

中文引用格式:刘长石,刘涛,刘光洪,等. 洪涝灾害情景下卡车-冲锋艇协同运输的动态路径规划[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5):204-212.

英文引用格式:LIU Changshi, LIU Tao, LIU Guanghong, et al. Dynamic path planning for truck-assault boat collaborative transportation in flood disaster scenario [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5):204-212.

洪涝灾害情景下卡车-冲锋艇协同运输的 动态路径规划*

刘长石¹教授, 刘涛², 刘光洪³, 孙鹏^{**1}副教授, 李君宇², 乔睿²

(1 湖南工商大学 工商管理学院, 湖南 长沙 410205; 2 湖南工商大学 智能工程与智能制造学院, 湖南 长沙 410205; 3 中南大学 化学与化工学院, 湖南 长沙 410083)

中图分类号:X915.5; X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1436

基金项目:国家社会科学基金资助(23BGL011);湖南省科技创新计划项目(2024RC4008);湖南省社会科学基金资助(23JD037);湖南省教育厅重点项目(22A0436)。

【摘要】 为解决洪涝灾害情景下应急物资多周期多批次配送问题,综合考虑洪涝灾情动态变化、卡车-冲锋艇协同运输等因素,以各周期内应急物资的总配送时间最短为目标构建卡车-冲锋艇协同运输的路径规划模型,并设计改进蚁群算法(IACA)结合遗传算法(GA)的混合启发式算法(HHA)求解;采用多类型算例开展试验,结果表明:HHA能根据动态变化的灾情快速计算出合理的卡车-冲锋艇协同运输方案,有效缩短应急物资的总配送时间,提高配送效率;水淹区数量与冲锋艇数量对应急物资配送路径规划有显著影响,应急物流部门应根据各水淹区受灾情况和资源配置实际,派遣合理数量的冲锋艇,保障应急物流效率。

【关键词】 洪涝灾害; 卡车-冲锋艇协同运输; 动态路径规划; 混合启发式算法(HHA); 应急物资

Dynamic path planning for truck-assault boat collaborative transportation in flood disaster scenario

LIU Changshi¹, LIU Tao², LIU Guanghong³, SUN Peng¹, LI Junyu², QIAO Rui²

(1 School of Business Administration, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 2 School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 3 School of Chemical and Chemical Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: In order to solve the multi-period and multi-batch relief delivery problem under flood disaster scenarios, a routing model was constructed for collaborative relief delivery of trucks and assault boats by comprehensively considering factors such as the dynamic changes of disaster situations, and the collaborative transportation of trucks and assault boats. The objective of the model was to minimize the total distribution time within each period. A HHA, which combines the improved ant colony algorithm(IACA)

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0204-09; 收稿日期:2025-01-14; 修稿日期:2025-03-20

** 通信作者:孙鹏(1975—),女,湖南邵阳人,博士,副教授,主要从事物流与供应链管理方面的研究。E-mail: 1978974663@qq.com。

with a genetic algorithm (GA), was designed for solving this problem. Compared with the ant colony algorithm and the simulated annealing algorithm, the experimental results show that the HHA provides truck-assault boat collaborative distribution routing solutions under the dynamically changing disaster situations in a relatively short time. The HHA effectively reduces the total distribution time and improves the efficiency of relief delivery. The rationality, feasibility, and effectiveness of the HHA were demonstrated. The number of flooded areas and the number of assault boats have a significant impact on the routing of relief delivery. Emergency logistics decision-making departments should weigh the disaster situation and resource allocation of each flooded area, and dispatch a reasonable number of assault boats to ensure the efficiency of relief delivery.

Keywords: flood disasters; truck-assault boat collaborative transportation; dynamic path planning; hybrid heuristic algorithm (HHA); emergency material

0 引言

近年来,我国洪涝灾害(简称洪灾)频发,严重威胁灾区群众的生命与财产安全。洪涝灾区很多受灾点积水严重,仅靠陆路运输难以将应急物资配送至水淹区的需求点,必须启用冲锋艇等特种载具配送。洪灾救灾周期通常较长,灾情随着时间动态变化,需根据受灾地区的实际情况开展多次配送。因此,研究洪灾应急物资多方式协同运输的动态路径规划,具有一定的现实意义和应用价值。

应急物资配送路径规划一直是学术界的研究热点之一。FLORENT 等^[1]研究洪灾应急物流中带截止时间的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)。WENG Xun 等^[2]研究公共卫生事件背景下的救援物资配送问题,构建考虑需求优先级和心理痛苦的 VRP 模型。TAN Kangye 等^[3]针对重大疫情下应急物资配送的 VRP,设计改进粒子群优化算法求解。刘钊等^[4]研究多障碍物水域中的救援船路径规划问题,设计一种蚁群算法 (Ant Colony Algorithm, ACA) 求解。应急物资通常需要多种运载工具协同运输。部分学者探索了应急物资多式协同运输路径规划。李双琳等^[5]针对震后初期应急物资配送问题,考虑需求不确定性,建立一个模糊多目标选址及多式联运路径规划的协同优化模型。郑斌等^[6]考虑应急物流中的动态选址和多式联运问题,构建双层规划模型。刘长石等^[7-8]分别在通行受限和疫情灾害情景下,研究卡车-无人机协同的应急物资配送模式。张艳萍等^[9]针对应急物资多式联运问题构建多目标混合整数动态规划模型。MOSHREF-JAVADI 等^[10]研究应急物流的卡车和无人机混合配送路径问题。洪灾等应急救援周期通常较长,需要根据灾情变化进行多周期多批次的应急

物流决策。LI Xiaodong 等^[11]研究不确定需求下的多周期应急易腐物资配送的 VRP,设计改进差分进化鲸鱼优化算法求解;WANG Yanyan 等^[12]探讨不确定条件下的多周期应急物资分配-配送路径规划,设计一种遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 求解。

综上所述,现有成果为深入研究洪灾应急物流规划奠定良好基础。梳理文献,发现如下可扩展的研究缺口:①通常仅采用车辆配送洪灾应急物资,与实际救援情况不够吻合。洪灾容易导致灾区部分道路被洪水淹没或冲毁,车辆难以通行,需要冲锋艇或直升机等运载工具开展应急物资协同配送。②大多假设应急物资运输工具数量不受限制。实际上,灾害初期灾区可用于救援的冲锋艇等工具数量有限。③较少关注不同时间段内水淹区面积的动态变化,且设定应急物资只配送一次,与洪涝灾情不够吻合。如 2024 年 6 月 29 日,江西省气象台公布赣江支流锦江新建区河段水体面积较 6 月 10 日大约增加 56%^[13],需要根据灾情变化进行多周期多批次的物流决策。

鉴于此,笔者拟将洪涝灾区分为水淹区与非水淹区,在非水淹区使用卡车配送,在水淹区采用冲锋艇配送。以各周期内应急物资的总配送时间最短为目标,构建卡车-冲锋艇协同运输路径规划模型,并根据模型特性设计蚁群算法结合遗传算法的混合启发式算法 (Hybrid Heuristic Algorithm, HHA) 求解,以期洪灾应急物资配送的动态路径规划提供决策方案。

1 洪灾应急物资配送决策问题

某地遭遇洪灾,大批群众受灾,亟待应急物资救援。部分区域被洪水淹没形成水淹区,车辆无法通

行。应急物资拟采用卡车-冲锋艇协同运输方式,在每个水淹区附近设立一个应急物资临时配送点,通过调拨方式先将冲锋艇从储备库运达临时配送点。水淹区、非水淹区、应急物资需求点坐标及需求量、物流中心坐标、各载具载货量与行驶速度已知。卡车搭载应急物资从物流中心出发,可配送非水淹区需求点与水淹区附近的临时配送点,完成任务后返回物流中心。冲锋艇在临时配送点装载物资后出发,配送位于水淹区的需求点,完成任务后返回其出发的临时配送点。为明确论文适用范围,提出如下假设:①洪灾灾情以 24 h 为周期动态变化。水淹区面积、各需求点的需求量、水淹区附近的临时配送点位置随着灾情变化而发生变化。②各临时配送点的物资需求量为其水淹区内所有需求点的需求量总和。③各周期内各需求点或临时配送点能且仅能由一种载具配送一次。决策问题:如何根据各周期洪灾灾情科学开展卡车-冲锋艇协同运输应急物资的动态路径规划,满足各需求点应急物资需求,并使得各周期内应急物资的总配送时间最短。

2 应急物资多周期动态协同配送模型

1) 卡车使用时间分析。卡车使用时间包括卡车行驶时间、配送非水淹区需求点和临时配送点的服务时间。所有卡车在周期 $t(t \in T)$ 内的使用时间 γ_1^t 为:

$$\gamma_1^t = \sum_{i \in C_1} \sum_{0 \in C_1 \cup J} \sum_{k \in K} X_{ijk}^t G_{ijk}^t + \sum_{i \in C_1 \cup J} \sum_{k \in K} s_i x_{ik}^t \quad (1)$$

式中: C_1 为位于非水淹区的需求点集合; J 为所有临时配送点的集合; 0 为物流中心; K 为所有卡车的集合; G_{ijk}^t 为周期 t 内卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 的时间, min; s_i 为需求点 i 所需的服务时间, min; X_{ijk}^t 为 0~1 变量,当周期 t 内卡车 k 从节点 i 驾驶到节点 j 时取值为 1, 否则为 0; x_{ik}^t 为 0~1 变量,当周期 t 内节点 i 由卡车 k 配送时取值为 1, 否则为 0。

2) 冲锋艇使用时间分析。冲锋艇使用时间包括冲锋艇行驶时间、配送水淹区需求点的服务时间。所有冲锋艇在周期 $t(t \in T)$ 内的使用时间 γ_2^t 为:

$$\gamma_2^t = \sum_{i \in J} \sum_{C_2} \sum_{b \in B} Y_{ib}^t g_{ib}^t + \sum_{i \in C_2} \sum_{b \in B} s_i y_{ib}^t \quad (2)$$

式中: C_2 为位于水淹区的需求点集合; B 为所有冲锋艇的集合; g_{ib}^t 为周期 t 内冲锋艇 b 从节点 i 行驶到节点 j 的时间, min; Y_{ib}^t 为 0~1 变量,当周期 t 内冲锋艇 b 从节点 i 行驶到节点 j 时取值为 1, 否则为 0; y_{ib}^t 为 0~1 变量,当周期 t 内节点 i 由冲锋艇 b 配送

时取值为 1, 否则为 0。

3) 卡车与冲锋艇协同运输的路径规划建模。下式为目标函数,表示周期 t 内应急物资的总配送时间最短。

$$\min(\gamma_1^t + \gamma_2^t) \quad (3)$$

4) 约束条件。下式表示在周期 t 内非水淹区内的需求点及各临时配送点能且仅能由卡车配送一次。

$$\sum_{k \in K} x_{ik}^t = 1, \forall i \in C_1 \cup J, t \in T \quad (4)$$

式中 $T = \{t | t = 1, 2, \dots, T\}$ 为配送周期集合。

下式表示在周期 t 内水淹区内的需求点能且只能由冲锋艇配送一次。

$$\sum_{b \in B} y_{ib}^t = 1, \forall i \in C_2, t \in T \quad (5)$$

下式表示周期 t 内每条卡车配送路径上各需求点或临时配送点的物资总量不能超过卡车的载重限制。

$$\sum_{i \in C_1} u_i^t x_{ik}^t + \sum_{j \in J} r_j^t x_{jk}^t \leq \eta_2, \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

式中: u_i^t 为在周期 t 内需求点 i 的需求量, kg; r_j^t 为周期 t 内临时配送点 j 的需求量, kg; η_2 为卡车的载货量, kg。

下式表示周期 t 内水淹区每艘冲锋艇配送路径上的需求点的物资总量不能超过冲锋艇的载重限制。

$$\sum_{i \in C_2} u_i^t y_{ib}^t \leq \eta_1, \forall b \in B, t \in T \quad (7)$$

式中 η_1 为冲锋艇的载货量, kg。

下式表示周期 t 内确保每辆卡车执行完配送任务后,均返回其出发的物流中心。

$$\sum_{j \in C_1 \cup J} X_{0jk}^t = \sum_{i \in C_1 \cup J} X_{i0k}^t, \forall k \in K, t \in T \quad (8)$$

下式表示周期 t 内确保每艘冲锋艇执行完配送任务后,均返回其出发的临时配送点。

$$\sum_{j \in C_2} Y_{ijb}^t = \sum_{j \in C_2} Y_{jib}^t, \forall b \in B, t \in T, i \in J \quad (9)$$

下式表示周期 t 内卡车进入节点的流量守恒,只要卡车进入某节点,最终必须离开某节点。

$$\sum_{i \in C_1 \cup J} X_{ijk}^t = \sum_{l \in C_1 \cup J} X_{ljk}^t, \quad \forall k \in K, t \in T, j \in C_1 \cup J \quad (10)$$

下式表示周期 t 内冲锋艇进入节点的流量守恒,即冲锋艇进入某节点,最终必须离开某节点。

$$\sum_{i \in C_2 \cup J} Y_{ijb}^t = \sum_{l \in C_2 \cup J} Y_{ljb}^t, \quad \forall b \in B, t \in T, j \in C_2 \quad (11)$$

下式表示周期 t 内卡车离开节点的时间计算方法。

$$A'_{ik} = (a'_{ik} + s_i)X'_{ijk}, \quad \forall i \in C_1 \cup J, k \in K, t \in T \quad (12)$$

式中: a'_{ik} 为周期 t 内卡车 k 到达节点 i 的时间, min; A'_{ik} 为周期 t 内卡车 k 驶出节点 i 的时间, min。

下式表示在周期 t 内冲锋艇离开节点的时间计算方法。

$$P'_{ib} = (b'_{ib} + s_i)Y'_{ib}, \quad \forall i \in C_2, b \in B, t \in T \quad (13)$$

式中: p'_{ib} 为周期 t 内冲锋艇 b 到达节点 i 的时间, min; P'_{ib} 为周期 t 内冲锋艇 b 驶出节点 i 的时间, min。

下式表示周期 t 内卡车从上一个节点行驶到下一个节点的时间计算方式。

$$a'_{ik} = (A'_{ik} + d_{ij}/V_k)X'_{ijk}, \quad \forall i, j \in C_1 \cup 0 \cup J, i \neq j, k \in K, t \in T \quad (14)$$

式中: d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离, km; V_k 为卡车行驶速度, km/h。

下式表示周期 t 内冲锋艇从上一个节点行驶到下一个节点的时间计算方式。

$$p'_{ib} = (P'_{ib} + d_{ij}/V_b)Y'_{ib}, \quad \forall i, j \in C_2 \cup J, i \neq j, b \in B, t \in T \quad (15)$$

式中 V_b 为冲锋艇的速度, km/h。

下式表示周期 t 内临时配送点的需求量的计算方式。

$$r'_i = \sum_{j \in R_j} u'_j, \quad \forall i \in J, t \in T \quad (16)$$

式中 R_j 为临时配送点 j 负责配送位于水淹区 j 的需求点集合。

下式表示周期 t 内卡车离开节点时的载重与卡车到达该节点时的载重、该节点的需求量之间的计算方式。

$$L'_{ik} = \begin{cases} l'_{ik} - u'_i x'_{ik}, & \forall k \in K, t \in T, i \in C_1 \\ l'_{ik} - r'_i x'_{ik}, & \forall k \in K, t \in T, i \in J \end{cases} \quad (17)$$

式中: l'_{ik} 为周期 t 内卡车 k 到达节点 i 时的载货量, kg; L'_{ik} 为周期 t 内卡车 k 驶出节点 i 时的载货量, kg。

下式表示周期 t 内冲锋艇离开节点时的载重与冲锋艇到达该节点时的载重、该节点的需求量之间的计算方式。

$$H'_{ib} = h'_{ib} - u'_i y'_{ib}, \quad \forall i \in C_2, b \in B, t \in T \quad (18)$$

式中: h'_{ib} 为周期 t 内冲锋艇 b 到达节点 i 时的载重, kg; H'_{ib} 为周期 t 内冲锋艇 b 驶出节点 i 时的载重, kg。

下式表示周期 t 内决策变量的约束, 即一个需求点能且只能由卡车或冲锋艇配送一次。

$$X'_{ijk} + Y'_{ijb} = 1, \quad \forall i, j \in C \cup J \cup 0, i \neq j, k \in K, b \in B, t \in T \quad (19)$$

$$x'_{ik} + y'_{ib} = 1, \quad \forall i \in C, k \in K, b \in B, t \in T \quad (20)$$

式中 C 为所有需求点的集合, $C = C_1 \cup C_2$ 。

下式表示周期 t 内各变量的取值限制。

$$x'_{ik} \in \{0, 1\}, y'_{ib} \in \{0, 1\}, X'_{ijk} \in \{0, 1\}, Y'_{ijb} \in \{0, 1\} \quad (21)$$

3 HHA 设计

3.1 设计思路

VRP 属于非确定性多项式困难 (Non-deterministic Polynomial Hard, NP-hard) 问题, 通常采用启发式算法寻找满意解^[14]。应急物资卡车-冲锋艇协同运输的动态路径规划比 VRP 更加复杂, 求解更难, 因此, 设计一种 HHA 求解。设计思路如下: ①将卡车-冲锋艇协同配送问题转化为 2 阶段配送问题, 第 1 阶段是卡车对非水淹区需求点和临时配送点的配送, 设计一种改进 ACA (Improved ACA, IACA) 求解; 第 2 阶段是在临时配送点接收卡车配送的物资后, 由冲锋艇负责对水淹区各需求点的配送, 设计一种 GA 求解。②为弥补 IACA 全局搜索方面的局限性, 设计一种融合轮盘赌与随机性选择的蚂蚁转移策略, 旨在扩宽蚂蚁的搜索范围。③为解决 IACA 搜索过程中可能出现的停滞现象, 采用精英蚂蚁信息素更新算法, 提高算法的搜索精度和收敛速度。④为提升 GA 的收敛速度和稳定性, 在选择算子的操作中, 根据个体的适应度进行择优选择。在交叉和变异过程中, 根据个体适应度值动态调整交叉和变异的概率。

3.2 HHA 算法步骤

HHA 求解步骤如下:

步骤 1: 初始化。读入周期 t 内的水淹区、物流中心、临时配送点、需求点、卡车和冲锋艇的相关参数数据。

步骤 2: 改进蚁群算法设计。优化非水淹区的车辆行驶路径。设定蚁群算法最大循环次数 M_1 、蚂蚁数量 m 、信息素挥发系数 ω 等参数。令 e 表示当前迭代次数, $e = 1$ 。令 ϕ_1 为改进蚁群算法的目标值, $\phi_1 = +\infty$ 。

步骤 3: 编码策略。采用整数编码方法对需求点编码。计算非水淹区需求点个数 X^1 、水淹区需求

点个数 χ^2 、水淹区数量 χ^3 。令数字 $1-\chi^1$ 代表水淹区需求点的编码,数字 χ^1+1 至 $\chi^1+\chi^2$ 代表非水淹区需求点的编码,数字 $\chi^1+\chi^2+1$ 至 $\chi^1+\chi^2+\chi^3$ 代表临时配送点的编码。

步骤4:构建周期 t 内卡车初始行驶路线。具体步骤如下:

步骤4.1:将 m 只蚂蚁部署在物流中心,首先派出第一只蚂蚁 ω 。

步骤4.2:设定 v_k 为卡车 k 的剩余载货量,初始化 $v_k = \eta_2$,将蚂蚁 ω 待访问的所有节点放入集合 φ_ω 。

步骤4.3:蚂蚁转移策略。参考文献[7],采用随机性与确定性相结合的方法计算蚂蚁 ω 从节点 i 转移到节点 j 的概率。

步骤4.4:若 $v_k \geq u'_j$,令 $j \notin \varphi_\omega, v_k = v_k - u'_j$,否则,车辆 k 返回物流中心, $k = k + 1, v_k = \eta_2$,转步骤4.3。

步骤4.5:如果 $\varphi_\omega \neq \emptyset$,转步骤4.3,否则 $\omega = \omega + 1$;如果 $\omega \leq m$,转步骤4.2,否则输出蚂蚁 ω 的初始路线 μ_ω 。

步骤5:计算当前迭代的最优解。计算每只蚂蚁的总配送时间 o_ω ,得出总配送时间最短的精英蚂蚁 λ 与当前迭代的最优解 o_λ 。如果 $o_\lambda \leq \phi_1, \phi_1 = o_\lambda$,保存精英蚂蚁行驶路径作为卡车最优配送路径 μ_K 。

步骤6:设计自适应启发式因子^[7]。信息素启发因子 $\beta_1 = 1 + 2(e/M_1)$,期望启发因子 $\beta_2 = 3 - 2(e/M_1)$ 。

步骤7:采用精英蚂蚁策略更新信息素。

$$\tau_{ij}^n = \tau_{ij}^o(1 - \bar{\omega}) + \sum_{\omega=1}^m \Delta_{ij}^\omega + \Delta_{ij}^\lambda \quad (22)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为信息素挥发率,取值范围为0~1; Δ_{ij}^ω 为普通蚂蚁 ω 在路段 (i,j) 上的信息素增量; Δ_{ij}^λ 为精英蚂蚁 λ 在路段 (i,j) 上的信息素增量。

步骤8:ACA终止条件判定。如果 $e \leq M_1$,则 $e = e + 1$,返回步骤4;否则终止算法。

步骤9:设计遗传算法优化水淹区内的冲锋艇路线。在卡车配送位于水淹区附近的临时配送点后,立即派出冲锋艇对水淹区内的需求点进行配送,采用遗传算法进行路径优化。

步骤9.1:初始化。GA种群规模设为 G ,最大迭代次数设为 M_2 ,交叉率为 P_c ,变异概率为 P_m ,染色体长度为 N 。令当前迭代次数为 $e_g, e_g = 1, \phi_2$ 为遗传算法的目标值, $\phi_2 = +\infty$ 。

步骤9.2:个体编码并生成冲锋艇初始行驶路

线 μ_g 。

步骤9.3:解码操作每条染色体,并计算当前迭代的目标函数值 O_g 、适应度函数值 F_g 。

步骤9.4:选择操作,采用二元锦标赛制,从当前种群随机选取2个个体,挑选适应度更优的个体进入下一次迭代。

步骤9.5:交叉操作,依次选取个体,生成一个随机数 z_c ,若小于交叉概率 P_c 则选中一个编码层进行交叉操作。

步骤9.6:变异操作,依次选取2个个体,若生成的随机数 z_m 小于变异概率 P_m ,进入变异操作并确定变异层级。

步骤9.7:若 $e_g \leq M_2, e_g = e_g + 1$,转步骤9.3;否则,算法终止,输出当前最优目标值 O_g 。若 $O_g < \phi_2, \phi_2 = O_g$,并保存该次迭代的最优路线作为冲锋艇最优配送路径 μ_B 。

步骤10:计算总目标值。既 $\min O = \phi_1 + \phi_2$ 。

4 应急物资配送动态路径规划算例

4.1 应急物资配送的动态路径规划算例设计

当前缺乏针对洪灾应急物资配送动态路径规划的标准算例库,因此,选择Solomon算例^[15]中客户坐标分布类型为R(Random)、RC(Random and Clustered)的部分算例作为基础,构建试验算例,每个算例包含1个物流中心与100个需求点。

为满足洪灾应急物资多周期配送的动态路径规划试验要求,补充如下数据:①假设某洪灾应急物资配送过程持续4个周期,以坐标(12,45)、(50,40)、(45,10)、(35,65)分别作为4个初始水淹区的中心点,初始半径分别为8、12、8和12 km。②各水淹区的临时配送点设置在水淹区边缘,坐标分别为(4,45)、(38,40)、(37,10)、(23,65)。③水淹区灾情动态变化设定如下:第1至第3个水淹区的半径每天以1 km的步长递减,而第4个水淹区的半径则每天以1 km的步长递增。在第4天,第1个水淹区的半径设定为0,模拟部分水淹区完全恢复卡车通行条件的情况。④为贴合实际救援过程中应急物资需求量,设定所有水淹区需求点的需求量为标准算例的10倍。参考文献[16],各需求点的需求量具有不确定性和递减性,因此,设定每次配送任务完成后各点需求量逐次递减5%。⑤参照文献[17]冲锋艇的参数,设定冲锋艇载重量和行驶速度为 $\eta_1 = 150$ kg, $V_b = 40$ km/h。参考轻型卡车五菱荣光新卡的资

料,将卡车的载重量和行驶速度设为 $\eta_2=3\,000\text{ kg}$ 、 $V_k=80\text{ km/h}$ 。卡车的数量充足,各临时配送点初始只配备一艘冲锋艇,各需求点的服务时间与标准算例一致。

参照文献[7,18]的方法,设定 IACA 参数 $M_1=200$ 、 $m=30$ 、 $z_0=0.5$ 、 $\bar{\omega}=0.2$,参照文献[11-14]的方法,设定 HHA 中的遗传算法参数 $G=80$ 、 $P_c=0.9$ 、 $M_2=100$ 、 $P_m=0.3$ 。

HHA 采用 Matlab R2019b 编程,在 8th Gen Intel (R) Core (TM) i5-8300H 中央处理器 (Central Processing Unit,CPU)@ 2.30GHz 与随机存取存储器 (Random Access Memory,RAM)16 GB 的电脑上运行。

4.2 算例试验

4.2.1 洪灾应急物资配送的动态路径规划分析

通过多种类型算例进行试验,验证 HHA 的可

行性和有效性。试验结果见表 1。

由表 1 可知:①从 TDT 的值得出所有算例在各周期内应急物资的总配送时间最大值为 2 030.87 min,最小值为 1 901.34 min。同一算例在不同配送周期内的配送时间和配送路线存在差异,说明 HHA 能根据不同周期内的洪灾情况状态规划卡车-冲锋艇协同运输路径。②综合 TT、NT、CST、AST 的值可知:由于从灾情开始到结束的过程中各周期内的灾情动态变化,水淹区内的需求点不断减少,冲锋艇行驶时间也随之缩短。在物资配送任务的后期,随着非水淹区需求点数量的增加,卡车的行驶时间和服务时间在增加。③根据 RT 的值可知:HHA 平均运行时间为 154.11 s,表明 HHA 能高效解决卡车-冲锋艇协同运输的动态路径规划问题,具有可行性与有效性。

表 1 不同类型算例的动态路径规划计算结果

Table 1 Results of dynamic routes planning for different types of instances

算例	T/d	FMT/min	DT/min	NT/min	CST/min	DST/min	RT/s
R103	1	2030.87	509.96	520.90	780	220	172.79
	2	1919.97	485.65	434.31	810	190	166.92
	3	1983.06	527.69	455.37	810	190	164.38
	4	1970.98	529.95	441.03	820	180	140.12
RC103	1	2008.78	581.23	427.55	800	200	172.58
	2	1977.22	597.20	380.02	830	170	163.63
	3	1977.26	582.93	394.33	840	160	152.88
	4	1901.34	617.05	284.29	890	110	121.33
R203	1	1997.23	481.94	515.29	780	220	162.57
	2	1947.63	507.92	439.72	810	190	156.48
	3	1963.84	528.89	434.95	810	190	152.17
	4	1948.12	532.76	415.36	820	180	123.56

注: t 为配送周期;TDT(Total Delivery Time)为周期 t 内应急物资的总配送时间;TT(Travel Time)为周期 t 内所有卡车的总行驶时间;NT(Navigate Time)为周期 t 内所有冲锋艇的总航行时间;CST(Car Service Time)为周期 t 内所有卡车服务时间;AST(Assault boat Service Time)为周期 t 内所有冲锋艇服务时间;RT(Running Time)为程序运行时间。

算例 R103 的动态路径规划如图 1 所示。圆圈代表水淹区,卡车路线经过水淹区时,会绕水淹区边缘行驶。由图 1 可知:①部分水淹区面积随时间推移呈现出缩小或扩大的动态变化,配送需求点的载具及其路线需要持续更新以适应灾情变化。②所有配送路线鲜有迂回或交叉配送的情况,表明 HHA 能根据灾情科学规划卡车-冲锋艇协同运输路径。

4.2.2 算法对比试验

为评估 HHA 的性能,另设计 ACA 和模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SAA),并进行对比试验。ACA 参数设置与前文一致。参照文献[19]的方法,设置 SAA 初始温度为 $\sigma=100^{\circ}\text{C}$,温

度衰退系数为 $\kappa=0.98$,马尔可夫链为 $\rho=200$,最大迭代次数设为 $M_3=800$,将算例 R103 分别采用 3 种不同算法运行 10 次取平均值,结果见表 2。

由表 2 可知:①由 TDT 的值得出,与 SAA 和 ACA 比较,HHA 求得的总配送时间分别平均缩短 2.07%与 2.3%。表明 HHA 能够规划出更优的配送路线,有效缩短应急物资配送时间。②由 RT 的值可知:与 SAA 和 ACA 比较,HHA 运行时间平均缩短 59.62%与 67.01%。HHA 展示出在较短时间内寻求最优解的能力。综上所述,HHA 在计算总配送时间和程序运行时间方面均展现出更优性能,时效性和合理性均得到验证。

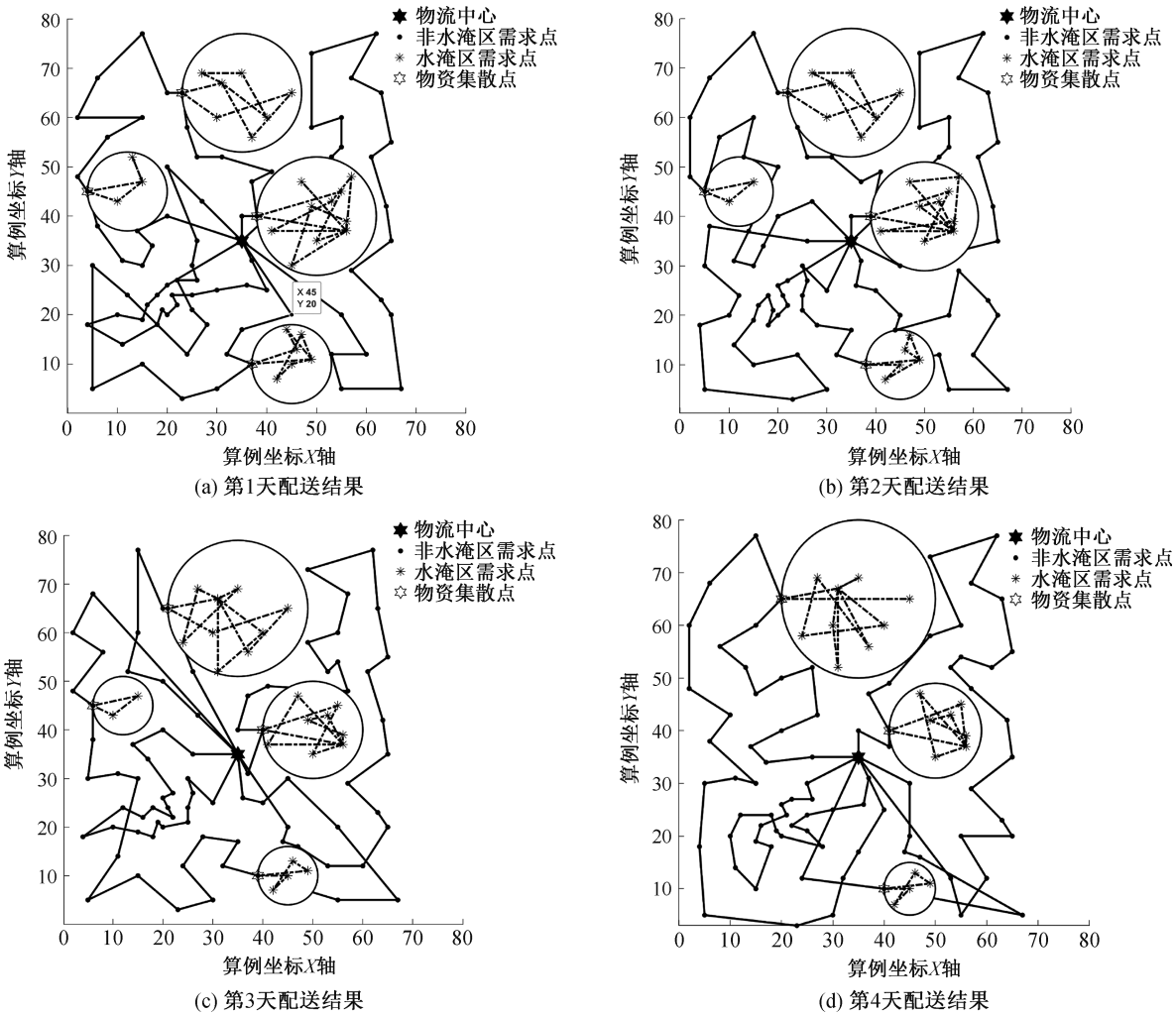


图 1 不同周期内算例 R103 的动态路径规划
Fig.1 Results of dynamic routes planning in different time periods of instance R103

表 2 不同优化算法组合的实验结果

Table 2 Experiment results of different optimization algorithm combinations

算例	t/d	HHA		SAA		ACA	
		TDT/min	RT/s	TDT/min	RT/s	TDT/min	RT/s
R103	1	2 030. 87	172. 79	2 136. 58	269. 28	2 120. 05	330. 91
	2	1 919. 97	166. 92	1 992. 86	262. 56	2 025. 20	259. 78
	3	1 983. 06	164. 38	1 976. 99	258. 65	1 991. 92	250. 75
	4	1 970. 98	140. 12	1 962. 17	240. 89	1 956. 09	234. 15
平均值		1 976. 22	161. 05	2 017. 15	257. 84	2 023. 31	268. 89

4. 2. 3 灵敏性分析

1) 冲锋艇数量灵敏性分析。在其他参数不变的前提下,将各水淹区的冲锋艇数量以 1 为步长在区间[1,4]内变动。算例 R103 各周期的计算结果见表3。限于篇幅,表3和表4中的变量值均以4天配送任务完成时间的总和表示。令 LT (Latest Time)为水淹区应急物资配送任务的最晚完成时间,即所有水淹区配送任务中最后一辆冲锋艇完成

任务回到临时配送点的时间。

表 3 冲锋艇数量的灵敏性分析

Table 3 Sensitivity analysis on the number of the assault boat

数量	LT/mm	TT/min
1	1 574. 76	2 053. 25
2	1 184. 3	2 053. 25
3	1 036. 06	2 053. 25
4	954. 59	2 053. 25

由表 3 可知:①随着冲锋艇数量的增加,LT 的值随着冲锋艇数量由 1 艘增加到 2、3、4 艘的过程中累计降幅分别为 24.77%、34.18%与 39.39%。说明增加水淹区的冲锋艇数量,可更快地将应急物资配送到水淹区的需求点,提升水淹区的应急物资配送效率,更有利于洪灾救援效果。②值得注意的是,当冲锋艇数量由 1 艘增加到 2 艘时,LT 值的相对降幅为 24.77%,由 2 艘增加到 3 艘时相对降幅为 12.5%,由 3 艘增加到 4 艘时相对降幅为 7.9%。说明派出超过实际需要数量的冲锋艇对提升应急物流配送效率并不显著。应急物流决策部门应综合考虑各水淹区受灾情况与资源配置情况,派遣合适数量的冲锋艇。③由 TT 的值可知:所有卡车的总行驶时间一致。说明增加冲锋艇的数量,能有效缩短水淹区应急物资配送任务的完成时间,但是不会影响卡车配送的路径规划。

2) 水淹区数量的灵敏性分析。设定其余参数不变,将初始的水淹区数量以步长 1 在区间[4,7]内变动,新增水淹区的中心位置坐标依次为(20,20)、(60,70)、(58,25)。初始半径都为 10 km,每天配送任务完成后设定水淹区半径缩小 1 km。算例 R103 的计算结果见表 4。

表 4 水淹区数量的灵敏性分析

Table 4 Sensitivity analysis on the number of flooded areas			
数量	TDT	TT	NT
4	7 904.88	2 053.25	1 851.61
5	8 425.22	1 816.48	2 608.74
6	8 656.28	1 773.21	2 883.07
7	8 818.81	1 683.42	3 135.39

由表 4 可知:①综合 TDT、TT 与 NT 的值得出,随着水淹区数量由 4 增加到 5、6、7 的过程中,应急物资的总配送时间增幅分别为 6.59%、2.7%、

1.8%。卡车总行驶时间相对降幅分别为 11.5%、2.3%、5.07%,冲锋艇总航行时间的相对增幅分别为 40.89%、10.54%、8.7%。说明随着水淹区数量增加,部分由卡车配送的需求点转由冲锋艇配送,使得卡车行驶时间略有减少,冲锋艇航行时间相应增加。②值得注意的是,如果水淹区需求点数量较多,由于冲锋艇载重量比卡车小,需要多次往返临时配送点和水淹区需求点,使得应急物资的总配送时间增加。说明水淹区数量对应急物资配送的路径规划影响较大,当水淹区数量较多时,应根据实际情况派遣多艘大容量的冲锋艇配送应急物资,满足应急物资配送的时效性要求。

5 结 论

1) 卡车-冲锋艇协同运输模式对于解决洪灾背景下应急物资配送问题具有可行性和合理性,有效提高配送效率。洪灾救灾周期通常较长,灾情随着时间动态变化,应急物流部门应根据各周期内灾情变化情况,科学开展多方式应急物资协同运输的动态路径规划。

2) HHA 的平均运行时间为 154.11 s,显示出在求解洪灾情景下应急物资配送路径规划问题的高时效性。对比 SAA 和 ACA,平均节约 2.07%、2.3%,说明 HHA 得出的方案可有效缩短应急物资的总配送时间。

3) 水淹区数量以及冲锋艇数量对应急物资配送路径规划有显著影响,应急物流部门应权衡各水淹区受灾情况和资源配置实际,派遣合理数量的冲锋艇,保障应急物流效率。

4) 未来研究可将灾民的心理感知等因素引入应急物流决策,刻画应急物资缺乏情景下灾民的痛苦感知成本,基于公平与效率兼顾视角开展应急物资配送的路径规划研究。

参 考 文 献

[1] DUBOIS F, RENAUD-GOUD P, STOLF P. Capacitated vehicle routing problem under deadlines: an application to flooding crisis[J]. IEEE Access, 2022, 10: 45 629-45 642.

[2] WENG Xun, DUAN Shuyao, ZHANG Jingtian, et al. A material allocation model for public health emergency under a multimodal transportation network by considering the demand priority and psychological pain[J]. Mathematics, 2024, 12(3): DOI:10.3390/MATH12030489.

[3] TAN Kangye, LIU Weihua, XU Fang, et al. Optimization model and algorithm of logistics vehicle routing problem under major emergency[J]. Mathematics, 2023, 11(5): DOI:10.3390/math11051274.

[4] 刘钊,罗辰汉,张明阳.多碍航物水域救援船路径规划方法[J].中国安全科学学报,2023,33(7):90-97.

LIU Zhao, LUO Chenhan, ZHANG Mingyang. Path planning method of rescue ships in waters with multiple obstacles[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(7):90-97.

[5] 李双琳,马祖军,郑斌,等. 震后初期应急物资配送的模糊多目标选址-多式联运问题[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2):144-151.
LI Shuanglin, MA Zujun, ZHENG Bin, et al. Fuzzy multi-objective location-multimodal transportation problem for relief delivery during the initial post earthquake period[J]. Chinese Management Science, 2013,21(2):144-151.

[6] 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. Bilevel model for dynamic location-transportation problem for post-earthquake relief distribution[J]. Journal of Systems & Management,2017,26(2):326-337.

[7] 刘长石,吴张,马祖军,等. 通行受限下需求可拆分的应急物资卡车-多无人机协同运输路径优化[J]. 系统科学与数学,2023,43(11):2 930-2 948.
LIU Changshi, WU Zhang, MA Zujun, et al. Split delivery truck multi-drone collaborative routing for emergency supplies under traffic restriction[J]. Systems Science and Mathematics, 2023,43(11):2 930-2 948.

[8] 刘长石,吴张,周愉峰,等. 疫区应急物资供应的卡车-无人机动态协同运输路径优化[J]. 系统科学与数学,2022, 42(11):3 027-3 043.
LIU Changshi, WU Zhang, ZHOU Yufeng, et al. The optimization of dynamic and cooperative truck-drone distribution routes for emergency supplies delivery in pandemic[J]. Systems Science and Mathematics, 2022,42(11):3 027-3 043.

[9] 张艳萍,崔娜,张波. 基于多式联运的应急物资供应多目标优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 230-238.
ZHANG Yanping, CUI Na, ZHANG Bo. Multi-objective optimization strategy of emergency material supply based on multi-mode transportation[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7):230-238.

[10] MOSHREF-JAVADI M, LEE S, WINKENBACH M. Design and evaluation of a multi-trip delivery model with truck and drones[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 136: DOI: 10.1016/j. tre. 2020. 101887.

[11] LI Xiaodong, XU Yang, LAI Keungkin, et al. A multi-period vehicle routing problem for emergency perishable materials under uncertain demand based on an improved whale optimization algorithm[J]. Mathematics, 2022, 10(17): DOI: 10.3390/math10173124.

[12] WANG Yanyan, SUN Baiqing. Multiperiod optimal emergency material allocation considering road network damage and risk under uncertain conditions[J]. Operational Research, 2022, 22(3): 2 173-2 208.

[13] 胡斐. 江西多地出现大面积洪涝 鄱阳湖水体面积达 3 872 平方公里[EB/OL]. [2024-07-03]. https://jx.cnr.cn/yw/20240703/t20240703_526776248.shtml.

[14] BLAZEWICZ J, LENSTRA J K, KAN A H G R. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity[J]. Discrete Applied Mathematics, 1983, 5(1): 11-24.

[15] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing problem with time windows constrains[J]. Operations Researches, 1987,35(2):254-265.

[16] MANOPINIWES W, TAKASHI I. Multi-period temporary depot location problem in flood natural disaster response[C]. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2019:1 094-1 102.

[17] FRAGSSA C. Engineering design driven by models and measures: the case of a rigid inflatable boat[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(1):DOI:10.3390/jmse7010006.

[18] LIU Changshi, KOU Gang, ZHOU Xiancheng, et al. Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 188: DOI: 10.1016/j. knosys. 2019. 06. 021.

[19] ARIYANI A K, MAHMUDY W F, ANGGODO Y P. Hybrid genetic algorithms and simulated annealing for multi-trip vehicle routing problem with time windows[J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2018, 8(6): 4 713-4 723.

作者简介: 刘长石 (1975—),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事物流与供应链管理、数字经济等方面的研究。E-mail: liuchangshi964@126.com。

