马伟亮,张刚,吴瑶.地震灾害下两阶段应急物资调度优化研究[J].地震工程学报,2027,49(1):240-250.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250420001

Ma Weiliang, Zhang Gang, Wu Yao. Two-stage emergency material scheduling optimization for earthquake disasters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 240-250. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250420001

地震灾害下两阶段应急物资调度优化研究

马伟亮,张 刚,吴 瑶

(湖北汽车工业学院,湖北 十堰 442002)

摘要:地震灾害突发性强、破坏性大,常造成巨大损失,因此灾后应急救援至关重要。针对地震灾害应急物资调度问题,构建一个两阶段调度模型,将物资运输分为分配与调度两个阶段:第一阶段优化救援资源分配;第二阶段在此基础上调度救援资源,确保所有受灾区域得到及时覆盖。采用陆空联运模式,以最小化覆盖时间为目标,综合考虑多种因素,建立混合整数规划模型,并利用Python和Gurobi实现优化模型的构建与求解;通过2008年汶川大地震算例分析及敏感性分析,验证模型的有效性与稳健性。结果表明,该模型能为应急救援提供决策支持。未来可进一步研究不确定性条件下的救援部署优化问题。

关键词:地震灾害;应急物资调度;两阶段调度;混合整数规划;覆盖时间优化;救援车辆分配

中图分类号:P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0240-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250420001

Two-stage emergency material scheduling optimization for earthquake disasters

Ma Weiliang, Zhang Gang, Wu Yao

(*Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Hubei, China*)

Abstract: Earthquakes are characterized by their sudden onset and severe destructiveness, often resulting in substantial human and economic losses. Consequently, effective post-earthquake emergency response is critical. To address the problem of emergency material scheduling following earthquakes, this study develops a two-stage scheduling model that divides material transportation into allocation and dispatch phases. In the first stage, rescue resources are optimally allocated, whereas in the second stage, these resources are dispatched to ensure timely coverage of all affected areas. A combined land-air transportation mode is adopted, and a mixed-integer programming model is formulated with the objective of minimizing overall coverage time while comprehensively accounting for multiple operational factors. The optimization model is implemented and solved using Python and Gurobi. Its effectiveness and robustness are evaluated through a case study and sensitivity analysis based on the

收稿日期:2025-04-20

基金项目:国家社会科学基金(23XGL039);湖北省教育厅哲学社会科学研究指导性项目(25Z112)

第一作者简介:马伟亮(1999-),男,硕士研究生,主要从事应急物流管理、运筹优化研究。E-mail: 771817586@qq.com。

通信作者:吴 瑶(1984-),男,博士,副教授,研究方向为物流系统优化、智能决策。E-mail: yaowumail@126.com。

Wenchuan *M*8.0 earthquake in 2008. The results demonstrate that the proposed model can provide effective decision support for post-earthquake emergency rescue operations and has practical value for emergency rescue command centers. Future research may further investigate rescue resource deployment under uncertain conditions.

Keywords: earthquake disasters; emergency material scheduling; two-stage scheduling; mixed-integer programming; coverage time optimization; rescue vehicle allocation

0　引言

地震是一种突发性强、破坏性大的自然灾害，常造成严重的社会、经济及生命财产损失。作为地质运动的直接结果，地震不仅威胁人类安全，还会对基础设施、经济活动和生态环境产生深远影响。根据全球灾害数据平台统计，2020—2022 年，全球共发生 1 961 次地震灾害，造成了巨大的生命财产损失[1]。由于地震的突发性、随机性和破坏性，灾害发生后短时间内会引发对各种医疗物资和生活物资的大量需求[2-3]。国务院在“十四五”现代物流发展规划中提出，要优化应急物资储备并提升调运水平，这一议题已成为学术界的重点关注方向[4]。灾后应急救援工作尤为重要，快速、有效的救援可以最大限度地减少地震对经济和社会稳定的危害。因此，决策部门需要建立一个稳定、高效的应急物资供应响应系统，实现多种约束下应急资源的快速合理调度。

面向地震等突发事件，学者们围绕设施选址、库存配置与跨层级协同开展研究，以提升准备阶段的资源可用性与调运韧性。Zhang 等[5]建立了前瞻性资源管理模型，通过预测当前未满足需求与未来需求趋势，主动优化资源请求量，显著提升了跨层级资源调度效率。Chen 等[6]基于复杂网络理论构建应急物流网络，针对仓库供应不足引发的级联失效开展治理，为应急储备与网络韧性联动提供了结构化思路。李晓萍等[7]从吸收、恢复与适应能力出发，构建了避难场所防震减灾韧性评价指标体系，并对上海市区避难场所进行实证分析，发现了避难场所应对地震灾害时存在的薄弱点。

地震发生后，交通基础设施功能退化与需求的时空扰动共同决定了响应期的可行域。葛昊宇等[8]采用高斯两步移动搜索法（Two-Step Floating Catchment Area，2SFCA）表征应急避难场所的可达性，预测动态服务半径，以反映灾后网络通达性的时空演化。姚文墨等[9]结合最近邻法与 2SFCA 构建急救医疗资源空间可达性模型，为地震场景下医疗资源与需求的匹配提供量化依据。王国保等[10]聚焦地震初期的应急物资需求预测，通过预测伤亡人数并引入安全库存理论，有效提升了应急物资需求预测的精度与效率，为资源预置与储备配置提供了重要量化依据。Ansari 等[11]将不确定性纳入救护车区域设计并求解最大期望覆盖，以在有限的资源条件下提高总体覆盖水平。Bolouri 等[12]在容量约束情景下联合考虑覆盖率与最短时间目标，推进区域层面的救援资源配置优化。这些以可达性与时间覆盖为核心的度量与区域设计研究，贯穿从准备到响应的全链条，为有限资源的动态布设与跨层级联动调度提供了量化支撑。

在受损路网与不确定约束下，响应期需同时兼顾服务覆盖与时效性。针对应急道路修复和物资配送优化调度问题，陈钢铁等[13]设计了一种启发式算法，并对比分析了 3 个不同应急配送路网的特征。张国富等[14]提出基于马尔科夫决策过程的联合调度框架，并设计双层交互 Q 学习以实现道路抢修与物资配送的协同优化，显著提升了整体效率。吴仍裕等[15]引入深度强化学习，用于动态路径规划，以实现对需求与路况变化的快速响应。王付宇等[16]提出了基于最短总救援时间与最大综合救援权重的双目标两阶段规划模型，有效解决了地震情景下伤员救援车辆调度问题。Bodaghi 等[17]提出了多资源调度与路径规划问题框架，用于高效分发可消耗与不可消耗资源。

上述成果为应急资源管理奠定了重要理论基础，但在应对动态灾变环境时仍存在显著局限：(1) 大部分研究将灾前准备阶段与灾后行动阶段割裂开来，较少关注两者的统一性，而将二者结合有助于提升应急背景下的供应及时性。(2) 在空间建模维度层面，基于历史事故导向的区域划分易产生覆盖盲区；同时，过大的网格划分虽简化了求解，却影响了时间估计的准确性。

本文首先研究受灾区域最小化覆盖时间问题，充分考虑救援运送的装载容量、速度、救援需求及

地理特征等因素，建立相应模型。此类模型属于NP-hard问题，常用启发式方法求解[18]。其次，针对现有研究的不足，通过建立物资基站，构建两阶段应急物资分配模型：第一阶段为备灾，第二阶段为救灾。在此基础上，进一步考虑风险因素，采用陆空联运的“基站-枢纽”协同配送模式。最后，分析所建模型的特性，设计出高效的求解策略以应对大规模问题，从而提供更为精确的救援时间预测。

1 资源两阶段调度模型

1.1 问题描述

本研究假设在多个地区突发灾害事件的情景下，各受灾区域邻近分布有若干急救站点，以及由组织委员会指定的卫生院和物资供给基站。这些基站配备了急救药品、创伤处置耗材等医疗救援资源，资源种类和数量因站点而异。应急救援过程中，一旦在受灾区域搜索到受伤人员，系统即刻发送指令到物资基站，基站立即派送车队，将医疗救援资源配送至受灾区域。在应急医学救援领域，最优先的目标是最短覆盖时间——覆盖救援区域的时间越短，挽救生命和财产的可能性越大，救援效果也越好，从而确保物资能在最短时间内转运至救助点，让伤员得到治疗。

本文提出的策略是首先对有限的救援资源进行“先分配、后调度”，进而优化救援资源的配置和使用。该策略旨在减少对医疗物资储备状况及道路交通情况的过度依赖，以更好地适应实际应急医学救援需求和操作实践。

1.2 问题假设

为构建合理有效的模型，相关假设如下：

（1）应急物资基站的医疗物资相对于运输工具是充足的。如果基站物资不足，即使运输工具有剩余，也会导致救援资源不足，其效果等量转化为运输工具的不足。

（2）应急物资配送采取“多对多”模式，受灾区域有紧急医疗物资需求时即向物资基站发送指令，由最近的基站调配运输车队至需求点。

（3）在突发灾害地区具备充足物资保障和专用道路规划的背景下，将有限的运载工具（包括货运车、救援直升机）定义为救援资源。

（4）所有物资运输均为单次运输。

（5）每个受灾区域只能由一个物资基站提供服务。

如图1所示，上述假设为紧急救援模型提供了科学实用的基础。

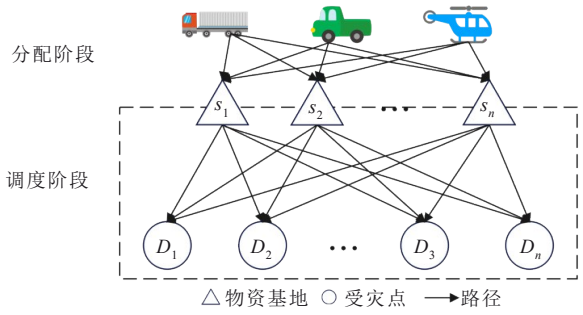


图1 震后应急物流系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of post-earthquake emergency logistics system

1.3 符号说明

为便于建模描述，本文模型中使用的符号列于表1。

表1 符号说明

Table 1 Symbol definitions

符号	定义
I	应急物资基站集合
J	需提供救援的区域集合
J'	相对偏远的受灾区域集合
K	不同类型可调用救援资源集合
v_k	可调用救援资源k的速度
c_k	可调用救援资源k的容量
$d_{i,j}$	从应急物资基站i到受灾区域j的距离
$t_{i,j,k}$	从应急物资基站i到区域j的行驶时间
c	随机灾害中受灾人员的医疗物资需求量
$x_{i,k}$	决策变量，表示是否将救援资源类型k分配至应急物资基站i；$x_{i,k}=1$表示分配，否则为0
$y_{k,j}$	决策变量，表示是否将救援资源类型k分配到受灾区域j；$y_{k,j}=1$表示分配，否则为0
$z_{i,j,k}$	决策变量，表示是否将救援资源类型k从应急物资基站i分配到受灾区域j；$z_{i,j,k}=1$表示分配，否则为0
$\tau_{i,j,k}$	中间决策变量，仅当$z_{i,j,k}=1$时有效
t	所有受灾区域的最大覆盖时间

1.4 模型建立

设集合I表示应急物资基站，下标i表示某一基站的索引；集合J表示受灾区域，下标j表示某一区域的索引。从基站i到受灾区域j的距离记为$d_{i,j}$，并假定救援车辆始终选择由$d_{i,j}$表示的最短导航路线。设K表示可调用救援资源类型k的集合，包括大型卡车、中型货车及直升机，其速度和救援能力分别用v_k和c_k表示。救援资源k从基站i到受灾区域j的行驶时间$t_{i,j,k}$由$d_{i,j}$和v_k决定，即$t_{i,j,k}=d_{i,j}/v_k$。对于

受灾区域j，救援车队的响应时间和救援能力取决于所选择的应急物资配送车辆，即应急救援资源的选择决定了该区域的物资送达时间和救援能力。合理的部署和救援资源选择决定了最小覆盖时间。本文的覆盖时间最小化问题属于混合整数规划问题，其目标为最小化到达各受灾区域的覆盖时间，约束条件则描述了救援工具部署计划、任务分配计划、救援资源属性、物资储备基站位置，以及救援能力要求之间的相互联系。基线模型假定需求量为确定值，用于生成可执行的部署与调度方案。为检验模型对不确定性的抵御能力，将在第3.4节引入基于灾害强度的需求外推与概率性断网场景进行风险评估。综上，该问题的数学模型如下：

$$\min_{X,Y,Z} t \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \tau_{i,j,k}=t_{i,j,k}z_{i,j,k},\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{2}$$

$$\tau_{i,j,k}\leqslant t,\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{3}$$

$$t=\max t_{i,j,k},\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{4}$$

$$z_{i,j,k}\geqslant x_{i,k}+y_{k,j}-1,\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{5}$$

$$z_{i,j,k}\leqslant x_{i,k},\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{6}$$

$$z_{i,j,k}\leqslant y_{k,j},\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{7}$$

$$\sum_{i\in I}x_{i,k}=1,k\in \boldsymbol{K} \tag{8}$$

$$\sum_{k\in K}y_{k,j}\geqslant 1,\forall j\in \boldsymbol{J} \tag{9}$$

$$\sum_{k\in K}c_k y_{k,j}\geqslant c,\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{10}$$

$$x_{i,k}\in\{0.1\},\forall i\in \boldsymbol{I},k\in \boldsymbol{K} \tag{11}$$

$$y_{k,j}\in\{0.1\},\forall k\in \boldsymbol{K},j\in \boldsymbol{J} \tag{12}$$

$$z_{i,j,k}\in\{0.1\},\forall i\in \boldsymbol{I},j\in \boldsymbol{J},k\in \boldsymbol{K} \tag{13}$$

$\boldsymbol{X}=(x_{i,k})$、$\boldsymbol{Y}=(y_{k,j})$和$\boldsymbol{Z}=(z_{i,j,k})$分别表示救援资源与应急物资基站的调配关系矩阵、救援资源与受灾区域的任务分配矩阵，以及救援资源行动调度的三维数组。目标函数(1)为最小化覆盖时间t。式(2)定义中间变量$\tau_{i,j,k}$，其仅在$z_{i,j,k}=1$时取值为$t_{i,j,k}$。式(3)约束覆盖时间t不小于$\tau_{i,j,k}$。式(4)规定最小救援时间为最后一批医疗物资到达的时间。式(5)～(7)定义了$x_{i,k}$、$y_{k,j}$与$z_{i,j,k}$之间的关系。式(8)确保每辆应急车辆仅部署至一个配送中心。式(9)保证每个受灾区域至少被一个单位的救援资源覆盖。式(10)要求配送的应急物资满足受灾人员的需求，这是衡量救援水平的重要指标。如果单一应急车辆不能满足预先确定的救援能力要求，则需从应急物资基站中增派救援资源以满足该约束。约束式(11)～(13)明确了决策变量的定义域。

值得注意的是，在救援行动中，虽然物资基站的医疗物资供应充足，但运输工具数量有限，等效于救援资源不足。此时，需对有限的救援资源构建一个辅助的混合整数规划问题，以判断是否存在一个可行的资源分配方案。因此，该辅助优化问题的目标是：在任意可行分配方案均能满足各基站资源需求的条件下，最小化所需救援资源总量。为求解该有限救援资源优化问题，即组合资源约束优化问题（Combinatorial Resource Constrained Optimization，CRCO），假设所有c_k和c都是整数，并设M为一个大的常数，采用Big-M方法建立混合整数规划模型。

$$\min_{X,c,p,p_i} c_i \tag{14}$$

$$\text{s.t. } M\cdot p_i\geqslant\sum_{k\in K}c_k x_{i,k}-c,\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{15}$$

$$M\cdot p_i\leqslant M+\sum_{k\in K}c_k x_{i,k}-c,\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{16}$$

$$p\leqslant p_i,\forall i\in \boldsymbol{I} \tag{17}$$

$$p\geqslant\sum_{i\in I}p_i-\text{card}(\boldsymbol{I})+1 \tag{18}$$

$$c_k x_{i,k}+M\cdot p+M(1-p_i)+M(1-x_{i,k})\geqslant\sum_{k\in K}c_k x_{i,k}-c,\forall i\in \boldsymbol{I},k\in \boldsymbol{K} \tag{19}$$

$$c_i\geqslant M\cdot p \tag{20}$$

$$c_i\geqslant 0,c\geqslant 0 \tag{21}$$

除式(15)～(21)外，上述CRCO模型还需满足前文基础模型给出的约束式(8)与式(11)。

设p_i为二进制变量，表示基站i是否被赋予足够的资源；p表示所有基站是否均满足资源需求。目标函数[式(14)]为最小化应急物资基站的容量需求c_i，以确保资源的最优配置，避免浪费于不可能或不必要的配置。

给定分配计划$\boldsymbol{X}$，式(15)和式(16)用于标记：若分配给基站i的容量不小于c，则$p_i=1$；否则$p_i=0$。式(17)和式(18)确保分配计划$\boldsymbol{X}$中每个已分配的应急物资基站均能满足受灾区域的需求，其中card表示集合的基数。式(19)保证所有应急物资基站的运输救援资源均能满足受灾区域的物资需求，且任何被分配到基站的救援资源都不是多余的。当$p=1$或$p_i=0$或$x_{i,k}=0$时，式(19)成立；当$p=0$、$p_i=1$且$x_{i,k}=1$时，式(19)简化为$c_k\geqslant\sum_{k\in K}c_k x_{i,k}-c$，以确

保分配到受灾区域的救援资源都不是多余的，除非所有基站均具备足够容量。式(20)促使求解器找到包含失效配送中心的分配计划。CRCO问题的目标是在多个资源约束下，寻找最优的资源配置或任务调度方案。

1.5 两阶段调度模型

本节将分析CRCO问题，并指出几个关键属性及其对最优解的影响。这些属性有助于通过缩小问题规模来简化求解，并为两阶段算法的设计提供理论基础。

本文提出的覆盖时间最小化问题由应急车辆分配计划 $\boldsymbol{X}$ 和调度计划 $\boldsymbol{Y}$ 共同确定，变量 $\boldsymbol{Z}$ 可通过 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$，由式(5)～(7)唯一确定。通过分离决策矩阵 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$，该问题可转化为两阶段最小覆盖时间(Minimal Covering Time，MCT)问题：第一阶段确定应急救援资源在各应急物资基站间的最优分配方案，即MCT分配问题；第二阶段在给定分配方案下以最优方式调度救援资源，使其覆盖所有受灾区域，称为MCT调度子问题。下文将对这两阶段问题进行反向分析。

1.5.1 MCT分配问题

用 $CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J})$ 表示在给定分配方案 $\boldsymbol{X}$ 下，MCT调度子问题在区域集合 $\boldsymbol{J}$ 上的最优目标值；若子问题无可行解，则其值为无穷大。同理，用 $CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J}')$ 表示更小区域集合 $\boldsymbol{J}'$ 对应的最优值。$CT(\boldsymbol{X},j)$ 为单个区域 j 的调度最优解，代表分配方案 $\boldsymbol{X}$ 下将足够的救援资源部署到区域 j 的最短响应时间，即该区域的覆盖时间。因此，$CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J})$ 取集合 $\boldsymbol{J}$ 内所有区域覆盖时间的最大值，即：

$$CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J})=\max_{j\in J}\left\{CT\left(\boldsymbol{X},j\right)\right\} \tag{22}$$

在已知分配资源将通过求解MCT进行最优调度的前提下，第一阶段分配问题的目标是求出该区域的最小覆盖时间，即：

$$\min_{X} CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J}) \tag{23}$$

MCT分配问题需满足基础模型中的式(8)与式(11)。

1.5.2 MCT调度问题

给定分配方案 $\boldsymbol{X}$，以任务分配矩阵 $\boldsymbol{Y}=(y_{k,j})$ 和调度变量 $\boldsymbol{Z}=(z_{i,j,k})$ 为决策变量，第二阶段最优调度子问题可表述为：

$$\min_{Y,Z} t \tag{24}$$

MCT调度子问题还需满足基础模型中的时间关联约束式(2)～(7)、需求满足约束式(10)，以及变量取值约束式(12)～(13)。

第一阶段的最优解 $\boldsymbol{X}^*$ 通过迭代调用第二阶段求解 $CT(\boldsymbol{X},\boldsymbol{J})$ 获得，整体表达式为：

$$CT(\boldsymbol{X}^*,\boldsymbol{J})=\min_{X}\left\{\max_{j\in J}\left[\min_{\substack{i,k\\ x_{i,k}=1,y_{k,j-1}}}\left(\frac{d_{i,j}}{v_k}\right)\right]\right\} \tag{25}$$

2 两阶段模型求解

根据上述分解，MCT问题实际上是最小-最大-最小(min-max-min)问题，其目标是最小化所有受灾区域最短响应时长的最大值。由于需要同时考虑所有区域，仅分析远离物资基站的边界区域，即可精准确定最优解。下文通过两条引理的数学推导对该结论予以证明。

引理1：对任意分配方案 $\boldsymbol{X}$，必存在边界区域 $j'\in\boldsymbol{J}'$，满足：

$$CT(\boldsymbol{X},j')=\max_{j\in J} CT(\boldsymbol{X},j) \tag{26}$$

且全局最优分配矩阵 $\boldsymbol{X}^*$ 满足：

$$CT(\boldsymbol{X}^*,j')=\min_{X}\max_{j\in J} CT(\boldsymbol{X},j) \tag{27}$$

证明：

设 $\boldsymbol{J}^0$ 为邻近物资基站的区域集合，对任意 $j\in\boldsymbol{J}^0$，均满足 $d_{i,j}^{\min}\leqslant\delta$($\delta$ 为邻近距离阈值)；全域区域集合满足 $\boldsymbol{J}=\boldsymbol{J}^0\cup\boldsymbol{J}'$，其中 $\boldsymbol{J}'$ 为距离超过 δ 的偏远区域集合。

对于任意邻近区域 $j\in\boldsymbol{J}^0$，其最短响应时间满足：

$$CT(\boldsymbol{X},j)\leqslant\frac{d_{ij}^{\min}}{v_k}\leqslant\frac{\delta}{v_k} \tag{28}$$

对于任意边界区域 $j'\in\boldsymbol{J}'$，其最短响应时间满足：

$$CT(\boldsymbol{X},j')=\frac{d_{ij'}^{\min}}{v_k}>\frac{\delta}{v_k} \tag{29}$$

因此可得，

$$\max_{j\in J} CT(\boldsymbol{X},j)=\max_{j\in J'} CT(\boldsymbol{X},j) \tag{30}$$

此外，原目标函数 $\min_{X}\max_{j\in J} CT(\boldsymbol{X},j)$ 可等价转化为 $\min_{X}\max_{j\in J'} CT(\boldsymbol{X},j)$。根据Weierstrass极值定理[19]，若 $CT(\boldsymbol{X},j)$ 在分配矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的可行域上连续，且可行域为紧集，则全局最优解 $\boldsymbol{X}^*$ 存在。设 $\boldsymbol{X}^*$ 使得

$\min\limits_{X}\max\limits_{j\in J'} CT(\boldsymbol{X}^*,j)$最小化，则对于任意邻近区域$j\in J^0$，有$CT(\boldsymbol{X}^*,j)\leqslant\max\limits_{j\in J'} CT(\boldsymbol{X}^*,j)$。

引理2：假设在任何可行分配计划中，均有足够的救援资源使所有物资基站具备救援能力。若受灾区域j满足：

$$d_{i,j}^{\min}\geqslant\max_{l\in J}\left(d_{i,l}^{\min}\right)-\epsilon \tag{31}$$

式中：ϵ为距离容忍参数；l为遍历受灾区域集合的索引变量。式(31)表明，区域j到最近物资基站的距离接近全局最大值。定义偏远区域子集$J'=\left\{j\in J\middle| d_{i,j}^{\min}\geqslant\max\limits_{l\in J}\left(d_{i,l}^{\min}\right)-\epsilon\right\}$，则原MCT问题等价于仅针对偏远区域集合$J'$的MCT问题。

证明：对任意$j\in J\backslash J'$，满足$CT(\boldsymbol{X},j)\leqslant\dfrac{\max\limits_{l\in J}\left(d_{i,l}^{\min}\right)-\epsilon}{v_k}$；而对任意$j'\in J'$，满足$CT(\boldsymbol{X},j')\geqslant\dfrac{\max\limits_{l\in J}\left(d_{i,l}^{\min}\right)-\epsilon}{v_k}$。因此，全域最大覆盖时间必由$J'$内区域决定，即：$\max\limits_{j\in J} CT(\boldsymbol{X},j)=\max\limits_{j\in J'} CT(\boldsymbol{X},j)$。

资源充足性保证所有物资基站均可被调度，避免了因车辆不足导致某些区域无法覆盖的情况。因此，优化问题可忽略非边界区域，仅需确保J'内区域的最优性。通过上述方法，原MCT问题中与非边界区域相关的约束得以消除，在保持准确性的前提下简化了问题。

除消除内部区域外，还需进一步考察区域距离对模型有效性的影响。上述两阶段方法体现了备灾与救灾的协同机制，而传统单阶段模型难以有效衔接备灾与救灾两个阶段。因此，该方法相较于传统模型更符合实际应急救援的运作流程。

3　算例分析

3.1　数据描述及参数设置

以2008年四川汶川8.0级大地震为背景进行案例分析。北川县是此次地震的重灾区，因地震导致的伤员数量多，急需将医疗物资转运至受灾区域。依据地震灾情数据，根据伤员评估结果确定物资需求量。考虑受灾初期最急缺的是医疗物资，维持灾民需求的物资单位重量约为5 kg/份。选取北川县等10个区域为应急物资储备基地(表2)，同时确定包含北川县在内的69个受灾区域(表3)[20]，其位置分布分别如图2和图3所示(图中用数字标注)。救援资源包括大型卡车、中型货车和直升机三类，其数量与参数如表4所列。

表2　应急物资基站及需求量

Table 2　Emergency supply depots and their demand

应急物资基地	编号	需求量/份	总需求量/kg
北川	1	45 525	227 625
德阳	2	32 580	162 900
绵阳	3	34 500	172 500
都江堰	4	42 000	210 000
茂县	5	32 475	162 375
理县	6	32 100	160 500
汶川	7	46 275	231 375
安县	8	35 925	179 625
什邡	9	36 000	180 000
绵竹	10	43 575	217 875

注：本文选取的10个应急物资储备基地基于文献[20]的地理分布与物流可达性分析，包含极重灾区及邻近重灾区(如德阳、绵阳)，以兼顾救援覆盖效率与模型复杂度。

3.2　结果分析

实验采用Python编程，调用Gurobi 11.0.32求解器对模型进行求解，运行环境为配备AMD 8核2.4 GHz中央处理器和16 GB内存的计算机。最优解对应的最小覆盖时间为1.86 h，物资储备基地的救援资源部署方案如表5所列。

3.3　两阶段优化模型与单阶段模型对比分析

为进一步验证本文提出的两阶段优化模型在最短覆盖时间上的优势，设置对比实验，将其与传统单阶段贪婪算法的结果进行比较。

在单阶段方案中，所有救援资源预先集中存储于一个中央应急运载中心。灾害发生后，系统基于贪婪规则，将救援资源从该中心直接分配至距受灾点最近的物资基站，并由该基站执行救援任务，过程中未对部署成本进行显式建模。在此设定下，贪婪算法仅基于局部最近性原则进行分派，忽略了部署路径的全局优化，结果具有一定随机性，且缺乏调度协调性。

相比之下，本文两阶段优化模型在灾害发生前通过部署模型优化了救援资源在各物资基站的预配置分布，使第二阶段任务指派能够更有效地覆盖受灾区域，避免了单阶段贪婪方法中资源分配不当与利用效率低下的问题。实验结果(表6)表明，两阶段方法在测试实例中均取得了更短的最小覆盖时间。

以两阶段优化模型取得的最小覆盖时间为基准，对传统单阶段贪婪算法的覆盖能力进行评估。

表 3 受灾区域及需求量

Table 3 Affected areas and their demand

受灾点	编码	需求量/份	总需求量/kg	受灾点	编码	需求量/份	总需求量/kg
北川	1	45 525	227 625	灌口镇	36	7 950	39 750
永安	2	5 820	29 100	青城山	37	7 290	36 450
永昌	3	6 300	31 500	紫平铺	38	6 600	33 000
开坪	4	5 700	28 500	虹口乡	39	7 200	36 000
罗江县	5	13 050	65 250	茂县	40	32 475	162 375
中江县	6	15 900	79 500	富顺	41	5 400	27 000
三台县	7	20 550	102 750	飞虹	42	5 700	28 500
盐亭县	8	20 625	103 125	黑虎	43	6 000	30 000
梓潼县	9	23 475	117 375	太平	44	4 800	24 000
德阳	10	32 580	162 900	理县	45	32 100	160 500
绵阳	11	34 500	172 500	朴头乡	46	4 800	24 000
广元	12	19 070	95 350	木卡乡	47	3 000	15 000
青川	13	10 575	52 875	通化乡	48	7 200	36 000
瓦砾乡	14	6 180	30 900	汶川	49	46 275	231 375
板桥乡	15	7 320	36 600	映秀镇	50	6 000	30 000
骑马乡	16	6 750	33 750	水磨镇	51	5 400	27 000
营盘乡	17	6 150	30 750	卧龙镇	52	5 100	25 500
利州区	18	13 350	66 750	雁门	53	5 220	26 100
朝天区	19	12 450	62 250	三江	54	4 620	23 100
苍溪	20	23 475	117 375	小金	55	3 750	18 750
剑阁	21	11 625	58 125	黑水	56	9 300	46 500
元坝区	22	13 350	66 750	松潘	57	3 600	18 000
彭州	23	15 678	78 390	安县	58	35 925	179 625
小鱼洞	24	3 428	17 140	秀水	59	5 340	26 700
通济	25	3 142	15 710	宝林	60	6 300	31 500
红岩	26	2 857	14 285	高川	61	3 420	17 100
平武县	27	23 000	115 000	什邡	62	36 000	180 000
龙安镇	28	4 540	22 700	洛水镇	63	5 700	28 500
坝子乡	29	3 820	19 100	双盛镇	64	7 800	39 000
水观乡	30	3 020	15 100	蓥华镇	65	7 200	36 000
旌阳区	31	8 600	43 000	绵竹	66	43 575	217 875
涪城区	32	8 850	44 250	剑南	67	5 280	26 400
游仙区	33	9 050	45 250	绵远镇	68	4 680	23 400
江油	34	10 400	52 000	汉王镇	69	4 080	20 400
都江堰	35	42 000	210 000				

计算结果表明，在 1.86 h 内，传统单阶段方法在此次地震灾害救援中仅能完成 79.91% 受灾点的医疗物资供应，说明在受灾点分布广、需求高的复杂场景下，两阶段优化模型的优势显著。该结果不仅验证了本文方法在响应时间全局优化控制上的优势，也凸显了资源预部署阶段在提升突发灾害救援调度效能中的关键作用。

3.4 不确定性情景与敏感性分析

为验证模型的稳健性和优化效果，对关键参数进行敏感性分析，重点分析不同类型救援资源数量变化对总覆盖时间的影响。敏感性分析主要考虑三种救援资源数量组合（X_1：大型货车数量；X_2：中型货车数量；X_3：直升机数量）对最短覆盖时间（T）的影响程度与显著性。此外，将路网连通性不确定性（X_4）与灾害强度（X_5）驱动的需求弹性纳入情景集，用于评估基线方案的稳健性，并采用回归模型（$T=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4+\beta_5X_5+\epsilon$）进行拟合。

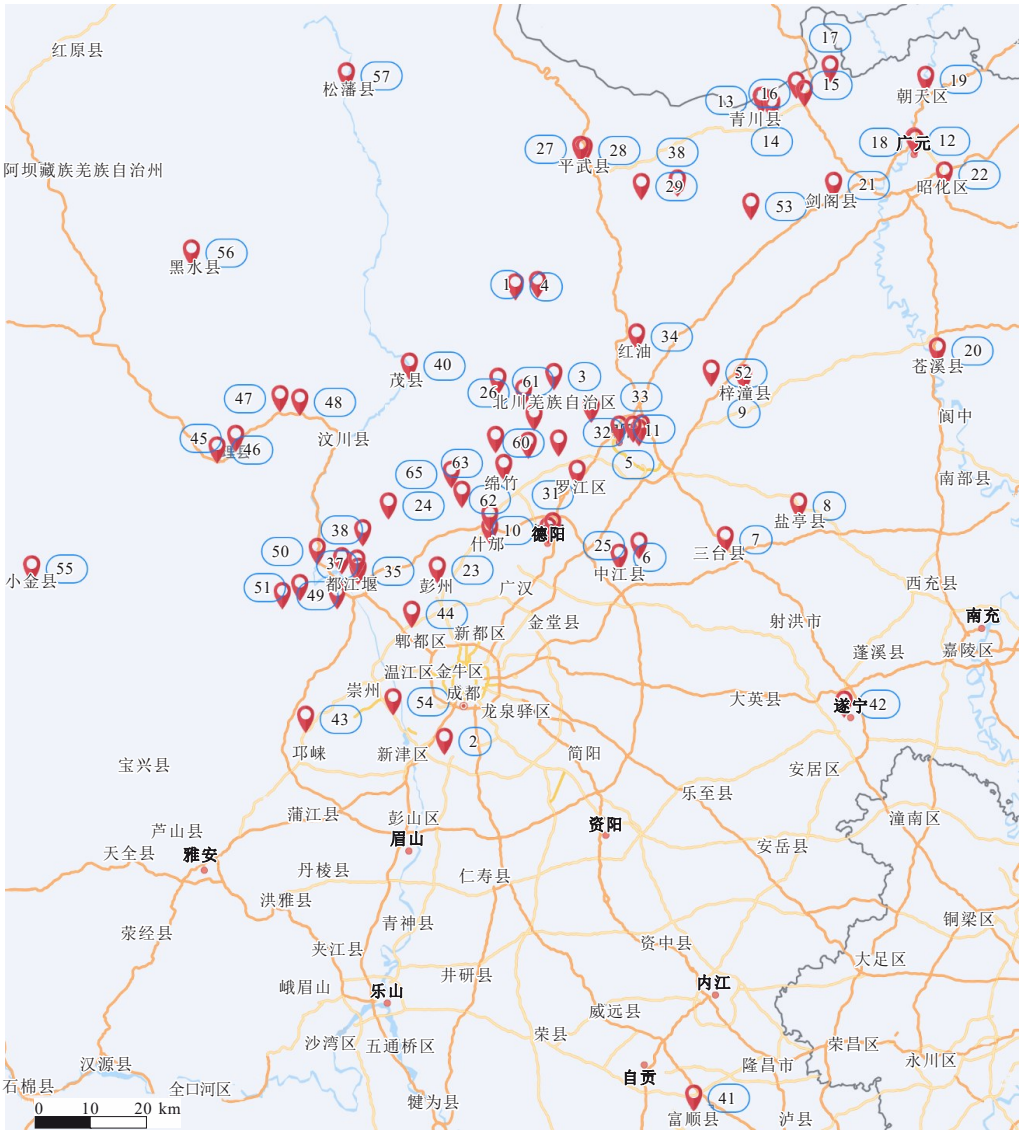


图 2　受灾区域位置示意图

Fig. 2　Location map of affected areas



图 3　应急物资基站位置示意图

Fig. 3　Location map of emergency supply depots

表 4 救援资源类型

Table 4 Rescue resource types

类型	速度/(km/h)	容量/kg	数量
大型卡车	80	40 000	48
中型货车	130	15 000	40
直升机	250	8 000	40

表 5 救援资源分配方案

Table 5 Rescue resource allocation scheme

应急物资基地	救援资源部署方案		
	大型卡车数量	中型货车数量	直升机数量
北川	6	4	4
德阳	6	7	0
绵阳	10	3	4
都江堰	3	0	8
茂县	11	4	4
理县	0	1	8
汶川	0	3	4
安县	7	4	4
什邡	0	7	0
绵竹	5	7	4

表 6 两阶段模型与传统单阶段贪婪算法最小覆盖时间对比

Table 6 Comparison of minimum coverage time between two-stage model and single-stage greedy algorithm

优化方法	最小覆盖时间(MCT)/h
传统单阶段贪婪算法	2.202
两阶段优化模型	1.86

在敏感性分析中,从三种救援资源数量上下浮动 20% 的范围内随机选取若干组合进行分析。路网连通性(X_4)通过随机断网情景进行处理,以模拟路网损坏的不同情景。考虑灾后路网修复的不确定性,采用蒙特卡洛模拟随机抽取不同断网比例(0%~20%),分析其对物资调度的影响。灾害强度(X_5)以灾害等级 $A\in\{1,\ldots,8\}$ 为外生驱动变量。采用线性增益模型,量化地震烈度与需求的关系:

$$C_j(A_j,\alpha)=C_{j0}\left[1+\alpha\left(A_j-A_{\mathrm{ref}}\right)_+\right],$$
$$(x)_+=\max\{x,0\} \tag{32}$$

式中:C_{j0} 为需求点 j 的基准物资需求量;A_j 为宏观烈度/灾害等级;A_{ref} 为参考阈值;α 为烈度-需求弹性(默认取 0.05)。本文在 $\alpha\in[0.03,0.08]$ 范围内开展区间敏感性分析,量化烈度-需求弹性并评估其对关键指标的影响。综合考察救援资源数量、路网连通性及灾害强度三类参数对优化结果的敏感性,图 4~8 分别给出了 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5 对应的偏回归图。

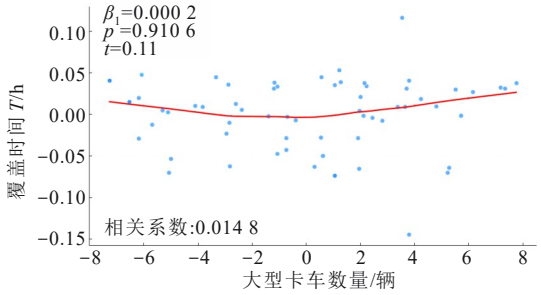


图 4 大型卡车偏回归图

Fig. 4 Partial regression plot for large trucks

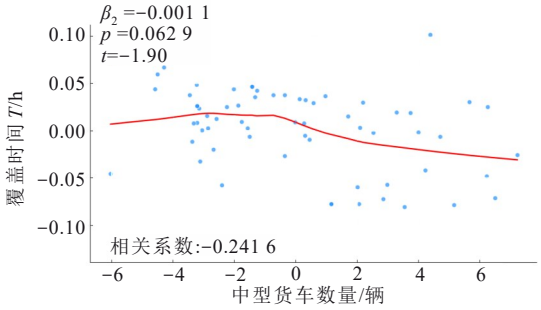


图 5 中型货车偏回归图

Fig. 5 Partial regression plot for medium trucks

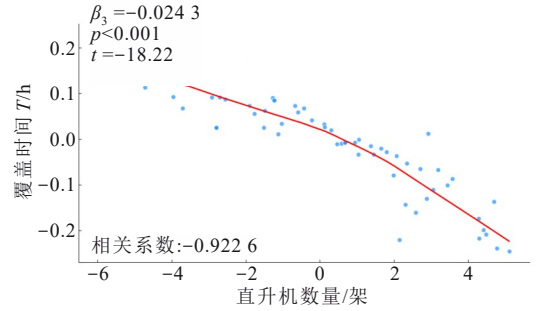


图 6 直升机偏回归图

Fig. 6 Partial regression plot for helicopters

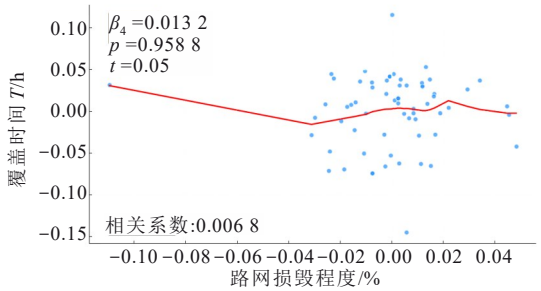


图 7 路网连通性偏回归图

Fig. 7 Partial regression plot for road network connectivity

通过多元回归模型量化各类运输资源对覆盖时间的影响效应,表 7 为回归分析结果汇总表。结果显示,在控制其他变量的条件下,大型卡车(β=0.000 2,p=0.911)与中型货车(β=−0.001 1,p=

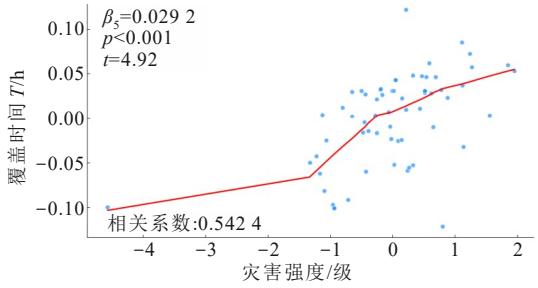


图 8　灾害等级偏回归图

Fig. 8　Partial regression plot for disaster intensity

0.063)的回归系数均不具备统计学显著性；二者95%置信区间分别为[−0.003, 0.003]和[−0.002, 0.000]，表明在当前样本量下，两类车辆的参数估计值包含零效应可能。相比之下，直升机数量对总覆盖时间具有显著负向影响(β=−0.024 3，p<0.001)，其95%置信区间[−0.027, −0.022]完全位于负值区间，验证了空中救援资源在时间优化中的关键作用。路网连通性(X_4)的回归系数β=0.013 2，但统计结果不显著(p=0.959)，表明在当前样本结构下，道路网络连通程度对整体覆盖时间的影响较小，其扰动对模型输出的敏感度较低。灾害强度(X_5)对总覆盖时间存在显著正向影响(β=0.029 2，p<0.001)，其95%置信区间[0.017, 0.041]完全位于正值区间，说明在控制其他因素的条件下，随着灾害强度增加，覆盖所需时间显著延长。

表 7　回归分析表

Table 7　Regression analysis results

变量	系数	标准误差	t值	p值	95%置信区间
截距(β_0)	3.238 2	0.279	11.599	0	[2.694, 3.797]
X_1	0.000 2	0.001	0.113	0.911	[−0.003, 0.003]
X_2	−0.001 1	0.002	−1.896	0.063	[−0.002, 0.000]
X_3	−0.024 3	0.002	−18.215	0.000	[−0.027, −0.022]
X_4	0.013 2	0.254	0.052	0.959	[−0.498, 0.524]
X_5	0.029 2	0.006	4.917	0.000	[0.017, 0.041]
R^2	0.893 4				

敏感性分析结果表明，地面运输资源、路网连通性两类参数在扰动范围内对优化模型输出的影响幅度均低于5%，而直升机参数扰动则引发覆盖时间26%的显著变化。同时，灾害强度参数波动虽导致模型输出结果出现一定变化，但模型整体结构仍保持稳健，体现出关键资源边际效益递增的规律。研究结果表明，所建模型能够有效识别影响时间效率的核心决策变量，在资源有限条件下该模型能够优先配置空中救援力量，并引导管理者根据灾害强度动态调整资源分配策略，进一步验证了其在参数波动情境下的结构稳健性与实用价值。

4　结论

(1) 地震应急救援响应时间优化研究是提升灾后生命救援效率的关键。针对地震灾区事故现场救援覆盖时间最小化问题，本研究结合灾前准备与灾后响应的统一性，构建了应急基站救援队伍部署的混合整数规划模型，并基于资源约束条件建立了辅助优化模型。通过解析最优解的结构特征，提出了备灾与救灾协同的两阶段应急物资分配模型：第一阶段为灾前备灾阶段，重点进行救援资源全局配置；第二阶段为灾后救灾阶段，旨在通过合理调度快速响应灾区需求。该模型与算法在地震搜救场景中具有更精确的救援时间预测能力，为应急资源时空配置提供了可靠的方法支撑。

(2) 本研究构建的“基站-枢纽”协同配送模式，突破了传统单模态运输局限，通过陆空联运实现复杂地形下的多式联运协同优化，提升了物资时空可达性。此外，建立融合地理特征的需求多维约束优化模型与两阶段应急资源分配机制，通过物资基站拓扑优化与枢纽节点规划的双层协同，有效弥补了历史事故导向区域划分带来的覆盖盲区问题，降低了救援时间估算误差。

(3) 鉴于地震灾害应急救援中误判或延误可能引发的灾难性后果，本研究采用稳健优化方法对地震灾害应急救援问题进行建模，为指挥中心提供保守型解决方案。地震灾害中的不确定性是一个重要研究方向，未来可根据震中动态环境变化，灵活调整灾后救援部署方案，将问题转化为不确定性条件下最小化期望响应时间的建模研究。

参考文献(References)

[1] 郑国光，刘凯．中国自然灾害风险普查研究报告(2020—2022年)[M]//马宝成．中国应急管理发展报告：2023．北京：社会科学文献出版社，2023：52-67.
Zheng Guoguang, Liu Kai. Research report on the risk survey of natural disasters in China (2020—2022) [M]//Ma Baocheng. Annual Report on Emergency Management in China: 2023. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2023: 52-67.

[2] 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.

[3] Özdamar L, Demir O. A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(3): 591-602.

[4] 应急管理部．“十四五”应急救援力量建设规划[EB/OL]．(2022-06-22)[2025-04-20]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5708947.htm.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for emergency rescue force construction[EB/OL]. (2022-06-22)[2025-04-20]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5708947.htm.

[5] Zhang H Z, Zhao X H, Fang X, et al. Proactive resource request for disaster response: a deep learning-based optimization model [J]. Information Systems Research, 2024, 35(2): 528-550.

[6] Chen T G, Wu S W, Yang J J, et al. Risk propagation model and its simulation of emergency logistics network based on material reliability[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4677.

[7] 李晓萍，陆佳黎，胡青蜜．城市避难场所防震减灾韧性评价体系研究：以上海市区为例[J]．地震工程学报，2024，46(1)：214-223.
Li Xiaoping, Lu Jiayun, Hu Qingmi. Resilience evaluation system for earthquake prevention and disaster reduction in urban shelters: a case study of the Shanghai urban area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 214-223.

[8] 葛昊宇，曹卫东，宋伟轩．基于精细尺度的城市应急避难场所时空覆盖效能研究：以南京主城区为例[J]．地理研究，2024，43(11)：2887-2901.
Ge Haoyu, Cao Weidong, Song Weixuan. Precision scale-based research on the spatiotemporal coverage efficacy of urban emergency shelters: a case study in the main urban area of Nanjing[J]. Geographical Research, 2024, 43(11): 2887-2901.

[9] 姚文墨，徐歆辰，陈丹镝．基于服务空间可达性的急救医疗资源配置状况分析：以成都市为例[J]．现代预防医学，2024，51(17)：3185-3190.
Yao Wenmo, Xu Xinchen, Chen Dandi. Analysis of the spatial accessibility of emergency medical resource allocation: a case study of Chengdu[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(17): 3185-3190.

[10] 王国保，蔡水涌，杨红刚，等．基于地震初期的应急物资需求预测研究[J]．地震工程学报，2025，47(4)：925-936.
Wang Guobao, Cai Shuiyong, Yang Honggang, et al. Emergency material demand prediction based on the early stage of earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(4): 925-936.

[11] Ansari S, Mclay L A, Mayorga M E. A maximum expected covering problem for district design[J]. Transportation Science, 2015, 51(1): 376-390.

[12] Bolouri S, Vafaeinejad A, Alesheikh A, et al. The ordered capacitated multi-objective location-allocation problem for fire stations using spatial optimization[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(2): 44.

[13] 陈钢铁，帅斌．震后道路抢修和应急物资配送优化调度研究[J]．中国安全科学学报，2012，22(9)：166-171.
Chen Gangtie, Shuai Bin. Optimizing emergency road repair and distribution of relief supplies after earthquake[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(9): 166-171.

[14] 张国富，朱前顺，苏兆品，等．基于双层交互Q学习的路网抢修和物资配送联合调度[J]．控制与决策，2024，39(12)：4109-4117.
Zhang Guofu, Zhu Qianshun, Su Zhaopin, et al. Joint scheduling of road network restoration and emergency relief supplies delivery based on double-layer interactive Q-learning[J]. Control and Decision, 2024, 39(12): 4109-4117.

[15] 吴仍裕，周强，于海龙，等．基于深度强化学习的深圳市急救车调度算法[J]．计算机工程，2022，48(9)：298-304.
Wu Rengyu, Zhou Qiang, Yu Hailong, et al. Ambulance dispatching algorithm in Shenzhen based on deep reinforcement learning[J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 298-304.

[16] 王付宇，叶春明，王涛，等．震后伤员救援车辆两阶段规划模型及算法研究[J]．管理科学学报，2018，21(2)：68-79.
Wang Fuyu, Ye Chunming, Wang Tao, et al. Research on two stage planning model and algorithm of wounded rescue vehicle after earthquake[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(2): 68-79.

[17] 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.

[18] Xu J P, Zhou X Y. Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: application to earth-rock work allocation[J]. Information Sciences, 2013, 238(7): 75-95.

[19] Rudin W. Principles of mathematical analysis[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1976: 90.

[20] 郑斌，马祖军，周愉峰．震后应急物流动态选址-联运问题的双层规划模型[J]．系统管理学报，2017，26(2)：326-337.
Zheng Bin, Ma Zujun, Zhou Yufeng. Bi-level model for dynamic location-transportation problem for post-earthquake relief distribution[J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26(2): 326-337.

(本文编辑：赵乘程)