

重大工程应急资源配置及调度研究综述

张静晓^{1*}, 雷渊媛^{1,2}, 施梦洁¹, 张兵³, 于竞宇⁴

1. 长安大学 经济与管理学院, 西安 710061;

2. 西安石油大学 经济管理学院, 西安 710065;

3. 扬州大学 土木与交通学院, 扬州 225127;

4. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009

摘要: 为保障重大工程项目的安全运行与可持续发展, 本文从应急管理视角系统梳理了重大工程应急资源配置及调度的相关研究。围绕应急资源储备、资源优化分配和资源运输调度三个核心问题, 对 2003—2023 年间的国内外文献进行了可视化分析, 并将现有研究成果归纳为铁路、高速公路、城市及水利工程四类典型应用场景。从重大工程的全生命周期出发, 探讨了应急资源配置与调度在不同阶段所展现的需求特点、决策重点及适用方法。构建了重大工程应急资源配置及调度的生命周期研究框架, 以揭示应急管理研究主题从灾后响应向灾前预置及全过程协同优化的演进趋势。研究结果不仅阐明了重大工程各阶段应急资源需求的逻辑, 还为构建重大工程应急保障体系提供了理论基础, 为制定应急预案、优化资源布局以及完善调度机制提供了依据。

关键词: 重大工程; 应急资源; 资源配置; 资源调度; 应急管理

中图分类号: X947

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-16

引言

随着工业化与全球化进程的持续推进, 工程、社会与自然系统之间的相互关联性日益增强, 导致突发

事件的影响在时间和空间上呈现出快速扩散与链式蔓延的显著特征。尤其是当重大工程应急响应滞后时, 不仅会造成巨大的生命和财产损失, 还使得应急管理体系建设面临严峻挑战。在应急管理体系中, 应急资

收稿日期: 2024-10-30; **修回日期:** 2025-11-20

基金项目: 国家社会科学基金项目: 数字化转型背景下中国建筑业高质量发展驱动机制与实施路径研究 (20BJY010); 陕西省社会科学基金项目: 陕西省建筑业数字化转型的实现 (2023R001)

作者简介: *张静晓 (1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为重大工程智能绿色建设与管理、项目管理智能决策、建筑经济与管理。E-mail: zhangjingxiao964@126.com (通讯作者)

雷渊媛 (1991—), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为应急管理、智能决策、能源供应链管理。

施梦洁 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为应急物流。

张兵 (1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工程项目管理。

于竞宇 (1984—) 女, 博士, 副教授, 研究方向为人工智能和云计算环境下的土木工程管理与运营决策。

引用格式: 张静晓, 雷渊媛, 施梦洁等. 重大工程应急资源配置及调度研究综述[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20240119.

ZHANG Jingxiao, LEI Yuanyuan, SHI Mengjie, et al. Review of Emergency Resource Allocation and Scheduling for Megaprojects [J]. Journal of Engineering Studies, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20240119.

源的科学配置与高效调度是快速响应与有效救援的基石，其安排的合理性直接关系到应急行动的整体效果。国内外学者们围绕地震、洪涝、飓风、疫情等典型灾害情境，形成了较为成熟的应急资源储备、资源分配与运输调度研究体系^[1]，为区域性与城市级灾害应对提供了重要的理论与方法支撑^[2]。

重大工程项目因其对国计民生、经济发展、生态环境和社会福祉的深远影响，其重要性不言而喻^[3]。一旦遭遇突发事件，其后果可能极为严重，甚至是灾难性的。因此，作为重大工程应急管理关键一环的应急资源配置及调度的合理与高效性显得尤为重要。在政府、企业、群众等多方主体的共同参与下，通过高效的资源配置与调度，能够满足应急物流、物资、供应链及人员管理的系统性需求，显著增强对灾害、事故等紧急情况的应对与救援能力，确保应急活动的可靠性和公平性^[4]，进而最大限度地降低突发事件带来的损失与影响^[5]。鉴于重大工程项目的复杂特性，需根据其全生命周期——从项目规划、设计、施工到运营四个阶段——有针对性地运用不同的资源配置与调度研究方法。当前，应急资源配置与调度的研究主要聚焦于应急物流系统结构、应急设施选址、资源分配与路径优化等方面，并对知识演化与研究热点进行了可视化梳理^[2,6]。然而，整体而言，仍存在三方面的不足：一是未能从重大工程视角全面审视应急资源需求与调度机制的差异，二是缺乏将应急资源配置与调度研究和重大工程项目管理实践深度融合的理论框架，三是未充分关注多主体协同、复杂系统建模以及数字化、智能化技术在重大工程应急资源配置中的应用研究。

基于上述分析，本文以铁路、公路及水利工程等重大工程基础设施为研究对象，以应急资源配置及调度为核心主线，梳理该领域的研究热点与演化脉络，刻画不同工程场景下资源配置与调度问题的特点，并据此构建面向重大工程全生命周期的应急资源配置及调度理论框架。

1 文献综述

1.1 数据选择

本文从中国知网（CNKI）数据库中遴选了中文核心期刊与 CSSCI 期刊论文，并进一步筛选了 Web of Science 核心数据库中的文献，将文献检索时间设定为 2003—2023 年，文献类型限制为“文章”及“综述”，分别以“应急资源”“应急资源调度”“应急资源配置”“resource allocation”“emergency management”等关键词在文章标题、摘要和关键字中进行中英文文献搜索。在排除了与主题无关的其他学科和研究领域的文章后，进一步对与应急资源配置及调度相关的研究进行了优化选择，聚焦于更详细的主题，包括应急资源分配、资源调度、应急选址和应急响应。随后，通过仔细审阅每篇文章的标题、摘要及内容，排除了采用其他方法的论文，最终精选出 114 篇中文文献和 2042 篇英文文献。

1.2 研究热点可视化分析

关键词共现分析能揭示研究主题间的潜在结构及其随时间的演变特征，是梳理学科发展脉络的关键工具^[6]。基于收集的中英文文献，利用关键词共现网络对领域热点进行分析，以频次为度量标准来衡量关键词的共现关系。所得的关键词共现图谱分别如图 1 和图 2 所示。从这些图谱中可以观察到，应急资源配置及调度相关研究在过去 20 年里呈现出一种显著的演变趋势，即从灾后被动响应逐渐转向灾前主动规划与全过程协同优化。

为了更清晰地阐述该领域的发展轨迹与核心研究内容，依据前文提炼出的高频关键词，特将各研究方向的经典文献进行了整理呈现。考虑到篇幅限制，表 1 仅列出了中英文文献中关键词使用频次位列前三的文献作为示例^[7-26]。

2 应急资源配置与调度的核心研究领域和理论进展

利用文献计量与关键词共现分析方法，可以将应

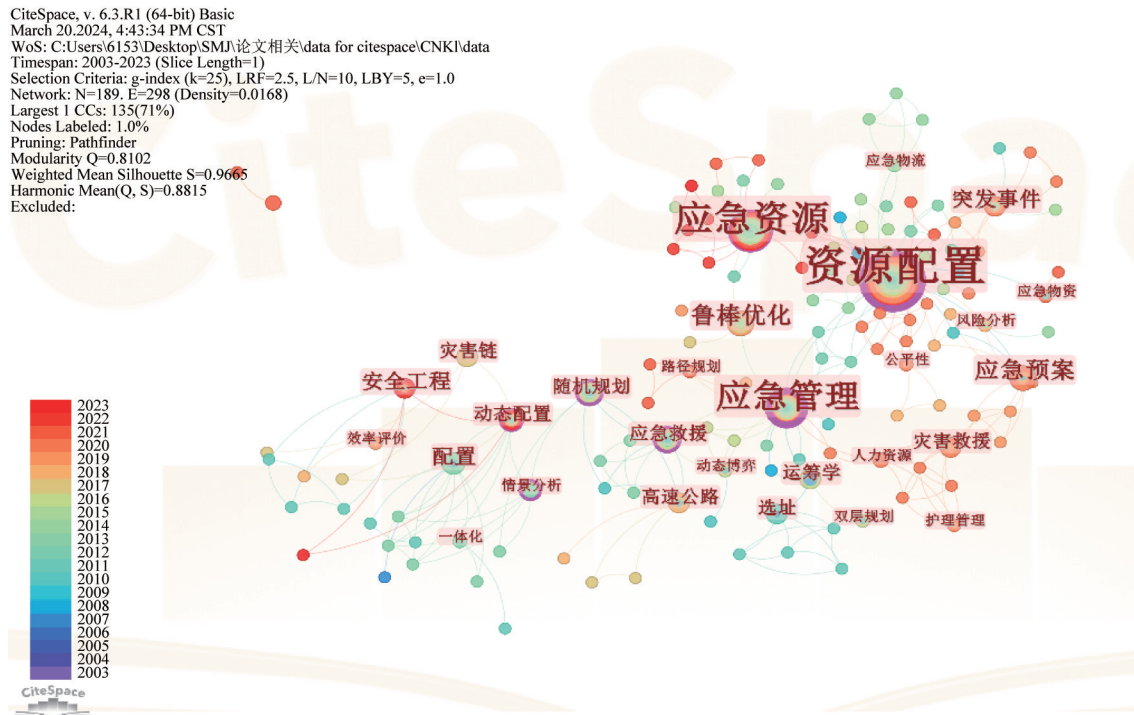


图1 中文文献关键词共现分析图

Figure 1 Keyword co-occurrence analysis chart of Chinese literature

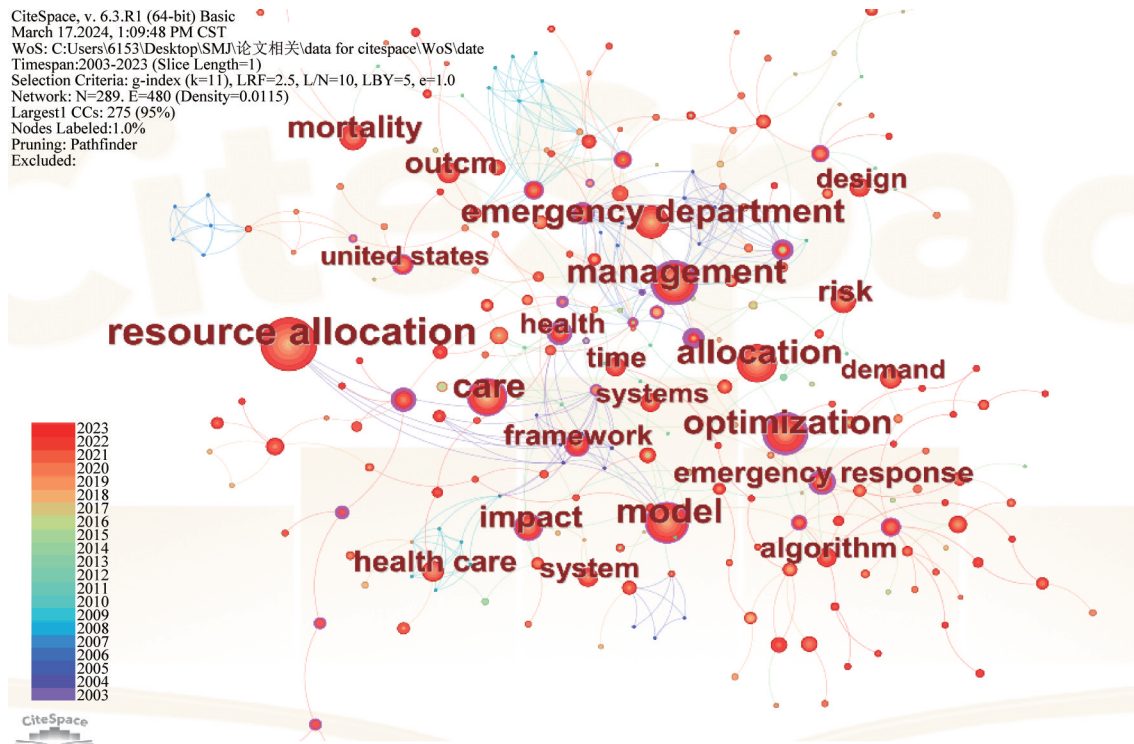


图2 英文文献关键词共现分析图

Figure 2 Keyword co-occurrence analysis chart of English literature

表 1 基于高频关键词的中英文文献分析表

Table 1 Chinese and English literature analysis table based on high-frequency keywords

关键词	使用 频次	初次出 现年份	相关经典文献	研究问题
资源配置	28	2008	基于公平优先原则的多受灾点应急资源配置算法 ^[7]	应急资源优化分配
			应急资源需求周期性变化的选址与资源配置模型 ^[8]	应急资源储备与选址联合
			复杂灾害情景下应急资源配置的随机规划模型 ^[9]	应急资源储备与选址联合、应急资源优化分配
			疫情事件下多灾点应急资源最优化配置研究 ^[10]	应急资源调度优化
应急资源	16	2011	面向非常规突发事件的应急资源合作博弈调度 ^[11]	应急资源运输调度
			多类应急资源配置的鲁棒选址-路径优化 ^[12]	应急资源优化分配
			考虑感知满意度的多灾点应急资源分配模型 ^[13]	应急资源储备与选址联合、应急资源优化分配、应急资源运输调度
应急管理	13	2008	我国应急物资储备制度的完善 ^[14]	应急物资储备
			一种多受灾点的灾害应急资源分配模型 ^[15]	应急资源优化分配
			道路修复条件下灾后应急资源配送 LRP 研究 ^[16]	应急设施选址、应急资源运输调度
resource allocation	335	2004	Pre-positioning of emergency supplies for disaster response ^[17]	应急资源储备与选址联合
			Preparation and scheduling system of emergency supplies in disasters ^[18]	应急物资储备、应急资源运输调度
			A two-stage optimization model for emergency material reserve layout planning under uncertainty in response to environmental accidents ^[19]	应急资源储备与选址联合、应急资源优化分配
			A multi-stage emergency supplies pre-allocation approach for freeway black spots: A Chinese case study ^[20]	应急资源优化分配
model	185	2004	A bi-objective robust model for emergency resource allocation under uncertainty ^[21]	应急资源优化分配
			Optimization on emergency resources transportation network based on bayes risk function: A case study ^[22]	应急资源运输调度
			The optimization and coordination of multi-layer recruitment network for social emergency resources ^[23]	应急资源储备方式
allocation	166	2013	A multi-agent genetic algorithm based on natural coding for emergency resources scheduling problems ^[24]	应急资源调度优化
			Multi-resource scheduling and routing for emergency recovery operations ^[25]	应急资源调度优化
			Emergency resource storage facility location problem considering domino effect after a disaster ^[26]	应急资源储备与选址联合

急资源配置及调度的研究领域精炼为三大相互关联的核心方向：应急资源储备、应急资源优化分配以及应急资源运输调度。这三类问题分别对应着灾前准备、灾中分配与灾后响应阶段，它们构成了应急资源管理体系中的关键环节，并在不同应用情境中展现出一种相互衔接、逐步深化的研究趋势。本文在既有文献的基础上进行归纳与提升，着重梳理了各研究方向的理论内涵、主要贡献与典型方法。

2.1 应急资源储备问题研究

作为灾前准备的关键一环，应急资源储备的核心任务在于确保在灾害发生后的初期救援阶段，能够拥有充足且适用的物资与装备。在现有研究中，对这一问题的关注主要集中在三个方面：一是储备数量与种类决策，二是储备方式选择，三是选址与储备的联合规划。

在研究储备数量与种类决策时，通常以灾后初期

的保障能力为出发点, 探讨在需求不确定性条件下的合理库存规模, 以满足灾害初期的救援需求^[27-29]。在此基础上, 研究逐步引入情景模拟与随机需求模型, 基于飓风预测开展随机库存控制^[30], 从物资的互补性出发构建以效用最大化为目标的储备量模型^[31]。这表明储备决策正从静态、经验化走向量化与不确定性分析。在储备方式选择上, 近年来政府与企业协同储备的模式受到了越来越多的关注。在传统的政府实物储备基础上, 引入企业合同储备、协议储备等方式, 以提高供给灵活性, 构建实物储备-合同储备的二级库存模型^[32], 并分析政府-企业合作机制在应急供给中的作用。同时, 通过合作博弈讨论政府预付比例对企业参与储备意愿的影响^[33]。这些研究展示了储备体系从政府单一供给向多主体协同供给演化的趋势^[34]。在选址与储备联合优化方面, 鉴于应急设施的位置选择与资源分配之间的高度耦合性, 越来越多的研究将两者纳入统一框架进行联合优化^[35]。选址-储备联合模型常涉及多场景、随机需求、周期波动等复杂条件, 并通过鲁棒优化、情景分析等方法进行求解^[36]。多场景预置模型有效解决了灾害信息不确定性条件下的设施布局问题^[37]; 将需求周期性变化纳入选址-配置决策, 提升了应急储备布局的适应性^[8]。此类研究推动储备问题从单点决策向系统性、前瞻性规划发展^[38]。综上所述, 应急资源储备研究已从数量与成本决策扩展至系统优化, 为应急资源分配与调度奠定了基础。

2.2 应急资源优化分配问题研究

应急资源分配作为一种独特的资源分配问题, 其关键在于如何高效地将储备资源调配至需求地点, 以满足紧急需求^[39]。在回顾相关研究文献时, 依据模型目标的不同, 可以将其划分为两大类: 一类是效能导向模型, 这类模型专注于分析资源分配策略对受影响群体在成本控制、响应速度或减少伤亡等方面的实际效果^[40]; 另一类则是公平性考量模型, 它强调在资源分配过程中的公正性及其对不同需求主体间效用感知的影响, 这类模型设计了一种基于偏好序的效用函数, 并利用完全信息非合作博弈模型来描绘多事故的资源分配过程^[41]。层次分析法作为一种常用的定

性和定量分析的决策方法, 在此类模型中得到了广泛应用。常用的决策因素包括受灾点的损害程度^[42]、灾民的心理感知^[43]等。这两类模型分别体现了应急资源分配研究中对于效率提升与促进公平的不同侧重点。从总体趋势来看, 分配研究已从早期以效率为主的单目标模型, 逐步发展为兼顾效率和公平的综合优化模型, 并逐渐引入博弈论、效用理论和群体决策等方法, 体现出应急管理从工程导向向综合治理的拓展。

2.3 应急资源运输调度问题研究

运输调度在应急响应阶段扮演着至关重要的角色, 它涉及路径选择、运输方式决策、车辆调度以及多资源协同等复杂问题, 其优化目标通常具有强烈的时间敏感性和网络依赖性。相关研究可大致分为以下四类。第一类研究专注于成本最小化, 通过将运输成本、库存成本、车辆使用成本等纳入统一的优化框架, 以实现灾后运输总成本最小化和受灾人群最大覆盖为目标^[44], 决策目标为最小化物资存储费用及运输等费用^[45]。第二类研究则聚焦于时间最短化, 以最短响应时间、最小化最大到达时间或平均到达时间为目标。从公平的角度出发, 提出了以最小最大的抵达时间和最小的平均到达时间作为目标函数^[46], 并选择以调度总时间最短为优化目标^[47]。第三类研究关注于需求满足最大化, 以所有时段内未满足的应急物资量最小为目标, 强调确保不同区域的需求能够被尽量满足^[29]。第四类研究则关注多目标综合, 将时间、成本、覆盖率、路径风险等作为复合目标, 形成综合性优化模型。该模型考虑了路径选择的重要性以及运输路网损害导致的运输时间变化^[48], 并以物资对受灾地区的覆盖和总运输时间作为决策目标^[49]。

虽然已有大量关于运输调度的研究, 但大多研究工作仍然基于资源充足的假设, 但在现实应急阶段, 常面临资源短缺和需求不确定等复杂问题。因此, 一个能够结合储备、分配、调度全流程的多目标调度模型, 正逐渐成为当前研究的最新趋势。

2.4 应急资源配置及调度应用情景分析

应急资源配置及调度的应用场景涵盖了自然灾

害、事故灾害、社会安全和公共卫生等多个领域，主要体现在铁路、高速公路、城市与水利工程四类典型情景。

2.4.1 铁路应急 铁路工程因其线路固定、区段跨度大、运行条件复杂以及高度依赖专业化设备等特性，导致了铁路应急资源配置与调度呈现出网络刚性强、响应链条长的特点。围绕资源种类繁多、设备不可替代、运输方式受限等关键问题，相关研究深入展开。学者们在对应急资源进行分类时，强调了救援工作不仅需要铁路内部各应急力量的协同作战，也离不开铁路外部社会资源的支持^[50]，据此将应急资源划分为消耗性资源和非消耗性救援设备^[51]。研究特别关注资源的独特属性，如需求的突发性、供应的依赖性以及时效的约束性等^[52]。

铁路应急资源救援点选止不仅受线路结构影响，还需考虑双线和多线铁路的瓶颈区段、安全冗余与最优覆盖。典型研究包括基于加权区段的重要性指标建立布局模型^[53]，以及基于路段化简与分支定界搜索的铁路储备点选址研究^[54]。

铁路应急资源调配，这一过程贯穿于铁路运输的各个环节，其核心在于针对各种突发的紧急状况，确保运输的安全与效率。需要根据铁路系统规模宏大、运输效率高的特性，以及灾害信息的不确定性、路网可能遭受的损毁等复杂情况，对人力、物资、设施等救援资源进行精准、高效的分配与调度。主要优化目标依旧是最大限度地缩短应急响应时间^[55]，同时，还需要将路网状况的不确定性和资源的有限性纳入考量^[56]。从更广阔的视角来看，铁路应急研究正逐步从对单一线路的优化，向全路网的协同响应、实时监测以及数字孪生技术驱动的智能调度方向迈进。

2.4.2 高速公路应急 高速公路应急管理受到节点稀疏、通道封闭和交通流密集三大因素的共同制约，其资源配置与调度需应对道路通行受限、交通状态动态变化及救援车辆可达性低等挑战。在研究此问题时，以应急响应时间最短作为最重要的优化目标^[57]。同时，鉴于高速公路的专用性和封闭性，救援车辆的储备与指派^[58]以及在不确定信息下保持应急的可持续性^[59]也是高速公路应急设施选址时的重要考量因素。

与铁路不同，高速公路的应急需求与交通流量紧

密相关，因此大量研究通过分析交通事故历史数据与流量数据来构建预测模型，并运用案例推理、机器学习、深度学习等方法来提高需求预测的准确性^[60]。在救援车辆调度中，需考虑事故引发的拥堵及道路阻断情况，结合动态交通状态进行路径规划，以避免出现“最近设施无法到达”的反向调度问题^[61]。展望未来，高速公路应急管理有望依托智慧高速的车路协同感知能力，通过交通仿真驱动的优化模型以及无人机-地面车辆协同救援等手段，进一步提升响应能力^[62]。

2.4.3 城市应急 城市场景具有人口密度高、设施高度密集、多类风险耦合及需求高波动性等典型特征，使得应急资源配置与调度呈现显著的复杂系统属性。在选址研究时，需综合考虑城市空间结构、路网分布与节点中心性，并利用网络中心性方法优化城市轨道交通救援站点的布局，这体现了复杂空间结构对选址模型的影响^[63]。城市应急资源配置一般分为静态配置和动态调整两个阶段。静态配置侧重于初始储备规模的合理性，而动态调整则需根据事故的演化、人员的流动和风险的扩散进行实时调度^[64]。鉴于城市灾害的连续演化性，现有研究逐渐引入了动态优化、强化学习、多源数据融合等方法，以提升调度策略的实时适应性。展望未来，城市应急管理将更加依赖于多灾种、多主体、多阶段的协同模型，并借助数字孪生城市、智能感知设备与实时数据系统构建动态应急决策平台，以实现对各类灾害的快速响应与有效管理。

2.4.4 水利工程应急 水利工程应急资源管理面临水文、水力、结构特性和地形等多重因素的制约，展现出工程结构性风险与环境动态性风险并存的特点。在应急方案的制定与决策过程中，需同时满足泄洪规律、库水位调控、安全监测等水工条件的要求，这使应急方案不仅依赖于物资调配，而且必须与水利工程运行规律紧密结合^[65]。为评估水利工程的应急能力，常采用多指标体系，如G1-灰色评价方法，该方法在施工期应急能力评估中应用，用以识别不同阶段的风险承受能力^[66]。在资源调度方面，研究显示出明显的多层次结构特征：上层负责总体资源布局，而下层则通过工程安全状态的约束来优化物资到位时间及资源使用策略^[67]。鉴于水利工程事故的不确定性与

模糊性, 部分研究引入了区间直觉模糊、TODIM等多属性决策方法, 以提升方案排序的合理性^[68]。未来的研究方向主要集中在资源配置过程的耦合, 以及利用知识图谱、机器学习辅助的智能应急系统建设, 旨在提升方案生成的自动化与智能化程度。

3 重大工程应急资源配置及调度的研究框架

3.1 理论框架构建

应急资源配置与调度的复杂性体现在其作为多目标、多主体、多情境交织的体系, 其内在逻辑由实现

目标、参与主体、情境约束以及方法体系等众多因素共同作用。通过2节中对其研究内容与热点进行了梳理, 可进一步构建一个涵盖重大工程全生命周期的理论框架, 如图3所示。此框架旨在填补因现有研究过分集中于灾种、行业或方法, 而忽视对重大工程系统化视角的不足。

应急资源配置与调度的紧迫性常常要求政府与公众的协同合作, 以促进突发事件的有效管理。这一过程涉及对物流、供应链、物资及人员的周密管理, 各要素间紧密相连、相互影响, 共同为达成应急管理目标奠定基石。当前, 应急资源配置与调度的目标可大

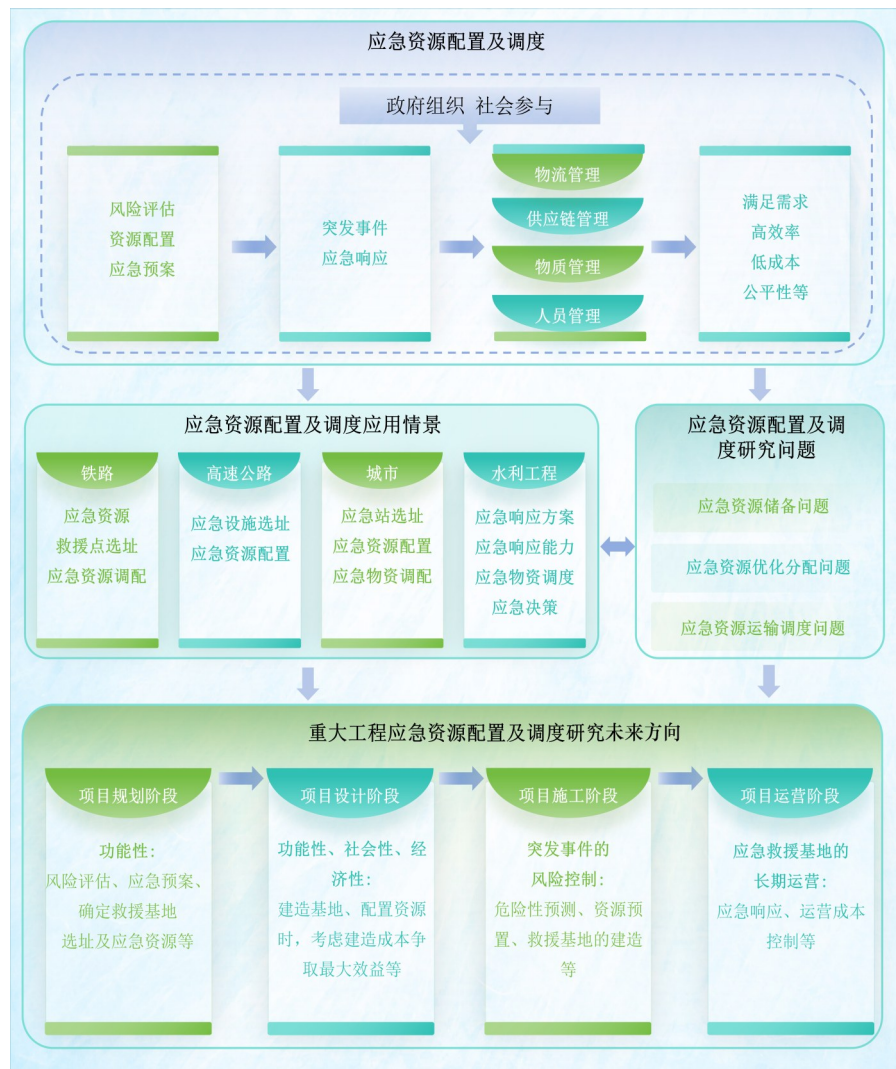


图3 重大工程应急资源配置及调度理论框架图

Figure 3 Theoretical framework for resource allocation and dispatch for major works emergencies

致划分为两大类：一类是功能属性，如响应速度、资源可及性、公平性和灵活性，具体目标涵盖覆盖优化、救援便捷性、资源分配策略及动态调度等；另一类是经济与社会属性，它综合考量成本控制、社会公平及生命财产安全等关键需求。在不同应用场景下，研究问题的切入点和解决方案呈现出显著的差异。

重大工程具有投资规模大、复杂性高、建设周期长等特点，针对其规划、设计、施工、运营四个建设阶段，其应急资源配置及调度的目标也具有特殊性。针对各个阶段不同的应急需求，对重大工程应急资源配置及调度的目标问题匹配、情境适用性、问题有效性展开探讨，能够有效揭示重大工程应急资源配置及调度机制，对重大工程应急管理体系的完善提供理论支撑。

本文所构建的理论框架具有广泛的普适性，能够为重大工程在各种应急管理实践中的分析提供坚实的理论基础。在运营阶段，应急管理核心是保障应急基地与资源体系的持续高效运作。考虑到公路工程具有线性走向和强连通性的特点，其应急资源调度策略通常采用路径最短化原则，以实现快速响应。例如，2019年江苏盐城沈海高速发生的重大交通事故，由于多车连环相撞导致道路部分路段严重堵塞，鉴于公路的线性延伸特性，救援路线的规划便依据距离远近来优化^[69]。相比之下，铁路工程因线路固定且包含特殊工程结构，在应急资源调度时需兼顾铁路线路的固定特性和专业性要求。以2020年京广铁路某段山体滑坡导致火车紧急制动的事故为例^[70]，救援工作主要由临近铁路工务段的工人执行，且部分救援工具如起道机、道尺等专业工具发挥了关键作用。与此同时，水利工程因与水力学和水文紧密相关，须大规模土石方工程且基础处理要求高，长期运行维护需求特殊，其应急资源调度要以水利工程功能（防洪、灌溉、发电等）、水文状况，以及工程结构的稳定性要求进行。以2019年南方某大型水库在雨季面临超警戒水位威胁为例^[71]，水库管理部门首先要根据水库的水力学特性和设计防洪标准来调度泄洪设施，同时调度水库闸门控制系统相关人员以及大坝安全监测人员大坝进行实时监测和控制。

3.2 未来研究方向

面向重大工程的规划、设计、施工和运营四个阶段，应急资源配置与调度需求呈现明显差异。本文结合情境类型与研究问题，从阶段目标、关键情境与应用要点三个维度展开深化阐述，以界定未来研究的重点方向。

3.2.1 项目规划阶段 在重大工程项目的规划阶段，首要任务是完成一系列诸如可行性研究、方案比选、投资估算以及风险识别等的关键工作。因此，应急资源配置与调度的核心使命在于构建一个面向潜在风险的前置性的布局策略。此阶段应将应急资源体系的功能性置于首位，涵盖风险识别、应急预案的编制、救援基地的选址以及物资储备的宏观布局^[72]。

具体地说，在管理责任范围上，针对那些位于复杂艰险地区的工程项目，如公路、铁路及桥梁等建设，鉴于其工程横跨的广阔区域和涉及的众多管辖主体，应考虑明确划分工程建设范围内的防灾应急分区，并明确应急物资的类别及需求量，以实现应急响应的充分覆盖和协调^[73]。在工程实施条件方面，应充分调查区域内的地形、环境、交通、通信等情况，对自然条件与基础设施进行有效评估，预测项目建设过程中可能存在的各种风险，确保满足应急物资的基本需求，提高应急响应的可靠性与便捷性安全性。在资源与人员配置方面，明确重大工程区域内有关人员、物资、企业等应急实体主体的分布情况，进行有效的应急需求预测，确定物流、仓储、医疗等应急设施的规模以及位置，充分满足突发事件中的人员应急需求，确保项目的平稳进行和项目相关人员生命财产安全。由于规划阶段缺乏精细化工程数据，应急资源布局更多依赖情景模拟与宏观预测，因此未来研究可进一步探索跨情景、多灾种、多主体的协同规划方法，以提升前置预置的科学性与适应性。

3.2.2 项目设计阶段 在设计阶段，应急资源配置及调度应被系统性地嵌入工程方案中，以体现从规划层面的方向性布局向可实施层面的工程化配置的过渡。此阶段需在功能性、经济性与社会性目标之间实现综合平衡，通过将应急设施选址、物资储备和工程布局进行协同设计，来提升方案的整体韧性。例如，在复

杂地形地区的铁路工程设计中,工程方案内需同步配置避难点、医疗站、通信设施及生活保障类仓储设施,并针对极端天气与地质灾害制定专业装备的储备方案。同时,由于此阶段掌握了施工组织、人员结构、物资需求与运输路线等关键数据,因此可以在应急资源规模、建设成本及维持成本之间开展优化研究,从而提高应急体系对未来突发场景的适应性。未来研究可进一步探索如何将工程设计参数与应急响应模型进行耦合,以形成具备可验证性、可迭代优化能力的工程设计-应急保障联合决策体系。

3.2.3 项目施工阶段 施工阶段是重大工程风险最为集中的时期,突发事件的不可预测性也达到高峰,导致应急资源需求呈现出高度动态化的特点。鉴于此,本阶段的应急资源配置与调度工作需着重于施工现场突发事件的风险控制与快速响应能力的提升,这涵盖了施工人员的安全保障、对危险作业点的实时监测,以及应急物资与装备的灵活布设等关键环节。

对于像公路、铁路这样施工范围广泛的大型工程,应将视线扩展至项目的整体建设流程,依据项目执行期间的人员资源需求与潜在危险性预测,灵活决定应急资源的储备与调度策略。通过动态选址规划,科学地配置资源存储地点与人员驻守位置,以确定应急服务站和医疗站的流动点位。同时,对于项目施工中存在的地形、灾害威胁,如易滑坡地区、隧道渗水、地震等因素威胁施工人员安全和项目进度的,应在合理地点设置专门的撤离场所,存储相关的应急物资和设备,安排医疗服务点等,有效避免二次伤害,将整个项目的停工时间控制在最短范围内,避免更大损失。未来研究可重点发展基于鲁棒优化、随机规划与实时数据驱动的动态调度方法,以实现应急资源在不同施工情境下的高效协同,从而保障项目的安全推进与工期控制。

3.2.4 项目运营阶段 运营阶段强调应急体系的长期稳定性、资源利用效率以及社会服务质量。此阶段,应急资源配置与调度的设计需平衡经济与社会性目标。面对重大工程在运营中可能遭遇的交通事故、设备故障、极端灾害等风险,须在风险评估的基础上,定期调整应急基地布局与资源储备规模。例如,在高原公路运营中,须特别关注地质灾害和低氧环境下的

救援需求,通过动态预测调整医疗与维护站点的数量,并补充相应的救援物资^[62]。同时,在运营成本控制方面,应充分利用区域内的企业、基础设施和人力资源,通过社会协同来降低应急体系的长期运行负担。未来研究应关注如何利用大数据、需求预测与智能调度技术实现应急资源的按需配置、实时调度和动态更新,从而提高运营期应急体系的韧性与可持续性。

3.2.5 挑战与改进方向 重大工程应急资源配置及调度仍面临数据整合难、系统建模复杂、技术集成度不足等问题。由于异源数据格式与标准不统一,导致跨部门、跨地区的数据共享与整合成为难题,因此,未来有必要推进区域级工程应急数据平台的建设,以促进数据的高效流通与利用。重大工程应急体系具有多主体、多过程、多约束耦合特征,传统建模方法难以全面表达系统行为,需发展适用于工程场景的综合性智能模型,如融合列车安全、旅客保障与救援调度的铁路应急模型。当前应急技术体系尚未实现深度集成,物联网、AI、大数据、GIS等技术在实际应急系统中存在融合壁垒,未来应构建多技术深度融合的智能化应急调度系统,实现监测、预测、决策与执行的闭环联动,以提升应急响应的效率与准确性。

4 结论

作为横跨工程管理与应急管理的重要交叉议题,重大工程应急资源配置及调度研究不仅关乎工程建设安全与运营韧性,也体现了国家治理体系和治理能力现代化的内在要求。本文在系统文献梳理与结构化分析的基础上,结合重大工程“规划-设计-施工-运营”全生命周期特征,将传统应急资源研究的知识体系与重大工程管理实践进行结构化融通,形成了重大工程应急资源配置及调度的理论框架,并进一步识别了未来的关键研究方向。主要研究结论如下:

(1) 应急资源配置及调度研究呈现出由灾后被动调度,向灾前主动规划,再向全过程协同优化的演化趋势。文献共现分析表明,该领域研究已进入快速发展期,热点集中于应急资源优化配置与调度方法,关注点从单一成本或时间目标逐步转向需求不确定性刻

画、多目标权衡、行为与感知因素建模、跨主体协同机制等方向,实现了从静态、局部优化向动态、系统化协同优化的理论升级。

(2) 本文提出的理论框架,实现了工程管理与应急管理研究融合。通过结合重大工程规划、设计、施工与运营的阶段特征,构建了应急资源目标、情境条件与决策逻辑的匹配关系,形成了重大工程应急资源配置及调度的普适性框架。该框架明确了不同阶段应重点关注的应急资源问题,从规划、设计、施工到运营,为工程系统韧性构建提供可操作的理论支撑。

(3) 未来研究应聚焦数据、模型和技术协同三类核心挑战,构建重大工程应急资源配置及调度的综合智能化体系。重大工程场景复杂,导致应急资源数据异构,系统建模需要同时考虑多目标,技术上仍存在物联网、GIS、AI与调度系统之间的集成壁垒。未来应重点推进多源数据共享平台建设、开展跨因素耦合模型研究,并强化智能感知、智能预测与智能调度之

间的闭环联动。

综上所述,本文的价值不仅在于文献回顾,也在于通过跨学科整合、结构化框架构建与生命周期嵌入式分析,为重大工程应急资源配置及调度研究提供了新的理论视角与研究路径。未来工作可在典型工程案例中验证与迭代该框架,进一步深化主体协同机制与技术集成等方面的研究,实现理论与方法、实践的协同演进,推动重大工程应急管理体系的科学化、精细化与智能化发展。然而,本文构建的框架在“主体协同机制”和“法律、预案依据适用性”等理论深化方面存在局限,且本框架作为首次尝试,其普适性主要体现在宏观结构和关键要素关联上,而非对各阶段极度差异化细节的深度刻画。未来将通过其在具体重大工程项目的情况进一步完善与深化该研究框架,有效指导此类重大工程应急资源配置及调度问题的工程实践。

参考文献

- [1] Timbie J W, Ringel J S, Fox D S, et al. Systematic review of strategies to manage and allocate scarce resources during mass casualty events[J]. *Annals of Emergency Medicine*, 2013, 61(6): 677-689.e101.
- [2] Caunhye A M, Nie X F, Pokharel S. Optimization models in emergency logistics: A literature review[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(1): 4-13.
- [3] 杨琳, 罗鄂湘. 重大工程项目社会风险评价指标体系研究[J]. *科技与管理*, 2010, 12(2): 43-46.
Yang L, Luo E X. Study on social risk indicator system for large project[J]. *Science-Technology and Management*, 2010, 12(2): 43-46.
- [4] Wang Z, Leng L L, Ding J J, et al. Study on location-allocation problem and algorithm for emergency supplies considering timeliness and fairness[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109078.
- [5] 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*, 2015, 22(3): 503-518.
- [6] 高婧琦, 俞添沅, 张永宝, 等. 安全与应急领域高质量论文可视化分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, 20(1): 30-36.
Gao J Q, Yu T L, Zhang Y B, et al. Visual analysis on high-quality papers in safety and emergency fields[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(1): 30-36.
- [7] 王苏生, 王岩. 基于公平优先原则的多受灾点应急资源配置算法[J]. *运筹与管理*, 2008, 17(3): 16-21.
Wang S S, Wang Y. Emergency resources allocation among multiple disaster places under fair priority principle[J]. *Operations Research and Management Science*, 2008, 17(3): 16-21.
- [8] 许建国, 池宏, 祁明亮, 等. 应急资源需求周期性变化的选址与资源配置模型[J]. *运筹与管理*, 2008, 17(1): 11-17.
Xu J G, Chi H, Qi M L, et al. An optimal model of location and configuration for emergency resource based on varied periodic demands[J]. *Operations Research and Management Science*, 2008, 17(1): 11-17.
- [9] 葛洪磊, 刘南. 复杂灾害情景下应急资源配置的随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3034-3042.
Ge H L, Liu N. A stochastic programming model for relief resources allocation problem based on complex disaster scenarios[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3034-3042.

- [10] 王付宇, 汤涛, 李艳, 等. 疫情事件下多灾点应急资源最优化配置研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2021, 18(1): 53-62.
Wang F Y, Tang T, Li Y, et al. Study on optimal allocation of emergency resources in multiple disaster sites under epidemic events[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2021, 18(1): 53-62.
- [11] 杨继君, 吴启迪, 程艳, 等. 面向非常规突发事件的应急资源合作博弈调度[J]. 系统工程, 2008, 26(9): 21-25.
Yang J J, Wu Q D, Cheng Y, et al. Cooperative game scheduling of relief resources for unconventional emergency[J]. Systems Engineering, 2008, 26(9): 21-25.
- [12] 彭春, 李金林, 王珊珊, 等. 多类应急资源配置的鲁棒选址-路径优化[J]. 中国管理科学, 2017, 25(6): 143-150.
Peng C, Li J L, Wang S S, et al. Multiple relief resources robust location-routing optimization[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(6): 143-150.
- [13] 王旭坪, 董莉, 陈明天. 考虑感知满意度的多受灾点应急资源分配模型[J]. 系统管理学报, 2013, 22(2): 251-256.
Wang X P, Dong L, Chen M T. Multiple-area post-disaster resource distribution model considering perception satisfaction[J]. Journal of Systems & Management, 2013, 22(2): 251-256.
- [14] 张红. 我国应急物资储备制度的完善[J]. 中国行政管理, 2009(3): 44-47.
Zhang H. Improvement of emergency materials reserves system in China[J]. Chinese Public Administration, 2009(3): 44-47.
- [15] 曾敏刚, 崔增收, 李双. 一种多受灾点的灾害应急资源分配模型[J]. 工业工程, 2010, 13(1): 85-89.
Zeng M G, Cui Z S, Li S. A novel model for resource assignment among multiple disaster places in emergency management[J]. Industrial Engineering Journal, 2010, 13(1): 85-89.
- [16] 王晶, 曲冲冲, 易显强. 道路修复条件下灾后应急资源配送LRP研究[J]. 运筹与管理, 2017, 26(12): 77-82.
Wang J, Qu C C, Yi X Q. Research on location-routing problem in emergency resource delivery based on the road repair[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(12): 77-82.
- [17] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[C]//2006 IEEE International Symposium on Technology and Society. Queens, NY, USA. IEEE, 2007: 1-9.
- [18] Liu J, Xie K F. Preparation and scheduling system of emergency supplies in disasters[J]. Kybernetes, 2015, 44(3): 423-439.
- [19] Liu J, Guo L, Jiang J P, et al. A two-stage optimization model for emergency material reserve layout planning under uncertainty in response to environmental accidents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 310: 30-39.
- [20] Luan S L, Yang Q F, Jiang Z T, et al. A multi-stage emergency supplies pre-allocation approach for freeway black spots: A Chinese case study[J]. PLoS One, 2020, 15(10): e0240372.
- [21] Hu C L, Liu X, Hua Y K. A bi-objective robust model for emergency resource allocation under uncertainty[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(24): 7421-7438.
- [22] Zhu C F, Fang G, Wang Q R. Optimization on emergency resources transportation network based on Bayes risk function: A case study[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 5030619.
- [23] Meng Y P. The optimization and coordination of multi-layer recruitment network for social emergency resources[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 130: 50-61.
- [24] Wu H L, Liu J. A multi-agent genetic algorithm based on natural coding for emergency resources scheduling problems[C]//2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2016: 2706-2711.
- [25] Bodaghi B, Shahparvari S, Fadaki M, et al. Multi-resource scheduling and routing for emergency recovery operations[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 50: 101780.
- [26] Chowdhury H T, Ghosh S, Mahamud S, et al. Emergency resource storage facility location problem considering domino effect after a disaster[J]. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2023, 13(4): 365-377.
- [27] Santoso T, Ahmed S, Goetschalckx M, et al. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(1): 96-115.
- [28] Van Wyk E, Bean W L, Yadavalli V S S. Modelling of uncertainty in minimising the cost of inventory for disaster relief[J]. The South African Journal of Industrial Engineering, 2012, 22(1): 23-34.
- [29] Ozbay K, Ozguven E E. Stochastic humanitarian inventory control model for disaster planning[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2022(1): 63-75.
- [30] Taskin S, Lodree E J. Inventory decisions for emergency supplies based on hurricane count predictions[J]. International Journal of

- Production Economics, 2010, 126(1): 66-75.
- [31] 徐寅峰, 张敏娇, 余海燕, 等. 基于效用替代率的物资储备量模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 270-275.
Xu Y F, Zhang M J, Yu H Y, et al. Model and algorithm of materials inventory based on substitution rate[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(2): 270-275.
- [32] 包玉梅. 突发公共事件应急物资储备策略研究[J]. 科技信息, 2008(34): 76-78.
Bao Y M. Research on emergency material reserve strategies for public emergencies[J]. Science and Technology Information, 2008(34): 76-78.
- [33] 丁斌, 桂斌. 基于合作博弈的预付条件下应急物资库存策略[J]. 运筹与管理, 2011, 20(3): 60-65.
Ding B, Gui B. On emergency material inventory strategy under pre-payment based on cooperative game[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(3): 60-65.
- [34] 谢如鹤, 邱祝强. 论应急物流体系的构建及其运作管理[J]. 物流技术, 2005, 24(10): 78-80.
Xie R H, Qiu Z Q. Discussion on the construction and operating management of emergency logistics system[J]. Logistics Technology, 2005, 24(10): 78-80.
- [35] Balcik B, Beamon B M, Smilowitz K. Last mile distribution in humanitarian relief[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2008, 12(2): 51-63.
- [36] Mete H O, Zabinsky Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 126(1): 76-84.
- [37] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(4): 521-534.
- [38] Luss H. On equitable resource allocation problems: A lexicographic minimax approach[J]. Operations Research, 1999, 47(3): 361-378.
- [39] Arora H, Raghu T S, Vinze A. Resource allocation for demand surge mitigation during disaster response[J]. Decision Support Systems, 2010, 50(1): 304-315.
- [40] 于辉, 刘洋. 应急物资的两阶段局内分配策略[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 394-403.
Yu H, Liu Y. Two-stage online distribution strategy of emergency material[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(3): 394-403.
- [41] 张婧, 申世飞, 杨锐. 基于偏好序的多事故应急资源调配博弈模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(12): 2172-2175.
Zhang J, Shen S F, Yang R. Preference-order-based game modeling of multiple emergency resource allocation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(12): 2172-2175.
- [42] 曾敏刚. 基于LRP模型的灾害应急物流研究[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2009, 23(2): 42-45.
Zeng M G. Emergency logistics of natural disaster based on LRP model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2009, 23(2): 42-45.
- [43] 朱建明, 王瑞. 灾害救援中基于民众心理感知的应急物资多阶段分配问题研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 5-10.
Zhu J M, Wang R. Study on multi-stage distribution of emergency materials in disaster rescue based on people's psychological perception [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(2): 5-10.
- [44] Viswanath K, Peeta S. Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1857(1): 1-10.
- [45] Barbarosoğlu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(1): 43-53.
- [46] Campbell A M, Vandenbussche D, Hermann W. Routing for relief efforts[J]. Transportation Science, 2008, 42(2): 127-145.
- [47] 李进, 张江华, 朱道立. 灾害链中多资源应急调度模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 488-495.
Li J, Zhang J H, Zhu D L. Multi-resource emergency scheduling model and algorithm in disaster chain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(3): 488-495.
- [48] Yuan Y, Wang D W. Path selection model and algorithm for emergency logistics management[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(3): 1081-1094.
- [49] Nolz P C, Semet F, Doerner K F. Risk approaches for delivering disaster relief supplies[J]. OR Spectrum, 2011, 33(3): 543-569.
- [50] 周慧娟. 铁路应急管理中的预案管理与资源配置优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

- Zhou H J. Plan management and resource allocation optimization on railway emergency management[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [51] 宋琦. 铁路突发事件应急资源调度问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
Song Q. Research on rescue resources dispatching of railway emergent event[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [52] 郭晓光. 面向自然灾害的应急物流网络规划与运作研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
Guo X G. Research on the theory and methodology of the network planning for natural disaster emergency logistics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [53] 黄德启. 面向区域路网的应急资源布局与调度方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
Huang D Q. Research on emergency resources layout and scheduling method for the regional road network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [54] 龙京, 黄钢, 王孟钧, 等. 铁路应急物资储备点选址[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 74-78.
Long J, Huang G, Wang M J, et al. Reserve depot location of railway emergency material[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 74-78.
- [55] Zografos K G, Androulopoulos K N, Vasilakis G M. A real-time decision support system for roadway network incident response logistics[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(1): 1-18.
- [56] 戴更新, 达庆利. 多资源组合应急调度问题的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 52-55.
Dai G X, Da Q L. The study of combinatorial scheduling problem in emergency systems[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(9): 52-55.
- [57] Iannoni A P, Morabito R, Saydam C. An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 195(2): 528-542.
- [58] Iannoni A P, Morabito R, Saydam C. A hypercube queueing model embedded into a genetic algorithm for ambulance deployment on highways[J]. Annals of Operations Research, 2008, 157(1): 207-224.
- [59] Zhang B, Li H, Li S G, et al. Sustainable multi-depot emergency facilities location-routing problem with uncertain information[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 333: 506-520.
- [60] Chai G, Fang C, Gao X, et al. A cost-based study on highway traffic emergency rescue sites location using heuristic genetic algorithm[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(2): 500-507.
- [61] 柴干, 赵倩, 黄琪, 等. 高速公路交通应急救援资源的配置[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(1): 165-170.
Chai G, Zhao Q, Huang Q, et al. Allocation of emergency rescue resources for freeway traffic[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(1): 165-170.
- [62] 罗振敏, 潘竞超. 应急物资需求预测研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7622-7630.
Luo Z M, Pan J C. Review of current situation and development trend of emergency materials demand forecasting[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(18): 7622-7630.
- [63] 俞虹, 程文美, 代洲, 等. 基于机器学习的应急物资需求预测模型设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(22): 19-23.
Yu H, Cheng W M, Dai Z, et al. Design of emergency material demand prediction model based on machine learning[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(22): 19-23.
- [64] 杨枫, 叶春明, 种大双. 城市突发事件中基于事故演变的救援需求决策模型及其优化求解[J]. 运筹与管理, 2020, 29(8): 79-88.
Yang F, Ye C M, Chong D S. Decision model of rescue demand in urban emergency based on accident evolution and its optimization solution[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(8): 79-88.
- [65] 刘雪梅, 卢汉康, 李海瑞, 等. 知识驱动的水利工程应急方案智能生成方法——以南水北调中线工程为例[J]. 水利学报, 2023, 54(06): 666-676.
Liu X M, Lu H K, Li H R, et al. A knowledge-driven approach for intelligent generation of hydraulic engineering contingency plans: A case study of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(06): 666-676.
- [66] 孙开畅, 李权, 尹志伟. 水利工程施工应急能力G1-灰色评价方法研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 43-47.
Sun K C, Li Q, Yin Z W. Study on G1-grey evaluation method for emergency capability in hydraulic engineering construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 43-47.
- [67] 吴洋, 孙开畅, 冯继伟. 基于双层模型的水利工程应急物资调度优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3991-3996.

- Wu Y, Sun K C, Feng J W. Optimal dispatching of emergency materials for hydraulic engineering based on bi-level programming model [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3991-3996.
- [68] 孙开畅, 陈璇, 时训先, 等. 基于区间直觉模糊信息 TODIM 法的水利工程应急决策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 19-24.
Sun K C, Chen X, Shi X X, et al. Study on emergency decision-making of hydraulic engineering based on interval intuitionistic fuzzy information TODIM method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(3): 19-24.
- [69] 沈海高速盐城段"4•4"重大道路交通事故调查组. 沈海高速盐城段"4•4"重大道路交通事故调查报告[R]. 盐城: 盐城市应急管理局, 2021.
Shenhai Expressway Yancheng Section "4•4" Major Road Accident Investigation Group. Investigation Report on the "4•4" Major Road Accident on Shenhai Expressway Yancheng Section[R]. Yancheng: Yancheng Emergency Management Bureau, 2021.
- [70] 广州铁路监督管理局. 京广线列车脱轨事故原因: 司机瞭望距离不足, 停车不及撞上滑坡山体[N]. 人民日报, 2020-04-30.
Guangzhou Railway Supervision Administration. Causes of train derailment on Beijing—Guangzhou line: Insufficient driver's sight distance, failing to stop in time and hitting a landslide[N]. People's Daily, 2020-04-30.
- [71] 江西省水文监测中心. 赣江 2019 年第 2 号洪水在上游形成[EB/OL]. (2019-06-11). http://www.jxssw.gov.cn/jxsswjczx/col/col42493/content/content_1769498184118890496.html.
Jiangxi Hydrological Monitoring Center. The second flood of 2019 on the Ganjiang River formed in the upper reaches[EB/OL]. (2019-06-11). http://www.jxssw.gov.cn/jxsswjczx/col/col42493/content/content_1769498184118890496.html.
- [72] 徐晨, 王嘉悦. 宏微观视域下大型活动风险评估研究进展[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6): 23-36.
Xu C, Wang J Y. Progress of research on risk assessment of large-scale activities from the macro and micro perspectives[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(6): 23-36.
- [73] 李亚迪, 马祥伟, 宁延. 重大交通基础设施工程价值实现框架: HMH 跨海通道案例研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(3): 349-363.
Li Y D, Ma X W, Ning Y. An investigation of value realization framework for mega transportation infrastructures: A case of HMH sea-crossing link project[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(3): 349-363.

Review of Emergency Resource Allocation and Scheduling for Megaprojects

ZHANG Jingxiao^{1*}, LEI Yuanyuan^{1,2}, SHI Mengjie¹, ZHANG Bing³, YU Jingyu⁴

1. School of Economic and Management, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. School of Economics and Management, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. School of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China.

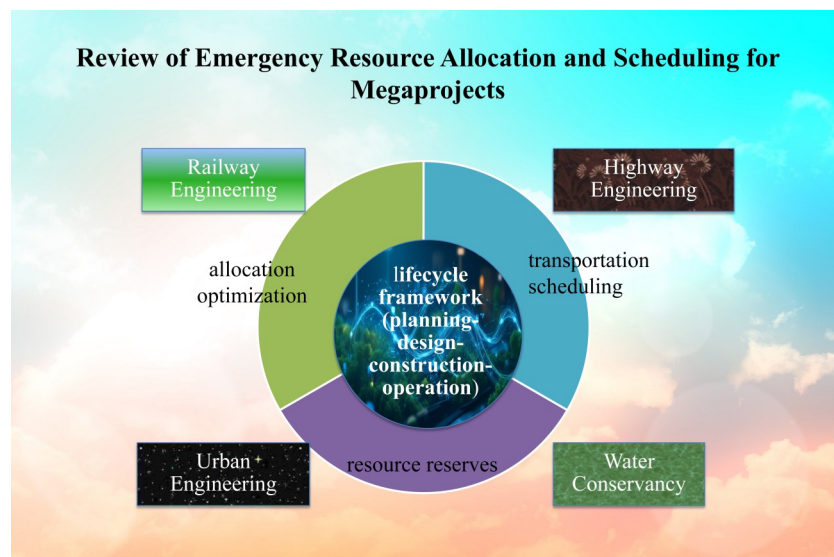
Highlights

Reviews core issues of emergency resource reserves, allocation optimization, and transportation scheduling across major engineering scenarios.

Develops a lifecycle-embedded framework integrating emergency resource decisions into planning, design, construction, and operation stages.

Identifies the shift toward proactive and coordinated emergency management and highlights future needs in data integration, coupled modeling, and intelligent decision-support technologies.

Graphical Abstract



Abstract: Emergency resource allocation and scheduling are essential to the safety, resilience, and sustainable operation of megaprojects. With the increasing interdependence of engineering, social, and natural systems, emergencies in megaproject contexts often produce rapid and cascading impacts across space and time. In this setting, scientific resource allocation and efficient scheduling are fundamental to emergency response and rescue effectiveness. Existing studies have generated substantial knowledge on emergency logistics, emergency facility location, resource allocation, and route optimization under disaster scenarios such as earthquakes, floods, epidemics, and accidents. However, most of this research has been developed for regional or urban emergencies and does not sufficiently reflect the distinctive characteristics of megaprojects, including large investment scales, long construction periods, complex engineering systems, multiple stakeholders, and strong stage specific management requirements. In addition, existing studies rarely integrate emergency resource issues with the full lifecycle of megaproject management. To address this gap, this study reviews the literature on emergency resource allocation and scheduling from the perspective of megaproject emergency management, identifies major research themes and evolution trends, summarizes typical engineering application contexts, and develops a lifecycle-oriented analytical framework.

This study combines systematic literature review with bibliometric analysis. Relevant publications from 2003 to 2023 were collected from CNKI core journals, CSSCI journals, and the Web of Science Core Collection. The search covered titles, abstracts, and keywords related to emergency resources, emergency resource scheduling, emergency resource allocation, resource allocation, and emergency management. After excluding irrelevant studies and screening the remaining literature according to thematic relevance, 114 chinese articles and 2042 english articles were retained. Keyword co-occurrence analysis was then used to identify major research hotspots and trace the evolution of the field over the past two decades. Based on the bibliometric results and literature synthesis, previous studies were organized into three interrelated domains: emergency resource reserves, emergency resource allocation, and emergency transportation scheduling. The literature was also analyzed in four representative

engineering contexts, namely railway engineering, highway engineering, urban engineering, and water conservancy engineering. On this basis, a theoretical framework was constructed to examine emergency resource allocation and scheduling across the planning, design, construction, and operation stages of megaprojects.

Research on emergency resource allocation and scheduling has gradually evolved from post-disaster reactive response to pre-disaster planning and further toward whole-process coordinated optimization. In the area of emergency resource reserves, early studies mainly focused on decisions regarding inventory quantity and category in order to meet initial rescue needs after disasters. Later studies introduced scenario simulation, stochastic demand modeling, and uncertainty analysis, and gradually expanded toward decisions on reserve modes, facility location, and joint pre-positioning under uncertainty, with growing attention to collaboration between government and enterprises. In the area of emergency resource allocation, the literature can be divided into two main streams. One stream is efficiency oriented and emphasizes response speed, cost control, casualty reduction, and operational effectiveness. The other emphasizes fairness and incorporates perceived satisfaction, disaster severity, preference order, and other behavioral or equity related factors. In the area of emergency transportation scheduling, the main research directions include cost minimization, time minimization, demand satisfaction maximization, and multi-objective optimization. Recent studies increasingly consider damaged transport networks, path risk, and multi-resource coordination, although many models still assume sufficient resource availability. Across the megaproject lifecycle, emergency resource priorities also vary by stage. The planning stage emphasizes risk identification, emergency zoning, and the macro-layout of reserves and rescue facilities. The design stage requires the integrated consideration of emergency facilities, reserve systems, and engineering schemes. The construction stage highlights dynamic deployment and rapid response under evolving risks. The operation stage places greater weight on long-term stability, efficiency, adaptive adjustment, and service continuity.

This study develops a lifecycle based analytical framework linking emergency objectives, contextual constraints, and decision methods for megaprojects. The review indicates that future research should move beyond fragmented analyses of isolated disaster types or single decision problems and place greater emphasis on cross-stage integration and system coordination. Further work is needed in heterogeneous data integration, multi-objective and multi-actor system modeling, and the coordinated application of digital technologies such as IoT, GIS, and artificial intelligence. By embedding emergency resource issues into the planning, design, construction, and operation stages of megaprojects, this study provides a structured basis for improving emergency planning, resource layout, and dispatch mechanisms in megaproject management.

Keywords: megaproject; emergency resources; resource allocation; resource scheduling; emergency management