

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.004

并发式复合灾害系统脆弱性评估

宋月¹, 王伟¹, 徐峥辉¹, 黄莉²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 河海大学公共管理学院)

摘要: 为完善并发式复合灾害脆弱性研究体系,考虑并发式灾害间的叠加(折减)效应、脆弱性各维度的不同特征,推导了并发式复合灾害系统暴露度指数、敏感性指数、适应性指数的理论公式,建立了并发式复合灾害系统脆弱性评估指标体系。该体系采用卷积神经网络对敏感性进行评估,采用熵权-TOPSIS 评估法对暴露度和适应性进行评估,采用 ArcGIS 技术进行系统脆弱性综合评估并得到脆弱性等级区间分布。粤港澳大湾区崩塌-滑坡实例验证结果表明:该评估体系逻辑合理、方法可靠、评估结果准确,具有较强的科学性与适用性,可有效应用于并发式复合灾害脆弱性定量评估;粤港澳大湾区崩塌-滑坡高脆弱区和次高脆弱区集中分布在越秀区、天河区等湾区中部地区和南山区、福田区、罗湖区等湾区中南部地区;越秀区、福田区等脆弱性排名前十的区县需要着重考虑强化抗灾基础设施和加强灾害管理。

关键词: 脆弱性评估;并发式复合灾害;评估模型;卷积神经网络;崩塌-滑坡;粤港澳大湾区

Vulnerability assessment of concurrent compound disaster systems

Song Yue¹, Wang Wei¹, Xu Zhenghui¹, Huang Li²

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;
2. College of Public Administration, Hohai University)

Abstract: To improve the research system for concurrent compound disaster vulnerability, the superimposition (reduction) effects among concurrent disasters and the different characteristics of each dimension of vulnerability were considered, and the theoretical formulas for exposure index, sensitivity index, and adaptive capacity index of the concurrent compound disaster system were derived. Moreover, a assessment index system for vulnerability of the concurrent compound disaster system was established. This system used convolutional neural networks (CNNs) to evaluate sensitivity and employed the entropy weight-TOPSIS evaluation method to evaluate exposure and adaptability, and it utilized ArcGIS technology to conduct a comprehensive assessment of system vulnerability and obtained the distribution of vulnerability grade intervals. The verification results of the avalanche-landslide example in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area show that this assessment system is logically reasonable and methodologically reliable, and it has accurate assessment results, with strong scientificity and applicability. It can be effectively applied to the quantitative assessment of concurrent compound disaster vulnerability. The high and medium-high vulnerability areas of avalanche-landslide in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area are concentrated in the central areas of the bay such as Yuexiu District and Tianhe District, as well as in the middle and southern areas of the bay such as Nanshan District, Futian District, and Luohu District. The districts and counties with vulnerability rankings in the top ten, such as Yuexiu District and Futian District, need to particularly consider strengthening disaster-resistant infrastructure and enhancing disaster management.

Key words: vulnerability assessment; concurrent compound disaster; assessment model; convolutional neural network; avalanche-landslide; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

近年来,随着气候变化的加剧^[1]和人类活动的增多^[2],极端气候与自然灾害对人民生命和财产安全的影响日益严重^[3]。复合灾害通过各种灾害之间的相互影响、风险传递等,带来了更为严重的损失^[4-6],包括并发式和串联式。串联式复合灾害又叫灾害链,指复合灾害中的一种灾害引发另一种灾害的现象,灾害的发生具有一定的顺序^[7]。并发式复合灾害指一些灾害在某一区域某一时段内群聚或群发的现象^[8],这也使得由单灾种造成的损失难以从整体中剥离出来。因此,探究并发式复合灾害脆弱性的叠加机理,对并发式复合

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71974052);国家自然科学基金委员会-联合国环境规划署(NSFC-UNEP)可持续发展国际合作科学计划重点项目(42361144873);国家重点研发计划项目(2021YFC3001002)

作者简介: 宋月(1998—),女,博士研究生,主要从事复合灾害应急研究。E-mail:220403020003@hhu.edu.cn

通信作者: 黄莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事复合灾害应急研究。E-mail:20100029@hhu.edu.cn

灾害系统脆弱性进行评估,对于防灾减灾具有重要意义^[9]。

现有研究通常从单一灾害类型的脆弱性评估入手,如地质灾害、水文灾害或气象灾害等。例如:Li等^[10]基于暴露-敏感-适应能力框架,利用随机森林模型评估了中国辽宁省的暴雨脆弱性;余瀚等^[11]基于区域灾害系统理论,综合考虑了台风灾害中人口与经济的社会脆弱性和暴露度,评估了广东省的台风风险;Rawat等^[12]采用 AHP 与 GIS 相结合的方式评估了印度东北喜马拉雅地区的洪水脆弱性;Li等^[13]考虑多向地震序列的影响,开发了典型建筑集群的脆弱性模型。然而,这种单一灾害类型的评估不能全面考虑多灾害联合作用的复杂性,因此学者们开始探索链式灾害之间的相互作用^[14-15]。例如:李子轩等^[16]基于区域灾害系统,利用随机森林、决策树及 XGBoost 算法评估了降雨-滑坡中的经济损失脆弱性;荣广智等^[17]从极端降水-地质灾害的危险性、暴露度、脆弱性、防灾减灾能力 4 个方面选取指标,评估了贵州省水城区的风险。

现有研究多集中于单一灾害类型的脆弱性评估,对于复合灾害的评估在研究方法上往往采用建立覆盖多个灾种的评价指标体系的方式,忽略了脆弱性在暴露度、敏感性、适应性等不同维度上的叠加(或折减)效应。此外,现有的复合灾害脆弱性评估通常重点关注灾害间的链式效应,针对群聚或并发式的灾害,尚未形成完善的评估体系。为此,本文基于并发式复合灾害在脆弱性各维度(包括敏感性、暴露度和适应性)的叠加机理,构建了一套具有普适性的并发式复合灾害系统脆弱性评估指标体系,以粤港澳大湾区崩塌-滑坡为例,基于熵权-TOPSIS 评估法和卷积神经网络(CNN)分别对脆弱性的 3 个维度进行评估,并采用 ArcGIS 软件计算得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡脆弱性分布,以期为区域有针对性地进行防灾减灾能力建设提供参考。

1 并发式复合灾害系统脆弱性评估理论推导

目前,复合灾害系统中的脆弱性与易损性概念内涵基本一致,二者均源自英文术语 vulnerability^[18]。复合灾害系统脆弱性指研究区自然、社会、经济、环境等承灾体面对复合灾害破坏时自身发生损毁的脆弱程度^[19],由敏感性、暴露度以及这些承灾体面对复合灾害的适应能力 3 个方面综合确定^[9,20]。敏感性也称易发性^[21],是指研究区域所处的综合外在环境对于灾害或破坏的敏感程度,是复合灾害发生的重要影响因素,其以空间概率的形式呈现出区域在给定压力情境下复合灾害发生的可能性^[22]。暴露度指自然灾害影响下的人口、财产、工程设施等承灾体的数量、构成、价值及分布^[23-25],反映了系统所遭受的灾难或危害的严重程度,以及由此带来的潜在损失。适应性指的是系统对灾害事件的应对能力,以及从灾害损失中恢复的能力,主要取决于社会财富、技术、教育、基础设施、管理能力等^[19]。例如,通过优化避灾点布局、加强堤防建设等工程与非工程措施,可显著提升区域灾害适应能力,进而有效降低灾害造成的损失。

假定复合灾害系统为单纯并发式复合灾害 $C_n, d_1, d_2, \dots, d_n$ 为同时发生的相互独立的灾种,则复合灾害 C_n 为:

$$C_n = \{d_j \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

设定复合灾害 C_n 中,灾害损失的叠加(折减)效应系数为 g_{C_n} :

$$g_{C_n} = L_n / \sum_{j=1}^n L_{d_j} \quad (2)$$

式中: L_n 为 C_n 的灾害损失; L_{d_j} 为 d_j 的灾害损失。

复合灾害系统脆弱性指数 V_{C_n} 根据复合灾害系统敏感性指数、暴露度指数、适应性指数综合计算得到^[26]:

$$V_{C_n} = w_e \bar{E}_{C_n} + w_s \bar{S}_{C_n} + w_f (1 - \bar{F}_{C_n}) \quad (3)$$

式中: $\bar{E}_{C_n}, \bar{S}_{C_n}, \bar{F}_{C_n}$ 分别为复合灾害的暴露度指数、敏感性指数、适应性指数的归一化结果; w_e, w_s, w_f 分别为暴露度指数、敏感性指数、适应性指数的权重,通过熵权法^[27]计算得到。

1.1 暴露度指数理论推导

复合灾害 C_n 的暴露度指数 E_{C_n} 为:

$$E_{C_n} = g_{C_n} \sum_{j=1}^n E_{d_j} \quad (4)$$

式中: E_{d_j} 为灾害 d_j 的暴露度指数。

1.2 敏感性指数理论推导

敏感性指受到灾害威胁的区域其综合外部环境对灾害或损害的敏感程度^[28],是复合灾害发生的重要影响因素^[29],决定了区域在给定压力情境下复合灾害发生的可能性^[30]。假定并发式复合灾害中,灾害 d_j 的发生是相互独立的,复合灾害中灾害 d_j 的敏感性不受其他灾害发生的影响。则复合灾害 C_n 的发生是灾害 d_1 、 d_2 、 $\cdots$ 、 d_n 同时发生的结果,也就是两者发生概率的乘积。因此,复合灾害 C_n 的敏感性指数为:

$$S_{C_n} = \prod_{j=1}^n S_{d_j} \tag{5}$$

式中: S_{C_n} 为复合灾害 C_n 的敏感性指数; S_{d_j} 为灾害 d_j 的敏感性指数。

1.3 适应性指数理论推导

区域面对灾害 d_j 的适应性指数为:

$$F_{d_j} = P_{d_j}/R_{d_j} \tag{6}$$

式中: F_{d_j} 为区域面对灾害 d_j 的适应性指数; P_{d_j} 、 R_{d_j} 为区域应对灾害 d_j 的能力与应急需求。

假设区域应对各类灾害的能力一致、通用,即 $P_{C_n}=P_{d_j}=P$,其中区域复合灾害 C_n 的应急需求 R_{C_n} 的叠加(折减)效应系数与灾害损失的叠加(折减)效应系数一致。则区域面对复合灾害 C_n 的适应性指数(应对能力) F_{C_n} 为:

$$F_{C_n} = \frac{P_{C_n}}{R_{C_n}} = \frac{P}{g_{C_n} \sum_{j=1}^n R_{d_j}} = \frac{1}{g_{C_n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{F_{d_j}}} \tag{7}$$

2 评估方法与步骤

2.1 CNN 评估方法

CNN 模拟生物神经网络的结构与功能,是当前图像识别领域最为高效的方法之一。与传统神经网络不同,CNN 的输入通常为多维图像数据,如二维空间信息、RGB 颜色通道等多个维度的图像数据。CNN 能够自动从原始数据中学习并提取特征,有效避免了烦琐且重复的人工特征工程。同时,CNN 的层级化结构使其在图像处理任务中更具直观性,便于对处理过程与结果进行分析和解释。在此基础上,本文建立了 AlexNet-2 模型对灾害的敏感性进行评价,评价步骤如下。

a. 评估因子叠加:在处理灾害数据时,需要考虑到像元的邻近区域。因此,需要将输入层的数据转换为二维阵列。将多个评估指数叠加后,再输入 CNN,形成一张多波段 2D 影像,如图 1 所示。

b. 评估单元选择:使用 CNN 建立灾害敏感性评估模型,由于网络层次较多,在进行数据输入时对矩阵尺寸有一定的要求,所以本文使用了规则网格元素进行评估。以评估因子叠加后的影像为输入影像,叠加后各像元的影像为原始资料,利用 ENVI 软件的 layer stacking 功能,将各评估指标的图层进行重叠,并以灾害点为中心,分割成 12×12 多波段栅格图,将其输入 CNN 进行预报。

c. AlexNet-2 模型构建:基于 CNN 的敏感性评估是对灾害是否发生的二分类问题,所以在输出层分类器中放置两个神经元,表示灾害是否发生。将历史灾害数据集随机分为 3 个部分:60%作为训练集、20%作为验证集、20%作为测试集。

2.2 熵权-TOPSIS 评估法

熵权法是一种被广泛应用的信息权重模型^[27,31],它可以捕捉因素之间隐含的相互作用,与各种主观权

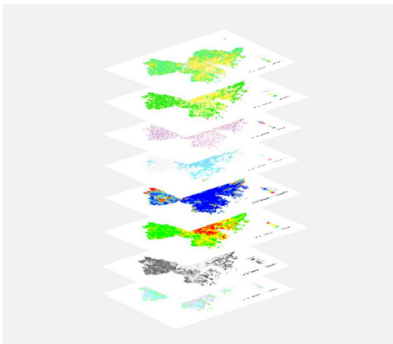


图 1 因子层叠加示意图
Fig.1 Schematic diagram of factor layer superposition

重模型相比,最大优势是可避免人为因素对指标权重的干扰,从而提高了综合评价结果的客观性。而熵权和 TOPSIS 评估法的结合可以在一定程度上降低 TOPSIS 评估法中权重分配的主观性^[32-33]。因此,本文采用熵权法结合 TOPSIS 评估法对单一灾害的暴露度和适应性进行评估。

基于熵权法的指标权重确定步骤:①构建 a 个事物 b 个评价指标的判断矩阵 R ;②将所有指标正向化,即将所有指标转化为极大型指标,对于极小型指标采用取倒数的方法对其进行正向化处理,得到一个新的判断矩阵 Y ;③采用最大最小标准化方法对各指标进行标准化处理,以平衡各指标差异或量纲而带来的误差,标准化后的矩阵为 B ;④基于归一化的判断矩阵,计算概率矩阵 P ;⑤计算各指标的熵和其对应的熵权(暴露度评估和适应性评估中各指标的权重)。

TOPSIS 评估法又叫逼近理想解法,是一种通用的综合评估方法,适合于多个特征量和多个目标的对比选取^[34],即通过每个特征量与正负理想值之间的欧氏距离得到一个接近程度,以此来评价各个特征量的优劣。因此,本文采用 TOPSIS 评估法进行暴露度和适应性评估。假定指标评估体系中共有 l 个目标和 m 个特征量,则 TOPSIS 评估法计算评估结果的过程如下:①将每个特征量 $x_{ik}(i=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,l)$ 和正负参考点的原始数据构成了一个初始的判定矩阵 X ,并且将其归一化得到矩阵 Y_1 ;②与熵权法获得的各个指标的权重相结合,得到了一个加权的判断矩阵 Z ;③以 Z 为基础,得到被评估体系的正负理想值 z_i^+ 和 z_i^- ,再通过欧氏距离 E^+ 和 E^- 计算 Z 中各个元素与正负理想值之间的相对贴近度;④将贴近度 T_i 归一化,得出综合评分。

3 实例验证

3.1 研究区概况

粤港澳大湾区地处我国华南地区,南濒南海,与东南亚隔海相望,区位优势显著。作为 21 世纪海上丝绸之路的重要起点与太平洋-印度洋航运网络的关键枢纽,该区域是我国经济发展、城镇化水平及人口集聚程度最高的地区之一。同时,粤港澳大湾区暴雨、风暴潮、咸潮、洪水等自然灾害频发,崩塌、滑坡等次生地质灾害与原生灾害相互触发、耦合演化,形成复杂的灾害链与灾害网络。受此影响,区域内极易诱发重大城市公共安全事件,并引发大范围连锁反应,对周边重要基础设施与居民生命财产安全构成严重威胁。鉴于此,本文选取粤港澳大湾区为研究区,开展崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估研究。

3.2 崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估指标体系构建与数据来源

评价指标的选择主要遵循 3 个原则:综合性、代表性和可及性。综合性是指综合考虑自然、经济、社会等多种因素,确定复合灾害的评价指标体系。代表性是指在指标选择中总结和组织相似指标,然后选择产生主要影响的指标,以避免因指标过多而降低评价效率。最后,考虑到数据的可及性,尽可能多地使用第一手数据,以确保指标体系的客观性和真实性,尽量减少因专家打分等主观判断产生的误差。依据前人研究成果^[35],并通过实地走访调研、专家咨询等,最终从敏感性、暴露度和适应性 3 个维度,选取了 24 个指标,构建了崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估指标体系,如图 2 所示。敏感性主要与当地的自然地理环境相关,因此本文考虑可能孕育灾害的自然地理条件,从水文、地质、地形、植被、土地利用五方面选定敏感性指标^[30]。暴露度反映了自然灾害对人类社会系统可能造成的潜在损失,因此从人口、经济、社会三方面确定暴露度指标^[36]。适应性反映对灾害事件的应对能力和从灾害损失中恢复的能力,因此以防灾能力和应灾能力两方面确定适应性评价指标^[37]。

降水量、地层岩性、地貌类型、高程等敏感性指标数据和居住用地面积占比、工业用地面积占比等暴露度指标数据来自中国科学院资源环境与数据中心;地形起伏度、距断裂带距离、河网密度等敏感性指标数据则是根据已有数据采用 ArcGIS 的统计分析功能计算得来。人口密度、女性占比等暴露度和适应性指标数据来自《第七次人口普查公报》。地均 GDP、每万人拥有避灾点数量等暴露度和适应性指标数据来自《广东省统计年鉴 2020》。除此之外,敏感性评估中所用的灾害点分布数据主要来自《深圳市 2022 年地质灾害防治方案》中的灾害点统计。24 个指标中,除地表粗糙度、土地利用类型只涉及滑坡,其他指标均涉及滑坡和崩塌两种灾害类型。



图 2 崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估指标体系

Fig. 2 Index system for vulnerability assessment of avalanche-landslide composite disaster

3.3 粤港澳大湾区崩塌-滑坡脆弱性评估

粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估流程如图 3 所示。

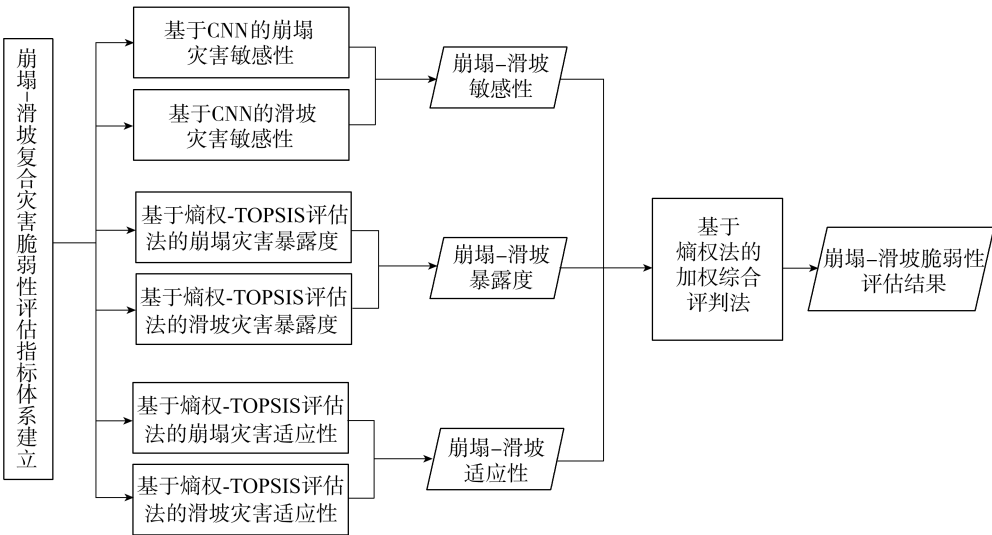


图 3 崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估流程

Fig. 3 Flowchart of vulnerability assessment for avalanche-landslide composite disaster

3.3.1 基于 CNN 的崩塌-滑坡复合灾害敏感性评估

在粤港澳大湾区,收集到灾害点数据包括截至 2019 年的滑坡 939 处和崩塌 1 330 处。对于非灾害点的选取,采用 GIS 技术在已知灾害点 5 km 以外随机生成相同数量的非灾害点。在此基础上,按照 60%、20%、20%对数据进行划分,分别作为训练集、验证集和测试集^[38]。通过卷积神经网络的训练得到最佳参数组合(表 1),最终计算得到崩塌测试集的准确率为 86.75%,滑坡测试集的准确率为 89.1%。

表 1 CNN 参数
Table 1 CNN parameters

灾害类型	输入图像	卷积核	最大池化	损失函数	激活函数	优化器	迭代次数	迭代批次	学习率
滑坡灾害	12×12×14	3×3	2×2	Cross-entropy	RELU	SGD	80	32	0.01
崩塌灾害	12×12×12	3×3	2×2	Cross-entropy	RELU	SGD	65	32	0.01

利用训练得到的 CNN 对粤港澳大湾区各栅格区域的敏感性进行预测,在得到崩塌、滑坡单灾种敏感性结果后,采用式(5)计算得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡敏感性结果,采用 ArcGIS 软件绘制得到粤港澳大湾区的崩塌-滑坡敏感性分布,如图 4(a)所示。

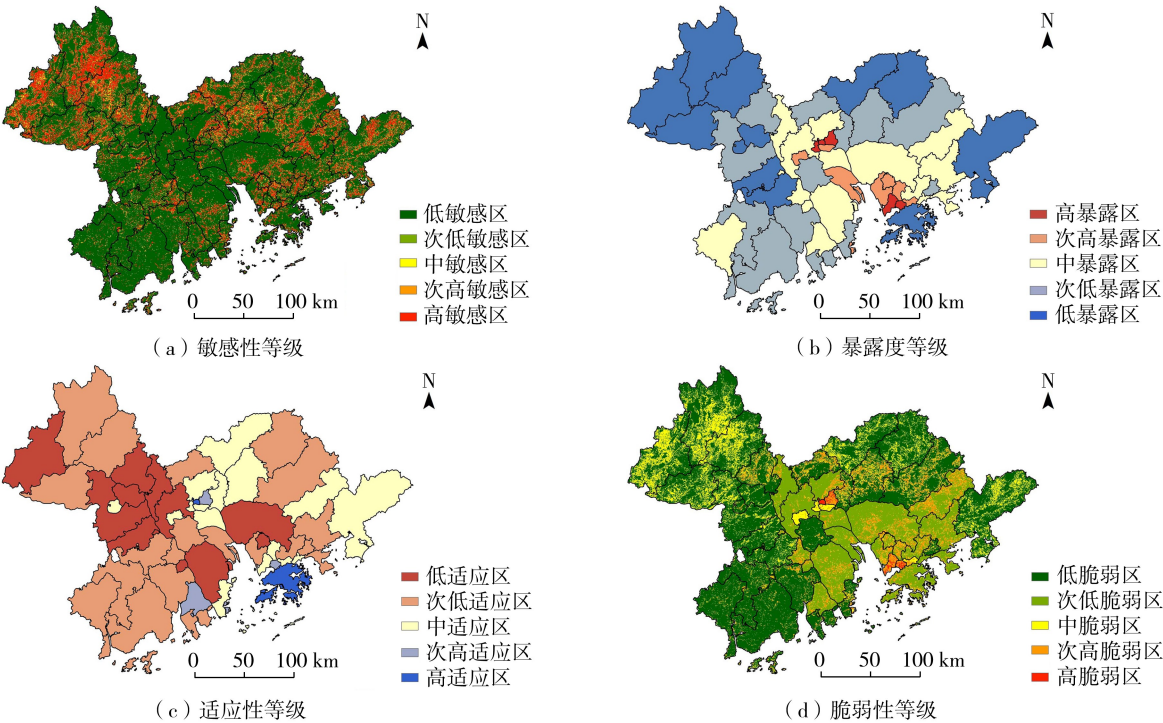


图 4 粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害脆弱性及其各维度等级分布

Fig. 4 Avalanche-landslide composite disaster vulnerability of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its dimensional grade distribution

崩塌-滑坡复合灾害高敏感区指敏感性指数大于 0.875 的区域,主要分布在封开县、怀集县、广宁县、德庆县等湾区的西北部,黄浦区、增城区、从化区等湾区的东北部地区,以及龙华区、龙岗区、福田区等湾区的东南部地区。西北部地区高程较高,地形起伏度较大,每平方千米起伏度达到 445 m。东北部地区高程较高,地形起伏度较大,部分地区达到 110 m,有两条断裂带穿过该区域,距断裂带距离较近。东南部地区距断裂带距离较近,NDVI 较低,植被覆盖度低,土地利用类型多为城镇居民用地,开发利用程度较高,崩塌、滑坡等地质灾害敏感程度较高。崩塌-滑坡低敏感区指敏感性指数小于 0.110 的区域,主要分布在三水区、南海区、顺德区等湾区的中部地区,恩平市、开平市、台山市、新会区等湾区的西南部地区。中部地区高程较低,地形起伏度均处于 20 m 以下,起伏程度较小,西南部地区,NDVI 较高,植被覆盖程度较高,土地利用类型多为耕地和林地,高程相对较低,地形起伏度较低,地形较为平缓,崩塌、滑坡等地质灾害发生概率较低。

3.3.2 基于熵权-TOPSIS 评估法的崩塌-滑坡复合灾害暴露度评估

基于熵权-TOPSIS 评估法计算得到粤港澳大湾区崩塌、滑坡单灾种暴露度,进而根据式(4)计算得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害暴露度结果,其中叠加(折减)效应系数参考前人研究^[39]以及专家意见,取 1.5。采用 ArcGIS 中的自然断点法,将暴露度水平划分为 5 类,绘制得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡暴露度分布(图 4(b))。

崩塌-滑坡高暴露区(暴露度指数范围 0.498~1.000)和次高暴露区(暴露度指数范围 0.278~0.498)主要分布在天河区、越秀区、荔湾区、海珠区、禅城区等湾区中部地区,以及南山区、福田区、南沙区、光明区等湾

区中南部地区。这些湾区中部地区居住用地面积占比均高于 60%,甚至有的地区高达 90%,居住用地面积占比较高,人口密度较大,达到 2 万人/km²,地均 GDP 较高,最高达到 99 亿元/km²。湾区中南部地区居住用地面积占比相对较高,地均 GDP 较高,除此之外还拥有较多的工业用地和耕地。人口密度大使得更多人口和财产面临灾害风险,而基础设施和财产的集中,工业用地和耕地等地区经济发展的支柱产业的存在,进一步增加了灾害造成的可能损失,使得这些地区拥有较高的暴露度水平。

低暴露区(暴露度指数小于 0.075)和次低暴露区(暴露度指数在 0.075~0.145)主要分布在封开县、怀集县、德庆县、广宁县等湾区西北部地区,从化区、龙门县等湾区东北部地区和惠东县等湾区东部地区。湾区西北部地区居住用地面积占比均低于 2%,工业用地面积占比均低于 1%,人口密度均低于 350 人/km²,地均 GDP 均低于 1000 万元/km²。东部地区除香港外居住用地面积占比在 2%左右,工业用地面积占比约 2%,人口密度均在 300 人/km²左右,地均 GDP 均低于 2000 万元/km²。

3.3.3 基于熵权-TOPSIS 评估法的崩塌-滑坡复合灾害适应性评估

基于熵权-TOPSIS 评估法计算得到粤港澳大湾区崩塌、滑坡单灾种适应性结果,进而根据式(7)计算得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害适应性结果。其中叠加(折减)效应系数参考前人研究^[39]以及专家意见,取 1.5。采用 ArcGIS 中的自然断点法,将适应性水平划分为 5 类,绘制得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡适应性分布(图 4(c))。

粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害低适应区(适应性指数小于 0.039)和次低适应区(适应性指数在 0.039~0.098)主要分布在高要区、四会市、鼎湖区、三水区、南海区、高明区、封开县等湾区西部和西北部地区,以及东莞市、光明区、中山市等湾区中南部和中东部地区。西部和西北部地区文化水平相对较低,例如高要区、封开县等每 10 万人中大学程度人口数在 7000 左右,每万人拥有的医疗床位数在 30 左右,处于相对较低水平。中南部和中东部地区每万人拥有的医疗床位数在 30 左右,处于相对较低水平,每万人拥有的避灾点数量约为 0.5 所,处于相对较低水平。低文化水平可能导致社会对灾害风险认知不足,缺乏有效应对措施和紧急救援能力,同时医疗资源和避灾设施的稀缺也意味着在灾害发生后的应急响应和灾后恢复能力较弱。因此,这些因素共同作用使得该地区处于低适应性水平。

粤港澳大湾区高适应区(适应性指数大于 0.639)和次高适应区(适应性指数在 0.290~0.639)主要分布在香港特别行政区、福田区、斗门区等湾区南部地区,以及越秀区、天河区等湾区中部地区。这些地区人均可支配收入基本在 7 万元及以上,甚至达到 30 万元,每 10 万常住人口的大学程度人数在 3 万左右,受教育程度较高,每万人拥有的医疗床位数均大于 50,甚至超过 200。较高的人均可支配收入、广泛的教育程度、丰富的医疗资源共同促成了这些地区在灾害事件中具备较高的适应性水平。

3.3.4 基于综合评判法的崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估

基于粤港澳大湾区崩塌-滑坡敏感性、暴露度和适应性评价结果,采用熵权法确定暴露度、敏感性、适应性 3 个维度的叠加重权分别为 0.3094、0.1469、0.5437,采用 ArcGIS 的栅格计算器功能,计算得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害脆弱性评估结果。最后以自然断点法将得到的结果划分为 5 个等级,低脆弱区、次低脆弱区、中脆弱区、次高脆弱区和高脆弱区,脆弱性指数区间分别为(0,0.098]、(0.098,0.231]、(0.231,0.364]、(0.364,0.567]、(0.567,0.948],得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡脆弱性分布,如图 4(d)所示。该空间分布规律与区域地质条件、人类开发强度及防灾减灾基础等高度契合,验证了本文构建的并发式复合灾害脆弱性评估体系在崩塌-滑坡灾害评估中的合理性与适用性。

崩塌-滑坡复合灾害高脆弱区和次高脆弱区在越秀区、天河区等湾区中部地区,以及南山区、福田区、罗湖区等湾区中南部地区集中分布,在四会市、花都区、增城区、黄浦区等湾区北部地区,以及博罗县、东莞市、惠城区、惠阳区、宝安区、光明区、龙华区、龙岗区等湾区中东部地区零散分布。湾区中部和中南部地区暴露度指数均高于 0.50,暴露程度高,基本处于高暴露区,敏感性水平也处于高敏感区、较高敏感区和中敏感区交错分布的情况,适应性水平较高,基本处于次高适应区。在高暴露度和高敏感性的作用下,这些地区尽管具有较高的适应性水平,仍然形成了较高的脆弱性水平。针对这些地区,可以通过强化基础设施提高其抗灾能力,降低灾害发生概率,优化土地利用规划避免在灾害敏感区域内过度开发和人口密集居住,同时加强灾害预警和推动社区减灾教育来提升整体抗灾能力,降低脆弱性水平。

低脆弱区集中分布在恩平市、台山市、开平市、新会区等湾区西南部地区,以及鼎湖区、高明区、顺德区等

湾区中部和中西部地区。次低脆弱区集中分布在三水区、南海区、番禺区、南沙区等湾区中部地区。其他地区如封开县、怀集县、广宁县、德庆县、高要区等湾区西北部地区,从化区、龙门县等湾区东北部地区,惠东等湾区东部地区主要表现为中脆弱区和低脆弱区交错分布。低脆弱区和次低脆弱区集中分布的区域敏感性基本处于低和较低水平,暴露度也基本处于低和次低水平,其灾害发生概率和灾害可能带来的损失较小,尽管其具有较低的适应性水平,这些区域仍然形成了较低的脆弱性水平。

通过 ArcGIS 的分区统计功能,统计得到粤港澳大湾区各区县崩塌-滑复合灾害坡脆弱性指数平均值,进而排序得到粤港澳大湾区崩塌-滑坡脆弱性较高的 10 个区县,分别为越秀区(0.8620)、福田区(0.7803)、天河区(0.6369)、南山区(0.5610)、龙华区(0.4897)、罗湖区(0.4664)、澳门特别行政区(0.4549)、宝安区(0.4267)、光明区(0.3823)、蓬江区(0.3481)。根据脆弱性等级划分区间,越秀区、福田区、天河区为高脆弱性水平,这些地区可能面临更高的崩塌-滑坡发生概率和更高的潜在损失,需要优先考虑强化基础设施抗灾能力和加强灾害管理措施。南山区、龙华区、罗湖区、澳门特别行政区、宝安区、光明区等处于次高脆弱性水平,虽然脆弱性较高但尚未达到最严重的水平,仍需加强预警和应对能力以减少潜在损失。蓬江区处于中脆弱性水平。基于区县尺度的分区统计与脆弱性排序,可为粤港澳大湾区崩塌-滑坡灾害差异化防灾减灾策略制定提供精准的数据支撑与科学依据。

3.4 单一灾种与复合灾害脆弱性结果对比

依据式(3),对崩塌、滑坡单一灾害的脆弱性进行评估,结果如图 5 所示。在复合灾害高脆弱区域(图 4(d)),单灾种和复合灾害的脆弱性呈现一定程度的一致性和叠加协同效应。以湾区中部的天河区、越秀区为例,其崩塌灾害脆弱性指数范围为 0.454~0.897,处于高和次高脆弱性水平;其滑坡灾害脆弱性指数范围 0.396~0.884,处于高脆弱性水平;而叠加得到的崩塌-滑坡复合灾害脆弱性指数均大于 0.364,呈现高和次高脆弱性水平。

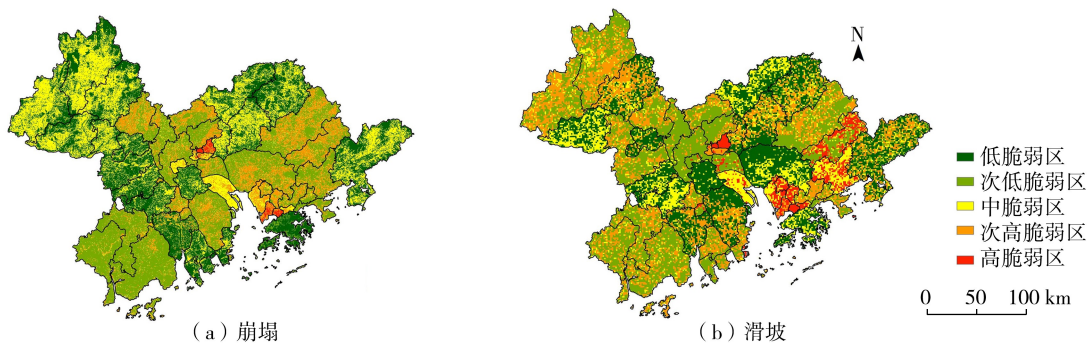


图 5 粤港澳大湾区崩塌、滑坡脆弱性对比

Fig. 5 Comparison of vulnerability to avalanche and landslide in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

在复合灾害低脆弱区域,除了存在一定的协同效应外,还呈现出扩散现象,即单灾种低脆弱性、次低脆弱性区域叠加之后,区域脆弱性等级变得更低,低脆弱区面积更大。以恩平市、开平市和台山市 3 个湾区西南部地区为例。其崩塌灾害低脆弱性区面积占比为 0,次低脆弱区占比 86.5%;滑坡脆弱性低脆弱区占地面积为 0,次低脆弱区占比 60.3%。而叠加得到的崩塌-滑坡复合灾害低脆弱区占比 88.4%、次低脆弱区 4.6%。复合灾害脆弱性等级更低,且低脆弱区占比明显高于单一灾种低脆弱区的面积占比。因此,可以通过降低单一灾害的脆弱性的方式来降低区域面对复合灾害的脆弱性。

而当单一灾种的脆弱性处在高、中、低等不同情况时,区域面对复合灾害的脆弱性等级存在中和现象,即表现为适中状态。以湾区中南部的中山市为例,其崩塌灾害脆弱性等级由高到低面积占比为 0、27.1%、7.0%、65.9%、0。滑坡脆弱区等级从高到低面积占比为 0、30.7%、5.6%、6.6%、57.1%。而该地区的复合灾害脆弱区等级从高到低面积占比为 0、12.4%、3.7%、83.9%、0。因此,经过中和之后,复合灾害中高脆弱区和低脆弱区的区等极端等级总占比显著降低,脆弱性分布整体向次高、中、次低等中等脆弱等级集中,使得中等脆弱等级总面积占比明显增大。

4 结 论

a. 基于复合灾害系统脆弱性各维度不同特性,建立了并发式复合灾害系统暴露度、敏感性、适应性评估

理论体系,进而依据区域灾害理论,构建了并发式复合灾害系统脆弱性评估指标体系。以粤港澳大湾区崩塌-滑坡复合灾害为例进行实证分析,验证了模型对并发式复合灾害的适配性及评估结果的可靠性。实证结果显示,崩塌-滑坡高脆弱区和次高脆弱区主要呈现以下特征:在越秀区、天河区等湾区中部地区,以及南山区、福田区、罗湖区等湾区中南部地区集中分布;在湾区北部地区,以及中东部地区零散分布。低脆弱区和次低脆弱区则集中分布在恩平市、台山市、开平市、新会区等湾区西南部地区,鼎湖区、高明区、顺德区、三水区、南海区、番禺区、南沙区等中部和中西部地区。越秀区、福田区、天河区、南山区、龙华区、罗湖区、澳门特别行政区、宝安区、光明区、蓬江区平均脆弱性水平处于湾区前十,且处于高脆弱水平,需要优先考虑强化基础设施抗灾能力和加强灾害管理措施。

b. 复合灾害高脆弱区与单灾种存在一定的一致性和协同效应;复合灾害低脆弱区相比于单灾种除了协同效应还呈现出扩散现象,复合灾害脆弱性等级更低,区域面积更广;单灾种脆弱性处于高中低等不同情况时,复合灾害脆弱性等级呈现一定的中和现象,即脆弱性处于适中状态。

参考文献:

[1] 董欣怡,祝明建,栾博,等. 海平面上升对粤港澳大湾区沿海生境脆弱性评估[J]. 生态学报,2024,44(12):5116-5127. (Dong Xinyi, Zhu Mingjian, Luan Bo, et al. Vulnerability assessment of coastal habitats in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from sea-level rise[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):5116-5127. (in Chinese))

[2] Peng Lu, Xia Jun, Li Zhihui, et al. Spatio-temporal dynamics of water-related disaster risk in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161:104851.

[3] Zhuang Yu, Xing Aiguo, Sun Qiang, et al. Failure and disaster-causing mechanism of a typhoon-induced large landslide in Yongjia, Zhejiang, China[J]. Landslides, 2023, 20(10):2257-2269.

[4] Cremen G, Galasso C, McCloskey J. Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards[J]. Science of the Total Environment, 2022, 817:152552.

[5] Yang Tao, Li Qian, Chen Xi, et al. Spatiotemporal variability of the precipitation concentration and diversity in Central Asia[J]. Atmospheric Research, 2020, 241:104954.

[6] 魏米铃,王威,戎卿文,等. 考虑不确定性的复合灾害避难疏散风险评估模型[J]. 中国安全科学学报,2023,33(7):203-212. (Wei Miling, Wang Wei, Rong Qingwen, et al. Risk assessment model of compound disaster evacuation considering uncertainty[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7):203-212. (in Chinese))

[7] Zheng Hao, Deng Zhifei, Guo Lanlan, et al. Assessment of building physical vulnerability in earthquake-debris flow disaster chain[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(4):666-679.

[8] 宁嘉辰,吴吉东,唐茹玫,等. 多灾种风险评估方法述评:基于5份国际权威报告的对比分析[J]. 地理科学进展,2023,42(1):197-208. (Ning Jiachen, Wu Jidong, Tang Rumei, et al. Multi-hazard risk assessment methods: a comparative analysis based on five authoritative reports[J]. Progress in Geography, 2023, 42(1):197-208. (in Chinese))

[9] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护,2023,39(1):93-100. (Yao Rui, Yang Quntao, Zhang Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):93-100. (in Chinese))

[10] Li Ying, Gong Shiyu, Zhang Zhiru, et al. Vulnerability evaluation of rainstorm disaster based on ESA conceptual framework: a case study of Liaoning province, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 64:102540.

[11] 余瀚,郭浩,王静爱. 面向区划的台风灾害综合风险评价:以广东省台风灾害人口与经济风险为例[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文),2023,62(1):86-95. (Yu Han, Guo Hao, Wang Jing' ai. Comprehensive risk assessment of typhoon for regionalization: a case of population and economic risk in Guangdong Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(1):86-95. (in Chinese))

[12] Rawat P K, Belho K, Rawat M S. Geospatial analysis of alarmingly increasing flood vulnerability and disaster risk within the northeast himalaya region of India[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 114:104920.

[13] Li Siqi, Gardoni P. Empirical seismic vulnerability models for building clusters considering hybrid intensity measures[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68:106130.

[14] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):172-181. (Liu Jiahong, Mei Chao, Liu Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood

- and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))
- [15] Wang Wei, Song Yue, Huang Li, et al. Vulnerability assessment of disaster chains: a case study of rainstorm - landslide disaster chains in the Greater Bay Area[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2025, 119: 105272.
- [16] 李子轩, 杜鹃, 徐伟. 基于机器学习的降雨—滑坡灾害链直接经济损失脆弱性评估[J]. *灾害学*, 2022, 37(4): 220-224. (Li Zixuan, Du Juan, Xu Wei. Rainfall-induced landslides direct economic loss vulnerability assessment using machine learning methods[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(4): 220-224. (in Chinese))
- [17] 荣广智, 张继权, 李天涛, 等. 极端降水诱发地质灾害链风险评估研究: 以贵州省水城区为例[J]. *灾害学*, 2022, 37(4): 201-210. (Rong Guangzhi, Zhang Jiquan, Li Tiantao, et al. Risk assessment of extreme precipitation-induced geological disaster chain: a case study of Shuicheng County, Guizhou Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(4): 201-210. (in Chinese))
- [18] Adger W N, Brooks N, Bentham G, et al. New indicators of vulnerability and adaptive capacity[R]. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research, 2004.
- [19] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [20] Adger W N. Vulnerability[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [21] 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. (Wu Shuren, Shi Jusong, Zhang Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995-1005. (in Chinese))
- [22] 黄莉, 徐凤凰, 张晨钰, 等. 粤港澳大湾区复合灾害系统敏感性评估[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 167-175. (Huang Li, Xu Fenghuang, Zhang Chenyu, et al. Sensitivity assessment of complex disaster system in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 167-175. (in Chinese))
- [23] Debortoli N S, Sayles J S, Clark D G, et al. A systems network approach for climate change vulnerability assessment[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 104019.
- [24] 黄莉, 王芸清, 王伟, 等. 粤港澳大湾区复合灾害系统暴露度评估[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2024, 45(4): 95-101. (Huang Li, Wang Yunqing, Wang Wei, et al. Exposure assessment of compound disaster system in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2024, 45(4): 95-101. (in Chinese))
- [25] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [26] 包文轩, 宫阿都, 徐灏, 等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估: 以“山竹”台风为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(1): 94-103. (Bao Wenxuan, Gong Adu, Xu Can, et al. Typhoon disaster risk assessment in Guangdong province by regional disaster system theory: case of “Mangkhut” [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2023, 59(1): 94-103. (in Chinese))
- [27] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 1-8. (Zheng Defeng, Gao Min, Li Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [28] 莫建飞, 陆甲, 李艳兰, 等. 基于 GIS 的广西洪涝灾害孕灾环境敏感性评估[J]. *灾害学*, 2010, 25(4): 33-37. (Mo Jianfei, Lu Jia, Li Yanlan, et al. GIS-based sensitivity assessment on environment of developing flood hazards in Guangxi Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(4): 33-37. (in Chinese))
- [29] 张卫星, 周洪建. 灾害链风险评估的概念模型: 以汶川 5·12 特大地震为例[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(1): 130-138. (Zhang Weixing, Zhou Hongjian. Conceptual model of disaster chain risk assessment: taking Wenchuan Earthquake on 12 May 2008 as a case [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(1): 130-138. (in Chinese))
- [30] Weis S W M, Agostini V N, Roth L M, et al. Assessing vulnerability: an integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure[J]. *Climatic Change*, 2016, 136(3): 615-629.
- [31] Xia Mu, Jia Kun, Zhao Wenwu, et al. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107274.
- [32] Li Zhao, Luo Zujang, Wang Yan, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by Entropy Weight Method and TOPSIS method[J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 564-576.

western Jilin Region, China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2024, 22(3): 2257-2275.

[25] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

[26] Bonhomme C, Petrucci G. Should we trust build-up/wash-off water quality models at the scale of urban catchments? [J]. *Water Research*, 2016, 108: 422-431.

[27] Yang Haoming, Zhu D Z, Zhang Yiping, et al. Numerical investigation on bottom shear stress induced by flushing gate for sewer cleaning[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(2): 290-299.

[28] Staufer P, Pinnekamp J. In situ measurements of shear stresses of a flushing wave in a circular sewer using ultrasound[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(9): 1363-1368.

(收稿日期: 2025 - 06 - 18 编辑: 彭桃英)

(上接第 37 页)

[33] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(3): 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(3): 55-61. (in Chinese))

[34] 姜雅男, 于永进, 李长云. 基于改进 TOPSIS 模型的绝缘纸机-热老化状态评估方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(6): 1572-1582. (Jiang Ya' nan, Yu Yongjin, Li Changyun. Evaluation method of insulation paper deterioration status with mechanical-thermal synergy based on improved TOPSIS model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(6): 1572-1582. (in Chinese))

[35] Liao Xinli, Xu Wei, Zhang Junlin, et al. Analysis of affected population vulnerability to rainstorms and its induced floods at county level: a case study of Zhejiang Province, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 75: 102976.

[36] Ming Xiaodong, Liang Qiuhua, Richard D, et al. A quantitative multi-hazard risk assessment framework for compound flooding considering hazard inter-dependencies and interactions[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127477.

[37] Zhang Qian, Yu Hao, Li Zhenning, et al. Assessing potential likelihood and impacts of landslides on transportation network vulnerability[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 82: 102304.

[38] Mesías-Ruiz G A, Borra-Serrano I, Peña J M, et al. Weed species classification with UAV imagery and standard CNN models: assessing the frontiers of training and inference phases[J]. *Crop Protection*, 2024, 182: 106721.

[39] 铁永波, 阮崇飞, 杨顺, 等. 云南省贡山县“5·25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 10-15. (Tie Yongbo, Ruan Chongfei, Yang Shun, et al. Characteristics and Mechanism of Geological Disasters Induced by “5·25” Rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2): 10-15. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 11 - 04 编辑: 刘晓艳)