

中文引用格式:卢毅,尚远望,王宇航,等. 决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配的影响[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 182-190.

英文引用格式:LU Yi, SHANG Yuanwang, WANG Yuhang, et al. Impact of decision-makers' risk perception on emergency material allocation in flood disasters[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 182-190.

决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配的影响^{*}

卢毅¹教授, 尚远望², 王宇航², 岳丹凤²

(1 四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610207; 2 四川大学 商学院, 四川 成都 610065)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0536

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(72274131)。

【摘要】 为合理制定洪涝灾害应急物资调配方案,利用前景理论刻画决策者风险感知程度,界定“救灾中心-灾点”2层决策者风险感知参考点;采用系统动力学(SD)方法构建决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配影响的仿真模型;以2023年涿州洪灾为例,验证模型的有效性,揭示灾点满足率和供需不平衡程度受“救灾中心-灾点”决策者风险感知水平的影响机制;阐明决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配的影响机制。研究结果表明:灾点和救灾中心的决策者风险感知水平对灾点满足率和供需不平衡程度呈现边际递增效应;不同物资丰富程度下灾点的满足率差异会随着决策者风险感知水平趋向于悲观而缩小。

【关键词】 决策者; 风险感知; 洪涝灾害; 应急物资调配; 系统动力学(SD); 前景理论

Impact of decision-makers' risk perception on emergency material allocation in flood disasters

LU Yi¹, SHANG Yuanwang², WANG Yuhang², YUE Danfeng²

(1 Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu

Sichuan 610207, China; 2 Business School, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: To develop reasonable emergency material allocation plans for flood disasters, prospect theory was used to characterize the risk perception levels of decision-makers. The reference points for the risk perception of "disaster relief center-disaster site" two-tier decision-makers were defined. A simulation model was constructed using system dynamics to examine the impact of decision-makers' risk perception on the allocation of emergency supplies for flood disasters. The model's validity was verified with case study of 2023 Zhuozhou flood. The study revealed that satisfaction rate at disaster sites and degree of supply-demand imbalance were influenced by risk perception levels of two-tier decision-makers, with a curve representing these effects. The findings show that the risk perception levels of decision-makers at both disaster sites and relief centers have a marginal increasing effect on the disaster site satisfaction rate and supply-demand imbalance. Additionally, under different levels of material availability, the difference in satisfaction rates at disaster sites becomes smaller as decision-makers' risk perception becomes more pessimistic.

Keywords: decision-maker; risk perception; flood disaster; emergency material allocation; system dynamics (SD); prospect theory

0 引言

气候变化和城市化共同作用下,全球暴雨洪涝灾害频发,造成了严重的人员伤亡与经济损失^[1]。

中国是全球洪涝灾害最为严重的国家之一^[2],《2024 年全球自然灾害评估报告》显示,中国因各类自然灾害造成的受灾人口中,洪涝灾害占比最高。洪涝灾害处置需要大量的应急物资,确保公众生命及财产安全^[3],合理的物资调配尤为重要^[4]。

物资调配是洪涝灾害应急响应的关键环节^[5]。与其他灾害相比,洪涝灾害造成的积水现象会大幅降低运输效率^[6]。受灾区域物资需求呈现显著增长态势,造成物资供应缺口,对后续救灾活动造成不利影响^[7]。政府应构建高效、精准的物资调度体系,以减轻洪涝灾害所致损失^[4]。许多学者研究了应急物资调配问题,薛星群等^[8]构建了“车辆+直升机”的联合运输模型;董海等^[9]针对多运输方式联合的配送模式,构建了一个 2 阶段应急供应链混合整数规划模型。有的学者将灾民风险感知纳入研究,如朱莉等^[5]通过相对剥夺成本刻画了救援公平性;高鹏飞等^[10]提出表征物资调配时效性和公平性的痛苦成本函数,构建了应急物资调配选址-联运的多目标规划模型;巩在武等^[11]基于前景理论建立风险感知函数描述灾民的风险感知,构建了多目标混合整数不确定规划模型。

应急管理实践中,决策者风险感知在应急物资调配中至关重要^[12]。决策者面对洪涝灾害应急物资调配这种复杂决策问题时,往往难以完全理性决策^[11]。同时,应急调度决策涉及多个层次的决策者,不同层次决策者通常会面临各自特有的风险来源^[12],这种影响在决策者表现出不同风险感知水平的情况下尤为显著^[13]。由于完全理性的决策无法有效解释现实中偏离期望效用理论的行为,AHNEMAN 等^[14]提出了前景理论,较好地描述决策者偏离完全理性的决策。同时,系统动力学(System Dynamics, SD)在量化分析洪涝灾害这种非线性、多重反馈的复杂时变系统时有独特优势^[15]。综上,现有研究在应急物资调配领域虽已从理性决策和系统建模等角度取得进展,但仍较少深入考虑决策者风险感知对应急调度决策行为的影响,这一不足限制了模型对现实应急管理情境的解释力与适用性。

为此,笔者将洪涝灾害应急物资调配系统划分为“救灾中心-灾点”2 层决策者结构,基于前景理论研究并界定决策者风险感知,构建洪涝灾害应急物资调配中的风险感知曲线及函数模型,系统分析风险感知对应急物资调配的影响因素与作用机制,以期合理制定洪涝灾害应急物资调配方案提供决策参考。

1 应急物资调配 SD 建模

1.1 因果回路图

洪涝灾害应急物资调配中,物资供应决策由上下 2 层决策者共同完成。这一过程分 3 步:①灾点决策者向救灾中心发出物资请求;②救灾中心决策者根据灾点提供信息估算物资需求;③救灾中心综合考虑多种因素,制定最后的发运决策。参考王旭坪等^[16]的做法,采用“救灾中心-灾点”二级供应链模型研究 2 层决策者风险感知对应急物资调配的影响。

由于灾点和救灾中心决策者处在一种高度不确定的动态决策环境中,其决策伴随着灾区实时情景带来的风险感知。对灾点决策者而言,首要风险来源是当前物资库存量能否满足灾民需求;对救灾中心决策者而言,其风险来源除了灾点提出的物资短缺,还需要结合灾点的物资决策、灾情反馈和库存信息作出最终的物资发运决策。构建考虑决策者风险感知的洪涝灾害应急物资调配因果关系,如图 1 所示。

1.2 存量流量图

存量流量图是 SD 模型的核心结构,用于将因果关系具体量化,支撑 SD 模型运行与仿真。图 2 为 SD 模型的存量流量结构。整个系统通过反馈机制动态联动,模拟考虑决策者风险感知的洪涝灾害应急物资调配过程。

2 决策者风险感知测度

使用前景理论来模拟灾点、救灾中心决策者风险感知对应急物资调配决策的影响。相应公式为:

$$V(x) = \begin{cases} x^\alpha, & x \geq 0 \\ -\lambda(-x)^\beta, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$\alpha > 0, \beta \leq 1, \lambda > 1$

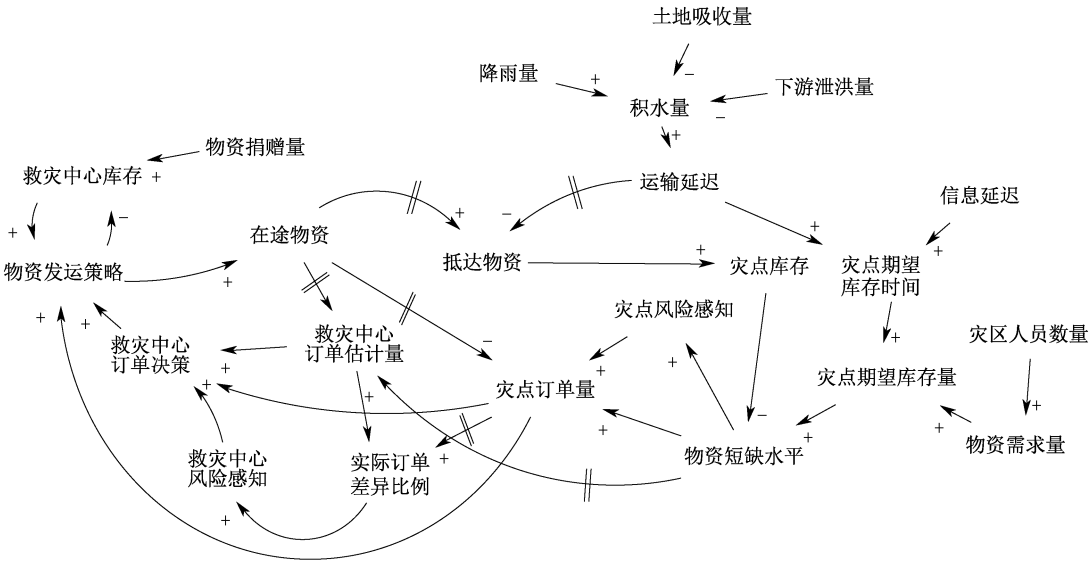


图 1 应急物资调配因果回路

Fig. 1 Causal loop diagram of emergency material allocation

式中： x 为决策方案相对于参考点的差值； $V(x)$ 为决策者对 x 的主观价值函数，用以刻画其在收益与损失情境下的心理感知差异； α 和 β 分别为风险感知水平系数和风险规避系数； λ 为对损失和收益的敏感系数，参考 TVERSKY 等^[17] 在累积前景理论基础上的试验结果，选取其广泛采用的标准参数设定，设 $\alpha = 0.89, \beta = 0.92, \lambda = 2.25$ 。其中， α 与 β 均 < 1 ，体现对收益与损失的边际效用递减； $\lambda > 1$ ，表明决策者存在损失厌恶倾向。

2.1 灾点决策者风险感知测度

针对灾点决策者，其风险感知程度来源于当前物资消耗情况，选取灾点当前库存量、需求量和期望库存持续时间 3 个关键要素的变化来衡量当前物资消耗情况：

$$X(t) = \frac{I(t)}{D(t) \times T(t)} \tag{2}$$

式中： $X(t)$ 为灾点决策者对救灾中心下一批物资抵达前灾点库存消耗情况的估计； $I(t)$ 为灾点当前库存量； $D(t)$ 为灾点当前物资消耗速度，即当前物资需求量； $T(t)$ 为由于运输延迟和信息延迟共同导致的总延迟时间，即期望库存持续时间。设灾点决策者参考点为 $X(t) = 1$ ，灾点当前库存量刚好能满足下一批物资抵达前这段时间的需求。

基于以上分析，通过变换前景理论中的价值函数，得到 SD 模型中灾点决策者风险感知公式：

$$V(\Delta X(t)) = \begin{cases} (\Delta X(t) + U_1)^\alpha, & \Delta X(t) \geq 0 \\ -\lambda(-\Delta X(t) + U_1)^\beta, & \Delta X(t) < 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中： U_1 为灾点决策者参考点； $\Delta X(t)$ 为实际值与参考点的差值。

2.2 救灾中心决策者风险感知测度

在实际洪涝灾害应急响应中，尽管灾点会提交物资请求，但由于存在信息反馈延迟等问题，救灾中心往往需要初步估算灾点物资需求。针对救灾中心决策者，该估算决策量反映的是救灾中心在获取有限信息下的判断结果，可能与灾点实际提交的请求量存在差异。其风险感知程度来源于灾点物资决策与初步估算的决策量差异。选取初步估算的决策量和灾点提交的决策量 2 个关键要素来衡量灾点物资供应情况：

$$Y(t) = O_1(t) - O_2(t) \tag{4}$$

式中： $Y(t)$ 为时刻 t 救灾中心初步估算的决策量与灾点实际提交决策量之间的差异， $Y(t) > 0$ 表示估算高于请求， $Y(t) < 0$ 表示估算低于请求； $O_1(t)$ 为救灾中心根据灾点反馈的灾情和库存信息初步估算的决策量； $O_2(t)$ 为灾点提交的决策量，体现了灾点当前物资紧缺程度。设救灾中心决策者的参考点为 $Y(t) = 0$ ，救灾中心预估的决策和灾点决策者提交的决策恰好一致。

基于以上分析，通过变换前景理论中的价值函数，得到 SD 模型中救灾中心决策者风险感知公式：

$$V(\Delta Y(t)) = \begin{cases} -(-\Delta Y(t) + U_2)^\alpha, & \Delta Y(t) < 0 \\ \lambda(\Delta Y(t) - U_2)^\beta, & \Delta Y(t) \geq 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中： U_2 为救灾中心决策者参考点； $\Delta Y(t)$ 为实际

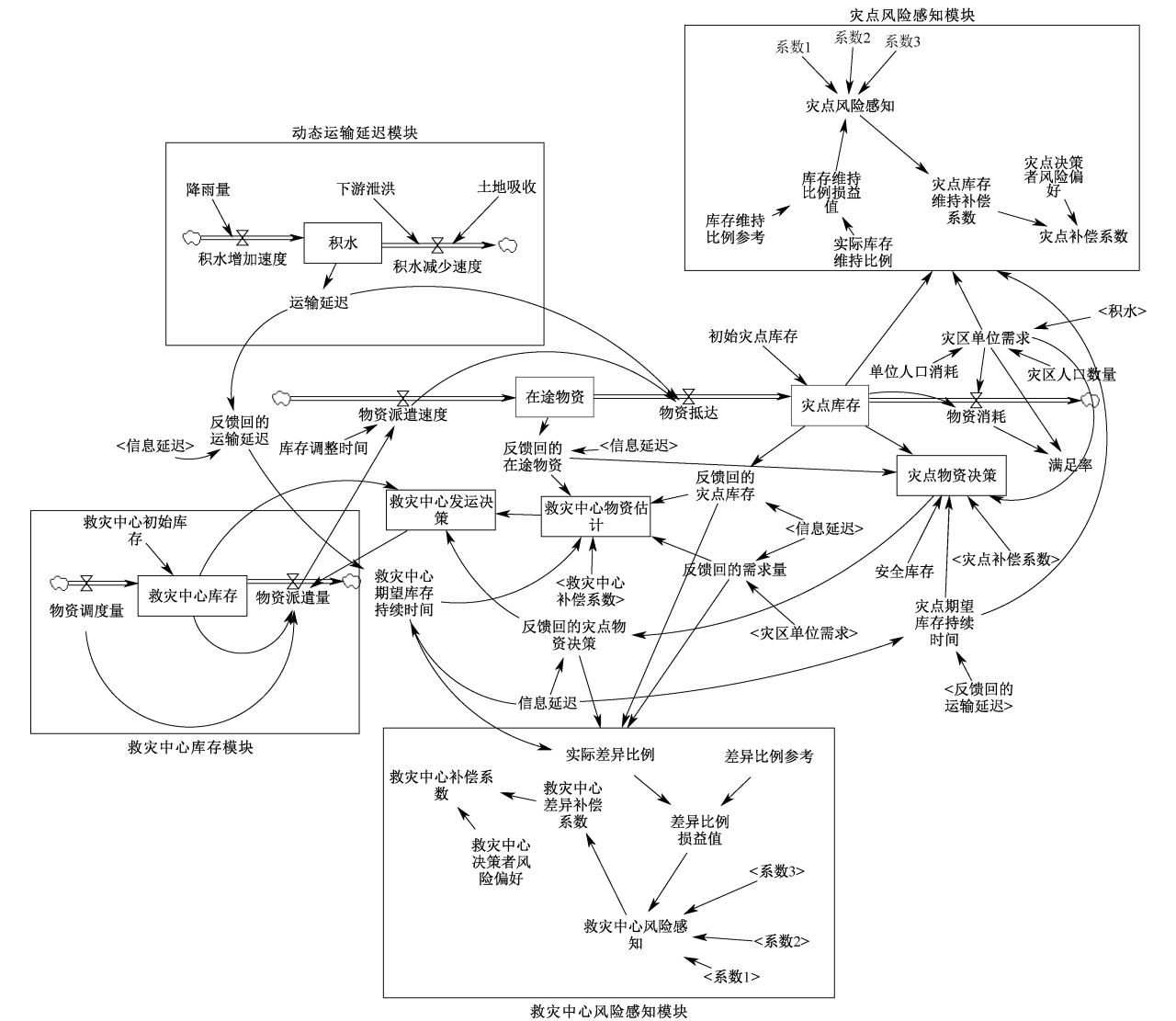


图 2 应急物资调配的存量流量

Fig. 2 Stock and flow of emergency material allocation

值与参考点的差值。

3 决策者风险感知对应急物资调配的影响

2023 年,河北涿州洪灾造成了重大经济损失和人员伤亡,是近年来我国遭遇的最为严重的极端暴雨洪涝灾害之一。因其具有较强代表性,选取该事件作为模型验证的案例。其中,救灾中心表示负责物资调配的上级管理机构,灾点则表示涿州市的地方救援指挥部门。仿真所用降雨过程、受灾人口规模与调度时间范围,参考了河北省防汛抗旱指挥部通报和官方媒体公开数据,选取 2023 年 7 月 29 日 0:00—8 月 12 日 24:00 为仿真周期,SD 模型时间步长设置为 6 h。以食物供给为主要物资类型,设定灾

点初始人口数量为 13.39 万人,每人每日消耗 0.5 kg,假定无额外决策延迟或外部干扰因素,以简化 SD 模型结构并突出风险感知因素的作用机制。

3.1 系统仿真结果

设定上下 2 层决策者分别具备 5 种风险感知水平(乐观、较为乐观、中立、较为悲观、悲观),分别探讨灾点、救灾中心决策者风险感知水平对救灾的影响。为避免行为偏差过大,设定决策者风险感知值,1 表示悲观,2 表示较为悲观,3 表示中立,4 表示较为乐观,5 表示乐观。

模型的总体运行绩效通过 2 个核心指标进行评估:灾点满足率反映物资供应的充分程度,灾点库存标准差则用于衡量系统内部的供需平衡状况。

3.1.1 灾点决策者风险感知对应急物资调配的影响

保持其他因素不变,假定救灾中心决策者的风

险感知为“中立”,通过调整灾点决策者不同风险感知水平,观察灾点库存、灾点决策量、救灾中心决策量、灾点补偿系数、救灾中心补偿系数、救灾中心库存的变化,结果如图3所示。从图3a、4b可以看出,在0~25个仿真周期内,灾点与救灾中心决策者均表现出较高的灾点补偿系数,表明两者在该阶段产生了较高的风险感知但由于运输延误和救灾中心库存限制等因素,导致缺货的灾区物资无法及时补给。在25周期后,运输延迟开始降低、救灾中心物资充足,灾点决策者的不同风险感知水平对后期物资调配产生了显著影响。悲观的风险感知水平倾向于推动决策者增加物资的发运量,故在图3c、图3d中,灾点风险感知为悲观时,物资发运量较高,图3e中灾点库存最高。这在一定程度上有助于改善灾点平均满足率,但同时也造成更大程度的供需不平衡;风险感知水平为乐观时,图3a中灾点库存最低,在灾点平均满足率上略有下降,但能够有效控制物资供需不平衡情况。

为更好地研究灾点风险感知对灾点满足率、库存标准差的影响,细化并仿真灾点风险感知,得出灾点决策者不同风险感知水平下满足率及标准差,如图4所示。可以看出,对于灾点满足率和灾点库存标准差,灾点决策者风险感知水平存在边际递增效应。当灾点决策者风险感知水平由乐观向中立转变时,灾点库存标准差只会出现少量上升,但其风险感知水平向悲观转变,供需不平衡情况会出现大幅度增加。这一趋势的形成,可能来源于悲观风险感知驱动下的过度调配行为,即灾点决策者在高估风险的基础上倾向于提前或多量请求物资,从而提高本地库存水平以应对未来不确定性。尽管这种行为在一定程度上提升了满足率,但由于实际需求未同步增长,反而造成库存标准差上涨。

3.1.2 救灾中心决策者风险感知对应急物资调配的影响

保持其他因素不变,假定灾点决策者的风险感知为“中立”,通过调整救灾中心决策者不同风险感知水平,观察灾点库存、灾点决策量、救灾中心决策量、灾点补偿系数、救灾中心补偿系数、救灾中心库存的变化情况,结果如图5所示。由图5a、图5b的0~35周期看出,救灾中心决策者风险感知水平对于灾点补偿系数和物资决策量影响较小。这是由于灾点决策者的物资请求能够更及时地反映灾区当前物资短缺情况,在灾点受灾较为严重的情况下,灾点的决策量在最终发货决策制定上占有较大影响比重;同时,灾点决策者受到救灾中心决策的影响较

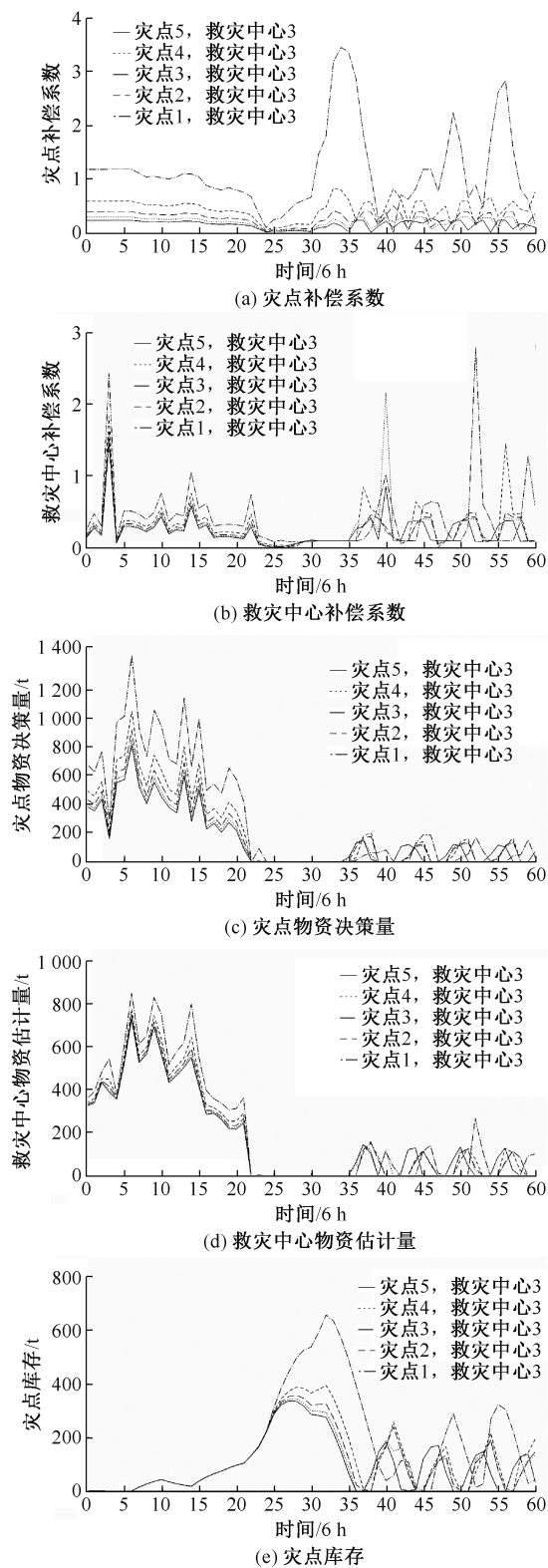


图3 灾点决策者不同风险感知水平下仿真结果对比
Fig.3 Comparison of simulation results under different risk preferences of disaster point decision-makers

小,更倾向于基于灾点本身信息决策。在35~60周期内,由图5c、图5d、图5e的35~60周期看出,救灾

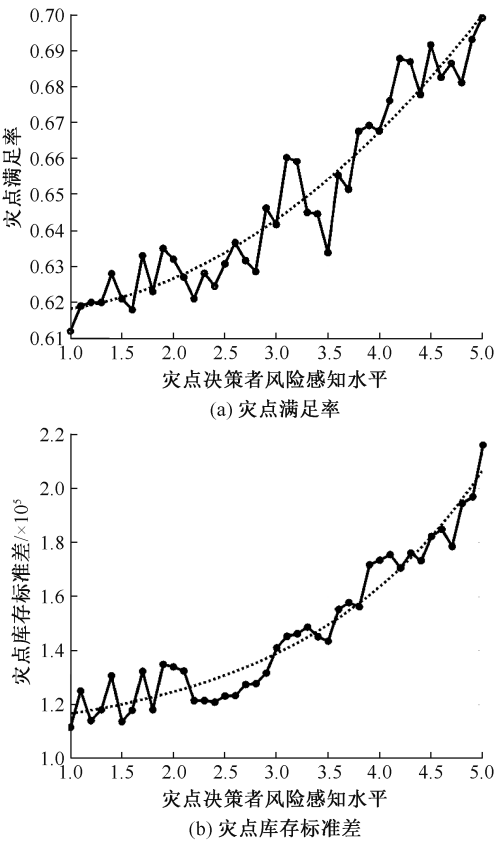


图 4 灾点决策者不同风险感知水平下满足率及标准差

Fig. 4 Satisfaction rate and standard deviation under different risk perception levels of disaster site decision-makers

中心风险感知水平为悲观时,救灾中心物资估计量最高,灾点库存最低;风险感知水平为乐观时,救灾中心物资估计量最低,灾点库存最高。这是由于采用了联合决策策略,以灾点物资请求量与救灾中心估算量之间数值较大者作为最终物资调配,展现了高风险感知对调配行为的放大效应。

细化并仿真灾点风险感知,得出救灾中心决策者不同风险感知水平下满足率及标准差,如图 6 所示。由图 6 可知:

1) 对于灾点库存标准差,救灾中心风险感知水平存在边际递增效应。当救灾中心决策者风险感知水平由乐观向中立转变时,灾点库存标准差只会出现少量上升,但其风险感知水平向悲观转变,供需不平衡情况会出现大幅度增加。这一结果的形成机制在于救灾中心作为最终调配执行方,在悲观风险感知下会增加发运量。然而,由于其获取灾点信息不及时或不充分,调配决策容易与实际需求产生偏差,进而形成阶段性过供,导致库存标准差升高。

2) 对比图 4 和图 6 可以看出,救灾中心对物资

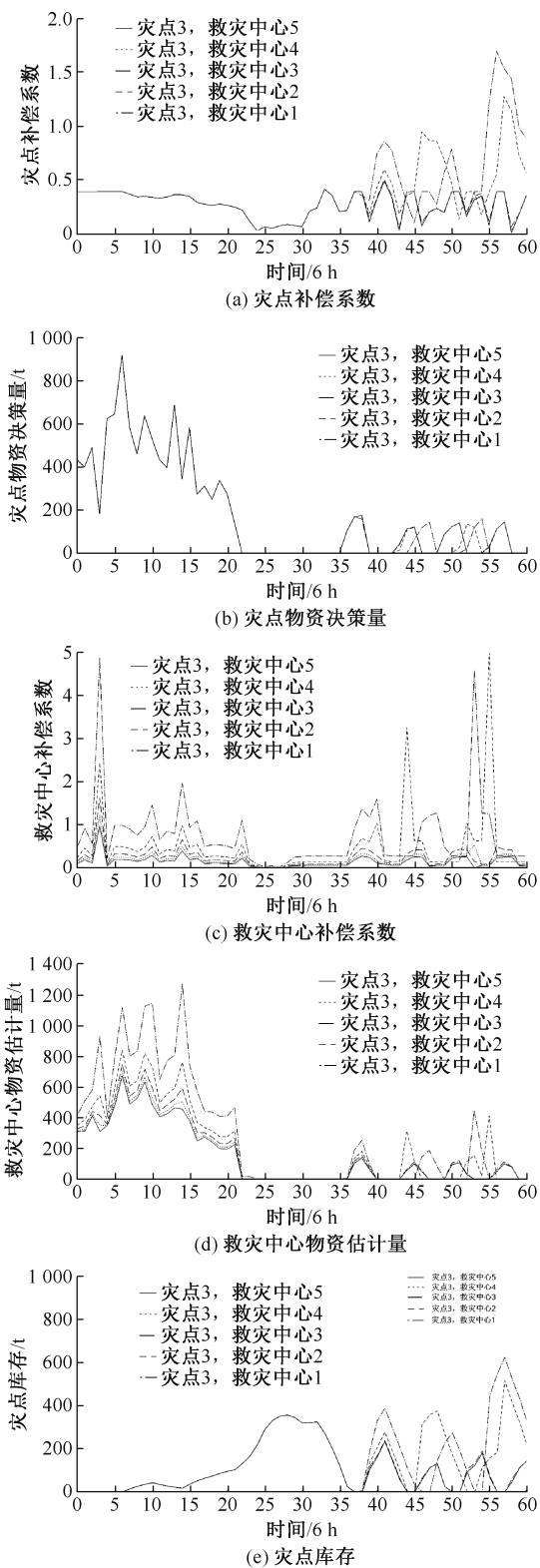


图 5 救灾中心决策者不同风险感知水平下仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation results under different risk perception levels of relief center decision-makers

不协调程度的影响更大。这是由于最终发运决策是由救灾中心决定,救灾中心决策者相较于灾点决策者在信息获取方面存在延迟,在救灾中心决策者风险感知悲观时,更容易出现风险感知波动,从而下达更多物资决策,导致物资不协调程度增大。

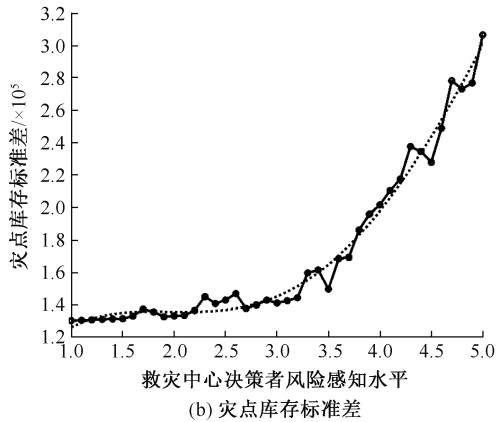
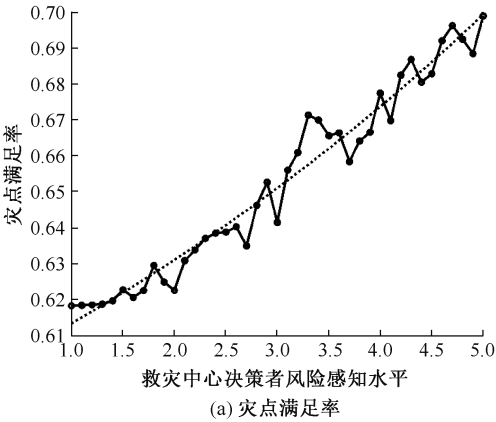


图6 救灾中心决策者不同风险感知水平下
满足率及标准差

Fig.6 Disaster point satisfaction rate and standard
deviation under different risk perception levels of
relief center decision-makers

3.2 多情景分析

为深入分析各种洪涝灾害应急物资情景下灾点和救灾中心决策者的风险感知水平对灾点平均满足率与供需不平衡程度的影响方式与程度,基于初始仿真结果进行多情景控制变量仿真试验。仿真结果如图7所示。

1) 从图7a看出,在物资丰富情景下,灾点满足率始终保持在较高位置;在物资较为匮乏情景下,灾点决策者风险感知水平对灾点平均满足率有较大影响,特别是在风险感知水平较为悲观的情景下该影响更为明显。同时,在持悲观风险感知水平时,无论物资状态如何,满足率差异是逐渐减少的。这说明,悲观态度下的保守决策缩小了不同物资状况下的表

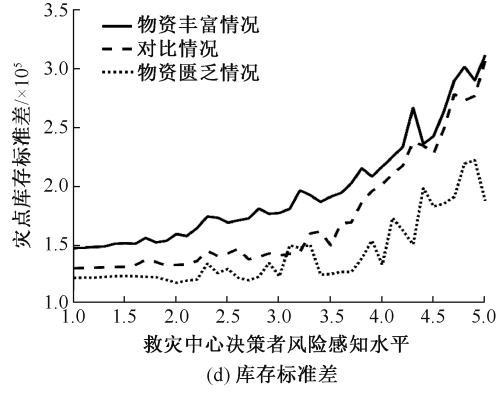
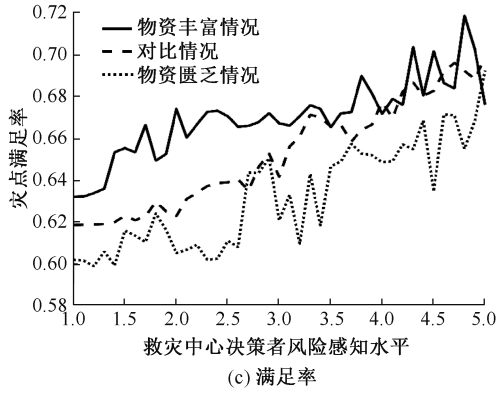
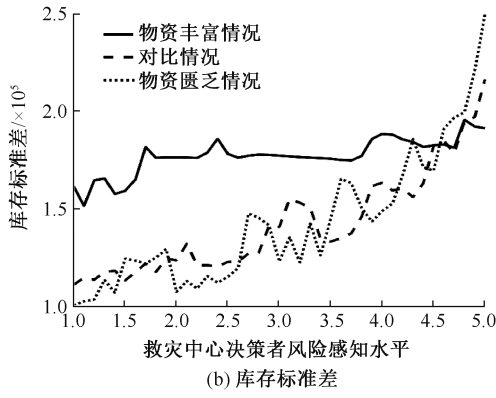
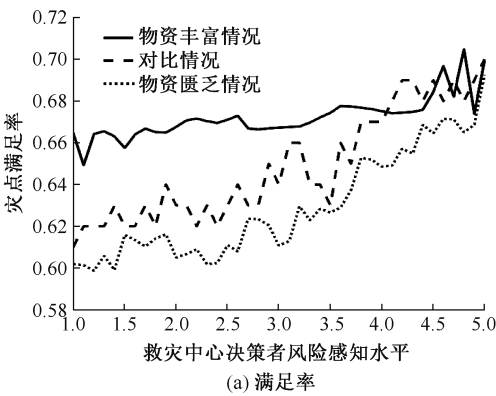


图7 不同情景下的灾点满足率及库存标准差
Fig.7 Disaster point satisfaction rate and inventory
standard deviation under different scenarios

现差异。
2) 由图7b可知:虽然整体上物资丰富的情景表

现出供需不平衡程度增加,但其波动较小,即使是在风险感知水平处于乐观的情景下,也存在着较高的供需不平衡状况。此外,风险感知水平逐步转变为悲观态度,供需不平衡程度也没有过多增长,保持在相对较低的供需不平衡状况。在物资匮乏的情景下,供需不平衡程度波动较大,并在悲观态度下显著增加。

3) 结合图 7a 与 7b 看出,在物资丰富情景中,灾点决策者持有的风险感知水平对灾点的满足率及物资供需不平衡的影响相对较小。这种情景下,由于物资的充裕性,即使决策者的风险感知水平发生变化,也不会显著影响到灾区物资满足程度和物资分配不均衡情况。

4) 结合 7c 和 7d 看出,在物资丰富的环境中,不同于灾点决策者,救灾中心决策者风险感知水平

的变化会显著影响到灾区的物资满足程度和物资分配不均衡情况。

4 结 论

1) 洪涝灾害中灾点决策者风险感知水平存在边际递增效应,当风险感知由乐观向悲观转变时,灾点库存波动显著加剧,供需不平衡问题愈发突出;而救灾中心决策者的风险感知水平则主要对库存标准差产生边际影响,对满足率影响相对有限。

2) 在多情景仿真中发现,当 2 层决策者均持悲观态度时,不同物资丰富状态下的灾点满足率差异逐渐缩小;在物资相对充足情景下,灾点决策者的风险感知水平对调配结果影响减弱,而救灾中心的风险感知变化仍对系统供需格局产生显著作用。

参 考 文 献

- [1] TELLMAN B, SULLIVAN J A, KUHN C. et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods[J]. *Nature*, 2021, 596: 80–86.
- [2] JIANG Ruijie, LU Hui, YANG Kun, et al. Substantial increase in future fluvial flood risk projected in China's major urban agglomerations[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: DOI: 10.1038/s43247-023-01049-0.
- [3] 李健, 张文文, 白晓昀, 等. 基于系统动力学的应急物资调运速度影响因素研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(3): 661–670.
LI Jian, ZHANG Wenwen, BAI Xiaoyun, et al. System-dynamics-based factor analysis for the speed of emergency materials transportation [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2015, 35(3): 661–670.
- [4] 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. [2025-03-12]. <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]. *Chinese Journal of Management Science*: 1–18. [2025-03-12]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0109>.
- [5] 朱莉, 曹杰, 顾琨, 等. 公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(9): 2 427–2 437.
ZHU Li, CAO Jie, GU Jun, et al. Dynamic emergency supply distribution considering fair mitigation of victim suffering[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2020, 40(9): 2 427–2 437.
- [6] PREGNOLATO M, FORD A, WILKINSON S M, et al. The impact of flooding on road transport: a depth-disruption function[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 67–81.
- [7] GUTJAHR W J, NOLZ P C. Multicriteria optimization in humanitarian aid[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(2): 351–366.
- [8] 薛星群, 王旭坪, 韩涛, 等. 考虑通行约束和运力限制的灾后应急物资联合调度优化研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 21–30.
XUE Xingqun, WANG Xuping, HAN Tao. Study on Joint dispatch optimization of emergency materials considering traffic constraints and capacity[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(3): 21–30.
- [9] 董海, 高秀秀, 魏铭琦. 不确定环境下两阶段应急供应链网络建模与优化求解[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(12): 107–116.
DONG Hai, GAO Xiuxiu, WEI Mingqi. Modeling and optimization solution of two-stage emergency supply chain under uncertain environment[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(12): 107–116.

[10] 高鹏飞, 刘方翔, 黄建华, 等. 考虑灾民心理痛苦的震后应急物资调配问题研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11): 200-207.
GAO Pengfei, LIU Fangxiang, HUANG Jianhua, et al. Research on post-earthquake emergency material allocation considering psychological pain of victims[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11): 200-207.

[11] 巩在武, 阳佳琦. 考虑灾民心理的多周期应急物资调度不确定规划建模研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-17. [2025-03-12]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0031>.
GONG Zaiwu, YANG Jiaqi. Study on uncertain programming modeling of multi-period emergency material allocation considering the psychology of victims[J/OL]. Chinese Journal of Management Science: 1-17. [2025-03-12]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0031>.

[12] ZHANG Zixin, WANG Liang, WANG Yingming. An emergency decision making method based on prospect theory for different emergency situations[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2018, 9: 407-420.

[13] 蒲国利, 苏秦. 满足救灾需求的灾后救援供应链网络设计[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(6): 161-166.
PU Guoli, SU Qin. Network design of disaster relief supply chain to meet relief demand[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(6): 161-166.

[14] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 363-391.

[15] 刘娟, 叶然. 基于系统动力学的疏散人员竞争行为仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 58-65.
LIU Juan, YE Ran. Simulation analysis of evacuees competitive behavior based on system dynamics[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 58-68.

[16] 王旭坪, 杨相英, 杨挺, 等. 动态路况下考虑决策者风险感知的地震物资调配动力学模型[J]. 系统管理学报, 2015, 24(2): 174-184.
WANG Xuping, YANG Xiangying, YANG Ting, et al. System Dynamics model of earthquake material allocation considering decision-makers' psychological risk perception and dynamic traffic[J]. Journal of Systems & Management, 2015, 24(2): 174-184.

[17] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5: 297-323.

作者简介: 卢毅 (1983—),男,湖北孝感人,博士,教授,博士生导师,主要从事综合减灾与应急管理方面的研究。E-mail: luyiscu@scu.edu.cn。

