

参赛学生姓名：徐子悦

中学：北京市十一学校

省份：北京市

国别：中国内地赛区-北方赛区

指导老师姓名：王潇

指导老师单位：北京市十一学校

研究题目：

基于博弈论的紧急情况救援模型研究

# 基于博弈论的紧急情况救援模型研究

徐子悦

## 摘要

随着突发事件频率的增加,高效的应急救援决策在减少人员伤亡和财产损失方面起着至关重要的作用。因此,本研究结合经济学中的资源配置理论,边际分析和博弈论,构建了一个涵盖多种决策模式的紧急情况救援决策模型,旨在分析不同社会条件下的资源分配和决策效率,以提出优化救援质量的政策建议。

在此模型中,优化人力救援资源分配是救援决策的核心问题。本文基于博弈论框架,分析了不同主体在救援效用与成本之间的权衡,涵盖了完全信息和不完全信息两种情境。通过构建三个子模型,本文探讨了个体与群体在决策过程中如何动态调整资源配置,并创建了救援质量指标,以评估不同决策模式下的救援效果。同时,本文通过仿真模拟进一步验证不同子模型下的救援质量表现。①子模型一假设群体作为一个整体进行决策,类似于政府对公共资源的集中调配。在此模式下,群体根据整体救援效用和成本的动态变化调整该群体救援参与比例,以实现资源的最优配置。结果表明,统一的决策与调度在一定程度上能够提高救援效率,但效果有限。②子模型二从子模型一的群体决策过渡到个体决策,模拟了在完全信息条件下,个体根据边际效用和边际成本做出决策的过程,类似于市场中个体在拥有充分价格信息的情况下对资源进行最优使用。每个救援个体依据参与的潜在效益和成本,选择最佳行动策略。结果显示,在完全信息环境下,个体的理性选择显著提升了整体救援效果,表明在信息充分且激励正确的情况下,资源分配效率最高。③子模型三从子模型二的完全信息情况过渡到不完全信息的情景,考虑了个体在对模型参数的不完全信息条件下的决策过程,类似于经济学中的市场信息不对称情境。个体通过不断更新其对参数的信念值,逐步调整参与决策。结果表明,虽然信息不完全情境下的救援效率低于完全信息情境,但随着信息的逐步获取和信念更新的过程,个体能够逐步改善其决策。与经济学中信息不对称对市场效率的影响类似,信息的透明对提升救援效率具有重要作用。基于不同的决策方式以及信息,本模型为经济学中的不同经济制度理论以及信息传递提供了新的研究视角,推动了在应急管理 and 经济资源分配制度领域的跨学科讨论。

进一步对效果最优的子模型二进行关键参数调试以及仿真模拟表明,高技能救援者的比例、社会救援资源的边际成本控制、资源分布的集中或分散程度,以及高低技能救援者之间技能差异,均对整体救援效果产生显著影响。此外,通过灵敏度分析,本文证明了模型对关键参数变化的稳健性。本文通过对这三个子模型的深入分析,并结合经济学中的资源配置理论,提出了一系列政策建议,如增加高技能救援者的比例、建立区域化或社区急救队伍、优化救援资源的集中配置,适度培训增大技能差异等。本模型的研究成果不仅深化了应急管理与博弈论的研究基础,还为实际救援行动中的资源优化配置提供了参考,为复杂多变的环境下合理调配资源、提升救援质量提供了方案。通过博弈论视角,本文系统分析了不同救援策略的相互作用及其对整体救援效果的影响,为在经济学的范畴内研究应急救援中的人力资源配置和决策提供了新的理论依据,并对政策制定者具有理论意义与实践意义。

**关键词:** 应急救援决策; 博弈论与救援决策; 资源优化配置

# 目录

## 一、引言

## 二、文献综述

- 2.1 纳什均衡博弈模型
- 2.2 志愿者困境博弈模型
- 2.3 动态演化博弈模型与信号博弈模型
- 2.4 模型创新点及独特性分析

## 三、问题描述、基本假设与符号说明

- 3.1 问题描述
- 3.2 基本假设
- 3.3 符号说明

## 四、模型的建立

- 4.1 模型概述与参数设定
- 4.2 模型评价指标的设计
- 4.3 子模型一：基于完全信息的群体总效益成本决策模型
- 4.4 子模型二：基于完全信息的个体边际效益成本决策模型
- 4.5 子模型三：基于不完全信息的个体边际效益成本决策模型

## 五、基于子模型的对比分析与试验

- 5.1 仿真模拟试验方法
- 5.2 子模型分析：三种决策方式的救援效果差异
- 5.3 试验一：社会中高技能人群在总人群中的占比对救援效果的影响
- 5.4 试验二：社会中个体救援边际成本均值对救援效果的影响
- 5.5 试验三：社会中个体救援边际成本的离散程度对救援效果的影响
- 5.6 试验四：社会中高低技能者的技能差异对救援效果的影响
- 5.7 灵敏度分析

## 六、结论与建议

- 6.1 主要结论与建议
- 6.2 模型的局限性与未来研究方向

## 七、参考文献

## 一、引言

近年来，随着突发事件的频繁发生，应急决策在减轻和减少突发事件造成的各种损失（如财产、生命、环境等）方面发挥着至关重要的作用，已成为一个备受关注的研究领域。大规模的紧急事件或灾难往往会带来巨大的损失。2008年的汶川地震是过去二十年中最具破坏性的灾难之一，导致超过37万人伤亡<sup>[1]</sup>。2024年4月，洪涝和地质灾害共造成江西、广东等17个省（区、市）159.8万人受灾，因灾死亡失踪24人，紧急转移安置12.4万人，倒塌房屋800余间，损坏房屋1.8万间，农作物受灾面积140.3千公顷，直接经济损失119.8亿元，成为近二十年来同期最严重的灾害<sup>[2]</sup>。这些事件突显了社会对加强紧急情况救援能力的迫切需求。

为此，建立国家灾难医疗响应系统、构建积极有效的指挥系统、成功协调救援部队以及实施有效治疗，对于降低重大灾害后的死亡率和发病率以及提高整体救援效果至关重要<sup>[3]</sup>。在紧急情况发生时，组织并调动具备救援技能的人群进行及时有效的救援是必不可少的。从经济学角度来看，紧急救援决策不仅涉及资源的合理分配，还涉及到如何在极端情况下进行效用最大化的决策。因此，本文构建了一个紧急情况人力救援的博弈模型，从资源的边际效用与边际成本角度对群体和个体的救援决策进行分析。模型涵盖了完全信息和不完全信息两种情境，并探讨了不同信息条件下，个体和群体如何进行最优资源分配，以最大化救援效益，同时控制成本。基于对关键经济学参数（如技能水平差异、资源集中度、资源丰富程度等）对救援效果的影响的分析，本文提出了相应的政策建议。

本文含引文在内共分为五个主要部分。第二部分是文献综述，概述了现有模型和研究理论，并介绍了本模型的贡献以及创新点。第三部分对符号的使用进行了说明，并分析了应用于本文的三个模型的基本假设。第四部分围绕基本假设构建了三个不同的子模型来描述紧急救援情境。第四部分首先分析并解释了三个模型的通用部分。随后，介绍了用以综合评估救援质量的指标。接着，第四部分详尽阐述了三种子模型：子模型一假设拥有完全信息的群体作为一个整体进行决策，并根据群体总收益与成本随时间变化来调整参与救援的比例。这一模型类似于政府在拥有充足信息的情况下，进行统一的资源调配和分配。子模型二假设具有完全信息的个体作为决策主体，个体会在每一时刻根据经济学中的边际效用与边际成本对参与救援的决策进行评估，从而决定是否参与救援。子模型三同样依据个体决策，但此模型假定个体仅拥有不完全信息，即模型中某些收益参数对个体而言是未知的。这一情境反映了市场中信息不对称的常见问题，个体将根据初始信念进行决策，并在过程中不断更新其信念，类似于市场参与者在面对不完全信息时的决策调整。

这三个子模型从群体层面逐渐过渡到个体层面，并从完全信息到不完全信息的不同视角，深入分析了紧急救援的决策过程，体现了经济学中的信息与决策理论。本文通过多智能体仿真模拟，在参数相同的情况下分别模拟三个子模型的决策，进行比较并分析可能的原因。最后，通过调整具有现实意义的多个参数，本文探讨了社会因素（如资源集中度、技能分布、资源丰富程度等）对救援质量的影响，并对模型结果进行了分析和讨论。在第五部分，本文总结了模型的结论，并讨论了贡献、不足以及未来研究的改进方向，在资源调度和决策优化的经济学框架下如何进一步提高救援的效用与效率。

## 二、文献综述

紧急事件的定义是“突然发生的造成或有可能造成严重伤亡、财产损失、生态破坏

和社会危害的事件”<sup>[4]</sup>。救援活动在紧急情况中一直是应急管理领域的核心研究议题，具有极高的理论和实践价值。从经济学的视角看，救援活动可以视为一种特殊的资源配置问题，涉及如何在资源有限的情况下，最优配置人力、物资和技术以最大化效用。社会资源应在边际效用等于边际成本的情况下进行分配，以确保资源使用的效率最大化。在紧急救援的背景下，这意味着救援资源必须依据其边际效用的大小并结合救援边际成本进行优先分配，从而实现资源最优配置，减少灾害带来的负面影响。

传统上，紧急情况下的救援常被视为非合作博弈中的公共商品生产问题进行研究。这类商品的特点是由多人共同并同时使用，且难以排除那些不支付的人<sup>[5]</sup>，类似于经济学中的公共资源问题。在这种情况下，资源配置的效率可能受到“搭便车”现象的影响，即某些主体选择不参与资源的提供或分配，但仍享受救援带来的效益。

文献综述部分将综合先前的研究，并讨论博弈论中的纳什均衡、志愿者困境模型以及动态演化博弈等理论框架，详细阐述在这些博弈论模型中如何通过合理的激励机制和资源配置策略，提升救援效率。纳什均衡的分析能够帮助解释在紧急情况下，个体和群体如何根据资源的稀缺性做出最优决策。志愿者困境模型则揭示了在公共资源分配中的激励问题，说明个体如何在做出是否参与救援的选择。动态演化博弈进一步展示了随着时间推移，个体的策略如何在信息逐步完善和资源持续分配的过程中进行调整，从而实现更高效的救援效果。

## 2.1 纳什均衡博弈模型

纳什均衡 (Nash Equilibrium, NE) 是非合作博弈中的最常用的解决概念，描述了一种战略博弈的稳态，使得在均衡状态下，博弈中的每个参与者在给定其他参与者策略的情况下无法通过单方面改变策略来获得更高的收益<sup>[6]</sup>。纳什均衡在经济学的资源分配和风险管理等领域中的应用尤为重要，为如何最优配置资源提供了理论依据。

例如，Cheng-Kuang Wu 在其研究中提出了一种博弈论方法，用于在灾难性海啸发生后评估风险值并部署搜索和救援资源。该模型通过将每个受影响地区的所有风险值纳入考量，模拟了救援资源的分配决策过程。并建立了区域风险博弈的收益矩阵。在这种非合作博弈中，纳什均衡为决策者提供了一个策略组合，将复合灾害与每个受影响地区的响应代理之间的互动建模为一个两人、零和、非合作博弈<sup>[7]</sup>。

纳什均衡模型意在描述资源分配的效率依赖每个参与者的独立决策以及博弈中其他参与者行为的影响的事实。通过纳什均衡分析，决策者能够更好地理解在多方参与的情况下，如何在有限资源条件下制定互不妨碍且最优的救援策略。

## 2.2 志愿者困境博弈模型

志愿者博弈模型 (Volunteer's Dilemma) 是一种经典的博弈论模型，主要用于分析在公共物品提供或集体行动中的个体决策行为。该模型探讨了参与者在面临是否参与贡献的选择时的行为决策：可以选择承担一定成本参与贡献，从而使整个群体受益，或者选择不参与，希望其他人承担成本以实现集体利益。这一选择过程揭示了经济概念“搭便车”行为的本质，即每个个体希望依赖他人来承担公共物品的成本，从而自己享受利益而不付出代价。然而，当所有人都选择不参与时，最终可能导致集体行动失败，公共物品无法被提供，所有参与者的收益为零。志愿者博弈模型不仅反映了在集体行动中普遍存在的困境，还说明了合理激励机制的重要性，以避免因依赖他人而导致的集体失败。

Diekmann (1985) 首次提出了志愿者困境的模型，并详细探讨了在有成本的合作 (Cooperation) 或无成本的背叛 (Defection) 情境下，志愿行为这一公共物品被生产的

概率。Diekmann 运用对称均衡对模型进行了分析,并进一步讨论了在存在超理性参与者时模型的变化,激发了对志愿者困境模型的更多研究讨论<sup>[8]</sup>。Weesie (1994) 在其文章中改进了志愿者困境的模型,探讨了行为可观察性和信息完整性如何独立影响志愿者困境的结果。他的研究通过比较四个不同的模型,进一步揭示了信息不完全性和行为时机对志愿者决策过程的关键影响<sup>[9]</sup>。He, Wang, 和 Li (2014) 将志愿者困境扩展到了非对称博弈,分析了在一个强者与多个弱者的情况下,公共物品提供的动力结构,分析了人员被分类时对模型结果的影响<sup>[10]</sup>。这些研究揭示了志愿者博弈模型在公共物品供给与集体行动问题中的广泛应用,通过博弈论视角分析不同假设下的决策过程,进一步阐明了如何优化资源配置,提高公共物品的供给效率,以克服“搭便车”行为。

### 2.3 动态演化博弈模型与信号博弈模型

动态演化博弈 (Dynamic Evolutionary Game) 是一种分析参与者在不断变化的环境中,随着时间推移如何调整策略以最大化收益的博弈论工具。动态演化博弈模型能够有效地解释参与者如何在长期互动中调整资源配置策略,以实现效用最大化。在紧急救援等复杂情境中,参与者的策略会随着外部条件和其他参与者行为的变化而不断演化,从而实现资源的最优配置,类似于经济学中根据价格信号的市场动态调整机制以达到均衡的过程<sup>[11]</sup>。通过动态演化博弈,可以模拟和预测各方在长期互动中的行为演化,识别出最优或演化稳定的策略组合。Liu et al. (2022) 在其研究中利用动态演化博弈模型探讨了中国紧急救援机制中政府救援队、社会应急组织、以及政府支援机构之间的动态博弈关系,即随着时间的推移这三方在紧急救援中的合作与互动如何演化,从而提出优化合作机制的建议<sup>[12]</sup>。

在非合作博弈中,信号博弈 (Signaling Game) 模型可以为分析这些复杂互动提供有力工具。在信号博弈中,博弈的参与者通过他们的前期的决策方式及行为向其他参与者传递信号,从而显示他们在未来参与救援的概率。其他参与者可以根据这些信号,结合轮次更新中的信息,调整自己的决策。这种信号更新机制帮助各方更好地评估和判断其他救援者的参与意图和可信度,进而优化整体合作策略。Khalvati, Park, Dreher, 和 Rao (2016) 基于公共物品和志愿者困境的博弈模型提出了利用部分可观测马尔可夫决策过程 (POMDP) 对合作行为进行建模与模拟的方案。在该模型中,个体根据对其他参与者是否合作的概率信念进行决策,而这些信念会随着合作轮次的更新而调整。通过真人实验验证,该模型有效地模拟了社会决策中合作行为的演化,为理解和优化合作机制提供了关键的理论支持<sup>[13]</sup>。

信念更新在博弈论模型 (尤其是信号博弈) 中扮演了关键角色。参与者必须根据新获得的信息持续调整其策略。通过贝叶斯更新公式,可以量化新信息对原有信念的影响。根据《概率论与数理统计》一书中的贝叶斯信念更新公式,设  $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$  为样本空间  $\Omega$  的一个完备事件组,其中,  $P(A_i) > 0$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ),  $B$  为满足条件  $P(B) > 0$  的任一事件,则事件  $A_i$  在事件  $B$  发生条件下的后验概率  $P(A_i|B)$  可以通过以下公式计算:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{P(B)}$$

其中,  $P(A_i|B)$  表示在事件  $B$  发生的条件下,事件  $A_i$  发生的概率,即后验概率;  $P(A_i)$  表示事件  $A_i$  发生的先验概率,即在没有额外信息的情况下,对  $A_i$  发生的概率的估计;  $P(B|A_i)$  表示在事件  $A_i$  发生的条件下,事件  $B$  发生的概率 (这部分在贝叶斯理论中通常

被看作似然)； $P(B)$  代表事件  $B$  的边缘概率，也称为全概率<sup>[14]</sup>。信念更新不仅在理论上具有贝叶斯公式作为严格的数学基础，因而实现了动态信息的整合与更新，而且在实际应用中也极大地影响了参与者的决策行为，尤其是在不完全信息的博弈环境中。

## 2.4 模型创新点及独特性分析

本文的研究贡献主要体现在四个方面，与先前的相关研究相比具有显著的创新和深化，在结合经济学原理和博弈论工具方面取得了重要突破。首先，本模型通过结合多种博弈论方法，不仅关注紧急情况中的资源分配问题，还强调了个体是否参与救援的决策过程，这与经济学中的资源配置理论密切相关。纳什均衡、志愿者困境模型、不完全信息的动态演化博弈和信号博弈的思想被融入到模型中，深入分析了个体在面对公共物品（即救援资源）供给时的决策行为。通过模拟个体如何在有限资源的条件下做出最优选择，本文弥补了现有文献中在动态救援决策方面的不足，进一步丰富了应急管理 with 资源配置的理论讨论。

其次，现有研究往往较少同时关注多种决策方式的合作互动，而本文对此进行了扩展和深化。通过将个体与群体在完全信息和不完全信息环境下的多种决策方式纳入同一博弈系统，本研究有效地增强了应急救援合作决策的系统性和完整性。这种扩展类似于经济学中对市场参与者在不同信息结构下的行为分析，强调了在不对称信息条件下如何优化资源配置与合作决策。

此外，本文创新性地设计了一系列评价指标，以科学评估并比较不同决策方法的效果。这些评价指标不仅量化了决策方法的效用成本比和救援参与度，还为未来在类似情境下优化资源分配提供了理论工具。与经济学中的绩效评估工具相似，这些指标为决策者提供了量化框架，以选择在特定资源条件下的最优救援策略。

最后，本文运用多智能体仿真模拟方法，并通过调整现实意义参数进行实验，深入探讨了对救援效果有重要影响的关键因素。这种方法拓宽了对应急救援合作决策模型的视角，不仅分析了个体在动态条件下的决策行为，也揭示了经济学中资源集中度、信息透明度和合作激励机制对整体救援效率的影响。本文的综合结论和政策建议为提升应急救援协作效率提供了理论依据，增强了对应急救援动态行为的理解，并在实践中为救援质量和资源配置效率的优化提供了重要指导。

## 三、问题描述、基本假设与符号说明

### 3.1 问题描述

本文的模型旨在解决应急救援场景中人力资源的优化利用与分配问题，这一场景中的资源分配具有显著的经济特征，尤其是面对稀缺资源和紧急需求时，如何进行最优配置。应急救援通常发生在自然灾害、严重事故或其他突发事件中，这些事件在短时间内对生命财产造成巨大威胁。在这种背景下，救援行动的时效性和有效性至关重要，决定了灾害应对的成功与否。

在应急救援场景中，人员会在不同时间陆续抵达现场，面对突发的复杂环境，他们需要在有限的时间内做出参与救援或等待更佳时机的决策。这种决策不仅与人员的技能水平有关，还取决于他们对现场情况的实时评估。救援行动的时效性至关重要，早期的响应往往能极大降低人员伤亡和财产损失。然而，人员也可能选择等待更有利的条件再行动，这涉及到对当前效用和未来成本的权衡。

在小规模紧急事件中（如老人心脏骤停），到场人员需要快速反应，立即决定是否采取行动，提升救援成功率。而在大规模灾害中（如地震或洪水），救援过程可能更加复杂，团队之间的协调与资源分配变得关键，到场人员不仅要考虑自身的行动，还需评估其他救援人员的到达时间与合作可能性。这种情境中，到场人员需在有限信息和不确定条件下，通过评估效用与成本做出最优决策，力求在时间和资源限制下实现整体救援效果的最大化。本模型融合了小规模以及大规模紧急事件的救援特点，通过模拟人员在不同时间节点的到达和决策，分析在这些不确定条件下如何优化救援策略，以提升救援的总体效率。

本文通过构建数学模型，分析在不同决策方式、社会结构和信息条件下，如何最大化救援效果。模型借鉴了经济学中的不同的博弈论工具，分析个体在有限资源条件下的最优决策方式，并探讨了在不同条件下可能出现的涌现行为，研究如何通过优化关键参数提升整体救援质量。

### 3.2 基本假设

- 理性行为假设：**所有参与者都是完全理性的，即他们能够完全理解所有可用信息，并选择使自己收益最大化的策略。
- 有限参与者假设：**每一次的紧急救援的到达者数量都是有限的，即假设参与决策的博弈者数量是有限的且已知。
- 收益函数与成本确定性假设：**参与者的收益函数是已知的且确定的。这意味着每个参与者在每种可能的结果中都可以计算出其收益。参与者每一个时间段参与救援的成本固定。
- 环境稳定性：**模型外部的环境（如政策、自然条件等）在博弈期间是稳定的，不会影响博弈参与者的策略选择。
- 时间分段化以及瞬时决策假设：**将连续的时间视为由离散的时间段组成。每个时间段代表一个特定的时刻或阶段。假设在每个时间段内，所有的决策和行动都是瞬时完成的，即在该时间段的起始时刻做出决策并立即执行相关行动，而救援行动会持续进行直到下一个时间段的开始。
- 边际效用递减假设：**救援者的边际效用会随着参与人数的增加而递减，这种现象通过效用函数来表达。

### 3.3 符号说明

为了便于理解和描述模型中的关键变量和参数，本部分将以下列出的符号和对应的意义进行了归纳整理。在随后的分析和讨论中，表 1 这些符号将用于表示模型中各个变量的具体数值和作用：

表 1-符号说明及定义

符号	定义及说明
$t_j$	第 $j$ 时段
$t_{total}$	紧急情况最后一个时间段
$i$	到达人员按照技能高低进行分类后的编号
$D_{H_j}$	在 $t_j$ 时段到达现场的高技能者数量
$D_{L_j}$	在 $t_j$ 时段到达现场的低技能者数量
$H_j$	在第 $j$ 时刻正在参与救援的高技能者
$L_j$	在第 $j$ 时刻正在参与救援的低技能者
$MC_i$	第 $i$ 个人在任意时刻进行救援的成本
$MU_j$	第 $i$ 个人在 $j$ 时段进行救援的效用
$U$	整个紧急事件中的救援总效用
$C$	整个紧急事件中的救援总成本
$\gamma$	社会中高技能人群在社会中的占比
$t_s$	救援决定性时刻, 即救援最优时间窗口
$\omega_H, \omega_L, a_H, a_L, b_H, b_L, \tau$	效用函数的参数
$BCR$	效益成本比
$R_j$	即时参与度
$AP$	平均参与度
$Q$	救援质量综合指标
$xH_j, xL_j$	高技能群体、低技能群体的参与比例

## 四、模型的建立

### 4.1 模型概述与参数设定

本文的模型旨在分析紧急情况下的救援过程以及决策方式。社会中的人群被分为高技能人群和低技能人群两类, 两者在参与救援时的效用函数中的参数有所不同。模型中设定高技能人群在总人口中的比例为  $\gamma \in (0,1)$ , 即到达现场的人中高技能者比例为  $\gamma$ , 而低技能人群的比例为  $1 - \gamma$ 。

为简化分析, 本模型假设从紧急情况发生的初始时刻  $t_0$  开始, 接下来的每一个时段按照时间顺序以  $t_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ) 命名。每一个时间段  $t_j$  开始时都会有新的人员  $i$  ( $i = j$ ) 到达现场。人员  $i$  的类型 (高技能或低技能) 由随机过程决定, 具体由社会中高技能救援者的比例  $\gamma$  控制。每个救援者在到达现场后都有两个可选状态: {救援, 不救援}。已经到场的人员到场后在每个时间段内可以选择参与或退出救援, 但决策只能在时间段开始时做出。到场人员如果在时间段  $t_j$  选择参与救援则称之为救援人员。这一设定反映了救援过程中决策的实时性和连续性。在是否参与救援的决策中, 救援效用  $U$  和成本  $C$  是衡量救援行动成效的两个关键指标。

## 1) 效用 $U$ 的定义

时间函数  $f_H(t_j)$  和  $f_L(t_j)$  描述了紧急情况下救援效用随时间的变化，因而反映了救援的时效性在灾难应对中的重要性。通常，救援行动的效用在灾难发生后的最初几个小时内最高，这一阶段的迅速响应对于降低死亡率和减少损失至关重要。因此，本文模型将时间函数定义为以关键时刻  $t_s$  为对称中心的向两侧递减函数，即：

$$\text{对于高技能: } f_H(t_j) = e^{-\omega_H |t_j - t_s|}$$

$$\text{对于低技能: } f_L(t_j) = e^{-\omega_L |t_j - t_s|}$$

在这个函数中，关键时刻  $t_s$  代表了救援行动的决定性时刻，也是救援的最优时间窗口，越接近这一时刻，救援的效用就越高。而参数  $\omega_H$  和  $\omega_L$  的值决定了效用随时间的衰减速度，衡量了时间紧迫性对高技能和低技能救援者的不同影响。时间函数不仅有效刻画救援过程中的时间敏感性，还为紧急情况下的资源分配与调度提供了理论依据。

在本模型中，边际效用函数  $MU_{Hj}$  和  $MU_{Lj}$ （统称为  $MU_j$ ）体现经济学中的边际效用概念，可以反映在增加一个单位时间的资源使用或投入时所带来的额外效用，同时也考虑了合作效应和边际效用递减现象。在紧急救援场景中，边际效用代表每位救援者在救援过程中的贡献，随着参与救援的人员增加，每个新增救援者的边际效用会逐渐减少。高技能和低技能救援者的边际效用函数分别表示为：

$$\text{对于高技能: } MU_{Hj} = \frac{f_H(t_j)}{\ln(a_H H_j + b_H)} + \tau H_j * L_j$$

$$\text{对于低技能: } MU_{Lj} = \frac{f_L(t_j)}{\ln(a_L L_j + b_L)} + \tau H_j * L_j$$

在公式中，自然对数函数  $\ln(x)$  被引入以处理参与人数的影响。自然对数的递减特性意味着，在第  $j$  时刻，随着两种技能的人员分别参与救援的人数 ( $H_j$  或  $L_j$ ) 的增加，每新增一位救援者对整体效用的边际贡献会逐渐减少。这种处理方式有效地反映了模型的基本假设在实际救援场景中，人员的边际效用随着救援队伍规模的扩大而递减的现象。同时，参数  $a_H$  和  $a_L$  分别代表了不同技能水平救援者在整体效用中的相对权重，以量化不同类型的救援者对救援行动的重要性。偏移参数  $b_H$  和  $b_L$  则反映在无救援者参与时灾难自动恢复的基本效应。

此外，公式中的合作互补性项  $\tau H_j * L_j$  捕捉了高技能和低技能救援者之间的协同效应。当两类救援者共同参与时，由于技能的互补性，他们的合作可以显著提高整体救援效用。在模型中，每个到场人员  $i$  在整个救援过程中的总效用  $\sum_{j=1}^{total} MU_j \cdot I_{i,j}$  是其在各个时间段  $t_j$  内参与救援所产生的效用的累积，反映时间维度上救援效果的累积性。将各时段所有到场人员的救援效用相加，得到整个紧急事件的救援总效用  $U$ ，反映人员维度上救援效果的累积性，为评估救援行动的整体效率提供了量化依据，即：

$$U = \sum_{i=1} \sum_{j=1}^{total} MU_j \cdot I_{i,j}$$

其中,  $I_{i,j}$  为指示函数。在第  $j$  时刻, 如果救援者  $i$  参与了救援,  $I_{i,j} = 1$ ; 如果救援者  $i$  没有参与救援,  $I_{i,j} = 0$ 。

## 2) 成本 $C$ 的定义

边际成本是指每个额外救援者在参与救援过程中所产生的额外成本, 包括人力、物力等方面的开销。在本文中, 边际成本衡量了救援者因为救援对个人的经济或时间损失以及该人员可以接触到的救援资源对以上损失的弥补。在成本分析中, 为了简化模型计算, 本文假设所有人员在每个时间段  $t_j$  内的参与成本  $MC_i$  是不随时间段变化的。个体在一个时间段成本的大小涵盖了救援过程中消耗的时间所带来的机会成本以及社会急救资源的丰富程度的考量, 使得模型能够更直接地分析救援行为的经济性。然而, 个体救援者的实际消耗成本会因其个人因素以及救援资源分配因素的差异而有所不同。为了更精确地描述这些个体差异, 模型中引入了正态分布来表示个体成本的分布情况:

$$MC_i \sim N(\mu, \sigma^2)$$

在此,  $\mu$  表示所有救援人员的平均成本, 即在缺乏其他信息时, 对每个救援者成本的预期平均值;  $\sigma^2$  表示个体成本的方差, 用以刻画不同救援者之间的成本差异性。通过使用正态分布, 模型不仅捕捉了个体成本的随机性, 也为个体之间的成本差异的衡量提供了依据, 从而更贴近实际救援场景中不同救援者的经济行为对整体救援成本的影响。

类似于救援总效用  $U$  的计算方法, 单个救援者在整个救援过程中的总成本可以表示为其在各个时间段  $t_j$  内参与救援的成本之和。同样地, 整个紧急情况的总成本  $C$  则为所有救援人员在整个救援过程中边际成本的总和, 具体计算方法为:

$$C = \sum_{i=1}^{total} \sum_{j=1}^{total} MC_i \cdot I_{i,j}$$

其中,  $I_{i,j}$  为指示函数。在第  $j$  时刻, 如果救援者  $i$  参与了救援,  $I_{i,j} = 1$ ; 如果救援者  $i$  没有参与救援,  $I_{i,j} = 0$ 。

## 4.2 模型评价指标的设计

在紧急救援的模型设计中, 评估模型的救援的质量至关重要。为此, 本文引入了一个综合指标  $Q$ , 该指标结合了效益成本比 (Benefit-Cost Ratio,  $BCR$ ) 与平均参与度 (Average Participation Rate,  $AP$ ), 从而全面衡量救援行动的整体表现。以下是对各个指标的详细定义和设计过程。

首先, 本文定义效益成本比 ( $BCR$ ), 这是衡量救援行动经济效益的关键指标。 $BCR$  反映了每单位成本带来的收益,  $BCR$  值越高, 意味着在相同的资源投入下, 救援行动所产生的效益越大。因此,  $BCR$  是评价救援经济性的重要指标, 被定义为救援总收益 ( $U$ ) 与救援总成本 ( $C$ ) 的比值:

$$BCR = \frac{U}{C}$$

在评估救援质量时, 平均参与度 ( $AP$ ) 是另一个关键因素。定义  $R_j$  为即时参与度,

即时参与度衡量的是在第  $j$  时段内实际参与救援的人员比例，即实际参与救援的人数与到达救援现场（有潜力参与救援）的人数之间的比例，第  $j$  时段的参与度定义为：

$$R_j = \frac{H_j + L_j}{D_{H_j} + D_{L_j}}$$

其中， $H_j$  和  $L_j$  分别表示在第  $j$  时段选择参与救援的高技能救援者和低技能救援者人数。 $D_{H_j}$  和  $D_{L_j}$  分别表示在第  $j$  时段内已经到达现场的高技能救援者和低技能救援者的人数。从社会期望以及实际救援效果的考虑，较高的参与度意味着更多的可用人力资源被有效利用，这通常是救援行动成功的一个重要前提。

为了综合衡量整个救援过程中的参与情况，本文进一步定义了每个时段的平均参与度（Average Participation Rate,  $AP$ ）：

$$AP = \frac{\sum_{j=1}^{total} R_j}{total}$$

其中， $total$  表示救援过程的总时段， $\sum_{j=1}^{total} R_j$  表示在所有时段内的参与度之和。 $AP$  表示在整个救援过程中，参与度的平均水平。一个较高的  $AP$  值意味着在整个救援过程中，资源被持续且有效地利用。

最后，为了全面评估救援行动的质量，本文引入了救援质量综合指标  $Q$ ，它结合了效益成本比 ( $BCR$ ) 和平均参与度 ( $AP$ )：

$$Q = BCR * AP$$

通过将  $BCR$  与  $AP$  相乘，指标  $Q$  不仅考虑了救援的经济性，还综合反映了整个救援过程中的平均参与度。经济上，提高效益成本比 ( $BCR$ ) 意味着在资源有限的情况下，通过优化配置来实现更大的社会效益，从而使得资源投入获得更高回报。这不仅符合成本效益分析的要求，也是救援资源投入可持续性的关键。另一方面，平均参与度 ( $AP$ ) 反映了社会道德期望下的公共参与和支持度。在紧急救援，社会道德期望推动更多人积极参与，提升集体责任感和贡献度。这种积极的参与和配合不仅符合社会的道德标准，也增强了救援的正面社会效应。因此，在经济和社会期望的双重驱动下，通过优化  $BCR$  和提升  $AP$  来实现更高的总体效果  $Q$ ，能够满足社会的资源效用期望，也更符合公众对救援的积极参与的道德需求。因此， $Q$  值越大，意味着救援行动在经济效益和资源利用效率两方面均表现优异，是一个较为全面的救援质量评估指标。

### 4.3 子模型一：基于完全信息的群体总效益成本决策模型

基于前文中的模型综述，子模型一旨在探究在多时间段的动态环境中，高低技能群体分别如何根据整个群体当前和历史的效用与成本动态调整本群体的救援参与比例。模型的核心思想是利用更新公式分别更新不同时间段  $t_j$  的高技能群体、低技能群体的参与比例  $xH_j$  和  $xL_j$ ，以优化集体救援的总效用。在模型中， $xH_j$  和  $xL_j$  分别表示在第  $j$  个时间段内选择参与救援的高技能到达者在所有高技能到达者中的占比以及选择参与救援的低技能到达者在所有低技能到达者中的占比，取值范围在 0 到 1 之间，用以表示参与该策略的个体数量相对于总参与者数量的比例。通过这种比例的不断调整，模型能够有

效地分配不同技能水平的救援资源，实现在不同时段内实现救援效果的最大化。具体比例更新方式如下。

在每一个时刻  $j$ ，对于参与比例  $xH_j$  和  $xL_j$ ，模型从高技能到达者总数  $D_{H_j}$  和低技能到达者总数  $D_{L_j}$  中分别选择救援边际成本  $MC_i$  最小的  $H_j$  和  $L_j$  数量的参与者，以优化参与的救援决策。其中  $H_j$  和  $L_j$  为该群体参与比例与到达人数的乘积：

$$\text{对于高技能群体: } H_j = xH_j * D_{H_j}$$

$$\text{对于低技能群体: } L_j = xL_j * D_{L_j}$$

首先，需要计算效用与成本的变化比值，该比值用于衡量当前时间段相较于前一时段的效用与成本的相对变化。如果当前时间段的效用增长大于成本增长，那么比值将大于 1，表明当前策略具有较高的收益，并且参与该策略的比例应当增加。具体计算公式如下：

$$\text{对于高技能群体: } \frac{U_H(H_j) - C(H_j)}{U_H(H_{j-1}) - C(H_{j-1})} - 1$$

$$\text{对于低技能群体: } \frac{U_L(L_j) - C(L_j)}{U_L(L_{j-1}) - C(L_{j-1})} - 1$$

以高技能群体为例， $U_H(H_j)$  和  $C(H_j)$  被定义为第  $j$  时刻的高技能群体内所有人的救援边际效用和救援边际成本的函数，它们取决于此时段内选择了成本  $MC_i$  最小的高技能救援者  $H_j$  的参与人数。对于低技能人群以及第  $j-1$  时刻的情形，效用和成本函数则类似地依赖于时段内选定的低技能救援者的参与数量  $L_j$  以及  $L_{j-1}$ 。这项比值中的表示当前时间段相对于上一时间段的净效用变化，即效用的相对优势或劣势。这个差值越大，意味着策略的净收益优势越明显，策略比例的变化速度越快，从而更迅速地增加或减少参与比例。这种机制不仅决定了策略调整的方向（增加或减少），还决定了调整的力度和速度。通过这个计算过程，可以得出救援比例策略的变化方向和幅度，为进一步优化模型中高技能和低技能救援者的参与比例提供依据。

接着，计算救援比例策略的变化。该变化量通过比较当前时间段与前一时间段的参与比例来确定。若第  $j$  时刻参与比例大于上一时刻，此项大于 0；若第  $j$  时刻参与比例小于上一时刻，此项小于 0：

$$\text{对于高技能群体: } \frac{xH_j}{xH_{j-1}} - 1$$

$$\text{对于低技能群体: } \frac{xL_j}{xL_{j-1}} - 1$$

结合以上的变化比值以及比例策略变化并将其相乘，模型引入了以下比例更新动态方程：

$$\text{对于高技能群体: } xH'_j = \left( \frac{U_H(H_j) - C(H_j)}{U_H(H_{j-1}) - C(H_{j-1})} - 1 \right) * \left( \frac{xH_j}{xH_{j-1}} - 1 \right)$$

$$\text{对于低技能群体: } xL'_j = \left( \frac{U_L(L_j) - C(L_j)}{U_L(L_{j-1}) - C(L_{j-1})} - 1 \right) * \left( \frac{xL_j}{xL_{j-1}} - 1 \right)$$

在上述方程中,  $xH'_j$  和  $xL'_j$  分别表示高技能和低技能救援者在时间段  $t_j$  的参与比例变化率。这些变化率基于当前时间段和前一时间段的净效用变化以及参与比例的变化来计算。净效用的相对变化不仅决定了策略调整的幅度, 还影响了参与比例的变化方向和力度。当效用的优势显著时, 参与该策略的个体数量将会迅速增加, 从而加速资源的优化配置; 而在效用劣势显著的情况下, 参与比例将大幅减少, 以避免资源浪费在低效策略上。在获得比例变化率  $xH'_j$  和  $xL'_j$  后, 可以通过以下公式求出新时刻  $j+1$  的参与比率  $xH_{j+1}$  和  $xL_{j+1}$ :

$$\text{对于高技能群体: } xH_{j+1} = xH_j * (1 + xH'_j)$$

$$\text{对于低技能群体: } xL_{j+1} = xL_j * (1 + xL'_j)$$

通过这种基于动态方程的参与比例更新机制, 模型能够有效地调节不同技能水平救援者的参与比例, 从而在每个时间段内实现救援资源的最优分配, 最终提升整体救援效率。子模型一的这种机制确保了模型在多时间段动态环境中的适应性和效率, 隐含了决策过程中的自我强化效应, 朝着效果更好比例的方向增大或减小现有比例。随着一个策略的效用增加, 更多的个体或群体成员会选择该策略, 这进一步提高了策略的应用频率。这种正反馈机制意味着成功的策略会自我强化, 形成一个良性循环。同样的, 效用较低的比例策略会被逐渐放弃, 从而加速其退出群体的决策过程。

#### 4.4 子模型二: 基于完全信息的个体边际效益成本决策模型

子模型一将群体作为决策的单位, 重点分析了整体救援队伍在不同时间段的参与比例调整。然而, 子模型一的决策方式无法反映个体救援者在面对动态环境时的实际决策过程。因此, 为了更加贴近现实并比较不同的决策方式, 子模型二采用了个体作为分析单位, 重点探讨每个救援者如何在面对不同救援时机和效益成本时作出决策。这种基于个体的决策模型能够更细致地模拟每个救援者在不同时间段内的行为变化, 从而更准确地捕捉个体决策对整体救援效果的影响。

在子模型二中, 到达现场的人员的决策过程基于边际效用 ( $MU_j$ ) 与边际成本 ( $MC_i$ ) 的比较。在实际的救援场景中, 参与者无法在瞬时准确观察到同一时间段内其他救援人员的参与情况, 而是只能观测到在自己之前的人员做出的决策。因此, 在模型的构建和计算过程中, 为了便于建模与更贴近现实, 效用函数  $MU_j$  的计算并非基于当前时间段  $t_j$  的实时参与人数  $H_j$  和  $L_j$ , 而是依赖于前一时间段  $t_{j-1}$  的实际参与人数  $H_{j-1}$  和  $L_{j-1}$ 。此设定反映了现实中的信息滞后性, 即救援人员在做出决策时只能基于之前获得的信息和观察结果, 从而导致他们的决策并不完全反映当前的现场状况:

1. 在  $t_j$  时刻加入救援: 如果在时间  $t_j$ , 个体的边际效用  $MU_j$  大于其边际成本  $MC_i$ , 即  $MU_j > MC_i$ , 则该救援者选择参与救援。
2. 在  $t_j$  时刻维持当前状态: 如果在时间  $t_j$ , 个体的边际效用  $MU_j$  等于其边际成本  $MC_i$ , 即  $MU_j = MC_i$ , 救援者将维持前一时刻的状态不变, 即继续参与或继续不参与。
3. 在  $t_j$  时刻不参与救援: 如果在时间  $t_j$ , 个体的边际效用  $MU_j$  小于其边际成本  $MC_i$ , 即  $MU_j < MC_i$ , 则该救援者选择不参与救援行动。

子模型二在救援决策过程中引入了个体层面的决策分析, 与子模型一将群体作为决策单位不同, 更加关注个体到达者在面对动态环境时的具体行为和决策方式。子模型二通过比较个体边际效用 ( $MU_j$ ) 与边际成本 ( $MC_i$ ) 的大小, 模拟了每个救援者在不同时间段内如何做出是否参与救援的决策。这一模型反映了救援者在信息完全的情境下所进行的决策过程, 并能够更细致地捕捉个体层面的行为变化及其对整体救援效果的影响。

#### 4.5 子模型三: 基于完全信息的个体边际效益成本决策模型

在进一步深入分析个体决策的基础上, 本文引入了子模型三, 以应对现实中救援者面临的信息不对称和不确定性问题。子模型二已经通过个体边际效用与边际成本的比较, 探讨了个体救援者在不同时间段内的决策行为, 但救援者在其中被假设拥有完全信息。在本文的救援者决策模型中, “具有完全信息”指的是每个救援者在决策过程中能够准确地掌握所有与救援相关的重要参数。考虑一个发生的重大灾害, 对于参与救援的救援者而言, “具有完全信息”意味着:

1. 完全掌握灾害的关键时刻 ( $t_s$ ): 救援者清楚地知道灾害发生后的黄金救援时间窗口, 即在何时救援的效果最大化。
2. 完全掌握技能水平和贡献度 ( $a_H, a_L$  和  $b_H, b_L$ ): 每个救援者了解自己的专业技能在当前救援任务中的作用, 并且知道这些技能在整体救援效果中平均化的重要性。同时, 他们也会利用这些参数对救援效用进行计算与评估。

然而, 在实际紧急救援场景中, 救援者往往无法获得所有必要的准确信息, 这使得他们的决策过程变得更加复杂和充满不确定性。因此, 子模型三进一步扩展了子模型二, 通过引入不完全信息的假设, 模拟了救援者在信息不对称情况下的决策行为。在子模型三中, 救援者不具备完全的信息, 即他们无法确切知道关键阈值点  $t_s$ 、参数  $a$  (高技能者为  $a_H$ , 低技能者为  $a_L$ ) 和  $b$  (高技能者为  $b_H$ , 低技能者为  $b_L$ ) 的真实值。这种不完全信息的假设反映了现实紧急救援场景中, 救援者在决策过程中面临的信息不对称。当救援者  $i$  到达现场时, 由于缺乏完全信息, 他们会根据随机生成的信念阈值  $t_{s_i}$ 、 $a_i$  和  $b_i$  来进行决策。信念阈值服从正态分布  $t_{s_i} \sim N(t_s, \sigma_2^2)$ , 而  $a_i$  和  $b_i$  的初始信念值也分别服从  $a_i \sim N(a, \sigma_2^2)$  和  $b_i \sim N(b, \sigma_2^2)$ 。这种假设为模拟救援者在不确定条件下如何调整其策略提供了基础, 进一步加强了模型对现实复杂救援场景的描述能力。

在每个时间段  $t_j$ , 救援者  $i$  根据当前的信念值  $t_{s_i}$ 、 $a_i$  和  $b_i$ , 计算其预期边际效用, 并将该预期效用与边际成本  $MC_i$  进行比较, 从而决定是否参与救援。若救援者在该时段选择参与救援, 则在时段结束时, 他将实际获得一个真实的边际效用  $MU_k$ 。这一真实值提供了救援者对其信念的一种校正依据。

在子模型三中，为了反映救援者随着时间推移对救援过程的逐渐了解，设定了信念更新机制。对于人员  $i$ ，在此次紧急情况中参与的所有救援 ( $N$ 次) 按时间顺序编号为  $k \in [1, 2, 3, \dots, N]$ 。通过对当前观测到的真实边际效用与信念之间的差异进行分析，救援者能够在下一时间段中调整其信念值，从而更加接近实际情况。对于人员  $i$ ，信念更新的具体公式如表 2：

表 2-子模型三信念值更新公式

	$t_{s_i}$	$a_i$	$b_i$
信念值更新 [1]	$t_{s_i}(k+1) = \frac{\theta_{t_{s_i}}(k)^{-2}t_{s_i}(k) + \theta_{MU_k}^{-2}t_{sg}}{\theta_{t_{s_i}}(k)^{-2} + \theta_{MU_k}^{-2}}$	$a_i(k+1) = \frac{\theta_{a_i}(k)^{-2}a_i(k) + \theta_{MU_k}^{-2}a_g}{\theta_{a_i}(k)^{-2} + \theta_{MU_k}^{-2}}$	$b_i(k+1) = \frac{\theta_{b_i}(k)^{-2}b_i(k) + \theta_{MU_k}^{-2}b_g}{\theta_{b_i}(k)^{-2} + \theta_{MU_k}^{-2}}$
方差 [2]	$\theta_{t_{s_i}}(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t_{s_i}(k) - AVRt_{s_i})^2$	$\theta_{a_i}(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (a_i(k) - AVRa_i)^2$	$\theta_{b_i}(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (b_i(k) - AVRb_i)^2$

其中：

- $\theta_{MU_k}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (MU_k - AVR MU)^2$

这个公式用于计算在第  $j$  时间段内，参与者的在参与救援的时间段中真实边际效用的方差。方差衡量了数据的离散程度，即这些救援者的实际效用值与其平均值之间的差异。

- $AVR MU$ ,  $AVR t_{s_i}$ ,  $AVR a_i$  以及  $AVR b_i$  分别表示人员  $i$  在紧急救援中获得过的真实的  $MU_k$  值以及信念  $t_{s_i}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  的平均值, 随着  $k$  的增大进行变化，以衡量其不稳定性的变化。

- $t_{sg}$ 、 $a_g$  和  $b_g$  是通过结合当前观测到的边际效用  $MU_k$  和救援者当前时刻的信念值  $t_{s_i}(k)$ 、 $a_i(k)$  以及  $b_i(k)$  进行估计的。这些估计值代表救援者对关键参数  $t_s$ 、 $a$  和  $b$  的最新预测，分别地：

$t_{sg}$  为基于当前观测到的真实边际效用  $MU_k$  以及当前信念  $t_{s_i}(k)$  对参数  $t_s$  的估计值。

$a_g$  为基于当前观测到的真实边际效用  $MU_k$  以及当前信念  $a_i(k)$  对参数  $a$  的估计值。

$b_g$  为基于当前观测到的真实边际效用  $MU_k$  以及当前信念  $b_i(k)$  对参数  $b$  的估计值。

- 信念值更新 [1] 的公式表示，在每一个选择救援的时间段  $k$ ，救援者根据其在本时间段的信念值和当前时段的观测值  $MU_k$ ，进行信念更新。在简化模型时，为了降低计算复杂性，本模型省略了边缘概率  $P(x)$  的计算，直接使用方差的倒数  $\theta_{t_{s_i}}(k)^{-2}$  (或

$\theta_{a_i}(k)^{-2}$ ,  $\theta_{b_i}(k)^{-2}$ ) 和  $\theta_{MU_k}^{-2}$  加权平均。较小的方差反映了较高的估计可信度，因此

在更新过程中获得更大的权重，而较大的方差则表示较高的不确定性，相应的权重较小。通过这种方法，救援者能够根据不断更新的信念，在不确定性中逐渐优化其决策。此外，模型中使用的效用函数  $MU_{H_j}$  和  $MU_{L_j}$  直接计算随着时间变化的救

援效用，已经隐含了对关键参数的假设。

5. 方差[2]的公式中方差的  $\theta_{ts_i}(k)^2$ ， $\theta_{a_i}(k)^2$ ， $\theta_{b_i}(k)^2$  和  $\theta_{MU_k}^2$  分别表示对信念值  $t_{s_i}$ ， $a_i$ ， $b_i$  和真实值  $MU_k$  的不确定性。这种不确定衡量了参与者对数据的信任程度。

这种建模方式充分考虑了救援者在不完全信息下的决策过程，反映了现实中的救援场景。通过将信念更新引入模型，救援者能够在不断获取新信息的过程中修正其决策依据，从而在不确定的环境中提高决策的有效性。该模型不仅能够捕捉到个体在救援过程中的动态决策行为，还能够模拟信息不对称对救援效率的影响，提供了对紧急救援情境下个体行为的更为深刻理解。

## 五、子模型的对比分析与试验

### 5.1 仿真模拟实验方法

为了更好地展现紧急情况救援中不同社会条件对救援效果的影响，本文对采用了基于多智能体建模 (Agent-Based Modeling, ABM) 的仿真模拟方法，观察救援系统中的涌现行为。多智能体建模是一种模拟方法，通过用 Python 程序定义多个自主“代理”及其行为规则，来研究复杂系统中的涌现行为。这些代理在动态环境中相互作用，从而揭示出系统整体的特性和模式。ABM 仿真可以揭示在不同初始条件和参数设置下，救援系统可能出现的行动模式和整体行为特征，从而为理解和优化紧急救援过程提供了重要的洞察。仿真模拟的步骤如下：

1. **初始化参数和变量：**首先，定义总时间段数  $total$  以及其他相关参数；并初始化每个时间段内到达以及参与救援的人数。
2. **增加到场人员：**从初始时刻  $t_0$  开始，在每个时间段  $t_j$ ，根据社会中高技能和低技能救援者的比例  $\gamma$ ，模拟新的人员到达现场。
3. **模拟群体或个体决策：**在不同子模型中，到场的群体或个体依据不同的决策方式来选择加入救援或退出救援，并随着轮次进行迭代。同时，根据设定的公式，计算每个时间段的救援总效果  $U$ 、救援总成本  $C$  以及救援效果指标  $Q$ 。

后文首先通过分析三个子模型的三种决策方式带来的救援效果差异来选出最具综合优势的救援决策模型。接着，在试验中，一些关键参数的值被进行了修改来观察这些有现实意义的参数对救援效果的影响。由于模拟过程具有随机性，本部分对每种情境进行了 1000 次仿真，以确保结果的可靠性，并对仿真结果取平均值进行分析。

### 5.2 子模型分析：三种决策方式的救援效果差异

在紧急救援场景下，不同子模型中不同的决策方式对救援效果的评估存在显著差异。为了深入理解各模型在不同条件下的表现，本节在控制子模型参数相同的前提下对三个子模型的救援质量指标  $Q$  进行了对比分析。通过这种对比可以直观地看到不同模型在救援效果上的优劣，进一步探讨其适用性与局限性，不仅有助于评估各模型在理论上的表现，还能为实际救援决策提供参考依据。表 3 展示了三个子模型的平均救援质量指标  $Q$

值对比情况。

表 3-子模型救援效果 $Q$ 对比

子模型一	子模型二	子模型三
$4.29 \times 10$	$3.25 \times 10^4$	$1.9 \times 10^4$

子模型一的救援效果  $Q$  显著低于另外两个模型，即整体救援效果较差。现实中，这种模型对应着统一指挥、集中决策的救援方式，缺乏灵活性和对个体能力的有效利用，类似于计划经济的集中管理结构。在这种结构中，资源的分配由单独机构决定，忽视了个体的能力差异和环境的复杂性。这种做法往往导致资源配置效率低下，难以适应快速变化的需求，使得子模型一的问题与计划经济下难以快速响应市场变化的局限性相似。

子模型二的救援效果  $Q$  数值最高，表明了在这种决策模式下，整体救援效果最优。子模型二代表了一种更具灵活性和个体化的决策方式，涉及到个体决策的动态调整。这可以类比为市场经济中的分布式决策机制。在市场经济中，个体（如企业或个人）根据自己的能力和信息进行决策，类似于市场经济中通过价格机制和个体行为实现资源的最优配置和经济效益最大化。它展示了在复杂环境中，个体自主决策如何显著提高整体效用。在现实中，这种模型对应于赋予救援者更多自主权的救援方式，使得高技能救援者能够最大限度地发挥作用，从而显著提升整体救援效果。这种方法可以实现更高效的资源利用和应急响应。

子模型三的救援效果  $Q$  介于子模型一和子模型二之间，表明其救援效果中等。它反映出它对应于信息不完全的自由市场模式。这种情况下，市场仍然依赖个体自主决策，但个体面临的信息并不完整，无法完全掌握市场情况，导致决策的有效性和资源配置的效率受到一定的限制。在现实中，这种模型可能对应于在资源有限或信息不完全的情况下进行的救援行动。虽然效果不如子模型二，但比子模型一更能适应现实中的不确定性和复杂性。

子模型二在对比分析中展现出显著的优势，主要体现在其对个体行为的细致刻画以及信息完全性。相比子模型一，子模型二更加贴近现实环境，能够动态捕捉救援者在不同情境下的决策变化，并通过个体化决策机制实现资源的高效分配与利用。这种对个体差异的敏感处理，使得子模型二在复杂且多变的救援场景中表现出更强的适应能力。与子模型三相比，子模型二则凭借更充分的信息流动和更优化的个体决策分析，进一步提升了整体救援效用：能够应对信息不完全的挑战，避免了因信息不足而产生的效率损失。

无论是在处理集中决策不足、应对复杂环境，还是在面对信息不完全时，子模型二凭借其独特的适应性和精细化的决策处理，成为三者中最具综合优势、效果最优的救援决策模型。因此，后续试验中将基于子模型二作为关键参数调整的基准模型，以确保救援资源的最优配置和应急响应的高效性。

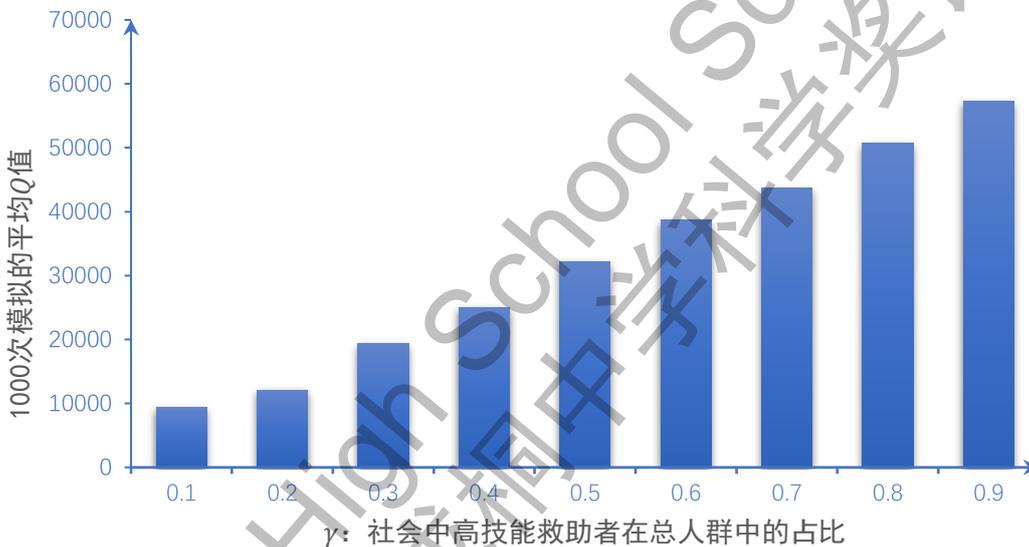
### 5.3 试验一：社会中高技能人群在总人群中的占比对救援效果的影响

试验一基于子模型二的决策方式，通过调整社会中高技能救援者在总人群中的占比  $\gamma$  来分析其对整体救援质量的影响。在模型中， $\gamma$  代表在每个时间段内到达救援现场的高技能救援者的比例。随着  $\gamma$  的增加，高技能救援者在救援队伍中的数量也随之增加。这一变化能够直接影响救援过程中的决策、协同效应以及最终的救援效果。为了定量评估这一影响，本试验通过多次仿真模拟，控制其它参数不变，观察在不同  $\gamma$  值下，救援质量指标  $Q$  的变化情况，从而得出高技能救援者的占比对救援整体成效的关键性作用。试验数据如表 4 所示：

表 4-不同高技能救助者比例对平均 Q 值的影响

$\gamma$ 的取值	1000 次模拟的平均 Q 值
0.1	$9.40 \times 10^3$
0.2	$1.21 \times 10^4$
0.3	$1.93 \times 10^4$
0.4	$2.50 \times 10^4$
0.5	$3.22 \times 10^4$
0.6	$3.87 \times 10^4$
0.7	$4.37 \times 10^4$
0.8	$5.07 \times 10^4$
0.9	$5.73 \times 10^4$

图 1-不同高技能救助者比例对平均 Q 值的影响



仿真结果显示,随着  $\gamma$  的取值增加,综合救援质量指标  $Q$  呈现出明显的上升趋势,表明高技能救援者在提升救援效率和效果方面具有重要的推动作用。当  $\gamma$  较小时,低技能救援者占主导地位,因此整体救援效率相对较低;然而,随着  $\gamma$  的逐步增加,高技能救援者的贡献逐渐体现,使得  $Q$  值显著提高。这种趋势表明,在紧急救援中,高技能救援者不仅能有效提高救援效果,还能够大幅度提升整体的救援效率。仿真结果进一步支持了在救援资源配置时,应适当增加高技能救援者比例,以优化救援效能的策略。这一结果体现了高技能救援者在救援任务中的关键作用,为优化紧急救援资源配置和提升救援效率提供了重要的理论依据。基于此,本文提出以下政策建议,以进一步提高紧急救援能力并最大化救援效用:

- 加强高技能救援者的培训与储备:** 政府和相关机构应加大对救援人员的培训投入,提高现有救援人员的技能水平。通过定期培训和实战演练,增加社会中高技能救援者的比例  $\gamma$ ,以确保在紧急事件中能够迅速调动具有专业技能的救援力量,提高救援质量。
- 提高调度效率:** 在制定紧急救援计划时,应优先考虑调动高技能救援者。为此,应建立完善的救援资源调度机制,使得高技能救援者能够在灾难发生的关键阶段迅速

集结并投入行动，从而最大化救援效用。

- 建立区域化与社区救援队伍：**建议建立更多由高技能救援者组成专业化的救援队伍，尤其是在高风险地区或易受灾害影响的区域，具备快速响应能力，以确保在紧急情况下能够有效发挥作用。在社区内建立社区自救队伍网络，以便居民在灾害初期自发组织救援。

#### 5.4 试验二：社会中个体救援边际成本均值对救援效果的影响

在前文中，模型中引入了正态分布来表示个体成本的分布情况：

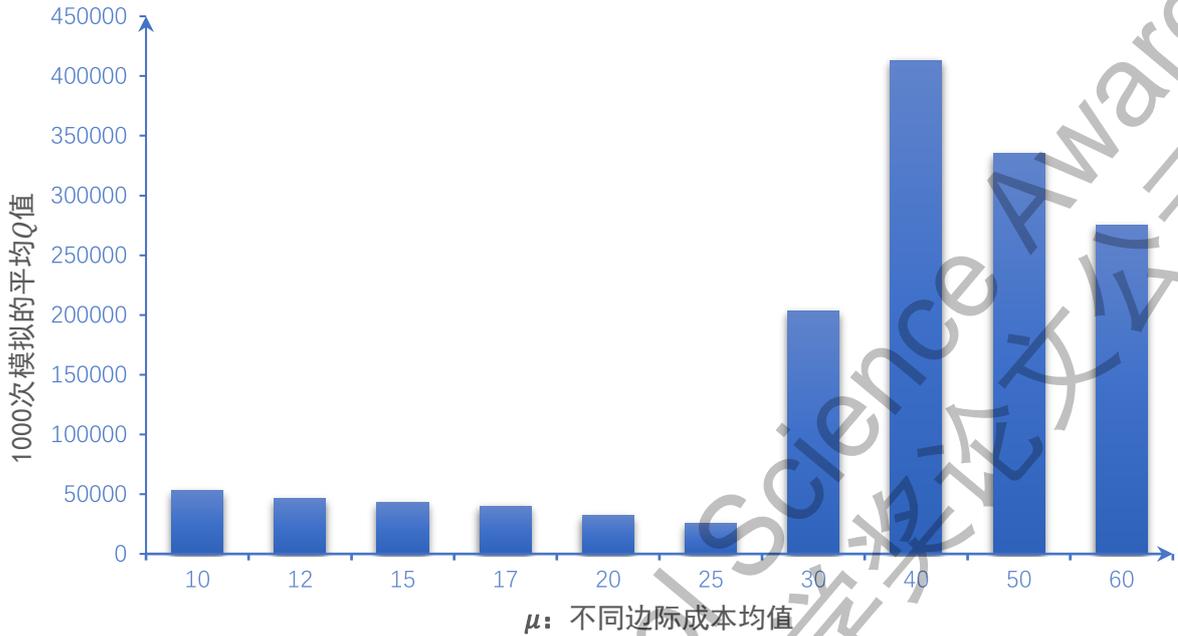
$$MC_i \sim N(\mu, \sigma^2)$$

社会中的个体救援边际成本  $MC_i$  的均值  $\mu$  为个体救援的人力物力等方面的开销，主要反映了个体救援的时间以及经济损失以及可以抵消这一损失的社会物质救援资源的丰富程度。物质资源越丰富，个体所需的花销越低，从而使救援成本相应降低。基于以上分析，本文将通过调整个体救援边际成本的相关参数，模拟不同社会生产力水平和资源分配状况对整体救援效果的影响。基于这一系列实验研究，本文能够深入探讨在不同条件下救援决策的变化，并为优化救援策略和政策提供科学依据。试验数据如表5所示：

表 5-不同边际成本均值  $\mu$  对平均 Q 值的影响

$\mu$ 的取值	1000 次模拟的平均Q值
10	$5.27 \times 10^4$
12	$4.62 \times 10^4$
15	$4.29 \times 10^4$
17	$4.00 \times 10^4$
20	$3.21 \times 10^4$
25	$2.54 \times 10^4$
30	$2.03 \times 10^5$
40	$4.13 \times 10^5$
50	$3.35 \times 10^5$
60	$2.75 \times 10^5$

图 2-不同边际成本均值 $\mu$ 对平均 Q 值的影响



从数据表中可见，随着救援边际成本均值  $\mu$  的增加，平均  $Q$  值呈现出先减小后增大再减小的趋势。起初的下降可归因于在高低技能救援者参与救援的比例不变的情况下，较高的成本导致救援参与度减少。然而，当成本增加到一定程度时， $Q$  值意外上升，表明适度提升救援成本能够促进资源的更合理配置，避免低成本导致的资源浪费和配置低效。在这种情况下，救援者可能会更加谨慎地评估救援的成本与效用，从而使得效率更高的救援者倾向于参与，提升了整体救援资源的使用效率。仿真模拟中关于平均参与率  $AP$  值的数据对此进行了验证，随着  $\mu$  的增大，平均  $AP$  减小，即在平均  $Q$  值增大的情况下，参与率的下降体现效益成本比 ( $BCR$ ) 的上升。

然而，当救援成本过高（例如  $\mu = 60$  时），数据显示平均  $Q$  值再次下降。一个可能的解释为尽管保留下来的救援者大多具有较高的效益成本比 ( $BCR$ )，但他们因成本压力过大而选择退出救援行动，导致救援参与度显著下降。尽管资源利用效率有所提升，但由于参与者数量减少，整体救援质量亦随之降低。

因此，社会在救援资源配置上需要在提高资源利用效率和降低救援成本之间取得平衡，以防止资源的滥用并保持救援质量。这一发现为政策制定者在规划紧急救援资源分配时提供了重要的理论依据。基于以上分析，提出以下建议：

- 控制救援成本：**在制定救援计划和政策时应控制救援成本在合理和可承受的范围内，增加社会救援资源的丰富程度，减轻人力资源负担，以保持救援人员的参与积极性。
- 加强资源匮乏地区经济支持：**在经济条件较差的地区，政府应加强对救援行动的财政支持，减轻救援者的经济负担，以确保救援行动的有效性，不因经济因素而受阻。
- 监督与平衡资源使用：**应对救援资源进行适当监督，防止个人或组织滥用，保证其利用的有效性，平衡财政支出与救援资源使用，以提高资源使用效率。

### 5.5 试验三：社会中个体救援成本的离散程度对救援效果的影响

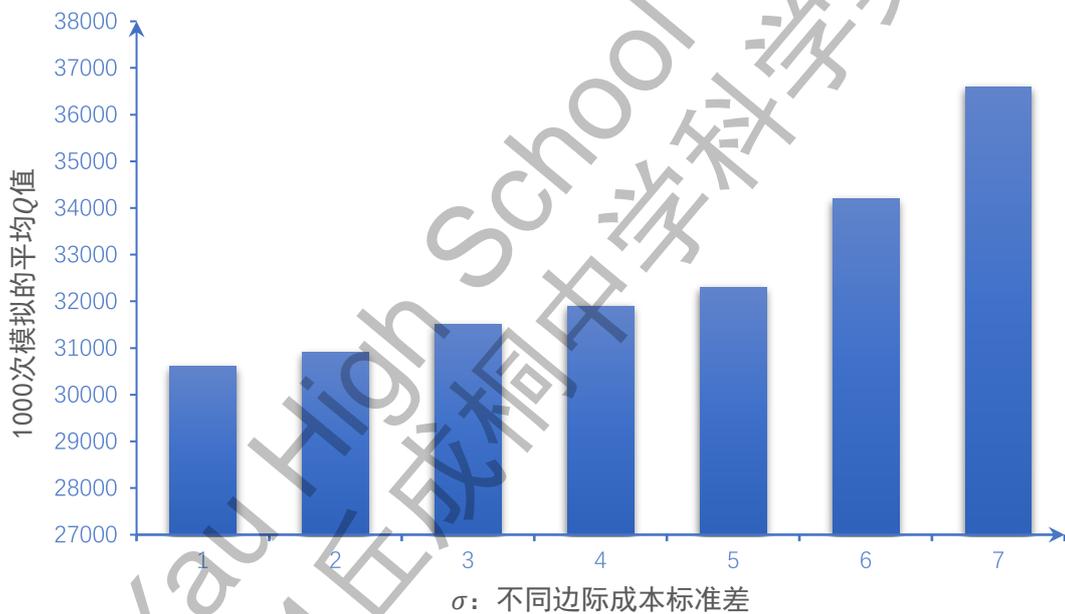
在第 5.3 节中，本文基于个体救援成本的正态分布  $MC_i \sim N(\mu, \sigma^2)$  来研究救援成本均值  $\mu$  对救援效果的影响。参数  $\mu$  表示社会中个体救援成本的均值，而  $\sigma$  则反映了

社会物质救援资源的分布情况。较大的  $\sigma$  值表明资源分配的不均衡程度较高，即某些救援者能以较低成本获得必要资源和能力，而其他救援者则需承担较高成本。本研究部分通过调整参数  $\sigma$  来模拟资源分配差异对紧急救援效果的影响。试验数据如表 6 所示：

表 6-不同边际成本标准差对平均 Q 值的影响

$\sigma$ 的取值	1000 次模拟的平均Q值
1	$3.06 \times 10^4$
2	$3.09 \times 10^4$
3	$3.15 \times 10^4$
4	$3.19 \times 10^4$
5	$3.23 \times 10^4$
6	$3.42 \times 10^4$
7	$3.66 \times 10^4$

图 3-不同边际成本标准差对平均 Q 值的影响



从数据图表中可以看出，随着  $\sigma$ （个体救援成本的标准差）的增加，1000 次模拟的平均 Q 值也呈逐步上升的趋势。这种趋势表明，救援成本分布的不均匀性增强时，紧急救援的整体效果得到了提升。较大的标准差  $\sigma$  意味着救援成本之间的差异增加，可能使得一部分资源效率更高的救援者（成本较低）得以更多参与，而成本较高的救援者则相对减少参与。随着成本分布范围的扩大，救援策略更倾向于优化资源的使用，确保资源能够被更有效地投入到最需要的地方。基于以上分析，提出以下建议：

- 优化资源分配机制：**在资源分配和救援计划制定时，政府和相关机构应进行详尽的效益成本分析，并以效率最大化为目标，依据此合理分配救援资源，以确保救援资源能被最有效地使用。应建立或优化资源分配机制，使得救援资源能够根据救援者的效率和成本差异有针对性地分配，从而提高整体救援效率。
- 增加资源的透明度和可访问性：**提高救援资源信息透明度，确保所有潜在的救援者

都能公平地获取到救援资源信息，定期发布透明化报告，使得救援资源分配更加公开公正且效率更高。

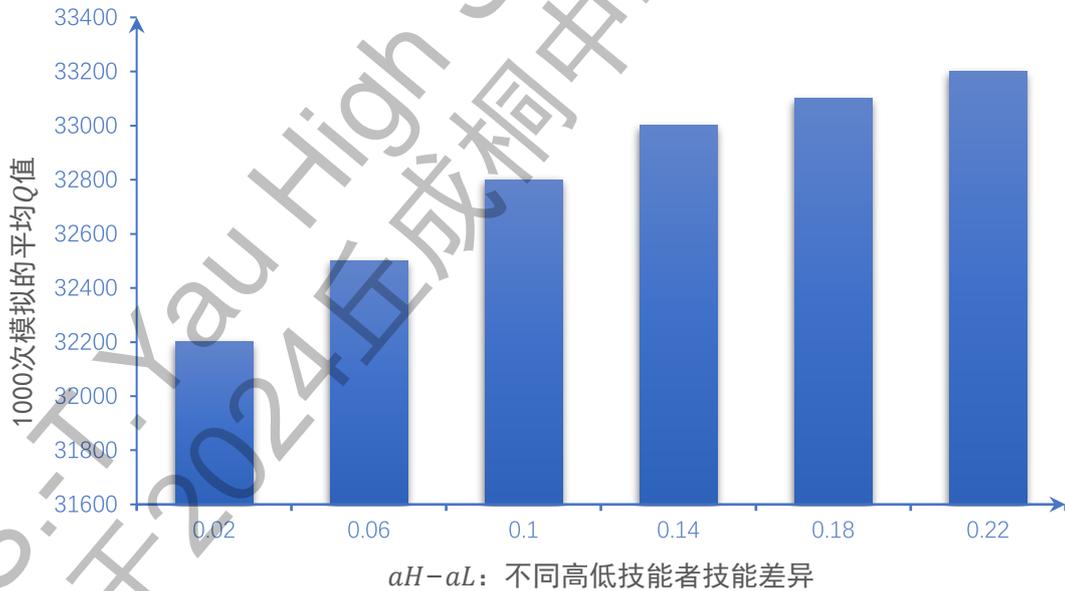
### 5.6 试验四：社会中高低技能者的技能差异对救援效果的影响

在本研究中，高技能者与低技能者之间的技能异质性体现为救援者在专业技能和救援能力上的差异。这种差异由不同的参数设置所体现，且其参数设置的差异对现实社会具有重要的实际意义。本部分通过调整参数来模拟救援者技能异质性对整体救援效果的影响。具体地，通过调节参数，保持高技能救援者和低技能救援者的参数  $a_H$  和  $a_L$  的总和不变，人为加大两者之间的差距，进而观察这种异质性的对救援质量指标  $Q$  的影响。试验数据如表 7 所示：

表 7-不同高低技能者技能差异对平均 $Q$ 值的影响

$a_H$	$a_L$	$a_H - a_L$	1000 次模拟的平均 $Q$ 值
1.50	1.52	0.02	$3.22 \times 10^4$
1.48	1.54	0.06	$3.25 \times 10^4$
1.46	1.56	0.10	$3.28 \times 10^4$
1.44	1.58	0.14	$3.30 \times 10^4$
1.42	1.60	0.18	$3.31 \times 10^4$
1.40	1.62	0.22	$3.32 \times 10^4$

图 4-不同高低技能者技能差异对平均 $Q$ 值的影响



根据仿真模拟的结果，可以观察到随着高技能救援者和低技能救援者之间参数  $a_H$  和  $a_L$  的差异  $a_H - a_L$  的增加，模拟得出的平均  $Q$  值呈现逐渐上升的趋势。这表明，在救援场景中，技能差异的增加有助于提高救援效果。技能差异的增加激励高技能救援者发挥其专业优势，同时也可能促使低技能救援者在非紧急任务中发挥更大作用，从而整体上提高救援操作的效率和效果。然而，在技能差异的初期增加时，救援效果的提升更为显著，而当技能差异继续增加到一定程度后，对救援效果的正面影响增幅趋于减弱。其中一种解释为初始阶段，较小的技能差异可能迅速促进高技能救援者发挥其专长，而

随着技能差异的进一步增加，高技能救援者的潜力可能已被较充分利用，额外的技能差异带来的效果提升有限。过度依赖高技能救援者也可能导致资源配置不均和救援团队依赖性增强，从而使得整体救援效率的提升受到限制。基于以上分析，提出以下建议：

- 专业化及动态化培训：**根据救援者的技能水平差异来定制培训和资源配置方案，推动救援队伍中角色的专业化，确保每个人都能在其最擅长的领域中发挥最大的效能，同时降低重复资源的浪费。进行技能储备动态调整，以便救援体系能够根据不同灾害类型灵活调动资源，提升应对的针对性和效率。
- 分阶段化合理增加技能差异：**由于社会公共教育服务支出有着机会成本，因此社会应当平衡提高技能差异以及社会救援教育成本。救援组织可以为救援人员实施分阶段的专业培训计划，逐步提升每个成员的技能水平，以逐步团队中的技能差异。高技能救援者的培训应通过集中资源投入，以确保在复杂紧急情况中的专业应对能力；同时，基础救援技能的普及则应通过低成本的方式大规模推广。

## 5.7 灵敏度分析

为了评估模型预测的稳健性及关键参数的影响程度，本研究对子模型二实施了灵敏度分析。此分析旨在识别对模型输出具有显著影响的参数，以明确哪些因素对个体救援决策和最终结果具有关键性的敏感性，进而为模型的进一步优化和决策制定提供理论依据。本部分选取了除了试验中的所有参数进行研究，包括合作互补性参数 $\tau$ 、救援关键时刻 $t_s$ 、时间紧迫性参数 $\omega_H$ 和 $\omega_L$ ，并在定义的合理范围内对这些参数进行了逐项调整。以 $3.21 \times 10^4$ 为输出指标的基线值，通过变更各个参数的数值，同时保持其他参数固定，本研究观察了模型输出（例如救援参与率、成功率等）的响应变化。灵敏度分析结果展示于表 8：

表 8-模型参数的灵敏度分析

参数	基线值	参数变动百分比	输出指标 Q	输出百分比变化
$\tau$	0.1	50%	$3.23 \times 10^4$	0.62%
$t_s$	75	33%	$3.17 \times 10^4$	-1.2%
$\omega_H$	4	34%	$3.31 \times 10^4$	2.5%
$\omega_L$	4	34%	$3.25 \times 10^4$	1.0%
$t_{total}$	300	33%	$2.33 \times 10^4$	-27%

仿真结果以及数据分析表明，模型中的参数对救援效果的影响各不相同。与此同时，指标 Q 对以上模型中的固定参数的变化不敏感，即模型对参数的假设对结果影响不大，即使参数取值有所偏差，也不会显著影响最终的救援效果。这些结果帮助验证了模型的稳健性，为模型在现实生活中的应用提供了保障。

## 六、结论与建议

### 6.1 主要结论与建议

本文针对紧急情况救援研究中缺少细分模型和人力资源博弈决策分析等局限性，构建了一个基于博弈论的紧急救援模型。通过借鉴了经济学中的博弈论工具，本文分析了在不同决策方式、社会结构和信息条件下，个体或群体决策如何最大化救援效果，探讨

了在不同条件下出现的涌现行为，反映了经济学中的资源配置理论在紧急救援中的应用。本研究通过子模型揭示了不同决策方式下的救援质量差异，并通过仿真模拟分析，研究了模型中的关键参数——高技能者在社会中的占比，个人救援边际成本即救援资源丰富程度与分布，以及高低技能者技能差异——对救援质量的影响，为提高救援质量提出了建议。

通过模拟集中决策与个体决策的不同模式，本模型中的三个子模型分别揭示了类似计划经济与市场经济中的资源配置机制。子模型一的救援在集中调度的框架下体现了公共资源统一管理特征，类似于计划经济中的集中分配方式，但效率相对有限。而在子模型二的个体决策模式下，到达救援现场的人员基于边际效用和成本自主选择救援，反映了市场经济中个体自由决策的优势，即充分信息下的个体行为显著提升了整体救援效果。此外，子模型三还引入了信息不对称的场景，模拟了个体如何在信息不完全条件下更新模型参数并随着时间轮次调整决策，这与信息不对称对市场行为和效率的影响相呼应。通过这些分析，本模型为经济学中的不同制度理论提供了新的研究视角，推动了在应急管理和资源分配领域的跨学科讨论。

基于三个子模型中效果最优的子模型二，本文对其关键参数进行的四个试验的结果揭示了不同条件下对救援效果的关键影响。试验一的结果表明，高技能救援者的比例越高，整体救援质量越好，表明高技能救援者的有效参与对于提升救援效果至关重要。试验二则发现，随着救援边际成本增加的初期，救援效果有所下降，但将成本提高到适度范围内，救援质量得以提高，再度提高成本反而会降低效率，说明合理控制救援成本能优化整体效果。第三个试验进一步表明，较高的救援成本离散程度可以促使资源更加合理分配，进而提升救援效率。最后，试验四发现，虽然增大高低技能救援者之间的技能差异可以提升救援效果，但当差异过大时，提升的幅度时边际救援效果的提高开始趋于减弱，提示了在救援资源配置中，需要平衡技能差异与社会救援教育资源及成本，以确保达到最优效果。

本文基于以上对子模型参数的试验结果，提出了四个提高救援质量的关键政策建议。首先，政府和相关机构应加强高技能救援者的培训与储备，增加社会中高技能救援者的比例，以确保在紧急情况下能够迅速调动具有专业技能的救援力量。同时，应在高风险或易受灾地区建立区域化的专业救援队伍并建立社区自救队伍网络，以便在灾害初期自发组织救援，减轻专业救援资源的压力。其次，社会应有效控制救援成本，政府应加大财政支持，减轻救援者的经济负担，并加强对救援资源使用的监督，确保资源得到合理分配与高效利用。此外，优化资源分配机制是提升救援效率的重要手段，建议政府和相关机构通过效益成本分析，完善资源分配机制，提高资源的透明度和可访问性，定期发布透明化报告，以确保救援资源能够公平且高效地分配。最后，针对救援者的技能水平差异，社会应当实施差异化的培训和分阶段技能提升计划，推动救援队伍中的角色专业化，以提高每个救援者在其专业领域中的效能，并减少由于过度追求技能差异导致的社会救援教育资源的低效使用，将高成本的专业化培训和低成本大众培训区分开；进行技能储备动态调整，以便救援体系能够根据不同灾害类型灵活调动资源，提升应对的针对性和效率。本模型不仅从理论上完善了救援效率的分析框架，还为政策制定者在救援行动中如何合理调配资源、控制成本、提升救援质量等方面提供了实用的建议，进一步推动了应急救援行动中资源分配的科学化和精细化，对提升社会救援效果以及能力有着重要意义。

## 6.2 模型的局限性与未来研究方向

本文在提出紧急救援资源分配与决策的经济学分析框架方面具有一定贡献，但仍存在一些不足之处。首先，模型中对个体决策的假设较为理想化，效用以及成本函数较为简洁，在一定程度上未充分考虑到实际救援中人类行为的复杂性和多样性，如情绪因素、紧急状况下的心理压力等，而这些因素可能会影响决策过程。其次，本文主要通过仿真进行验证，缺乏实际救援场景的验证和案例分析，模型的实际适用性和效果仍需在真实环境中进一步检验。最后，模型在处理不同区域、文化背景下的救援行为差异方面尚未深入探讨，在一定程度上限制了其在更广阔内的应用；同时，在有限预算条件下，如何合理分配资源以达到最佳救援效果是一个亟需深入探讨的问题。未来研究可引入更多个体行为的现实因素，构建更贴近实际的决策模型，提升模型对救援场景的预测和适用性。其次，可以结合实际救援数据，进一步验证模型的准确性和适用性，并通过大数据和实时监控系統优化动态数据收集与反馈机制，使得模型能够更好地应对复杂的救援场景。最后，可以进一步引入具体的预算成本优化模型，结合现实中的成本效益分析，探讨不同情境下的最优资源分配方案。

## 七、参考文献

- [1] 中国政府. (2008, May 31). 国务院总理温家宝在 2008 年全国两会上的政府工作报告 [Government work report by Premier Wen Jiabao at the 2008 National People's Congress]. 国务院. [https://www.gov.cn/jrzq/2008-05/31/content\\_1001011.htm](https://www.gov.cn/jrzq/2008-05/31/content_1001011.htm)
- [2] 应急管理部. (2024, May 17). 应急管理部发布 2024 年 4 月全国自然灾害情况. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240517\\_488741.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240517_488741.shtml)
- [3] Zhang, L., Liu, X., Li, Y., Liu, Y., Liu, Z., Lin, J., ... Liang, W. (2012). Emergency medical rescue efforts after a major earthquake: Lessons from the 2008 Wenchuan earthquake. *The Lancet*, 379(9818), 853-861.
- [4] Liu, B., Zhao, X., & Li, Y. (2016). Review and prospect of studies on emergency management. *Procedia Engineering*, 145, 1501-1508.
- [5] Ostrom, V., & Ostrom, E. (2019). *Public goods and public choices*. In *Alternatives for delivering public services* (pp. 7-49). Routledge.
- [6] Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT Press.
- [7] Wu, C. K. (2018). A game theory approach for assessing risk value and deploying search-and-rescue resources after devastating tsunamis. *Environmental Research*, 162, 18-26.
- [8] Diekmann, A. (1985). Volunteer's dilemma. *Journal of Conflict Resolution*, 29(4), 605-610.
- [9] Weesie, J. (1994). Incomplete information and timing in the volunteer's dilemma: A comparison of four models. *Journal of conflict resolution*, 38(3), 557-585.

[10] He, J. Z., Wang, R. W., & Li, Y. T. (2014). Evolutionary stability in the asymmetric volunteer's dilemma. *PLOS ONE*, 9(8), e103931.

[11] Friedman, D. (1991). Evolutionary games in economics. *Econometrica*, 59(3), 637-666.

[12] Liu, J., Song, Y., An, S., & Dong, C. (2022). How to improve the cooperation mechanism of emergency rescue and optimize the cooperation strategy in China: A tripartite evolutionary game model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1326.

[13] Khalvati, K., Park, S. A., Dreher, J. C., & Rao, R. P. (2016). A probabilistic model of social decision making based on reward maximization. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 29.

[14] 同济大学数学系. (2016). *概率论与数理统计*. 中国邮电出版社.

2024 S.-T. Yau High School Science Award  
仅用于2024丘成桐中学科学奖公示

## 致谢

几年前的夏天，我的外公突发心脏病，但当时身边没有人具备急救技能，最终导致了他不幸离世。自那时起，我心中便埋下了一个愿望——希望通过提升社会的急救技能来减少类似的悲剧发生。随着我在经济学和博弈论领域的学习深入，我愈发渴望利用自己的所学知识来解决这一问题。我研读了大量相关的文献和书籍，其中包括志愿者博弈模型的论文和谢识予老师的《经济博弈论》。最初，我的研究方向专注于心脏骤停的急救模型，但在进一步的探索中，我意识到这个模型同样可以应用于其他类型的紧急救援场景，并提供有价值的洞见。于是，我将模型扩展至更广泛的领域，并通过数学描述这一事件，用 Python 进行仿真模拟。

我要特别感谢我的指导老师王潇老师。在研究的初期，虽然阅读了相关文献，我却陷入了思路的瓶颈，不知该如何着手，进行创新。王老师为我提供了许多鼓励与建议，帮助我跳脱出思维定式，从基础问题入手，重新审视整个研究过程。我从经济学中的边际成本和效率原理出发，逐步厘清了模型的结构与逻辑。虽然我喜欢构建模型的过程，但在完整撰写建模论文方面经验不足。王老师不仅在论文框架的构建上提出了宝贵的建议，还指导我加入符号说明和敏感性分析等内容。这些意见让我在学术道路上找到了明确的方向，受益终身。希望未来能够将此次学习到的经验运用于实际生活和学术研究中，用所学知识切实解决现实中的问题。