

中文引用格式:黄晶,田晓悦,赖小莹,等.业务连续性视角下社区应急物资储备优化模型[J].中国安全科学学报,2025,35(6):216-222.

英文引用格式:HUANG Jing, TIAN Xiaoyue, LAI Xiaoying, et al. Optimizing community emergency material reserves from business continuity perspective[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(6):216-222.

业务连续性视角下社区应急物资储备优化模型^{*}

黄晶^{1,2}教授,田晓悦¹,赖小莹³副教授,刘高峰^{1,2}副教授,
王慧敏^{1,2,3}教授

(1 河海大学 管理科学研究所,江苏 南京 211100;2 水灾害防御全国重点实验室,
江苏 南京 210024;3 天津大学 管理与经济学部,天津 300072)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1321

基金项目:国家自然科学基金资助(42171081,72174054)。

【摘要】 为优化社区应急物资储备,引入业务连续性管理(BCM)理念,构建社区应急物资储备多目标优化模型。首先,识别灾后社区的关键服务及其所需的应急物资类型,构建灾后居民生活水平变化曲线,量化社区应急保障能力;其次,提出最大保障能力和最小成本的物资储备多目标优化模型;最后,求解算例并开展关键参数的敏感性分析。结果表明:随着居民最低生活保障要求的提升,应急物资储备水平随之升高,社区应急保障能力也相应提升,且社区应急物资的储备呈现先后次序,单价较低物资的储备水平率先提升;同一应急物资储备水平下,提升社区应急响应和处置能力均可提升社区应急保障能力,且随着社区应急物资储备水平提升,社区应急响应能力和处置能力对提升社区应急保障能力的重要性愈发显著。从业务连续性视角构建的应急物资储备优化模型能够使社区在突发事件后为居民提供基本生活保障。

【关键词】 应急物资储备; 业务连续性管理(BCM); 优化模型; 居民生活水平; 突发事件

Optimizing community emergency material reserves from business continuity perspective

HUANG Jing^{1,2}, TIAN Xiaoyue¹, LAI Xiaoying³, LIU Gaofeng^{1,2}, WANG Huimin^{1,2,3}

(1 Institute of Management Science, Hohai University, Nanjing Jiangsu 211100, China;

2 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Jiangsu 210024, China;

3 College of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to optimize the community emergency supplies reserve, the concept of BCM was introduced to study the multi-objective optimization model of community emergency supplies reserve. Firstly, the key services and related emergency supplies after the disaster were identified, and the community emergency support capacity was quantified by constructing the post-disaster living standard change curve. Secondly, a multi-objective optimization model for material reserves with the maximum guarantee capacity and the minimum cost is proposed. Finally, the numerical examples were solved and the sensitivity analysis of the key parameters was carried out. The results indicate that as the minimum

business continuity objective increases, the level of emergency material reserves increases, enhancing the community emergency support capacity. The reserves show a priority order, with lower-cost items being increased first. Under the same level of emergency material reserves, enhancing community emergency response and handling capabilities can improve the community emergency support capacity. Moreover, as the reserves of emergency materials in a community grow, the significance of these capacities in improving the emergency support capacity becomes increasingly pronounced. The emergency material reserve optimization model constructed from the perspective of business continuity can enable the community to provide basic living guarantees for residents after emergencies.

Keywords: emergency material reserves; business continuity management (BCM); optimization model; residents' living standard; emergency incidents

0 引言

近年来,随着全球气候变化不断加剧,不确定因素逐渐增多,自然灾害、公共卫生、事故灾难等突发事件频发。社区作为城市的基本单元,是各类突发灾害的“第一现场”,也是应急处置的“前沿阵地”^[1]。灾害情景下,社区所提供的服务成为保障居民生活与社区稳定的基石,而应急物资的储备则是确保社区服务持续运行的坚实基础。国家减灾委在《“十四五”国家综合防灾减灾规划》^[2]中明确指出,应科学调整救灾物资储备的品类、规模、结构,提升救灾应急保障能力。然而,当前依据潜在受灾居民数量制定的应急物资储备计划,没有充分考虑社区的实际需求及应对能力,这导致储备的物资无法有效满足灾害应急管理的需求。

业务连续性管理(Business Continuity Management, BCM)最早由国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)于2012年在ISO 22301中正式提出,旨在识别组织面临的潜在风险,并评估这些风险一旦发生可能对业务运行造成的影响,从而制定应对策略,确保关键业务能够迅速恢复并持续运行^[3]。起初,BCM主要被用于保障企业业务的持续运行^[4],随后其应用范围逐渐拓展至基础设施、安全事故管理等领域^[5-6]。近年来,BCM方法逐渐融入公共危机管理的实践中^[7-8],为政府及相关部门提供了一套框架,使其能够高效识别潜在威胁,并通过实施业务连续性计划保障关键业务的持续运行,从而增强其应对能力与恢复能力。因此,从业务连续性视角出发,考虑居民生活水平保障需求,探讨社区应急物资储备优化方法,可提升社区的应急保障能力。

应急物资储备受到灾害发生概率、物资单价以及储存成本等多方面因素的影响^[9]。项寅^[10]根据

地区的灾害发生率、社会脆弱性、暴露人口构建“灾害风险函数”并将其作为目标函数,开展物资空间布局、数量配置及灾后物资分配的集成优化研究。庞海云等^[11]以政府应急物资总成本最小化为目标,探究政府实物储备模式下的最优物资储备量。王伟等^[12]以最小储运成本和最少缺货损失为目标研究不同种类的防汛应急物资在各仓库的储备规模。与此同时,刘阳^[13]和樊彧^[14]等引入匮乏成本,探究应急物资的最优储备量。现有研究主要聚焦灾害风险、物资总成本以及灾民痛苦感知对应急物资储备的影响,还鲜有文献从社区服务连续性视角出发,以保障居民基本生活为目标,研究社区应急物资储备优化。

鉴于此,笔者从业务连续性视角出发,考虑居民灾后的生活水平变化,通过构建灾后社区居民生活水平变化曲线,量化社区应急保障能力,进而研究社区应急保障能力最大和应急物资总成本最小的社区应急物资储备优化模型,以期社区应急物资储备提供科学依据。

1 基于BCM的社区应急保障能力测度

1.1 社区关键服务及相关应急物资识别

BCM的目标是保障组织在中断事件发生时具备维持其关键业务连续性的能力。实现这一目标的首要环节是识别组织的关键业务以及支撑其运行所需的资源。根据马斯洛需求层次理论,灾害事件会直接威胁居民的生命财产安全,使其最基本的生理需求(如食物、饮水、庇护)和安全需求(如人身安全、秩序保障)变得尤为迫切。在这一情境下,社区作为基层服务单元,必须优先确保居民的生存保障和 basic 生活秩序。

在此基础上,参考《救灾物资储备标准指引》^[15],将保障居民生活的应急物资分为以下6类:食品(方便面、饮用水、婴儿奶粉等)、衣物(常服、防寒服等)、临时住所(12 m²单帐篷等)、卧具用品(棉被、枕头、防潮垫等)、卫生用品(洗漱包、女性卫生用品、移动厕所等)、医疗用品(医疗急救包、自动体外除颤器等院前急救设备)。

1.2 基于生活水平变化的社区应急保障能力测度

假设正常情况下,社区居民的生活水平为100%。受到突发事件冲击后,社区服务系统中断,居民生活水平急剧下降。随后,社区启动应急响应,迅速调配其储备的各类应急物资,由于物资调拨存在时滞性,此阶段居民的生活水平仍维持在较低水平。应急物资供应到位后,居民生活水平逐渐恢复。社区居民生活水平变化曲线如图1所示。图1中,受灾居民生活可达到的最终水平(Recovery Point Object, RPO)应高于居民生活保障服务的最低运行水平(Minimum Business Continuity Objective, MBCO);居民生活恢复至最终水平所需时间(Recovery Time Objective, RTO)应短于最长可容忍中断时间(Maximum Tolerable Period of Disruption, MTPD); L_0 为灾后社区仍剩余的居民生活水平; t 为时间,h; k 为社区居民生活恢复速率; S 为 $[t_0, t_0 + \text{MTPD}]$ 时间段内居民生活水平变化曲线与坐标轴围成的阴影部分面积。

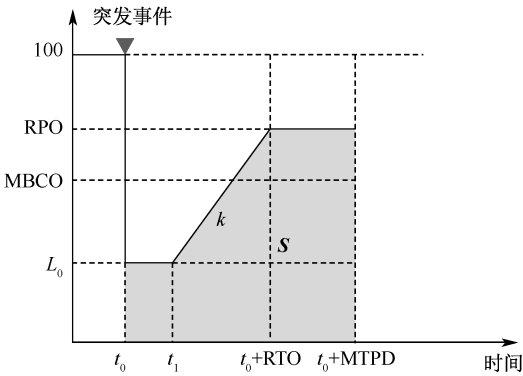


图1 社区居民生活水平变化曲线

Fig.1 Community residents' living standard change curve

居民生活水平在 t_0 时刻遭遇突发事件冲击后迅速由100%下降至 L_0 , $[t_0, t_1]$ 时段,受灾居民尚未获取应急物资,其生活水平仍维持在 L_0 ; $[t_1, t_0 + \text{RTO}]$ 时段,社区物资尚处于相对匮乏阶段,居民生活水平随着应急物资供给的增加以 k 逐渐提升至RPO水平; $[t_0 + \text{RTO}, t_0 + \text{MTPD}]$ 时段,居民生活水平始终维持在RPO水平。由此,社区居民生活水平

的时间函数 $F(t)$ 可表示为:

$$F(t) = \begin{cases} L_0 & t_0 \leq t < t_1 \\ k \times (t - t_1) + L_0 & t_1 \leq t < t_0 + \text{RTO} \\ \text{RPO} & t_0 + \text{RTO} \leq t \leq t_0 + \text{MTPD} \end{cases} \quad (1)$$

社区应急保障能力以灾害情景下社区在居民可容忍的最长服务中断时间内可保障的居民生活水平来表征,即 $[t_0, t_0 + \text{MTPD}]$ 时段居民生活水平函数 $F(t)$ 下方的阴影区域面积 S ,可表示为:

$$S = \int_{t_0}^{t_0 + \text{MTPD}} F(t) dt \quad (2)$$

社区应急保障能力受到社区应急物资储备水平、应急物资调配时间(Dispatch Time, DT)以及居民生活恢复速率等因素的影响,当社区应急物资储备水平提高时,RPO提高,从而增强社区的应急保障能力。随着DT(即 $[t_0, t_1]$ 时段)的缩短和 k 的提升,居民生活恢复至RPO所需时间(即 $[t_1, t_0 + \text{RTO}]$ 时段)缩短,社区应急保障能力提升。

2 社区应急物资储备优化模型构建

2.1 社区应急物资储备优化问题描述

社区应急物资储备量增加虽能提升应急保障能力,但会显著提高运营成本。因此,需解决以下优化问题:构建兼顾应急保障能力与经济性的物资储备决策模型,通过量化储备水平与保障能力的关系,确定最优储备方案,以保障灾害发生时居民的基本生活需求,同时,避免资源浪费。

2.2 应急物资储备优化模型假设

假设1:灾后初期,社区依靠储备的应急物资保障居民的基本生活。

假设2:社区的DT为 m , m 为已知常数,且满足 $0 < m < \text{MTPD}$,h。

假设3:每个社区均设有应急物资储备点,且社区储备应急物资时不考虑储备点的空间限制。

2.3 应急物资储备多目标优化模型构建

灾害情景下,RTO为DT及居民生活水平恢复时间(Recovery Time, RT)之和,由此:

$$\text{RTO} = \text{DT} + \text{RT} = m + \frac{\text{RPO} - L_0}{k} \quad (3)$$

式中RT为应急物资到达受灾点后,社区居民生活恢复至RPO水平所需时间,h。

应急物资主要包括食品(r_1)、衣物(r_2)、临时住

所(r_3)、卧具用品(r_4)、卫生用品(r_5)、医疗用品(r_6)共 6 类。由此:

$$RPO = \sum_{i=1}^6 \omega_{r_i} L_{r_i} \tag{4}$$

式中: r_i 为第 i 种应急物资; ω_{r_i} 为第 i 种应急物资的相对重要性,即储备 1 单位水平的第 i 种应急物资对居民生活水平的贡献度; L_{r_i} 为社区对第 i 种应急物资的储备水平。社区应急物资总量为 L_{r_i} 与第 i 种应急物资的居民日常需求量乘积之和。

由此,构建如下社区应急物资储备多目标优化模型。

目标函数 1:社区应急保障能力最大化见下式:

$$\begin{aligned} \max Z_1 = & \int_{t_0}^{t_0+MTPD} F(t) dt = DT \times L_0 - \frac{L_0^2}{2k} + \\ & \left(MTPD-DT + \frac{L_0}{k} \right) \times RPO - \frac{1}{2k} \times (RPO)^2 \end{aligned} \tag{5}$$

目标函数 2:应急物资总成本最小化见下式:

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \frac{MTPD}{24} \times (L_{r_1} + L_{r_5}) \times C_{r_i} \times P + \\ & (L_{r_2} + L_{r_3} + L_{r_4} + L_{r_6}) \times C_{r_i} \times P \end{aligned} \tag{6}$$

式中: C_{r_i} 为第 i 种应急物资的单位成本,元; P 为灾害情景下社区需转移安置人数。

约束条件 1:PRO 应高于 MBCO,见下式:

$$RPO \geq MBCO \tag{7}$$

约束条件 2:RTO 应短于 MTPD,见下式:

$$RTO \leq MTPD \tag{8}$$

约束条件 3:社区对第 r 种应急物资的储备水平应高于最低水平,见下式:

$$L_{r_i} \geq L_{r_i}^b \tag{9}$$

式中 $L_{r_i}^b$ 为满足受灾居民的基本生存需求,对第 i 种应急物资的最低需求水平。

3 应急物资储备优化的算例分析

3.1 算例介绍与模型参数设置

选取某社区为受灾点,该社区需转移安置的人口为 4 000 人,各年龄段人口分布较为平均。假设社区灾后居民生活水平降低至正常水平的 20%,MBCO 为 50%,DT 为 12 h,MTPD 为 72 h,居民生活恢复速率为 0.01。

考虑到不同年龄段受灾居民的应急物资需求存在差异^[16],根据人口结构均衡社区的物资需求特征,对各物资类别赋予差异化权重。物资最低供应标准依据《救灾物资储备标准指引》^[15]《中国居民

膳食营养素参考摄入量》^[17]确定,物资单位成本则依据政府救灾物资招标公告文件确定,见表 1。

表 1 应急物资相关参数

Table 1 Parameters related to emergency supplies

r_i	ω_{r_i}	$L_{r_i}^b/\%$	$C_{r_i}/\text{元}$
r_1	0.25	70	50
r_2	0.20	50	400
r_3	0.15	25	1 400
r_4	0.15	25	400
r_5	0.10	0	40
r_6	0.15	20	410

3.2 应急物资储备优化模型求解

设置种群规模为 100,最优前端个体系数为 0.35,最大迭代次数为 200,交叉概率为 0.8,通过非支配排序遗传算法 II 求解多目标优化模型,获得由 31 个非劣解构成的帕累托前沿(图 2)。在该帕累托前沿中,应急保障能力范围为[27.97, 32.33]、总成本范围为[397.71, 844.36]。

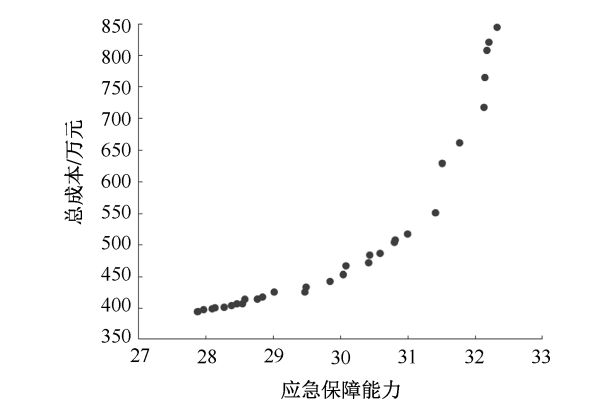


图 2 多目标优化的帕累托前沿

Fig. 2 Pareto frontier for multi-objective optimization

图 2 中,每个非劣解对应一个应急物资储备方案。由于非劣解之间无法直接比较优劣,采用熵权 TOPSIS 模型评估求解出的 31 个应急物资储备方案,并筛选出排名前 10 的方案,具体结果见表 2。其中,方案 8 为最优解,该方案中食品、衣物、临时住所、卧具用品、卫生用品、医疗用品 6 类物资的储备水平分别为 95.3%、55.54%、27%、79.78%、61.81%、58.74%,此时可保障居民生活水平达到日常状态的 65.94%,应急保障能力为 31.41,总成本为 550.86 万元。

3.3 关键参数的敏感性分析

通过对模型中的关键参数开展敏感性分析,探究其对 RPO、社区应急保障能力以及物资总成本三

表 2 社区应急物资储备方案

Table 2 Community emergency materials reserve plan

方案	社区应急物资储备水平/%						RPO/ %	应急保 障能力	总成本/ 万元	综合评 价指数	排序
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6					
8	95.3	55.54	27.00	79.78	61.81	58.74	65.94	31.41	550.86	0.742 5	1
9	97.66	58.97	27.11	76.42	58.73	37.60	63.25	31.00	516.87	0.706 9	2
7	96.68	75.01	47.55	53.84	58.62	42.84	66.67	31.51	628.84	0.686 1	3
12	97.66	51.96	26.82	31.40	67.84	78.65	62.12	30.80	503.71	0.683 8	4
11	97.55	58.48	26.99	60.23	60.81	45.86	62.13	30.80	504.00	0.683 7	5
6	97.82	52.13	50.51	51.92	80.75	69.65	68.77	31.77	661.00	0.683 4	6
10	97.31	58.97	27.33	51.22	59.56	55.50	62.19	30.81	507.34	0.683 4	7
5	97.82	51.72	53.37	78.81	75.03	70.26	72.67	32.13	717.66	0.663 7	8
13	97.54	57.82	27.63	48.48	74.81	40.82	60.97	30.59	486.18	0.659 3	9
15	97.60	57.50	27.57	38.07	83.79	39.80	60.10	30.42	471.38	0.639 8	10

者均值和帕累托前沿的影响。

3.3.1 MBCO 阈值参数的敏感性分析

通过改变 MBCO,分析不同参数下帕累托前沿、RPO、社区应急保障能力以及物资总成本三者均值的变化特征,结果如图 3 和表 3 所示。

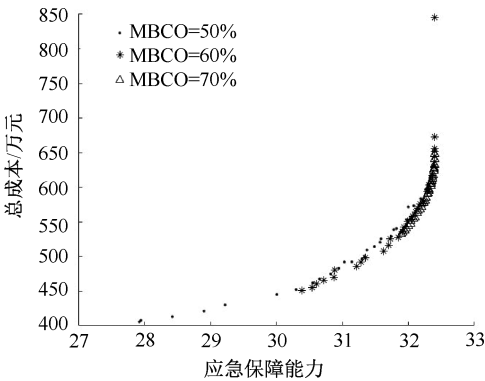


图 3 不同 MBCO 下帕累托前沿对比

Fig. 3 Comparison of pareto fronts under different MBCOs

表 3 不同 MBCO 下 RPO、应急保障能力、总成本变化

Table 3 Changes of RPO, emergency support capacity, and total cost under different MBCO

MBCO/%	RPO/%	应急保障能力	总成本/万元
50	66.52	31.14	523.41
60	70.87	31.81	551.63
70	74.88	32.23	585.84

由图 3 可知:随着 MBCO 的提升,帕累托前沿面下端点的应急保障能力和总成本逐步提升,这主要是因为,随着 MBCO 的提升,社区需预先储备的应急物资水平提升,而社区的应急保障能力和总成本与应急物资储备水平息息相关,因此,社区应急保障能力和总成本随着 MBCO 的提升而上升。

由表 3 可知:随着 MBCO 升高,RPO 提升,社区

平均应急保障能力由 31.14 上升至 32.23。这主要是因为,随着 MBCO 的提升,社区储备的应急物资水平提升,灾害情景下社区可保障的居民生活水平提升,相应地,应急物资的平均总成本随着物资储备水平的提升由 523.41 万元上升至 585.84 万元。与此同时,随着 MBCO 的升高,社区平均应急保障能力增幅减小,平均总成本增幅扩大。这主要是因为随着 MBCO 的提升,社区需进一步增加单位成本相对高昂的物资的储备。

3.3.2 社区 DT 的敏感性分析

通过改变 DT,分析不同参数下帕累托前沿、RPO、社区应急保障能力与物资总成本三者均值的变化特征,结果如图 4、图 5 所示。

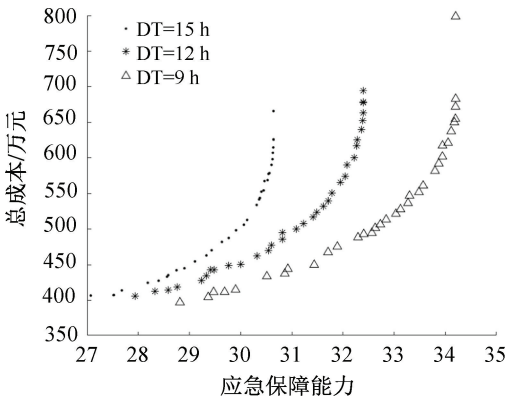


图 4 不同 DT 下帕累托前沿对比

Fig. 4 Comparison of the Pareto front under different DTs

由图 4 可知:随着 DT 的缩短,社区应急保障能力提升,总成本基本保持不变。这主要是因为随着应急物资调配时间缩短,社区恢复所需的总时长缩短,社区保障居民生活维持在最终水平的总时长延长,社区应急保障能力随之提升,而社区应急物资储备水平未发生显著变化。

由图 5 可知:随着 RPO 的提升,居民生活恢复至同一水平时应急保障能力差距不断扩大,当 RPO 为 50%时,随着 DT 由 15 h 缩短为 12 h,社区应急保障能力增加 6.67%,当 RPO 提升至 80%时,应急保障能力增幅上升至 10.76%。这主要是因为随着 RPO 的上升,社区在缩短的时间段内可保障的居民生活水平进一步提升,从而使得社区应急保障能力之间的差距进一步扩大。

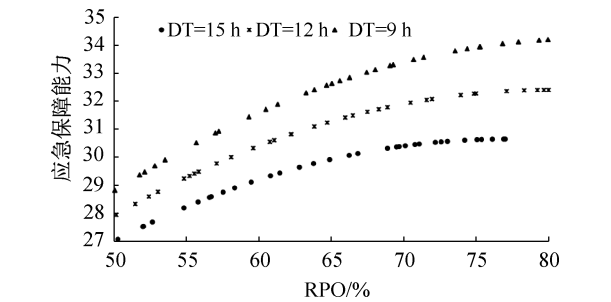


图 5 不同 DT 下 RPO 与应急保障能力变化
Fig. 5 Changes of RPO and emergency support capacity under different DTs

3.3.3 社区居民生活恢复速率的敏感性分析

分析不同 k 值下 RPO、社区应急保障能力以及物资总成本三者均值的变化特征,结果见表 4 和图 6、图 7。

表 4 不同 k 下 RPO、应急保障能力、总成本变化
Table 4 Changes of RPO, emergency preparedness level, and total cost under different k

k	RPO/%	应急保障能力	总成本/万元
0.008	60.23	28.25	452.71
0.01	65.76	30.93	510.03
0.012 5	76.45	34.79	664.07

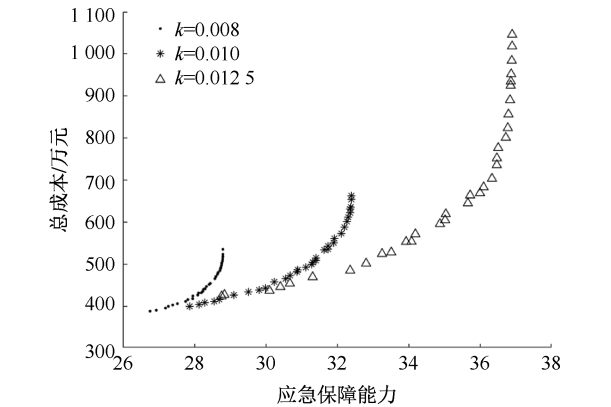


图 6 不同 k 下帕累托前沿对比
Fig. 6 Comparison of the Pareto front under different k

由表 4 和图 6 可知:居民生活恢复速率的提高促使 RPO、社区应急保障能力和总成本增加。这主

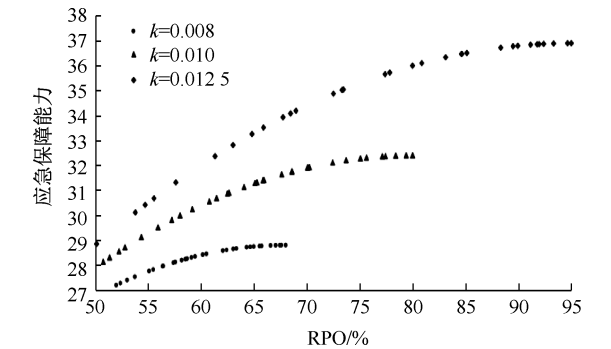


图 7 不同 k 下 RPO 与应急保障能力变化
Fig. 7 Changes of RPO and emergency support capacity under different k

要是因为,居民生活恢复速率的提高,可通过提升应急物资储备水平进一步提升灾后居民可达到的生活水平。与此同时,随着恢复速率的提升,社区可保障居民生活维持在最终水平的时间延长,从而提升社区应急保障能力。由图 7 可知:随着 RPO 升高,居民生活恢复至同一水平时应急保障能力差距不断扩大,当 RPO 为 55%时,随着 k 由 0.008 提升至 0.012 5,社区应急保障能力增加 9.93%,当 RPO 提升至 65%时,应急保障能力增幅上升至 15.68%。

4 结 论

1) 随着最低生活保障要求的提升,应急物资储备水平随之提升,社区居民可达到的生活水平和应急保障能力也相应提升,且社区应急物资的储备呈现先后次序,社区会率先储备单价较低的物资,当最低生活保障要求提升时,社区会增加对单位成本较高物资的储备,物资总成本也由此上升。

2) 在同一应急物资储备水平下,社区应急响应能力和处置能力的提升均能显著增强社区应急保障能力。同时,随着社区应急物资储备水平的提升,社区应急保障能力增幅会随着应急物资调配时间的缩短和社区居民恢复速率的提升逐渐扩大;当社区应急物资储备达到较高水平后,缩短调配时间、加快恢复速率,对应急保障能力的提升作用将更为显著。

3) 当前所提出的人口结构均衡条件下保障居民生活的应急物资储备优化模型在实际应用中,需结合社区具体特征作差异化调整。针对老年人、妇幼占比较高的社区,应提高医疗卫生物资的储备权重;对于洪涝易发区等灾害特征明显的社区,则需增加防汛物资储备。因此,未来可针对社区人口结构和灾害风险特征的区域差异,建立分类优化模型,以提升应急物资储备方案的适配性和实用性。

参考文献

[1] 瞿英, 许生. 社区韧性的概念演进与中外前沿热点对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 105-116.
QU Ying, XU Sheng. Conceptual evolution of community resilience and comparative analysis of frontier spots at home and abroad[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 105-116.

[2] 国家减灾委员会. 国家减灾委员会关于印发《“十四五”国家综合防灾减灾规划》的通知[EB/OL]. [2025-03-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/22/content_5702154.htm.

[3] ISO22301, Societal security-business continuity management systems-requirements[S]. 2012.

[4] SMITH R. Business continuity planning and service level agreements[J]. Information Management & Computer Security, 1995, 3(3): 17-19.

[5] 田敬秋, 王凯, 贾传圣, 等. 业务持续性管理在煤矿应急管理中的应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 214-217.
TIAN Jingqiu, WANG Kai, JIA Chuansheng, et al. Application of business continuity management in emergency management of coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 214-217.

[6] PARISE G, HESLA E, PARISE L, et al. Switching procedures and business continuity management: the flock logic of multiple source systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 60-66.

[7] HASSEI H, CEDERGREN A. Integrating risk assessment and business impact assessment in the public crisis management sector[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 56: DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102136.

[8] TÓMASSON B. Using business continuity methodology for improving national disaster risk management[J]. Journal of Contingencies and Crisis Management, 2023, 31(1): 134-148.

[9] 李璵珂, 刘振翼, 李舒泓, 等. 基于 Stackelberg 博弈的应急物资政企协同储备决策模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(6): 33-39.
LI Yingke, LIU Zhenyi, LI Shuhong, et al. Government-enterprise collaborative reserve decision-making model of emergency supplies based on Stackelberg game[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(6): 33-39.

[10] 项寅. 社会环境视角下应急物资政企联合配置模型[J]. 运筹与管理, 2023, 32(10): 69-75.
XIANG Yin. Optimizing emergency material reserve considering supplier participation and social environment[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(10): 69-75.

[11] 庞海云, 叶永. 基于实物期权契约的应急物资政企联合储备模型[J]. 系统管理学报, 2020, 29(4): 733-741.
PANG Haiyun, YE Yong. Government-enterprise joint reserve model of emergency materials based on real option contract[J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(4): 733-741.

[12] 王伟, 王芸清, 黄莉, 等. 基于损失定量的防汛应急物资配置优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 189-195.
WANG Wei, WANG Yunqing, HUANG Li, et al. Research on optimization of flood control emergency material allocation based on loss quantification[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 189-195.

[13] 刘阳, 田军, 于宁, 等. 考虑灾民痛苦感知的应急物资储备模型及协调机制研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-18. [2024-04-17]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0109>.
LIU Yang, TIAN Jun, YU Ning, et al. Prepositioning model of emergency supplies and coordination mechanism considering human suffering perception via an option contract[J/OL]. Journal of Management Science: 1-18. [2024-04-17]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0109>.

[14] 樊彧, 邵建芳, 王熹徽. 基于匮乏成本的应急物资政企合作储备与运输策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(5): 1 603-1 614.
FAN Yu, SHAO Jianfang, WANG Xihui. A study of strategies on joint inventory and delivery of emergency supplies between the local authority and the suppliers based on deprivation cost[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2024, 44(5): 1 603-1 614.

[15] DB 4403/T 345—2023, 救灾物资储备标准指引[S].
DB 4403/T 345—2023, Guidelines for disaster relief materials reserve[S].

[16] 李亚琴, 於家, 周决, 等. 洪灾情景下食品类物资供需分配及配送路径优化: 以上海市奉贤区为例[J]. 地理科学, 2024, 44(4): 573-585.
LI Yaqin, YU Jia, ZHOU Yang, et al. Optimization of the supply and demand allocation and distribution path of food supplies under flood scenarios: a case study in Fengxian district, Shanghai[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(4): 573-585.

[17] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023: 91-92.

作者简介: 黄晶 (1986—), 女, 江苏宜兴人, 博士, 教授, 主要从事管理科学与系统工程、灾害风险与应急管理等方面的研究。E-mail: j_huang@hhu.edu.cn。

