

中文引用格式: 龚英, 刘晓聪, 周愉峰, 等. 面向灾情侦察的有优先级多无人机协同调度优化[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 202-212.

英文引用格式: GONG Ying, LIU Xiaocong, ZHOU Yufeng, et al. Prioritized multi-UAV collaborative scheduling optimization for disaster reconnaissance[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 202-212.

# 面向灾情侦察的有优先级多无人机协同调度优化\*

龚英教授, 刘晓聪, 周愉峰\*\*教授, 杨维

(重庆工商大学管理科学与工程学院, 重庆 400067)

中图分类号: X915.5 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0732

基金项目: 国家社科基金资助(23XGL039)。

**【摘要】** 为提高灾情侦察效率, 针对灾害应急响应中无人机(UAV)侦察调度问题, 提出一种考虑优先级的灾情侦察多 UAV 协同调度优化模型。首先采用混合整数非线性规划描述模型, 开发一种改进的禁忌搜索算法, 并通过引入特定的邻域算子和修复算子, 提升算法的搜索能力和解的质量; 然后设计 2 组算例验证模型和算法, 算例组 1 源于 2021 年郑州洪灾的实际情境, 算例组 2 为不同规模的模拟算例。结果表明: 模型和算法得到有效验证, 敏感性分析能够探讨飞行速度、UAV 数量、型号以及续航能力对侦察能力的影响; 增加 UAV 数量和优化型号能显著提高侦察效率; 资源有限时, 应优先选择侦察能力强的 UAV; 资源充足时, 飞行速度则更为关键。

**【关键词】** 灾情侦察; 无人机(UAV); 调度优化; 禁忌搜索算法; 侦察优先级

## Prioritized multi-UAV collaborative scheduling optimization for disaster reconnaissance

GONG Ying, LIU Xiaocong, ZHOU Yufeng, YANG Wei

(School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University,  
Chongqing 400067, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of disaster reconnaissance, a prioritized multi-UAV cooperative scheduling optimization model was proposed for the UAV reconnaissance scheduling problem in disaster emergency responses. An improved tabu search algorithm was proposed by using a mixed integer nonlinear programming model. Moreover, specific neighborhood operators and repair operators were used to enhance the algorithm's search capability and solution quality. Two cases were designed to validate the model and algorithm performance. The first case was based on the actual scenario of the Zhengzhou flood in 2021, and the second case simulated examples of different scales. The results indicated that the model and algorithm were effectively validated. The effects of flight speed, UAV quantity, model, and endurance on reconnaissance capabilities were investigated through sensitivity analyses. The reconnaissance efficiency can be significantly improved by increasing the number of UAV models and optimizing them. UAVs with strong reconnaissance capabilities should be given priority when resources are limited. However, flight

\* 文章编号: 1003-3033(2024)11-0202-10; 收稿日期: 2024-05-16; 修稿日期: 2024-08-17

\*\* 通信作者: 周愉峰(1984—), 男, 湖南双峰人, 博士, 教授, 主要从事应急管理与应急物流方面的研究。E-mail: xtuzyf@qq.com。

speed is more critical when resources are sufficient.

**Keywords:** disaster reconnaissance; unmanned aerial vehicle (UAV); scheduling optimization; tabu search algorithm; reconnaissance prioritization

## 0 引 言

近年来,全球范围内自然灾害发生频次持续攀升。2000—2019年,全球发生一级及以上自然灾害事件 11 765 起,灾害发生频次较此前 10 年上升 61%。2022 年,自然灾害共造成 1.12 亿人次受灾,直接经济损失达 2 386.5 亿元<sup>[1]</sup>。其中,洪灾频次最高,后果最严重,造成 8 049 人死亡,比历史平均高出 20%。灾害发生后,及时准确的灾情信息传递对于抢险救灾工作至关重要。无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)以其机动性强、部署灵活等优势,在灾情侦察中发挥着重要作用。然而,灾情侦察过程中,由于灾区范围广、灾情复杂多变等因素的限制,UAV 的调度问题复杂。传统的灾情侦察 UAV 调度方法往往忽略灾情的优先级,导致侦察效率较低,无法高效满足灾情应对的紧急需求。因此,研究考虑优先级的灾情侦察多 UAV 协同调度优化问题具有重要价值。

目前,国内外学者研究了灾情侦察问题,如冉桂吉<sup>[2]</sup>通过三维建模探讨了 UAV 辅助侦察在危化品泄漏中应急处置的应用;许可等<sup>[3]</sup>研究了基于改进拍卖算法的多 UAV 灾后侦察任务分配问题;梁佳琪等<sup>[4]</sup>开发了一套基于北斗导航系统的侦察机器人群组多任务调度智能导航系统;DA Hu 等<sup>[5]</sup>开发了一种基于建筑物损坏信息的深度学习方法,以优化 UAV 的任务分配和路线计算;ABHISHEK 等<sup>[6]</sup>模拟了在班加罗尔的洪水场景中,利用一组 UAV 来辅助陆地车辆进行资源动态配送的问题;CHANG Kuojen 等<sup>[7]</sup>结合 UAV 图像与卫星图像,评估台风前后的地形和滑坡变化;YEŞİLLER 等<sup>[8]</sup>提出一种可持续灾后物资管理的灾情侦察框架;JEDDI 等<sup>[9]</sup>开发了一种用于电力设施灾后侦察的深度学习方法。也有一些文献研究了灾害中 UAV 应用问题,如章可怡等<sup>[10]</sup>研究了山区自然灾害应急物资调度优化问题,通过卡车和 UAV 协同运输模型提升物资运输效率;李国强<sup>[11]</sup>探讨了 UAV 航测技术在地质灾害应急测绘中的应用;张海生<sup>[12]</sup>基于 UAV 贴近摄影测量技术,研究了贵州山区滑坡监测建模与智能预警,旨在提高滑坡监测的效率和准确性;AVANZATO 等<sup>[13]</sup>提出一种 UAV-微蜂窝智能数据感知和地理定位算

法,在自然灾害中定位被困人员;ALSAMHI 等<sup>[14]</sup>提出一种基于 UAV 计算辅助的搜索和救援任务框架,通过评估网络性能和参数优化,加速救援效率;WAN Pengfu 等<sup>[15]</sup>提出一种时变不确定信息下基于深度强化学习的多 UAV 调度方法。还有许多学者研究了“救援车+UAV”协同配送模式,如 MOSHREF 等<sup>[16]</sup>建立了以所有客户的等待时间之和最小为目标的“救援车 + UAV”动态协同配送路径规划模型;刘长石等<sup>[17]</sup>考虑疫区风险级别、UAV 载重等因素,借助“救援车+UAV”动态协同配送规划模型来解决疫区应急物资供应问题。上述研究为灾情侦察提供了多种技术和方法,然而,忽略了不同灾情点的优先级差异,未能针对高价值的关键点进行优先侦察,难以满足紧急救援的时效性需求。

鉴于此,笔者考虑不同受灾点的侦察优先级差异及多型 UAV 的协同,构建一个以最大侦察时间最小化为目标的灾情侦察多 UAV 协同调度优化模型,并提出一种改进的禁忌搜索算法,以期为应急管理部门优化 UAV 灾情侦察调度策略提供决策借鉴。

## 1 面向灾情侦察的 UAV 调度问题描述

灾害发生后,灾区的通信网络与道路等基础设施往往会受到不同程度的破坏。不同受伤程度的伤员和被困人员在短时间内大量出现。应急指挥中心急需得到灾区灾情、人员被困及其伤情等具体信息,并根据信息安排救援行动。UAV 具有体积小、续航长、成本低、机动性好、操作简单的特点,能够克服灾害复杂环境的障碍,在短时间内获取珍贵的灾情信息。

将问题定义为一个救援网络  $G = (Y, E)$ , 其中,  $Y$  为顶点集,由指挥中心  $O$  与侦察点  $C$  组成。每个侦察点都有各自的优先级以及基础侦察时间。 $E$  为弧集,网络中的边皆为无向。UAV 群开始执行任务时会根据侦察点的优先级排序优先侦察优先级高的点,并被允许回到最近的指挥中心更换电池。执行侦察任务的总时间既包含点之间的飞行时间,也包含侦察点的基础侦察时间以及根据被困人员数量决定的额外侦察时间。UAV 需要根据通信设施的受损情况侦察现场,通信设施的受损程度和人员分布情况决定了侦察点的数量、优先级以及单点的侦察时间。

综上所述,文中拟解决的问题为:在灾情未知情况下,根据不同型号 UAV 的参数特性,规划一组 UAV 完全飞越受灾地区以及时获取有效的灾情信息,并确定每架 UAV 的最优侦察路径,在满足侦察优先级约束下使最大侦察时间最小。

为明确应用范围,提出以下假设:

假设 1: UAV 有多种型号,具有差异化的技术参数,如电量限制、飞行速度、侦察能力等。

假设 2: UAV 在每个侦察点存在一定的侦察时间。若侦察到该点有被困人员,则根据 UAV 的侦察效率调整因子,会相应增加更加细致的工作并产生额外的侦察时间,以确保获取足够的信息以辅助救援。

假设 3: 同一 UAV 可多次出发执行任务,并被允许更换电池,但更换电池需返回指挥中心并消耗额外的时间。

## 2 面向灾情侦察的 UAV 调度模型

根据问题描述,建立模型如下:

$$Z = \min \max T_f, f \in F \quad (1)$$

式中:  $T_f$  为 UAV  $f$  完成任务的时间,  $\min$ ;  $F$  为 UAV 集合,  $f \in F$ 。式(1)表示 UAV 最大侦察时间最小化。

$$\sum_{f \in F} \sum_{n \in N} x_{inf} = 1, \forall i \in C \quad (2)$$

式中:  $x_{inf}$  为二元变量,若 UAV  $f$  第  $n$  次出发侦察  $i$  点取 1, 否则为 0;  $Y$  为点集合,  $i \in Y, Y = O \cup C$ ;  $O$  为指挥中心集合;  $C$  为侦察点集合。式(2)表示每个侦察点  $i$  都有 UAV 前去侦察。

$$2 \leq x_{inf} + x_{jnf} + M(1 - y_{ijnf}), \quad (3)$$

$$\forall i, j \in Y, f \in F, n \in N, i \neq j$$

式中:  $M$  为极大正整数;  $y_{ijnf}$  为二元变量,若 UAV  $f$  第  $n$  次出发从  $i$  点去  $j$  点取 1, 否则为 0;  $N$  为出发次数集合。式(3)表示 UAV  $f$  在第  $n$  次出发从  $i$  点去  $j$  点的前提是第  $n$  次出发要去侦察  $i$  点和  $j$  点。

$$(\delta_i - \delta_j) y_{ijnf} \geq 0, \forall i, j \in C, f \in F, n \in N \quad (4)$$

式中  $\delta_i$  为点  $i$  的侦察优先级系数。式(4)为优先级约束。

$$\sum_{j \in C} \sum_{n \in N} y_{ojnf} = 1, \forall o \in O, f \in F \quad (5)$$

式(5)表示 UAV  $f$  第  $n$  次出发的起点是指挥中心。

$$\sum_{i \in Y} y_{ijnf} - \sum_{i \in Y} y_{jinf} = 0, \forall j \in Y, f \in F, n \in N \quad (6)$$

式(6)表示 UAV  $f$  的流量约束。

$$\sum_{i \in C} \sum_{n \in N} y_{ionf} = 1, \forall o \in O, f \in F \quad (7)$$

式(7)表示 UAV  $f$  第  $n$  次出发的终点必须是指挥中心。

$$t'_{of} = 0, \forall o \in O, f \in F \quad (8)$$

式中  $t'_{of}$  为 UAV  $f$  第 1 次出发离开指挥中心  $o$  的时间点,  $\min$ 。式(8)表示 UAV  $f$  第  $n$  次出发离开指挥中心的时间点。

$$t_{onf} \leq B_f, \forall o \in O, f \in F, n \in N \quad (9)$$

式中  $B_f$  为 UAV  $f$  的电量限制,  $\min, f \in F$ 。式(9)表示 UAV  $f$  的飞行电量约束。

$$\sum_{i \in C} \sum_{n \in N} x_{inf} t_{if} + \sum_{i \in C} \sum_{n \in N} t'_i x_{inf} q_i + \sum_{i \in Y} \sum_{j \in Y} \sum_{n \in N} y_{ijnf} t_{ijnf} + n_f B'_f \leq T_f, \forall f \in F, i \neq j \quad (10)$$

式中:  $t_{if}$  为 UAV  $f$  在  $i$  点的基础侦察时间,  $\min, i \in C$ ;  $t'_i$  为  $i$  点的额外侦察时间,  $\min$ /人,  $i \in C$ ;  $q_i$  为  $i$  受灾点的被困人数,  $i \in C$ ;  $t_{ijnf}$  为 UAV  $f$  从  $i$  点到  $j$  点的飞行时间,  $\min, i, j \in Y$ ;  $n_f$  为 UAV  $f$  出发次数;  $B'_f$  为 UAV  $f$  的电池更换时间,  $\min$ 。式(10)表示 UAV  $f$  的任务完成时间。

$$t_{ijnf} = \frac{l_{ij}}{V_f}, \forall i, j \in Y, f \in F \quad (11)$$

式中:  $l_{ij}$  为  $i$  点到  $j$  点的距离,  $\text{km}$ ;  $V_f$  为 UAV  $f$  的正常飞行速度,  $\text{km/h}$ 。式(11)表示 UAV  $f$  从  $i$  到  $j$  的飞行时间。

$$t'_{inf} + t_{ijnf} \leq t_{jnf} + M(1 - y_{ijnf}), \quad (12)$$

$$\forall i, j \in Y, f \in F, n \in N, i \neq j$$

式中:  $t'_{inf}$  为 UAV  $f$  第  $n$  次出发离开  $i$  点的时间点,  $\min$ ;  $t_{ijnf}$  为 UAV  $f$  第  $n$  次从  $i$  点到  $j$  点的飞行时间,  $\min$ ;  $t_{jnf}$  为 UAV  $f$  第  $n$  次出发到达  $j$  点的时间点,  $\min$ 。式(12)表示如果 UAV  $f$  在第  $n$  次出发从  $i$  到  $j$ , 则它到达  $j$  的时间点大于等于从  $i$  出发的时间点加上从  $i$  到  $j$  飞行的时间。

$$t_{inf} + t_{if} + t'_i q_i \leq t'_{inf} + M(1 - x_{inf}), \quad (13)$$

$$\forall i \in Y, n \in N, f \in F$$

式(13)表示如果 UAV  $f$  在第  $n$  次出发要侦察  $i$  点, 则它离开  $i$  的时间点要大于等于到达  $i$  的时间点加上  $i$  点的基础侦察时间和额外侦察时间。

$$\sum_{j \in Y} \sum_{n \in N} y_{ojnf} \leq n_f, \forall o \in O, f \in F \quad (14)$$

式中  $y_{ojnf}$  为二元变量, UAV  $f$  第  $n$  次出发时从指挥中心  $o$  飞行到侦察  $j$  点取 1, 否则为 0。式(14)表示 UAV  $f$  的出发次数约束。

$$x_{inf}, y_{ijnf} \in \{0, 1\}, \forall i \in Y, n \in N, f \in F \quad (15)$$

式(15)表示决策变量约束。

### 3 求解模型的改进禁忌搜索算法

#### 3.1 传统禁忌搜索算法

传统的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 是 NP-Hard 问题<sup>[18-19]</sup>, 而涉及多型号 UAV、侦察优先级和续航限制的侦察路径问题更为复杂, 难以用传统精确算法求解。传统禁忌搜索算法是一种经典启发式算法, 适用于解决复杂的组合优化问题。它通过在解空间内进行局部搜索, 结合禁忌表避免重复搜索已经访问过的解, 实现全局最优解的快速收敛。传统禁忌搜索算法一般步骤为: ①产生一个初始解作为当前解并加入禁忌表, 开始进入迭代; ②创建当前解的候选解解集, 即邻域解解集; ③在候选解解集中选择目标函数值最优且不在禁忌表中的解作为新的当前解; ④将新的当前解加入禁忌表, 并更新禁忌表; ⑤输出最优解。

#### 3.2 改进禁忌搜索算法

在传统禁忌搜索算法的基础上, 引入多种逆转和变异的领域算子, 扩展搜索范围, 同时加入修复算子以确保路径的可行性。

##### 3.2.1 编码

采用整数编码生成初始路径。将所有路径点随机生成由  $1-I$  个整数构成的初始节点编码。其中, 指挥中心点编码为  $1-I_1$ 。待侦察点编码为  $I_1+1-I$ 。将所有侦察点随机分配给不同 UAV, 并在首尾加上随机的指挥中心点, 形成若干条 UAV 侦察路径。根据上述原则循环计算, 直到所有节点分配完毕。

一个 UAV 侦察路径初始解如图 1 所示。其中, 路径 1 表示 UAV<sub>*f*1</sub> 从指挥中心 4 出发, 从节点 24 依次侦察到节点 6, 最终回到指挥中心 1。

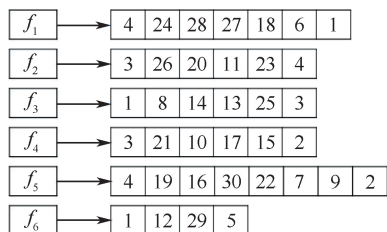


图 1 初始解的 UAV 路径

Fig. 1 UAV paths of initial solution

##### 3.2.2 解码

选择初始解中的一条 UAV 路径, 对其进行顺序遍历。在遍历开始时救援车搭载救援船从指挥中心出发, 依次经过各个侦察点。将初始 UAV 时间依次加上飞行时间和侦察时间直至路径遍历结束。将时

间代入目标函数计算, 即可得到目标值。

##### 3.2.3 修复算子设计

1) 确保 UAV 路径符合优先级约束。UAV 群侦察时应优先完成高优先级点的侦察任务。因此, 在一条 UAV 侦察路径中, 位置相对靠前侦察点的优先级应大于等于相对靠后侦察点的优先级。若路径中位置靠前侦察点的优先级小于其后侦察点的优先级, 则不符合约束, 需修复该路径。步骤如下:

步骤 1: 将每条 UAV 侦察路径的侦察点优先级赋值在侦察点序号的下方。

步骤 2: 将序号和优先级一同根据优先级大小进行倒序排列, 同一优先级侦察点序号随机排列。删除序号下方优先级。

步骤 3: 输出全部路径。

2) 确保 UAV 从离起始侦察点最近的指挥中心出发, 并在任务结束后回到距终止侦察点最近的指挥中心。因为模型目标使 UAV 群中最大的侦察时间最小化, 故保证 UAV 从最近的指挥中心出发, 符合优化目标的要求。初始路径中 UAV 出发的指挥中心是随机产生的, 因此, 设计修复算子修复路径, 步骤如下:

步骤 1: 计算每架 UAV 初始侦察点以及结束侦察点到每个指挥中心的距离。

步骤 2: 找到 UAV 路径中每个最短距离对应的指挥中心点, 将其替换为 UAV 侦察路径的起始点和结束点。

步骤 3: 输出全部路径。

3) 确保 UAV 的飞行时间和电量约束得到满足。为确保 UAV 能够完成侦察任务, 需要在路径中插入指挥中心, 以便 UAV 在必要时进行充电, 满足电量约束。步骤如下:

步骤 1: 遍历每架 UAV 的侦察路径, 计算 UAV 从当前侦察点到下一个侦察点的飞行时间; 若飞行时间超过约束, 则在 2 个侦察点之间插入最近的指挥中心。

步骤 2: 对于每个 UAV 的最终路径, 在结束侦察点后插入离该点最近的指挥中心点。

步骤 3: 输出全部路径。

##### 3.2.4 邻域算子设计

根据问题特性, 设计以下几种算子产生邻域解:

1) 线路内逆转。从当前解中随机选择一架 UAV 的路径, 再随机选择 2 个不相邻的节点  $a$  和  $b$ , 将  $a$  到  $b$  之间的路径翻转形成一条新的路径, 如图 2 所示。

2) 线路内单点交换。从当前解中随机选择一

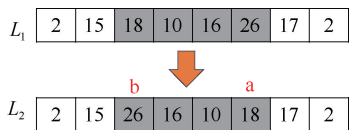


图2 线路内逆转

Fig. 2 Reversal within line

条路径,再在该路径上随机选择2个节点  $a$  和  $b$ ,将2个节点的位置交换后形成一条新的路径。

3) 线路间单点交换。从当前解中随机选择2条路径,并在2条路径上各自随机选择一个节点  $a$  和  $b$ ,将2个节点的位置交换后形成2条新的路径。

4) 线路间交叉。从当前解中随机选择2条路径,并在2条路径上各自随机选择一个节点  $a$  和  $b$ ,将2个节点及之后的路径交换后形成2条新的路径,如图3所示。

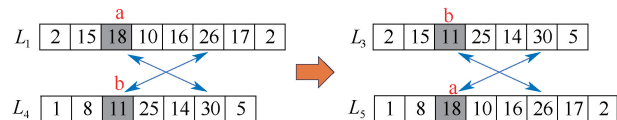


图3 线路间交叉

Fig. 3 Crossover between lines

### 3.2.5 改进的禁忌搜索算法流程

步骤1:输入问题的参数,输入指挥中心点、侦察点的坐标、优先级数据以及 UAV 相关数据。

步骤2:禁忌搜索算法邻域规模设置为  $candidateNum$ 、最大迭代次数设置为  $maxiter$ 、禁忌表长度为  $tabulength$ 、禁忌表最大最小长度分别为  $Maxtabulength$ 、 $Mintabulength$ 。

步骤3:生成初始解,使用修复算子修复初始解,形成初始可行解。计算初始可行种群的目标值  $f(x)$ ,并将当前解设置为最优解。设算法当前迭代数为0。

步骤4:初始化禁忌表。

步骤5:令当前迭代次数加1,根据多种邻域算子生成邻域解集,并使用修复算子修复新邻域解。

步骤6:计算新邻域解集的目标值集  $f'(x)$ 。

步骤7:判断是否接受邻域最优解。将邻域目标值集中的所有候选集目标函数值升序排列,比较

候选集中最优目标值与当前函数最优值  $f(x)$ ,若  $\min f'(x) < f(x)$ ,则更新函数最优解及最优目标值。

步骤8:更新禁忌表。根据最优解的更新情况调整禁忌表长度,如果连续  $N$  代未更新最优解,则  $tabulength = tabulength + 1$ ;如果更新最优解,则  $tabulength = tabulength - 1$ ,  $Mintabulength \leq tabulength \leq Maxtabulength$ 。

步骤9:若  $t < maxiter$ ,保持步骤5—步骤8的循环迭代。否则,输出最优解和目标值,终止算法。

## 4 多 UAV 协同调度优化算例分析

### 4.1 算例设置

构造2组算例,算例组1数据源于河南省郑州市2021年“7·20”特大暴雨洪水灾害,算例组2为5个不同规模的模拟算例。

2021年7月20日,郑州日最大降雨量高达624.1 mm,接近郑州多年平均年降雨量(640.8 mm),为郑州气象站建站以来观测最大值(189.4 mm)的3.4倍<sup>[20]</sup>。20日午后强降雨从西部山区移动到中心城区,15:00—18:00小时雨强度剧增,16:00—17:00出现201.9 mm/h的极端小时强降雨,突破我国大陆气象观测记录历史极值(198.5 mm)<sup>[19]</sup>。此时郑州城区大量通信设施损坏,出现大量伤员和被困人员,需尽快获取准确的灾情信息并展开救援工作。

算例组1以郑州地铁5号环线以内作为侦察环境,指挥中心为郑州地铁5号环线内的5个官方应急疏散场所,相关节点坐标通过  $ditu.amap.com$  获得,参数值见表1、表2。

表1 指挥中心数据

Table 1 Command center data

编号	坐标/km
1	(1.7,2.0)
2	(6.4,4.8)
3	(9.0,3.2)
4	(11.2,0.6)
5	(13.6,0.2)

表2 受灾点数据

Table 2 Disaster site data

编号	坐标/km	基础侦察时间/min	侦察优先级	被困人数	编号	坐标/km	基础侦察时间/min	侦察优先级	被困人数
6	(0.0,4.0)	2	1	6	19	(10.0,1.0)	0.5	3	7
7	(0.0,3.0)	0.5	1	11	20	(10.0,3.0)	1	2	12
8	(1.6,3.0)	2	2	7	21	(10.0,5.0)	0.5	1	5

续表 2

编号	坐标/ km	基础侦察 时间/min	侦察优 先级	被困 人数	编号	坐标/ km	基础侦察 时间/min	侦察优 先级	被困 人数
9	(2.5,5.6)	0.5	1	12	22	(10.0,6.5)	0.5	1	7
10	(3.2,4.7)	0.5	1	11	23	(12.0,0.0)	2	3	4
11	(3.4,6.0)	2	2	11	24	(12.0,3.0)	2	1	6
12	(3.8,2.8)	0.5	3	6	25	(12.0,4.5)	2	1	5
13	(4.8,3.5)	0.5	1	4	26	(12.5,4.0)	0.5	3	6
14	(6.3,0.0)	1	2	4	27	(12.5,6.5)	2	2	14
15	(6.3,3.0)	2	2	11	28	(14.0,1.2)	0.5	3	4
16	(6.3,4.6)	0.5	2	5	29	(14.6,2.6)	0.5	1	3
17	(6.3,6.0)	2	1	6	30	(14.6,4.3)	1	2	11
18	(10.0,0.0)	0.5	2	11					

算例组 2 选用算例 1 的数据作为基础数据,通过改变侦察点数量、坐标与被困人员数量等参数,构造不同规模的模拟算例。算例构造规则描述如下:在受灾区范围内随机生成 40 个侦察点,加上算例 1 已有的 30 个侦察点,共得到 70 个侦察点。分别选取 30、40、50、60 和 70 数量的节点,构造 5 个不同规模的算例。算例中,新增节点侦察时间在 {0.5, 1, 2} 内随机生成,被困人数在 [3, 12] 范围内随机生成,侦察优先级在 {1, 2, 3} 内随机生成。其他参数取值不变。

改进的禁忌搜索算法相关参数设置如下:最大迭代次数为 500,邻域规模为 200,禁忌表长度为 20,最大禁忌表长度为 40,最小禁忌表长度为 1,禁忌表长度更新的迭代次数为 2。

采用 3 种型号的 UAV 执行侦察任务,UAV 配置见表 3。

表 3 选用 UAV 的性能参数和实验配置<sup>[20]</sup>

Table 3 Performance parameters and experimental configurations of selected UAVs

类型	UAV 型号	调整因子	续航时间/min	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	更换电池时间/min	特点	数量
1	DJI phantom 4 RTK	0.8	30	50	1.0	高侦察能力	2
2	DJI AIR 3	1	45	75	2.0	高飞行能力	2
3	WK 1900 PRO	1.5	60	40	1.5	长续航能力	1

以上 UAV 均具备避障功能,能够在恶劣天气条件工作。每款 UAV 均配备高性能的处理单元和通信设备,能实时生成和扫描视频<sup>[20]</sup>。一旦侦测到紧急情况,如被困人员,UAV 将迅速靠近目标以获得

更多详细信息,并及时向基地发送关键数据。

### 4.2 计算结果

采用 Matlab R2021b 编程,在 Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60 GHz 1.80 GHz 和 8 G 内存的电脑进行计算。算例运行 10 次,平均目标值为 0.651 2,最差解和最优解分别为 0.665 4 和 0.632 0(与平均目标值的偏差仅为 2.18% 和 2.95%),平均运行时间为 27.56 s。算法在前期迭代过程中目标值下降较快,在后期逐渐趋于稳定。算法收敛情况如图 4 所示,最优 UAV 编队方案的路径信息见表 4。

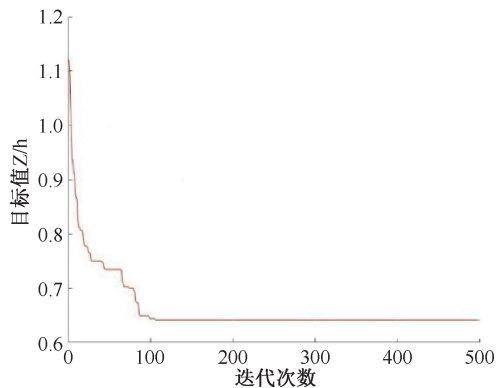


图 4 禁忌搜索算法收敛情况

Fig. 4 Convergence of tabu search algorithm

表 4 最优运算结果

Table 4 Optimal calculation results

UAV 数量/架	最优目标值/h	时间/s	路径
5	0.632 0	29.65	$f_1$ : [4, 23, 19, 20, 3, 22, 21, 17, 2] $f_2$ : [1, 8, 9, 10, 1, 6, 7, 1] $f_3$ : [1, 12, 16, 27, 25, 24, 4] $f_4$ : [4, 18, 14, 15, 11, 13, 2] $f_5$ : [5, 28, 26, 30, 29, 5]

5架 UAV 的侦察路径如图 5 所示,由图 5 可知:各架 UAV 的侦察区域相互独立,形成协同作业模式,能高效侦察全域。

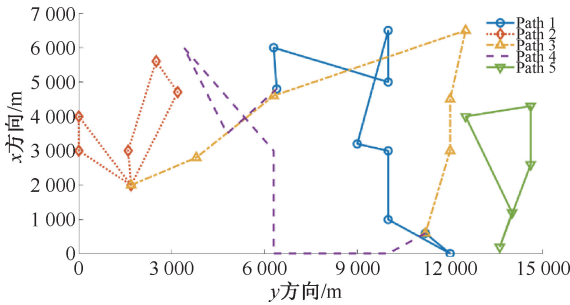


图 5 5架 UAV 的侦察路径

Fig. 5 Reconnaissance path of 5 UAVs

### 4.3 敏感性分析

1) 飞行速度的敏感性分析。基于算例 1,考察 UAV 飞行速度对结果的影响。将飞行速度以原始值为基础在-10~+20 km/h 之间增减,UAV 飞行速度的敏感性分析结果见表 5。

表 5 不同 UAV 飞行速度下的最优运算结果

Table 5 Optimal calculation results at different UAV flight speeds

UAV flight speeds			
飞行速度变化值/(km·h <sup>-1</sup> )	最优目标值/h	飞行速度变化值/(km·h <sup>-1</sup> )	最优目标值/h
-10	0.709 4	+10	0.597 4
-5	0.683 0	+15	0.580 5
0	0.632 0	+20	0.562 4
+5	0.613 9		

由表 5 可知:当飞行速度从降低 10 km/h 转变到升高 20 km/h 时,最优目标值降幅为 20.7%。这说明提高 UAV 飞行速度可有效缩短总侦察时间。飞行速度的降低会使目标值加速上升。飞行速度的降低意味着 UAV 在侦察点之间的通行时间增加,影响侦察和电池使用的效率。但不断增加飞行速度,UAV 会受风速和其他环境因素的影响,在实际飞行中容易遭遇其他变故。因此,需要根据飞行速度来合理选择 UAV。

表 7 混合型号 UAV 在不同数量下的最优运算结果

Table 7 Optimal computation results of mixed model UAVs under different numbers

UAV 数量/架	UAV 型号及数量	最优目标值/h	UAV 数量架	UAV 型号及数量	最优目标值/h
2	1架 DJI phantom 4 1架 DJI AIR 3	1.520 0	7	3架 DJI phantom 4 3架 DJI AIR 3 1架 WK 1900 PRO	0.445 5
3	1架 DJI phantom 4 1架 DJI AIR 3 1架 WK 1900 PRO	1.131 2	8	3架 DJI phantom 4 3架 DJI AIR 3 2架 WK 1900 PRO	0.408 8

2) UAV 数量及型号敏感性分析。设置 UAV 数量在 2~10 架变化,进行敏感性分析,评估不同数量配置下的侦察效果。混合型号 UAV 在不同数量下的敏感性分析结果见表 6。

表 6 UAV 数量对最优运算结果的影响

Table 6 Effect of UAV number on optimal computation results

DJI phantom 4		DJI AIR 3		WK 1900 PRO	
UAV 数量	最优目标值	UAV 数量	最优目标值	UAV 数量	最优目标值
2	1.343 1	2	1.508 2	2	2.616 4
3	0.872 7	3	0.980 1	3	1.734 9
4	0.669 5	4	0.768 7	4	1.269 5
5	0.614 8	5	0.561 4	5	1.054 0
6	0.468 6	6	0.475 1	6	0.867 2
7	0.407 6	7	0.416 2	7	0.722 0
8	0.364 6	8	0.375 4	8	0.648 6
9	0.336 6	9	0.339 0	9	0.579 4
10	0.311 7	10	0.309 4	10	0.535 9

从表 6 可以看出,随着 UAV 数量的增加,最优目标值呈现明显的下降趋势。当 UAV 数量从 2 架增加到 10 架时,最优目标值从 1.520 0 h 降低到 0.342 8 h,降幅达 77.4%。这种下降在初期较为陡峭,后期趋于平缓。目标值在初期快速下降,说明当 UAV 数量从较低水平增加时,每增加一架 UAV,都能显著提高任务效率。然而,随着 UAV 数量继续增加,曲线趋于平缓,说明增加额外的 UAV 对于总侦察时间的边际效益逐渐减少,这可能是任务分配和协调的复杂性增加所导致的。进一步发现,在当前规模算例中,选择 4~6 架 UAV 最合适。此时,UAV 组在保证较高侦察效率的同时还能使资源保持高利用率。因此,在进行侦察任务规划时,决策者应充分考虑灾情的紧急性和已有的 UAV 资源数量。合理的 UAV 数量不仅可以确保侦察任务的高效执行,还可以优化资源配置,避免资源浪费。

同型号 UAV 在不同数量下的敏感性分析结果见表 7。

续表 7

UAV 数量/架	UAV 型号及数量	最优目标值/h	UAV 数量架	UAV 型号及数量	最优目标值/h
4	1 架 DJI phantom 4 2 架 DJI AIR 3 1 架 WK 1900 PRO	0.825 1	9	3 架 DJI phantom 4 3 架 DJI AIR 3 3 架 WK 1900 PRO	0.360 3
5	2 架 DJI phantom 4 2 架 DJI AIR 3 1 架 WK 1900 PRO	0.632 0	10	3 架 DJI phantom 4 4 架 DJI AIR 3 3 架 WK 1900 PRO	0.342 8
6	2 架 DJI phantom 4 2 架 DJI AIR 3 2 架 WK 1900 PRO	0.528 9			

而对于 3 种不同型号的 UAV,随着数量的增加,最优目标值都呈现下降趋势,但下降幅度有所不同。当 UAV 数量从 2 架增加到 10 架时,DJI Phantom 4 RTK 的最优目标值从 1.343 1 h 降到 0.311 7 h(降幅 76.8%),DJI AIR 3 从 1.508 2 h 降到 0.309 4 h(降幅 79.5%),华科尔 WK 1900 PRO 从 2.616 4 h 降到 0.535 9 h(降幅 79.5%)。在 UAV 数量较少时,DJI Phantom 4 RTK 的表现最佳,表明侦察能力在此区间内最为重要。当 UAV 数量增加至 5~6 架时,DJI AIR 3 的表现最好,这可能意味着在这一阶段飞行速度更关键,快速飞行可大幅减少侦察点间的飞行时间,从而降低通行时间在目标函数中的占比。华科尔 WK 1900 PRO 在全区间内均表现较差,说明在灾情侦察方面,与飞行速度和侦察能力相比,续航时间贡献较小,因此,在选择灾情侦察 UAV 方面续航能力通常不是首要考虑的条件。当决策者进行侦察 UAV 的选择决策时,若 UAV 资源较紧缺,则应优先选择侦察能力较强的 UAV;在 UAV 资源不紧缺时,飞行速度则成为选择的首要考虑因素。在 UAV 资源充裕的情况下,侦察能力和飞行速度的重要性趋于相同,决策者应选择侦察能力和飞行速度都较为出色的 UAV。因为续航时间的重要性始终较低,选择的 UAV 中只需其续航时间处于正常范围即可。决策者还可结合侦察范围和任务的需求来确定侧重点,若任务区域广且侦察任务紧急,应优先考虑飞行速度;若任务需要高精度的数据收集,应侧重侦察能力。

3) UAV 续航时间敏感性分析。在选择侦察 UAV 时,侦察能力和飞行速度是优先考虑的因素。因此,在续航时间分析中,选择侦察能力较强的 UAV(DJI phantom 4)和飞行速度较高的 UAV(DJI AIR 3)进行分析。UAV 续航时间的敏感性分析结果见表 8。

由表 8 可知:当 UAV 侦察时间从 25 min 延长至

表 8 不同 UAV 侦察时间下的最优运算结果

Table 8 Optimal computation results for different UAV reconnaissance times

侦察时间/min	最优目标值/h	
	DJI phantom 4	DJI AIR 3
25	0.616 8	0.635 8
30	0.614 8	0.630 7
35	0.610 2	0.630 0
40	0.603 6	0.593 6
45	0.527 6	0.563 8
50	0.530 8	0.561 4
55	0.527 6	0.561 4
60	0.537 7	0.561 4
65	0.527 6	0.561 4

65 min 时,DJI Phantom 4 RTK 的最优目标值从 0.616 8 h 降到 0.527 6 h(降幅 14.5%),DJI AIR 3 从 0.635 8 h 降到 0.561 4 h(降幅 11.7%)。这表明:延长 UAV 的续航时间能够降低总的侦察时间,提高任务效率。但需要注意的是,续航时间并非越长越好,过长的续航时间可能会导致 UAV 成本过高、电池充电效率下降等不利因素。对于所用的 2 种型号 UAV 而言,当续航时间超过 45 min,最优目标值不再发生大的波动。说明 UAV 续航时间也存在一个临界点,其后的边际效益也快速下降。

#### 4.4 求解模型的多启发式算法对比

为测试所提改进禁忌搜索算法(Improved Tabu Search, ITS)的性能,将其与经典禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SAA)进行比较。在对比算法中,为使生成的解可行,将修复算子也带入各算法。TS 的禁忌表长度为 10,候选集个数为 200,最大迭代次数为 500。GA 的初始种群长度为 100,最大迭代次数为 500。SAS 的初始温度为 100,冷却因子为 0.997,最大迭代次数为 500。设置 2 组算例进行对比。首先,针对真实算例,

每个算法计算 10 次,选取最优值、最差值、最优值运行时间、平均值和标准差进行对比,结果见表 9。

表 9 不同算法求解模型的结果对比

Table 9 Comparison of results of different algorithms for solving the model

算法	目标函数值				计算时间/s
	最优值/h	最差值/h	平均值/h	标准差/h	
ITS	0.632 0	0.665 4	0.651 2	0.011 2	27.56
TS	0.797 8	0.870 2	0.829 7	0.025 2	31.37
GA	0.673 3	0.726 8	0.703 0	0.017 3	31.51
SAA	0.818 1	1.428 8	1.096 4	0.191 9	31.85

从表 9 可以看出,ITS 全面优于 3 种对比算法。在目标函数值方面,ITS 的最优值为 0.680 4,平均

值为 0.702 6,优于 GA、TS 和 SAA。在运行时间方面,ITS 平均为 27.56 s,效率最高。在稳定性方面,ITS 的标准差仅为 0.011 2,其解的稳定性最好。

进一步分析不同算法在不同规模模拟算例中的表现,结果见表 10。在不同规模算例中,ITS 的表现始终出色,并且随着问题规模的增大,这种优势更加显著。对于 30 个侦察点的小规模问题,ITS 的平均目标函数值为 0.632 0,优于 TS 的 0.797 8、GA 的 0.673 3 和 SAA 的 0.818 1。在处理 60 个侦察点的大规模问题时,ITS 的平均目标函数值为 1.196 0,远优于 TS 的 1.527 8、GA 的 1.307 8 和 SA 的 1.749 2。同时,ITS 的运行时间也较其他算法更短。在稳定性方面,ITS 的标准差均保持在较低的水平,表明其解的稳定性最好。

表 10 不同规模求解结果

Table 10 Solution results of different scales

算法	指标/算例	30	40	50	60	70
ITS	最优目标值/h	0.632 0	0.836 8	1.017 6	1.196 0	1.401 4
	最差目标值/h	0.665 4	0.891 4	1.064 3	1.292 6	1.474 0
	平均目标值/h	0.651 2	0.870 0	1.041 6	1.224 5	1.423 4
	标准差	0.011 2	0.017 7	0.014 4	0.029 9	0.019 9
	计算时间/s	27.56	32.29	36.18	39.53	45.40
TS	最优目标值/h	0.797 8	1.040 5	1.257 3	1.527 8	1.694 8
	最差目标值/h	0.870 2	1.141 9	1.425 4	1.628 0	1.949 9
	平均目标值/h	0.829 7	1.093 4	1.356 3	1.586 3	1.803 0
	标准差	0.025 2	0.034 7	0.058 5	0.037 0	0.080 2
	差距/%	20.79	39.26	49.74	58.64	62.71
计算时间/s	31.37	39.28	43.52	48.93	60.69	
GA	最优目标值/h	0.673 3	0.854 3	1.086 1	1.307 8	1.558 5
	最差目标值/h	0.726 8	0.961 1	1.137 4	1.377 0	1.685 2
	平均目标值/h	0.703 0	0.918 5	1.109 6	1.348 5	1.615 9
	标准差	0.017 3	0.029 1	0.020 3	0.019 5	0.034 6
	差距/%	6.14	26.03	41.81	51.68	59.45
计算时间/s	31.51	34.31	36.48	38.19	41.53	
SAA	最优目标值/h	0.818 1	1.181 5	1.400 8	1.749 2	1.956 9
	最差目标值/h	1.428 8	1.907 6	2.083 8	3.108 4	3.007 5
	平均目标值/h	1.096 4	1.380 6	1.627 7	2.148 3	2.483 9
	标准差	0.191 9	0.215 4	0.214 4	0.427 8	0.322 6
	差距/%	22.75	46.51	54.89	63.87	67.71
计算时间/s	31.85	38.50	44.62	48.90	55.95	

### 5 结 论

1) 提出一种考虑侦察优先级的多 UAV 协同调度优化模型,该模型能够显著提高灾情侦察效率。

2) 设计一种 ITS 算法,多组算例的数值试验对比结果说明:所提 ITS 算法优于 TS、GA 和 SAA。

3) 灾情侦察中适当增加 UAV 数量,可显著减少最大侦察时间。在 UAV 选择方面,需根据特定任务和环境条件,选择倾向于飞行速度较强或侦察能力较强的 UAV。在 UAV 资源较匮乏时,侦察能力对于任务效率的提升尤为关键;而在 UAV 资源不紧缺时,侦察能力的重要性上升,这对于提高灾情数据

的收集精度和质量至关重要,而续航能力属性在 UAV 的选择中较为次要。

件下的操作,以及在高密度城市环境中的导航挑战等问题,提高 UAV 在复杂环境下的操作性能和任务适应性。

4) 未来研究可进一步探索 UAV 在极端天气条

### 参 考 文 献

- [1] 应急管理部. 2022 全国自然灾害评估报告[R], 2023.
- [2] 冉桂吉. 无人机辅助侦察技术在危险化学品泄漏事故应急指挥中的应用[J]. 中国人民警察大学学报, 2023, 39(6):71-76.  
RAN Guiji. Application of drone-assisted reconnaissance technology in emergency command of hazardous chemical leakage accidents[J]. Journal of China People's Police University, 2023, 39(6):71-76.
- [3] 许可, 高宏宇, 雷鸣, 等. 基于改进拍卖算法灾后救援多无人机任务分配[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(2): 29-37, 44.  
XU Ke, GAO Hongyu, LEI Ming, et al. Multi-UAV task allocation for post-disaster rescue based on improved auction algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 43(2):29-37, 44.
- [4] 梁佳琪, 宋爱国. 基于北斗导航的突发灾害侦察机器人群组编队设计[J]. 信息技术与信息化, 2014(5):32-33, 35.  
LIANG Jiaqi, SONG Aiguo. Design of sudden disaster reconnaissance robot swarm formation based on Beidou navigation[J]. Information Technology and Informatization, 2014(5):32-33, 35.
- [5] DA Hu, TIEN Yee. Integrated framework for bridge crack detection and semantic bim model generation using drone-captured imagery and deep learning techniques[M]. Arlington: ASCE Inspire, 2023: 167-175.
- [6] KASHYAP A, GHOSE D, MENON P P, et al. UAV aided dynamic routing of resources in a flood scenario[C]. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2019: 328-335.
- [7] CHANG K J, TSENG C W, TSENG C M, et al. Application of unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired topography for quantifying typhoon-driven landslide volume and its potential topographic impact on rivers in mountainous catchments[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): DOI:10.3390/app10176102.
- [8] YEŞİLLER N, HANSON J, WARTMAN J, et al. Disaster reconnaissance framework for sustainable post-disaster materials management[J]. Waste Management, 2023, 169: 392-398.
- [9] JEDDI A B, SHAFIEEZADEH A, NATEGHI R. PDP-CNN: a deep learning model for post-hurricane reconnaissance of electricity infrastructure on resource-constrained embedded systems at the edge[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [10] 章可怡, 石咏, 郭海湘, 等. 基于卡车-无人机协同的山区自然灾害应急物资调度优化决策研究 [J/OL]. 中国管理科学: 1-14. [2024-03-11]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1278>.  
ZHANG Keyi, SHI Yong, GUO Haixiang, et al. Optimized decision-making research on dispatching emergency supplies for natural disasters in mountainous areas based on truck-unmanned aircraft collaboration [J/OL]. China Management Science: 1-14. [2024-03-11]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1278>.
- [11] 李国强. 无人机航测技术在地质灾害应急测绘中的应用[J]. 石材, 2024(3): 141-143.  
LI Guoqiang. Application of drone aerial survey technology in geologic disaster emergency mapping[J]. Stone, 2024(3): 141-143.
- [12] 张海生. 无人机贴近摄影测量技术在贵州山区滑坡监测中的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 9(2):208-210.  
ZHANG Haisheng. Application of UAV proximity photogrammetry technology in landslide monitoring in Guizhou mountainous areas[J]. Engineering Technology Research, 2024, 9(2):208-210.

- [13] AVANZATO R, BERITELLI F. A smart UAV-femtocell data sensing system for post-earthquake localization of people[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:30 262–30 270.
- [14] ALSAMHI S H, SHVETSOVA V, KUMAR S, et al. UAV computing-assisted search and rescue mission framework for disaster and harsh environment mitigation[J]. *Drones*, 2022, 6(7): DOI:10. 3390/drones6070154.
- [15] WAN Pengfu, XU Gangyan, CHEN Jiawei, et al. Deep reinforcement learning enabled multi-UAV scheduling for disaster data collection with time-varying value[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(7): 6 691–6 702.
- [16] MOSHREF-JAVADI M, HEMMATI A, WINKENBACH M. A truck and drones model for last-mile delivery: a mathematical model and heuristic approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 80: 290–318.
- [17] 刘长石, 吴张, 周愉峰, 等. 疫区应急物资供应的卡车-无人机动态协同配送路径优化[J]. *系统科学与数学*, 2022, 42(11): 3 027–3 043.  
LIU Changshi, WU Zhang, ZHOU Yufeng, et al. Truck-unmanned aircraft dynamic cooperative distribution path optimization for emergency supplies in epidemic areas [J]. *System Science and Mathematics*, 2022, 42(11): 3 027–3 043.
- [18] 柴荻, 何瑞春, 韩伟, 等. 带时间窗的危险货物车辆路径问题 2 阶段优化[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(12): 160–166.  
CHAI Huo, HE Ruichun, HAN Wei, et al. Two-stage optimization for the hazardous materials vehicle routing problem with time windows [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(12): 160–166.
- [19] 张民波, 钟子逸, 闫瑾, 等. 考虑生物危险源扩散的疫区应急物资调配模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(11): 206–213.  
ZHANG Minbo, ZHONG Ziyi, YAN Jin, et al. A model for emergency material allocation in epidemic areas considering the spread of biological hazards [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(11): 206–213.
- [20] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R], 2022.



作者简介: 龚英 (1968—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事物流与供应链管理方面的研究。E-mail: 815674938@qq.com。