

面向受灾差异的跨区域应急救援路径优化

朱莉[†], 顾珺, 马铮, 徐逸水

(南京信息工程大学 经济管理学院, 南京 210044)

摘要: 关注各灾区待救人员的不同受伤程度,用“伤员在途可坚持时间”的区别来表征差异化受灾情形,研究带有时间窗限制、基于受灾差异的跨区域应急救援路径优化问题. 构建以最小化救援车辆行车总时间为决策目标的车辆路径模型,设计蚁群算法对仿真算例进行求解. 讨论考虑受灾差异因素对整个跨区域救援路径优化方案的影响,并对以决策者风险态度为例的关键参数实施敏感性分析. 研究结果可为构建高效的应急管理体系提供有益参考.

关键词: 应急; 跨区域; 异质性; 车辆路径问题; 蚁群算法

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

Routing optimization of cross-regional emergency rescue considering differentiated disaster impacts

ZHU Li[†], GU Jun, MA Zheng, XU Yi-shui

(School of Economics and Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Focusing on the various severity of the victims' injuries appeared in different disaster areas, using the diverse final due date or sufferable duration that the casualties can stick to be rescued, we characterize different disaster area impacts and discuss the cross-regional emergency vehicle routing problem with time window. Firstly, a vehicle routing optimization model with minimizing the traveling time is developed, and a modified ant colony algorithm is designed to solve this model. Then, the impacts of differentiated disaster on the cross-regional emergency rescue routing optimization are discussed. Finally, taking decision-makers' risk attitude as an example, we perform the simulation analysis and demonstrate the effects of key parameters. The results provide some suggestions for establishing an effective emergency management system.

Keywords: emergency; cross-region; heterogeneity; vehicle routing problem; ant colony algorithm

0 引言

应急救援路径决策在定量建模时被抽象成车辆路径问题(VRP),按研究对象不同分为物资调度路径选择和人员运输(尤其伤员撤退至各医疗中心或避难场所)路径优化问题^[1-2]. 聚焦伤员运输路径优化相关研究,不同受伤程度常被视为区别于物资运输的关键因素之一^[2]. 的确,伤员伤情的严重程度间接体现了受灾差异,在面对极其有限的应急资源进行运营优化时,对伤员进行分类分级对待十分必要,这在医疗管理领域被称为Triage^[3-4]. 不同于Triage研究视角和方法,针对伤员运输的VRP,文献中常采用以下处理方式刻画伤员等级分类对救援路径选择的影响:

有的将伤员处理成特殊的一种物资流,采取类似于对具不同需求级别商品进行分类的方式,对轻重伤患者赋予不同救援权重以作区分^[2];也有在目标函数中构造不同治愈概率函数以展现不同受伤程度^[5-6];还有在约束条件里选用不同时间窗限制来表达伤员差异化受伤等级^[7-9]. 本文研究手段与时间窗区分方法相近,尤其文献[9]提出各类型车辆所具最大运输时长限制的不同对本文思路形成具有重要启发.

综合来看,一方面,带时间窗的应急VRP相关研究,大都是在同质性“单(多)出救点、单(多)受灾点”场景下讨论路径优化,虽有文献^[7-9]关注不同受伤程度人员的救援,但较少探讨对灾害下各异质区域中

收稿日期: 2016-02-04; 修回日期: 2016-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71571103, 71101073); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏高校品牌专业建设工程项目; 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201510300001).

作者简介: 朱莉(1983—),女,副教授,博士,从事应急物流等研究; 顾珺(1992—),女,硕士生,从事应急物流的研究.

[†]通讯作者. E-mail: lzhu@nuist.edu.cn

具有受灾差异的伤员如何实施救援车辆路径优化决策. 而重大突发灾害事件常波及多个区域, 这些区域在经济发展水平、人口密度、道路通达性等方面均存在异质特征; 另一方面, 为刻画伤员受伤程度的不同, 带时间窗应急VRP模型常采用的方式是对车辆抵达伤员处的时间窗进行差别限制^[7-8], 却忽略了具有受灾差异的各伤员能够忍受从被车辆接收到被送至医疗中心接受救治成功的最大时间间隔(下称“伤员在途可坚持时间”)也具有差异性. 尤其救援车辆到达各受灾点将伤员接上车后, 有时并非直接送至医疗中心, 而是顺道赶往其他受灾点一并解救伤员, 若在路径优化决策时不考虑伤情轻重, 则极可能造成伤员伤情恶化、错过最佳救援时机. 因此, 重大灾害下救援车辆在途经具有异质性特征的不同区域时, 面对不同受灾程度的伤员如何合理规划救援路径, 是应急响应中迫切需要关注的现实问题.

本文采用时间窗VRP基础模型框架来研究受灾差异下跨区域应急救援路径选择问题. 与相关研究不同的是, 本文不仅考虑伤员在受灾区域等待救援时间窗约束的不同, 还细化关注不同受灾程度伤员从被接上救援车辆到被运至医疗中心所历经整个运输时长的不同限制, 即创新性地以不同程度伤员在途可坚持时间的差异化来刻画受灾差异. 此外, 为表达面向灾害的各区域异质性特征, 特别采用灾害影响下差别化的车辆行驶速度来客观度量. 最终构建一个以救援车辆行驶总时间最短为目标、面向受灾差异的跨区域应急路径优化模型, 设计并应用改进后的蚁群算法对模型实施仿真求解, 并通过对关键参数的敏感性分析验证模型和算法的可行性和有效性, 得出的相关结论可为政府部门应急决策提供参考建议.

1 受灾差异下跨区域应急路径优化模型

模型研究场景是某重大灾害的爆发使多个邻近区域均受到不同程度影响, 在这多个邻近灾区内或附近建有一个大型医疗中心, 若干车辆从该医疗中心出发, 对各灾区内不同程度伤员实施应急救援后送回医疗中心, 要求应急路线不能重复且救援总时间最短.

1.1 模型假设与符号说明

模型假设条件如下: 1) 灾害影响的受灾点位置和待救伤员数量已知; 2) 救援车辆车型相同, 车辆最大荷载人数唯一并已知, 且任一受灾点处伤员数不超过单车容量; 3) 各受灾点有且仅有一辆车对其实施伤员救援; 4) 车辆在各受灾点处停留时间与此受灾点内待救伤员人数成正比; 5) 车辆往来于各受灾点间的行驶速度与其间的道路受损程度直接相关; 6)

灾害影响下不同受灾点处伤员的在途可坚持时间存在差别, 同一受灾点处不同伤员的在途可坚持时间相同.

设医疗中心共有 K 辆救援车辆, 任一救援车辆用 $k(k = 1, 2, \dots, K)$ 表示, 每辆车最多可荷载伤员人数为 W ; 用 i 或 j 指那些有待救伤员需求的不同受灾点, 受灾点总个数为 N ; 第 k 辆车历经并救援受灾点的个数为 $n_k(n_k = 0$ 表示未使用第 k 辆车); 集合 R_k 是第 k 辆车行驶路线, 用 r_{ki} 代表在路线 R_k 中途径顺序为 i 的受灾点, 即 $R_k = \{r_{k0}, r_{k1}, \dots, r_{ki}, \dots, r_{kn_k}, r_{k(n_k+1)}\}$, 其中 r_{k0} 和 $r_{k(n_k+1)}$ 分别表示车辆从医疗中心出发和车辆回到医疗中心的情形.

受灾点 i 到 j 的距离为 $d_{ij}(i, j = 0, 1, \dots, N)$, 其中 $i, j = 0$ 代表医疗中心; 受灾点 i 内待救伤员人数为 q_i ; 救援车辆须在时间窗 $[0, b_i]$ 内到达受灾点 i ; 受灾点 i 处伤员的在途可坚持时间为 c_i ; 用 s_i 表示救援车辆抵达受灾点 i 的时刻, t_{ij} 是车辆从受灾点 i 到 j 的行驶时间, ut_i 是在受灾点 i 处安排每位伤员上车所耗时间; 用 v_{ij}^0 表示未受灾情况下车辆从 i 到 j 的正常通行速度, v_{ij} 是灾害发生后救援车辆从 i 到 j 的平均通行速度, ε_{ij} 是 i 与 j 路段间受灾害影响的速度衰减系数.

1.2 模型构建

考虑应急救援强时效性要求, 模型决策目标是在符合各车辆荷载、车辆总数量限制以及满足各时间关联约束下, 寻求使救援行驶总时间最短的调度方案. 即

$$\min Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k+1} t_{r_{k(i-1)}r_{ki}} \cdot \text{sign}(n_k - 1). \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n_k} q_{r_{ki}} \leq W; \quad (2)$$

$$0 \leq n_k \leq N; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K n_k = N; \quad (4)$$

$$R_{k_1} \cap R_{k_2} = \emptyset, \quad \forall k_1 \neq k_2; \quad (5)$$

$$R_k = \{r_{ki} | r_{ki} \in \{1, 2, \dots, N\}\}; \quad (6)$$

$$s_{r_{k(i-1)}} + ut_{r_{k(i-1)}} \cdot q_{r_{k(i-1)}} + t_{r_{k(i-1)}r_{ki}} = s_{r_{ki}}; \quad (7)$$

$$s_{r_{ki}} \leq b_i; \quad (8)$$

$$s_{r_{k(n_k+1)}} - s_{r_{ki}} \leq c_i; \quad (9)$$

$$\text{sign}(n_k - 1) = \begin{cases} 1, & n_k \geq 1; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad (10)$$

$$v_{r_{k(i-1)}r_{ki}} = v_{r_{k(i-1)}r_{ki}}^0 \cdot \varepsilon_{r_{k(i-1)}r_{ki}}; \quad (11)$$

$$t_{r_{k(i-1)}r_{ki}} = \frac{d_{r_{k(i-1)}r_{ki}}}{v_{r_{k(i-1)}r_{ki}}}. \quad (12)$$

目标函数(1)是最小化所有救援车辆总行驶时间;式(2)是每辆车荷载容量限制;式(3)是每辆车在行驶路径上历经受灾点的个数限制;式(4)和(5)共同确保每个有待救伤员需求的受灾点有且仅有一辆车前往救助;式(6)是第 k 辆车依次访问各受灾点所形成的救援路径;式(7)是车辆抵达前后两受灾点处实施救援的时间关联表达;式(8)是救援车辆到达各受灾点的不同时间窗约束;式(9)是对各受灾点处伤员在途可坚持时间的约束;式(10)说明只有当第 k 辆车至少历经1个受灾点时才参与救援,此时取 $\text{sign}(n_k - 1) = 1$, 否则认为该车辆未实施应急救援;式(11)表明救援车辆通行速度随灾害影响下衰减系数的变化而变化;式(12)则是救援车辆行驶历经两受灾点所耗时间与通行速度、以及两受灾点间距离的关系表达式。

所构模型属于时间窗VRP优化范畴,是一个NP-hard问题,模型变量和约束条件的增加会导致求解难度快速上升^[10]。目前的求解算法可分为精确和启发式(经典启发式和元启发式)两类,下面选用元启发式算法中的一种——蚁群算法对模型实施求解。

2 改进的蚁群算法设计

选择蚁群算法求解模型是因为,所构模型在时间窗VRP基础上增加了在途可坚持时间限制和灾后速度衰减约束,求解工作更繁琐。而蚁群算法中正反馈原理能在一定程度上加快寻优进程,且作为一种并行算法可凭借个体间信息交互来搜索全局最优解,特别适于解决带时间窗VRP的路径寻优问题。现基于所构模型特点对传统蚁群算法进行改进设计。

2.1 状态转移规则

蚂蚁 $k(k = 1, 2, \dots, m)$ 依据各连接路径上信息素浓度决定其下一个要访问的受灾点, $P_{ij}^k(t)$ 是蚂蚁 k 在 t 时刻从受灾点 i 转移到 j 的概率,公式如下:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{j \in J_k} (\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij}(t))^\beta}, & j \in J_k; \\ 0, & j \notin J_k; \end{cases} \quad (13)$$

$$\eta_{ij} = \begin{cases} v_{ij}^0 \cdot \varepsilon_{ij} \cdot e^{-p}, & j \in J_k; \\ 0, & j \notin J_k. \end{cases} \quad (14)$$

其中: τ_{ij} 是信息素浓度函数; η_{ij} 是启发函数,度量 η_{ij} 时特用参数 p 来刻画受灾害影响的道路通行状况^[11]: p 越大, η_{ij} 越小,意味着以通行状况为指征的某条道路受灾情况越糟糕,蚂蚁选择该条路径的概率越小,即启发函数值越小; J_k 表示蚂蚁 k 下一步可选择访问的受灾点集合; α 是信息素重要程度因子,其值越大,表明信息素浓度在受灾点状态转移中发挥的作用越大; β 是启发函数重要程度因子, β 越大,意味着启发函数在受灾点状态转移中的影响越大。

2.2 局部更新策略

当所有蚂蚁完成一次路径选择后,各受灾点间连接路段上的信息素浓度按如下策略实时更新循环:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t). \quad (15)$$

其中: $\rho(0 < \rho < 1)$ 是信息素挥发因子, $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 是第 k 只蚂蚁从受灾点 i 到 j 路途中在 t 时刻释放的信息素浓度。

2.3 全局更新策略

对于蚂蚁释放信息素问题,采用如下 ant cycle system 模型^[12]来表达信息素浓度的增加:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{边}(i, j) \text{在蚂蚁} k \text{路径上}; \\ 0, & \text{否则}. \end{cases} \quad (16)$$

其中: Q 是信息素强度系数,其含义是蚂蚁循环一次所释放信息素的总量; L_k 是第 k 只蚂蚁行驶路径的总长度。

3 仿真算例与参数分析

3.1 算例设置

某地震灾害波及地处邻近、有不同程度人员伤亡的19个区域,另选1处应急救援机构(如大型医院)作为医疗中心,从医疗中心分派车辆分别将19个受灾区域的伤员接回至医疗中心接受救治。为刻画各区域在地理位置、人口数量、经济发展水平等方面差别,首先构建一个灾害评估体系对所有区域的受灾等级进行衡量,然后据此等级评估来合理设定各受灾区域间的行驶速度衰减系数、车辆至各受灾区域的时间窗以及各灾区伤员在途可坚持时间等模型关键参数。

3.1.1 灾害评估体系的构建

选择经济发展水平、道路通达性、震中距和伤亡人数这4个指标^[13]来评估各区域受地震灾害的影响程度。简述评估方法如下:首先采集各受灾区域在这4个指标方面的相关数据,其中经济发展水平指数依

托各地区GDP值测定,道路通达性指数依据各区域交通流量密度设置,震中距根据Google等官方地图测算,伤亡人数由特定灾情数据统计而得.将这些指标数据列于表1,区域1是医疗中心、区域8是震中所在地.由于各指标数据的单位值不一致,需对其分别采取去量纲化的处理,然后运用层次分析法得出4个指标因素各自的权重.

表1 各区域地理位置及灾害评估体系的指标数据

区域	位置坐标	经济发展水平指数	道路通达性指数	震中距离/km	伤亡人数/个
1	(0,0)	220	250	106	0
2	(-74,8)	211	220	164	3
3	(-70,-115)	92	104	132	1
4	(-102,-105)	156	135	162	3
5	(-117,11)	189	109	202	2
6	(10,-50)	177	144	62	2
7	(-94,-50)	166	180	158	3
8	(59,-88)	85	100	0	4
9	(-53,76)	126	108	164	3
10	(-20,-120)	135	142	85	3
11	(-56,25)	210	245	161	1
12	(-41,44)	204	189	109	2
13	(-43,94)	86	102	209	2
14	(-78,78)	141	117	215	3
15	(70,20)	153	133	109	3
16	(56,-28)	196	169	60	1
17	(20,50)	80	102	143	3
18	(-14,-104)	210	246	75	2
19	(80,104)	214	198	193	2
20	(0,-106)	163	147	62	4

3.1.2 受灾等级的划分及区域异质性参数的设定

依据去量纲化处理后的指标数据及相应权重,测算出各区域受灾程度的评估值,列于表2.再据此受灾评估值对模型关键参数进行合理设定:依评估值将区域分为不同受灾等级,其中受灾等级为1表示受灾害影响程度最大,受灾等级为4表示受灾害影响程度最小;对各受灾级别区域设置不同的时间窗和差异化的伤员在途可坚持时间,见表2;另对各区域受灾程度评估值实施两两配对并加和平均处理,以作为两灾区间车辆行驶速度的衰减系数,用来度量区域间以道路损坏程度为表征的受灾影响,进而得出灾后救援车辆在两区域间的平均行驶速度.

表2 各区域受灾等级及异质性参数设置

区域	评估值	受灾等级	b_i	c_i	区域	评估值	受灾等级	b_i	c_i
1	0.78	4	6	6	11	0.73	4	6	6
2	0.45	2	3	1.5	12	0.49	2	3	1.5
3	0.64	3	4.5	3.5	13	0.61	3	4.5	3.5
4	0.41	2	3	1.5	14	0.47	2	3	1.5
5	0.56	3	4.5	3.5	15	0.34	2	3	1.5
6	0.4	2	3	1.5	16	0.54	3	4.5	3.5
7	0.43	2	3	1.5	17	0.4	2	3	1.5
8	0.07	1	2	1	18	0.48	2	3	1.5
9	0.41	2	3	1.5	19	0.6	3	4.5	3.5
10	0.32	2	3	1.5	20	0.15	1	2	1

3.2 求解结果比较

其他相关参数设置为:蚂蚁数目 $m = 20$,信息素重要程度因子 $\alpha = 1$,启发函数重要程度因子 $\beta = 1$,信息素挥发因子 $\rho = 0.15$;最大迭代次数 $NC_{max} = 60$,信息素强度系数 $Q = 10$,救援车辆最大荷载人数 $W = 13$,伤员上车耗费时间为0.15h,未受灾时车辆正常通行速度由随机生成矩阵获得.在MatlabR2010b中实现用于模型求解的改进蚁群算法,得出此算例场景下考虑跨区域受灾差异的应急救援车辆最优路径,见图1.为便于比较,特对忽视伤员在途可坚持时间约束且不刻画各区域灾后车辆行驶速度差异性的算例场景实施仿真求解,得出不考虑跨区域受灾差异的最优应急路径方案(如图2所示),并将两情形下路径优化方案、最短救援行车总时间及总距离对比列于表3.

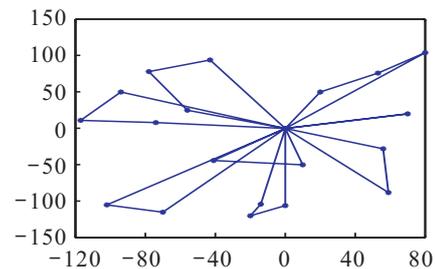


图1 考虑跨区域受灾差异的应急最优路径

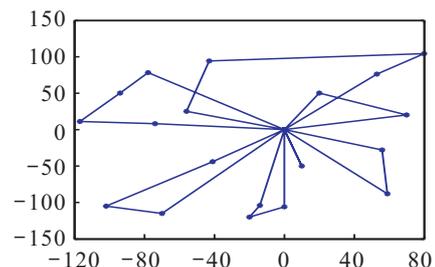


图2 不考虑跨区域受灾差异的应急最优路径

表3 两种情形下的应急最优路径及最短救援行车总时间

不考虑跨区域受灾差异		考虑跨区域受灾差异	
路径序号	行车路线	路径序号	行车路线
1	1-3-4-2-1	1	1-3-4-1
2	1-5-7-11-1	2	1-2-5-7-1
3	1-6-20-1	3	1-6-12-1
4	1-8-16-15-1	4	1-8-16-1
5	1-9-19-13-1	5	1-19-9-17-1
6	1-18-10-12-1	6	1-18-10-20-1
7	1-14-17-1	7	1-13-14-11-1
		8	1-15-1
最短行车总距离/km	2016.70		1899.50
最短行车总时间/h	113.13		46.96

由图1、图2和表3可知,考虑与不考虑跨区域受灾差异的应急路径优化方案存在明显不同.例如,若不考虑各异质区域伤员在途可坚持时间存在差异,则最优方案中第1条路径为1-3-4-2-1,即车辆依次对区域3、4和2处伤员实施救援后回到医疗中心.而在考虑受灾差异场景下,由表2可知,区域4被评估为受灾等级较高(第2等级,仅次于震中地),伤员受灾害影响严重而致在途可坚持时间较短,因而车辆在接收区域4处伤员后若再继续前往区域2实施救援变得不再可行,故考虑受灾差异时车辆1的最优

路径变为1-3-4-1.再如,对比两场景中第4条路径发现,考虑受灾差异的车辆在救援区域8和16后直接返回医疗中心,区域15则由另派车辆直接提供救援(路径8).这是因为考虑受灾差异时区域15也被评估为受灾较重区域,故其伤员可接受的救援时间窗较严格,而车辆在对区域8和16施救后便已严重超出区域15的时间窗约束,因而不再前往区域15.路径选择的变化使两情形下最短救援行车总时间和总距离也呈现较大差异(见表3),这些差别均表明,不考虑各异质区域受灾差异这一现实因素的路径规划难以有效服务于真实应急决策.

3.3 参数分析

下面对模型中刻画伤员在途可坚持时间差异的关键参数 c_i 进行敏感性分析.各灾区不同受伤程度伤员的在途可坚持时间受多种因素共同作用,不仅各区域地理位置和待救伤员人数等客观因素对其有影响,而且如决策者风险态度等主观因素也决定其值大小.现选择改变决策者主观风险态度,观察由此而致的伤员在途可坚持时间变化对救援车辆最优路径的影响.将决策者风险态度分为乐观、折中、悲观3类,不同的风险态度会直接导致区域受灾等级评估范围的变化,对各区域受灾等级的划分与认定也随之改变,进而影响救援车辆到达各灾区的时间窗以及各灾区伤员在途可坚持时间的设置,将相应参数变化列于表4.

表4 决策者不同风险态度下的各区域受灾等级划分

受灾等级	乐观范围	各区域序号	折中范围	各区域序号	悲观范围	各区域序号	b_i	c_i
1	0.00 ~ 0.10	8	0.00 ~ 0.29	8, 20	0.00 ~ 0.40	6, 8, 10, 15, 17, 20	2	1
2	0.11 ~ 0.44	4, 6, 7, 9, 10, 15, 17, 20	0.30 ~ 0.49	2, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18	0.41 ~ 0.59	2, 4, 5, 7, 9, 12, 14, 16, 18	3	1.5
3	0.45 ~ 0.60	2, 5, 12, 14, 16, 18, 19	0.50 ~ 0.69	3, 5, 13, 16, 19	0.60 ~ 0.74	3, 11, 13, 19	4.5	3.5
4	0.61 ~ 1.00	1, 3, 11, 13	0.70 ~ 1.00	1, 11	0.75 ~ 1.00	1	6	6

对表4中数据予以简单整理说明:若应急决策者对风险持乐观态度,则被评定为1、2、3、4等级的受灾区域数量占区域总数的比例分别是5%、40%、35%、20%;若应急决策者持风险折中态度,则相应比例变为10%、55%、25%、10%;而当应急决策者偏向风险悲观时,相应等级灾区比例分别为30%、45%、20%、5%.以乐观和悲观决策情形为例,其他模型参数不变,观察这两种极端风险态度下考虑受灾差异的应急路径方案比较,如图3和图4所示.

由表4、图3和图4可知,应急决策者不同风险态

度在一定程度上影响对各灾区伤员在途可坚持时间的判断,故导致不同 c_i 取值下考虑受灾差异的跨区域应急救援最优路径明显不同.多次实验结果表明:乐观决策下的车辆最短救援总时间和总距离均比悲观决策的更短.这似乎很符合常理推断,但仍需注意的是,由于乐观风险态度可能低估各异质区域受灾程度,在实际应急决策中应结合相关灾情各方面客观因素(如综合考量各灾区自然地理和人文经济等)对跨区域应急救援车辆实施合理调度.

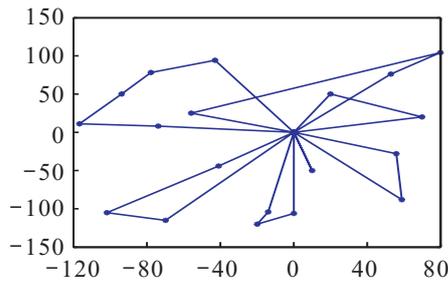


图3 乐观决策下的应急最优路径

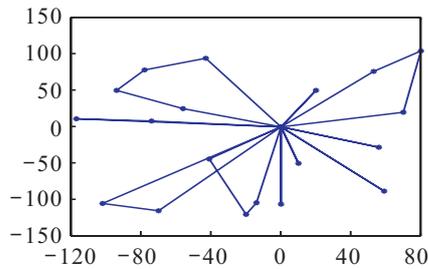


图4 悲观决策下的应急最优路径

4 结 论

伤员救援是灾后应急处置的关键任务之一,救援车辆及时高效的调度是顺利开展伤员救援工作的重要保障.以往带时间窗的应急救援VRP研究中,不仅忽略了伤员从被车辆接收至被运抵医疗中心整个过程可忍受时长的差异化限制,也较少考虑到各区域异质特征对灾后救援车辆运输速度的影响.本文提出了“伤员在途可坚持时间”这一概念,并进一步深入探讨了可能影响该时间约束的众多因素(如异质性区域的不同受灾等级和应急决策者的不同风险态度等).面对具有差异化受灾状况的多个异质区域,本文建立了以最小化救援车辆行车总时间为目标的带时间窗VRP模型,设计了一种改进的蚁群算法,并通过仿真算例求解和参数分析验证了所构模型和算法的可行性和有效性,研究结果可以为政府部门制定科学高效的应急管理方案提供有益参考.

未来可尝试突破受灾区域位置和待救伤员人数已知这一假定,考虑实际应急决策中可能出现的诸多不确定情景;另外,本文仅讨论了区域异质性和决策者风险态度对伤员在途可坚持时间的影响,今后也可努力挖掘更多潜在时间关联因素之间的相互作用.

参考文献(References)

[1] Braekers K, Ramaekers K, Nieuwenhuysse I V. The vehicle routing problem: State of the art classification and

review[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 99(9): 300-313.

[2] Jacobson E U, Argon N T, Ziya S. Priority assignment in emergency response[J]. *Operations Research*, 2012, 60(4): 813-832.

[3] Saghafian S, Hopp W J, Oyen M P V, et al. Complexity-augmented triage: A tool for improving patient safety and operational efficiency[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2014, 16(3): 329-345.

[4] Wex F, Schryen G, Feuerriegel S, et al. Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 235(3): 697-708.

[5] Jin S, Jeong S, Kim J, et al. A logistics model for the transport of disaster victims with various injuries and survival probabilities[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 230(1): 17-33.

[6] Sung I, Lee T. Optimal allocation of emergency medical resources in a mass casualty incident: Patient prioritization by column generation[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 252(2): 623-634.

[7] Talarico L, Meisel F, Sörensen K. Ambulance routing for disaster response with patient groups[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 56(4): 120-133.

[8] Miranda D M, Conceição S V. The vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel and service time[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 64(22): 104-116.

[9] Erera A L, Morales J C, Savelsbergh M. The vehicle routing problem with stochastic demand and duration constraints[J]. *Transportation Science*, 2010, 44(4): 474-492.

[10] Toth P, Vigo D. The vehicle routing problem[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2011: 157-178.

[11] Yuan Y, Wang D. Path selection model and algorithm for emergency logistics management[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(3): 1081-1094.

[12] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.

[13] Wang Z. Uncertainty index based consistency measurement and priority generation with interval probabilities in the analytic hierarchy process[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 83(5): 252-260.

(责任编辑:李君玲)