文章编号：2097-5899(2025)01-0025-09　　**中图分类号**：F275.5; U292.4　　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202406210001
引用格式：靳国伟，任维权，王文杰，等. 车辆运输能力随机的应急物流选址-分配-路径优化[J]. 铁路物流，2025，43(1)：25-33.
JIN Guowei，REN Weiquan，WANG Wenjie，et al. Emergency Logistics Location-Allocation-Routing Optimization with Stochastic Vehicle Transport Capacity[J]. Railway Logistics，2025，43(1)：25-33.

车辆运输能力随机的应急物流选址-分配-路径优化

靳国伟[1,2]，任维权[1,3]，王文杰[4]，严　明[1,2]，陈　希[1,2]，赵伊楠[1,2]

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院，河北 石家庄　050043；2. 河北省交通安全与控制重点实验室，河北 石家庄　050043；3. 中国铁路呼和浩特局集团有限公司 乌海车务段，内蒙古 乌海　016000；4. 中铁快运股份有限公司 多式联运部，北京　100055)

摘　要：为解决车辆运输能力随机的应急物流选址-分配-路径优化问题，考虑设施备选点的服务能力、需求覆盖以及车辆运输能力的随机性等约束，分别以总的服务时间和总的车辆运行时间最小为目标，构建包含车辆运输能力机会约束的双层规划模型。上层的选址-分配模型利用数学软件进行求解；下层的车辆路径模型采用蚁群算法进行求解。经过测试，提出的混合算法能够有效求解提出的选址-分配-路径问题。最后，设计算例对提出的数学模型和求解方法进行验证，结果表明考虑车辆运输能力的随机性更加符合实际情况，能够较好满足应急物流的需求。

关键词：物流工程；选址路径规划；蚁群算法；应急物流；机会约束

0　引言

应急物流是指为应对严重自然灾害、突发性公共卫生事件及公共安全事件等突发事件而对物资、人员、资金等需求进行紧急保障的一种特殊物流活动。应急物流具有突发性、弱经济性、不确定性和非常规性等特点，多数情况下通过物流效率实现其物流效益，快速响应是应急物流最重要的特点之一。除此之外，不确定性也是其主要特点之一，除了需求的不确定，在供给侧也存在诸多不确定性，如受到应急物资形状、装载方式、装载水平等因素的影响，可用车辆运输能力呈现出一定程度的不确定性。为了有效应对应急物资保障问题，构建包含基本生活物资储备点选址和运输的应急服务网络，以保证基本生活物资的快速送达。

基本生活物资储备点选址和派送是应急物流管理中面临的一个非常重要的问题[1]，国内外关于设施选址和车辆路径的研究较为丰富。郭鹏辉等[2]对应急救援路线规划问题进行研究，综合考虑了安全风险和时间花费2个目标。郭鹏辉等[3]综合考虑救援及时性、综合满意度和物资供给公平性等多个目标，对灾后应急救援中的选址-路径-配给问题展开研究。范厚明等[4-5]在考虑随机集货需求的条件下对同时配货集货的车辆路径问题进行探讨。张聆晔等[6]研究了风险不确定的海上应急物资储备库选址问题。刘明等[7]基于应急服务水平研究了应急物流网络的选址-分配问题(Location-Allocation Problem，LAP)。赖志柱等[8]研究了多目标应急物流中心选址的鲁棒优化问题。周愉峰等[9]考虑设施中断情景的震后救援初期应急物流LAP问题。张得志等[10]、陈治亚等[11]对随机需求的车辆路径问题进行了研究。曲冲冲等[12]以京津冀地区应急物资保障的经

收稿日期：2024-06-21
通信作者：王文杰(1984—)，男，内蒙古阿拉善盟人，中铁快运股份有限公司多式联运部高级工程师。
基金项目：河北省高等学校社科研究项目(SQ2022078)；河北省军民融合发展研究课题(HB22JMRH035)

济性和物资分配的公平性为目标，研究了多阶段、多灾种的京津冀协同应对自然灾害应急资源配置问题。周开军等[13]研究了绿色物流中需求不确定的车辆路径问题。Chen等[14]考虑了空域能力不确定的民航交通流管理问题。Noorizadegan等[15]研究了随机需求下的机会约束车辆路径问题，并使用分支定价方法求解问题。Tasouji等[16]研究了疫情期间传染性废物的选址-路径问题(Location-Routing Problem，LRP)。Aghalari等[17]研究了电动汽车快速充电桩LRP问题。Soto-Mendoza等[18]研究了1个局部的两级供应链问题，第一级确定开设的工厂和供应商选择，第二级决策供应商至工厂及工厂到顾客的车辆路径问题，构建了基于节点的数学模型和基于流的数学模型，并设计分支切割算法进行求解。Zhang等[19]研究了疫情期间的LAP问题。Pourmohammadi等[20]对枢纽的选址和路径问题进行研究。Lagos等[21]研究了具有随机需求的车辆路径问题。Dominguez-Martin等[22]研究了综合考虑LRP问题和一类商品的取送货问题(One-Commodity Pickup and Delivery Problem，1-PDP)的新问题，并设计分支切割算法进行求解。

综上所述，目前的研究主要集中在选址、路径等单个方面，将选址、分配与车辆路径综合考虑的研究较少。同时，在选址、车辆路径等问题中考虑不确定性也存在一些研究，但这些研究主要从需求的角度考虑，从供给的角度进行研究的较少。事实上，供给侧也面临诸多不确定性，例如，服务车辆运输能力的不确定性。在不考虑超载的情况下，尽管服务车辆的装载空间和载重能力是确定的，但基本生活物资的形状、装载方式、装载水平等因素都会影响服务车辆的运输能力。受到基本生活物资形状、装载方式、装载水平等因素的影响，服务车辆的运输能力表现出不确定性。这种不确定性，可能会影响需要使用的车辆数量以及派送效率。因此，拟研究考虑可用车辆运输能力不确定条件下应急物流基本生活物资储备点选址与派送问题，以保障基本生活物资的快速、及时送达。

1　问题描述与建模

1.1　问题描述与假设

应急物流基本生活物资储备点选址与派送问题可以描述如下：在考虑车辆运输能力供给不确定的前提下，给定需求点集合、设施备选点集合，考虑设施和车辆的能力限制，确定设施选址问题、车辆路径问题以及需求点的分配问题，要求所有需求都能得到满足，属于典型的LRP问题[23]。基于应急物流对时间效率要求较高的特点，以总的服务时间最小和总的车辆运行时间最小为目标构建双层规划模型，上层为LAP模型，下层为车辆路径问题(Vehicle Routing Problem，VRP)模型。为了便于理解选址-分配-路径问题(Location-Allocation-Routing Problem，LARP)，给出应急物流LARP问题示例如图1所示。为了便于建模，给出以下假设：①可用车辆的运输能力是随机的，但假设其符合正态分布；②为了符合实际，每个设施备选点都有其服务半径，只有在其半径内的需求点才能由该设施备选点服务，应急物流LARP问题示例如图1所示，虚线圆圈表示的是当前设施备选点的服务半径；③每个需求点的所有需求由1个设施备选点服务，即需求不拆分；④为了简化和便于管理，假设运营需要的每辆车只能服务1个设施备选点。

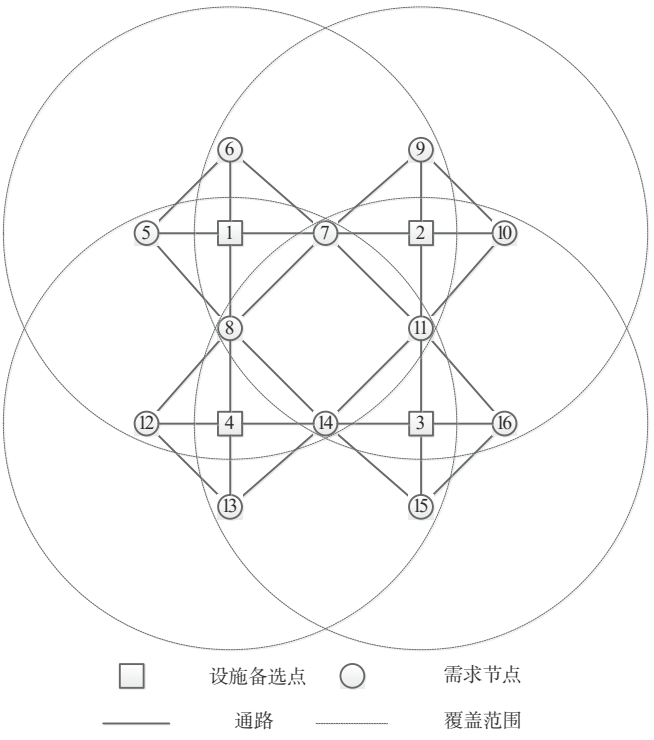


图1　应急物流LARP问题示例

Fig.1　Example of emergency logistics LARP

1.2　符号定义

建模用到的参数与变量较多，集合定义如表1所示，参数定义如表2所示，决策变量定义如表3所示。

1.3　数学模型

基于问题描述与符号定义，构建双层规划模型。设计上层LAP模型目标函数如下。

表1　集合定义

Tab.1　Sets

数学符号	含义
I	需求点集合，$i\in I$
J	设施备选点集合，$j\in J$
I_j	设施备选点$j\in J$能够服务的需求点集合，$i'\in I_j$
J_i	表示能够服务需求点$i\in I$的设施备选点集合，$j'\in J_i$
K	所有节点集合，$K=I\cup J$，$k\in K$
K_i	表示与节点i直接连通的节点集合，$K_i\subseteq K$，不包括节点i，$k'\in K_i$
V	可用车辆集合，$v\in V$

表2　参数定义

Tab.2　Parameters

数学符号	含义
τ_j	表示服务储备点$j\in J$的车辆从储备点$j\in J$出发遍历所有分配给储备点$j\in J$的需求点后重新回到储备点j的时间，与车辆运行路径有关，h
d_i	需求点$i\in I$的基本生活物资需求数量，件
D_j	设施备选点$j\in J$的基本生活物资储备数量，件
C_v	车辆$v\in V$的运输能力，件
t_{kl}	表示车辆从节点$k\in K$到其邻接节点$l\in K$的运行时间，h

表3　决策变量定义

Table.3　Decision variables

数学符号	含义
x_j	选址变量，用于指示设施备选点$j\in J$是否被选择开设，若是则为1，否则为0
y_{ij}	分配变量，用于指示需求点$i\in I$是否由设施备选点$j\in J$提供服务，若是则为1，否则为0
z_{vkl}	车辆路径变量，如果车辆$v\in V$直接从节点$k\in K$运行至其邻接节点$l\in K$则为1，否则为0
f_{vi}	辅助决策变量，用于消除车辆$v\in V$和需求点$i\in I$的子回路

$$\min\sum_{j\in J}\tau_j x_j \tag{1}$$

约束条件如下。

$$\sum_{l\in K_i}\bar{z}_{vil}+\sum_{k\in K_j}\bar{z}_{vjk}-y_{ij}\leqslant 1\quad \forall i\in I,\ j\in J,\ v\in V \tag{2}$$

$$x_j\leqslant\sum_{v\in V}\sum_{k\in K_j}\bar{z}_{vjk}\quad \forall j\in J \tag{3}$$

$$\sum_{i'\in I_j}d_{i'}y_{i'j}\leqslant D_j x_j\quad \forall j\in J \tag{4}$$

$$\sum_{j\in J}y_{ij}=1\quad \forall i\in I \tag{5}$$

$$x_j\in\{0,1\}\quad \forall j\in J \tag{6}$$

$$y_{ij}\in\{0,1\}\quad \forall i\in I,\ j\in J_i \tag{7}$$

式中：$\bar{z}_{vil}$为变量z_{vil}所对应的值，由下层VRP模型计算得到，对于初始迭代，为了减少限制统一赋值为1，其他迭代中$\bar{z}_{vil}$取下层VRP模型计算得到的值；τ_j为某个储备点服务需求的效率，作为备选节点的权重，可以有效引导算法迭代方向，根据下层VRP模型结果计算得到，其值为车辆的周转时间，即车辆从某设施备选点出发遍历所有分配给当前设施备选点的需求点后重新回到当前设施备选点的运行时间，初始迭代时可以统一设置为1。

考虑到应急物流多数情况下通过物流效率(尤其是时间效率)实现其物流效益，上层LAP问题以总的服务时间最短为目标，如公式(1)所示，服务时间τ_j依赖于下层车辆路径模型的计算结果。公式(2)表示车辆v如果同时经过了需求点$i\in I$和设施备选点$j\in J$那么需求$i\in I$才有可能分配给设施备选点$j\in J$。公式(3)表示只有存在车辆服务某个设施备选点的情况下，该设施备选点才有可能选择开设。公式(4)为设施备选点能力约束，表示分配给任一设施备选点的需求不能超过该设施的储备量上限，同时该约束也表达了分配变量和选址变量之间的关系。公式(5)规定任一需求都只能有1个设施备选点为其服务。公式(6)、公式(7)为变量约束。

下层VRP模型目标函数如下。

$$\min\sum_{v\in V}\sum_{k\in K}\sum_{l\in K_k}z_{vkl}t_{kl} \tag{8}$$

下层VRP模型约束条件如下。

$$\sum_{v\in V}\sum_{k'\in K_i}z_{vik'}=1\quad \forall i\in I \tag{9}$$

$$\Pr\left(\sum_{i\in I}\sum_{k'\in K_i}d_i z_{vik'}\leqslant C_v\right)>\alpha\quad \forall v\in V \tag{10}$$

$$f_{vi_1}-f_{vi_2}+\left(|I|\times z_{vi_1i_2}\right)\leqslant|I|-1\quad \forall i_1,\ i_2\in I,\ v\in V \tag{11}$$

$$\sum_{l\in K_k}z_{vld}-\sum_{l'\in K_k}z_{vlk}=0\quad \forall k\in K,\ v\in V \tag{12}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{i'\in I_j}z_{vji'}\leqslant 1\quad \forall v\in V \tag{13}$$

$$\sum_{l\in K_i}z_{vil}+\sum_{k\in K_j}z_{vjk}-\bar{y}_{ij}\leqslant 1\quad \forall i\in I,\ j\in J,\ v\in V \tag{14}$$

$$\bar{x}_j\leqslant\sum_{v\in V}\sum_{k\in K_j}z_{vjk}\quad \forall j\in J \tag{15}$$

$$z_{vld}\in\{0,1\}\quad \forall v\in V,\ k\in K,\ l\in K_k \tag{16}$$

$$f_{vi}\geqslant 0\quad \forall v\in V,\ i\in I \tag{17}$$

应急物流因其突发性和紧迫性等特点，对响应时间要求较高。为了达到快速响应、快速服务的目的，

下层模型以总的车辆运行时间最短为目标构建模型，如公式(8)所示，这与应急物流对时间要求较为紧迫一致，能够很好地满足应急物流紧迫性的特点。公式(9)为需求覆盖约束，要求每个需求点都要有车辆服务，而且只被服务一次。公式(10)是车辆能力约束，即车辆服务的需求不能超过其运输能力。考虑到可用车辆运输能力的不确定性，此处用机会约束来描述。该约束中车辆运输能力为随机变量，公式(10)左边为车辆随机运输能力的概率测度，表示车辆实际运输的基本生活物资不超过车辆运输能力的概率要大于α，机会约束考虑了运输能力的不确定性。公式(11)为消除子回路约束。公式(12)为网络流约束。公式(13)表示任一车辆路径中至多只能包含1个设施备选点，即每辆车至多分配给1个设施备选点，也就是说如果某辆车参与了服务，那么这辆车就会隶属于某一个设施备选点，为其提供服务。公式(14)表示变量之间关系约束，只有在需求$i\in I$分配给了设施备选点$j\in J$的情况下，车辆v才能同时经过需求点$i\in I$和设施备选点$j\in J$。公式(15)表示如果某设施备选点$j\in J$选择开设，那么必须有车辆为其提供服务。公式(16)、公式(17)为变量约束。

2　求解算法设计

2.1　机会约束处理

下层VRP模型包含机会约束，为了便于求解，拟对机会约束进行处理，将其转化为确定性约束[24]。根据 $\Pr\left(\sum_{i\in I}\sum_{k\in K_i} d_i z_{vik'}\leqslant C_v\right)>\alpha\ \ \forall v\in V$，可得到 $\Pr\left(\sum_{i\in I}\sum_{k\in K_i} d_i z_{vik'}\geqslant C_v\right)\leqslant 1-\alpha\ \ \forall v\in V$，表示车辆可以提供的运输能力不满足车辆实际运输量的概率要控制在$1-\alpha$及以下。根据分布函数定义有 $\Pr\left(\sum_{i\in I}\sum_{k\in K_i} d_i z_{vik'}\geqslant C_v\right)=F_v\left(\sum_{i\in I}\sum_{k\in K_i} d_i z_{vik'}\right)\ \ \forall v\in V$，其中$F_v(\bullet)$表示$C_v$的分布函数。本研究假设车辆运输能力的分布函数已知，服从正态分布，因此，根据文献的方法[24]，机会约束可以转化如下。

$$\sum_{i\in I}\sum_{k\in K_i} d_i z_{vik'}\leqslant F_v^{-1}(1-\alpha) \tag{18}$$

通过用公式(18)代替原来的机会约束(10)，得到确定性的混合整数规划模型。公式(18)更加容易理解，车辆在服务节点的时候，在储备点的装载量需要满足上面的随机条件，而不是简单地以车辆额定运输能力为依据进行考虑。

2.2　求解VRP的蚁群算法设计

拟采用序贯型方法对提出的双层规划模型进行求解，通过分析模型发现，上层为LAP问题，较为容易求解，可以借助数学软件求解；下层为VRP问题，求解较为困难，拟采用蚁群算法求解下层车辆路径模型。蚁群算法流程如图2所示。

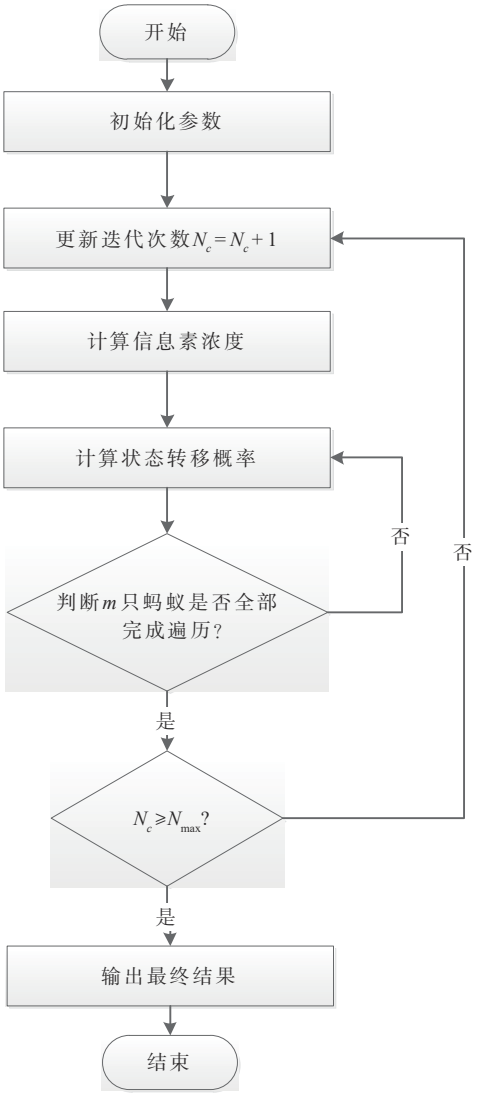


图2　蚁群算法流程

Fig.2　Flowchart of ant colony algorithm

设计的蚁群算法步骤如下。

步骤1：初始化参数[25−27]。设蚂蚁总数为m，信息素浓度指数α，启发因子指数β，初始信息素挥发系数ρ_0，初始循环次数$N_c=0$，最大循环次数N_{max}，初始信息素浓度$\tau_{ij}(0)=0$，$\forall(i,j)$，信息素增量$\Delta\tau_{ij}(0)=0$，$\forall(i,j)$，初始禁忌表$tabu$设为空。

步骤2：更新迭代次数。$N_c=N_c+1$，转下一步。

步骤3：计算信息素浓度。上一代m只蚂蚁遍历所有需求点以及回到储备点后需要更新信息素，按照公式⑲和公式⑳进行计算。

$$\tau_{ij}(N_c)=\tau_{ij}(N_c-1)\times(1-\rho_c)+\Delta\tau_{ij}(N_c-1) \tag{19}$$

$$\Delta\tau_{ij}(N_c-1)=\sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^{k}(N_c-1) \tag{20}$$

式中：$\tau_{ij}(N_c)$为第N_c代路段(i,j)的信息素浓度；ρ_c为当前信息素挥发系数，按照$\rho_c=\rho_0\left(1-e^{\frac{N_c-N_{\max}}{N_{\max}}}\right)$计算[26]；$\Delta\tau_{ij}(N_c-1)$为第$N_c-1$代所有蚂蚁觅食结束后路段$(i,j)$上的新增信息素含量总量；$\Delta\tau_{ij}^{k}(N_c-1)$为第$N_c-1$代中蚂蚁$k$经过路段$(i,j)$留下的信息素含量，即信息素的增量，按照公式㉑进行计算。

$$\Delta\tau_{ij}^{k}(N_c-1)=\begin{cases}\dfrac{Q}{L_k(N_c-1)} & k\in(i,j)\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{21}$$

式中：$L_k(N_c-1)$表示第N_c-1代中蚂蚁k经过的路段总长度；Q为信息素增量常数。

从公式㉑容易看出，信息素增量与路径总长度成反比关系。

步骤4：计算状态转移概率。计算选择下一个要遍历的节点，可能为需求点或储备点。首先，确定本代蚂蚁k下一个可以选择的节点集合$M_i^k(N_c)$。具体方法为：假设蚂蚁k当前位于节点i，与节点i连通的节点集合为K_i，根据当前蚂蚁k已经服务的节点集合，即禁忌表$tabu_i^k(N_c)$，从K_i中删除存在于$tabu_i^k(N_c)$的节点，得到本代节点集合$M_i^k(N_c)$。其次，根据选择概率公式㉒选择下一个要遍历的节点。

$$p_{ij}^{k}(N_c)=\begin{cases}\dfrac{\left[\tau_{ij}(N_c)\right]^{\alpha}\left[\eta_{ij}\right]^{\beta}}{\sum\limits_{s\in M_i^k(N_c)}\left[\tau_{is}(N_c)\right]^{\alpha}\left[\eta_{is}\right]^{\beta}} & j\in M_i^k(N_c)\\ 0 & j\notin M_i^k(N_c)\end{cases} \tag{22}$$

式中：$p_{ij}^{k}(N_c)$为当前迭代N_c中第k只蚂蚁从当前节点i到达下一节点j的概率函数；$\eta_{ij}(N_c)$为路段(i,j)上的启发函数，其取值为$\eta_{ij}=1/t_{ij}$；t_{ij}为路段(i,j)的通行时间。

之后更新禁忌表$tabu_i^k(N_c)$。

步骤5：判断当前迭代N_c中任意蚂蚁k是否已经遍历所有需求点以及是否回到出发储备点，即任意$tabu_i^k(N_c)$是否已经包含储备点和储备点覆盖的需求点，如果已经满足该条件，则转下一步；否则，转步骤4。

步骤6：终止条件判断。判断循环次数$N_c\geqslant N_{\max}$是否成立，若不成立转步骤2；否则，输出最终结果。

2.3　混合算法

根据问题特点，首先，将上层LAP问题模型目标函数变量的权重全部设为1，对上层LAP模型采用数学软件进行求解，将结果作为下层VRP模型的输入。对于下层VRP模型，对每个上层模型选择的储备点及分配的需求，采用设计的蚁群算法求解，并将下层得到的结果作为上层的输入继续求解上层LAP模型，如此循环，直到最近3次的下层问题目标函数一致即可停止，得到最终结果。

3　算例分析

3.1　算例数据

为了验证提出的模型和算法的有效性和适用性，设计了含有8个设施备选点，40个需求点的应急物流网络如图3所示。

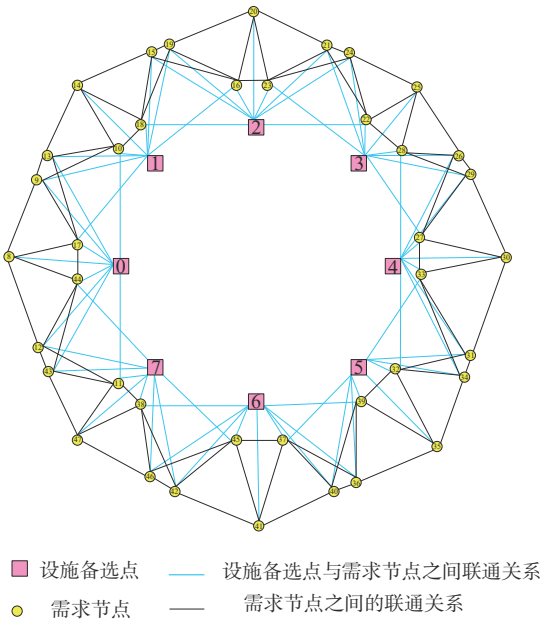


图3　应急物流网络

Fig.3　Emergency logistics network

假设可用车辆数量为10辆，每辆车的运输能力是随机变量，相互独立且均服从$\mu=950$，$\delta^2=100$的正态分布，令$\alpha=0.99$，车辆从节点$k\in K$到其邻接节点$l\in K$的运行时间t_{kl}由于数据量较大暂不赘述，模型中用到的其他数据，包括设施备选点储备能力、需求等，设施备选点储备能力如表4所示，需求如表5所示。

表4　设施备选点储备能力

Tab.4　Storage capacity of alternative facility sites

设施备选点	服务能力/件	设施备选点	服务能力/件
0	1 505	4	1 111
1	1 069	5	1 068
2	1 044	6	1 102
3	1 686	7	1 532

表5　需求

Tab.5　Demands

需求点	需求量/件	需求点	需求量/件	需求点	需求量/件	需求点	需求量/件
8	111	18	100	28	115	38	100
9	100	19	102	29	110	39	101
10	106	20	114	30	113	40	101
11	102	21	107	31	110	41	104
12	117	22	117	32	116	42	117
13	107	23	107	33	102	43	105
14	112	24	106	34	117	44	112
15	104	25	111	35	103	45	115
16	104	26	104	36	120	46	108
17	119	27	117	37	120	47	102

3.2　计算结果

为了验证算法的有效性，以算例应急物流网络为基础，随机生成连通关系、通行时间、需求，其他数据不变。采用 Visual Studio 2010 编程，在 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7—1165G72.80 GHz CPU 和 16.00 GB 内存的计算机上运行提出的混合算法，经过 50 次运行测试，平均迭代时间小于 10 min，算法即达到收敛，算法测试结果如图 4 所示。为了分析算法的效率，下层车辆路径模型也使用 ILOG Cplex 求解随机约束转化为确定约束后的模型，采用前面生成的 50 次数据，经过测试，ILOG Cplex 在 10 min 内甚至无法得到可行解。

为了进一步验证算法的普遍适用性和求解效率，采用计算机随机生成不同规模的算例。其中，设施备选点数量、需求点数量以及可用车辆数量由人为设定，车辆额定运输能力统一设定为 1 000 单位。备选点供给能力、需求点需求量等由计算机按照一定规则随机生成。为了有效分析算法，对每种规模的算例运行 10 次，算法达到收敛的时间取 10 次的平均值，并且取整。通

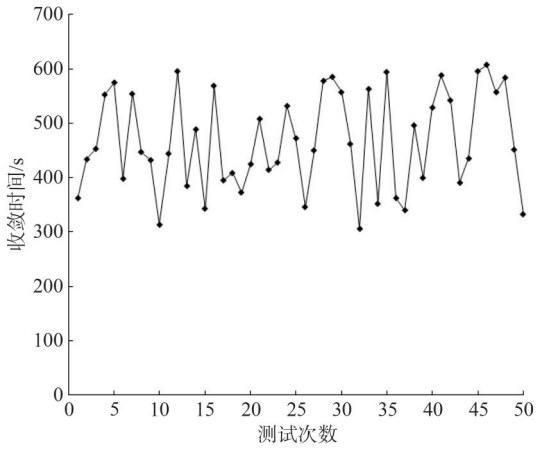


图4　算法测试结果

Fig.4　Algorithm test results

过分析不同规模算例达到收敛的时间，可以发现提出的算法均能在较合理的时间内收敛，算法的适应性和求解效率都较好。此外，通过对收敛时间进行分析还可得到，算法收敛时间大体上与问题规模成线性正比关系，并且随着问题规模的不断增加，算法收敛时间增速减缓，进一步验证了提出的算法的有效性。为了进一步分析蚁群算法求解效率，采用遗传算法对同等规模的数据分别测试，对每种规模的算例也是运行 10 次，算法达到收敛的时间取 10 次的平均值，并且取整，不同规模算例的算法分析如表 6 所示。与遗传算法相比，蚁群算法的求解效率平均提升了 24.59%。

表6　不同规模算例的算法分析

Tab.6　Algorithm analysis for examples of different scales

序号	设施备选点数量/个	需求点数量/个	车辆数量/辆	蚁群算法收敛时间/s	遗传算法收敛时间/s
1	1	10	15	38	36
2	2	10	15	47	56
3	3	15	15	93	113
4	4	20	15	152	186
5	5	25	15	213	261
6	6	30	15	279	342
7	7	35	15	327	410
8	8	40	15	367	463
9	9	45	15	405	536
10	10	50	15	442	585
11	11	55	15	479	656
12	12	60	15	517	719

通过对测试数据的统计分析和参考文献[24－26]，建议算法的参数设置为：蚂蚁总数为$m=20$，信息素浓度指数$\alpha=1.2$，启发因子指数$\beta=1$，初始信息素挥发系数$\rho_0=2$，最大循环次数$N_{max}=50$，初始信息素浓度$\tau_{ij}(0)=0$，$\forall(i,j)$，信息素增量$\Delta\tau_{ij}(0)=0$，$\forall(i,j)$，信息素增量常数$Q=100$，初始禁忌表$tabu$设为空。

采用前面构建的数学模型和设计的算法，对算例进行求解得到计算结果如图5所示，图中不同颜色线条代表不同的车辆。根据结果，所有需求点均被覆盖，总共用到7辆车，共有7个设施备选点被选择，目标函数值为85.76 h。

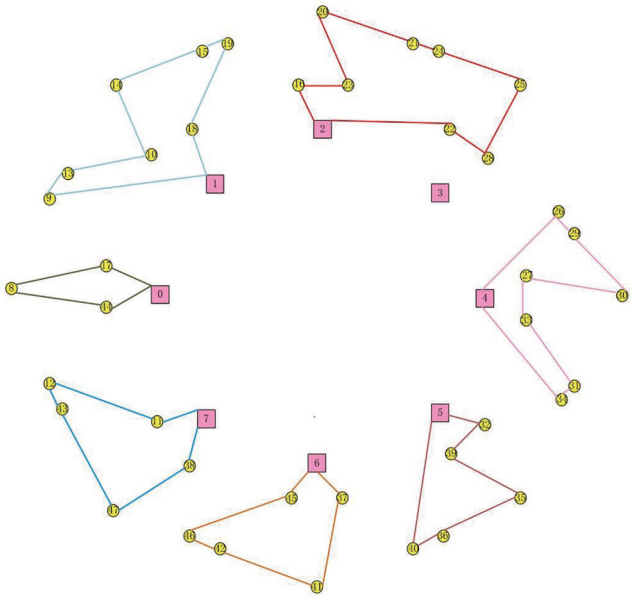


图5　计算结果

Fig.5　Calculation results

为了进一步分析结果，对车辆行驶路径、车辆到达节点的时间及车辆服务的节点需求数量等进行统计分析，得到车辆服务的节点及周转时间如表7所示。其中，第1列对应的是运营车辆；第2列表示车辆行驶路径；第3列表示车辆到达节点时间，是在假设车辆从设施备选点出发的时间为0进行统计的结果；第4列对应车辆行驶路径上服务的节点需求数量。通过分析表7，能够较为清晰地得到各个节点被服务的时间。从表中还可以得到，车辆在节点之间平均运行时间在2 h左右。在所有节点当中，最先被服务的节点时间为1.22 h，最后被服务的节点时间为13.82 h，所有节点被服务时间的平均值为6.45 h，运营车辆平均周转时间为12.25 h。

表7　车辆服务的节点及周转时间

Tab.7　Vehicle service nodes and turnaround time

车辆	车辆行驶路径	车辆到达节点所用时间/h	车辆服务的节点需求量/件
0	0—17—8—44—0	0—1.22—3.41—5.6—6.82	119，111，112
1	1—9—13—10—14—15—19—18—1	0—3.49—4.09—6.15—8.32—10.77—11.38—13.82—15.06	100，107，106，112，104，102，100
2	2—16—23—20—21—24—25—28—22—2	0—1.22—2.34—4.53—6.98—7.59—10.03—12.2—13.33—16.53	104，107，114，107，106，111，115，117
3	4—26—29—30—27—33—31—34—4	0—3.47—4.08—6.53—8.72—9.84—11.91—12.52—15.99	104，110，113，117，102，110，117
4	5—32—39—35—36—40—5	0—1.24—2.37—4.54—6.99—7.6—11.08	116，101，103，120，101
5	6—37—41—42—46—45—6	0—1.22—3.41—5.86—6.47—8.91—10.13	120，104，117，108，115
6	7—38—47—43—12—11—7	0—1.24—3.41—5.86—6.46—8.91—10.15	100，102，105，117，102

4　结束语

基于应急物流的紧迫性，考虑车辆运输能力的随机性，构建应急物流选址-分配-路径双层规划模型，采用混合蚁群算法进行求解，结果表明构建的数学模型和设计的算法能够较好地处理应急物流的LARP问题。考虑到应急物流管理的复杂性，后续研究可以面向特定突发事件下的应急物流组织问题，将突发事件进行详细分类如地震下应急物流等；或针对突发事件发生后受灾地区需求量处理，运用鲁棒优化等方法模拟需求不确定等；亦可在应急物流系统添加柔性网络设计，分析应急物流网络系统短期社会效益与长期社会效益。

参考文献：

[1] KUNDU T，SHEU J B，KUO H T. Emergency Logistics Management：Review and Propositions for Future Research[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2022，164：102789.

[2] 郭鹏辉，朱建军，王嚣华.考虑“安全-时间”的自然灾害多地点应急救援路线优化[J].系统工程，2018，36(6)：62-70.
GUO Penghui，ZHU Jianjun，WANG Hehua. Multi-Location

Emergency Rescue Route Optimization under the Condition of Natural Disaster Considering Safety and Time Cost[J]. Systems Engineering，2018，36(6)：62-70.

[3] 郭鹏辉，朱建军，王嵩华.考虑异质物资合车运输的灾后救援选址-路径-配给优化[J].系统工程理论与实践，2019，39(9)：2345-2360.
GUO Penghui，ZHU Jianjun，WANG Hehua. Location-Routing-Allocation Problem with Consolidated Shipping of Heterogeneous Relief Supplies in Post-Disaster Rescue[J]. Systems Engineering-Theory & Practice，2019，39(9)：2345-2360.

[4] 范厚明，刘鹏程，刘　浩，等.多中心联合配送模式下集货需求随机的VRPSDP问题[J].自动化学报，2021，47(7)：1646-1660.
FAN Houming，LIU Pengcheng，LIU Hao，et al.The Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deterministic Delivery and Stochastic Pickup Based on Joint Distribution[J]. Acta Automatica Sinica，2021，47(7)：1646-1660.

[5] 范厚明，刘鹏程，吴嘉鑫，等.集货需求随机的同时配集货VRP及混合变邻域搜索算法[J].系统工程理论与实践，2019，39(10)：2646-2659.
FAN Houming，LIU Pengcheng，WU Jiaxin，et al.Hybrid Genetic Algorithm with Variable Neighborhood Descent for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Stochastic Pickup and Deterministic Delivery[J].Systems Engineering—Theory & Practice，2019，39(10)：2646-2659.

[6] 张聆晔，吕　靖.风险不确定的海上应急物资储备库选址[J].中国安全科学学报，2019，29(9)：173-180.
ZHANG Lingye，LYU Jing. Location of Maritime Emergency Supplies Repertories Considering Risk Uncertainty[J]. China Safety Science Journal，2019，29(9)：173-180.

[7] 刘　明，李颖祖，曹　杰，等.突发疫情环境下基于服务水平的应急物流网络优化设计[J].中国管理科学，2020，28(3)：11-20.
LIU Ming，LI Yingzu，CAO Jie，et al. An Optimal Design of Emergency Logistics Network for Epidemic Controlling Based on Service Level[J].Chinese Journal of Management Science，2020，28(3)：11-20.

[8] 赖志柱，王　铮，戈冬梅，等.多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型[J].运筹与管理，2020，29(5)：74-83.
LAI Zhizhu，WANG Zheng，GE Dongmei，et al. A Multi-Objective Robust Optimization Model for Emergency Logistics Center Location[J]. Operations Research and Management Science，2020，29(5)：74-83.

[9] 周愉峰，陈　娜，李　志，等.考虑设施中断情景的震后救援初期应急物流网络优化设计[J].运筹与管理，2020，29(6)：107-112.
ZHOU Yufeng，CHEN Na，LI Zhi，et al.Optimization Design of Emergency Logistics Network Considering Facility Disruption Scenarios during the Early Stage of Post-Earthquake Relief[J]. Operations Research and Management Science，2020，29(6)：107-112.

[10] 张得志，乔　馨，肖博文，等.基于低碳与随机需求的多目标车辆路径优化[J].铁道科学与工程学报，2021，18(8)：2165-2174.
ZHANG Dezhi，QIAO Xin，XIAO Bowen，et al.Multi-Objective Vehicle Routing Optimization Based on Low Carbon Perspective and Random Demand[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(8)：2165-2174.

[11] 陈治亚，高　辉，徐光明，等.考虑随机需求和硬时间窗的多目标车辆路径优化方法[J].铁道科学与工程学报，2021，18(12)：3110-3120.
CHEN Zhiya，GAO Hui，XU Guangming，et al.A Multi-Objective Vehicle Routing Optimization Method Based on Stochastic Demand and Hard Time Window[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(12)：3110-3120.

[12] 曲冲冲，王　晶，何明珂.京津冀协同应对自然灾害应急资源配置优化研究[J].运筹与管理，2021，30(1)：36-42.
QU Chongchong，WANG Jing，HE Mingke.Research on Resource Allocation Optimization of Synergetic Development in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Operations Research and Management Science，2021，30(1)：36-42.

[13] 周开军，刘　婷，周鲜成，等.考虑随机需求的带时间窗绿色车辆路径模型及优化算法研究[J].系统科学与数学，2023，43(10)：2557-2572.
ZHOU Kaijun，LIU Ting，ZHOU Xiancheng，et al.Research on Green Vehicle Routing Model and Its Algorithm Optimization with Time Windows and Stochastic Demands[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences，2023，43(10)：2557-2572.

[14] CHEN J，CHEN L，SUN D.Air Traffic Flow Management under Uncertainty Using Chance-Constrained Optimization[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2017，102：124-141.

[15] NOORIZADEGAN M，CHEN B.Vehicle Routing with Probabilistic Capacity Constraints[J].European Journal of Operational Research，2018，270(2)：544-555.

[16] TASOUJI HASSANPOUR S，KE G Y，ZHAO J H，et al. Infectious Waste Management during a Pandemic：A Stochastic Location-Routing Problem with Chance-Constrained Time Windows[J].Computers & Industrial Engineering，2023，177：109066.

[17] AGHALARI A，SALAMAH D E，MARINO C，et al.Electric Vehicles Fast Charger Location-Routing Problem under Ambient Temperature[J]. Annals of Operations Research，2023，324(1)：721-759.

[18] SOTO-MENDOZA V，RUIZ-Y-RUIZ E，GARCÍA-CALVILLO I，et al. A Location-Routing Problem for Local Supply Chains[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，183：109528.

[19] ZHANG J H，LONG D Z，LI Y C.A Reliable Emergency Logistics Network for COVID-19 Considering the Uncertain Time-Varying Demands[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2023，172：103087.

[20] POURMOHAMMADI P，TAVAKKOLI-MOGHADDAM R，RAHIMI Y，et al.Solving a Hub Location-Routing Problem with a Queue System under Social Responsibility by a Fuzzy Meta-Heuristic

Algorithm[J].Annals of Operations Research，2023，324(1)：1099-1128.

[21] LAGOS F，KLAPP M A，TORIELLO A. Branch-and-Price for Routing with Probabilistic Customers[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，183：109429.

[22] DOMÍNGUEZ-MARTÍN B，HERNÁNDEZ-PÉREZ H，RIERA-LEDESMA J，et al. A Branch-and-Cut Algorithm for the One-Commodity Pickup and Delivery Location Routing Problem[J]. Computers & Operations Research，2024，161：106426.

[23] AHMADI-JAVID A，SEDDIGHI A H.A Location-Routing Problem with Disruption Risk[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2013，53：63-82.

[24] WALLER S T，ZILIASKOPOULOS A K. Stochastic Dynamic Network Design Problem[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2001，1771(1)：106-113.

[25] 刘紫玉，赵丽霞，薛建越，等.面向车辆路径问题的改进蚁群算法研究[J].河北科技大学学报，2022，43(1)：80-89.
LIU Ziyu，ZHAO Lixia，XUE Jianyue，et al.Research on Vehicle Routing Problem Based on Improved Ant Colony Algorithm[J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2022，43(1)：80-89.

[26] 周　京.基于改进蚁群算法的船舶路径规划及跟踪控制[D].大连：大连海事大学，2021.

[27] 祝环宇.基于改进蚁群算法的船舶路径规划[D].大连：大连海事大学，2020.

（责任编辑：刘宁馨）

Emergency Logistics Location-Allocation-Routing Optimization with Stochastic Vehicle Transport Capacity

JIN Guowei[1,2]，REN Weiquan[1,3]，WANG Wenjie[4]，YAN Ming[1,2]，CHEN Xi[1,2]，ZHAO Yinan[1,2]

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Traffic Safety and Control, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 3. Wuhai Depot of China Railway Hohhot Group Co., Ltd., Wuhai 016000, Hubei, China; 4. Multimodal Transport Department, China Railway Express Co., LTD, Beijing 100055, China)

Abstract: To address the emergency logistics location-allocation-routing optimization problem (LARP) with stochastic vehicle transport capacity, this study considered constraints such as the service capacity of alternative facility sites, demand coverage, and the randomness of vehicle transport capacity. With the objectives of minimizing total service time and total vehicle transport time, a bi-level programming model was formed that included chance constraints for vehicle transport capacity. The upper-level model, focusing on the location-allocation problem, was solved using mathematical software, while the lower-level model, focusing on the vehicle-routing problem was addressed with the ant colony algorithm. After tests, the proposed hybrid algorithm could effectively solve the LARP. Finally, numerical examples were designed to validate the proposed mathematical model and solution method. The results indicate that the model considering the randomness of vehicle transport capacity is more in line with actual conditions and can better meet the needs of emergency logistics.

Keywords: Logistics Engineering; Location-Routing Planning; Ant Colony Algorithm; Emergency Logistics; Chance Constraint