doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.009

基于承灾体抗灾能力的地质灾害易损性评价模型及应用 ——以武汉市岩溶地面塌陷典型区为例

王芳婷',齐 信^{1,2},王晓晗',谢扬龙^{1,3},高 鹏^{1,3}

WANG Fang-Ting¹, QI Xin^{1,2}, WANG Xiao-Han¹, XIE Yang-Long^{1,3}, GAO Peng^{1,3}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北武汉 430074 1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

Wang F T, Qi X, Wang X H, Xie Y L and Gao P. 2025. Geological Hazard Vulnerability Evaluation Model and Its Application Based on Disaster-Bearing Body's Disaster Resistance Ability: A Typical Area of Karst Ground Subsidence in Wuhan City. South China Geology, 41(2): 339–349.

Abstract: Disaster resistance and vulnerability are two opposite attributes of disaster-bearing bodies, and vulnerability assessment is one of the basic tasks of geological disaster risk assessment and control, and the disaster resistance of disaster-bearing bodies is a useful supplement to evaluate the risk degree of urban disaster-bearing bodies. A geological hazard vulnerability evaluation model based on the disaster-bearing body's disaster resistance was constructed and applied to the typical karst ground subsidence area of the Hannan-Jinkou area, Wuhan City. Through the detailed investigation of the socio-economic characteristics that are highly related to the disaster-causing process, such as population distribution, economic background,

收稿日期: 2025-03-31;修回日期: 2025-04-24

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221734)

第一作者:王芳婷(1991—),女,博士,主要从事地质安全风险评估与污染物区域环境过程研究,E-mail:ftwang1991@cug.edu.cn

engineering activities, environmental resource development, etc., an evaluation index system for the vulnerability and disaster resistance of the work area was established. ArcGIS software was used to visualize the vulnerability assessment of geological hazards based on disaster resilience. The results show that in the non-building area, the traditional vulnerability assessment is consistent with the zoning result of vulnerability assessment based on the disaster resistance of the disaster-bearing body, while in the built-up area, the disaster resistance has a significant impact on the urban geological disaster risk, resulting in a significant difference between the traditional vulnerability assessment and the zoning vulnerability assessment based on the disaster resistance of the disaster results of this study enrich the theory of urban geological disaster risk assessment and can serve the prevention and mitigation of urban geological disasters.

Key words: geological hazards; vulnerability; disaster resilience; GIS; karst ground collapse; Wuhan City

"地质灾害"一词由前国际工程地质协会主席 Arnould 教授于 1976 年提出(胡冬华, 2016; 王日 标等, 2017), 指一种受地质条件、人类工程活动、 气候等多种因素共同影响下,自然环境发生渐变 或者突变破坏的现象(胡现振等, 2023; 杨伟等, 2024)。以现有的技术条件,精确预测地质灾害的 强度、规模、频率和波及范围是十分困难的。地 质灾害风险评价是有效化解灾害风险的方式之一 (黄润秋, 2007; 连志鹏等, 2022)。一般将地质灾 害风险(王日标等, 2017; Cheng Y X et al., 2024)定 义为"面临的伤害和损失的可能性"(蔡向阳和铁 永波, 2016; 胡冬华, 2016; 周壁鑫, 2019), 主要涉 及两方面评价,一是地灾体的危险性评价,二是承 灾体的易损性评价(Ding M T et al., 2020; 高玉欣 等, 2021; Xu F G et al., 2023)。地质灾害易损性评 价是一种通过综合评价地质灾害可能威胁的人 员、财产、环境等承灾体,从而评估一个地区承灾 体受潜在地质灾害威胁而可能遭受损失的程度的 评价方法(殷坤龙和张桂荣, 2003; 李宇亮等, 2014; 颜建东等, 2020), 是开展地质灾害风险评价 的核心基础之一。现有研究大多集中于县域尺度 的地质灾害易发性分析,或仅限于单一因素下的 危险性评估,未能充分结合诱发条件和易损性因 素,构建出完整的地质灾害风险评估框架(何寒舟 和丁一,2024)。易损性评价对城市减灾、减灾投 资以及灾害保险等有着极为重要的意义。一般而 言,易损性评价多偏向于人口密度、财产密度以及 建筑密度等承灾体脆弱性指标,大多忽略了承灾 体抗灾能力评价(许强等, 2010; Reves-Hardy et al., 2021; 陈宾等, 2024)。世界环境与发展委员会 (WCED, 1987)指出抗灾能力是地质灾害风险评 价中不可忽视的一个环节,联合国于 2002 年提出 了基于抗灾能力的风险定义,即"风险(Risk)=危 险(Hazard)×易损性(Vulnerability)÷抗灾能力 (Resilience)",近年也有部分学者(陈华清等, 2015;吴丝雨, 2017)将抗灾能力引入风险评价中, 但仅是基于防治工程、预警能力和应急能力等形 成的抗灾能力(Lin J H et al., 2021; Cheng Y X et al., 2024)。

抗灾能力与易损性同是承灾体的属性,但抗 灾能力指承灾体抵抗灾害破坏的能力,易损性指 承灾体在灾害作用下可能造成的损失程度,是属 性正反相对的两方面(吴丝雨, 2017)。承灾体抗 灾能力是影响承灾体风险的重要因素之一,研究 承灾体的抗灾能力是评价城市承灾体风险程度的 有益补充,基于综合防治体系抗灾能力的地质灾 害风险评价势在必行,也是检验综合防治体系的 有效手段(Yang Y G et al., 2019; Lai F et al., 2021)。 地质灾害防治不能一味强调风险的大小而忽视抗 灾能力强弱,否则会夸大地质灾害的"负能量",防 灾过度会导致资源浪费,恰如其分地进行地质灾 害风险评价,实施合理的防治措施是科技成果转 化为生产力的必然需求(韩健楠等, 2018)。Cuanalo et al.(2014)和 Das et al.(2011)分别对墨西哥 陡峭山区和印度喜马拉雅山滑坡易发地区建筑承 灾体的抵抗灾害破坏能力与结构之间的关系进行 了研究, 葛学礼等(2014)和毕小玉等(2014)分别 从建筑材料、结构型式、建造方式及其抗灾防灾 能力等方面构建了我国山区村镇建筑综合防灾能力的评价指标体系。新世纪以来,随着我国城市化、城镇化进程的不断推进,人类工程活动对自然环境的影响日趋加大,由此引发城市地质灾害的产生频率和危害性日趋上升(杨伟,2024)。

本研究通过精细化调查与致灾过程高度相关的社会经济特征,如人口分布、经济背景、工程活动、环境资源开发、承灾能力等方面,综合评价武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区基于承灾体抗灾能力的地质灾害易损性,旨在丰富风险评价理论,服务城市地质灾害防治工作。

1工作区概况

武汉市位于鄂东北大别山丘陵和鄂东南幕阜 山丘陵之间,处于江汉平原的东部,整体位于低海 拔区域,以丘陵和平原相间的微小波状起伏地形 为主,北高南低。武汉是长江中游城市群三大核 心之一,自21世纪初,城市建设发展速度逐步加 快,由此产生的地质环境问题与日俱增,如:地震 灾害与区域稳定性、水土污染、岩溶地面塌陷、软 土沉降等,从而影响城市的可持续发展。

工作区位于武汉市中南部汉南纱帽—金口金 水闸,以长江、汉江冲积平原为主,地形平坦开阔, 地面标高一般为 22~25 m。工作区位于金水闸 岩溶条带,该岩溶条带横跨长江,总体呈近东西向 分布,以隐伏岩溶为主,2018年至2019年开展的 武汉市多要素城市地质调查示范项目—岩溶地面 塌陷调查—期结果显示,工作区70%以上面积地 区属岩溶塌陷高易发区(图1)。一方面,武汉市 属亚热带湿润季风气候,夏季雨热同期,暴雨频 繁,河网密布;另一方面,随着工程建设活动的加 剧,地质环境遭受强烈破坏并有加剧趋势,因此区 内岩溶塌陷隐患逐年增高。

2基于承灾体抗灾能力的易损性评价 模型

随着 GIS 技术的发展,地质灾害风险评价方 法不断涌现,逐渐从定性、半定量方法向定量方法 发展(江思义等,2019)。层次分析法在地质环境 评价中应用广泛(江思义等,2020)。具体评价步 骤如下:

(1)确定评价因子。通过精细化调查,参考工 作区社会经济条件及相关规范,确定工作区地质 灾害易损性评价及承灾体抗灾能力评价因子。

(2)评价因子分区。采用加权平均综合指数 模型对地质灾害易损性及承灾体抗灾能力进行评价。加权平均法是将各个单因子先按分级标准判 断为极高、高、中和低四级,并将其从高到低依次



 图 1 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区地理位置图(a)及地质灾害综合易发性分区图(b)
 Fig. 1 Location of the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City (a) and the comprehensive susceptibility zoning of geological disasters (b)
 据武汉城市综合地质调查及应用编委会(2021)修编

评分为4、3、2、1作为单因子得分值。

(3)确定因子权数。通过对地质灾害易损性 因素的分析,利用层次分析标度(Saaty, 1987) (表1)表示因素之间的影响强弱,逐项就各层中 的因子对上一层目标的相对重要性进行两两比 较,构建判别矩阵,同时参考专家意见,确定它们 的相对重要性并赋以相应的分值,构建判断矩 阵。再计算最大特征根、对应的特征向量、各层 次的单排序以及进行判断矩阵一致性检验。

表1 层次分析法的判断矩阵标志及其含义

 Table 1 Signs and meanings of the judgment matrix in the analytic hierarchy process

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍微重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者更为重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述两相邻判断之中值
倒数	若因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 的重要性之比为a _{ij} , 那么因素j与因素i的重要性之比a _i =1/ a _{ij}

(4)承灾体易损性与抗灾能力分级。将单因 子得分值和权重分别代入加权平均公式计算综合 指数,其计算公式如下:

$$V_{\overline{B}} = \sum_{i=1}^{n} a_i \times b_i \tag{1}$$

$$DR_{\dot{\pi}\mathcal{R}} = \sum_{i=1}^{n} x_i \times y_i \qquad (2)$$

式中: *V*_{易损}—易损指数; *a*_i—第 i 类影响易损性因素的权重; *b*_i—第 i 类影响易损性因素的分值; *DR*_{抗灾}—承灾体抗灾能力综合指数; *x*_i—第 i 类影响抗灾能力的因素权重; *y*_i—第 i 类影响抗灾能力的因素权重; *y*_i—第 i 类影响抗灾能力的因素权重; *y*_i—第 i 类影响抗灾能力

(5)构建基于承灾体抗灾能力的易损性评价 模型。基于承灾体抗灾能力的地质灾害易损性评 价模型如图 2 所示,其计算公式如下:

$$V_{\rm sharphi(\beta = h \pi \pi \pi \pi \pi \pi)} = \frac{V_{\rm sharphi}}{DR_{\rm high}}$$
(3)

式中: V_{易损(考虑抗灾能力)}— 基于承灾体抗灾能力的易 损指数。

(6)绘制可视化图件。基于 ArcGIS 空间数据

管理、分析和制图能力,将各因子的分区图按因子 权重进行叠加,得到叠加后工作区的易损指数、抗 灾能力和基于承灾体抗灾能力的易损指数,将得 到的易损指数合理分为4段,分别赋予4种不同 颜色,实现可视化,得到易损性分区图。



Fig. 2 Vulnerability evaluation model based on the disasterbearing body's disaster resistance capacity

3 结果与分析

3.1 单因子评价

3.1.1 易损性评价因子

易损性评价主要分为生命易损性、社会经济 易损性和资源环境损失。资源环境损失由于资料 收集的困难在本次评价中未被考虑,且资源环境 损失有一部分内容和土地利用规划相重复。生命 易损性主要考虑人口密度,社会经济易损性主要 是根据社会功能进行划分,社会功能的直接体现 就是土地利用规划,同时考虑建筑价值,评价等级 参考前人研究(赵卫权等, 2008; 郭海湘等, 2014; 吴丝雨等, 2017),并结合工作区实际情况来划 分。根据土地利用现状图及城市规划、人口分 布、土地价值等资料,结合遥感影像,对各因子分 区赋予相应属性值(属性值的范围是在0~4) (表 2), 划分人口密度分区(图 3a)、土地利用类型 分区(图 3b)、建筑价值分区(图 3c)。汉南纱帽区 薇湖路社区——新兰社区——滨江路社区——兴城社区 一带以居住用地为主,多见高层住宅,建筑价值 高---极高,人口密度极高;金口金水闸一带耕地及

表 2 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区易损性评价因子评分表 Table 2 Scoring table of vulnerability evaluation factors in the typical karst collapse

area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

评价因子			评价等级及量化值			
准则	量化说明	指标	极高(4)	高(3)	中(2)	低(1)
生命易损性	人口密度(人/km ²)	F_1	≥30000	[10000, 30000)	[5000, 10000)	[0, 5000)
社会经济易损性	土地利用类型	F ₂	居住用地、政府机构、 教育科研机构、医院	商业办公、 厂房、仓库	市政设施、道路 交通、文娱用地	耕地、林地、 水系、未利用地
	建筑价值(元/m ²)	F ₃	≥50000	[10000, 50000)	[5000, 10000)	[0, 5000)



图 3 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区 易损性评价因子分区图

Fig. 3 Zoning of vulnerability evaluation factors in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City
a. 人口密度(人/km²); b. 土地利用类型; c. 建筑价值(元/m²)

林地广泛分布,居住用地多为3—4层的私房,建 筑价值中—低,人口密度高;汉南纱帽区幸福村和 陡埠村以厂房为主,居住用地多为3—4层的私 房,建筑价值中—低,人口密度中—低。

3.1.2 承灾体抗灾能力评价因子

承灾体抗灾能力评价因子主要考虑生命抗灾 能力和社会经济抗灾能力。建筑的结构类型、建 筑层数、建造年限和维护情况等是影响其抗灾能 力的主要因素(吴丝雨等, 2017)。结构是建筑安

全的基础,更是建筑抗灾的主体,所以建筑结构是 城镇建筑抗灾性能评价考虑的首要因素。建筑层 数与建筑结构有很大关系,一般情况下,在做建筑 设计时,砖混结构楼高不能超过6层,砖木结构一 般不超过3层,而钢结构和钢筋混凝土结构可用 于中高层或超高层建筑,故在简化模型过程中将 建筑层数合并至建筑结构进行综合分析。建筑的 安全性与其已使用年限相关,一般情况下,建筑的 结构材料会随着建筑使用时间的增加而慢慢老 化,导致其对灾害的抵抗能力随之减弱。在人口 因素中,除人口密度外,老幼占比越大,抗灾能力 越弱(程书波等, 2024)。因此, 在充分考虑区域自 然和社会特性及数据可获取性、可操作性、可比 性以及可量化的基础上,借鉴以往学者(陈华清 等, 2015; 韩健楠等, 2018) 对地质灾害综合承灾力 评价指标体系和模型的构建,将人口年龄系数、建 筑结构和建筑年代三大指标作为承灾体抗灾能力 评价因子(表 3)。

根据表 3 中评价因子的评价等级和量化值, 按照人口年龄系数(Ca)、建筑结构、建筑年代图 层的属性划分为强抗灾能力、较强抗灾能力、中 等抗灾能力和弱抗灾能力四级,形成人口年龄系 数分布图(图 4a)、建筑结构分布图(图 4b)和建筑 年代分布图(图 4c),其中人口年龄系数为评价单 元内老年人(>60 岁)和少年儿童(0~13 岁)人口 与总人口的比例,用 Ca 表示。汉南纱帽区薇湖路 社区—新兰社区—滨江路社区—兴城社区一带老 年人和少年儿童占比较高,人口年龄系数多为极 高—高,建筑结构以钢筋混凝土和砖混结构为主, 建筑年代多早于 2020 年;金口金水闸一带人口年 龄系数多为极高—高,建筑结构以砖混结构为主,

表 3 武汉市汉南-金口岩溶塌陷典型区承灾体抗灾能力评价因子评分表

Table 3 Scoring table of evaluation factors for the disaster - resistance capacity of the disaster - bearing body

in the typical karst collapse area fr	rom Hannan to Jinkou in Wuhan City
---------------------------------------	------------------------------------

评价因子			评价等级及量化值			
准则	量化说明	指标	极高(4)	高(3)	中(2)	低(1)
生命抗灾能力	人口年龄系数	F_4	Ca≤0.2	0.2 <ca≤0.4< td=""><td>0.4<ca≤0.6< td=""><td>Ca>0.6</td></ca≤0.6<></td></ca≤0.4<>	0.4 <ca≤0.6< td=""><td>Ca>0.6</td></ca≤0.6<>	Ca>0.6
计合场这结束能力	建筑结构	F ₅	钢筋混凝土	钢结构	砖混结构	装配式结构
<u>和云空研机</u> 火能力	建筑年代	F ₆	≥2020年	2005—2019年	1995—2004年	<1995年

注:人口年龄系数范围为0~1,0表示评价区人口全部为青壮年人,1表示全部为老年人和少年儿童.



图 4 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区承灾体 抗灾能力评价因子分区图

Fig. 4 Zoning of evaluation factors for the disaster-resistance capacity of disaster-bearing bodies in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

a. 人口年龄系数; b. 建筑结构; c. 建筑年代

建筑年代多早于 2005年;汉南纱帽区幸福村和 陡埠村厂房多为钢结构,厂房内工人多以中青年 为主,人口年龄系数中—低,建筑年代多晚于 2005年。

3.2 易损性分级

3.2.1 传统易损性评价分级

利用层次分析标度得到易损性评价因子组合 权重表(表 4),模型为: V_{易损}=0.6×人口密度+0.1× 土地利用类型+0.3×建筑价值,各评价因子量化值 见表 2。基于 ArcGIS 空间分析模块,将各易损性 因子区文件进行叠加分析。通过对易损指数计算 结果的分析,结合全区易损度分布情况,将全区易 损性划分为四个等级,分别对应的易损指数区间, 其中 0~0.2 为低易损区,0.2~1.6 为中易损区, 1.6~2.8 为高易损区,2.8~4 为极高易损区 (图 5)。

表 4 武汉市汉南-金口岩溶塌陷典型区 易损性评价因子组合权重表

Table 4 Combined weight values of vulnerabilityevaluation factors in the typical karst collapsearea from Hannan to Jinkou in Wuhan City

指标		生命易损性	社会经济易损性	F层总排序
		0.600	0.400	权重
人口密度	F_1	0.600		0.600
土地利用类型	F_2		0.250	0.100
建筑价值	F_3		0.750	0.300

工作区内极高、高、中和低易损区的面积分 别为 0.9 km²、1.56 km²、3.41 km²和 18.43 km²,面 积占比分别为 3.70%、6.42%、14.03% 和 75.84%。 极高易损区主要位于汉南纱帽区北段及金口金康 社区,该区以居住用地为主,多见高层住宅,建筑 价值高—极高,人口密度极高;高易损区主要位于 汉南纱帽区南段和金口居住用地区,以 3—4 层的 私房和少量厂房为主,建筑价值中—低,人口密度 高;中易损区主要位于区内广泛分布的道路和幸 福村西段厂房,人口密度和建筑价值低;低易损区 在区内广泛分布,土地利用类型为耕地、林地、水 系或未利用地,一般不存在建筑物。

3.2.2 承灾体抗灾能力分级

承灾体抗灾能力评价因子组合权重指标参照 表 5,最后利用综合指数法计算每一个评价单元



图 5 武汉市汉南-金口岩溶塌陷典型区传统易损性评价分区图

Fig. 5 Zoning of traditional vulnerability evaluation in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

的抗灾能力指数,抗灾能力综合指数评价模型为: DR_{抗灾}=人口年龄系数×0.4+建筑结构×0.4+建筑年 代×0.2,各评价因子量化值见表 3。利用 ArcGIS 空间分析模块,将各抗灾因子区文件进行叠加分 析,对叠加区进行 lab 点提取并将其属性导出,通 过对抗灾能力综合指数计算结果的分析,将全区 抗灾能力划分为4个等级,抗灾能力综合指数为 0~1.95、1.95~2.95、2.95~3.4、>3.4的区域分别 划分为低抗灾能力区、中抗灾能力区、高抗灾能 力区、极高抗灾能力区(图 6)。

表 5 武汉市汉南-金口岩溶塌陷典型区承灾体抗灾能力评价因子组合权重表

 Table 5
 Combined weight values of evaluation factors for the disaster - resistance capacity of disaster - bearing bodies in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

北标		生命抗灾能力	社会经济抗灾能力	r目台排它权重	
10/1/1		0.400 0.600		- I/云心飛/小人里	
人口年龄系数(Ca)	F_4	0.400		0.400	
建筑结构	F_5		0.666	0.400	
建筑年代	F_6		0.333	0.200	



图 6 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区承灾体抗灾能力分区图 Fig. 6 Zoning of the disaster-resistance capacity of disaster-bearing bodies in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

工作区内承灾体抗灾能力极高、高、中和低 的面积分别为 1.56 km²、0.71 km²、0.56 km²和 1.03 km²,空白区域无建筑。承灾体抗灾能力极高 的区域主要位于汉南纱帽区幸福村和陡埠村西南 边厂房区,人口年龄系数小、建筑年代新、建筑结 构多为钢结构;承灾体抗灾能力低的主要位于汉 南纱帽区幸福村和陡埠村私房,以及金口金水闸 私房,区内人口年龄系数大、建筑年代老、建筑结 构多为砖混结构。

3.2.3 基于承灾体抗灾能力的易损性评价分级

将易损性分区评价的极高、高、中和低四个 等级分别赋值4、3、2、1,将承灾体抗灾能力分区 评价的极高、高、中和低抗灾能力四个等级分别 赋值 3.6、2.8、2.0 和 1.2,将无建筑区赋值为 1。 利用 ArcGIS 空间分析模块,将各基于承灾体抗灾 能力的易损性区文件进行分析,将基于承灾体抗 灾能力的易损性指数划分为四个等级,即0~
1.0、1.0~1.95、1.95~2.48和2.48~4,分别划分为基于抗灾能力的低易损区、中易损区、高易损区和极高易损区(图7)。



图 7 武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区基于抗灾能力的易损性评价分区图 Fig. 7 Zoning of vulnerability evaluation based on the disaster resistance capacity in the typical karst collapse area from Hannan to Jinkou in Wuhan City

武汉市汉南纱帽—金口金水闸区域基于抗灾 能力的极高、高、中和低易损区面积分别为 1.00 km²、2.28 km²、1.03 km²和 19.99 km²,面积 占比分别为 4.12%、9.38%、4.24% 和 82.26%。基 于抗灾能力的极高易损区在长江两岸均有分布, 其中汉南纱帽街陡埠村及金口金水闸一带居住用 地以私房为主,虽建筑价值及人口密度中等—高, 但人口年龄系数大、建筑年代老、建筑结构多为 砖混,承灾体抗灾能力低,长江大堤一旦溃堤,造 成的生命与社会经济损失不可估量。基于抗灾能 力的极高易损区主要分布在道路、距长江大堤 0~50 m 及汉南纱帽区新兰社区—朱家山社区 一带。

4 讨论

本文从承灾体抗灾能力对地质灾害风险的影响出发,提出了基于承灾体抗灾能力的地质灾害 易损性评价模型,将其运用到武汉市汉南纱帽— 金口金水闸一带岩溶塌陷高易发区,从生命和社 会经济两方面,建立工作区易损性和抗灾能力评 价指标体系,选取人口密度、土地利用类型和建筑 价值作为易损性评价指标,选取人口年龄系数、建 筑结构和建筑年代作为抗灾能力评价指标,利用 ArcGIS 软件对各评价指标进行提取和分析,完成 工作区基于承灾体抗灾能力的地质灾害易损性评价,并与传统易损性评价模型进行了对比(表 6)。

结果显示,无建筑区内,传统易损性评价与基 于承灾体抗灾能力的易损性评价分区结果一致, 等级均划分为低,而在建筑区内,传统易损性评价 与基于承灾体抗灾能力的易损性评价分区具有显 著差异。传统易损性评价中,汉南纱帽区北段为 极高易损区,该区以居住用地为主,多见高层住 宅,建筑价值高—极高,人口密度高—极高,但区 内高层建筑地基良好,建筑结构为钢筋混凝土,建 筑年代较新,人口年龄系数中等,抗灾能力高,降 低了基于承灾体抗灾能力的易损性评价等级,导 致基于承灾体抗灾能力的易损性评价等级为高— 中等;汉南纱帽街陡埠村及金口金水闸一带居住 用地以私房为主,建筑价值及人口密度中等--高, 传统易损性评价划分为高易损区,但区内人口年 龄系数大、建筑年代老、建筑结构多为砖混,承灾 体抗灾能力低,因此基于承灾体抗灾能力的易损 性评价将其划分为极高易损区;汉南纱帽街幸福 村西段厂房,人口密度和建筑价值中等偏低,传统 易损性评价划分为中易损区,但区内人口年龄系 数小、建筑年代新、建筑结构多为钢结构,承灾体 抗灾能力极高,因此基于承灾体抗灾能力的易损

表 6 基于抗灾能力的武汉市汉南—金口岩溶塌陷典型区易损性与传统易损性评价等级差异一览表 Table 6 Comparison table of vulnerability and traditional vulnerability evaluation grades in the typical

karst collapse area from Hannan to Jinkou in	Wuhan City based on disaster resistance capacity
--	--

基于抗灾 能力的 易损性等级	面积(km²)	典型分布区	传统易损 性等级	抗灾能力影响
极高	1.00	汉南纱帽区陡埠村; 汉南纱帽区南侧约500 m处; 金口金水闸长江村、范湖社区西侧、 金兴社区西侧、闸东社区、农科所西南侧	高	区内人口年龄系数大、建筑年代老、建筑结 构多为砖混,承灾体抗灾能力低,导致基于承 灾体抗灾能力的易损性评价等级升高。
		长江大堤	中	长江大堤一旦溃堤,造成的生命与社会经济 损失不可估量。
高 2.28	2 28	汉南纱帽区新兰社区——兴城社区南段	极高	建筑地基良好,建筑结构为钢筋混凝土,建筑 年代较新,人口年龄系数中等,抗灾能力高, 导致基于承灾体抗灾能力的易损性评价等级 降低。
	2.20	道路	中	道路地基薄, 抗灾能力低, 导致基于承灾体抗 灾能力的易损评价等级升高。
		长江大堤的0~50 m范围	低	地下结构失稳会威胁长江大堤的安全。
中		汉南纱帽区陡埠村南侧	高	建筑年代较新,为钢结构,人口年龄系数中 等,抗灾能力高,导致基于承灾体抗灾能力的 易损性评价等级降低。
	1.03	金口金水闸农科所北侧、闸东社区东侧		建筑年代较新,导致基于承灾体抗灾能力的 易损性评价等级降低。
		金口金水闸金康社区西侧; 汉南纱帽区兴城社区—马影河社区西侧、 薇湖路社区西侧、陡埠村北侧	极高	区内高层建筑地基良好,建筑结构为钢筋混 凝土,建筑年代较新,人口年龄系数中等,抗 灾能力高,导致基于承灾体抗灾能力的易损 性评价等级降低。
低	19.99	汉南纱帽区幸福村和陡埠村西侧	中	建筑年代较新,为钢结构,人口年龄系数中 等,导致基于承灾体抗灾能力的易损性评价 等级降低。

性评价将其划分为低易损区;区内广泛分布的道路人口密度和建筑价值中等偏低,长江大堤人口密度和建筑价值中等偏低,长江大堤人口密度低,传统易损性评价均划分为中易损区,但道路地基薄,抗灾能力低,划分为基于承灾体抗灾能力的高易损区,长江大堤一旦溃堤,造成的生命与社会经济损失不可估量,因此将长江大堤划分为基于承灾体抗灾能力的极高易损区,将距离长江大堤的 0~50 m 范围内划分为基于承灾体抗灾能力的高易损区。

地质灾害风险评价是一个持续完善的过程, 随着后续调查、防治与研究工作的开展,应不断运 用新理论、新方法验证并优化评价方法及指标体 系,继续完善地区地质灾害风险评价科学研究体 系,从而更好地指导地质灾害防治工作。

5 结论

(1)根据武汉市汉南纱帽—金口金水闸一带 岩溶地面塌陷高易发的特点,建立了基于人口密 度、土地利用类型和建筑价值的易损性评价指标 体系,以及基于人口年龄系数、建筑结构和建筑年 代的抗灾能力评价指标体系。

(2)利用 ArcGIS 软件对各评价指标进行提取 和分析,完成工作区基于承灾体抗灾能力的地质 灾害易损性评价,实现可视化,并与传统易损性评 价模型进行了对比。无建筑区内,传统易损性评 价与基于承灾体抗灾能力的易损性评价分区结果 一致,而在建筑区内,传统易损性评价与基于承灾 体抗灾能力的易损性评价分区具有显著差异。

(3)抗灾能力对城市地质灾害风险影响显 著。工作区内传统极高易损区的面积占比 3.70%, 主要位于汉南纱帽区北段,但区内高层建筑抗灾 能力高,人口年龄系数中等,导致基于承灾体抗灾 能力的易损性评价等级为高—中等;传统易损性 评价将汉南纱帽街陡埠村及金口金水闸一带划分 为高易损区,但区内承灾体抗灾能力低,因此基于 承灾体抗灾能力的易损性评价将其划分为极高易 损区。

参考文献:

- 毕小玉,张靖岩,王 佳.2014.基于模糊综合评价的建筑综合 防灾能力评估体系 [J]. 自然灾害学报,23(4):257-262.
- 蔡向阳,铁永波.2016.我国山区城镇地质灾害易损性评价 研究现状与趋势 [J]. 灾害学,31(4):200-204.
- 陈 宾,魏 娜,张联志,李颖懿,刘 宁,屈添强.2024.基于斜坡单 元灾害强度的滑坡灾害易损性评价——以湖南省湘乡 市为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报,35(2):137-145.
- 陈华清,杨敏,张江华,何芳,乔冈,刘瑞平.2015.基于抗灾能 力的矿渣型泥石流风险评价方法—以小秦岭金矿区 为例[J]. 地质通报,34(11):2009-2017.
- 程书波,李冲,刘玉.2024.基于组合赋权的河南省洪涝灾害 综合承灾力评价 [J]. 人民黄河,46(7):48-55.
- 高玉欣,刘德成,高雪媛.2021.区县地质灾害风险评价中易 损性评价研究 [J]. 环境生态学,3(5):49-54.
- 葛学礼,朱立新,于文.2014.我国村镇建筑防灾研究概述 [J]. 自然灾害学报,23(2):8-14.
- 郭海湘,李亚楠,黎金玲,尹朋珍.2014.基于灾害多级联动模型的城市综合承灾能力研究 [J]. 系统管理学报, 23(1):91-103+110.
- 韩健楠,李永红,刘海南,何倩,李傲雯.2018.基于综合防治 体系抗灾能力的泥石流沟风险评价[J]. 灾害学, 33(1):230-234.
- 何寒舟,丁一.2024.赣南地区地质灾害风险区划分析研究 [J].华南地质,40(4):737-748.
- 胡冬华.2016.地质灾害风险评价及其管理研究 [J]. 岩土工 程技术,30(6):298-302.
- 胡现振,付少杰,迟宏庆,张辉军,张志飞.2023.基于层次分 析-信息量耦合模型的地质灾害风险评价—以河北省 武安市为例 [J]. 中国地质调查,10(5):109-117.
- 黄润秋.2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制

[J]. 岩石力学与工程学报,26(3):433-454.

- 江思义,吴福,刘庆超,何源,李海良.2020.基于 GIS 与 AHP 法的岩溶塌陷易损性评价及其在城市建设规划 中的意义 [J]. 矿产勘查,11(3):616-623.
- 江思义,吴福,王启耀,刘庆超,李海良,潘晓丽.2019.岩溶地 区地下空间开发适宜性评价—以桂林市规划中心城 区为例 [J].桂林理工大学学报,39(2):402-409.
- 李宇亮,王豪伟,邓红兵,董仁才.2014.城市规划区地质灾害 易损性评价 [J].环境科学与技术,37(S2):526-529+610.
- 连志鹏, 厉一宁, 刘磊, 王宁涛. 2022. 基于 ArcGIS 的湖北省 远安县地质灾害风险定量评价 [J]. 华南地质, 38(4): 680-688.
- 王日标,张剑波,谭辉善.2017.地质灾害风险评价指标体系 构建研究 [J]. 南方国土资源,(12):33-36+40.
- 武汉城市综合地质调查及应用编委会. 2021. 武汉城市综合地质调查及应用 [M]. 北京:科学出版社.
- 吴丝雨. 2017. 基于 GIS 技术的山区村镇建筑滑坡抗灾能 力模糊综合评价 [D]. 武汉大学硕士学位论文.
- 许强,张一凡,陈伟.2010.西南山区城镇地质灾害易损性评价方法—以四川省丹巴县城为例[J]. 地质通报,29(5): 729-738.
- 颜建东,李 玥,吴环环,郑金龙.2020.地质灾害易损性评价模型在城市地质中的应用 [J]. 工程建设与设计,(22):36-37.
- 杨 伟.2024.基于贡献率权重法的丰顺县地质灾害易损性 评价 [J]. 地下水,46(3):177-179.
- 殷坤龙,张桂荣.2003.地质灾害风险区划与综合防治对策 [J]. 安全与环境工程,(1):32-35.
- 赵卫权.2008. 自然灾害社会易损性评价指标体系研究 [D]. 重庆师范大学硕士学位论文.
- 周壁鑫.2019.地质灾害风险评价的理论与方法 [J]. 中国金 属通报,(3):285-286.
- Cheng Y X, Gan Y, Shi C M, Huo A, Huo A D, Pei Y H, Song Y, Wang X, Ahmed A. 2024. A Critical Analysis of Geological Hazard Risk Assessment Including Future Perspectives[J]. Sustainability, 16(9): 3701.
- Cuanalo O, Bernal E, Polanco G. 2014. Geotechnical stability analysis, fragility of structures and velocity of movement to assess landslides vulnerability[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2(9): 5689-5720.
- Das I, Kumar G, Stein A, Bagchi A, Dadhwal V K. 2011. Stochastic landslide vulnerability modeling in space and

time in a part of the northern Himalayas, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 178(1): 25-37.

- Ding M T, Tang C, Huang T, Gao Z M. 2020. Dynamic Vulnerability Analysis of Mountain Settlements Exposed to Geological Hazards: A Case Study of the Upper Min River, China[J]. Advances in Civil Engineering, (2): 1-13.
- Lai F, Shao Q F, Lin Y, Yi X, Sun X F, Shao H Y, Xian W, Peng P H. 2021. A method for the hazard assessment of regional geological disasters: a case study of the Panxi area, China[J]. Journal of Spatial Science, 66(1): 143-162.
- Lin J H, Chen W H, Qi X H, Hou H R. 2021. Risk assessment and its influencing factors analysis of geological hazards in typical mountain environment[J]. Journal of Cleaner Production, 309: 127077.
- Reyes-Hardy M P, Barraza F A, Birke J P S, Caceres A E, Pizarro M I. 2021. GIS-based volcanic hazards, vulnera-

bility and risks assessment of the Guallatiri Volcano, Arica y Parinacota Region, Chile[J]. Journal of South American Earth Sciences, 109: 103262.

- Saaty R W. 1987. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 9(3): 161-176.
- WCED. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: note / by the Secretary-General [R].
- Xu F G, Ou Y H, Wang F, Wei B W, Ruokun N. 2023. Risk assessment of geological disasters in Beichuan County after the Wenchuan earthquake based on ArcGIS[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(11): 416.
- Yang Y G, Yu J Q, Fu Y B, Hu J T. 2019. Research on geological hazard risk assessment based on the cloud fuzzy clustering algorithm[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 37(4): 4763-4770.