

1-18-2021

Overview of Optimization Problems Regarding Emergency Organization Allocation Based on Mathematical Programming

Cejun Cao

1. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; ;2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ;

Congdong Li

2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ;3. School of Management, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Overview of Optimization Problems Regarding Emergency Organization Allocation Based on Mathematical Programming

Abstract

Abstract: To improve the utilization of human resources in large-scale natural disasters and reduce various losses, how to use mathematical programming approach to optimize emergency organization allocation strategy is the currently urgent and critical issue. A decision framework or conceptual model for emergency organization allocation optimization is proposed. The current status of mathematical programming model for emergency organization allocation is presented from the perspective of task sequence and objective quantity. An overview on the exact and heuristic algorithm to solve the proposed model is conducted. Potential issues for in-depth study with respect to simulation and modeling of emergency organization allocation optimization are given.

Keywords

large-scale natural disasters, emergency management, emergency organization allocation, mathematical programming, simulation and modeling

Recommended Citation

Cao Cejun, Li Congdong. Overview of Optimization Problems Regarding Emergency Organization Allocation Based on Mathematical Programming[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(1): 1-12.

基于数学规划的应急组织指派优化问题综述

曹策俊^{1,2}, 李从东^{2,3}

(1. 重庆工商大学 管理科学与工程学院, 重庆 400067; 2. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 3. 暨南大学 管理学院, 广东 广州 510632)

摘要: 如何采用数学规划方法优化应急组织指派策略, 提高大规模自然灾害中人力资源的利用率, 减少各种损失是当前亟待解决的重要课题。在应急组织指派优化决策框架的基础上, 从任务顺序和目标数量2个维度, 梳理了应急组织指派数学规划模型的研究现状; 梳理了应急组织指派优化模型求解算法的进展; 总结并指出了应急组织指派优化仿真建模中亟待深入研究的问题。

关键词: 大规模自然灾害; 应急管理; 应急组织指派; 数学规划; 仿真建模

中图分类号: TP391.9 文献标志码: B 文章编号: 1004-731X (2021) 01-0001-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0203

Overview of Optimization Problems Regarding Emergency Organization Allocation Based on Mathematical Programming

Cao Cejun^{1,2}, Li Congdong^{2,3}

(1. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Management, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: To improve the utilization of human resources in large-scale natural disasters and reduce various losses, how to use mathematical programming approach to optimize emergency organization allocation strategy is the currently urgent and critical issue. A decision framework or conceptual model for emergency organization allocation optimization is proposed. The current status of mathematical programming model for emergency organization allocation is presented from the perspective of task sequence and objective quantity. An overview on the exact and heuristic algorithm to solve the proposed model is conducted. Potential issues for in-depth study with respect to simulation and modeling of emergency organization allocation optimization are given.

Keywords: large-scale natural disasters; emergency management; emergency organization allocation; mathematical programming; simulation and modeling

引言

应急组织是指具有技术技能人员的集合。每个应急组织是由经过特殊训练的消防与救援人员、医护人员、结构工程师、警犬训导员/训犬师、起重机司机等组成^[1-2]。应急组织作为人力资源在大规模自然灾害管理中扮演着至关重要的角色^[3-5]。它

不仅是应急任务(如疏散幸存者、搜救伤员、运输救援物资)的执行者, 而且还是决策主体与需求主体的沟通桥梁, 缺乏应急组织的灾害响应没有任何意义^[4]。文献[1,3,5]指出灾后合理地指派应急组织是灾害响应过程中的首要任务之一。不合理地指派应急组织可能会诱发各种社会和经济问题, 甚至引发极端事件, 从而导致灾害响应决策系统陷入无序

收稿日期: 2019-05-12 修回日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(71904021), 重庆市社会科学规划项目(2019QNGL27), 教育部“春晖计划”合作科研项目(CQ2019001), 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0164), 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900830), 重庆工商大学“应对重大突发公共卫生事件”专题研究重点项目(ctbuyqzx01), 重庆工商大学引进高层次人才科研启动项目(1955011), 重庆工商大学校内科研项目(1951025), 教育部人文社科研究规划基金(20YJA630079)

作者简介: 曹策俊(1990-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为灾害运作管理、应急组织建模。E-mail: caocejun0601@tju.edu.cn

和混乱状态^[6]。例如, 2005 年美国卡特里娜飓风响应过程中, 尽管联邦与地方政府都启动了应急响应系统, 医疗工具包和疫苗都准时送达受影响区域, 但由于严重缺乏护士(应急组织), 导致幸存者临时治疗或处理任务的开始执行时间延迟, 增加了幸存者的痛苦和社会成本, 从而影响了救援活动的整体绩效。

为了避免出现“想帮忙, 反添乱”和“搭便车”等混乱现象, 提高人力资源利用率, 如何采用有效的方法, 对应急组织指派优化问题进行仿真建模, 获得最佳指派策略, 完成受影响区域涌现出的大量应急任务, 从而有效应对大规模自然灾害和满足救援过程的可持续要求, 是各级决策主体(如应急管理部/中央、应急管理厅/地方政府和应急管理局/基层政府)在黄金救援阶段的首要任务之一, 也是当前亟待解决的重要课题。

一方面, 由于应急组织具有独立的思考能力, 加上大规模自然灾害救援活动本身高度的不确定性和复杂性, 导致对应急组织指派优化问题进行仿真建模的难度大幅度增加。因此, 如何设计有效的方法研究上述问题亟待解决。数学规划作为经典的优化方法之一, 为解决此问题提供了新的思路和技术手段。另一方面, 数学规划是具代表性的优化方法, 许多管理数量方法最终都可化为数学规划来处理。数学规划问题的三要素为决策变量、目标函数和约束条件。Galindo 等^[7]、Zheng 等^[8]指出数学规划已成为目前对应急决策优化问题(如应急组织指派)进行仿真建模的有效方法。

应急组织指派数学规划模型可为应急指挥仿真系统的开发, 提供决策模型模块的支撑。指派模型的合理性与有效性会直接响应急指挥仿真系统模拟应对大规模自然灾害过程中的效果。因此, 对用于应急指挥训练、应急方案评估和辅助决策的仿真系统而言, 研究运用数学规划方法建立应急组织指派决策模型也有着重要的意义。

数学规划是应用广泛的建模方法和工具。数学规划方法被广泛应用于解决管理、经济、工程、军

事和医疗等领域。文献[7-8]强调了该方法在解决应急组织指派优化问题时的重要性和迫切性。已有学者开始运用数学规划方法对应急组织指派优化问题进行仿真建模, 并取得了一定的成果。借鉴文献[9]的观点, 系统梳理此领域的研究现状, 准确识别研究空白, 提出未来的研究方向, 以及试图为本领域的学者和实践者提供科学依据和参考, 本文对数学规划方法在应急组织指派优化仿真建模中的应用现状进行系统梳理和归纳总结。

1 应急组织指派优化问题描述

灾害响应决策系统是决策主体、供给主体、应急任务、需求主体、救援物资、灾害基础环境及其交互关系的总称^[1,3-4,10], 结构示意图见图 1。正如前文所述, 本文讨论的应急组织是由多个具有不同技能的个体组成^[2]。本文提到的应急组织是粗粒度视角下的结果, 提到的应急组织指派活动都发生在灾害响应决策系统中。

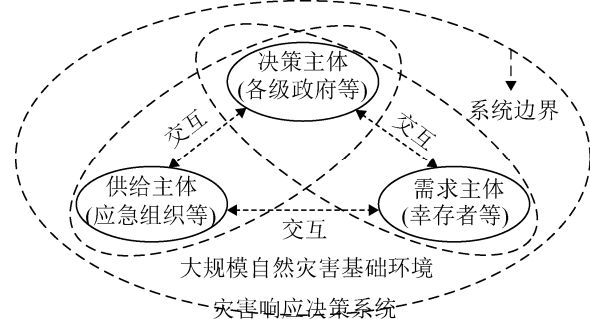


图 1 灾害响应决策系统结构

Fig. 1 Structure of decision system for disaster response

大规模自然灾害应急组织指派优化的实质可描述为: 决策主体(或管理者)根据不同准则约束下的救援目标, 通过各种手段提取应急任务清单, 设计、评估进而选择任务导向的应急组织指派策略, 使应急组织指派决策可以最大程度地提高救援过程的绩效, 满足对幸存者人文关怀的要求, 进而促进国家或区域的社会、环境和经济可持续发展。应急组织指派策略聚焦于如何有效地分配应急组织完成相应的应急任务、以及确定应急组织的访问路

径(即执行任务的顺序)。

在黄金救援阶段,来自不同地方的应急组织不断涌入受影响区域。由于灾害响应决策系统中有大量的应急任务等待被完成,而当前可利用的应急组织有限,每个应急组织可能会承担多项任务。因此,应急任务在获得作为人力资源的应急组织时,可能会存在竞争关系。不同的匹配关系、不同的执行顺序都会影响整个决策系统的绩效。因此,应急组织与任务的匹配关系、应急任务的结构(即执行顺序)应该被考虑到应急组织指派优化问题中。在灾害运作管理实践中,既可同时决策应急组织分配方案与应急任务执行顺序,也可只制定应急组织与任务间的匹配方案。

此外,宋瑶^[11]还强调了“府际”关系是应急响应决策制定过程中产生持续作用的关键因素。针对灾害响应决策系统而言,利益相关者间的“府际”关系包括纵向关系(如中央、地方与基层政府)和横向关系(如区域内同级政府间)^[4]。“府际”关系会直接影响应急组织指派活动的整体绩效/效果。横向“府际”关系视角下的决策主体拥有较大的权利,易于快速集中和调度应急组织来应对大规模自然灾害,从而控制灾害带来的各种影响。将横向“府际”关系考虑到应急组织指派策略中,在很大程度

上,可有效避免救援过程中出现“打太极”、“踢皮球”和“多龙治水”等混乱现象^[12]。另一方面,《中华人民共和国突发事件应对法》中强调了统一领导、分级负责的管理体制,其在本质上体现了利益相关者间的纵向“府际”关系。在纵向“府际”关系中,高层级决策主体对低层级决策主体进行有效控制和领导,低层级决策主体服从领导和接受监督。将纵向“府际”关系融入应急组织指派策略中,既可保证高层级决策主体的权威性,还能调动低层级决策主体的积极性,从而提高灾害响应效率^[11]。解决不同层级决策主体间“联动性不足”的问题。因此,将利益相关者间的横向和纵向“府际”关系融入任务导向的应急组织指派策略中也是必要的。

综上所述,在灾害运作管理实践中,不仅需要平衡同层级决策主体或不同部门间的不同利益诉求,还需要解决不同层级决策主体所追求目标的矛盾与冲突关系。在制定应急组织指派策略的过程中,决策主体可能会考虑单个方面的救援目标,也可能综合考虑多个维度的救援目标,需视情况而定。还应该考虑救援目标的数量对应急组织指派策略或方案制定的影响。

基于此,本文提出了任务导向的应急组织指派优化决策框架,如图 2 所示。

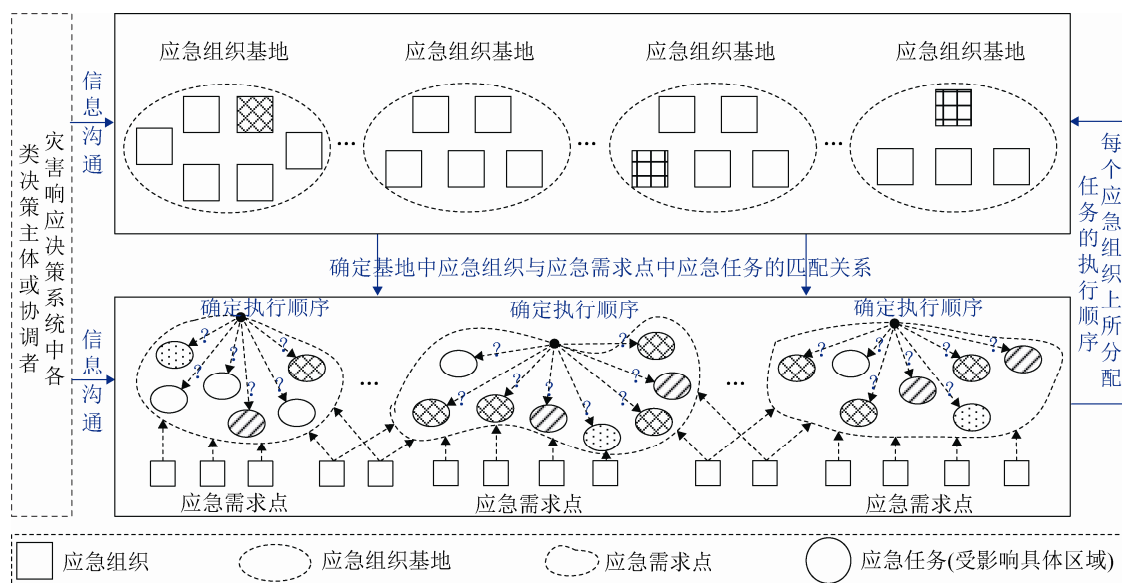


图 2 任务导向的应急组织指派优化决策框架

Fig. 2 Optimization decision framework regarding task-oriented emergency organization allocation

2 应急组织指派优化模型的研究现状

本文将任务顺序、“府际”关系和救援目标(函数)数量作为文献的分类准则。由于本文的目标文献都仅涉及了横向“府际”关系,故未采用“府际”关系准则对已有成果进行分类。在这样的情形下,本节首先给出了应急组织指派数学规划模型的一般形式;然后,根据是否考虑任务顺序(即任务顺序准则),将已有成果分为 2 类;最后,根据目标函数的数量(即目标数量准则),将已有成果分为单目标和多目标规划模型。

2.1 应急组织指派优化基本模型

假设用 F 表示应急组织指派优化问题的目标函数, k 表示目标函数的数量;用 x 表示与应急组织分配相关的决策变量,用 y 表示与应急任务顺序确定相关的决策变量;用 $g(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 分别表示硬约束和软约束条件,用 i 表示硬约束的数量,用 j 表示软约束的数量。任务导向的应急组织指派数学规划模型的一般形式为:

$$\min F = \{F_1(x, y), F_2(x, y), \dots, F_k(x, y)\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_i(x, y) \leq 0 \quad (2)$$

$$h_j(x, y) \leq 0 \quad (3)$$

$$x \in X, y \in Y \quad (4)$$

式中:当 $k=1$ 时,此问题被刻画为单目标规划模型;当 $k \geq 2$ 时,此问题被刻画为多目标规划模型。式(1)中的目标函数主要包括最小化加权完成时间总和(与时间相关)、应急费用总和(与费用相关)、碳排放总量(与环境相关)、最大化感知满意度与幸存者生存概率(与幸存者相关)等。式(2)表示应急任务执行顺序、应急组织能力,以及与应急组织和任务相关的其他硬约束条件。式(3)表示应急组织所承担的工作负荷等软约束条件。式(4)表示决策变量的取值范围;若仅考虑应急组织分配问题,则仅需保留决策变量 x 。

此外,表 1 归纳和总结了应急组织指派优化相关的部分文献。其中,“集成框架”列表示是否清晰地建立了相应的理论框架,用于剖析内在机理;

“可持续(发展)”列强调是否清晰地界定了灾害情境下可持续(发展)的概念;“决策模式”列包括集中和分散 2 种模式,前者多采用单层数学规划模型衡量,后者用双层规划模型刻画。

2.2 任务顺序准则下的应急组织指派模型

针对仅考虑分配的应急组织指派优化问题,Chen 等^[2]针对城市灾害搜索-救援中同质救援队伍布局优化问题,构建了两阶段随机规划模型。Zhang 等^[6]将考虑异质性和任务紧迫程度的应急救援队伍多阶段分配问题,刻画为 0-1 整数非线性规划模型。Yan 等^[13]针对巨灾后同质救援队伍分配问题,构建了混合整数规划模型。Ren 等^[14]针对考虑优先级和工作负荷的同质森林火灾救援队伍分配问题,建立了 0-1 整数规划模型。Su 等^[15]针对多救援组织与多并行事件匹配问题,构建了相应的整数规划模型。Zhang 等^[16]针对考虑适用限制条件的资源分配(如救援队伍)问题,提出了两阶段随机混合整数规划模型。Falasca 等^[17]提出了志愿者个体或群体分配整数规划模型。Lee 等^[18]将医疗队伍和医疗物资分别视为可再生和非可再生资源,针对应急资源联合配置完成伤员治疗任务的问题,建立了相应的混合整数规划模型。Lei 等^[19]针对充分供应条件下考虑准备时间的应急医疗队伍调度和医疗物资分配问题,构建了 0-1 整数规划模型。Lassiter 等^[20]运用鲁棒优化方法,提出了具有不同技能的志愿者分配混合整数规划模型。张雷等^[21]针对考虑应急任务优先权、紧迫程度和工作负荷的地震灾害救援队伍部署问题,建立了 0-1 整数规划模型。樊治平等^[22]以应急任务为主线,构建了考虑紧迫程度的异质救援人员指派模型。袁媛等^[23]和曹庆奎等^[24]将考虑工作负荷与紧迫程度的异质救援人员派遣问题,刻画为 0-1 整数规划模型。初翔等^[25]基于最大幸福原则,研究了考虑任务紧迫程度的多灾点医疗队支援分配问题,建立了非线性整数规划模型。周荣辅等^[26]聚焦于考虑任务紧迫程度的地震灾害救援队伍派遣与道路重建问题,并将其刻画为 0-1 整数规划模型。

表 1 应急组织指派文献(部分)总结
Tab. 1 Summary of the literature regarding emergency organization allocation

文献	年份	系统要素			研究问题		集成框架		问题特性											
		组织	任务	匹配	分配	结构	是	否	组织分类		紧迫程度		工作负荷		适用限制		准备时间		其他	
								同质	异质	是	否	是	否	是	否	是	否	是		否
[1]	2017	√	√	√	√	√	√		√	√		√		√		√		√		
[2]	2012	√			√			√	√			√		√		√		√		√
[3]	2014	√	√	√	√	√		√		√		√		√		√		√		
[5]	2019	√	√	√	√	√		√		√		√		√		√		√		
[6]	2017	√			√			√		√		√		√		√		√		√
[13]	2007	√			√			√	√			√		√		√		√		√
[14]	2016	√			√			√	√			√	√	√		√		√		√
[15]	2016	√	√		√			√	√			√		√		√		√		√
[16]	2016	√			√			√	√			√		√	√	√		√		√
[17]	2012	√	√	√	√			√	√			√		√		√		√		√
[18]	2013	√	√		√			√	√			√		√		√		√	√	
[19]	2015	√	√		√			√	√			√		√		√		√	√	
[20]	2015	√	√	√	√			√	√			√		√		√		√		√
[21]	2013	√	√		√			√	√			√		√		√		√		√
[22]	2012	√	√	√	√			√		√		√	√	√		√		√		√
[23]	2013	√	√	√	√			√	√			√	√	√		√		√		√
[24]	2017	√	√	√	√			√	√			√		√		√		√		√
[25]	2015	√			√			√	√			√		√		√		√		√
[26]	2017	√	√	√	√			√	√			√		√		√		√		√
[27]	2015	√	√	√	√	√		√	√			√		√		√		√	√	
[28]	2010	√	√	√	√	√		√		√		√	√	√		√		√		√
[29]	2015	√	√	√	√	√		√	√			√		√		√		√		√
[30]	2018	√	√		√	√		√	√			√		√		√		√		√
[31]	2018	√	√	√	√	√		√	√			√		√		√		√		√

文献	年份	模型特征										可持续(发展)		决策模式		
		目标类型		目标函数				模型分类				是	否	集中	分散	
		单	多	时间	碳排放	费用	效用	其他	纯整数	混合整数	其他					
[1]	2017		√	√	√	√			√				√		√	
[2]	2012	√		√						√		√			√	√
[3]	2014	√		√						√					√	√
[5]	2019	√		√						√					√	√
[6]	2017		√	√				√		√					√	√
[13]	2007	√		√						√					√	√
[14]	2016	√						√		√					√	√
[15]	2016		√	√		√				√					√	√
[16]	2016		√	√		√				√					√	√
[17]	2012		√			√		√		√					√	√
[18]	2013	√				√				√					√	√
[19]	2015	√		√						√					√	√
[20]	2015		√					√		√					√	√
[21]	2013		√	√				√		√					√	√
[22]	2012	√						√		√					√	√
[23]	2013		√	√				√	√	√					√	√
[24]	2017		√					√	√	√					√	√
[25]	2015	√						√		√					√	√
[26]	2017		√					√		√					√	√
[27]	2015		√	√								√			√	√
[28]	2010	√				√				√					√	√
[29]	2015		√	√		√				√					√	√
[30]	2018	√		√								√			√	√
[31]	2018	√		√								√			√	√

上述文献仅考虑了应急组织分配问题,未涉及任务顺序确定的问题。然而,随着时间的推移,应急组织的成员/个体会产生疲劳效应,从而影响应急任务完成的效果。因此,不同的任务执行顺序对灾害响应决策系统产生的影响也不相同。在灾害运作管理实践中,应将任务顺序考虑到应急组织指派优化策略中,且此问题也更贴近实际、更有意义,但也更加复杂,值得深入研究。

针对考虑任务顺序的应急组织指派优化问题,已有学者进行了有意义的探索,并取得了一定的成果。例如, Cao 等^[1]将融入可持续发展理念且考虑任务顺序、工作负荷、异质性、适用限制和任务紧迫程度的应急组织指派优化问题,刻画为 0-1 整数规划模型。Wex 等^[3]针对考虑异质性、紧迫程度、任务顺序、适用限制和准备时间的救援组织指派、组织与事件匹配问题,构建了 0-1 整数非线性规划模型。Rauchecker 等^[5]将考虑任务顺序、异质性、适用限制和准备时间的救援组织调度问题,描述为 0-1 整数规划模型。Zheng 等^[27]针对中国情境下的灾害救援物资运作过程,聚焦于考虑紧迫程度和准备时间的多救援团队与多任务匹配问题,建立了相应的数学规划模型。Rolland 等^[28]针对考虑工作负荷的异质应急组织指派、组织与任务匹配问题,建立了 0-1 整数规划模型。刘艺等^[29]针对任务驱动的同质应急组织分配问题,提出了 0-1 整数规划模型。Wang 等^[30]针对考虑任务执行顺序和准备时间的同质应急医疗队伍指派问题,构建了混合整数规划模型。Nayeri 等^[31]聚焦于考虑疲劳效应、任务顺序、紧迫程度、适用限制和准备时间的救援组织指派与调度问题,并将其刻画为混合整数规划模型。

综上所述,国内外学者更多地聚焦于应急组织分配问题;对考虑任务顺序(或任务结构)的应急组织指派优化问题关注度仍然不够。已有文献聚焦于传统视角下考虑异质性、准备时间和适用限制的应急组织指派优化问题,对融入可持续发展理念、工作负荷与疲劳效应的异质应急组织指派进行研究的成果相对较少。

2.3 目标数量准则下的应急组织指派模型

针对应急组织指派单目标优化问题,Chen 等^[2]针对救援队伍布局问题,提出的单目标随机规划模型,旨在最大化期望收益(如获救灾民的数量)。Wex 等^[3]提出了以最小化加权完成时间总和为目标函数的救援组织指派单目标整数规划模型。Rauchecker 等^[5]构建的救援组织调度整数规划模型,目标函数为最小化加权完成时间总和。Yan 等^[13]建立了最小化应急修复时间长度的救援队伍指派单目标混合整数规划模型。Ren 等^[14]提出的救援队伍指派与分配单目标整数规划模型,旨在最小化救援队伍总的行程距离。Lee 等^[18]建立了最小化总滞后惩罚成本的单目标混合整数规划模型。Lei 等^[19]构建的应急医疗队伍调度与医疗物资分配单目标整数规划模型,旨在最小化滞后完成时间。樊治平等^[22]建立的救援人员单目标指派模型,旨在最大化完成任务“效果”最佳。初翔等^[25]构建了以死亡人数最小化为目标函数的医疗队指派单目标非线性整数规划模型。Rolland 等^[28]建立的应急组织指派单目标整数规划模型,旨在最小化应急费用。刘艺等^[29]提出的应急组织指派单目标整数规划模型,旨在最小化响应时间与总成本。Wang 等^[30]构建了最小化总服务完成时间的应急医疗队伍指派单目标混合整数规划模型。Nayeri 等^[31]建立的救援组织指派与调度单目标混合整数规划模型,旨在最小化加权响应时间与开始延迟时间总和。

上述文献在设计应急组织指派策略过程中,仅考虑了某个维度的单个救援目标。然而,在灾害运作管理实践中,应急组织指派活动相当复杂,涉及到同层级的不同部门的决策主体、不同层级的多个决策主体,其利益诉求往往是多维度的。同层级某个或某类主体(或不同部门)可能在不同维度提出需求;具有层级或主从关系的多元主体在不同方面会提出不同的需求。此外, Holguin-Veras 等^[32]还强调了多目标优化在人道主义供应链或灾害运作管理中非常受青睐。从这种意义而言,应急组织指派多目标优化问题更有意义,且仍需深入研究。

针对应急组织指派多目标优化问题, Cao 等^[1]建立的应急组织指派多目标整数规划模型, 旨在最小化加权准备时间总和、碳排放总量与应急费用总和。Zhang 等^[6]构建的应急救援队伍分配多目标整数规划模型, 旨在最小化最大行程时间、最大化救援队伍分配的感知满意度。Su 等^[15]建立了以总加权行程时间和与总成本最小化为目标函数的救援组织分配多目标整数规划模型。Zhang 等^[16]建立的资源分配两阶段多目标混合整数规划模型, 第 1 阶段的目标函数为最小化总损失/成本, 第 2 阶段为最小化任务最晚完成时间(即制造期)。Falasca 等^[17]提出的志愿者分配多目标整数规划模型, 目标函数为最小化人力资源缺乏总成本和匹配不佳的任务(undesired task)数量总和。Lassiter 等^[20]建立的志愿者指派多目标混合整数规划模型, 旨在最小化累积加权未满足需求期望值和可行性惩罚函数。张雷等^[21]提出的地震灾害救援队伍部署多目标整数规划模型, 旨在最大化响应时间最短、最大化救援效率和最小化救援物资损耗。袁媛等^[23]构建的救援人员派遣多目标整数规划模型的目标函数为最大化应急救援时间满意度和总体胜任程度。曹庆奎等^[24]构建的救援人员派遣多目标整数规划模型, 旨在最大化感知满意度和救援效果。周荣辅等^[26]提出的地震灾害救援队伍派遣多目标整数规划模型, 旨在最大化受困人员生存概率、最大化救援队伍完成任务效果。Zheng 等^[27]提出的多工程救援队伍指派优化多目标决策模型, 旨在最小化加权等待时间总和、最小化最大加权等待时间。

综上所述, 已有成果更多地关注与时间或费用相关的单目标函数最优化问题; 较少涉及综合考虑与时间、费用、环境和幸存者等相关的目标函数整体最优的多目标应急组织指派优化问题。此外, 学者们侧重于解决同层级决策主体或不同部门在不同维度利益诉求的冲突问题; 极少关注不同层级利益相关者/决策主体在不同方面的诉求。

3 应急组织指派数学规划模型求解算法的研究现状

在灾害运作管理实践中, 为了向决策主体提供更为精确和针对性的决策支持, 除需要依靠第 2 章中讨论的各类数学规划模型, 还必须借助各类技术手段/方法来求解这些模型。为了应对大规模自然灾害背景下的应急组织指派优化问题与模型的高度不确定性或随机性、复杂性, 合理且高效地设计求解策略/方法成为了灾害运作管理的主要内容。

文献[33-37]指出求解应急资源配置模型的方法/技术手段主要包括精确算法和启发式算法。借鉴上述观点, 将求解应急组织指派数学规划模型的方法也分为精确和启发式算法。前者主要适用于应急组织指派优化小规模问题, 包括分支定界法、匈牙利法、全局准则法等; 后者主要适用于大规模问题, 包括遗传算法、差分进化算法、粒子群算法等。问题规模大小的界定并没有严格或统一的标准, 需视情况而定。在黄金救援阶段, 由于可利用资源的稀缺性, 应急组织数量相对较小。然而, 在大规模自然灾害背景下, 应急需求点、应急任务的数量都相对较大。

3.1 求解应急组织指派模型的精确算法

有些学者将诸如分支定界法、匈牙利法、LINGO 软件等精确算法或内置精确算法的软件应用于求解相对简单的应急组织指派数学规划模型。例如, 文献[1, 5]针对应急组织指派 0-1 整数规划模型, 分别设计了分支定界算法和分支定价算法。Chen 等^[2]提出了基于列生成的动态算法, 求解救援队伍分配单目标随机规划模型。Falasca 等^[17]运用加权求和与帕累托优化方法求解志愿者分配多目标整数线性规划模型。Lassiter 等^[20]采用帕累托优化方法对志愿者指派多目标混合整数规划模型进行求解。张雷等^[21]采用包括最小调整法的两阶段算法求解救援队伍分配多目标 0-1 整数规划模型。文献[22-24]设计了匈牙利法求解救援人员派遣 0-1 整数规划模型。文献[25-26]借助 LINGO 软件分别求

解了应急组织分配非线性整数规划模型与0-1整数规划模型。

上述文献通过设计不同的精确算法来求解应急组织指派数学规划模型,从而获得最优指派方案。这些精确算法主要包括分支定界法、分支定价法、帕累托优化方法、匈牙利法和列生成等。然而,正如文献[37]提到的,在灾害运作管理实践中,应急指派优化问题具有高度复杂性和随机性特征,具体表现为多层次关系、多救援目标、多约束条件、多应急任务、多应急组织等方面的交叉关联性。因此,在大规模自然灾害背景下,在有限时间内,采用这些精确算法,很难找到此类问题的最优解,且并非都能获得最优解。并且,随着问题规模的增加,精确算法的求解效率逐渐降低,更难找到最优解,甚至是近似最优解或可行解。基于此,学者们尝试引入启发式算法来提高求解效率,寻求此类问题的次优解或满意解。

3.2 求解应急组织指派模型的启发式算法

文献[3, 29]分别设计了启发式算法求解应急(救援)组织指派0-1整数非线性和线性规划模型。Zhang等^[6]采用带精英策略的非支配排序的遗传算法求解救援队伍多阶段分配0-1整数非线性规划模型。Yan等^[13]在借助CPLEX软件的基础上,设计了启发式算法求解救援队伍单目标混合整数规划模型。Ren等^[14]设计了包括遗传算法和粒子群算法的混合启发式算法求解救援队伍分配0-1整数规划模型。Su等^[15]提出了差分进化算法求解救援组织分配多目标整数规划模型。Zhang等^[16]采用非支配排序的遗传算法求解救援队伍分配两阶段随机混合整数规划模型。Lee等^[18]提出了启发式流程框架来求解应急资源联合配置混合整数规划模型。Lei等^[19]设计了滚动优化算法求解应急医疗队伍调度与医疗物资分配0-1整数规划模型。Zheng等^[27]设计了生物地理学优化算法对多救援团队与多救援任务匹配多目标规划模型进行求解。Rolland等^[28]针对应急组织指派0-1整数规划模型,设计了自适

应推理技术。刘艺等^[29]采用启发式算法求解应急组织分配多目标0-1整数线性规划模型。Wang等^[30]提出了两阶段混合启发式算法(包括人工蜂群算法与滚动规划算法)求解应急医疗队伍指派混合整数规划模型。Nayeri等^[31]针对救援组织指派混合整数规划模型,分别设计了模拟退火算法、粒子群算法、模拟退火-粒子群混合算法。

通过梳理文献发现,求解应急组织指派数学规划模型的启发式算法主要包括遗传算法、差分进化算法、模拟退火算法、粒子群算法、滚动优化算法、生物地理学优化算法、自适应推理技术、模拟退火-粒子群混合算法、遗传算法-粒子群混合算法,以及其他启发式算法。与精确算法相比较,启发式算法在求解应急组织指派优化模型中更受青睐。尽管如此,相关成果仍然相对较少。上述成果侧重于运用这些启发式算法求解单层数学规划模型;将其用于求解应急组织指派双层规划模型的研究相对较少。如何设计支持“多准则决策建模、高不确定性和复杂性求解”的高效率启发式算法需进一步研究。

4 结论

(1) 研究结论

通过文献梳理,得出以下几点结论:

1) 与救援物资运输、分配、调度和选址等问题相比较,基于数学规划的应急组织指派优化相关文献相对较少。

2) 聚焦于应急组织分配优化问题,尽管已考虑了组织、任务及其匹配关系等多个关键要素,但对考虑任务顺序的应急组织指派优化问题的关注度仍然不够。

3) 侧重于灾后确定条件下应急组织指派优化问题,对灾前、灾前-灾后不确定条件下的相关问题较少关注。

4) 更多地研究传统视角下考虑准备时间和适用限制的应急组织指派优化问题,融入可持续发展理念、适用限制、准备时间、紧迫程度、工作负荷与疲劳效应的异质应急组织指派优化相关成果仍

相对较少。

5) 大多数成果聚焦于横向“府际”关系视角下应急组织指派单层优化问题, 极少涉及纵向“府际”关系视角下应急组织指派双层优化问题。

6) 大多数学者聚焦于解决同层级决策主体或不同部门在不同方面的利益诉求冲突问题, 极少关注如何平衡不同层级利益相关者在不同维度的利益诉求问题。

7) 已有文献将应急组织指派优化问题, 刻画为关注时间或费用的单目标整数规划模型, 较少将其描述为同时追求与时间、费用和环境等相关的目标函数整体最优的(多目标)整数规划模型。

8) 与精确算法比较, 启发式算法(如遗传算法、粒子群算法)在应急组织指派数学规划模型求解中应用更广泛。

9) 主要将精确算法与启发式算法应用于求解应急组织指派单层单目标/多目标数学规划模型, 将其用于求解双层规划模型的成果较少。

(2) 未来研究方向

1) 模糊环境下任务导向的应急组织指派优化问题研究。大规模自然灾害发生后, 由于受影响区域内的应急组织基地极有可能已被破坏, 在短时间内, 可利用的应急组织数量是模糊的(即无法准确获得)。此外, 应急组织的成员具有独立的思考能力, 幸存者对任务分配方案具有不同的偏好, 不同应急组织拥有的能力/技能也不尽相同, 不同任务的复杂程度也可能不同^[6]。应急组织执行任务所耗时间、所需费用和产生的温室或有害气体的排放量, 不同应急组织执行不同任务所带来的效用, 不同应急组织间的信任程度, 不同应急组织以相同顺序执行任务带来的疲劳程度都是模糊的。此外, 救援活动本身也具有模糊属性。因此, 研究模糊环境下任务导向的应急组织指派优化问题更贴近实际, 既是挑战也是机遇。如何识别与量化应急组织指派活动的模糊特征? 如何构建任务导向的应急组织指派多目标和双层模糊规划模型? 如何将应急组织指派模糊数学规划模型转化为确定型模型? 这

些都是值得深入研究的问题。

2) 任务导向下面向可持续发展的应急组织指派优化问题研究。自联合国颁布了包括《1994 年横滨战略行动计划》和《2015 年可持续发展目标》等在内的纲领性文件后, 学术界开始呼吁将可持续发展理念融入灾害运作管理决策问题中。例如, Cao 等^[1]、曹策俊等^[4]、Haavisto 等^[38]和 Li 等^[39]指出了高效的应急组织指派策略有助于提高救援过程的可持续绩效。Lettieri 等^[40]还强调了应急组织间的错误协作、应急任务与应急组织间的不合理匹配都可能会导致出现资源和时间浪费、人力和财产损失的现象。此外, 不合理的应急组织指派策略还可能会: ① 引发各种社会问题, 影响社会稳定和社会可持续^[1,33]; ② 增加环境压力, 对环境产生有害影响^[1,41]; ③ 增加政府或其他决策主体的财政负担^[1,16]。因此, 将救援过程的可持续发展理念融入应急组织指派优化问题是值得研究的课题。如何运用 OR/MS 方法诠释、理解和界定灾害情境下救援过程的可持续发展? 如何刻画社会、环境和经济维度的可持续发展绩效? 如何将可持续目标与传统应急组织指派优化模型有机融合? 如何构建任务导向下面向可持续发展的应急组织指派多目标与双层规划模型? 上述问题都是未来的主要工作。

3) 集成(即前摄性与反应性)视角下任务导向的应急组织指派优化问题研究。灾前制定应急组织基准救援计划(前摄性视角)^[42-43], 灾后根据实际调整基准救援计划, 制定实时指派方案(反应性视角)^[1,31], 是有效地应对大规模自然灾害的关键任务。然而, 在实践中, 基准救援计划的制定通常未充分考虑灾后可能出现的情景、决策主体也并未足够重视基准救援计划, 加上大规模自然灾害本身的高度不确定性、灾后环境的复杂性, 导致在大多数情况下制定的应急组织实时指派策略是不合理或不恰当的。基于此, 为了提高基准救援计划和实时指派方案的匹配度, 研究集成视角下任务导向的应急组织指派优化问题是重要且迫切需求的。在未来的研究工作中, 致力于解决/回答以下问题: 如何识别

应急组织指派活动中的不确定性因素？如何提取和设计不确定性参数估计方法？如何识别前摄性、反应性视角下决策问题在目标函数、约束条件、变量和参数方面的关联关系？如何建立前摄性或反应性视角下任务导向的应急组织指派优化模型？如何建立集成视角下任务导向的应急组织指派优化模型？

4) 基于建模仿真视角的应急组织指派优化问题研究。大规模自然灾害的突发性、不可复制性等特征，导致不同灾害的应急组织指派策略也具有不可重复/复制性。实证研究方法更多地关注要素间是否相关，并未回答各要素间的关联程度，也未给出要素间的数学关系。为了降低灾害带来的各种损失和提高整体救援效果，采用建模仿真方法/手段，识别灾害响应决策系统中关键要素，量化其关联关系，探究要素间的影响规律，从而为决策主体制定应急组织实时指派方案提供针对性的理论依据。因此，从建模仿真视角，研究应急组织指派优化问题是重要且紧迫的。如何提高建模仿真结果与实际指派方案的匹配度？如何提高应急组织指派优化建模仿真的效率？如何借助新的建模仿真技术(如数字孪生)优化应急组织指派策略？这些都是未来值得研究的问题。

5) 任务导向的应急组织指派优化支撑框架构建。在灾害运作管理实践中，灾害响应决策系统是一个复杂且具有高度不确定性和时变性的系统。为了更深入地研究系统内部结构、剖析任务导向的应急组织指派优化机理，需要识别和提取系统的关键要素及其关联关系，构建任务导向的应急组织指派优化支撑框架。另一方面，已有成果聚焦于应急组织指派模型的构建、求解策略的设计等问题，但很少从根本上回答关键要素表达式建立、模型构建的内在机理。然而，战略层面有效的机理分析对操作层面构建恰当且合理的数学规划模型又至关重要，可为其提供科学的理论依据。如何有序地将这些关键要素有机地联系起来、以及如何有效刻画利益相关者间的横向与纵向“府际”关系、以及如何量化

应急组织间的信任关系又是比较困难的。因此，未来的研究工作需要进一步研究任务导向的应急组织指派优化支撑框架。可结合语义 X 列表理论，抽象、识别与提取系统关键要素及其关联关系；构建包括应急组织清单列表、应急任务清单列表和智能决策代理列表等的应急组织指派优化层次结构模型^[4,10]。

6) 带精英策略的改进与嵌套式遗传算法、模拟植物生长算法设计。尽管国内外学者已设计了不同的精确算法(如分支定界法)与启发式算法(如遗传算法)来求解所构建的应急组织指派优化模型；但仍然需要针对不同的数学规划模型，设计支持“多准则决策建模、高不确定性和复杂性求解”的高效求解算法。例如，针对应急组织指派多目标规划模型，如何设计带精英策略的改进遗传算法、改进模拟植物生长算法？针对应急组织指派双层规划模型，如何分别设计带精英策略且下层采用分支定界法、遗传算法的嵌套式遗传算法？如何分别设计带精英策略且下层采用分支定界法、模拟植物生长算法的嵌套式模拟植物生长算法？上述问题都是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] Cao C J, Li C D, Yang Q, et al. Multi-objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain[J]. Sustainability (S2071-1050), 2017, 9(11): 2103.
- [2] Chen L, Miller-Hooks E. Optimal Team Deployment in Urban Search and Rescue[J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 2012, 46: 984-999.
- [3] Wex F, Schryen G, Feuerriegel S, et al. Emergency Response in Natural Management: Allocation and Scheduling of Rescue Units[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2014, 235(3): 697-708.
- [4] 曹策俊, 李从东, 谢天, 等. 基于语义 X 列表理论的应急响应集成决策优化框架研究[J]. 系统科学学报, 2018, 26(4): 100-105, 117.
Cao Cejun, Li Congdong, Xie Tian, et al. Research on Framework of Integrated Decision Optimization for Emergency Response Based on S-BOX[J]. Journal of

- Systems Science, 2018, 26(4): 100-105, 117.
- [5] Rauchecker G, Schryen G. An Exact Branch-and-Price Algorithm for Scheduling Rescue Units During Disaster Response[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2019, 272(1): 352-363.
- [6] Zhang S W, Guo H X, Zhu K J, et al. Multi-stage Assignment Optimization for Emergency Rescue Teams in the Disaster Chain[J]. *Knowledge-Based Systems* (S0950-7051), 2017, 137: 123-137.
- [7] Galindo G, Batta R. Review of Recent Development in OR/MS Research in Disaster Operations Management[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2013, 230(2): 201-211.
- [8] Zheng Y J, Chen S Y, Ling H F. Evolutionary Optimization for Disaster Relief Operations: A Survey[J]. *Applied Soft Computing* (S1568-4946), 2015, 27: 553-566.
- [9] 曹策俊, 李从东, 杨琴, 等. 模拟植物生长算法在组合优化问题中的应用: 研究进展[J]. *技术经济*, 2017, 36(5): 127-136.
- Cao Cejun, Li Congdong, Yang Qin, et al. Application of Plant Growth Simulation Algorithm in Combinatorial Optimization Problem: study Progress[J]. *Technology Economics*, 2017, 36(5): 127-136.
- [10] 李从东, 曹策俊, 杨琴, 等. BOX 理论在多阶段应急资源调度中的应用研究-以应急响应阶段为例[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(7): 159-165.
- Li Congdong, Cao Cejun, Yang Qin, et al. Application of BOX Theory in Multi-stage Emergency Resource Scheduling-Taking Emergency Response Stage as an Example[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(7): 159-165.
- [11] 宋瑶. 基于动态博弈的智慧城市灾害应急决策研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- Song Yao. Research on the Emergency Decision-making of Disasters in Smart City Based on Dynamic Game Theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [12] 曹策俊, 李从东, 王玉, 等. 大数据时代城市公共安全治理模式研究[J]. *城市发展研究*, 2017, 24(11): 86-92.
- Cao Cejun, Li Congdong, Wang Yu, et al. Governance Mode of Urban Public Safety Risk in Big Data Era[J]. *Urban Development Studies*, 2017, 24(11): 86-92.
- [13] Yan S Y, Shih Y L. A Time-space Network Model for Work Team Scheduling after a Major Disaster[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* (S0253-3839), 2007, 30: 63-75.
- [14] Ren Y P, Tian G D. Emergency Scheduling for Forest Fires Subject to Limited Rescue Team Resources and Priority Disaster Areas[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* (S1931-4973), 2016, 11: 753-759.
- [15] Su Z P, Zhang G F, Liu Y, et al. Multiple Emergency Resource Allocation for Concurrent Incidents in Natural Disasters[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (S2212-4209), 2016, 17: 199-212.
- [16] Zhang C, Liu X, Jiang Y P, et al. A Two-Stage Resource Allocation Model for Lifeline Systems Quick Response with Vulnerability Analysis[J]. *European Journal of Operational Research*(S0377-2217), 2016, 250: 855-864.
- [17] Falasca M, Zobel C. An Optimization Model for Volunteer Assignments in Humanitarian Organizations[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*(S0038-0121), 2012, 46: 250-260.
- [18] Lee K, Lei L, Pinedo M, et al. Operations Scheduling with Multiple Resources and Transportation Considerations[J]. *International Journal of Production Research*(S0020-7543), 2013, 51(23/24): 7071-7090.
- [19] Lei L, Pinedo M, Qi L, et al. Personnel Scheduling and Supplies Provisioning in Emergency Relief Operations[J]. *Annals of Operations Research* (S0254-5330), 2015, 235: 487-515.
- [20] Lassiter K, Khademi A, Taaffe K M. A Robust Optimization Approach to Volunteer Management in Humanitarian Crises[J]. *International Journal of Production Economics* (S0925-5273), 2015, 163: 97-111.
- [21] 张雷, 元昌安, 马璐. 考虑优先权的地震灾害时限应急救援指派模型[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(5): 1439-1447.
- Zhang Lei, Yuan Chang'an, Ma Lu. Time Limit Emergency Rescue Assignment Model of Earthquake Disaster Based on Rescue Priority[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(5): 1439-1447.
- [22] 樊治平, 刘洋, 袁媛, 等. 突发事件应急救援人员的分组方法研究[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(2): 1-7.
- Fan Zhiping, Liu Yang, Yuan Yuan, et al. Study on the Grouping Method for Rescue Workers in the Emergency Rescue[J]. *Operations Research and Management Science*, 2012, 21(2): 1-7.
- [23] 袁媛, 樊治平, 刘洋. 突发事件应急救援人员的派遣模型研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 152-160.
- Yuan Yuan, Fan Zhiping, Liu Yang. Study on the Model for the Assignment of Rescue Workers in Emergency Rescue[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(2): 152-160.
- [24] 曹庆奎, 王文君, 任向阳. 考虑灾民感知满意度的突发事件应急救援人员派遣模型[J]. *价值工程*, 2017(2): 82-85.

- Cao Qingkui, Wang Wenjun, Ren Xiangyang. Emergency Rescue Workers Assignment Model Considering Perception Satisfaction[J]. Value Engineering, 2017(2): 82-85.
- [25] 初翔, 仲秋雁, 曲毅. 基于最大幸福原则的多受灾点医疗队支援指派模型[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 149-154.
- Chu Xiang, Zhong Qiuyan, Qu Yi. Assignment Model of Multiple-Area Post-Disaster Medical Teams Based on Greatest Happiness Principle[J]. System Engineering, 2015, 33(10): 149-154.
- [26] 周荣辅, 王涛, 王英. 地震应急救援队伍派遣及道路重建联合规划模型[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 303-308.
- Zhou Rongfu, Wang Tao, Wang Ying. United Programming Model for Dispatch of Emergency Rescue Teams and Road Reconstruction Under Earthquake Disaster[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 303-308.
- [27] Zheng Y J, Ling H F, Xu X L, et al. Emergency Scheduling of Engineering Rescue Tasks in Disaster Relief Operations and its Application in China[J]. International Transactions in Operational Research (S0969-6016), 2015, 22: 503-518.
- [28] Rolland E, Patterson R A, Ward K, et al. Decision Support for Disaster Management[J]. Operations Management Research (S1936-9735), 2010, 3(1/2): 68-79.
- [29] 刘艺, 邓青, 李从东, 等. 任务驱动的应急资源集成方式与组织过程建模[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(10): 2613-2620.
- Liu Yi, Deng Qing, Li Congdong, et al. Building the Model for the Task-Oriented Emergency Organization in the Management Process[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2015, 35(10): 2613-2620.
- [30] Wang S B, Liu F, Hong Y, et al. Integrated Disaster Medical Assistance Team Scheduling and Relief Supply Distribution[J]. International Journal of Logistics Management (S0957-4093), 2018, 29(4): 1279-1305.
- [31] Nayeri S, Asadi Gangraj E, Emami S. Metaheuristic Algorithms to Allocate and Schedule of the Rescue Units in the Natural Disaster with Fatigue Effect[J]. Neural Computing and Applications (S0941-0643), 2018(10): 1-21.
- [32] Holguin Veras J, Perez N, Jaller M, et al. On the Appropriate Objective Function for Post-Disaster Humanitarian Logistics Models[J]. Journal of Operations Management (S0272-6963), 2013, 31: 262-280.
- [33] Cao C J, Li C D, Yang Q, et al. A Novel Multi-objective Programming Model of Relief Distribution for Sustainable Disaster Supply Chain in Large-scale Natural Disasters[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2018, 174: 1422-1435.
- [34] Lu J, Han J L, Hu Y G, et al. Multilevel Decision-Making: A Survey[J]. Information Sciences (S0020-0255), 2016, 346/347: 463-487.
- [35] Habib M S, Lee Y H, Memon M S. Mathematical Models in Humanitarian Supply Chain Management: A Systematic Literature Review[J]. Mathematical Problems in Engineering (S1024-123X), 2016: 1-20.
- [36] Ozdamar L, Ertem M A. Models, Solutions and Enabling Technologies in Humanitarian Logistics[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2015, 244(1): 55-65.
- [37] Zheng Y J, Chen S Y, Ling H F. Evolutionary Optimization for Disaster Relief Operations: A Survey[J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2015, 27: 553-566.
- [38] Haavisto I, Kovacs G. Perspectives on Sustainability in Humanitarian Supply Chains[J]. Disaster Prevention and Management (S0965-3562), 2014, 23(5): 610-631.
- [39] Li C D, Zhang F S, Cao C J, et al. Organizational Coordination in Sustainable Humanitarian Supply Chain: An Evolutionary Game Approach[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2019, 219: 291-303.
- [40] Lettieri E, Masella C, Radaelli G. Disaster Management: Findings from a Systematic Review[J]. Disaster Prevention and Management (S0965-3562), 2009, 18: 117-136.
- [41] Jaehn F. Sustainable Operations[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2016, 253: 243-264.
- [42] 初翔, 仲秋雁, 曲毅. 大规模伤亡事件应对流程的前摄性调度优化[J]. 运筹与管理, 2014, 23(6): 7-11.
- Chu Xiang, Zhong Qiuyan, Qu Yi. Proactive Scheduling Optimization of Emergency Response in Mass Casualty Incident[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(6): 7-11.
- [43] 何正文, 贾涛, 徐渝. 双目标突发事件应急救援前摄性调度优化[J]. 运筹与管理, 2012, 21(1): 124-130.
- He Zhengwen, Jia Tao, Xu Yu. Proactive Scheduling Optimization of Emergency Rescue with Bi-objective[J]. Operations Research and Management Science, 2012, 21(1): 124-130.