应急资源在复杂灾害情景下的多目标布局

袁长伟[1]和丁胜轩[2]*、王胤[3]、冯健[4]、马宁远[5]1 长安大学交通工程学院，西安，710061；电话：139-9280- 2916；电子邮箱：changwei@chd.edu.cn[2]（通讯作者）长安大学交通工程学院，西安，710061；电话：184-0519-6669；电子邮箱：2020234075@chd.edu.cn[3] 长安大学交通工程学院，西安，710061；电话：156-9182-7809；电子邮箱：wyin@chd.edu.cn[4] 长安大学交通工程学院，西安，710061；电话：136-3021- 6091；电子邮箱：2021234097@chd.edu.cn[5] 长安大学交通工程学院，西安，710061；电话：187-0297- 1922；电子邮箱：2020034025@chd.edu.cn

摘要

在复杂灾害情景下，尤其是涉及联合供应商时，有效配置应急救援资源对于确保应急救援活动的可靠性、效率和质量至关重要。然而，目前关于不同灾害之间的相互作用以及物资分类的研究有限，而这两者对应急救援至关重要。本研究为复杂灾害情景下可靠的应急救援策略提供了一种新颖且实用的框架。研究采用基于情景的方法，描述地震、泥石流、洪水及其相互作用等复合灾害。在优化应急资源配置时，研究综合考虑了政府所有的供应商、框架协议供应商和现有供应商共同提供应急救援物资的情形。为确定复杂灾害情景下联合供应商的选择及其相应的最优物资数量，研究提出了一种多目标模型，将成本、公平性、应急效率和不确定性纳入设施选址问题。最后，研究开发了NSGA-II-XGB算法，并通过一个灾害多发省份的案例验证所提出的多目标模型和求解方法的可行性与有效性。结果表明，本文提出的方法论能够大幅降低应急成本和救援时间，缩小需求与供应商之间的差异，同时最大限度地扩大救援资源的覆盖范围。更重要的是，该方法能够通过确定联合供应商的位置以及针对不同灾害同时提供的物资数量，优化资源规模。本研究为应急救援工作中的科学配置决策迈出了可喜的一步。

关键词：应急资源、多种物资、复杂灾害情景、多个救援主体、多目标优化、NSGA-II-XGB算法

1.引言

极端天气、洪水和地质灾害等重大灾害的发生，已造成重大人员伤亡和财产损失[1]。由于涉及多个救援部门、灾害具有不可预测性，且应急物资分布不均，因此迫切需要高效储备和选址应急物资[2]。当前研究主要聚焦于开发多智能体信任系统[3],、信息共享与协调[4], 以及物资与装备的联动储备[5]。然而，当前应急物资的分类标准有限[6] ，多灾害情景下的协同救援能力较弱[7]。尽管已有研究探讨响应阶段的应急资源配置[8-10], ，但对准备阶段的资源选址规划关注不足[11]。这对于确保应急响应可靠至关重要。在应急救援选址过程中，仍有若干挑战亟待解决。

首先，在复杂数据的不确定场景中，信息整合往往会延迟[12], ，而灾害的演变特性也使应急物资的储存与调配面临困难[13]。因此，本研究着重整合多维灾害信息，并探讨灾害演变对应急物资储备策略的影响。

其次，设备分布不均，种类有限，且用于支持储备的数据共享不足[14]。这往往导致供需不匹配，以及跨区域调配应急物资时运输延迟，致使应急物资无法及时送达灾区，错失最佳救援时机[15]。现有的应急物资分类体系以用途为依据，不足以支持跨区域调配。因此，亟须解决储备网络布局与储备设置问题，并制定更精细的多物资协同储备策略。

第三，灾害救援中的多环节协调薄弱，应急资源难以共享，利用率较低[16]。需要建立应急联动机制，以

实施应急资源的统一储备与调配，并推动应急部门协同作业。

为解决这些问题，本研究旨在整合多维灾害信息，并考虑灾害演化对应急物资储备策略的影响。本研究还将重点关注应急设备的分配，并制定更为细致的多种物资协同储备策略，以实现应急物资的跨区域调配。此外，本研究将探讨应急联动机制，以促进不同应急部门之间的协作与协调。所提出的方法将多主体供应商纳入考量，从全局视角对紧急储备作出统一布局决策。

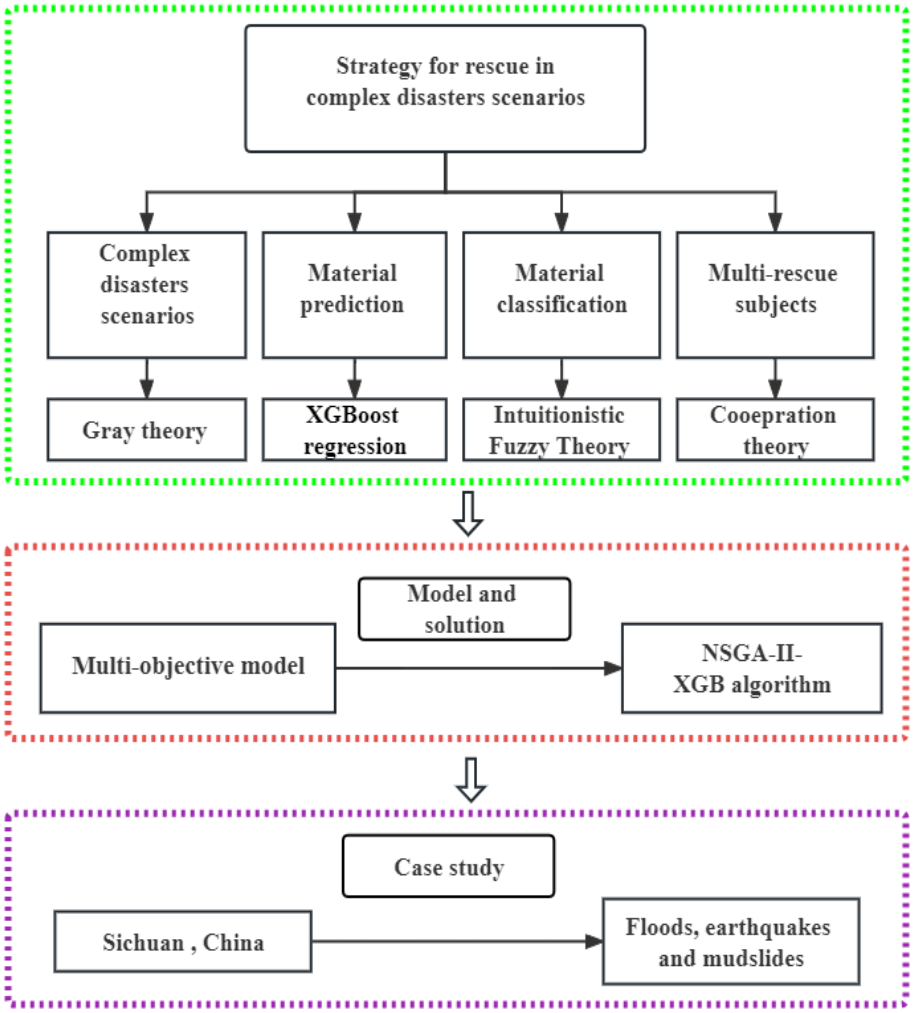

图 1 本文框架

下一节将通过回顾相关研究，说明我们提出的方法的依据。随后，我们将介绍方法的结构，包括物资预测与分类、多目标模型及求解方法。在第4节中，我们将介绍数据集，并随后展示方法论的结果，以验证所提出的模型。接着，我们将在第5节进行讨论并作出总结。本文的框架如图1所示。

2. 文献综述

2.1 多种救援模型

选择应急救援地点的基本框架包括 P-中位模型、P-中心模型和集合覆盖模型。学者们通过引入确定性模型及其他变体，进一步发展了这一基本模型。

在地震应急救援规划领域，已有多种模型用于确定救援设施的最优位置、灾前预储备和响应阶段安排以及救援调度策略，同时考虑需求、供应、成本、设施失效、交通拥堵和排队延误等不确定性。XG A[17]针对地震应急救援物资建立了多目标选址模型，根据时间序列特征划分覆盖阈值，并采用目标偏差率最小化模型和NSGA-II算法求解。通过四川阿坝州的案例研究验证了该模型的可行性。M Haghi[18]提出了一种多目标规划模型，用于确定救援物资配送中心的位置；该模型考虑灾前和灾后不确定性，旨在公平分配救援物资，同时使总成本最小化。Xie[19]提出了一种基于情景的随机混合整数非线性模型，将设施中断风险、交通拥堵和排队延误纳入同一模型，推导了模糊设施停运情景下系统的期望总成本，并得出了该问题的上下界。敏感性分析凸显了选址时考虑设施排队情况和物资数量的重要性。A Dyen[20]建立了用于救援点选址的两阶段随机混合整数线性规划模型，旨在使设施选址、库存持有、运输和短缺的总成本最小化，同时确定灾前和灾后的救援中心、灾前救援中心的救援物资数量以及救援物资短缺量。A Bozorgi-Amiri[21] 提出了一种折衷规划模型，在多目标模型中将需求、供应和成本视为不确定参数，以受灾地区满意度最大化和最大短缺总量最小化为目标，求得非支配折衷解。Ni[22] 建立了极小极大鲁棒模型，用于优化灾害救援网络中的设施位置、应急储备位置以及救援调度策略，并捕捉约束条件边界参数的不确定性。通过2010年玉树

县青海省地震。在多方协同分层选址模型方面，S Tofighi[23]解决了涉及多个中心仓库（CWs）和地方配送中心（LDCs）的两级救援网络设计问题，并建立了基于情景的两阶段随机规划（SBPSP）方法。第一阶段确定救援物资的位置和库存水平，同时考虑供应与需求的不确定性以及震后道路网络的通达性；第二阶段根据各种灾害情景制定救援配送方案，以最小化时间加权总库存成本和加权短缺成本。JH Zhang[24]考虑了政府与协议供应商的联合储备模型，根据情景表征需求的不确定性，建立了灾前和灾后的非线性数学模型，以分析政府和协议供应商的物资储备策略，并对相关参数进行了敏感性分析。Sheu JB[25] 提出了一种用于全球救援网络分层配置的多目标规划模型，并考虑潜在风险成本；该模型基于整数规划和层次聚类分析方法，确定GLS网络中服务区域和设施的位置、数量及覆盖范围，以最小化网络配置成本、最大化运营利润和客户满意度。

众多研究探讨了应急救援选址模型，包括覆盖、层级划分和多目标优化。这些研究主要致力于确保应急救援选址的可靠性并降低其不确定性。然而，目前缺乏从不同视角整合多重目标的研究，尤其是在多灾害情景和多类型物资应急救援选址方面。

2.2 多类型物资与救援主体

在应急物资分类研究中，Hill[26] 批评现行标准不足以满足实际应用需求。他们采用层次分析法（AHP）开展定性与定量研究，并将结果汇总为分类分析。Mete[27]关注各种灾害情景下医疗应急物资的储存与配送。他们以西雅图地震为例，建立了医疗应急物资设施的选址与配送随机规划模型，以检验其方法。X Guan[28] 提出了一种基于混合多属性决策方法的地震应急服务基地选址模型。该方法考虑了选址决策信息的混合不确定性，并提出了一种新的赋权

方法和聚合过程，无需进行信息转换。最后，他们通过数值算例证明了该方法的可行性和有效性。

涉及多方主体的应急选址研究通常聚焦于应急响应阶段。例如，[29, 30]基于权力、合法性和紧迫性，强调利益相关者参与应急响应和协同救援的重要性。JH Zhang 的研究（i）考虑了政府与协议供应商共同参与的联合储备模型，并建立非线性数学模型，分析灾前和灾后的物资储备策略，同时对相关参数进行了敏感性分析。在应急管理准备阶段，[31] 将选址参数转化为多方协同应急响应决策模型中的决策变量，并构建了基于多方协调的应急服务设施选址模型，以最小化任务完成时间和服务获取难度成本。[32]从全局视角结合行政区划，研究应急联动下的选址布局，评估应急物资分类结果对选址决策方案的影响，并最终提出省级和市级储备选址决策及资源配置方案。 [33] 针对非常规突发事件下应急决策的多主体性、复杂性和不确定性特征，基于应急预案之间的个体信息和协同信息，构建非对称关联有向协同网络，以选择非常规突发事件的应急预案。此前的研究还为 Open AI 在医疗救援中的应用提供了指导[34]。当前研究强调了应急响应中协同救援的重要性，并从参数确定、协同网络、救援主体分类以及政府与协议供应商联合储备等方面，分析选址预储备策略中的多主体救援。然而，面对灾害发生时间、地点、后果及道路网络受损情况等不确定因素所导致的不确定应急服务需求，还必须应对规模更大、复杂度更高的多目标优化场景。

现有研究提出了一套基于模糊评价分析和层次分析法的物资分级体系，用于对应急资源进行分类。该体系为资源配置提供了科学合理的方法。然而，现有指标体系缺乏足够的次级指标和实证分析，且依赖假设参数。为

改进该体系，本文旨在完善次级指标，并参考实际数据调整选址模型参数。在应对多个救援主体时，需要考虑多层级网络的构建，以及能够考虑多个救援主体不确定性的模型。然而，在规模更大、结构更复杂的多目标优化场景中，当前多方协同研究的方法可能不再适用。

2.3 复杂灾害情景

在多灾种研究中，Rawls C G[5]采用两阶段混合整数规划选址模型，研究了飓风等自然灾害情境下应急服务设施的选址问题。J Shu[35] 利用扩展图的一种变体，构建救援与供应网络设计模型，以降低洪水和飓风等大规模灾害下应急设施和供应点的成本，并通过2013年东北洪水案例研究验证了所提出的模型。G Erbeyolu[36] 提出了一种应急救援选址模型，考虑设施选址和库存水平，并采用Benders方法求解最优解。Ginger Y[37] 考察了系统中断对危险品应急物流的影响，并提出了一种采用两阶段鲁棒优化方法的时变风险评估方法。研究构建了一个两层混合整数规划模型，并采用列与约束生成算法对模型进行精确求解。该模型在不同规模的随机实例上进行了测试。

针对多灾种情形，既有研究提出了不同类别和强度的灾害情景，并识别了面临停运时的不确定决策信息。然而，关于不同类型灾害如何相互作用及其同时发生的研究仍然有限。

文献中，众多学者对紧急情况应急救援选址模型与算法、多方协同选址、物资分类等主题进行了广泛研究。相关研究成果为危机时期应急物资站点的选址提供了必要的理论基础。本研究在现有研究基础上，聚焦多灾害情景下的应急救援选址模型，分析灾害应急物资分类的系统性与可替代性，并构建基于多救援主体的应急装备储备布局模型。本研究拓展并深化了对应急救援物资选址

与储备模型的认识，为未来的选址与布局研究提供理论支持。

3. 方法

灾害救援需要审慎考虑应急资源分配，以尽量减少人员伤亡和经济损失。近年来，资源分配不足、准备不充分以及次生灾害等问题，使救援行动更加困难。为了有效开展灾害救援，研究应急资源的最优规模和位置至关重要。

3.1 复合灾害情景下的救援策略

3.1.1 复合灾害的耦合度

本文采用灾害风险耦合矩阵技术，对各种灾害造成的后果进行全面分析。尽管存在多种风险，本研究重点考察地震、台风和洪水之间的相互依存关系。研究涵盖灾害的性质与发展、参与救援的救援队伍及其所需储备，以及选址模型的应用等多个方面。

本研究应用灰色理论评估各种灾害之间的相互依存程度[38]。采用1至9的评分尺度构建决策矩阵，并评估各项指标的相对重要性。首先，将矩阵各行的指标值相乘，计算各项指标的权重。

$$\mathrm{M}_i = \prod_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{x_{ij}} (\mathrm{i}=1,2,\ldots,\mathrm{n}) \tag{3.1}$$

其中，$\mathrm{x_{ij}}$ 表示灾害 j 下评价指标 i 的权重。

计算 M 的 n 次方根：

$$\overline{\mathrm{W}_i} = \sqrt[\mathrm{n}]{\mathrm{M}_i} \tag{3.2}$$

确定权重矩阵：

$$\mathrm{Wi} = \overline{\mathrm{W}_i} / \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \sqrt[\mathrm{n}]{\mathrm{W}_i} \tag{3.3}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \frac{(\mathrm{BW})_i}{\mathrm{W}_i} \tag{3.4}$$

$$\mathrm{BW} = \begin{bmatrix} \mathrm{x_{11}} & \cdots & \mathrm{x_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathrm{x_{m1}} & \cdots & \mathrm{x_{mn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{W_1} \\ \vdots \\ \mathrm{W_n} \end{bmatrix} = (d_{i1}{}^{max}, d_{i2}{}^{max}, \ldots, d_{in}{}^{max})^T \tag{3.5}$$

其中，$d_{i1}{}^{max}$为次级耦合指标的最优向量。

一致性检验：

$$\mathrm{CR}=\frac{\lambda_{max}-n}{（\mathrm{n}-1）\ \mathrm{RI}} \tag{3.6}$$

其中，CR 为随机一致性比率，RI 为随机一致性指标。

相关性计算公式如下：

$$\lambda_{ij}=\frac{\min|d_{i1}-{d_{ik}}^{max}|+\rho\max|d_{ik}-{d_{ik}}^{max}|}{|d_{i1}-{d_{ik}}^{max}|+\rho\max|d_{ik}-{d_{ik}}^{max}|} \tag{3.7}$$

其中，ρ 表示分辨系数，通常取 0.5。

耦合度评价矩阵如下：

$$\mathrm{P}_i=(\lambda_{i1},\lambda_{i2},\ldots,\lambda_{in})^T \tag{3.8}$$

计算耦合指数的综合指数：

$$\mathrm{X}_i=\mathrm{W}^T\mathrm{P}_i \tag{3.9}$$

其中，X_i 表示二级指标的综合指标；W^T为特征向量。

对于一个综合性的多灾害耦合系统，其耦合指数的效率函数可表示为：

$$\mu_{\mathrm{ij}}=\frac{\mathrm{X_{ij}}-\beta_{\mathrm{ij}}}{\alpha_{\mathrm{ij}}-\beta_{\mathrm{ij}}},\mathrm{X_{ij}\ is\ positive} \tag{3.10}$$

$$\mu_{\mathrm{ij}}=\frac{\alpha_{\mathrm{ij}}-\mathrm{X_{ij}}}{\alpha_{\mathrm{ij}}-\beta_{\mathrm{ij}}},\mathrm{X_{ij}\ is\ negative} \tag{3.11}$$

本文中的取值如下：α_{ij}=1, β_{ij}=0。

多系统耦合公式如下：

$$\mathrm{C}=\sqrt[m]{\frac{U_1U_{2\ldots}U_m}{\prod_{j=1}^{m}\prod_{\substack{i=1\\i\neq j}}^{m}(U_i+U_j)}} \tag{3.12}$$

3.1.2 物资预测

应急救援物资需求预测是灾害响应中的重要环节，因为它能提高应急救援效率，并确保灾民生存。近年来，XGboost算法作为一种机器学习算法日益受到欢迎，并已证明在预测应急救援物资需求方面成效显著[39]。本文将讨论在预测应急救援物资需求时采用XGboost算法的选择标准。

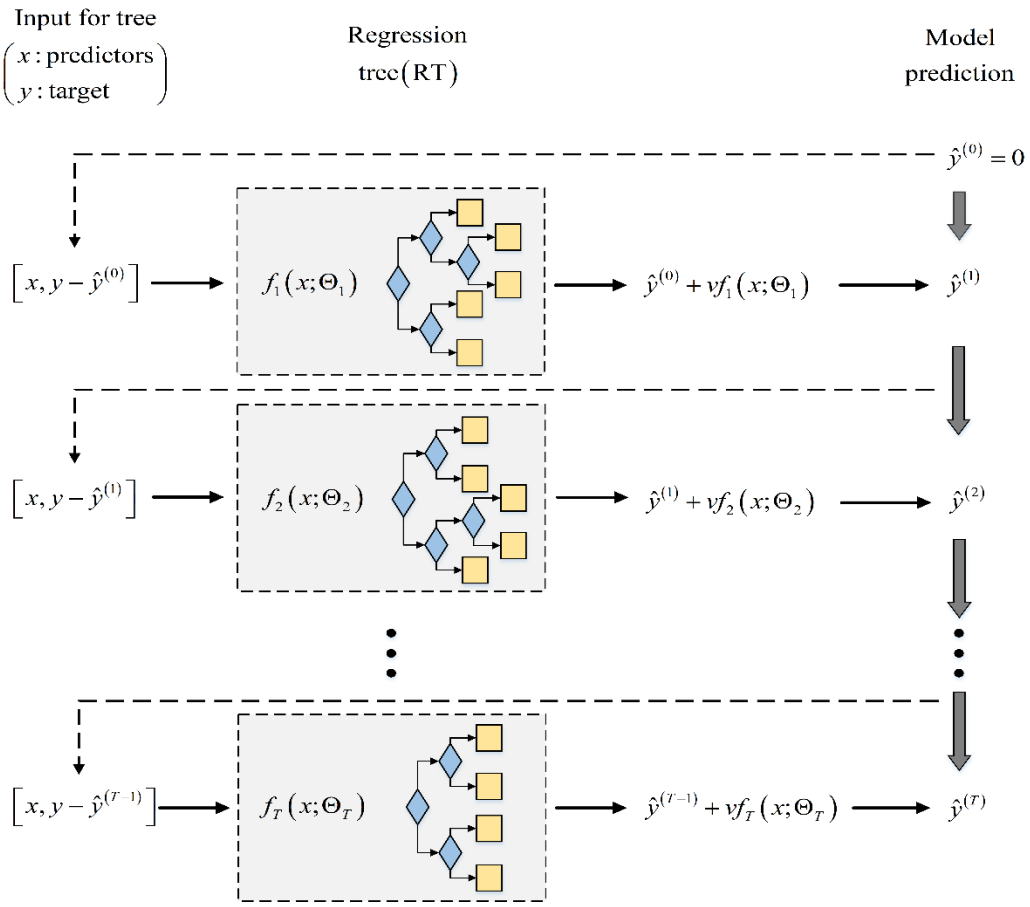

图 2 XGBoost回归模型原理

XGboost模型如下图所示，见图2。

$$\hat{y} = \sum_{k=1}^{K} f_k(x_i), f_k \in F \tag{3.13}$$

损失函数模型如下：

$$\mathrm{L} = \sum_{i=1}^{n} l\left(y_i, \hat{y}_i\right) \tag{3.14}$$

通过最小化损失函数求解函数空间集合，并加入正则项，表达式如下：

$$\mathrm{Obj} = \sum_{i=1}^{n} l\left(y_i, \hat{y}_i\right) + \sum_{k=1}^{K} \Pi(f_k) \tag{3.15}$$

如果基模型是树模型，$\Pi(f_k)$表示树的复杂度。为了获得目标函数的最优解，采用前向逐步算法，每一步都基于此前所有步骤的模型集合，进一步优化目标函数。其中，第 t 步的模型表达式如下：

$$\hat{y}_i^t = \sum_{k=1}^{K} f_k(x_i) = \hat{y}_i^{t-1} + f_t(x_i) \tag{3.16}$$

其中，g_i是$l(y_i,\ \hat{y}_i^{t-1})$函数的一阶导数，h_i 是其二阶导数。第 t 步的损失通过基于前 t-1 步损失的目标函数的二阶导数进行近似。目标函数仅与下式有关：

$$\text{Obj} \approx \sum_{i=1}^{n} l\left(g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t(x_i)^2\right) + \Pi(f_k) \tag{3.17}$$

使用 XGBoost 预测应急物资需求通常包括以下步骤（如图3所示）：

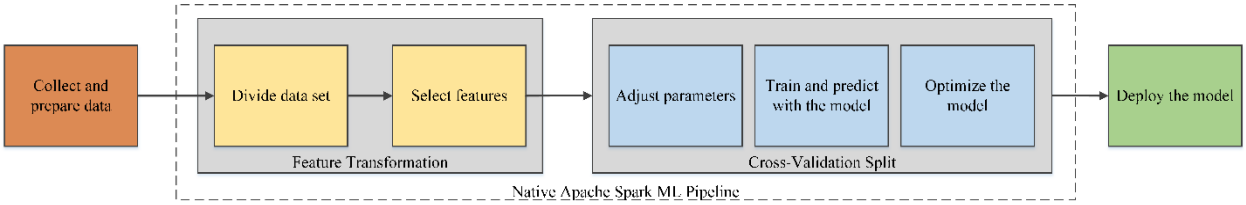

图3 XGBoost回归模型的步骤

(1) 收集并准备数据：收集需求、时间和位置等因素的历史数据，并进行数据清洗、特征提取、标准化和缺失值处理等预处理。

(2) 划分数据集：将数据集划分为训练集和测试集，通常使用 80% 的数据进行训练，20% 的数据进行测试。

(3) 选择特征：选择与需求相关的特征，例如时间、位置和天气。

(4) 调整参数：XGBoost 有多个可调参数，例如树深度、学习率和正则化项，需要通过交叉验证等技术进行调优，以实现最佳性能。

(5) 使用模型进行训练和预测：使用训练集训练模型，然后使用测试集进行预测，并评估模型的准确性和性能。

(6) 优化模型：根据预测结果改进模型，例如调整参数或添加新特征。

(7) 部署模型：将训练好的模型应用于实际场景，以预测应急物资需求，并及时、准确地进行物资分配。

3.1.3 物资分类

直觉模糊理论是一种用于处理不确定性和模糊性的数学技术[40]。它在应急响应场景中具有实际应用，救援人员可以

利用它评估多灾害救援行动中不同物资的相似性和可替代性，并通过案例分析进行总结[41]。具体步骤如下（如图4所示）：



图4. 使用直觉模糊理论对物资进行分类的步骤。

（1）确定决策因素

首先，必须确定对选择应急救援地点至关重要的决策因素。这些因素可能包括救援物资储备量、受灾人口、交通便利程度、周边环境以及其他相关因素。

（2）定义模糊集

为避免不同维度的特征属性值对案例相似度计算产生负面影响，必须先对数值数据进行归一化处理。这有助于定义模糊集。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - {x_j}^{min}}{{x_j}^{max} - {x_j}^{min}} \tag{3.18}$$

要确定决策因素的归一化方式，必须先明确每个因素所属的模糊集。模糊集依据特定规则对变量的可能取值进行分类，从而构成一个集合。例如，交通便利程度可分为“非常便利”“比较便利”“一般”和“不便利”四个等级，如下所示：

非常便利 - (0, 0, 0.2) 便利 - (0.12,
0.32, 0.52) 一般 - (0.44, 0.64,
0.84) 不便利 - (0.76, 0.96, 1.16,
1.16)

(3) 隶属函数确定

必须为每个模糊集建立一个隶属函数，用于表示变量取不同值时的隶属度。例如，要确定决策因素“交通便利度”的隶属度和非隶属度，可以采用三角形隶属函数：

$$\vartheta_A(\mathrm{x}) = \begin{Bmatrix} \left(1 - \frac{\mathrm{x}-a}{\mathrm{b}-a}\right) * D; a < x < b \\ \left(1 - \frac{\mathrm{c}-x}{c-b}\right) * D\ ; b \le x < c \\ 1\ ;\quad in\ other \end{Bmatrix} \tag{3.19}$$

$$\vartheta_A(\mathrm{x}) = \begin{Bmatrix} \left(1 - \frac{\mathrm{x}-a}{\mathrm{b}-a}\right) * D; a < x < b \\ \left(1 - \frac{\mathrm{c}-x}{c-b}\right) * D\ ; b \le x < c \\ 1\ ;\quad in\ other \end{Bmatrix} \tag{3.20}$$

采用模糊逻辑运算和模糊数学方法确定各选址方案的相似度，其中 a、b 和 c 表示三角模糊数的顶点，d 为一个系数。这有助于计算各方案的权重。

$$\mathrm{Sim(A,B)} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(\min(\mu_A(f_i),\mu_B(f_i)))}{\sum_{i=1}^{n} w_i(\max(\mu_A(f_i),\mu_B(f_i)))} + \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(\min(\vartheta_A(f_i),\vartheta_B(f_i)))}{\sum_{i=1}^{n} w_i(\max(\vartheta_A(f_i),\vartheta_B(f_i)))}\right)/2 \tag{3.21}$$

(4) 权重计算

权重是用于描述各特征因素对救援点选址影响程度的量化值。应急救援人员可以通过专家访谈、问卷等方式为各特征因素赋予权重。权重通常以 0 到 1 之间的数值表示，且各特征因素的权重值之和等于 1。不同决策因素对救援点选址的影响不同，应急救援人员需要确定每个决策因素的权重。

根据属性值的离散程度确定的权重 $w_i{}^*$ 由以下公式得出：

$$w_i{}^* = \frac{\mathrm{s}(\mathrm{x}_i)}{\sum_{m=1}^{M} s(\mathrm{x}_i)} \tag{3.22}$$

(5) 模糊综合评价

确定每个决策因素的模糊集和隶属函数后，需要对这些因素进行模糊综合评价，以获得每个选址方案的综合评价值。

$$\text{Comprehensive evaluation value} = \sum(w_i{}^* \times \mathrm{Sim(A,B)}) \tag{3.23}$$

3.2 多目标模型

3.2.1 问题描述

本研究提出了一种多目标数学规划模型，用于确定复杂灾害情景下联合供应商的数量、位置和分配。该模型的目标包括：最大限度地降低应急资源分配成本、最大限度地提高联合供应商的覆盖范围、最大限度地缩小需求与供应商之间的差距，以及最大限度地缩短救援时间。多目标模型如图5所示。

我们考虑针对多种灾害的联合供应商，这些灾害同时发生，且涉及不同类型的物资和设施。联合供应商确保政府所有的供应商、企业和现有供应商协调物资储备。救援机构提供特定和通用的应急救援物资。在这种方法中，考虑了物资的伴随性和转换面积。

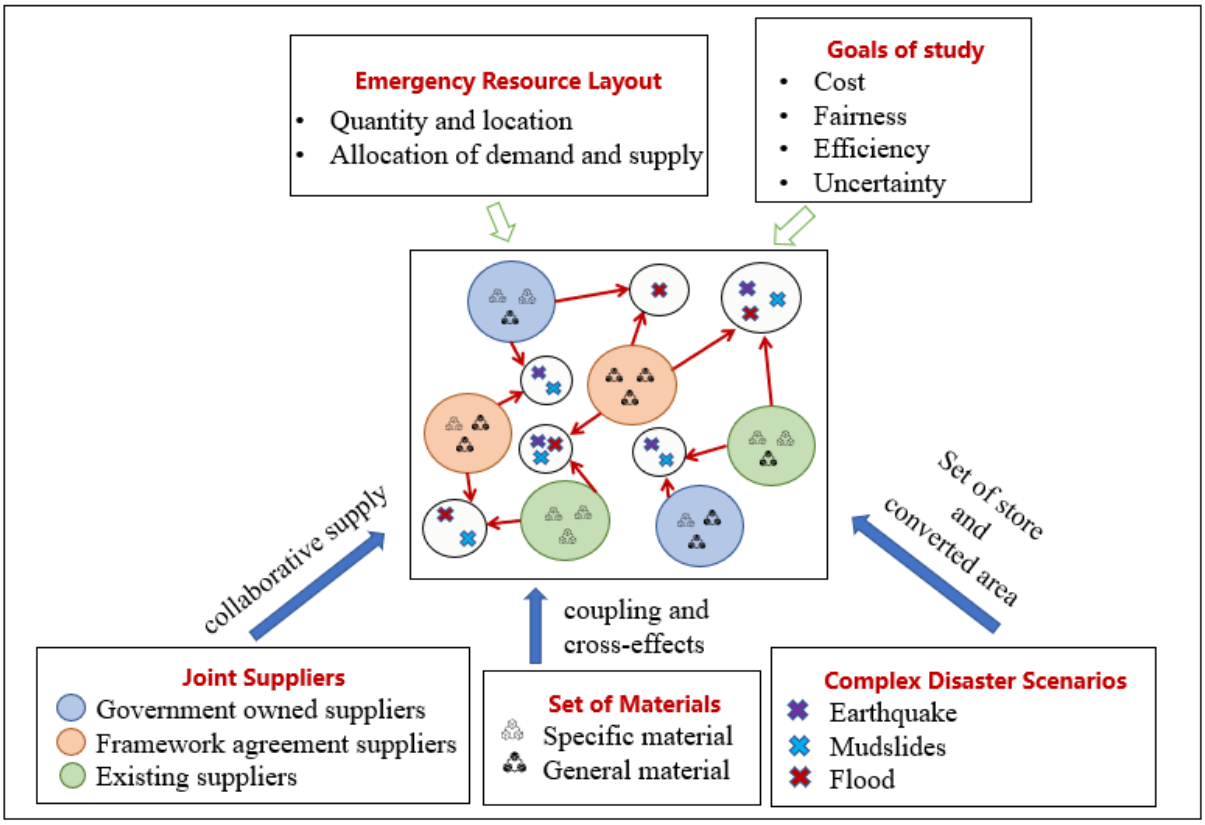

图5 多目标模型框架

3.2.2 模型假设

构建多目标模型时采用以下假设：

(1) 假设不同物资的需求由决策者给出。(2) 各灾区的需求具有随机性，且至少由一个供应点为其提供服务。(3) 灾区的紧急程度服从非凸、非凹且非递增函数。(4) 框架协议供应商的支付方式以物资单位计量。

(5) 不考虑现有储备的建设和运营成本。

基于这些假设，模型设定了四个目标：成本、公平性、应急效率和不确定性。

3.2.3 符号说明

模型的集合、参数和变量介绍如下:

表1 多目标模型的集合

集合名称	集合说明
F	各种灾害点的集合，fi 表示灾害类型。f∈F，F=f1+f2+f3
M	各种灾害所需专用物资的集合，mi 表示专用物资类型。m∈M，M=m1+m2+m3
C	各种灾害所需通用物资的集合，ci 表示通用物资类型物资。c∈C，C=c1+c2+c3
I	各种灾害所需物资的集合，i∈I, I=M+C
W	政府所有的供应商集合，w∈W
P	框架协议供应商集合，p∈P
K	现有供应商集合，k∈K
J	备选供应商集合，j∈J，J=W+P+K

表 2 多目标模型参数

名称 参数	集合说明
N_f	灾区 f 的数量，f ∈ F
N_i	材料类型 i 的数量，i ∈ I
N_w	政府所有的供应商 w 的数量，w∈W

N_p	框架协议供应商的类型数量 p，p∈P
N_k	现有供应商的类型数量 k，k∈K
N_j	供应商数量 j，j∈J，J=W+P+K
V_w	政府所有的供应商 w 的最大面积，w∈W
V_p	框架协议供应商 p 的最大面积，p∈P
V_k	现有供应商 k 的最大面积，k∈K
D_{1i}	灾区的一般物资需求 ，i∈C
C_i	一般物资需求的转换系数，i∈C
D_{2i}	灾区的特定物资需求，i∈M
S_{ki}	现有供应商 k 提供的物资 i 的数量，i∈I，k∈K
B_w	政府所有的供应商 w 的建设和运营成本，w∈W
B_{pi}	框架协议供应商 p 提供的物资 i 的单位成本，i∈I
B_{ki}	现有供应商 k 提供的物资 i 的单位成本，i∈I
G_{wi}	政府所有的供应商 w 提供的单位数量物资成本，i∈I, w∈W
Q_i	物资 i 的转换面积 ，i∈I
N_w^{max}	政府所有的供应商 w 的最大数量，w ∈ W
N_w^{min}	政府所有的供应商 w 的最小数量，w ∈ W
N_p^{max}	框架协议供应商 p 的最大数量，p∈P，i∈I
N_p^{min}	框架协议供应商 p 的最小数量，p∈P
N_k^{max}	现有供应商 k 的最大数量，k∈K，i∈I
N_k^{min}	现有供应商 k 的最小数量，k∈K
E_j	备选供应商 j 的半径覆盖面积与总面积之比的面积，j∈WUPUK
$C_{(djf)}$	供应商 j 在灾区 f 的满意度，j∈WUPUK,f∈F
d_{jf}	供应商 j 到灾区 f 的距离，j∈WUPUK,f∈F
V_{jf}	供应商 j 到灾区 f 的速度，j∈WUPUK,f∈F

R_{jf}	供应商 j 到灾区 f 的最大半径由最大救援时间决定，j∈WUPUK，f∈F
r_{jf}	供应商 j 到灾区 f 的最小半径，可确保灾区面积至少由一个供应商覆盖，j∈WUPUK，f∈F

表. 3 多目标模型的决策变量

变量名称	决策变量说明
变量	
X_j	若选择备选供应商 j，则取值为 1，否则取值为 0，j∈W∪P
y_{jf}	若所选供应商 j 为灾区 f 提供服务，则取值为 1，否则取值为 0，f∈F, j∈W∪P∪K
Z_{wi}	政府所有的供应商w提供的物资i数量，w∈W，i∈I
Z_{pi}	框架协议供应商p提供的物资i数量，p∈P，i∈I
Z_{ki}	现有供应商k提供的物资i数量，k∈K，i∈I

3.2.4 数学建模

复杂灾害情景下应急资源布局的联合供应商多目标模型如下:

目标。

(1) 最小化应急资源布局总成本

$$Min1 = \sum_{w_{\in}W} \left(Bw + \sum_{i\in I}(Gwi \times Zwi \times Xw)\right) + \sum_k Z_{ki} + \sum_{p_{\in}P} \left(\sum_{i\in I}(Xp \times Bpi)\right) \quad (3.1)$$

在选择应急资源供应商时，受实际经济能力限制，成本控制是重要的参考目标。因此，在设计应急资源供应商选址方案时，应在满足需求的前提下尽可能提高资金使用效率、降低成本。成本目标的总成本模型旨在使应急资源成本最小化，这是该模型的第一个目标函数。应急资源布局成本主要包括三部分。第一部分与政府所有的供应商的建设和运营成本有关。方程（1）的第二部分表示由政府所有的供应商和框架协议供应商提供物资的成本。

(2) 最大化备选供应商的覆盖期望

$$Max3 = \sum_{j_{\in}W_{\cup}P_{\cup}K} \left(E_j \times y_{jf} \times F(d_{jf})\right) \quad (3.2)$$

为确保所有需求区域在面临灾害威胁时都能获得相应的应急资源，保障应急救援的公平性也是应急资源选址问题的一项重要目标。此处，将各需求区域的应急资源效用定义为供应商对灾区的满意度和覆盖情况。它由两部分组成：第一部分是备选供应商 j 的覆盖半径所覆盖的面积与该区域总面积之比；第二部分是供应商 j 对灾区 f 的覆盖满意度，公式如下：

$$F(d_{jf}) = \begin{cases} 1, d_{jf} \le r_{jf} \\ 1 - \frac{d_{jf} - r_{jf}}{R_{jf} - r_{jf}}, r_{jf} \le d_{jf} \le R_{jf} \\ 0, d_{jf} \ge R_{jf} \end{cases} \tag{3.3}$$

(3) 最小化需求与供应商之间的差异。

$$\text{Min3} = (\sum_{i \in C} \begin{array}{l} (\sum_k (S_{ki} + Z_{ki}) + \sum_w Z_{wi} + \sum_p Z_{pi} - \sum_f (D1_{fi} * \alpha_i)) + \\ (\sum_{i \in M} (\sum_k (S_{ki} + Z_{ki}) + \sum_w Z_{wi} + \sum_p Z_{pi} - \sum_f D2_{fm})) \end{array} \tag{3.4}$$

如上式所示，第三个目标函数旨在最小化灾区需求与现有供应商、政府所有的供应商及框架协议供应商所提供物资之间的差异。此外，灾区的需求由一般物资和具体物资构成。

(4) 最小化救援时间

$$Min4 = \sum_{j \in W \cup P \cup K} \left(y_{jf} \times \frac{d_{jf}}{V_{jf}} \right) \tag{3.5}$$

考虑到应急资源储备的重要目的是挽救生命，而应急资源的效用直接关系到这一主要目标。应急储备资源的效用主要取决于其及时性。因此，第四个目标函数旨在最小化供应商至灾区的救援时间总和。

s.t.

$$\mathrm{N}_{\mathrm{pi}}^{\min} \le Z_{pi} \le \mathrm{N}_{\mathrm{pi}}^{\max} \tag{3.6}$$

$$\mathrm{N}_{\mathrm{w}}^{\max} \ge \sum_w X_w \quad \ge \mathrm{N}_{\mathrm{w}}^{\min} \tag{3.7}$$

$$\mathrm{N_p^{max}} \geq \sum_p X_p \quad \geq \mathrm{N_p^{min}} \tag{3.8}$$

$$\mathrm{N_k^{max}} \geq \sum_k X_k \quad \geq \mathrm{N_k^{min}} \tag{3.9}$$

$$\sum_i Q_i \quad \times Z_{wi} \leq Vw \tag{3.10}$$

$$\sum_i Q_i \times Z_{ki} \leq V_k \tag{3.11}$$

$$\sum_i Q_i \times Z_{pi} \leq V_p \tag{3.12}$$

$$\sum_{j \in W \cup P \cup K} Z_{jm} \quad \leq D1_{fc} \times \alpha_c \tag{3.13}$$

$$\sum_{j \in W \cup P \cup K} Z_{jm} \quad \leq D2_{fm} \tag{3.14}$$

$$Z_{jm} \leq M \sum_{f1} y_{jf} \quad （m \in m1 \cup m2 \cup m3 \tag{3.15}$$

$$y_{jf} \leq Xj, \mathrm{j} \in \mathrm{W \cup P \cup K}, \forall \mathrm{f} \in \mathrm{F} \tag{3.16}$$

$$X_j \leq \sum_i Z_{ij} \text{，} \quad \forall j \in W \cup P \cup K \tag{3.17}$$

$$y_{wf} + y_{kf} + y_{pf} \geq 1, \mathrm{f} \in \mathrm{F} \tag{3.18}$$

$$y_{jf}, Xj \in \{0,1\} \tag{3.19}$$

$$\mathrm{Zwi, Zpi, Zki} \geq 0 \tag{3.20}$$

约束（3.6）规定了框架协议供应商数量的上下限。约束（3.7）—（3.9）规定了供应商数量的上下限。约束（3.10）—（3.12）根据面积控制供应商的存储容量。约束（3.13）—（3.14）规定每种物资的数量必须大于需求。约束（3.15）规定，如果特定物资 m1 专供供应商 j，则 j 至少服务一个需求区域 f。约束（3.16）表示，只有当供应商 j 被选中储存物资时，它才能服务需求区域 f。约束（3.17）意味着，只有当供应商 j 被选中时，它才能储存一定数量的储备。约束（3.18）确保至少有一个供应商 j 服务灾区 f。约束（3.19）表示二元变量。最后，约束（3.20）为非负约束。

3.3 求解方法

由于当前模型具有多目标特性，优化一个目标函数可能会对其他目标函数产生负面影响[42]。因此，有必要采用多目标优化方法，以获得一组尽可能优化所有目标函数、且不损害任何一个目标函数的解[43]。在多目标

优化问题中，帕累托支配关系定义了何为优良解[44]。如果一个解在所有目标函数上都优于另一个解，则前者支配后者；如果两个解互不支配，则称它们为非支配解。帕累托最优解是指不存在其他解能够支配它的解。

NSGA-II是一种基于遗传算法的多目标优化算法，能够有效处理高维、非凸和非线性问题，并生成分布均匀的非支配解集[45, 46]。NSGA-II算法包含若干步骤，如图6所示。

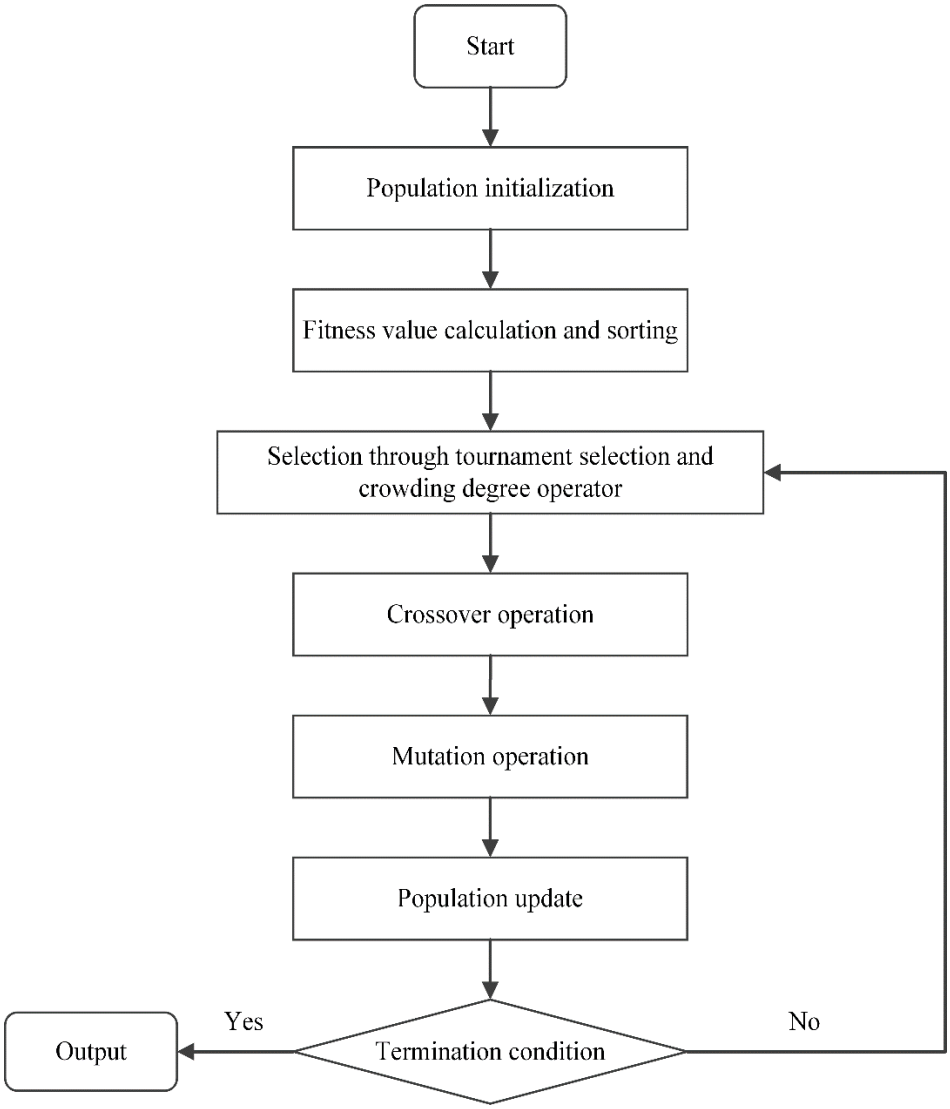

图6 NSGA-II模型框架

多目标应急救援选址模型是一种在应急救援过程中，基于多种因素和

指标。NSGA-II是一种常用的多目标优化算法，用于优化多个目标函数[47]。在多目标应急救援选址模型的NSGA-II算法中，关键操作包括将候选救援选址方案编码为一组决策变量，随机生成初始种群，使用非支配排序和拥挤距离策略选择个体，执行交叉和变异操作，并进行非支配排序和拥挤距离计算，以确保种群多样性和分布[48]。当达到预设的最大迭代次数，或种群的多样性和分布满足要求时，算法终止并输出最优解。

4. 数值研究

为验证所提出的多目标模型及其求解算法，选取以下算例进行验证。本章首先基于研究背景分析一个算例，以验证算法的合理性和适用性。第一步，采用 XGBoost 集成学习方法预测救灾物资需求，并通过案例进行验证。接下来，利用多灾种耦合度和多物资替代转换系数，确定复杂灾害情景下的需求。最后，建立多目标决策模型，并采用所提出的 NSAG-II-XGB 求解算法验证预储备方案。选取多个算例进行验证。

4.1 数据描述与参数设置

为验证所提出的多目标模型及其求解算法，选取以下算例进行验证。本研究采用某易受灾省份的相关数据，证明模型的有效性。考虑到真实数据获取方面的限制，并聚焦于特定范围，我们研究了地震、洪水和泥石流三类灾害。此外，我们还考虑了多种灾害之间相互依存和共同作用的影响。本章首先基于研究背景分析一个算例，以验证算法的合理性和适用性。第一步，采用 XGBoost 集成学习方法预测救灾物资需求，并对案例进行验证。接下来，利用多灾种耦合度和多物资替代

转换系数。最后，建立一个多目标决策模型，并采用所提出的 NSAG-II-XGB 求解算法验证预储备方案。选取若干算例进行验证。

4.1.1 灾害数据

本文的数据来源于2002年8月23日至2022年12月30日期间中国西南地区四川省的灾害数据。由于地理位置和地形条件的影响，该省易受自然灾害侵袭。因此，四川省人民政府及相关机构建立了全面的灾害点数据系统，以有效监测和应对各类自然灾害。本文记录了四川省各地发生灾害的基本信息，包括具体位置、震级、震源深度和发生时间。此外，本文还包含灾害类型和严重程度的基本信息，以及泥石流灾害的具体位置、规模和形状。图7展示了这些详情。

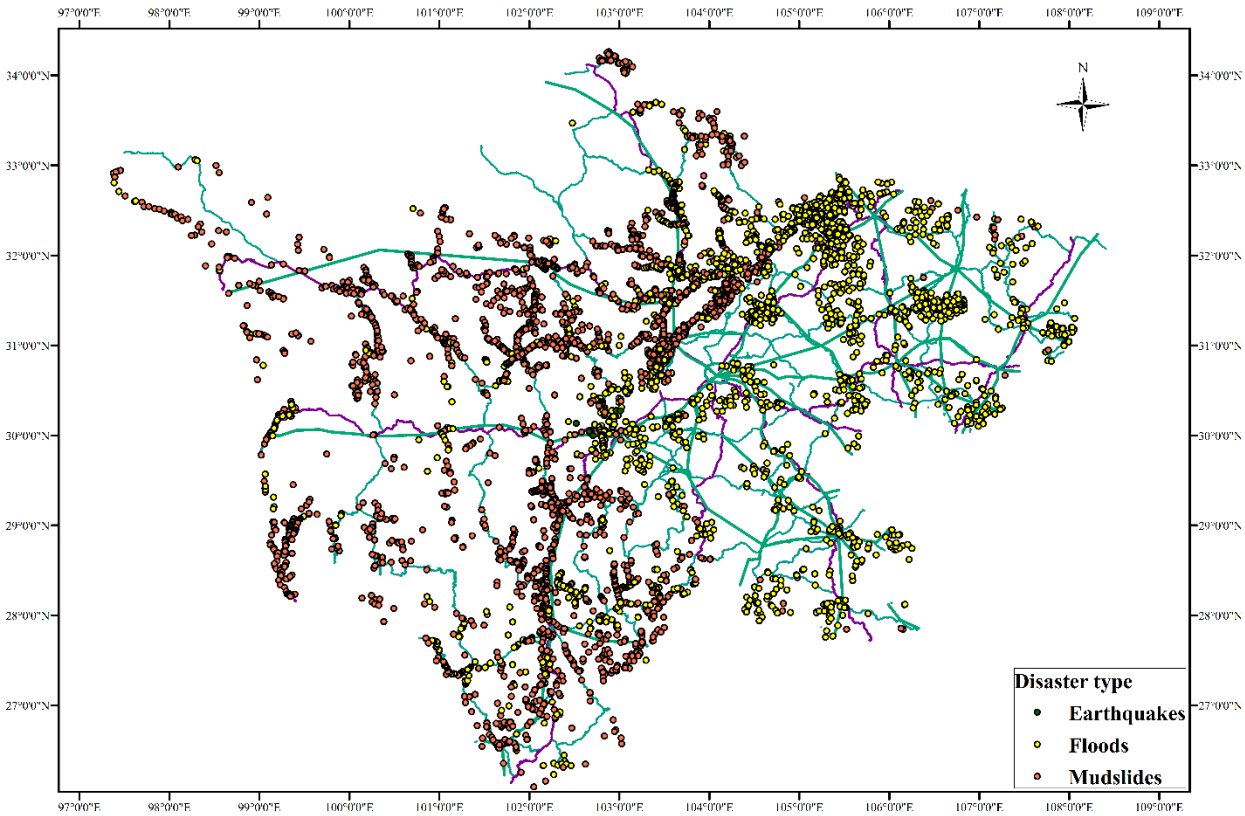

图 7 灾害点采集

按照前文所述的数据预处理步骤，训练集和测试集已创建。表4列出了灾害点字段的定义。

表4 灾害点字段含义表

编号	描述	Type
1	灾害体类型	字符串
2	地理位置	字符串
3	经度	浮点数
4	纬度	浮点数
5	地震烈度	浮点型
6	受威胁人口	int
7	受威胁财产	int
8	灾害等级	int
9	危险等级	int
10	防范建议	字符串
11	监测建议	字符串
12	房屋损毁	int

本研究利用易受灾省份的数据验证模型的有效性。受实际数据获取限制及研究范围所限，本文聚焦于三类灾害：地震、洪水和泥石流。此外，研究纳入了灾区内的22种相关物资，并考虑了多种灾害可能产生的耦合和交互影响，如表5所示。

表5. 4号救援点字段含义

	强度	人口	财产	灾害等级
强度	1	3	1	0.33
人口	0.33	1	0.50	0.20
财产	1	2	1	0.33
灾害等级	3	5	3	1

表6展示了七种灾害情景的风险指数和耦合度。这些数据是基于灾害现场的历史需求数据，采用前文提出的复杂灾害情景风险评估方法计算得出的。

表. 6 灾害耦合与风险指数计算表

耦合	灾害类型	耦合指数	风险指数
耦合双重灾害	洪水和泥石流	0.499	8.58
	洪水和地震	0.498	8.31
三重灾害的耦合灾害	地震和泥石流	0.286	7.97
	地震、洪水和泥石流	0.283	7.73

4.1.2 供应数据

供应点分为三种：省级政府供应点、签约企业储备点和现有供应商。救援响应点是已建成的基础设施，可在突发事件期间提供救援服务和支持。政府、非政府组织或私人机构通常会设立这些响应点，以确保在紧急情况下能够迅速、有效地提供支持和援助。图8展示了这些点的分布情况。

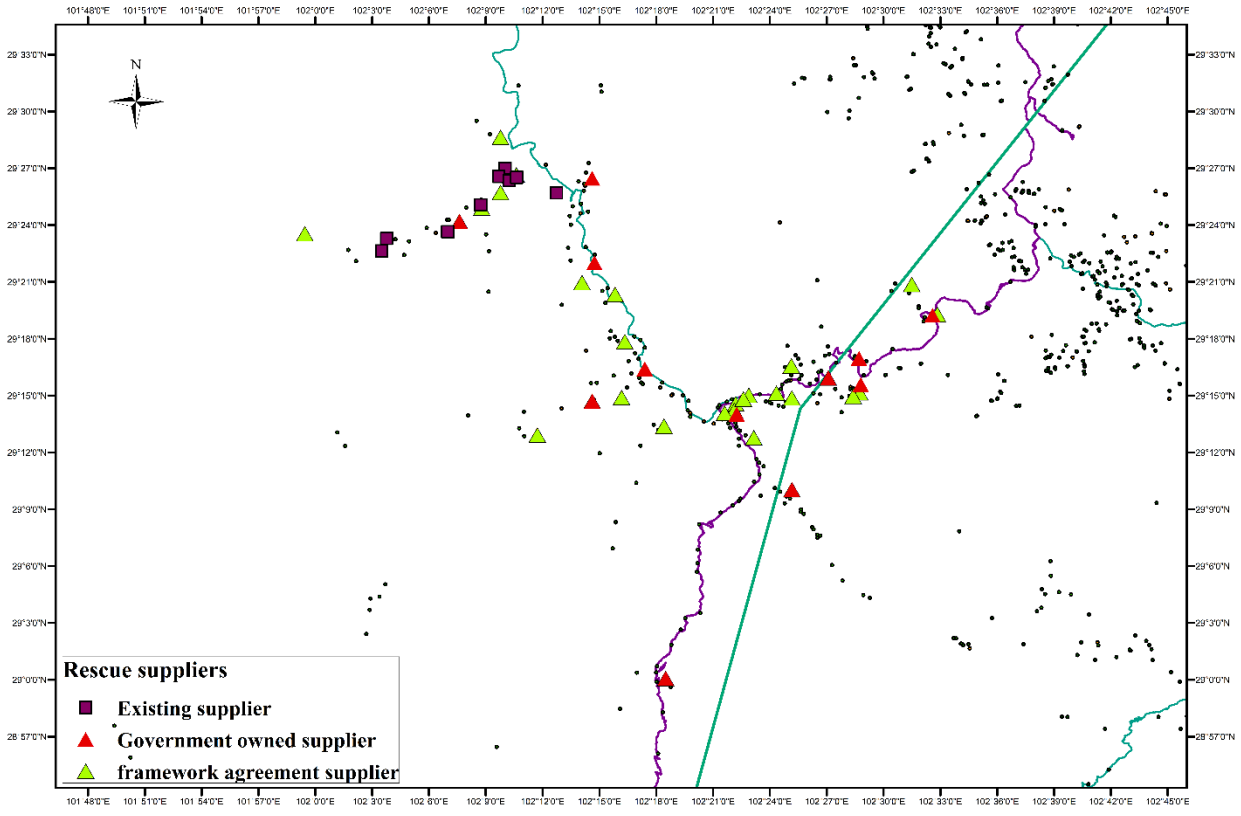

图 8 备选供应商分布

供应点数据包括物资供应点的物资储备、供应点类型、供应点位置、容量限制等。供应点各字段的含义见表7。

表 7. 救援点字段含义表

编号	描述	Type
1	物资类型	字符串
2	具体物资	字符串
3	物资数量	int
4	位置	字符串
5	供应商类型	字符串
6	供应商数量	浮点数
7	最长救援时间	int
8	经度	浮点数
9	纬度	float

根据 [49]，按照各类主要物资在应急救援中的紧迫程度进行分类，并确定具体类型及最长响应时间。

表 8 灾后主要物资救援最长时间表

物资类型	具体类型	最长救援时间（h）
专用物资	救援设备	0.5
	医疗用品	1
一般物资	应急食品和日常用品	3
	帐篷和其他后勤物资	2

本文将22种物资分为通用物资和特殊物资，并根据其紧急情况分类和可替代性进行转换。每种物资所占的面积根据其配套条件确定。利用历史灾害数据，通过 XGBOOST 预测物资需求。尽管需求数据可能存在一定的近似误差，但鉴于本研究的范围和目的，这些误差并非主要问题。政府供应商、协议供应商和现有供应商提供现有物资储备、供应成本以及灾区需求的信息。储备情况决定物资供应约束，如表8所示。

本文聚焦于容易遭受地震等自然灾害的地区，包括泥石流和滑坡。研究根据灾害点、供应点和供应点类型等因素，分析灾害易发区的供应情况。为确定备选供应商的满意度和半径覆盖区域的比例，使用 ARCGIS 计算供应商 j 到灾区 f 的距离以及最大和最小半径。计算方法考虑了不同类型道路的限速（详见表9和图8）。

表 9 供应点与灾害点的匹配字段

编号	描述	Type
1	灾害点编号	int
2	救援点编号	int
3	救援点到灾害点的距离	int
4	救援点到灾害点的最小覆盖半径	浮点数
5	救援点到灾害点的最大覆盖半径	浮点数
6	救援点到灾害点的覆盖期望	浮点型
7	从救援点到灾害点的救援时间	浮点数
8	从救援点到灾害点的救援速度	浮点数

本研究涉及22种通用物资和专用物资。政府所有的供应商和框架协议供应商提供现有物资储备、物资成本以及灾区需求的数据。该问题涉及3429个决策变量，并受1068个约束条件限制。研究承认需求数据近似可能存在误差，但鉴于研究范围，预计这不会构成重大问题。

4.2 数值结果分析

帕累托解集是指导应急救援选址决策和确定最佳救援方案的实用工具。该集合由在多目标优化问题中无法进一步改进的解组成。在应急救援选址的背景下，帕累托解集可能包含多种方案，每种方案都代表一个可能的最优解。例如，就救援响应时间和成本而言，帕累托解集可能由响应时间和成本各不相同的解组成。通过分析帕累托解集，决策者可以更好地权衡不同目标，并选择最合适的方案。这种方法在多个目标之间进行权衡并

选址最优解方面非常有效。本研究采用 NSGA-II-XGB 求解应急救援选址问题，并发现共计 40 组帕累托解，如图 9 所示。

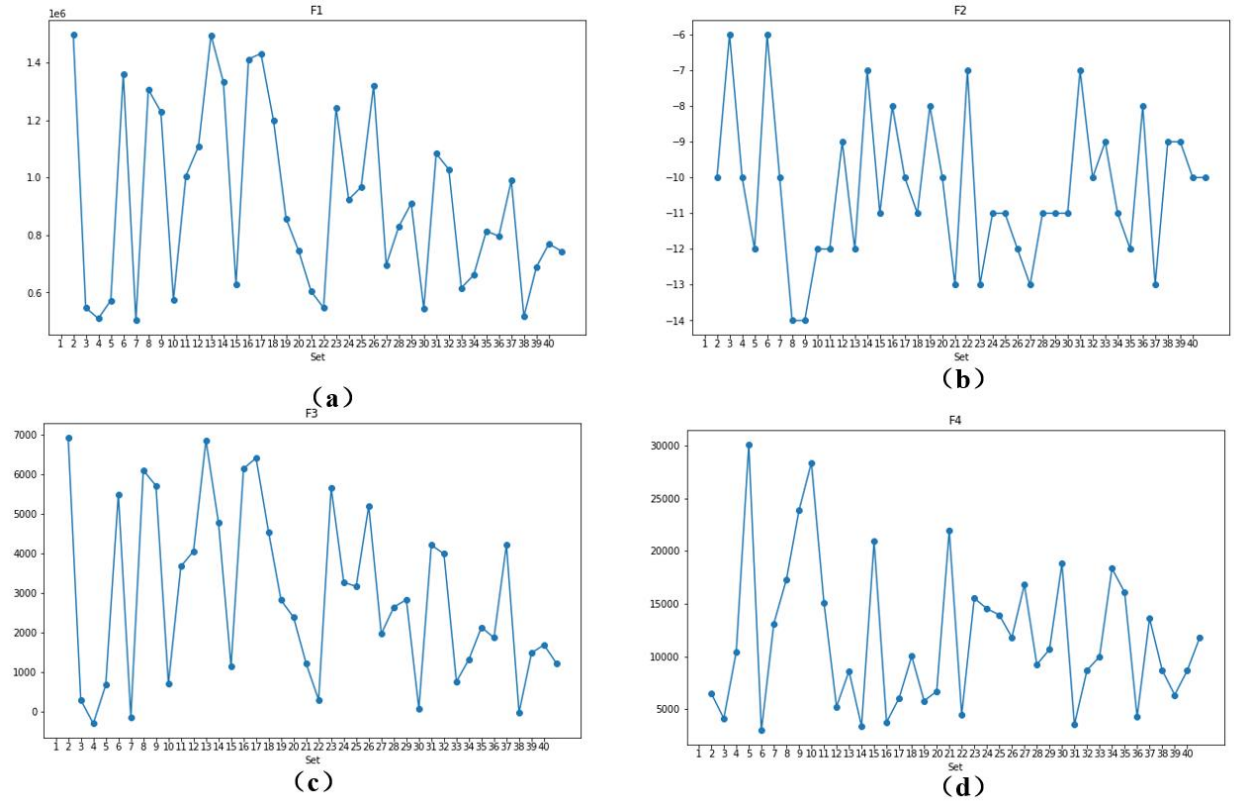

图9 多目标模型的帕累托解

救援行动的成本由多个部分构成，例如运输、维护、人员和设备。选择最优的救援地点可以最大限度地降低这些成本，进而影响行动的效率和成效。例如，选择靠近灾区且交通便利的地点可以降低运输成本；选择合适的设备和物资可以减少维护成本；高效部署人员和资源则可以提升整体效率并降低成本。当优先目标是降低成本时，帕累托分析表明，方案2、3、4、6、9、21、29和37是高性价比方案，其中方案2对应的一种解如图10所示。

当重点关注覆盖和公平性时，选择一个能够覆盖最大数量受灾群众并在不同地区公平分配救援资源的救援地点至关重要。帕累托分析表明，就覆盖和公平性而言，方案4、7、8、9、20、22、26、34和36为最优方案。

当关注需求与供应之间的差异时，需求预测至关重要。准确预测救援地点的需求有助于相关组织提前做好准备，包括部署人员、物资和设备。这可以确保在发生紧急情况时迅速、及时地作出响应，减少人员伤亡和财产损失。帕累托分析表明，方案2、3、4、6、9、21、29和37能够提供最准确的预测。

在时间至关重要的情况下，及时选择救援地点至关重要。选址延误可能导致救援效率降低，并增加人员伤亡风险。需要采取有效措施来加快响应时间。帕累托分析表明，方案 2、5、11、13、15、30、35 提供了救援时间最短的解决方案。

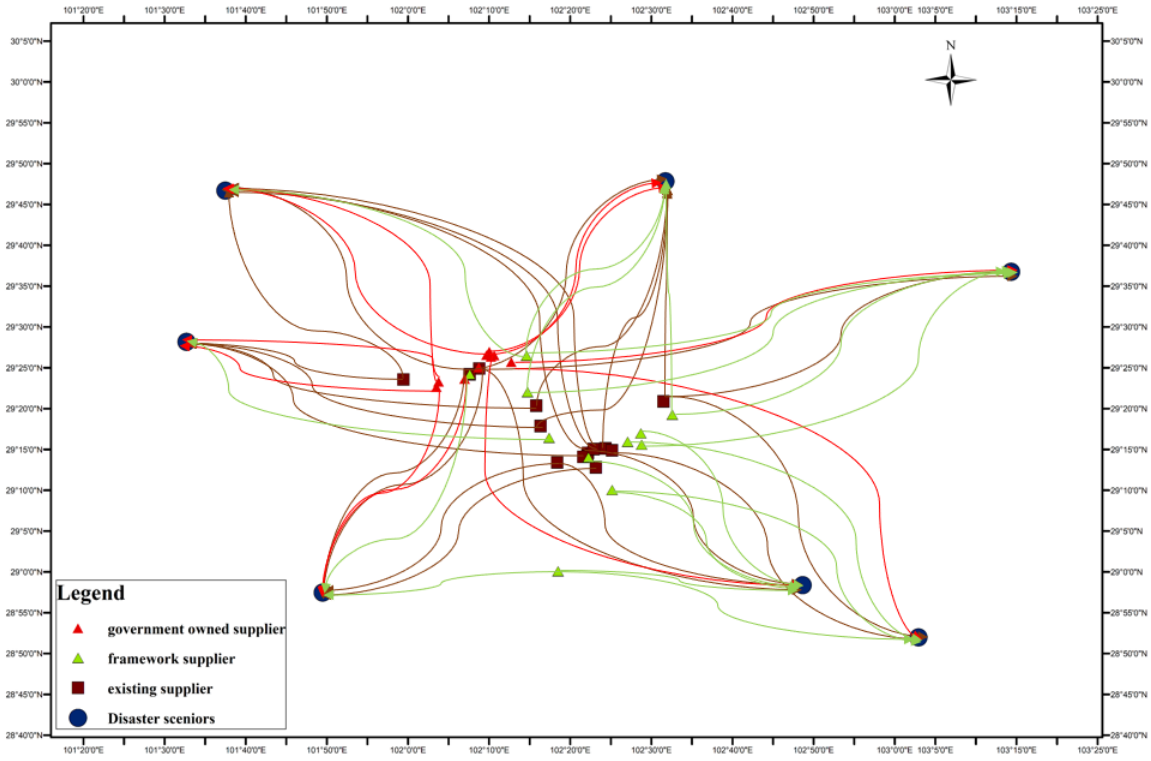

图 10 成本最低的帕累托解示例

5. 结论

复合灾害发生后，由于成本高、覆盖不足以及不同灾害之间的相互作用，物资储备面临困难。仅依靠政府或合同供应商，无法满足多个灾区的需求，也难以完成应急物资的准备。因此，选择协议供应商

并做好物资储备，对于多灾种应急资源布局至关重要。一个综合考虑成本、公平性、应急效率和不确定性的多目标模型，能够有效应对灾害需求的变化，并提高应急救援效率。

为复杂灾害情景下的应急救援提供可靠策略，本研究将这些因素纳入多目标模型。通过基于情景的方法来表示复合灾害，建立多目标数学模型，以确定供应商储备点及其储备数量。该模型展现了政府、协议和现有供应商针对不同类型灾害的协同响应。基于易受灾省份的大型数据集，本文的首要目标是使政府供应商、合同供应商和现有供应商的总体期望成本最小化。此外，本文还考虑供应商的最大覆盖期望，并尝试利用多目标模型，缩小各供应商之间物资需求预测的差异，同时缩短救援时间。

案例分析表明，所提出的方法能够较好地估算物资储备的数量和位置，并可应用于各种类型的灾区。因此，本文为政府供应商、合同供应商和现有供应商的物资位置选择与布局提供了有价值的解决方案。本文提出的NSGA-II-XGB算法经验证，在处理复合灾害方面表现良好。

与以往研究相比[48, 50, 51], ，本文做出了几项相关贡献。首先，本文考虑了复杂灾害情景的耦合交互作用，并确定了多个复合灾害之间的交互作用对应急救援选址的影响。其次，本文基于现有救援响应点提出了多个救援主体协同响应的方案。第三，本文考虑了通用物资与特定灾害情景下物资之间的转换和替代。最后，本文提出的模型根据帕累托点的分布和目标偏好，为决策提供了一系列可选方案。

然而，本研究仅为初步探索，未来学者应对这一主题进行更系统、更专业的分析。未来的研究方向之一可以是考虑不同类型的车辆和运输成本，以及路径规划问题

和应急救援的车辆调度。此外，考虑更多目标函数并提出一种新的元启发式算法，也可以作为未来的研究方向。

致谢

本研究部分经费来自中国陕西省自然科学基础研究计划、交通-能源-环境复杂机制与系统调控（资助编号：2021JC-27）、陕西省重点科技创新团队、公路交通基础设施数字化与智能灾害管理与控制创新团队（资助编号：2023-CX-TD-11）

参考资料

1. He, B., 等, 《2011年至2015年中国山洪灾害特征分析》。Natural Hazards，2018年。90：407-420。 2. Zhou, L., 等, 《自然灾害应急决策：综述》。《国际灾害风险降低杂志》，2018年。27：567-576。 3. Wang, Y. 和 H. Chen, 《区块链：一种通过多智能体参与提升协同应急管理绩效的潜在技术》。《国际灾害风险降低杂志》，2022年。72：102867。 4. Andreassen, N., O.J. Borch, 和 A.K. Sydnes, 《信息共享与应急响应协调》。Safety Science，2020年。130：104895。 5. Rawls, C.G. 和 M.A. Turnquist, 《为灾害响应预置应急物资》。Transportation research part B: Methodological，2010年。44(4)：521-534。 6. Zhang, T., 等, 《基于主题模型的框架：利用社交媒体数据识别救援物资需求分布》。International Journal of Geographical Information Science，2021年。35(11)：2216-2237。 7. Drakaki, M., H.G. Gören, 和 P. Tzionas, 《用于难民安置选址的智能多智能体决策支持系统》。《国际灾害风险降低杂志》，2018年。31：576-588。 8. Su, Z., 等, 《自然灾害中并发事件的多重应急资源分配》。《国际灾害风险降低杂志》，2016年。17：199-212。 9. Hu, C., X. Liu, 和 Y. Hua, 《不确定性条件下应急资源分配的双目标鲁棒模型》。International Journal of Production Research，2016年。54(24)：7421-7438。 10. Hick, J.L., D. Hanfling, 和 S.V. Cantrill, 《灾害中稀缺资源的分配：急诊科原则》。Annals of emergency medicine，2012年。59(3)：177-187。 11. Eriskin, L., M. Karatas, 和 Y.-J. Zheng, 《大流行病期间医疗资源管理与选址规划的鲁棒多目标模型》。Annals of Operations Research，2022年：1-48。 12. Alamdar, F., M. Kalantari, 和 A. Rajabifard, 《面向灾害管理的多机构传感器信息集成》。Computers, Environment and Urban Systems，2016年。56：68-85。 13. Zheng, Y.-J., S.-Y. Chen, 和 H.-F. Ling, 《灾害救援行动的进化优化：综述》。Applied Soft Computing，2015年。27：553-566。 14. Safeer, M., 等, 《应急人道主义物流中的运输与配送分析》。Procedia Engineering，2014年。97：2248-2258。 15. Hu, H., 等, 《应急物资调度优化模型与算法：综述》。《交通运输工程学报（英文版）》，2019年。6(5)：441-454。 16. Tang, X., 等, 《上海多灾种预警系统：应对城市大都市区灾害风险降低的挑战》。Institutional Partnerships in Multi-Hazard Early Warning Systems: A Compilation of Seven National Good Practices and Guiding Principles，2012年：159-179。

17. Guan, X. 等，考虑配送时间序列特征的地震救援物资储备库多层级覆盖选址模型。《交通运输工程学报（英文版）》，2021年。8(2)：第209-224页。18. Haghi, M.、S.M.T.F. Ghomi 和 F. Jolai，针对需求与资源不确定性的灾前／灾后时期鲁棒多目标模型开发。《清洁生产杂志》，2017年。154：第188-202页。19. An, S. 等，考虑设施中断、途中拥堵和设施内排队的可靠应急服务设施选址。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2015年。82：第199-216页。20. Döyen, A.、N. Aras 和 G. Barbarosoğlu，人道主义救援物流两级随机设施选址模型。《优化快报》，2012年。6：第1123-1145页。21. Bozorgi-Amiri, A.、M.S. Jabalameli 和 S. Mirzapour Al-e-Hashem，针对不确定性的灾害救援物流多目标鲁棒随机规划模型。《运筹学频谱》，2013年。35：第905-933页。22. Ni, W.、J. Shu 和 M. Song，灾害响应行动中的位置选址与应急库存预置：最小最大鲁棒模型及玉树地震案例研究。《生产与运营管理》，2018年。27(1)：第160-183页。23. Tofighi, S.、S.A. Torabi 和 S.A. Mansouri，混合不确定性下的人道主义物流网络设计。《欧洲运筹学杂志》，2016年。250(1)：第239-250页。24. Zhang, J.-H. 等，政府与框架协议供应商联合储备模式下的应急救援物资问题求解。《公共科学图书馆·综合》，2017年。12(10)：第e0186747页。25. Sheu, J.-B. 和 A.Y.-S. Lin，全球物流网络配置的层级设施网络规划模型。《应用数学建模》，2012年。36(7)：第3053-3066页。26. Hill, M.J. 等，空间决策支持中的多准则决策分析：ASSESS层次分析法以及定量方法和空间显式分析的作用。《环境建模与软件》，2005年。20(7)：第955-976页。27. Mete, H.O. 和 Z.B. Zabinsky，灾害管理中医疗物资选址与配送的随机优化。《国际生产经济学杂志》，2010年。126(1)：第76-84页。28. Guan, X. 等，基于混合多属性决策的地震应急服务站选址分配研究。《Natural Hazards》，2018年。90：第337-348页。29. McKnight, B. 和 M.K. Linnenluecke，企业对自然灾害的响应如何增强社区韧性：利益相关者视角。《组织与环境》，2016年。29(3)：第290-307页。30. Mojtahedi, M. 和 B.L. Oo，灾害风险管理中利益相关者主动参与的关键属性。《国际灾害风险降低杂志》，2017年。21：第35-43页。31. Wang, Y.、S. Peng 和 M. Xu，基于时空资源配置的应急物流网络设计。《知识型系统》，2021年。223：第107041页。

32. Chang, M.-S.、Y.-L. Tseng 和 J.-W. Chen，不确定性条件下洪水应急物流准备问题的情景规划方法。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2007年。43(6)：第737-754页。33. Zhang, Y.、Q. Ding 和 J.-B. Liu，突发公共卫生事件应急物流能力绩效评估：以COVID-19为视角。《国际物流研究与应用杂志》，2022年。25(12)：第1509-1522页。34. Huang, H. 等，ChatGPT如何塑造牙科未来：多模态大型语言模型的潜力。arXiv预印本 arXiv:2304.03086，2023年。35. Shu, J.、W. Lv 和 Q. Na，人道主义救援供应网络设计：基于扩展图的方法及2013年中国东北洪水案例研究。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2021年。146：第102178页。36. Erbeyoğlu, G. 和 Ü. Bilge，实现有效且公平灾害响应的鲁棒灾害准备模型。《欧洲运筹学杂志》，2020年。280(2)：第479-494页。37. Ke, G.Y.，危险品可靠应急物流管理：两阶段鲁棒优化方法。《计算机与运筹学》，2022年。138：第105557页。38. Yabe, T. 和 S.V. Ukkusuri，收入不平等对灾后疏散、返迁和隔离的影响。《交通研究D辑：交通与环境》，2020年。82：第102260页。39. Roy, K.C. 等，利用交通系统和社交媒体实时数据预测飓风疏散期间的交通需求。《交通研究C辑：新兴技术》，2021年。131：第103339页。40. Shankar, R.、D. Choudhary 和 S. Jharkharia，综合风险评估模型：可持续货运系统案例。《交通研究D辑：交通与环境》，2018年。63：第662-676页。41. Shao, J. 等，基于直觉模糊案例推理的救援需求预测。《社会经济规划科学》，2021年。74：第100932页。42. Zhou, Y. 等，多时期动态应急资源调度问题的多目标进化算法。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2017年。99：第77-95页。43. Zhong, S. 等，随机需求下灾害救援设施选址与车辆路径问题的风险规避优化。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2020年。141：第102015页。44. Rezaei-Malek, M. 等，灾害管理中救援物资预置的效率、效能与平衡权衡近似方法。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2016年。93：第485-509页。45. Kundu, T.、J.-B. Sheu 和 H.-T. Kuo，应急物流管理——综述与未来研究建议。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2022年。164：第102789页。46. Goerigk, M.、K. Deghdak 和 P. Heßler，综合疏散规划模型与遗传求解算法。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2014年。71：第82-97页。47. Fang, X. 等，改进NSGA-II算法的研究及其在应急管理中的应用。《工程数学问题》，2018年。2018：第1-13页。

48. Sun, H. 等，一种针对中断风险下人道主义物流网络的新型基于情景的鲁棒双目标优化模型。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2022年。**157**：第 102578 页。

49. Long, C. 基于在线地理信息系统和定期时刻表对应急救援多式联运的评估。载于《物理学杂志：会议系列》。2021年。IOP出版社。

50. Liu, Y.、N. Cui 和 J. Zhang，面向灾后人道主义医疗服务的临时设施选址与伤员分配规划一体化。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，2019年。128：第 1–16 页。

51. Wang, Q. 和 X. Nie，考虑交通网络缓解和交通拥堵的应急物资规划随机规划模型。《社会经济规划科学》，2022年。79：第 101119 页。