

中文引用格式:侯可心,佟艳,樊良新. 基于最优供需分配的乡村避难场所布局优化:以焦作市西村乡为例[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 220-229.

英文引用格式:HOU Kexin, TONG Yan, FAN Liangxin. Optimizing layout of emergency shelters in rural areas based on optimal supply-demand allocation: a case study of Xicun town, Jiaozuo city[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 220-229.

基于最优供需分配的乡村避难场所布局优化: 以焦作市西村乡为例*

侯可心¹, 佟艳^{**1}副教授, 樊良新²教授

(1 河南理工大学 建筑与艺术设计学院, 河南 焦作 454000;

2 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.0082

基金项目:河南省哲学社会科学规划项目(2023BSHO08, 2023BSH010);河南省高校人文社会科学研究项目(2024-ZZJH-250);河南理工大学人文社会科学基金资助(GSKY2024-21)。

【摘要】 为提升乡村地区应急响应能力和避难场所体系的服务效能,采用最优供需分配模型,结合地理信息系统(GIS)软件分析豫北乡村的村级紧急避难所和乡(镇)级短期避难所的可达性;选取影响应急避难场所选址的关键因素构建应急避难场所空间适宜性评价指标体系;通过评价西村乡应急避难场所空间布局,优化研究区避难场所体系的空间布局。研究结果表明:西村乡避难场所体系可达性较差且村级避难场所局部超载、乡镇级避难场所空间分布不合理且严重短缺的供需失衡特征;选址适宜性评价结果呈现出南优北劣的空间分异格局;通过增设村级避难场所、提升高适宜区场所等级后西村乡乡(镇)村两级应急避难场所供需不平衡和可达性均有所改善。

【关键词】 最优供需分配; 乡村; 应急避难场所; 布局优化; 可达性

Optimizing layout of emergency shelters in rural areas based on optimal supply-demand allocation: a case study of Xicun town, Jiaozuo city

HOU Kexin¹, TONG Yan¹, FAN Liangxin²

(1 School of Architectural and Artistic Design, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China; 2 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: In order to enhance emergency response capabilities and the service efficiency of shelter systems in rural areas, this study adopted an optimal supply-demand allocation model integrated with Geographic Information System (GIS) software (ArcGIS) to evaluate the accessibility of village-level emergency shelters and township-level short-term shelters in northern Henan province. Key factors influencing shelter site selection were identified to construct a spatial suitability evaluation index system. Using this system, we assessed the spatial distribution of emergency shelters in Xicun town and proposed optimization strategies for the shelter system. The results reveal a significant supply-demand imbalance

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0220-10; 收稿日期:2025-04-02; 修稿日期:2025-07-10

** 通信作者:佟艳(1981—),女,江苏徐州人,博士,副教授,主要从事土地信息化利用、应急避难场所规划、乡村地理学方面的研究。
E-mail: tongyan08@126.com。

characterized by poor accessibility, partial overload of village-level shelters, and an irrational distribution with severe shortages of township-level shelters. The suitability evaluation indicates a clear north-south disparity, with higher suitability in the south. After implementing optimization measures—including adding village-level shelters and upgrading those in highly suitable areas—both the balance between supply and demand and overall accessibility are improved across the two-tier shelter system in Xicun town.

Keywords: optimal supply-demand allocation model; rural; emergency shelters; spatial layout optimization; accessibility

0 引 言

近年来,全球发生自然灾害的次数和损毁程度不断上升,已成为全人类的共同挑战^[1],国家防灾减灾救灾委员会办公室公布的数据显示,仅在 2024 年上半年,各类自然灾害已造成全国(不含港澳台地区)3 238.1 万人次不同程度受灾,因灾死亡失踪 322 人,紧急转移安置 85.6 万人次;倒塌房屋 2.3 万间,损坏房屋 27.9 万间;直接经济损失 931.6 亿元^[2]。应急避难场所是为应对自然灾害和突发公共事件而设立的安全场所,也是防灾减灾救灾体系中的关键环节。建设有效的应急避难场所,可最大限度减少突发灾害带来的损失,确保人民生命安全。

目前,国内外学者在应急避难场所选址、应急疏散、评价体系和空间布局等方面开展了大量研究。在应急避难场所选址方面,主要围绕灾害类型^[3]、特定地理环境^[4],选址模型优化^[5]等方面展开;有关应急疏散的研究主要关注避难需求人口类型^[6]、疏散路径模型优化模拟^[7]、人群疏散行为^[8]等;应急避难场所评价体系的研究主要围绕基于选址规划与布局优化^[9]、服务功能与范围^[10]所构建的多维度评价体系^[11-12];空间布局方面,探究了应急避难场所布局特征^[13]、供需匹配^[14]及可达性^[15]等方面。综上,虽然应急避难场所的相关研究成果丰硕,但其研究对象多为独立单元,对避难场所体系的研究仍较为鲜见,且多集中在人口规模较大的城市^[16-17],未有针对乡村应急避难场所的研究,使得当前乡村应急避难场所研究仍处于空白状态。

鉴于此,笔者拟响应国家应急避难场所分级分类政策^[18],选取焦作市西村乡避难场所体系作为研究对象,基于最优供需分配模型^[19],分级分类成体系地研究乡(镇)村两级应急避难场可达性及供需匹配度,并根据最优分配结果结合选址适宜性评价,优化西村乡避难场所体系空间布局,以期对提升乡村地区应急避难场所规划的科学性和精准性提供理论支撑与实践指导。

1 研究区域概况、数据源及研究方法

1.1 西村乡概况

西村乡位于河南省焦作市修武县西北部太行山区,在 35°27'16"—35°15'56"N、113°8'23"—113°20'59"E 之间,海拔为 168.62~1 301.25 m,地势北高南低,山势陡峻。全乡辖 35 个行政村,其中包含 8 个传统村落,总人口 1.68 万,常住人口约 0.9 万。焦作市地处华北平原地震带上,地质构造复杂,加上煤矿采空区的存在,有发生 6 级以上破坏性地震的构造背景。同时,该地区易发季节性多种气象灾害,夏季降水集中且多暴雨,山地丘陵产流和汇流速度快,常年性河流和季节性河流发生洪水的威胁巨大。西村乡所处太行山区是重点森林火险地区,发生重特大森林火灾及崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、地面塌陷、地裂缝等地质灾害可能性较大。调查发现该乡 7—8 月份既为汛期又为旅游旺季,避难需求人口较多,但基层防灾减灾能力较弱,乡(镇)村避难场所体系亟待完善。

1.2 数据来源

为获得全面可靠的研究数据,2024 年 6 月前往研究区开展初步调研,通过访谈获得当地避难场所体系建设情况、自然灾害及易发地段、常驻人口、旅游旺季和外来旅游人口等相关数据;2024 年 7—8 月期间,通过实地调研获取了现有应急避难场所点位及其规模、近邻医疗设施、消防站的空间位置数据;居民点数据基于欧空局 10 m 分辨率土地覆盖数据与 Bigemap 地图 0.5 m 分辨率卫星影像图,目视解译得到 220 个点状矢量数据;路网数据来源于 Bigemap 平台。

1.3 研究方法

1.3.1 最优供需分配

假设集合 V 存在 m 个需求点(在村级紧急避难阶段,居民点为需求点,镇级短期避难阶段时,村级紧急避难场所转变为需求点),集合 U 存在 n 个供给点(在村级紧急避难阶段,村级紧急避难场所为

供给点;镇级短期避难阶段时,镇级短期避难场所转变为供给点)。在应急避难过程中,缩短避难路径长度是提升疏散效率、降低疏散过程风险的关键,此外,乡村研究区域,获取高精度、实时动态的交通流量等数据存在困难,基于空间点位和基础路网数据的通行距离,相对易于获取且较为稳定,基于上述考虑,构建应急避难场所最优供需分配线性规划模型^[19]。下式为目标函数,优化目标是最小化通行成本。

$$\text{minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in U} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中: i 为任一需求点; j 为任一供给点; c_{ij} 为需求点 i 和供给点 j 之间的距离; m ; x_{ij} 为供给点 j 为需求点 i 提供的服务量,人。

下式为约束条件,确保任一需求点到总供给点的访问需求量等于该点的总需求量。

$$\text{subject to } \sum_{j \in U} x_{ij} = d_i \quad \forall i \in V \quad (2)$$

式中 d_i 为需求点 i 的需求量需求,即避难人口规模,人。下式为约束条件,确保每个设施分配的服务量不超过其供给量。

$$\begin{aligned} \sum_{i \in V} x_{ij} &\leq q_j \quad \forall j \in U \\ x_{ij} &\geq 0, \quad \forall i \in V \quad \forall j \in U \end{aligned} \quad (3)$$

式中 q_j 为服务供给量,即应急避难场所可容纳避难人口规模,人。

基于最优供需分配模型测度乡(镇)村2个阶段的应急避难场所可达性,参考《应急避难场所分级及分类》^[20],通过人均有效避难面积得出乡(镇)村两级应急避难场所的服务能力。

$$C_1 = B/2 + D/1.5 \quad (4)$$

$$C_2 = B/2.5 + D/2 \quad (5)$$

式中: C_1 为村级紧急避难阶段时,各个应急避难场所的服务能力即可容纳人口规模,人; C_2 为乡镇级短期避难阶段时,各个乡(镇)短期避难场所的服务能力,即可容纳人口规模,人; B 为各个应急避难场所室内可用服务面积, m^2 ; D 为各个应急避难场所室外可用服务面积, m^2 。

1.3.2 网络分析法

在评估乡村应急避难场所可达性时,采用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)网络分析法中的起点-目的地(Origin-Destination, OD)成本矩阵模块,结合高精度遥感影像和已有路网数据构建乡村应急疏散网络模型,将交通系统抽象为节点(交叉路口、居民点、避难场所)和边(主干道、村道)的拓扑网络。创建使用通行时间作为网络阻抗

的网络数据集,根据道路长度计算步行时间。人在紧急情况下步行速率能达 $150 \sim 180 \text{ m/min}$ ^[9],鉴于研究区位于南太行山区,地形复杂,且调研发现其常住人口老龄化严重,参考相关研究^[21]将避难需求人口步行速度设为 72 m/min ,利用 OD 成本矩阵计算居民点与避难场所最小通行时间。

1.3.3 评价指标体系

利用层次分析法构建应急避难场所选址适宜性评价指标体系,评价西村乡避难场所空间适宜性。设计该评价体系时遵循科学性、典型性,综合考虑了选址安全性、救援可达性、区位适配性等3个维度,选址安全性包含指标为地质安全性、距消防站距离、海拔、坡度等;救援可达性包含指标为距县级以上道路距离、距县级以上道路距离、距镇级卫生院距离和距村级卫生室距离等;区位适配性包含指标为乡镇级短期避难场所服务范围、村级紧急避难场所服务范围、最优分配后15 min 阈值以外避难人口剩余量、土地利用类型等;根据其对应应急避难场所空间位置作用的显著性及专家打分法来评分和赋值。

1.3.4 GIS 加权叠加法

采用 ArcGIS10.8 网络分析、欧氏距离等方法处理评价指标体系中指标层的各项数据,如距不同等级道路、医疗点、消防等影响因子的距离,重分类高程、海拔、服务范围、自然灾害易发地段等指标等级,生成各级因素空间栅格图等。之后采用 Spatial Analysis 中的加权叠加功能,加权计算影响因素,最终得到应急避难场所适宜性等级分区图。

2 西村乡人口与应急避难场所总体布局

2.1 应急避难场所现状分析

截至2024年8月,西村乡共设有应急避难场所37处,结合实地探勘记录位置和卫星影像图,在 ArcGIS10.8 中将各村应急避难场所空间位置矢量化。其中,村级应急避难场所包括室内和室外2种类型,共35处,室内总面积为 $16\,455.9 \text{ m}^2$,室外总面积 $27\,312.7 \text{ m}^2$,总面积为 $44\,068.6 \text{ m}^2$,乡(镇)级应急避难场所全部为室外型共2处,总面积为 $2\,825 \text{ m}^2$,分析其空间布局如图1所示,村级应急避难场所多位于地形相对平缓且行政村密集度较高的南部区域;相比之下,北部地区由于海拔更高地形崎岖且行政村分布稀疏,其分布数量明显少于南部。此外,西村乡仅有的2处乡镇级应急避难场所均设置于乡政府驻地附近。

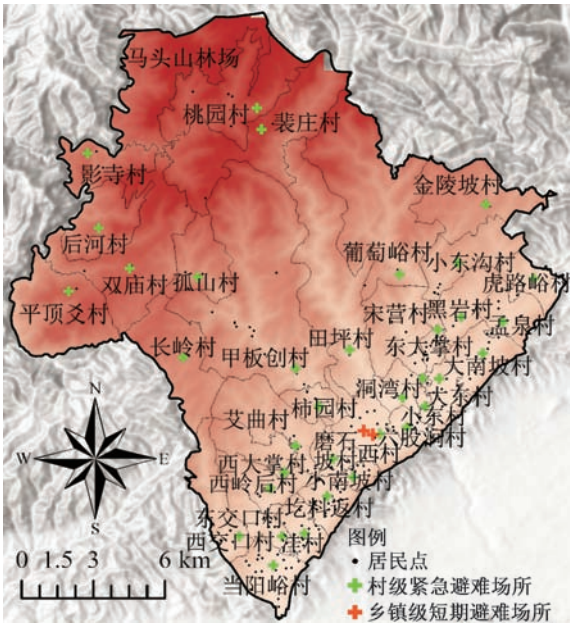


图 1 应急避难场所空间分布现状

Fig. 1 Spatial distribution of emergency shelters

2.2 避难需求人口空间分布特征分析

人口要素被普遍认为是公共资源空间配置合理性评价中最重要的影响因素^[22],通过实地调研西村乡各行政村,收集到常住人口共 8 994 人。同时由于西村乡位于太行山区内,该地区包含 4 个国家级传统村落——长岭村、双庙村、平顶爻村与东交口村,4 个省级传统村落——西岭后村、桃园村、陪嫁妆村及后河村。这些村落因其独特的自然景观与丰富的文化遗产而成为旅游热点,在每年 7、8 和 10 月吸引大量游客。此外,值得注意的是,夏季(7、8 月)是当地汛期。为最大限度地保证群众安全,将各村日均游客量及纳入避难需求人口,故全乡总避难需求人口为 12 733 人,生成各行政村人口空间分布(图 2)。结果显示,西村乡除旅游资源较好的双庙村和裴庄村,由南向北避难需求人口规模逐渐减小。

3 可达性分析

3.1 应急避难场所可达性现状

西村乡应急避难场所现仅依据行政管理级别划分为村级和乡镇级。在此,参考文献[20],将村级对应紧急避难场所、乡镇级对应短期避难场所。同时,根据已勘测的各个应急避难场所室内外面积,结合 1.3.1 节应急避难场所服务能力计算方式(式(4)和式(5)),分阶段算出各应急避难场所可容纳人口,以此代表其服务能力。村级紧急避难时,居民点为需求点,2 个乡镇级短期避难场所也兼顾

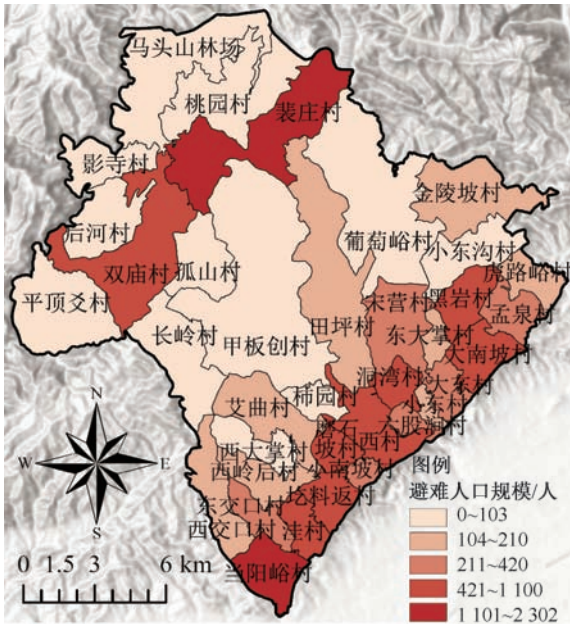


图 2 避难需求人口空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of population in need of evacuation

紧急避难作用,所有的应急避难场所为供给点;居民在村级紧急避难后,若避难需求超过 1 天转为短期避难阶段时,在村级紧急避难场所的所有避难需求人口及镇级短期避难场所冗余的有避难需求人口,则向其他乡镇级短期避难场所转移,获取进一步的救助服务,此时新的供给点为乡镇级短期避难场所,需求点为村级紧急避难场所。

采用 ArcGIS10.8 中的网络分析以道路通行时间为网络阻抗的构建数据集,并结合各行政村居民区总避难需求人口密度,求出各居民点人口规模。计算第 1 阶段村级紧急避难阶段各居民点至应急避难场所的 OD 成本矩阵,得到空间可达性,如图 3 所示,10 520 人(82.6%)的居民可在 15 min 内到达村级紧急避难场所,17.4%的居民无法到达。统计该阶段村级紧急避难场所服务现状,如图 4 所示,37 个应急避难场所中有 6 个应急避难场所存在缺口,缺口较大的有 15 号(裴庄村村民委员会)1 881 人和 6 号(东郊口村民委员会)447 人。其余 31 个应急避难场所服务量均存在明显冗余,其中冗余量超过 1 000 人的有 19 号(宋营希望小学)4 317 人、22 号(洼村村民委员会)1 479 人、33 号(孟泉村民委员会)1 359 人等 6 个应急避难场所。计算乡镇短期避难场所空间可达性如图 5 所示,40 min 阈值内仅有 6 个村级紧急避难场所可到达,此外,乡镇级短期避难场所仅能容纳 1 413 人,全镇剩余有短期避难需求人口共 11 320 人,

无法向上转移,供需匹配差额极大。

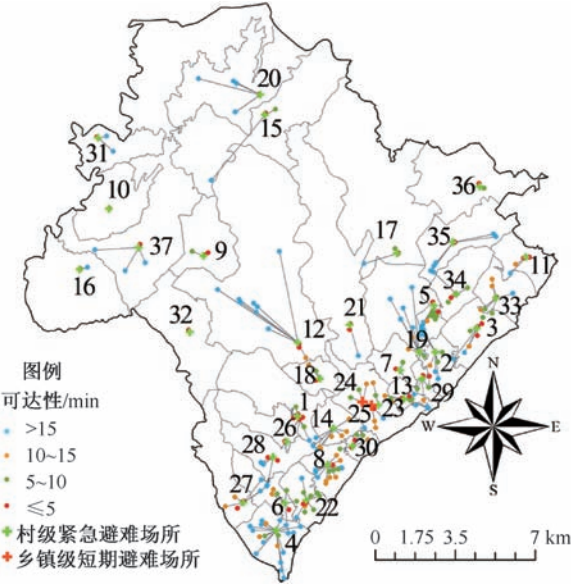


图3 村级紧急避难场所可达性现状

Fig.3 Accessibility status of village-level urgent emergency shelters

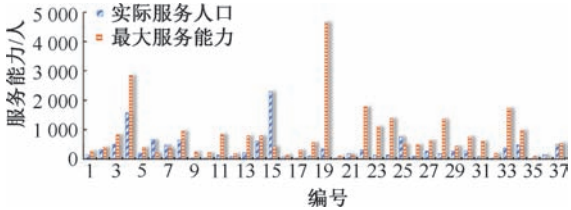


图4 村级紧急避难场所服务现状

Fig.4 Service status of village-level urgent emergency shelters

3.2 应急避难场所可达性最优分配结果

为解决应急避难场所供需平衡问题,在 ArcGIS 中重新利用最优供需分配模型 (Optimal Supply-Demand, OSD) 分配居民点避难需求人口,村级紧急避难阶段各居民点至应急避难场所重新分配后如图 6 所示,统计其服务现状(图 7)发现各应急避难场所所服务人数均在其服务能力范围内,虽解决了供需不平衡的问题,但步行 15 min 阈值内到达村级紧急避难场所的人数为 8 513,较之重新分配前减少了 2 007(19.08%)人,仍有 33.2%的居民 15 min 阈值以内不可到达,可达性较差。此外,在第 1 阶段村级紧急避难时,已有乡镇级短期避难场所 25 号(西村政府前活动广场)服务容量已满,24 号(西村篮球场)服务容量仅剩 1 187 人;第 2 阶段乡镇级短期避难时,仅余 24 号(西村篮球场)可容纳短期避难需求人口 842 人,剩余 11 320 人(88.9%)短期避难需

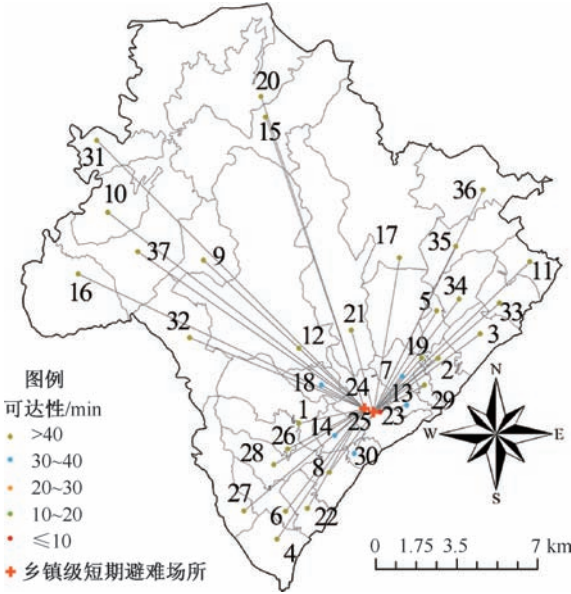


图5 乡镇级短期避难场所可达性现状

Fig.5 Accessibility status of township-level short-term emergency shelters

求的人口无法向上转移,表明了乡镇级短期避难场所严重缺失。

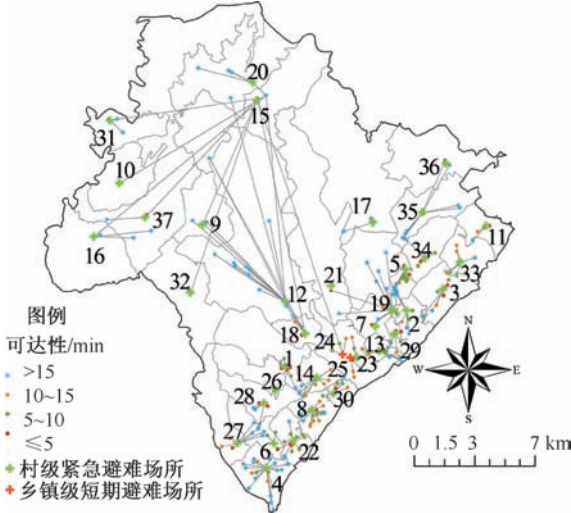


图6 村级紧急避难场所最优分配结果

Fig.6 Optimal allocation of village-level urgent emergency shelters

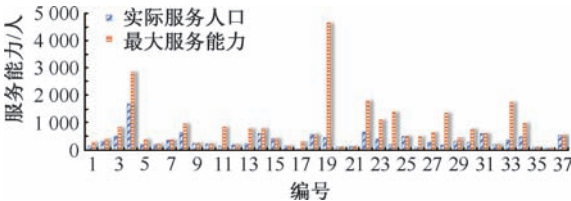


图7 最优分配后村级紧急避难场所服务现状

Fig.7 Service status of village-level urgent emergency shelters after optimal allocation

准则层	权重	指标层	权重	综合权重	指标内涵	赋值依据	赋值
选址安全性	0.472 8	地质安全性	0.517 6	0.245	可能发生滑坡、崩塌、塌陷、泥石流的区位	不在地质灾害易发地段	5
						在地质灾害易发地段	1
		距消防站距离/km	0.283 8	0.134	消防站是灾害发生后救灾的重要力量,距其越近,就可以越快展开救助	[0,0.5]	5
						(0.5,2]	3
						(2,+∞)	1
		坡度/%	0.103 9	0.049	应急避难场所应选择地势较为空旷,坡度较小的平缓地带	(0,7]	4
						(7,15]	3
						(15,30]	2
						(30,+∞)	1
		海拔/m	0.094 7	0.045	高海拔地区可能更容易受到某些自然灾害的影响,如泥石流、山体滑坡等	[168.625,404.033]	5
						(404.033,590.583]	4
						(590.583,781.575]	3
						(781.575,994.775]	2
(994.775,1301.25]	1						
救援可达性	0.216 5	距村级卫生室距离/km	0.231 8	0.050	应急避难场所距医疗设施的距离越近,受伤的灾民就可以越快得到救助,等级越高救助效果越好	[0,0.5]	5
						(0.5,1]	3
		距镇级卫生院距离/km	0.414 3	0.090	(1,+∞)	1	
					[0,1]	5	
					(1,2]	3	
		距县级以上道路距离/km	0.192 1	0.042	距道路越近,越便于到达应急避难场所得救助。高等级的道路通常具有更好的通行能力,居民在紧急情况下能够更快地到达应急避难场所	(2,+∞)	1
						[0,1]	5
						(1,2]	3
						(2,+∞)	1
		距县级以下道路距离/km	0.161 8	0.035	(0,0.5]	5	
(0.5,1.5]	3						
(1.5,+∞)	1						

续表 1

准则层	权重	指标层	权重	综合权重	指标内涵	赋值依据	赋值	
区位 适配性	0.310 7	乡镇级短期避难场所服务范围	0.235 9	0.073	根据 GB/T 44013—2024《应急避难场所 分级及分类》短期避难场所宜 30~40 min 内可达。乡镇级短期避难阶段,乡镇级短期避难场所距离村级紧急避难场所越近,所用时间越短,救助效果越好;紧急避难场所宜 10~15 min 内可达。村级紧急避难阶段,应急避难场所距居民点越近,所用时间越短,救助效果越好	10 min 内可达	5	
						10~20 min 内可达	4	
						20~30 min 内可达	3	
						30~40 min 内可达	2	
						40 min 以上可达	1	
		村级紧急避难场所服务范围	0.390 2	0.121		5 min 内可达	4	
						5~10 min 内可达	3	
						10~15 min 内可达	2	
						15 min 以上可达	1	
						最优分配后 15 min 阈值以外避难需求人口剩余量/人	0.310 2	0.096
		(219,841]	4					
		(73,219]	3					
		(25,73]	2					
		[0,25]	1					
		土地利用类型	0.637 0	0.020		土地利用类型根据土地利用类型选出合理的建设用地	建设用地	5
							其他用地类型	1

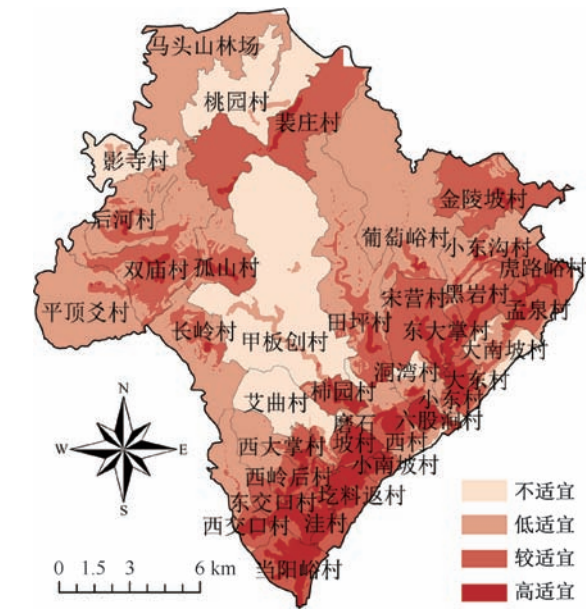


图 8 应急避难场所选址适宜性等级

Fig. 8 Emergency shelter site suitability classification map

示,高适宜区 4 个;较适宜区 2 个。

为进一步验证空间布局优化效果,再次采用最优分配模型测度村级紧急避难场所的可达性如图 10 所示,村级紧急避难阶段 10 304(80.9%)人的避难需求人口能在 15 min 内到达村级紧急避难场所,较优化前可达性提升了 21%。根据这一阶段优化结果,统计村级紧急避难场所服务现状如图 11 所示,冗余量超 500 人以上的村级紧急避难场所共 12 个,其中在高适宜区 10 个;在较适宜区和低适宜

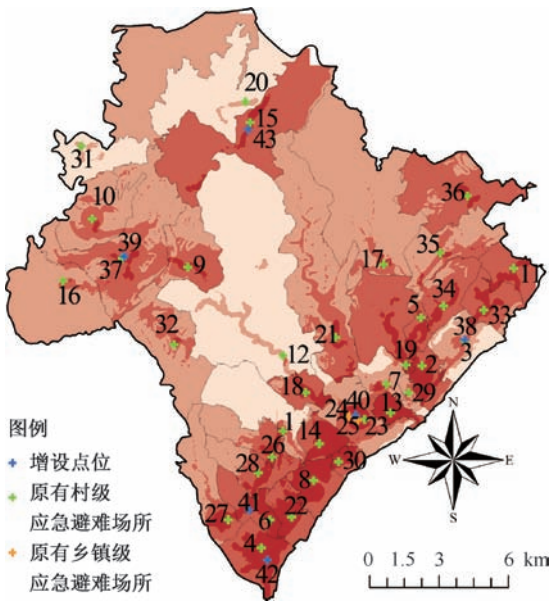


图 9 新增应急避难场所分布

Fig. 9 Distribution of newly added emergency shelters

区各 1 个。剔除低适宜区 31 号(影寺村民委员会),提升其他 11 个冗余量超 500 人以上的村级紧急避难场所为镇级短期避难场所,完善避难场所体系的空间分布如图 12 所示。之后基于第 1 阶段最优分配结束后各村级紧急避难场所容纳的避难人口数,重新分配乡镇级短期避难阶段的避难需求人口。最优分配结果如图 13 所示,10 723(84.2%)人的短期避难需求人口步行 40 min 内能到达镇级短期避难场所,对比优化前仅能容纳 1 413 人,镇级短期避难场所所能覆盖避难需求人口规模提升了 9 310 人。

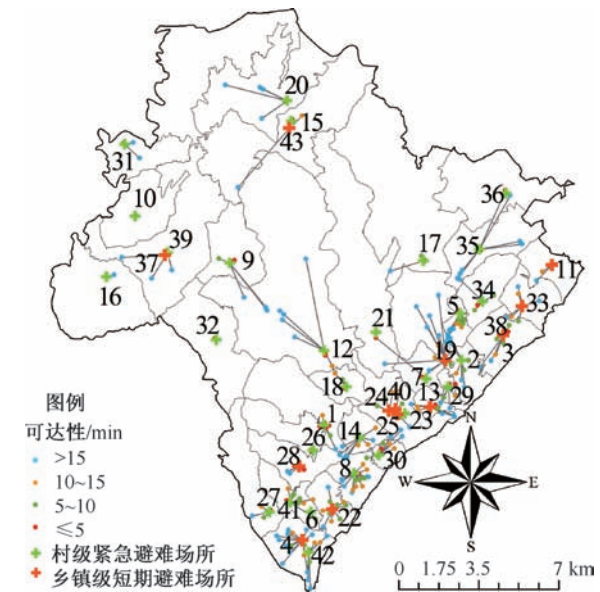


图 10 优化后村级紧急避难场所最优分配结果

Fig. 10 Optimal allocation of village-level urgent emergency shelters post-optimization

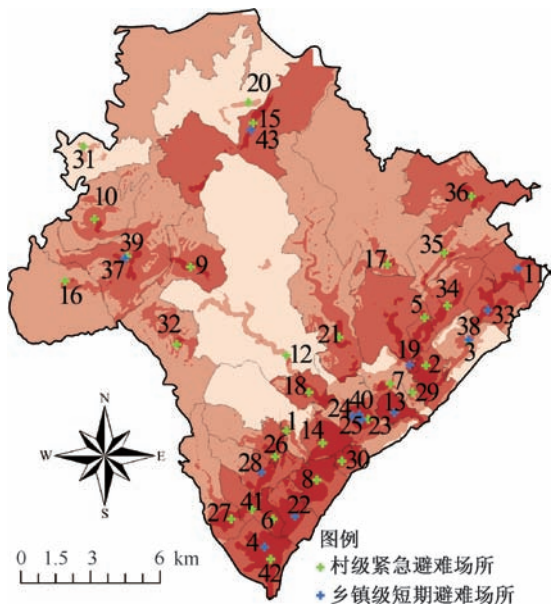


图 12 优化后西村乡避难场所体系

Fig. 12 Optimized emergency shelter system of Xicun town

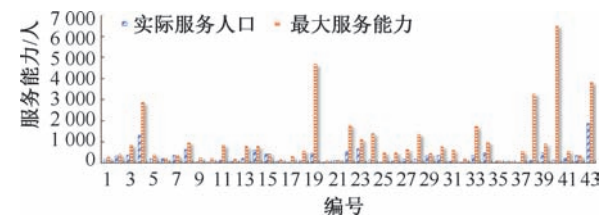


图 11 优化后村级紧急避难场所最优分配服务现状

Fig. 11 Service status of optimized village-level urgent emergency shelters

5 结 论

1) 通过空间可达性测度揭示出西村乡存在村级避难场所局部超载、乡镇级避难场所空间分布不合理且严重短缺的供需失衡特征。在村级紧急避难阶段,步行 15 min 内 10 520 人(82.6%)的居民可到达应急避难场所,17.4%的居民无法到达,其中,有 6 个应急避难场所服务量严重超载。最优供需分配模型能够重新分配避难需求人口,解决供需不平衡的问题,但在 15 min 内到达村级紧急避难场所的人数为 8 513,比重新分配之前反而减少 2 007 人(19.08%),可达性较差;在乡镇级短期避难阶段,乡镇级短期避难场所空间分布极不合理,40 min 内仅有 6 个村级紧急避难场所的 2 789 人(21.9%)可到达。

2) 西村乡应急避难场所选址适宜性评价结果呈现出南优北劣的空间分异格局,这与地形地貌条件、基础设施水平和人口聚集程度密切相关。

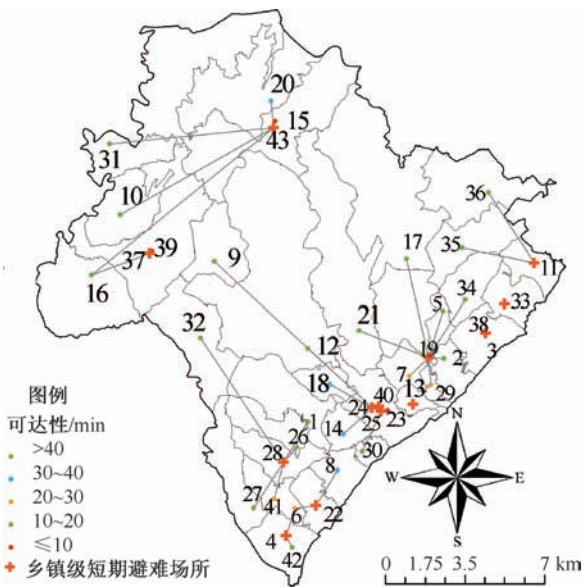


图 13 优化后乡镇级短期避难场所最优分配结果

Fig. 13 Optimal allocation of optimized township-level short-term emergency shelters

3) 通过 APH-GIS 技术空间布局优化以村级补缺-增设镇级梯次优化策略,增设村级避难场所、提升高适宜区场所等级后西村乡乡(镇)村两级应急避难场所供需不平衡和可达性均有所改善。优化后利用最优供需分配模型评估西村乡避难场所体系可达性,村级紧急避难阶段,15 min 内到达村级紧急避难场所的人数为 10 304,比优化前提升 21%;乡镇级短期避难阶段,40 min 内可到达乡镇级短期避难场

所的人数为 10 723,较优化前提升 9 310 人(559%),占总避难需求人口的 84.2%。

参 考 文 献

[1] 蔡梓涵. 以新质生产力助推应急管理体系和能力现代化建设[J]. 人民论坛, 2024(14): 73-75.

[2] 中华人民共和国应急管理部应急管理部. 发布 2024 年上半年全国自然灾害情况[EB/OL]. (2024-07-12). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202407/t20240712_494600.shtml.

[3] 刘强, 阮雪景, 付碧宏. 特大地震灾害应急避难场所选址原则与模型研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2010, 40(8): 129-135.

LIU Qiang, RUAN Xuejing, FU Bihong. A study of principles on emergency shelter site selection and modeling under disastrous earthquake [J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8): 129-135.

[4] 张威涛, 任利剑, 运迎霞. 滨海城市竖向避难场所选址可靠性评价与若干问题探讨:以天津滨海新区临港城区为例[J]. 地理科学, 2020, 40(11): 1 899-1 908.

ZHANG Weitao, REN Lijian, YUN Yingxia. Siting reliability evaluation and discussion of vertical shelter in coastal cities: a case of port-urban area in Binhai NewDistrict, Tianjin [J]. Scientia Geographical Sinica, 2020, 40(11): 1 899-1 908.

[5] DE ALBUQUERQUE N L B, DA SILVA L B L, ALENCAR M H, et al. A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: locating-allocating urban shelters against floods[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 111: DOI:10.1016/j.ijdr.2024.104695.

[6] GU Ziyuan, LIU Zhiyuan, SHIWAKOTI N, et al. Video-based analysis of school students' emergency evacuation behavior in earthquakes[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 18: 1-11.

[7] 陈伟, 汤一鸣, 赵军, 等. 基于手机信令数据的城市尺度地震避难疏散模拟[J]. 地震研究, 2023, 46(4): 611-621.

CHEN Wei, TANG Yiming, ZHAO Jun, et al. Urban-scale earthquake evacuation simulation based on mobile phone signaling data [J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(4): 611-621.

[8] XU Jinghai, WANG Chao, LI Shanshan, et al. Emergency evacuation shelter management and online drill method driven by real scene 3D model[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 97: DOI:10.1016/j.ijdr.2023.104057.

[9] 陈明洁, 吕飞. 基于社会网络分析的苏州古城区应急避难场所布局优化研究[J]. 城市发展研究, 2022, 29(4): 1-8,15.

CHEN Mingjie, LYU Fei. Research on layout optimization of emergency evacuation sites in ancient Suzhou city based on social network analysis [J]. Urban Development Studies, 2022,29(4):1-8,15.

[10] 那麦提·艾合麦提, 曾坚, 蒋飞阳. 基于综合灾害风险的应急避难服务供需评估与规划干预:以天津市为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 92-100.

AIHEMAITI Namaiti, ZENG Jian, JIANG Feiyang. Supply-Demand analysis and planning intervention of emergency shelter services based on comprehensive disaster risk: a case study in Tianjin [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 92-100.

[11] ALAM M J, HABIB M A, POTHIER E. Shelter locations in evacuation: a multiple criteria evaluation combined with flood risk and traffic microsimulation modeling[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 53: DOI:10.1016/j.ijdr.2020.102016.

[12] 朱安峰, 范秀芳, 杜温瑞, 等. 韧性视角下应急避难场所防灾减灾能力综合评价:以温州市瓯海区为例[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 223-230.

ZHU Anfeng, FAN Xiufang, DU Wenrui, et al. Comprehensive evaluation of disaster prevention and mitigation capacity of emergency shelters based on resilience perspective; a case study of Ou hai district in Wenzhou [J]. China Safety Science Journal, 2024,34(5):223-230.

[13] 唐彦东, 曹帅, 于汐, 等. 河北省应急避难场所空间分布特征及影响因素分析[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(2): 29-36.

TANG Yandong, CAO Shuai, YU Xi, et al. Analysis of spatial distribution characteristics and influencing factors of

emergency shelters in Hebei province [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(2): 29–36.

[14] HU Fuyu, YANG Saini, HU Xiaobing, et al. Integrated optimization for shelter service area demarcation and evacuation route planning by a ripple-spreading algorithm [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 24: 539–548.

[15] 吴超, 王其东, 李珊. 基于可达性分析的应急避难场所空间布局研究:以广州市为例[J]. 城市规划, 2018, 42(4): 107–112, 124.

WU Chao, WANG Qidong, LI Shan. Spatial distribution of emergency shelters based on accessibility: a case of Guangzhou [J]. City Planning Review, 2018, 42(4): 107–112, 124.

[16] AMINI H K, ASADZADEH T S, MIRHAKIMI S A. A new index-based model for site selection of emergency shelters after an earthquake for Iran [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 77: DOI:10.1016/j.ijdr.2022.103110.

[17] ZHOU Jie, NIE Gaozhong, LIU Yaohui. Multi-criteria comparison analysis of spatial equity for emergency shelters in old and new urban districts: a case study in Wuhua district and Chenggong district of Kunming city, China [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 108: DOI:10.1016/j.ijdr.2024.104547.

[18] 中华人民共和国应急管理部. 《应急避难场所 术语》《应急避难场所 分级及分类》《应急避难场所 标志》国家标准发布 [EB/OL]. (2024–05–10). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240510_487805.shtml.

[19] 翟石艳, 何新新, 孔云峰, 等. 基于最优供需分配的公共设施空间可达性分析 [J]. 地理学报, 2022, 77(4): 1 028–1 038.

ZHAI Shiyang, HE Xinxin, KONG Yunfeng, et al. Measuring the spatial accessibility of public services by optimal supply-demand allocation [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(4): 1 028–1 038.

[20] GB/T 44013—2024, 应急避难场所分级及分类[S].

GB/T 44013—2024, Emergency shelter-grading and classification[S].

[21] SONG Genxin, HE Xinxin, KONG Yunfeng, et al. Improving the spatial accessibility of community-level healthcare service toward the "15-Minute City" goal in China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022, 11(8): DOI:10.3390/ijgi11080436.

[22] 湛东升, 张文忠, 湛丽, 等. 城市公共服务设施配置研究进展及趋向 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(4): 506–519.

ZHAN Dongsheng, ZHANG Wenzhong, CHEN Li, et al. Research progress and its enlightenment of urban public service facilities allocation [J]. Progress in Geography, 2019, 38(4): 506–519.

[23] 宋英华, 高晓茜, 霍非舟, 等. 考虑洪涝灾害风险的城市应急避难场所选址研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(6): 31–37.

SONG Yinghua, GAO Xiaoxi, HUO Feizhou, et al. Study on site selection of urban emergency shelters consider risk of flood disaster [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 31–37.

[24] 吕伟, 韩业凡, 周雯楠, 等. 避难场所适宜性评价及服务范围空间相关性分析 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(3): 694–703.

LYU Wei, HAN Yefan, ZHOU Wennan, et al. Study on the spatial correlation between the suitability evaluation of emergency shelters and the service scope [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(3): 694–703.

[25] GB/T 45290—2025, 乡村应急避难场所设计规范[S].

GB/T 45290—2025, Specification for design of rural emergency shelter[S].

作者简介: 侯可心 (1998—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为城乡历史文化遗产保护。
E-mail:houkexin2024@163.com。