

## 江苏南京地质灾害风险评价

刘宝生, 陈刚, 程刚建

### Risk assessment of geological disasters in Nanjing, Jiangsu Province

LIU Baosheng, CHEN Gang, and CHENG Gangjian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205048>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

#### 甘肃定西地区地质灾害危险性评价

Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

沈迪, 郭进京, 陈俊合 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 134-142

#### 安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110-116

#### 渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

#### 渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205048

刘宝生, 陈刚, 程刚建. 江苏南京地质灾害风险评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 97-104.

LIU Baosheng, CHEN Gang, CHENG Gangjian. Risk assessment of geological disasters in Nanjing, Jiangsu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 97-104.

## 江苏南京地质灾害风险评价

刘宝生<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 程刚建<sup>2</sup>

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018;

2. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东济南 250014)

**摘要:** 地质灾害风险评价是地质灾害风险管控的支撑与依据, 对于科学防治地质灾害具有重要意义。以江苏南京为研究区, 选取历史灾害点密度等影响因子开展易发性评价, 以降雨量作为诱发因素开展危险性评价, 结合承灾体易损性, 分析划定地质灾害高、中、低三类风险区。结果表明: 高风险区主要集中在沿江的老山、幕府山、紫金山、栖霞山以及青龙山等部分人员聚居的山前坡麓一带, 面积 51.3 km<sup>2</sup>, 占比 0.8%; 中风险区主要集中在低山丘陵中人员较集中的区域, 面积 371.9 km<sup>2</sup>, 占比 5.6%; 低风险区分布较广, 位于其余低山丘陵岗地, 面积 1 740.1 km<sup>2</sup>, 占比 26.4%。研究成果可有效支撑当地地质灾害防灾减灾以及国土空间规划应用。

**关键词:** 地质灾害; 易发性; 危险性; 易损性; 风险评价; 南京

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)04-0097-08

## Risk assessment of geological disasters in Nanjing, Jiangsu Province

LIU Baosheng<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, CHENG Gangjian<sup>2</sup>

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. No. 1 Geological Team of Shandong Province Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** Geological disaster risk assessment serves as a crucial foundation for the risk management and control of such risks, playing a significant role in the scientific prevention and control of geological disasters. This study focuses on Nanjing, Jiangsu Province, and employs historical disaster point density and other influencing factors to evaluate the susceptibility of geological disasters. Rainfall is utilized as the triggering factor for conducting probability assessments. By considering the comprehensive vulnerability of the affected areas, the study analyzes and defines the high, medium, and low-risk zones for geological disasters. The findings reveal that high-risk zone primarily concentrates on populated piedmont slopes, including Laoshan, Mufu Mountain, Zijin Mountain, Qixia Mountain, and Qinglong Mountain, covering an area of 51.3 km<sup>2</sup>, accounting for 0.8% of the total area. Medium-risk zone is mainly located in areas with relatively concentrated populations in low mountains and hills, covering an area of 371.9 km<sup>2</sup>, accounting for 5.6% of the total area. Low-risk zone is more widely distributed, occupying the remaining low mountains and hills, covering an area of 1 740.1 km<sup>2</sup>, accounting for 26.4% of the total area. The research results can effectively support disaster prevention, mitigation efforts related to geological disasters, and contribute to land space planning.

**Keywords:** geological hazard; susceptibility; probability; vulnerability; risk assessment; Nanjing

## 0 引言

近年来,我国地质灾害防治工作由隐患管理逐步向风险管理转变,作为地质灾害风险管理的支撑和依据,地质灾害风险评价越来越受重视<sup>[1]</sup>。

早在 20 世纪 60 年代,国外已开始研究地质灾害风险性相关内容<sup>[2]</sup>。联合国于 1991 年将地质灾害风险性正式定义为在一定时间与特定区域内,地质灾害发生时,对人类社会造成损失的期望值<sup>[3]</sup>。Remondo 等<sup>[4]</sup>于 2005 年提出了新的基于统计学原理的地质灾害风险性评价方法。国内研究起步稍晚,吴树仁等<sup>[5]</sup>逐步把国外的风险管理理论引入国内。国土资源经济研究院主要致力于地质灾害易损性、风险评价、经济评价等方面的研究<sup>[6]</sup>。王佳佳等<sup>[7]</sup>以三峡库区万州区为例开展滑坡灾害易发性评价,为该区域滑坡灾害防治规划与预测预报提供技术支持。施成艳等<sup>[8]</sup>在对区域 1:5 万地质灾害详细调查的基础上,利用综合指数法对地质灾害进行了易发区划分。李春燕等<sup>[9]</sup>采用地质灾害危险性与承灾体易损性分项测算,以定性综合评估的方式实现我国县域单元地质灾害风险评估。在国内外研究成果的支撑下,国务院于 2020 年部署了第一次全国自然灾害综合风险普查。作为六大灾种之一,地质灾害风险普查工作取得了阶段性进展,110 个试点县已顺利完成,其中江苏省完成了徐州市铜山区和常州市金坛区两个县级试点。

从国内研究成果及相关工作部署来看,目前对于地质灾害易发性研究较多,且尺度一般以县级、城镇为主,缺乏系统的市级地质灾害风险性研究。本文以南京市为研究区,系统开展了易发性、危险性、易损性评价,并通过矩阵分析开展市级风险评价。相关成果为南京市地质灾害防灾减灾以及国土空间规划提供有效支撑,也为类似工作提供经验借鉴。

## 1 研究区概况

研究区位于江苏省西南部,呈近南北走向“带状”,总面积 6 587 km<sup>2</sup>。

区域地处低山丘陵与平原过渡地带,境内有东西向的老山山脉、宁镇山脉横于长江两侧。构造上处于扬子板块上一个以震旦系为变质基底的长期凹陷带内,断裂根据走向大体可分为北北东向压扭性断裂、北西向张性断裂以及近东西向断裂。地层属华南地层大区下扬子分区,对地质灾害影响较大的地层岩性主要为震旦系至奥陶系以及中石炭统至下二叠统的碳酸盐岩、上侏罗统至白垩系的碎屑岩、第四系的黏土、粉质黏土。

研究区属于北亚热带季风气候,多年平均降水量为 1 083.2 mm,其中 6—9 月为降雨集中期,多年平均降水量 600.1 mm,约占全年降水量的 53%。此外,作为长三角特大城市之一,工程建设密集繁多,不可避免的削坡、开挖坡脚等对边坡稳定性造成一定程度的破坏,区内每年排查新增的崩塌、滑坡地质灾害大多为因人类工程活动而导致的边坡失稳。

## 2 地质灾害类型及时空分布特征

### 2.1 地质灾害类型特征

根据地质灾害历史数据统计显示,滑坡是区内数目最多、危害最大的地质灾害类型,其次为崩塌。截至 2022 年 4 月,研究区地质灾害隐患点共计 202 处,其中滑坡 130 处,占比 64.36%;崩塌 72 处,占比 35.64%。威胁人数约 1 196 人,潜在经济损失约 17 758 万元<sup>[10]</sup>。

研究区滑坡隐患点规模多为小型,长度基本小于 100 m,宽度小于 200 m,厚度一般为 1 m 左右,中型规模滑坡可达 15 m,多呈复合式滑动。平面形态以半圆形为主,剖面形态以直线形和凹形为主。滑体性质主要为土质,研究区广泛分布的下蜀土具有吸水饱和后强度迅速降低的力学性质,易导致滑坡产生<sup>[11-14]</sup>。崩塌隐患点规模亦多为小型,呈拉裂式,主要发生于 70°~90°的陡崖地段,以顺向坡为主,多在碳酸盐岩及砂岩等碎屑岩地层发育。

### 2.2 地质灾害时空分布特征

地质灾害在空间上的展布具有明显的不均匀性和区域集中性。主要在中部的沿江低山—丘陵区分布最为密集,其次是南部的石臼湖—固城湖滨湖平原—岗地区及秦淮河流域丘陵—岗地—平原区,在北部六合岗地—丘陵区分布最为稀疏。

在时间分布上,根据近 30 年来已发生的 116 处地质灾害发育时间历史记录统计,其发生集中分布于每年的 6、7 月,已查明地质灾害分别为 11 处、85 处,占比 82.8%,尤以滑坡更为明显,其余各月查明地质灾害点较少,占比 17.2%(图 1)。由此可见,地质灾害的时间分布特征与年降雨量集中分布时间相一致,每年的雨季是地质灾害的高易发期,强降雨和持续性降雨为地质灾害发育分布的主要诱发因素。

## 3 研究方法

根据地质灾害风险理论,地质灾害风险评价由地质灾害易发性评价、危险性评价、易损性评价、风险评价构成。

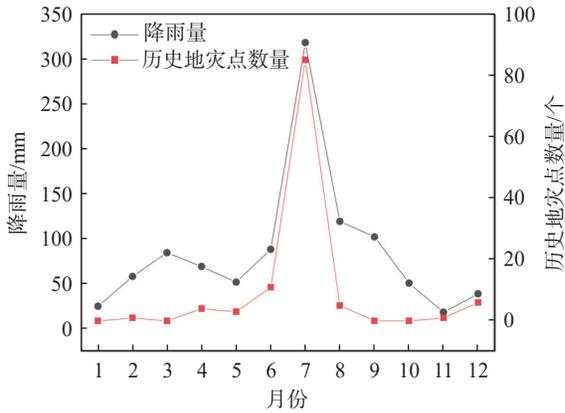


图 1 降雨量与历史地灾点数量关系

Fig. 1 Relationship between rainfall amount and the number of historical disasters

### 3.1 易发性评价

地质灾害易发性评价采用信息量法结合层次分析法开展。

(1)信息量法<sup>[15-16]</sup>。地质灾害的形成受多种因素影响,信息量模型通过特定评估单元内某种因素作用下地质灾害发生频率与区域地质灾害发生频率相比较实现。对应某种因素特定状态下的地质灾害信息量公式可表示为下式:

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中:  $I_{A_j \rightarrow B}$ ——对应因素  $A$ 、 $j$  状态下地质灾害  $B$  发生的信息量;

- $N_j$ ——对应因素  $A$ 、 $j$  状态下地质灾害分布的单元数;
- $N$ ——调查区已有地质灾害分布的单元总数;
- $S_j$ ——因素  $A$ 、 $j$  状态分布的单元数;
- $S$ ——调查区单元总数。

各状态因素组合条件下信息量的综合值越大表示越易于发生地质灾害,该单元内的地质灾害易发性越高。最后对全部单元信息量值划分类别,分成不同的易发等级。

(2)层次分析法<sup>[17-19]</sup>。该方法将复杂问题中的各种因素以某种相互联系的有序层次使之条理化,并将数据、专家意见和分析者的主观判断直接有效地结合起来,就每一层次的相对重要性予以定量表示。然后,利用数学方法确定每一层次全部元素的相对重要性权值,通过排序结果分析并求解所提出的问题。

(3)评价单元确定。评价单元通常可取栅格单元或斜坡单元,对于地形较为平坦、山体规模较小的地区,规则的栅格单元更为适用,其优势是易于获取和处理各类数据且运算速度快。结合研究经验<sup>[20]</sup>,栅格单元大小

可按式计算:

$$G_s = 7.49 + 0.0006S - 2 \times 10^{-9}S^2 + 2.9 \times 10^{-15}S^3$$

式中:  $G_s$ ——适宜网格的大小;

$S$ ——原始等高线数据精度的分母。

### 3.2 危险性评价

区内崩塌、滑坡地质灾害的主要诱发因素是连续大量降雨,在前述易发性评价的基础上,选取不同降雨重现周期开展地质灾害危险性评价。在此之前,需先进行区域地质灾害时间概率和空间概率的计算,其中时间概率的计算需满足一定的前提条件,即长重现期降雨诱发的地质灾害中一定包含了短重现期降雨诱发的地质灾害,考虑到降雨量一旦超过了地质灾害的降雨临界阈值,便发生变形破坏。本次以易发性表征地质灾害的空间概率,以降雨重现概率表征时间概率,危险性按下式计算:

$$H = I \times \left( \frac{H_{24P}}{H_{24}} \right)$$

式中:  $H$ ——每个单元的危险性指数;

$I$ ——每个单元的信息量;

$H_{24P}$ ——不同重现期下研究区年最大日降雨量;

$H_{24}$ ——为年最大日降雨量均值。

### 3.3 易损性评价

地质灾害承灾体易损性评价是对地质灾害可能威胁的建筑物、人员、交通设施进行综合评价。建筑物为人口分布的基础载体,同时又具有自身的经济价值,采用对建筑物面积归一化处理的方法,取归一化值作为研究区内的建筑易损性;采用第七次人口普查常住人口结合建筑物面积与人员分布关系,得到地质灾害危险区内人员分布,通过核密度算法获得人员易损性,再进行重分类;交通设施按其不同类型和等级进行易损性赋值。将不同类型承灾体易损性进行权重叠加,获得综合易损性评价结果。

### 3.4 风险评价

在危险性、易损性评价基础上,采用矩阵分析方法,划分为极高、高、中、低四个等级(表 1)。

表 1 地质灾害风险等级矩阵分析  
Table 1 Analysis of geological hazard risk level matrix

风险性		危险性			
		极高	高	中	低
易损性	极高	极高	极高	高	中
	高	极高	高	中	中
	中	高	高	中	低
	低	高	中	低	低

### 4 评价结果

#### 4.1 易发性评价

(1)评价因子。划分为地质灾害现状、地质环境条件及诱发因素三大类。选取地质灾害点密度、坡度、地形起伏度、地层岩性、地质构造及人类工程活动等 6 项指标作为评价因子。

(2)过程结果。以 ArcGIS 10.8 作为多元数据处理平台,以栅格作为评价单元,将各类数据融合到同一体系下。各个因子分级开始以较小的间隔进行分级,以各指标条件下地质灾害数量和累计发生频次曲线斜率的突变为依据,对评估指标因子进行状态分级,求得最佳因子分级,计算结果见表 2。

表 2 评价因子信息量

Table 2 Information value of evaluation factors

评价因子	子类区间	信息量值
灾害点密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0	-5.86
	(0, 2]	2.51
	(2, 4]	3.10
	>4	4.12
坡度/(°)	[0, 10)	-0.97
	[10, 25)	1.97
	[25, 40)	3.31
	[40, 50)	4.87
	[50, 90]	5.32
地形起伏度/m	<20	-2.16
	[20, 40)	2.86
	[40, 90)	3.47
	[90, 120)	5.24
	[120, 140]	6.85
工程地质岩组	>140	7.13
	老黏性土	-1.43
	一般黏性土	-3.71
	岩浆岩类坚硬岩	1.33
	碎屑岩类软~极软岩	2.64
	碳酸盐岩类坚硬岩	3.10
	碳酸盐岩类较坚硬岩	2.40
碎屑岩类较坚硬岩	2.39	
距断层距离/m	碎屑岩类坚硬岩	1.08
	<20	2.50
	[20, 200)	2.48
	[200, 500)	1.78
	[500, 1 000]	0.90
距道路距离/m	>1 000	-0.56
	<100	-0.19
	[100, 200]	0.06
	(200, 300]	0.53
	(300, 400]	0.65
	(400, 500]	0.59
>500	-2.19	

层次分析法地质灾害易发性评价指标体系见图 2,判断矩阵见表 3、4,经层析分析法计算各因子的权重见表 5。

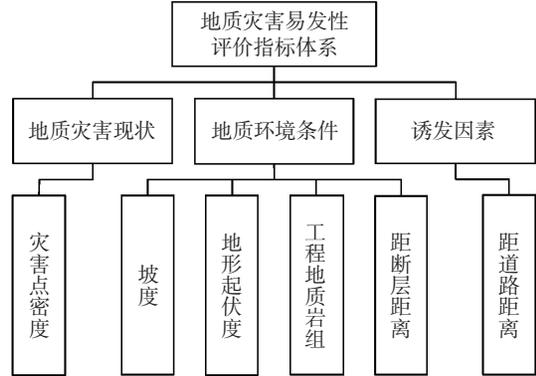


图 2 地质灾害易发性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation indicator system for assessing susceptibility to geological hazards

表 3 地质灾害易发性分区评价判断矩阵

Table 3 Judgment matrix for assessing susceptibility zonation of geological hazards

地质灾害易发性分区评价	地质环境条件	诱发因素	地质灾害现状	权重
地质环境条件	1	3	3	0.593 6
诱发因素	1/3	1	2	0.249 3
地质灾害现状	1/3	1/2	1	0.157 1

判断矩阵一致性比例: 0.051 6;对总目标的权重: 1.000 0;  
最大特征根: 3.053 6

表 4 地质环境条件判断矩阵

Table 4 Judgment matrix for geological environmental conditions

地质环境条件	坡度	工程地质岩组	地形起伏度	距断层距离	权重
坡度	1	1	1	1/2	0.207 1
工程地质岩组	1	1	1	2	0.292 9
地形起伏度	1	1	1	2	0.292 9
距断层距离	2	1/2	1/2	1	0.207 1

判断矩阵一致性比例: 0.092 3;对总目标的权重: 0.593 6;  
最大特征根: 4.246 3

表 5 层次分析法计算各因子权重

Table 5 Calculation of factor weights using analytic hierarchy process (AHP)

影响因子	权重
历史灾害点密度	0.17
坡度	0.12
地形起伏度	0.17
工程地质岩组	0.17
距断层距离	0.12
距道路距离	0.25

由信息量值乘以各因子的权重后再按照自然断点法进行聚类分析, 计算结果如图 3 所示。

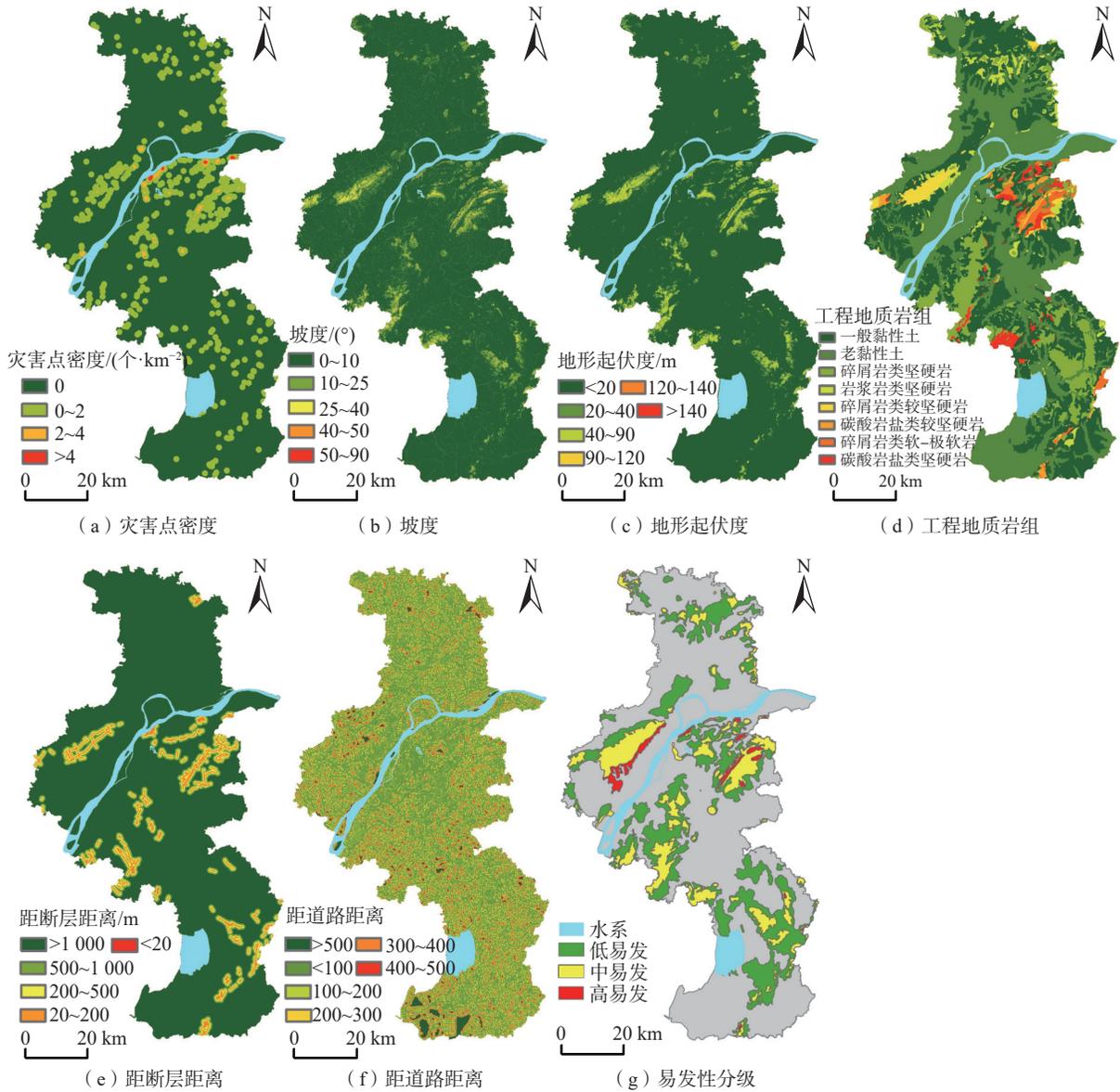


图 3 评价因子分级及易发性等级

Fig. 3 Classification of evaluation factors and susceptibility levels

从易发性评价结果来看, 总体来说, 区内崩塌、滑坡地质灾害易发程度中、低易发区及非易发区分布范围较广, 高易发区分布较少, 崩塌、滑坡易发区面积为 2 175.4 km<sup>2</sup>, 占全区面积的 33%。其中高易发区面积为 90.1 km<sup>2</sup>, 中易发区地区面积为 690.8 km<sup>2</sup>, 低易发区面积为 1 394.5 km<sup>2</sup>。

(3)结果检验。采用接受者操作特性曲线(ROC 曲线)对评价结果进行检验<sup>[21]</sup>。纵轴代表真阳性概率(TPR), 即“地质灾害易发区灾害栅格数”与“研究区灾害栅格数”的比值, 横轴代表假阳性概率(FPR), 即“地质灾害易发区总栅格数-地质灾害易发区灾害栅格数”

与“研究区总栅格数-研究区灾害栅格数”的比值。检验结果以 ROC 曲线下方的面积(AUC)来表示(图 4), AUC 面积为 90.3%>90%, 说明结果准确。

### 4.2 危险性评价

利用 ArcGIS 的空间分析工具计算各评价单元的危险性指数, 将地质灾害危险性分为高危险区、中危险区和低危险区。研究区不同重现期降雨量见表 6, 评价结果见图 5。

根据结果统计, 在 10 年、20 年、50 年、100 年一遇 4 种降雨强度下, 地质灾害总体上呈现高危险区面积逐渐增大、低危险区面积逐渐减小的趋势, 10 年一遇降雨

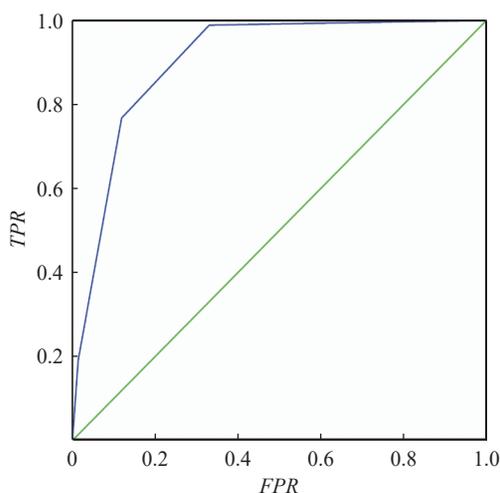


图 4 评价结果 ROC 检验曲线

Fig. 4 ROC curve of evaluation results

表 6 研究区不同重现期降雨量

Table 6 Precipitation distribution in different recurrence period in the study area

年均及不同重现期	降雨量/mm
年最大日降雨量均值	101
$P=10\%$	157.92
$P=5\%$	182.22
$P=2\%$	212.84
$P=1\%$	235.22

强度下, 高危险区面积约 140.63 km<sup>2</sup>, 20 年一遇降雨工况高危险区面积增加至 281.28 km<sup>2</sup>, 面积增加一倍, 50 年一遇降雨工况下面积增加至 498.16 km<sup>2</sup>, 较 20 年一遇增加 77%, 100 年一遇增加至 561.52 km<sup>2</sup>, 较 50 年

一遇增加幅度达 13%。分区域来看, 高危险区主要分布于栖霞山、青龙山沿线、老山东南侧等地, 随降雨周期变长, 高危险区面积显著增加, 且由中危险区升至高危险区。

### 4.3 易损性评价

由表 1 风险等级矩阵分析可知, 仅分析危险区范围内的承灾体即可, 将建筑物、人员、交通设施不同类型承灾体易损性进行叠加, 分析得综合易损性评估图, 见图 6(a)。其中, 极高易损区面积为 304.0 km<sup>2</sup>, 占比 4.62%; 高易损区面积为 296.5 km<sup>2</sup>, 占比 4.50%; 中易损区面积为 173.4 km<sup>2</sup>, 占比 2.63%; 低易损区面积 1 396.4 km<sup>2</sup>, 占比 21.20%。

### 4.4 风险评价

选取 10 年一遇降雨强度危险性评价与易损性评价结果开展矩阵分析, 得到风险评价结果, 见图 6(b)。高风险区主要集中在沿江的老山、幕府山、紫金山、栖霞山以及青龙山等部分人员聚居的山前坡麓一带, 面积 51.3 km<sup>2</sup>, 占比 0.8%; 中风险区主要集中在低山丘陵中人员较集中的区域, 面积 371.9 km<sup>2</sup>, 占比 5.6%; 低风险区分布较广, 位于其余低山丘陵岗地, 面积 1 740.1 km<sup>2</sup>, 占比 26.4%。防治措施上, 高风险区建议以工程治理、搬迁避让、专业监测为主, 中风险区以工程治理、群测群防为主, 低风险区以群测群防为主。

## 5 结论

为支撑地质灾害风险管控新要求, 本文以南京市为

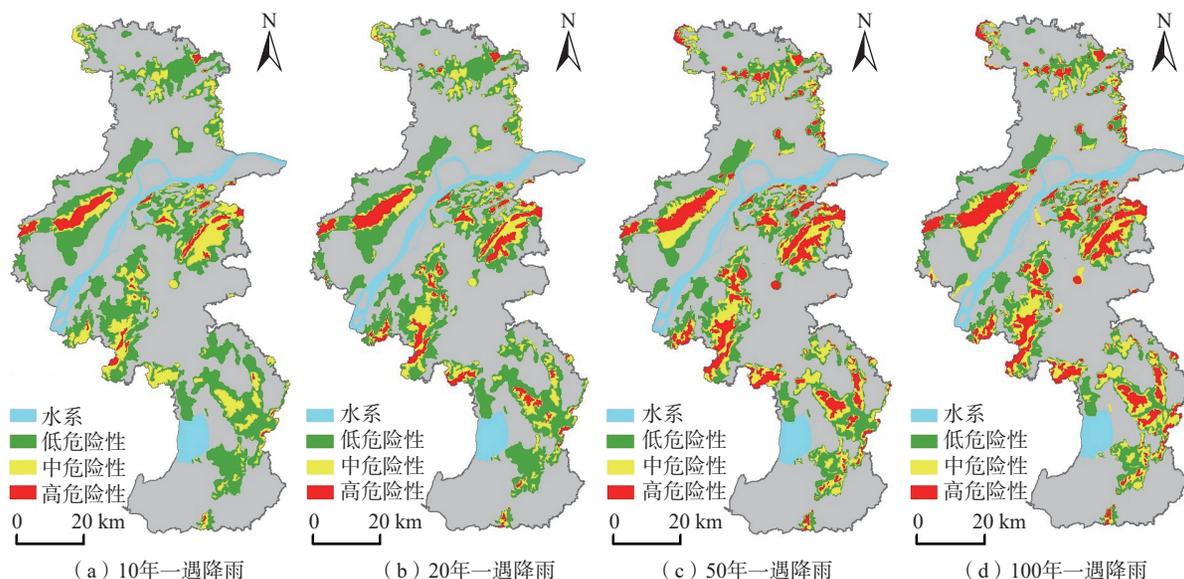


图 5 不同重现期降雨强度下地质灾害危险性分级

Fig. 5 Classification of geological hazards under different rainfall intensity in different recurrence period

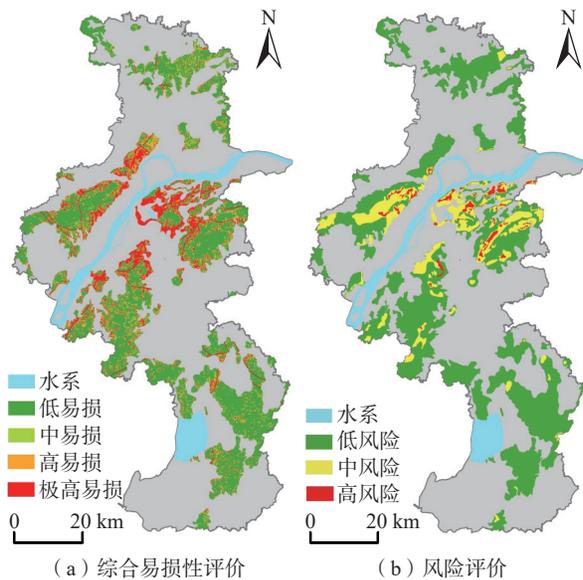


图 6 地质灾害综合易损性以及风险评价

Fig. 6 Comprehensive vulnerability and risk assessment of geological hazards

研究对象,开展了市级地质灾害风险评价研究,主要有以下结论:

(1)研究区主要发育崩塌、滑坡地质灾害,规模以小型为主,滑坡主要类型为半圆形土质复合式滑坡,崩塌主要类型多为岩质拉裂式崩塌。

(2)开展了基于易发性、危险性、易损性的风险评价,分别划定了地质灾害高、中、低三类风险区,其中高风险区主要集中在沿江的老山、幕府山、紫金山、栖霞山以及青龙山等部分人员聚居的山前坡麓一带,中风险区主要集中在低山丘陵中人员较集中的区域,低风险区分布较广,位于其余低山丘陵岗地。高风险区防治措施建议以工程治理、搬迁避让、专业监测为主。

(3)研究成果应用具有一定的理论和现实意义,能够有效支撑地质灾害风险管控以及新一轮国土空间规划应用。下一步,可以构建动态的地质灾害风险评价模型,结合气象实时信息,开展地质灾害风险预警研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 马晓峰,朱浩濛,张义顺,等.省级地质灾害风险评价技术方法研究——以浙江省为例[J].浙江国土资源,2021(1):57-65. [MA Xiaofeng, ZHU Haomeng, ZHANG Yishun, et al. Study on the provincial risk assessment of geological disasters: A case of Zhejiang Province [J]. Zhejiang Land & Resources, 2021(1): 57-65. (in Chinese with English abstract)]
- [2] COTECCHIA V, MELIDORO G. Some principal geological aspects of the landslides of southern Italy [J]. Bulletin of the

International Association of Engineering Geology - Bulletin De L'Association Internationale De Géologie De L'Ingénieur, 1974, 9(1): 23-32.

- [3] MEJÍA-NAVARRO M, WOHL E E, OAKS S D. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: Model for Glenwood Springs, Colorado [M]//Geomorphology and Natural Hazards. Amsterdam; Elsevier, 1994: 331-354.
- [4] REMONDO J, BONACHEA J, CENDRERO A. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: From landslide susceptibility to quantitative risk assessment [J]. Landslides, 2005, 2(4): 321-328.
- [5] 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)]
- [6] 唐亚明,张茂省,李政国,等.国内外地质灾害风险管理对比及评述[J].西北地质,2015,48(2):238-246. [TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Zhengguo, et al. Review and comparison on inland and overseas geo-hazards risk management [J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 238-246. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽.基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J].岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808. [WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: A case study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 797-808. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 施成艳,鹿献章,刘中刚.基于GIS的安徽黄山市徽州区地质灾害易发性区划[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):136-140. [SHI Chengyan, LU Xianzhang, LIU Zhonggang. GIS-based zoning of geological hazard's susceptibility in Huizhou District of Huangshan City of Anhui Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 136-140. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李春燕,孟晖,张若琳,等.中国县域单元地质灾害风险评估[J].水文地质工程地质,2017,44(2):160-166. [LI Chunyan, MENG Hui, ZHANG Ruolin, et al. Risk assessment of geo-hazard of China in County unit [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(2): 160-166. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 理继红,李伟.南京市2021年度重要地质灾害隐患点核查简报[R].南京:江苏省地质调查研究院,2021. [LI Jihong, LI Wei. Nanjing 2021 major geological disaster hidden

- points verification briefing [ R ] . Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province, 2021. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 刘宝生, 宋京雷, 郝社峰, 等. 江苏宁镇地区典型下蜀土滑坡机理分析及应急处理措施 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 31 - 36. [ LIU Baosheng, SONG Jinglei, HAO Shefeng, et al. Analysis and emergent control measures of the typical Xiashu loess landslides in Nanjing-Zhenjiang area, Jiangsu Province [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 31 - 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 张敏, 周灵, 谭超, 等. 复杂地层方形抗滑桩旋挖成孔工艺及工程应用 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 85 - 93. [ ZHANG Min, ZHOU Ling, TAN Chao, et al. Techniques of rotary hole-drilling for square anti-slide piles in complex formation and its application [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 85 - 93. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 杨洋, 苏晶文, 李云峰, 等. 河谷平原跨区域工程地质层序厘定与平面分区方法——以安徽沿江地区为例 [ J ] . 地质通报, 2022, 41(11): 2019 - 2025. [ YANG Yang, SU Jingwen, LI Yunfeng, et al. Stratigraphic ordering and regionalization of engineering geology in large area of valley plain: A case study along the Yangtze River in Anhui Province [ J ] . Geological Bulletin of China, 2022, 41(11): 2019 - 2025. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 周彤, 商广明, 翟亚峰. 路基砾类填料土动力特性影响因素试验分析 [ J ] . 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1482 - 1489. [ ZHOU Tong, SHANG Guangming, ZHAI Yafeng. Experimental analysis on influencing factors of dynamic characteristics of subgrade gravel packing soil [ J ] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1482 - 1489. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 中国地质环境监测院. 地质灾害风险调查评价技术要求(1:50000) [ M ] . 北京: 中国地质环境监测院, 2020. [ China Geological Environmental Monitoring Institute. The 1:50000 Technical Requirements for Geological Hazard Risk Investigation and Evaluation [ M ] . Beijing: China Geological Environmental Monitoring Institute, 2010. (in Chinese) ]
- [ 16 ] 杜国梁, 杨志华, 袁颖, 等. 基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 102 - 111. [ DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 102 - 111. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 庞栋栋, 刘刚, 何敬, 等. 基于层次分析法的甘肃省地质灾害风险评估分析 [ J ] . 国土资源信息化, 2021(6): 41 - 47. [ PANG Dongdong, LIU Gang, HE Jing, et al. Analysis of geological hazard risk assessment in Gansu Province based on analytic hierarchy process [ J ] . Land and Resources Informatization, 2021(6): 41 - 47. (in Chinese) ]
- [ 18 ] 郑师谊, 张绪教, 杨艳, 等. 层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用 [ J ] . 地质通报, 2012, 31(增刊 1): 356 - 365. [ ZHENG Shiyi, ZHANG Xujiao, YANG Yan, et al. The application of analytic hierarchy process to the danger evaluation of collapse and slide in Lujiang Basin segment of Nujiang valley, western Yunnan Province [ J ] . Geological Bulletin of China, 2012, 31(Sup 1): 356 - 365. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 闫佰忠, 孙剑, 王昕洲, 等. 基于GIS-FAHP的石家庄市地下水热源泵适宜性分区 [ J ] . 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1172 - 1181. [ YAN Baizhong, SUN Jian, WANG Xinzhou, et al. Suitability zoning of groundwater source heat pump in Shijiazhuang based on GIS-FAHP [ J ] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1172 - 1181. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 李军, 周成虎. 基于栅格GIS滑坡风险评价方法中网格大小选取分析 [ J ] . 遥感学报, 2003(2): 86 - 92, 161. [ LI Jun, ZHOU Chenghu. Appropriate grid size for terrain based landslide risk assessment in lantau island, hong kong [ J ] . Journal of Remote Sensing, 2003(2): 86 - 92, 161. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 屠水云, 张钟远, 付弘流, 等. 基于CF与CF-LR模型的地质灾害易发性评价 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 96 - 104. [ TU Shuiyun, ZHANG Zhongyuan, FU Hongliu, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 96 - 104. (in Chinese with English abstract) ]