

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.012

基于 GIS 的空间 TOPSIS 模型的 安徽省休宁县滑坡易发性评价

袁亚南¹, 喻根¹, 方斌²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 200009; 2. 安徽省地质矿产勘查局 332 地质队, 安徽 黄山 245000)

摘要:文章在常规 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)模型的基础上提出空间 TOPSIS 模型,以安徽省休宁县为例,采用地理信息系统(geographic information system, GIS)技术对安徽省休宁县的滑坡易发性进行评价。研究表明:基于 GIS 的空间 TOPSIS 模型的滑坡易发性评价,能够处理和分析滑坡评价因子以及滑坡易发性的空间变化特征;评价结果与休宁县境内已经发生滑坡的空间分布较为吻合,评价结果较好。基于 GIS 的空间 TOPSIS 模型在滑坡易发性评价中具有较好的适用性。

关键词:滑坡;地理信息系统(GIS);TOPSIS 模型;易发性评价;休宁县

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)08-1087-08

Assessment of landslide susceptibility in Xiuning County, Anhui Province using GIS-based spatial TOPSIS model

YUAN Yanan¹, YU Gen¹, FANG Bin²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. No. 332 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Huangshan 245000, China)

Abstract:Based on the conventional technique for order preference by similarity to ideal solution(TOP-SIS) model, this paper proposes a spatial TOPSIS model, and evaluates the landslide susceptibility in Xiuning County, Anhui Province using geographic information system(GIS). The results show that the landslide susceptibility assessment using GIS-based spatial TOPSIS model can process and analyze the spatial variation characteristics of landslide-affecting factors and landslide susceptibility. The resulted landslide susceptibility is in good agreement with the spatial distribution of landslides occurred in Xiuning County. The GIS-based spatial TOPSIS model has a good applicability in the assessment of landslide susceptibility.

Key words:landslide; geographic information system(GIS); technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) model; susceptibility assessment; Xiuning County

滑坡是岩石、碎石或土的块体沿斜坡移动的一种现象,是显著改变地球地表面景观的自然地质过程^[1],是自然灾害中最常见的类型之一,具有分布广、发生频率高、运动速度快、致灾严重等特点^[2]。文献[3]分析近年来全球致命性非地震滑坡数据,发现在 55 997 次滑坡事件中有 4 862 人

失去生命,由人类活动特别是非法采矿和切割山体所引发的滑坡正在增加。因此,研究滑坡的易发性对于防灾减灾具有重要的现实意义。目前,对于滑坡易发性评价,主要是基于地理信息系统(geographic information system, GIS)技术与数学模型相结合的方法。这些被广泛应用的数学模

收稿日期:2021-05-08;修回日期:2021-05-21

基金项目:安徽省公益性地质调查资助项目(2011-g-33)

作者简介:袁亚南(1992—),女,河南郑州人,合肥工业大学硕士生;

喻根(1963—),男,安徽全椒人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:yugen@hfut.edu.cn.

型包括逻辑回归模型、决策树模型、确定性系数法、信息量模型、神经网络模型、支持向量机模型等^[4]。然而,将 GIS 技术与 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) 模型相结合,进行滑坡空间易发性评价的相关研究相对较少。文献[5]归纳了 TOPSIS 模型在 9 个方面的应用:① 供应链管理和物流;② 设计、工程和制造系统;③ 商业和营销管理;④ 健康、安全和环境管理;⑤ 人力资源管理;⑥ 能源管理;⑦ 化学工程;⑧ 水资源管理;⑨ 医药、农业、教育等其他领域。

近年来,将 TOPSIS 模型应用于滑坡研究。文献[6]利用层次分析法和 TOPSIS 模型,研究贵州省毕节地区的滑坡易发性;文献[7]运用理想点模型,选取 7 条泥石流为评价对象,对陇南市武都区泥石流灾害进行危险性评价;文献[8]研究伊朗戈勒斯坦省滑坡、洪涝及水土流失灾害综合管理,根据灾害综合威胁程度,将戈勒斯坦省 14 个行政区进行排序;文献[9]基于组合权重-TOPSIS 模型,以 10 个边坡为例,选取 8 个指标体系对岩质边坡稳定性进行评价;文献[10]分析 TOPSIS 模型。并对单个采空区边坡的稳定性进行研究。这些研究实例均采用常规的 TOPSIS 模型,不考虑诱导滑坡产生因素以及滑坡易发性的空间变化特征。事实上,地层岩性、土地利用类型以及降雨量等滑坡评价因子或评价指标的属性值具有空间变化特征,即在一个研究区范围内,不同的空间位置存在不同的地层岩性单元、土地利用类型以及不同的降雨量;滑坡的易发性也有所不同,表现为空间上的异质性。对 TOPSIS 模型进行扩展,使其能够处理和分析滑坡评价因子以及滑坡易发性的空间变化特征,具有理论意义和应用价值。本文在常规 TOPSIS 模型的基础上,以休宁县滑坡多发区为例,探讨基于 GIS 的空间 TOPSIS 模型在滑坡易发性评价中的可行性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

休宁县位于皖南山区的最南部,属黄山市管辖,地理位置位于东经 $117^{\circ}38' \sim 118^{\circ}26'$,北纬 $29^{\circ}24' \sim 30^{\circ}02'$ 之间,面积约为 $2\,190\text{ km}^2$ 。境内山势巍峨,绵延起伏、沟谷幽深、山坡陡峭、河流纵横。总体上地势高差大,表现为南北高、中间低的特点;山地、丘陵广泛分布。中部为休宁盆地,最低处高程为 130 m ,县内最大高差达 $1\,500\text{ m}$;县

境河网密布,共有大小河流 237 条,大部分水系属钱塘江流域,仅南端局部(岭南乡)属长江流域;气候属亚热带季风性湿润气候,多年平均降雨量约 $1\,697.6\text{ mm}$,季节分布不均,主要集中在春、夏汛期(3—7 月);区内地层岩性组成复杂,属下扬子地层区江南地层分区,出露有中元古代蓟县纪—长城纪、晚元古代青白口纪、震旦纪、早古生代寒武纪、晚古生代石炭纪、二叠纪、中生代侏罗纪和白垩纪地层,现代沟谷部分地段分布有第四纪松散沉积物;区内地质构造较为复杂,地处扬子陆块东南部的江南隆起带,经历了皖南、印支和燕山多期次构造活动,形成一系列的褶皱、断裂和岩浆侵入活动,历史上多次发生滑坡等地质灾害。

1.2 数据来源

研究区域内共有 830 个滑坡点数据,来源于《1:50 000 休宁县地质灾害调查和遥感解译》研究项目成果数据库。断层、地层岩性和地貌单元数据来源于 1:50 000 地质图;河流、道路数据以及数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于测绘部门 1:10 000 地形图数字线划地图(digital line graphic, DLG)数据;坡度和坡向数据采用 1:10 000 DEM 数据计算获得;降雨量数据来源于国家气象信息中心;土地利用类型数据来源于休宁县土地利用调查数据。

2 研究方法

2.1 常规理想点方法

常规的理想点方法采用多个评价因子或评价指标,计算一组决策方案与某个参照点的分离程度,并根据所计算的分离程度对这一组决策方案进行排序^[11]。参照点通常用正理想点或负理想点进行定义,正理想点表示评价因子或评价指标属性值的最优值,而负理想点则表示评价因子或评价指标属性值的最差值^[12]。

一个决策方案与参照点的分离度可以由距离 L_p 定义如下^[11]:

$$L_p(A_i) = \left[\sum_{k=1}^n (w_k | t_k - v(\alpha_k) |)^p \right]^{1/p} \quad (1)$$

其中: A_i 为第 i 个决策方案; w_k 为第 k 个评价因子或评价指标的权重, $0 \leq w_k \leq 1$, $\sum_{k=1}^n w_k = 1$; t_k 为第 k 个评价因子或评价指标的参照值,例如第 k 个评价因子或评价指标属性值的最优值或最差值; $v(\alpha_k)$ 为第 k 个评价因子或评价指标的属性值,如果将各个评价因子或评价指标的属性值进

行标准化处理后,那么 $v(\alpha_k) \in [0, 1]$,相应地,正理想点 $A^+ = (1, 1, \dots, 1)$,负理想点 $A^- = (0, 0, \dots, 0)$ ^[13]。

p 为一个参数,数值变化范围为 $[1, \infty)$ 。当 $p=2$ 时, L_p 就是欧式距离,其表达式为:

$$L_2(A_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\omega_k | t_k - v(\alpha_k) |)^2} \quad (2)$$

2.2 常规 TOPSIS 模型

根据参照点和分离度 L_p 的定义,可以利用距离 L_p 、正理想点和负理想点,设计多个决策分析模型,其中最著名的是 TOPSIS 模型,即逼近理想解排序法,简称为优劣解距离法^[14]。

由于各个评价因子或评价指标的属性值经过标准化处理后, $v(\alpha_k) \in [0, 1]$,正理想点 $A^+ = (1, 1, \dots, 1)$,负理想点 $A^- = (0, 0, \dots, 0)$,可以利用 L_p ,将正理想点模型表示为:

$$L_p^+(A_i) = \left[\sum_{k=1}^n (\omega_k | 1 - v(\alpha_k) |)^p \right]^{1/p} \quad (3)$$

将负理想点表示为:

$$L_p^-(A_i) = \left[\sum_{k=1}^n (\omega_k v(\alpha_k))^p \right]^{1/p} \quad (4)$$

常规 TOPSIS 模型是利用 $L_p^+(A_i)$ 与 $L_p^-(A_i)$ 所构成的综合指标,该指标将距离正理想点最近同时距离负理想点最远的决策方案定义为最优决策方案。常规 TOPSIS 模型的计算公式为:

$$L_p^\pm(A_i) = \frac{L_p^-(A_i)}{L_p^+(A_i) + L_p^-(A_i)} \quad (5)$$

其中, $0 \leq L_p^\pm(A_i) \leq 1$, $L_p^\pm(A_i)$ 表示第 i 个决策方案 A_i 与正理想点 A^+ 的相对贴适度, $L_p^\pm(A_i)$ 数值越高,则决策方案越优。

2.3 空间理想点方法和空间 TOPSIS 模型

地层岩性、土地利用类型以及降雨量等滑坡因子或评价指标的属性值具有空间变化特征,即在一个研究区范围内,不同的空间位置存在不同的地层岩性单元、土地利用类型以及不同的降雨量。滑坡因子或评价指标属性值的空间变化特征,可以利用 GIS 技术,用 GIS 图层的形式进行有效的表达和分析。而常规的理想点方法以及常规的 TOPSIS 模型,均未考虑评价因子或评价指标属性值的空间变化特征。因此,需要对常规理想点方法和常规 TOPSIS 模型进行扩展,使其便于采用 GIS 技术进行分析和计算。文献[15]在分析水资源管理问题时,对常规正理想点方法进行扩展,提出空间正理想点计算方法。文献[11]将空间正理想点计算表达式归结为:

$$L_p^+(A_{i(x,y)}) = \left[\sum_{k=1}^n (\omega_{i(x,y)k} | 1 - v(\alpha_{i(x,y)k}) |)^p \right]^{1/p} \quad (6)$$

其中: $\omega_{i(x,y)k}$ 为第 k 个价因子或评价指标的权重,与位于座标 (x, y) 位置的第 i 个决策方案 $A_{i(x,y)}$ 相关; $v(\alpha_{i(x,y)k})$ 为位于 (x, y) 位置的第 i 个决策方案 $A_{i(x,y)}$ 的属性标准化值。参照文献[15],本文对常规负理想点模型和常规 TOPSIS 模型进行扩展,将空间负理想点模型表示为:

$$L_p^-(A_{i(x,y)}) = \left[\sum_{k=1}^n (\omega_{i(x,y)k} v(\alpha_{i(x,y)k}))^p \right]^{1/p} \quad (7)$$

将空间 TOPSIS 模型表示为:

$$L_p^\pm(A_{i(x,y)}) = \frac{L_p^-(A_{i(x,y)})}{L_p^+(A_{i(x,y)}) + L_p^-(A_{i(x,y)})} \quad (8)$$

其中: $L_p^\pm(A_{i(x,y)})$ 为位于 (x, y) 位置的第 i 个决策方案 $A_{i(x,y)}$ 与正理想点 A^+ 的相对贴适度, $0 \leq L_p^\pm(A_{i(x,y)}) \leq 1$, $L_p^\pm(A_{i(x,y)})$ 数值越高,则决策方案越优。

本文研究采用欧氏距离计算决策方案与参照点的分离度 L_p ,即取参数 $p=2$ 。

2.4 GIS 数据结构、决策方案和滑坡易发区域

目前常用的 2 种 GIS 数据结构是栅格数据和矢量数据。栅格数据是将空间分割成有规则的网格,在各个网格上给出相应的属性值来表示空间实体的一种数据组织形式。矢量数据是用欧氏空间的点、线、面等几何元素来表达空间实体的几何特征的数据。

带有地理空间位置的决策方案 $A_{i(x,y)}$,可根据 GIS 数据结构来进行定义。采用栅格数据时,一个决策方案可以定义为一个栅格或一组栅格;采用矢量数据时,一个决策方案可以定义为一个表示地理实体的几何元素或一组几何元素^[11]。由于栅格数据更适合进行地图代数运算的空间分析,空间 TOPSIS 模型是多个空间变量的代数运算,因此本研究采用栅格定义决策方案 $A_{i(x,y)}$,即任何一个决策方案 $A_{i(x,y)}$ 是由一个栅格组成,每个栅格由其坐标 (x, y) 确定其空间位置。

基于上述分析,一个研究地区的空间范围可以采用 GIS 栅格数据划分成多个栅格;一个栅格构成一个决策方案。依据相对贴适度值 $L_p^\pm(A_{i(x,y)})$ 的大小,在 ArcGIS 中采用自然断点法,将研究区内的多个栅格决策方案从高到低分成若干类别。自然断点法是一种常见的聚类分类方法,即在分级类别确定的情况下,通过迭代计算

类间的数据间断点,使类中的差异最小化,类间的差异最大化,从而对数据中的相似值进行最恰当的分组。参照文献[16],方案分为高、中和低 3 个类别,则高类别决策方案、中类别决策方案和低类别决策方案对应研究地区不同的空间范围,分别表示滑坡高易发区、滑坡中易发区和滑坡低易发区。

根据研究区滑坡影响因素(坡度、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路、土地利用类型、坡向 9 个因子)空间数据的精度,本研究采用 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 栅格进行分析。

2.5 滑坡易发性评价因子及其权重

2.5.1 滑坡易发性评价因子与滑坡关系

利用 ArcGIS10 的空间分析功能,将所选 9 个因子图层进行各评价因子的状态分级,与滑坡灾害点进行叠加分析,并统计出各个分级区域内的滑坡比例,分析滑坡与各评价因子之间的空间关系,结果如图 1 所示。

1) 坡度。坡度是滑坡发生的必要地形条件,坡度的陡缓程度影响斜坡的稳定性。从图 1a 可以看出,滑坡发育主要集中在 $5^\circ\sim 45^\circ$ 范围内。

2) 降雨量。降雨量是触发滑坡发生的一个重要因素。由于水体入渗导致岩体力学强度降低,岩体自重应力增加,斜坡容易发生变性破坏发生滑坡。研究区内多年平均降雨量在 $1\ 707\sim 1\ 787\text{ mm/a}$ 之间。从图 1b 可以看出,研究区内 65% 的滑坡出现在多年平均降雨量为 $1\ 723\sim 1\ 747\text{ mm/a}$ 的区域内,其中多年平均降雨量 $1\ 723\sim <1\ 731\text{ mm/a}$ 、 $1\ 731\sim <1\ 739\text{ mm/a}$ 、 $1\ 739\sim <1\ 747\text{ mm/a}$ 区域内滑坡出现的比例分别为 15%、19%、31%;其余区域滑坡出现的比例相对较小,均在 10% 以下。野外调查表明,研究区内每年滑坡灾害一般发生在 4—8 月的汛期,尤以 5—7 月主汛期为多。由此可见,研究区内滑坡灾害的发生,在时间上与汛期密切相关,在空间上主要出现在多年平均降雨量为 $1\ 723\sim 1\ 747\text{ mm/a}$ 的区域内。

3) 河流。河流的分布与地区的斜坡稳定性和降雨量都有着密切的关系,从而影响滑坡的发生。从图 1c 可以看出,滑坡点主要落在河流附近,其中距离河流 50 m 以内范围的比例最大,占滑坡总数量的 34.46%, $50\sim <100\text{ m}$ 范围内滑坡数占比为 16.63%, $100\sim 150\text{ m}$ 范围内滑坡数占比为 8.92%。随着距离河流的间距越大,滑坡数量呈现减少的趋势,表明研究区内滑坡与河流

存在密切的空间关系。

4) 断层。距离断裂带越近,发生的滑坡灾害越多。研究区内经历了皖南、印支和燕山多期次构造活动,形成一系列的褶皱断裂构造,使得区域内岩石破碎,力学强度也相对下降,从而造成滑坡沿断裂构造带呈明显的带状分布。从图 1d 可以看出,距离断层越近,滑坡出现的比率越大,随着与断层的距离增大,滑坡地质灾害的发生依次呈递减趋势,表明研究区滑坡的出现与断层的空间关系密切。

5) 地层岩性。滑坡地质灾害的发生和分布与地层岩性的特征有着密切的关系。地层岩性由于在不同的时期其原始结构、矿物组成成分和所经历的地貌过程不同,导致其岩土体强度、应力分布、变形破坏特征和抗风化能力都存在着差异。从图 1e 可以看出,发生滑坡灾害比例较高的地层单元有中元古代木坑组(Pt_2m) (岩性主要为千枚岩、含砂粉砂岩夹粉砂质千枚岩、千枚岩),中元古代牛屋组(Pt_2n) (岩性主要为变长石岩屑砂岩、变粉砂岩、粉砂质板岩),晚元古代井潭组(Qn_j) (岩性主要为变流纹质英安岩、变流纹岩、变流纹质斑岩),中元古代板桥组(Pt_2b) (岩性主要为千枚状粉砂质板岩与粉砂质千枚岩),白垩纪徽州组(K_1h) (岩性主要为砾岩、岩屑砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩)以及晚元古代震旦纪休宁组(Z_1x) (岩性主要为凝灰质砂岩、粉砂岩、泥岩韵律夹沉凝灰岩);其余各地层单元内发生的滑坡比例较低,均小于 5%。这表明研究区内滑坡的发生与这些特定的地层岩性空间关系紧密。

6) 地貌单元。不同的地貌单元内,滑坡的发生频率有所不同,研究区内地貌单元复杂。从图 1f 可以看出,研究区内滑坡集中发育在剥蚀-侵蚀地貌单元内。剥蚀-侵蚀地貌单元内岩土松散,物源丰富,地形坡度较大,滑坡极易发生。

7) 道路。道路一般需要跨越岩性、地貌单元、地质构造等因素,加上在修建过程中人为不合理的开挖,会降低岩质边坡稳定性。研究区在修建道路的过程中,由于不合理的放坡,一些路段缺少对道路两边岩质土体的加固,加剧当地的滑坡地质灾害的发生。从图 1g 可以看出,落在道路两侧 50 m 范围内的滑坡数量最大,占滑坡总数量的 73%,随着缓冲距离的增加,落入各段缓冲区内的滑坡数量是逐渐变少。这表明研究区滑坡地质灾害的分布与道路空间关系密切。

8) 土地利用类型。不同的土地利用类型对

滑坡发生的影响程度也不相同,而人类不合理的土地利用方式会加剧滑坡地质灾害的发生。从图 1h 可以看出,发生滑坡灾害比例较高的有林地和山地水田 2 种土地利用类型。说明研究区内过量砍伐造成水土流失以及不合理的耕作制度(如陡坡耕种、旱田改水田)会加大地表水不断入渗,这些往往恶化了地质环境,使山地滑坡发生率得到增加。

9) 坡向。坡向也是滑坡形成的影响因素之一。一方面,不同坡向区域的太阳辐射会有所差异,从而造成岩石风化程度的不同;另一方面,不同坡向区域的降雨量和热量有所不同,从而导致坡体的植被、土壤存在差异。从图 1i 可以看出,研究区内滑坡主要发生在南坡,即在坡向为东南、南、西南这 3 个区域,滑坡地质灾害相对较为发育。

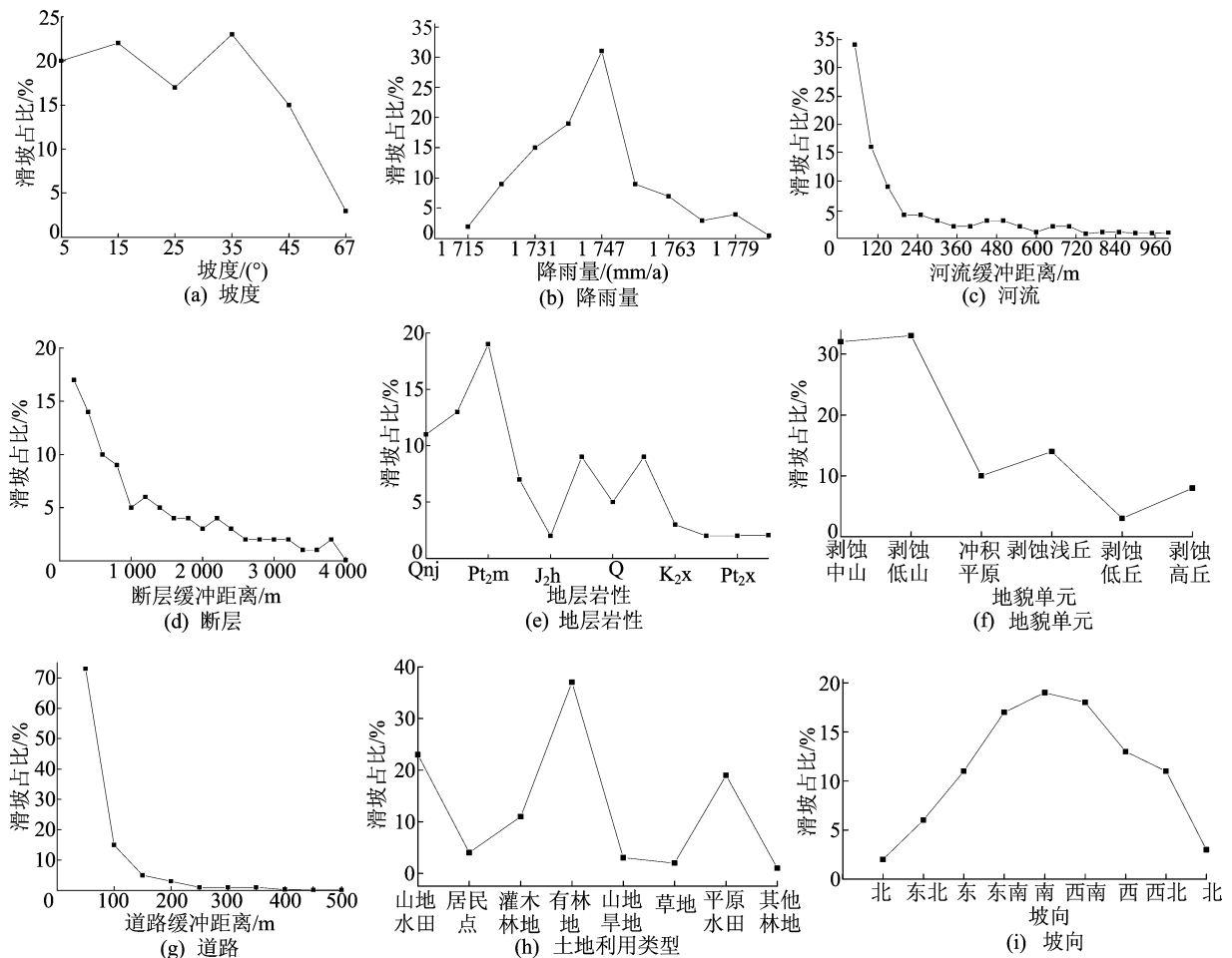


图 1 滑坡易发性评价因子与滑坡的关系

2.5.2 滑坡易发性评价因子权重

本文采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各指标因子的权重。AHP 是 20 世纪 70 年代美国学者 Saaty T L 提出的多目标决策理论,是通过专家估计两个因子之间的关系,确定其相对重要性来构造矩阵^[17]。坡度、坡向、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路、土地利用类型等 9 个因子比较的定性描述指标见表 1 所列。

根据表 1 中的标度值,对坡度、坡向、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路、土地利用

类型等 9 个指标因子进行两两比较,比较矩阵见表 2 所列。

表 1 判断矩阵指标因子 1~9 标度值的含义

标度值	含义
1	a 与 b 具有同等重要性
3	a 比 b 稍微重要
5	a 比 b 明显重要
7	a 比 b 极其重要
9	a 比 b 极端重要
2,4,6,8	a 与 b 重要性介于上述之间
倒数	与上述情况相反

表 2 因子权重的配对比较矩阵

因子	断层	河流	地貌单元	降雨量	坡向	道路	岩性	土地利用	坡度	权重
断层	1	2	4	5	3	1	2	4	4	0.208
河流	1/2	1	4	5	4	1/2	1	5	2	0.159
地貌单元	1/4	1/4	1	2	1	1/5	1/3	1/5	1/2	0.040
降雨量	1/5	1	1/2	1	1/2	1/5	1/4	1/2	1/3	0.030
坡向	1/3	1/4	1	2	1	1/4	1/2	2	1/2	0.058
道路	1	2	5	5	4	1	3	4	4	0.238
岩性	1/2	1	3	4	2	1/3	1	2	3	0.123
土地利用	1/3	1/5	5	2	1	1/4	1/2	1	1/2	0.064
坡度	1/4	1/2	2	3	2	1/4	1/3	2	1	0.075

运用 yaahp 软件对评价因子关系矩阵进行求解。求得矩阵的最大特征根 λ_{\max} 为 9.5816, 计算矩阵的一致性指标 $I_C = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, 得到 I_C 为 0.072。当指标因子为 9 时, 随机指数 I_R 取 1.46, 计算得到一致性比率 $R_C = I_C/I_R = 0.049 < 0.100$, 说明该矩阵的一致性是可以接受的。本次评价的权重矩阵为 $w = [0.208 \ 0.159 \ 0.040 \ 0.030 \ 0.058 \ 0.238 \ 0.123 \ 0.064 \ 0.075]$, 以其作为空间 TOPSIS 模型的权重系数。

2.6 基于 GIS 的滑坡易发性模型构建

根据空间正理想点、空间负理想点以及空间 TOPSIS 模型, 在 ArcGIS10 中, 利用 ModelBuilder 模块的构建模型, 计算决策方案 $A_{i(x,y)}$ 与正理想点 A^+ 的相对贴近度。模型中包含坡度、坡向、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路、土地利用类型 9 个因子, 即 n 取值为 9, k 分别取值为 1~9。这 9 个滑坡评价因子的权重 $w_{i(x,y)k}$ 见表 2 所列。

在 ArcGIS10 中, 将研究区已经发生的 830 个历史滑坡点空间分布数据分别与坡度、坡向、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路和土地利用类型 9 个因子图层进行叠加分析, 统计计算出 9 个因子各个分级或分类空间区域内出现滑坡数量百分比; 再将此百分比统计数值进行 min-max 标准化处理后, 作为评价因子的属性标准化值 $v(\alpha_{i(x,y)k})$, 以其反映各个因子在研究区内不同空间位置触发滑坡的相对能力大小。 $v(\alpha_{i(x,y)k})$ 值越大的评价因子分级或分类区域, 发生滑坡的可能性越大。

3 结果分析

3.1 空间 TOPSIS 模型计算结果及滑坡区划

根据 TOPSIS 模型公式中的式(6)~(8), 利用 ArcGIS10 的 ModelBuilder 模块进行建模分析, 计算决策方案与正理想点 A^+ 的相对贴近度,

结果如图 2 所示。

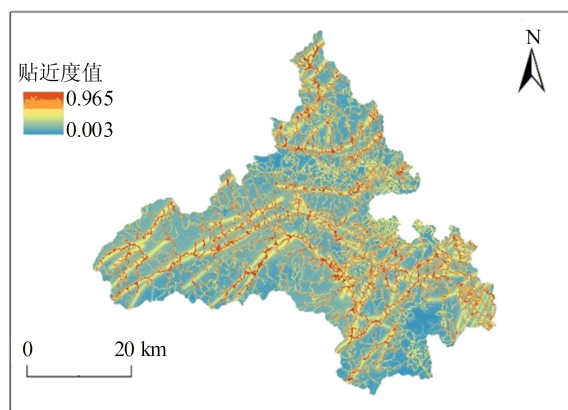


图 2 贴近度值

对研究区的理想点值贴近度 $L_p^\pm(A_{i(x,y)})$ 按照自然断点法进行重新分类, 即以 $L_p^\pm(A_{i(x,y)})$ 值由高到低、类别中属性差异性最小、类别间属性差异性最大为原则, 分为高、中、低 3 类: 当 $0.003 < L_p^\pm(A_{i(x,y)}) \leq 0.393$ 时, 划分为低易发区; 当 $0.393 < L_p^\pm(A_{i(x,y)}) \leq 0.615$ 时, 划分为中易发区; 当 $0.615 < L_p^\pm(A_{i(x,y)}) \leq 0.965$ 时, 划分为高易发区。3 个类别贴近度的具体变化范围适用于本研究区, 体现了休宁县范围内各个空间位置滑坡易发性的相对大小。滑坡高易发区、滑坡中易发区和滑坡低易发区的空间分布结果如图 3 所示。

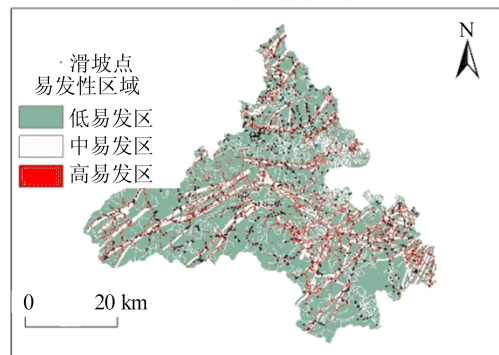


图 3 滑坡易发性区划图

3.2 易发性评价结果分析

将最终得到的休宁县滑坡易发性分区图和历史发生的滑坡灾害进行叠加,统计各易发性分区内实际发生的滑坡面积、滑坡点数量和滑坡灾害点密度,结果见表 3 所列。从表 3 可以看出,高易发区的滑坡地质灾害点数量为 476 个,占滑坡地质灾害发生总数的 57.35%;中易发区的滑坡地质灾害点数量为 252 个,占滑坡地质灾害发生总数的 30.32%;低易发区内滑坡地质灾害点数量

为 102 个,占比只有 12.27%,而低易发区所占区域总面积为 1 230.34 km²,超过研究区总面积的 1/2,即占比 57.01%。高易发区所占区域总面积最小,而滑坡地质灾害发生频率却最高;低易发区反之。进一步统计滑坡地质灾害在不同易发等级范围内的分布数据,计算灾害点在不同易发等级范围内的分布密度,发现随着易发程度的提高,滑坡灾害点的密度逐渐增大,中易发区和高易发区的滑坡灾害点密度达到最大。

表 3 滑坡易发性统计

易发性等级	面积/km ²	区域面积占比/%	滑坡灾害点数量/个	滑坡点数占比/%	滑坡灾害点密度/(个/km ²)
低易发区	1 230.34	57.01	102	12.27	0.08
中易发区	637.48	29.54	252	30.32	0.40
高易发区	290.13	13.44	476	57.35	1.64

根据上述结果,基于 ArcGIS 的空间 TOPSIS 模型预测准确率较高,适用于休宁县滑坡灾害的易发性评价。TOPSIS 作为一种数学模型,与 ArcGIS 相结合,可以很好地反映决策方案在空间上的变化,为以后其他地区的灾害易发性评价研究提供新思路、新方法。

4 结 论

滑坡地质灾害易发性评价研究是一个多学科相互交叉的复杂性问题。本文对于休宁县滑坡地质灾害进行了研究,得出如下结论。

1) 坡度、坡向、降雨量、河流、断层、地层岩性、地貌单元、道路、土地利用类型等 9 个滑坡评价因子,与休宁县已经发生的滑坡存在着密切的空间关系。

2) 本文提出的空间 TOPSIS 模型适合休宁县滑坡易发性评价。滑坡易发性评价的结果,与研究区已经发生滑坡的空间分布较为吻合,评价结果较好。空间 TOPSIS 模型预测结果显示:休宁县滑坡高易发区主要分布于道路、水系和断层周围;其余区域为滑坡中、低易发区。TOPSIS 模型与 ArcGIS 相结合,弥补了单纯利用 TOPSIS 模型在空间变化反映上的不足,并为将来的灾害易发性研究提供了新方向。

本研究将每个评价因子权重作为一个常量,衡量不同因子之间的相对重要性,没有考虑指标因子权重的空间变化特征。后续的研究可以将权重作为空间变量进行处理和分析。另外,后续研

究中可以进一步提高断层、道路、河流、降雨量等评价因子的分类精度,以期进一步提高休宁县滑坡易发性的评价精度。

[参 考 文 献]

- [1] 喻根, MAATHUIS B H P, WESTEN C J V. 基于 GIS 的滑坡预测模型的预测率及其作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 285-291.
- [2] 张俊, 殷坤龙, 王佳佳. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 284-296.
- [3] PETLEY D. Global patterns of loss of life from landslides[J]. Geology, 2012, 40(10): 927-930.
- [4] 吴常润, 赵冬梅, 刘澄静, 等. 基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 308-320.
- [5] BEHZADIAN M, OTAGHSARA S K, YAZDANI M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(17): 13051-13069.
- [6] 邵维懿, 赵翠薇. 改进 AHP 和 TOPSIS 法在滑坡灾害易发性评价中的应用: 以贵州毕节地区为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 40-46.
- [7] 刘德玉, 丛凯, 魏洁, 等. 基于理想点法的武都区北山泥石流危险度评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(2): 7-11.
- [8] SHEIKH V, KORNEJADY A, OWNEGH M. Application of the coupled TOPSIS-Mahalanobis distance for multi-hazard-based management of the target districts of the Golestan Province, Iran[J]. Natural Hazards, 2019, 96(3): 1335-1365.
- [9] 陈文强, 杨睿孜, 赵宇飞, 等. 基于组合权重-TOPSIS 的岩质边坡稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1198-1206.

(下转第 1099 页)

[参 考 文 献]

- [1] TOZAWA T, JONES J T A, SWAMY S I, et al. Porous organic cages [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(12): 973-978.
- [2] 李阳雪, 张巍, 刘智, 等. 环糊精的金属有机框架材料作为模板制备多孔有机笼[J]. *化学学报*, 2015, 73(6): 641-645.
- [3] HASELL T, COOPER A I. Porous organic cages: soluble, modular and molecular pores [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(9): 16053.
- [4] LIU M, ZHANG L, LITTLE M A, et al. Barely porous organic cages for hydrogen isotope separation [J]. *Science*, 2019, 366(6465): 613-620.
- [5] SONG J, ARATANI N, SHINOKUBO H, et al. A porphyrin nanobarrel that encapsulates C₆₀ [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(46): 16356-16357.
- [6] SUN J K, ZHAN W W, AKITA T, et al. Toward homogenization of heterogeneous metal nanoparticle catalysts with enhanced catalytic performance: soluble porous organic cage as a stabilizer and homogenizer [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(22): 7063-7066.
- [7] YANG X, SUN J K, KITTA M, et al. Encapsulating highly catalytically active metal nanoclusters inside porous organic cages [J]. *Nature Catalysis*, 2018, 1(3): 214-220.
- [8] CORRIGAN N, JUNG K, MOAD G, et al. Reversible-deactivation radical polymerization (controlled/living radical polymerization): from discovery to materials design and applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2020, 111: 101311.
- [9] BRAUNECKER W A, MATYJASZEWSKI K. Controlled/living radical polymerization: features, developments, and perspectives [J]. *Progress in Polymer Science*, 2007, 32(1): 93-146.
- [10] RIBELLI T G, LORANDI F, FANTIN M, et al. Atom transfer radical polymerization: billion times more active catalysts and new initiation systems [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(1): 1800616.
- [11] ENCISO A E, LORANDI F, MEHMOOD A, et al. p-Substituted tris(2-pyridylmethyl)amines as ligands for highly active atp catalysts: facile synthesis and characterization [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(35): 14910-14920.
- [12] LEE H C, FANTIN M, ANTONIETTI M, et al. Synergic effect between nucleophilic monomers and Cu(II) metal-organic framework for visible-light-triggered controlled photopolymerization [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(21): 9445-9455.
- [13] LIU M, LITTLE M A, JELFS K E, et al. Acid-and base-stable porous organic cages: shape persistence and pH stability via post-synthetic "tying" of a flexible amine cage [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(21): 7583-7586.
- [14] BRIGGS M E, COOPER A I. A perspective on the synthesis, purification, and characterization of porous organic cages [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(1): 149-157.
- [15] BUSHELL A F, BUDD P M, ATTFIELD M P, et al. Nanoporous organic polymer/cage composite membranes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(4): 1253-1256.
- [16] XU X, BAO C, HONG M, et al. A tripodal heptadentate Schiff base as an active ligand for atom transfer radical polymerization [J]. *Polymer Chemistry*, 2020, 11(39): 6356-6364.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1093 页)

- [10] ZHAO B, ZHAO Y Q, WANG J M. New stability forecasting model for goaf slope based on the AHP-TOPSIS theory [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(1): 1-12.
- [11] MALCZEWSKI J, RINNER C. Multicriteria decision analysis in geographic information science [M]. New York: Springer, 2015: 113-121.
- [12] ZELENY M. Multiple criteria decision making [M]. New York: McGraw Hill, 1982: 98-109.
- [13] JOCE M C P, LUCIEN D. A multiple criteria decision-making approach to GIS based land suitability evaluation [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1993, 7(5): 407-424.
- [14] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making: methods and applications [M]. Berlin: Springer, 1981: 112-126.
- [15] SIMONOVIC S P. A spatial multi-objective decision-making under uncertainty for water resources management [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2005, 7(2): 117-133.
- [16] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究 [J]. *地学前缘*, 2001, 8(2): 229-284.
- [17] 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.

(责任编辑 吴 亮)