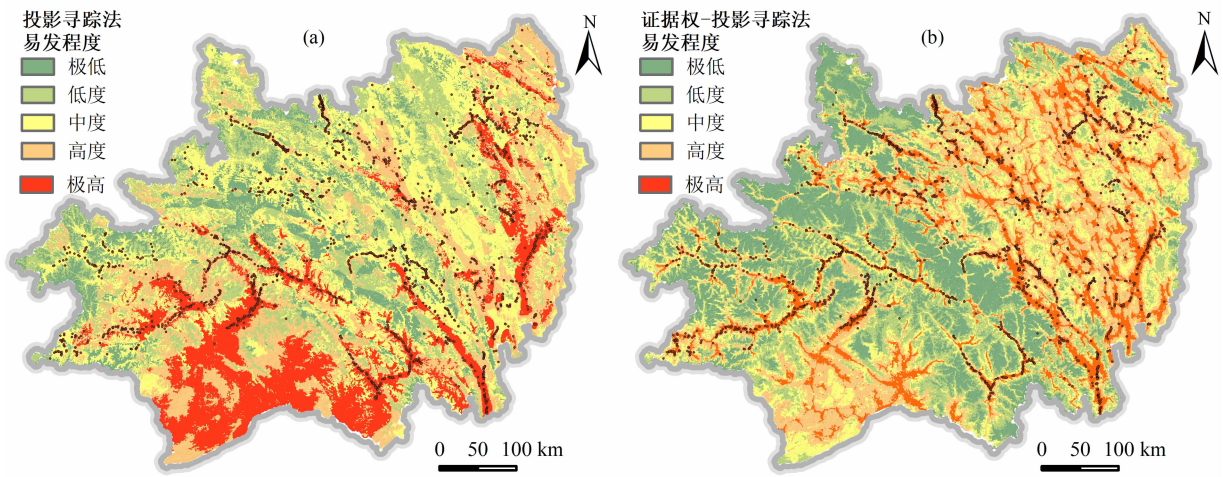


图 8 基于不同模型的地质灾害易发性评价结果:(a)投影追踪模型;(b)证据权-投影追踪模型

Fig. 8 Susceptibility assessment result of geological hazards in the study area by two different models;

(a) projection pursuit model(PP); (b) weight of evidence - projection pursuit model (WOE-PP)

10 个县中的哈加、雄松、罗麦、拉妥、相皮、阿旺、昂多、帮达、温拖、普马、龚垭、麻邛、河坡、伊日、中咱镇、昌波、阿孜、巴日、宗沙、肯通、戈波、嘎托、如美、加热萨、岩比、青泥洞等 26 个乡镇。该区集中于坡度 20°~30°,海拔 3500~4000 m 和相对高差 600~800 m 区域,其大部分为高烈度地震区,岩体较为破碎,山高坡陡,切割强烈,崩塌、滑坡等地质灾害较为发育且发生较为频繁,现分布地质灾害 293 处、占研究区灾害总数的 14.012%,仍是地质灾害高风险区和灾害防治重点区。(5)中易发区占研究区总面积的 20.610%,主要分布于水系发育程度较高、断裂带密度较大、人类工程活动较频繁区域,以及大江、

大河及深切峡谷的支流两岸,主要集中在德格、巴塘、白玉、卡若、左贡、江达等 6 个县中的所巴、中扎科、德达、甲英、辽西、麻绒、妥坝、仁果、邓柯等 9 个乡镇。该区毗邻极高和高易发区,主要分布在坡度 15°~20°,海拔 3000~3500 m 和相对高差 400~600 m 区域,且岩土体结构相对较为完整,植被覆盖较好,崩塌、滑坡等地质灾害以中型为主,现有地质灾害 62 处、占区内灾害总数的 2.965%,发育密度较小,但峡谷和高陡坡地带的软弱岩层区域也常有大型崩塌、滑坡等地质灾害发生,造成中等程度破坏。(6)低易发区占研究区总面积的 20.124%,主要分布在水系发育程度较低、距离活动断裂带和交

通干线相对较远且断裂密度较小的区域,集中在丁青和巴塘等 2 个县中的甘岩、丁青镇、木塔、巴达、夏邛、列衣等 6 个乡镇。该区毗邻中易发区,主要集中于坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,海拔 2000 ~ 3000 m 及以上和相对高差 200 ~ 400 m 区域,岩土体结构相对完整,受构造和高烈度地震影响相对较小,崩塌、滑坡等地质灾害少,以中小型为主,且受小构造和微地貌控制,现有 16 处地质灾害、占灾害总数的 0.765%。区内地质灾害易发性低,可进行适度的现代农林牧业开发建设,也可较大规模社会经济布局和资源开发。(7)极低易发区占研究区总面积的 13.899%,主要分布在地震烈度较低、构造不发育、人类活动少的高山地带和地形相对平缓的高原、平原、山间盆地等区域,集中在边坝和工布江达等 2 个县中的加贡、朱拉、娘蒲、金达等 4 个乡镇。该区毗邻中、低易发区,分布于坡度 $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$,海拔 1000 ~ 2000 m 和相对高差 200 m 以下区域,多为平缓地带,没有地质灾害形成发育的孕灾条件,很少发生地质灾害,现有地质灾害 3 处、占灾害总数的 0.143%。区内经济建设和资源开发可在采取合理的灾害防治条件下按安全区或适宜开发区进行布局。

3.4 精度检验

统计分析历史灾害点在各易发区的密度与比例作为精度检验方法。在 WOE-PP 模型中,地质灾害点密度随着易发性等级由低到高递增而快速增加,且灾害占比也逐渐增加;而在 RAGA-PP 模型中,地质灾害点密度则比较平稳(图 9)。由此说明采用 WOE-PP 模型的地质灾害易发性评价结果更符合灾害形成发育的实际情况^[33]。

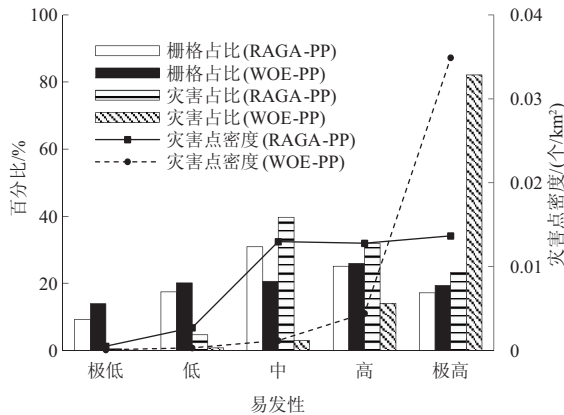


图 9 地质灾害易发性评价结果

Fig. 9 Result of geological hazards in their related susceptibility assessment zone

进一步采用受试工作者特征曲线(ROC)来检验本文提出的 WOE-PP 模型的预测能力。RAGA-PP 模型计算结果的 AUC 值为 0.643,说明此模型的评价精度较低,而改进后的 WOE-PP 模型的 AUC 值则达到 0.884,说明它具有较高的评价精度(图 10)。同时,利用真阳性和假阳性检验(表 5)进行模型的精度验证,其中投影寻踪和证据权-投影寻踪精度分别为 0.529 和 0.815,也说明证据权-投影寻踪评价精度较高,能较好地评估和预测研究区地质灾害发生情况。

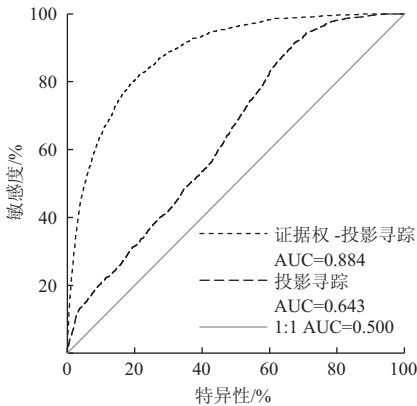


图 10 地质灾害易发性评价结果 ROC 曲线

Fig. 10 ROC curve of geological hazard susceptibility assessment results

表 5 精度检验真阳性和假阳性检验

Tab. 5 Accuracy test true positive and false positive

实际结果	投影寻踪预测结果			证据权-投影寻踪预测结果		
	正例	反例	合计	正例	反例	合计
正例	1153	637	1790	1434	356	1790
反例	118 991	132 935	251 926	46 552	205 374	251 926
合计	120 144	133 572	253 716	47 986	205 730	253 716

4 讨论

(1) 积温和冰雪消融量是影响藏东南地区地质灾害形成发育的重要因素,需要纳入灾害易发性评价指标体系。本文建立的高寒山区地质灾害易发性评价指标体系较好地考虑了灾害的成因机制和数据可获得性,但这些指标均是静态指标,未能引入动态指标进行地质灾害易发性动态评价。后续可结合时空大数据、数值天气系统和高分遥感等技术,动态提

取并计算气温、降水、工程建设等人类活动指标,再结合地形地貌、地质、植被等静态指标,研发技术系统,实现区域地质灾害易发性动态快速评价与预测。

(2)部分指标被均衡化或相对化处理,而未能考虑指标内部不同等级因子的重要性,其不同规模、等级或重要性对地质灾害形成发育具有不同的影响与作用程度(如深大活动断裂对灾害形成发育的影响远大于小断裂带),但现有研究都只是将这些指标均衡化处理(内部有不同等级的指标却按相同重要性统一处理),从而影响灾害易发性评价结果的可靠性和精度。

(3)冰川作为一种特殊的下垫面会在其表面产生较冷的冰川风,形成独特的大气边界层,从而破坏了气温的梯度变化^[34]。本文充分考虑了温度对冰川积雪活动及其诱发的高寒山区地质灾害事件的影响,但研究区气象站点不足且部分站点气象数据缺失,故在计算过程中未考虑冰川风的影响,即认为冰川积雪区内的气温与同高度非冰川积雪区的大气温度一致。因此,积温结果与实际情况存在一定差异。

(4)不同的评价模型均有各自的优缺点和适用性,模型之间没有优劣之分。研究区地质灾害易发性评价模型计算结果表明:单一的证据权模型或投影寻踪模型均有各自的局限性,采用单一模型进行研究区灾害易损性评价,其效果均不理想,而采用多模型耦合建立的证据权-投影寻踪评价方法,则可以较好地避开评价指标数据不完备性和单一模型的缺陷,可取得较好的评价效果与精度。多模型耦合的评价方法是近年来地质灾害易发性评价模型发展趋势之一,也是评价模型多样化、综合化的重要原因。

5 结论

(1)积温和冰雪消融量经证据权改正后的最佳向量值分别达到 0.088 和 0.579,这表明积温和冰川积雪活高寒山区地质灾害易发性评价的重要评价因子,对该区地质灾害形成发育具有重要影响。

(2)提出的气温插补模型中距平差法对气温的插值效果优于以往的平均值法和线性插值法,可较好地解决传统气象缺失数据插补中的不确定性问题。结果表明:提出的距平差法插补后的气温数据

平均绝对误差、方差、均方差分别为 0.58、0.56、0.75,低于平均值法的 0.79、1.02、1.01 和线性插值法的 1.19、4.6、2.14。

(3)藏东南大部分地区为地质灾害中度及以上易发区,其面积占研究区总面积的 65.98%,其地质灾害占研究区灾害总数的 99.09%。其中,极高易发区主要分布在沿嘉黎断裂、怒江断裂和澜沧江断裂等深大活动断裂带和主干江河两侧 2 km 以内区域;高易发区毗邻极高易发区,主要分布在怒江、澜沧江、雅鲁藏布江等江河干流两侧极高易发区以外的区域;中易发区主要位于大江大河支流和峡谷两岸 5~10 km 区域;低易发区和极低易发区则主要集中在距离断裂带和水系 10 km 以外的区域,占总面积的 34.02%,缺少地质灾害形成发育的孕灾条件,很少发生地质灾害,该区共有灾害 19 处,占研究区灾害总数的 0.91%。藏东南地质灾害易发性评价结果符合区内地质灾害分布现状和发育特征,也与前人的研究结果较为一致^[21]。

(4)建立的证据权-投影寻踪模型能有效应用藏东南地质灾害易发性评价,且评价精度高。结果表明:经过证据权调整各指标后输入投影寻踪模型,能成功避免评价指标分级赋值的主观性,并能更好地凸显评价指标之间相似性与差异性的特征关系,从而有利于模型获取稳定的投影方向。

参考文献 (References)

- [1] 张勇,刘时银,刘巧. 1952-2009 年青藏高原东南部贡嘎山海螺沟流域冰川物质平衡数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2018, 3(4): 7-16. [ZHANG Yong, LIU Shiyin, LIU Qiao. A dataset of glacier mass balance of Hailuoguo catchment in Mount Gongga, southeastern Tibetan Plateau, during 1952-2009 [J]. China Scientific Data, 2018, 3(4): 7-16] DOI: 10.11922/csdata.2018.0042.zh
- [2] 王培清,徐国涛,何强. 西藏藏东南地区典型地质灾害成因及防治技术浅析[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 16-20. [WANG Peiqing, XU Guotao, HE Qiang. Analysis on the causes of typical geological disasters in the southeastern Tibet and its prevention technology [J]. Journal of Tibet University, 2013, 28(1): 16-20] DOI: 10.16249/j.cnki.54-1034/c.2013.01.002
- [3] 崔鹏,郭晓军,姜天海,等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1313-1321. [CUI Peng, GUO Xiaojun, JIANG Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1313-

- 1321] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.014
- [4] ANIYA M. Landslide-susceptibility mapping in the Amahata River Basin, Japan [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1985, **75**(1):102-114. DOI: 10.1111/j.1467-8306.1985.tb00061.x
- [5] 谢谟文, 江崎哲郎, 周国云. 基于边坡单元的三维滑坡灾害评价的 GIS 方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(6):969-976. [XIE Mowen, TESTURO Esaki, ZHOU Guoyun. GIS method for slope-unit-based 3D landslide hazard evaluation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(6):969-976]
- [6] SHAHRI A A, SPROSS J, JOHANSSON F, et al. Landslide susceptibility hazard map in southwest Sweden using artificial neural network [J]. *Catena*, 2019, **183**(12):104225. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104225
- [7] MANDAL S, MAITI R. Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Frequency Ratio (FR) model in assessing landslide susceptibility and risk [M]. Singapore: Springer Science + Business Media, 2015:199-226. DOI: 10.1007/978-981-287-146-6-7
- [8] KALANTAR B, PRADHAN B, NAGHIBI S A, et al. Assessment of the effects of training data selection on the landslide susceptibility mapping: A comparison between support vector machine (SVM), logistic regression (LR) and artificial neural networks (ANN) [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, **9**(1):49-69. DOI: 10.1080/19475705.2017.1407368
- [9] AKGUN A, SEZER E A, NEFESLIOGLU H A, et al. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm [J]. *Computers and Geosciences*, 2012, **38**(1):23-34. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.04.012
- [10] FEIZIZADEH B, BLASCHKE T. GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: Comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran [J]. *Natural Hazards*, 2013, **65**(3):2105-2128. DOI: 10.1007/s11069-012-0463-3
- [11] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. *铁道学报*, 1986, **8**(2):51-57. [TAN Bingyan. Quantified comprehensive evaluation for the scope and intensity of mud-rock flow gully activity [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1986, **8**(2):51-57]
- [12] 白世彪, 王建, 闰国年, 等. 基于 GIS 和双变量分析模型的三峡库区滑坡灾害易发性制图[J]. *山地学报*, 2007, **25**(1):85-92. [BAI Shibiao, WANG Jian, LYU Guonian, et al. GIS-based and data drive bivariate landslide susceptibility mapping in the Three Gorge Area, China [J]. *Mountain Research*, 2007, **25**(1):85-92]
- [13] 杨志华, 张永双, 郭长宝, 等. 青藏高原东缘地质灾害影响因子敏感性分析[J]. *工程地质学报*, 2018, **26**(3):673-683. [YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, et al. Sensitivity analysis on causative factors of geohazards in eastern margin of Tibetan plateau [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(3):673-683] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-165
- [14] 武雪玲, 任福, 牛瑞卿, 等. 斜坡单元支持下的滑坡易发性评价支持向量机模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, **38**(12):116-120. [WU Xueling, REN Fu, NIU Ruiqing, et al. Landslide spatial prediction based on slope units and support vector machines [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(12):116-120] DOI: 10.13203/j.whugis.2013.12.006
- [15] 张永宏, 葛涛涛, 田伟, 等. 基于地质大数据的泥石流灾害易发性评价[J]. *计算机应用*, 2018, **38**(11):3319-3325. [ZHANG Yonghong, GE Taotao, TIAN Wei, et al. Evaluation of susceptibility to debris flow hazards based on geological big data [J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, **38**(11):3319-3325] DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2018040789
- [16] 韩用顺, 梁川, 崔鹏, 等. 地形条件对次生山地灾害易发性分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, **42**(z1):15-21. [HAN Yongshun, LIANG Chuan, CUI Peng, et al. Susceptibility of mountain hazards triggered by Wenchuan earthquake to topographic factors [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, **42**(z1):15-21] DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.s1.001
- [17] 杜国梁, 张永双, 吕文明, 等. 基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价[J]. *灾害学*, 2016, **31**(2):226-234. [DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, LYU Wenming, et al. Landslide susceptibility assessment based on weighted information value model in southeast Tibet [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, **31**(2):226-234] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.02.042
- [18] 郭长宝, 唐杰, 吴瑞安, 等. 基于证据权模型的川藏铁路加查—朗县段滑坡易发性评价[J]. *山地学报*, 2019, **37**(2):240-251. [GUO Changbao, TANG Jie, WU Ruian, et al. Landslide susceptibility assessment based on WOE model along Jiacha-Langxian county section of Sichuan-Tibet Railway, China [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(2):240-251] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000418
- [19] 邹强, 王青, 刘延国. 基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性分析[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(3):185-189. [ZOU Qiang, WANG Qing, LIU Yanguo. Evaluation method of debris-flow susceptibility using GIS and logistic model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(3):185-189] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.036
- [20] 胡江顺, 傅荣华, 何天牛, 等. 墨脱公路地质灾害发育分布特征[J]. *地质灾害与环境保护*, 2005, **16**(3):231-234+242. [HU Jiangshun, FU Ronghua, HE Tianniu, et al. Characteristics of geologic hazards developing in Motuo county [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2005, **16**(3):

- 231 - 234 + 242]
- [21] 郭子正, 殷坤龙, 付圣, 等. 基于 GIS 与 WOE-BP 模型的滑坡易发性评价 [J]. 地球科学, 2019, **44** (12): 4299 - 4312. [GUO Zizheng, YIN Kunlong, FU Sheng, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on GIS and WOE-BP model [J]. Earth Science, 2019, **44** (12): 4299 - 4312] DOI: 10.3799/dqkx.2018.555
- [22] 闫举生, 谭建民. 基于不同因子分级法的滑坡易发性评价——以湖北远安县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, **30** (1): 56 - 64. [YAN Jusheng, TAN Jianmin. Landslide susceptibility assessment based on different factor classification methods—a case study in Yuan'an county of Hubei province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, **30** (1): 56 - 64] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.06
- [23] MA Shuyue, QIU Haijun, HU Sheng, et al. Quantitative assessment of landslide susceptibility on the Loess Plateau in China [J]. Physical Geography, 2020, **41** (6): 489 - 516. DOI: 10.1080/02723646.2019.1674559
- [24] 谢贤健, 韦方强, 张继, 等. 基于投影寻踪模型的滑坡危险性等级评价 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, **40** (9): 1598 - 1606. [XIE Xianjian, WEI Fangqiang, ZHANG Ji, et al. Application of projection pursuit model to landslide risk classification assessment [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, **40** (9): 1598 - 1606] DOI: 10.3799/dqkx.2015.144
- [25] 徐江. 藏东南地区泥石流分布特点及其活动特征 [J]. 西藏科技, 2020, **327** (6): 17 - 20. [XU Jiang. Distribution and activity characteristics of debris flow in southeast Tibet [J]. Tibet Science and Technology, 2020, **327** (6): 17 - 20]
- [26] 李菲, 郜永祺, 万欣, 等. 全球变暖与地球“三极”气候变化 [J]. 大气科学学报, 2021, **44** (1): 1 - 11. [LI Fei, GAO Yongqi, WAN Xin, et al. Earth's “three-poles” climate change under global warming [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, **44** (1): 1 - 11] DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201031003
- [27] LOPEZ M G, WENNERSTRÖM H, NORDÉN L, et al. Location and density of rain gauges for the estimation of spatial varying precipitation [J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2015, **97** (1): 167 - 179. DOI: 10.1111/geoa.12094
- [28] 刘田, 阳坤, 秦军, 等. 青藏高原中、东部气象站降水资料时间序列的构建与应用 [J]. 高原气象, 2018, **37** (6): 1449 - 1457. [LIU Tian, YANG Kun, QIN Jun, et al. Construction and applications of time series of monthly precipitation at weather stations in the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2018, **37** (6): 1449 - 1457] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00060
- [29] GOMEZ J L, PASTORIZA F T, ÁLVAREZ E G, et al. Comparison between geostatistical interpolation and numerical weather model predictions for meteorological conditions mapping [J]. Infrastructures, 2020, **5** (2): 15. DOI: 10.3390/infrastructures5020015
- [30] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型 [J]. 水资源保护, 2021, **37** (3): 1 - 6. [JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection, 2021, **37** (3): 1 - 6] DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.001
- [31] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例 [J]. 工程地质学报, 2014, **22** (3): 474 - 481. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: A case study in Guizhou, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22** (3): 474 - 481] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.03.017
- [32] 王顺久, 张欣莉, 丁晶, 等. 投影寻踪聚类模型及其应用 [J]. 长江科学院院报, 2002, **19** (6): 53 - 55 + 6. [WANG Shunjiu, ZHANG Xinli, DING Jing, et al. Immune evolutionary algorithm and its application to parameters optimization in storm intensity formula [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, **19** (6): 53 - 55 + 6]
- [33] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models [J]. Environment Earth Science, 2010, **60**: 1037 - 1054. DOI: 10.1007/s12665-009-0245-8
- [34] 赵传熙, 杨威, 朱美林, 等. 冰川区不同气温估算方法评估——以藏东南帕隆 4 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2019, **41** (6): 1281 - 1291. [ZHAO Chuanxi, YANG Wei, ZHU Meilin, et al. Evaluation on three methods of temperature estimation at glacierized regions: Taking the Parlun No. 4 Glacier in the southeastern Tibetan Plateau as example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41** (6): 1281 - 1291] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0085

Susceptibility Evaluation of Geological Hazards Based on Evidence Weight-Projection Pursuit Model in Southeast Tibet, China

HAN Yongshun^{1,2}, SUN Xiangyan¹, LIU Tong², CHEN Yongguo^{3*}

(1. School of Resource Environment and Safety, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan China;

2. Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan China)

Abstract: Southeast Tibet is a concentrated area of marine glaciers, a major engineering construction area and an area prone to geological hazards in China. The susceptibility evaluation of plateau geological hazards is one of the important technical bases and hot issues for hazards prevention and mitigation in this area. In this paper, considering the impact of climate change and glacier snow activities on the formation and development of geological hazards in alpine mountainous areas, two characteristic factors such as the accumulated temperature and the glacier snow melting amount were introduced, and the distance adjustment meteorological interpolation method and the generalized model of glacier snow ablation amount were proposed respectively. Then, thirteen factors were selected from the aspects of hazard-developing environment, dynamic conditions and human disturbance, and the susceptibility evaluation index system of geological hazards in Southeast Tibet was established. Finally, the evidence weight-projection pursuit model was constructed to realize the susceptibility evaluation calculation, classification zoning and accuracy verification of geological hazards in study area. The results show that: (1) Accumulated temperature and glacier snow melting amount had a significant impact on the susceptibility of geological hazards in alpine mountainous areas, with the optimal vector values of 0.088 and 0.579. (2) The proposed temperature interpolation model based on the distance adjustment method was better than the average method and the linear interpolation method for temperature prediction, which can effectively solve the problems of missing meteorological data and amplification of interpolation values. (3) Most of the study areas were located in moderate and above geo-hazard susceptibility zones, accounting for 65.98% of the total area, the extremely high-susceptibility zones were concentrated within the area of 2 km on both sides of the deep active faults and the main stream systems, the high-susceptibility zones were concentrated in the approximate ring-shape area of 2 ~ 5 km on both sides of the main stream system and the moderate-susceptibility zones were mainly distributed in the area of 5 ~ 10 km on both sides of the canyon and the main stream system as well as the tributaries of large rivers. (4) The established evidence weight-projection pursuit model could better realize the susceptibility evaluation of geological hazards in the study area, and its success rate curve test value reached 0.884, which was of good practicability. The research results enrich the theory and method of regional geological disaster susceptibility evaluation, and provide reference for objective and rapid evaluation of geological disaster susceptibility in Southeast Tibet.

Key words: geological disaster; susceptibility evaluation; index system; evidence weight-projection pursuit model; Southeast Tibet