

同时取送货的双层级选址路径问题建模与 樽海鞘算法求解研究

张文妹, 张惠珍, 海舍舍

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在双层级物流网络中, 为了同时满足每个客户取货和送货需求, 建立了一个以最小化配送中心选址成本、车辆启用成本以及运输成本为目标的混合整数规划模型。针对该模型的具体特征, 设计了一种改进的樽海鞘优化算法进行求解, 采用贪心聚类算法生成初始解, 并引入自适应权重策略、调整食物源数量策略、精英保留策略和多种搜索算子。通过测试不同客户规模的算例对构建的模型及算法进行验证, 并使用原始樽海鞘算法、遗传算法、免疫算法、灰狼优化算法以及鲸鱼优化算法进行求解, 对比分析各算法的运行结果, 验证了构建模型的可行性和改进算法的有效性。

关键词: 选址路径问题; 双层级; 同时取送货; 改进樽海鞘算法

中图分类号: F 224.3 文献标志码: A

Salp swarm algorithm for solving the two-echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery

ZHANG Wenmei, ZHANG Huizhen, HAI Sheshe

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In a two-echelon logistics network, to simultaneously meet the pickup and delivery requirements of each customer, a mixed integer programming model was established to minimize the costs associated with distribution center location, vehicle activation and vehicle transportation. An improved salp swarm algorithm was designed based on the specific characteristics of the model to solve this problem. The greedy clustering algorithm was employed to generate the initial solutions. An adaptive weighting strategy, adjusting food source quantity strategy, elite retention strategy and various

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72101149); 2023 年度国家外国专家项目(G2023013029)

第一作者: 张文妹(1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 智能优化。E-mail: zhangpei0704@163.com

通信作者: 张惠珍(1979—), 女, 教授。研究方向: 运筹学及智能优化。E-mail: zhzyyz@163.com

引文格式: 张文妹, 张惠珍, 海舍舍. 同时取送货的双层级选址路径问题建模与樽海鞘算法求解研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(3): 345-356.

Citation: ZHANG Wenmei, ZHANG Huizhen, HAI Sheshe. Salp swarm algorithm for solving the two-echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(3): 345-356.

search operators were introduced. The constructed model and algorithm were verified through testing instances of different customer sizes, and the original salp swarm algorithm, genetic algorithm, immune algorithm, grey wolf optimizer, and whale optimization algorithm were used for solving the problem. A comparative analysis of the operation results of each algorithm verified the feasibility of the constructed model and the effectiveness of the improved algorithm.

Keywords: *location routing problem; two-echelon; simultaneous pickup and delivery; improved salp swarm algorithm*

选址路径问题 (location routing problem, LRP) 是交通运输以及运筹优化领域的重要研究内容之一,需同时考虑两方面的决策问题:设施选址问题 (facility location problem, FLP) 和车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP)^[1]。随着互联网的发展以及全球经济一体化的深入推进,企业物流运作范围日益扩大,物流系统亦呈现出多层级的演进态势。因此,众多学者在标准选址路径问题的基础上提出构建双层级选址路径问题 (two-echelon location routing problem, 2E-LRP), 双层级物流网络设计逐渐成为研究热点,对现代物流行业的发展具有重要意义。

20 世纪 80 年代, Jacobsen 等^[2]第一次正式提出 2E-LRP, 此后, 众多学者对双层级选址路径问题进行了模型优化及拓展。Cuda 等^[3]对双层级选址路径问题、双层级车辆路径问题以及多车型路径规划问题中的相关文献进行介绍和调查, 得出城市物流和多式联运系统是双层级物流网络中较为关注的研究内容。Pichka 等^[4]将第三方物流企业纳入供应链配送系统, 提出了开放式的双层级选址路径问题 (two-echelon open location routing problem, 2E-OLRP), 从而增强了 2E-LRP 问题的现实意义。Nikbakhsh 等^[5]考虑物流企业服务客户满意度的因素, 以最小化成本为目标建立了带时间窗的双层级选址路径问题 (two-echelon location routing problem with time window, 2E-LRPTW) 模型。除上述研究, 关于 2E-LRP 的变体及扩展还包括: 多资源的和多产品的 2E-LRP (2E-LRP with multisources and multiproducts)^[6]、绿色低碳的 2E-LRP (low carbon two-echelon location routing problem, LC2E-LRP)^[7]等。

实际交易时, 客户除了送货需求外, 往往还存在取货需求, 标准的 LRP 仅能满足客户的送货需求而无法满足不同客户的取货需求, 这导致 LRP 模

型已经不再符合当今物流行业的实际情况。因此, 研究者们提出了同时取送货的选址路径问题 (location routing problem with simultaneous pickup and delivery, LRPSPD)。LRPSPD 是 LRP 的拓展, 由物流企业为应对客户需求变化演变而来。针对 LRPSPD, 国内外学者展开了广泛而深入的研究。Wang^[8]通过采用贪心算法生成初始解并改进原始免疫操作, 提出了一种混合免疫优化算法进行求解。刘冬等^[9]考虑了车辆完成服务后不返回仓库的情况, 并改进蘑菇算法求解开放式的 LRPSPD 模型。Huang^[10]考虑了客户的随机性需求与确定性需求, 提出了一种根据设施选择、客户分配和车辆路线三阶段设计的禁忌搜索算法。Nadizadeh 等^[11]针对客户取货及送货需求不确定的情况, 设计了一种贪心聚类算法求解需求模糊的 LRPSPD 模型。

本文研究的同时取送货的双层级选址路径问题 (two-echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery, 2E-LRPSPD) 是 2E-LRP 与 LRPSPD 的结合, 能够有效优化物流网络效率并满足客户的两种需求。针对 2E-LRPSPD, 众多学者对模型和算法进行了多角度的探索。Kusuma 等^[12]采用 CPLEX 软件求解中小型客户规模算例。Yildiz 等^[13]设计了一种基于分支和切割思想的精确算法。Fan 等^[14]提出了一种由路径链接算法和可变邻域下降算法组成的混合启发式算法。Du 等^[15]设计了一种评估客户服务满意度的函数, 采用非支配排序遗传算法来求解带时间窗的 2E-LRPSPD 模型。

目前, 大多数文献中的 2E-LRPSPD 模型通常假设开放的配送中心和每个客户仅由一辆车提供服务。考虑到开放的配送中心其取送货总需求可能大于所派遣车辆的容量, 以及客户的取送货需求往往小于所派遣车辆容量的情况, 本文提出开

放的配送中心可由多辆车提供服务, 以及每个客户仅由一辆车提供服务的假设, 并且每条路径上的总取货量和总送货量不超过车辆容量限制。

2E-LRP 属于 NP-Hard 问题^[3], 精确算法在求解较大规模算例时的时间复杂度较高, 很难求出最优解。启发式算法具有适用范围广、求解速度快等优点, 能够在较短的时间内求出最优解或是近似最优解, 逐渐成为求解选址路径问题的主流算法。樽海鞘算法 (salp swarm algorithm, SSA) 是一种新兴群智能优化算法, 受海洋生物樽海鞘群觅食行为启发而形成, 由 Mirjalili 等^[16] 于 2017 年提出, 具有操作灵活以及参数设置少等特点。本文针对构建的 2E-LRPSPD 模型特性, 设计了一种改进的樽海鞘优化算法 (improved salp swarm algorithm, ISSA) 来进行求解。

1 2E-LRPSPD

1.1 问题描述与假设

2E-LRPSPD 是现代物流管理的研究重点, 对于规划最优设施布局和优化配送路径具有重要的意义。本文构建的双层级物流网络主要包括仓库、配送中心、客户、第一阶段车辆以及第二阶段车辆。其中: 仓库通常位于远离客户的地方, 仓库无容量限制约束; 配送中心位于靠近客户的地方, 具有容量限制约束; 第一阶段车辆相比较第二阶段车辆具有较大的车辆载重容量。整个物流网络可以描述为: 第一阶段车辆从仓库出发, 访问开放的配送中心并完成其配送任务后再返回仓库; 第二阶段车辆从开放的配送中心驶出, 服务该配送中心所属的客户, 满足取送货需求后返回配送中心。2E-LRPSPD 用以解决配送中心选址、客户分配以及第一阶段和第二阶段车辆路径规划的问题。

本文研究的 2E-LRPSPD 考虑如下假设: (a) 物流网络中的仓库、配送中心以及客户的节点位置已知, 配送中心容量、第一阶段和第二阶段车辆的容量限制已知; (b) 第一阶段车辆从仓库出发且完成服务后回到仓库, 配送中心可由多辆车提供服务; (c) 第二阶段车辆只会从开放的配送中心出发且完成服务后回到配送中心, 每个客户只能由一辆车提供服务, 并且每个客户只能被服务一次; (d) 第二阶段车辆所服务的客户, 其取货需求与送货需求均不得超过其车辆容量限制, 且车辆

在配送过程中的载重不得超过其容量限制; (e) 每一个客户由一个配送中心进行配送, 且该配送中心需满足所分配客户的总需求。

1.2 参数与变量

表 1 和表 2 对构建数学模型所需要的参数和决策变量进行了具体描述及解释。

表 1 参数设置及符号解释
Tab.1 Parameter settings and explanations

参数	符号解释
I	仓库点集合, $I = \{0\}$
D	配送中心候选设施点集合, $D = \{1, 2, 3, \dots, d\}$
C	客户需求点集合, $C = \{1, 2, 3, \dots, c\}$
K	第一阶段车辆集合, $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$
V	第二阶段车辆集合, $V = \{1, 2, 3, \dots, v\}$
L_{ij}	节点 i 到节点 j 的距离, $i, j \in I \cup D \cup C$
fc_k	第一阶段车辆 k 启用的固定成本, $k \in K$
fc_v	第二阶段车辆 v 启用的固定成本, $v \in V$
f_k	第一阶段车辆 k 每公里的行驶成本, $k \in K$
f_v	第二阶段车辆 v 每公里的行驶成本, $v \in V$
F_d	配送中心 d 开放的固定成本, $d \in D$
W_k	第一阶段车辆 k 的最大载重, $k \in K$
W_v	第二阶段车辆 v 的最大载重, $v \in V$
W_d	候选配送中心 d 的最大容量, $d \in D$
Q_d	配送中心 d 的送货量, $d \in D$
P_d	配送中心 d 的取货量, $d \in D$
q_c	客户 c 的送货量, $c \in C$
p_c	客户 c 的取货量, $c \in C$
h_{idk}	第一阶段车辆 k 从节点 i 到节点 d 的载重, $i, d \in I \cup D, k \in K$
h_{dcv}	第二阶段车辆 v 从节点 d 到节点 c 的载重, $d, c \in D \cup C, v \in V$

表 2 决策变量设置及符号解释
Tab.2 Decision variable settings and explanations

决策变量	取值范围	符号解释
o_d	$\{0, 1\}$	配送中心 d 是否开放, $d \in D$
z_{dc}	$\{0, 1\}$	客户 c 是否由配送中心 d 服务, $d \in D, c \in C$
x_{idk}	$\{0, 1\}$	第一阶段车辆 k 是否访问节点 i 到节点 d , $i, d \in I \cup D$
y_{dcv}	$\{0, 1\}$	第二阶段车辆 v 是否访问节点 d 到节点 c , $d, c \in D \cup C$

1.3 数学模型

根据上述假设条件以及参数和决策变量的设定, 本文构建的 2E-LRPSPD 模型描述如下:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{d \in D} o_d F_d + \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} f c_k x_{0dk} + \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} f c_v y_{dcv} + \\ & \sum_{i \in I \cup D} \sum_{d \in I \cup D} \sum_{k \in K} x_{idk} L_{id} f_k + \\ & \sum_{d \in D \cup C} \sum_{c \in D \cup C} \sum_{v \in V} y_{dcv} L_{dc} f_v \end{aligned} \quad (1)$$

第一阶段约束条件为

$$\sum_{i \in I \cup D} x_{idk} \leq 1, d \in D, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I \cup D} x_{idk} - \sum_{s \in I \cup D} x_{dsk} = 0, d \in I \cup D, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{d \in D} x_{idk} P_d \leq W_k, i \in I \cup D, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} x_{idk} Q_d \leq W_k, i \in I \cup D, k \in K \quad (5)$$

$$h_{dik} \geq (h_{idk} - Q_d + P_d) x_{idk}, i \in I \cup D, d \in I \cup D, k \in K \quad (6)$$

$$0 \leq h_{idk} \leq W_k x_{idk}, i, d \in I \cup D, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{d \in D} x_{idk} \leq |D| - 1, k \in K \quad (8)$$

$$P_d = \sum_{c \in C} p_c z_{dc} o_d, d \in D \quad (9)$$

$$Q_d = \sum_{c \in C} q_c z_{dc} o_d, d \in D \quad (10)$$

第二阶段约束条件为

$$\sum_{d \in D \cup C} \sum_{v \in V} y_{dcv} = 1, c \in C \quad (11)$$

$$\sum_{d \in D \cup C} y_{dcv} - \sum_{u \in D \cup C} y_{cuv} = 0, c \in D \cup C, v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} y_{dcv} p_c \leq W_v, d \in D \cup C, v \in V \quad (13)$$

$$\sum_{c \in C} y_{dcv} q_c \leq W_v, d \in D \cup C, v \in V \quad (14)$$

$$h_{cdv} \geq (h_{dcv} - q_c + p_c) y_{dcv}, \\ d \in D \cup C, c \in D \cup C, v \in V \quad (15)$$

$$0 \leq h_{cdv} \leq W_v y_{dcv}, d, c \in D \cup C, v \in V \quad (16)$$

$$\max \left\{ \sum_{c \in C} q_c z_{dc}, \sum_{c \in C} p_c z_{dc} \right\} \leq W_d o_d, d \in D \quad (17)$$

$$\sum_{d \in C} \sum_{c \in C} y_{dcv} \leq |C| - 1, v \in V \quad (18)$$

$$\sum_{d \in D} z_{dc} = 1, c \in C \quad (19)$$

$$x_{idk} \in \{0, 1\}, i, d \in I \cup D, k \in K \quad (20)$$

$$y_{dcv} \in \{0, 1\}, d, c \in D \cup C, v \in V \quad (21)$$

$$o_d \in \{0, 1\}, d \in D \quad (22)$$

$$z_{dc} \in \{0, 1\}, d \in D, c \in C \quad (23)$$

目标函数式(1)表示最小化总成本,总成本包括配送中心建设成本、第一阶段和第二阶段车辆启用成本以及运输成本。约束条件式(2)表示第一阶段车辆只会访问开放的配送中心,且该车辆仅提供一次服务;式(3)确保第一阶段节点流量守恒;式(4)、(5)表示第一阶段车辆服务的配送中心取货和送货需求均不超过车辆最大载重限制;式(6)、(7)确保第一阶段车辆服务过程中的载重变化不超过车辆的最大载重限制;式(8)表示消除第一阶段子回路;式(9)、(10)表示配送中心的取货和送货量;式(11)表示每个客户有且仅有一辆车服务;式(12)确保第二阶段节点流量守恒;式(13)、(14)表示第二阶段车辆服务的客户取货和送货需求均不超过车辆的最大载重限制;式(15)、(16)确保第二阶段车辆服务过程中的载重变化不超过车辆的最大载重限制;式(17)确保每个开放的配送中心其容量能够满足所服务客户的总需求;式(18)表示消除第二阶段子回路;式(19)确保每个客户由一个配送中心服务;式(20)~(23)表示决策变量取值范围。

2 求解 2E-LRPSPD 的 ISSA

SSA 是受到海洋动物樽海鞘群觅食行为启发而提出的群智能优化算法。樽海鞘群以一种链式行为进行移动和觅食,其樽海鞘链前端为领导者,并指引后端追随者的移动,且追随者仅受前方紧邻个体的引导。因此,SSA 具有较强的全局开发和局部探索能力。SSA 最初主要用于求解连续性问题,随着国内外学者研究的不断深入,将此算法的应用场景从连续性问题扩展至离散性问题。本文提出的 ISSA 在 SSA 的基础上通过增加食物源数量,动态调整樽海鞘链中领导者与追随者的占比,采用贪心聚类算法生成初始种群,并结合顺序交叉算子、两点交换算子、单点插入算子和变异算子以提高种群多样性。

2.1 编码方式

ISSA 采用自然数编码,编码长度由车辆启用

数和客户数决定, 为非定长的自然数数组, 用以表示配送中心建设方案以及第二阶段车辆行驶路线方案。一个解数组主要包括 m 个配送中心和 n 个客户。假设 n 个客户的编号为 $1, 2, 3, \dots, n$, m 个配送中心的编号为 $n+1, n+2, n+3, \dots, n+m$, 则解数组可以表示为 1 至 $n+m$ 排列组合的一系列数字。若某一配送中心的编号未出现, 则表示该配送中心不开放; 若某一配送中心编号后出现客户编号, 则表示对该配送中心开放, 该配送中心出现的次数为第二阶段车辆启用数量, 并按照该配送中心的客户编号顺序依次进行服务, 直至下一个配送中心编号出现。以图 1 所示的编码为例: 假设有 3 个候选配送中心, 12 个客户。客户编号为 $1 \sim 12$, 候选配送中心编号为 $13 \sim 15$ 。图 1 中的解

14	2	5	11	14	8	1	10	3	15	12	4	9	7	6
----	---	---	----	----	---	---	----	---	----	----	---	---	---	---

图 1 解的编码

Fig.1 Solution encoding

b. 从剩余客户中选择与已加入聚类客户距离最近的客户, 判断是否超过车辆容量限制, 若未超过则将该客户加入当前聚类, 否则不加入当前聚类。

c. 重复操作 b, 继续选择距上一个已聚类的客户最近的客户, 判断是否满足车辆容量限制, 直到超过当前聚类的容量。重复以上操作直到所有的客户被分配完成。

d. 计算每个聚类中心的坐标, $G(x_a, y_a)$ 用以表示聚类 a 的中心坐标, (x_c, y_c) 为客户 c 的坐标, n_a 为该聚类中的客户数量, 计算公式为

$$G(x_a, y_a) = \left(\frac{\sum_{c \in C} x_c}{n_a}, \frac{\sum_{c \in C} y_c}{n_a} \right) \quad (24)$$

e. 计算配送中心 d 到所有聚类中心的距离总和 U_d , A 表示聚类中心集合, 计算公式为

$$U_d = \sum_{a \in A} \sqrt{(x_d - x_a)^2 + (y_d - y_a)^2} \quad (25)$$

f. 计算配送中心的排序指标 H_d , 计算公式为

$$H_d = \frac{1}{U_d F_d} \quad (26)$$

g. 按照配送中心排序指标 H_d 将各聚类进行分配。将离它最近的聚类分配给排序第一的配送中心, 接着分配离它次近的聚类。重复此操作直至超过配送中心容量, 开启排序序列中下一个配送

可表示为配送中心 13 关闭, 而 14 和 15 开放; 从配送中心 14 出发有两条路线, 分别为 $14 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 11 \rightarrow 14$ 和 $14 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 10 \rightarrow 3 \rightarrow 14$; 从配送中心 15 出发有一条路线, 为 $15 \rightarrow 12 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 15$ 。

2.2 初始解

初始解的质量对于模型求解十分关键, 其优劣直接影响群智能优化算法的收敛速度和精度。本文采用贪心聚类算法, 根据第二阶段车辆的容量、客户的取送货需求以及客户之间的距离对客户进行聚类, 具体步骤如下:

a. 生成一个空聚类, 聚类的容量为第二阶段车辆的容量, 从客户集中随机选择一个客户加入该聚类, 并将该客户从客户集中剔除。

中心, 直到所有聚类都被分配给配送中心为止。

h. 根据上述步骤确定配送中心建设方案以及客户分配情况后, 采用最近邻思想 (nearest neighbour heuristic, NNH)^[14] 构造第一阶段车辆路径方案。

2.3 自适应权重策略

Mirjalili 等^[16] 提出的初始 SSA 算法中, 领导者数量 N_L 和追随者数量 N_F 在迭代过程中固定不变, 始终为种群总数的 50%。然而算法在优化过程初始阶段时, 领导者占种群总数比例较低, 导致全局搜索的性能较差, 从而导致局部最优的情况出现; 在优化过程的后期阶段, 追随者占种群总数比例较低, 导致局部搜索操作不充分, 容易造成算法精度下降。因此, 本文采用自适应权重策略动态调整领导者与追随者的占比。在迭代初期增加领导者的数量, 在迭代后期提高追随者的数量, 从而实现算法较强的全局搜索能力并提高算法精度, 避免陷入局部最优^[17]。领导者数量为 $N_L = rN$; 追随者数量为 $N_F = (1-r)N$ 。其中: N 为种群个体总数; 参数 r 为自适应权重因子, 计算公式如下所示:

$$r = r_0 - (r_0 - r_1) \tan \left(\pi \times \frac{t}{T} \times \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (27)$$

式中: r_0 、 r_1 分别为自适应权重因子的初始值和终值; ε 为非线性调节系数; t 为当前迭代次数; T 为

最大迭代次数。 r 的取值与迭代次数之间呈负相关关系,从而实现随着算法迭代次数的增加,领导者数量逐渐减少,以及追随者数量逐渐增加。

同时,基本SSA算法中,食物源个体一般为适应度值最佳的个体。为了避免出现局部最优的情况,本文增加了食物源的数量,分别为 F_{α} 、 F_{β} 、 F_{ω} 。这3个食物源个体为领导者群中适应度值排序前三的个体。

2.4 顺序交叉算子

顺序交叉(order crossover, OX)算子是一种有效的遗传算法算子,用于产生新的子代个体。OX算子具有一定的随机性,有利于提高算法的搜索能力。具体流程如下:

步骤1 从食物源和领导者中各选择一个个体,随机选择这两个个体的起止位置,记作位置

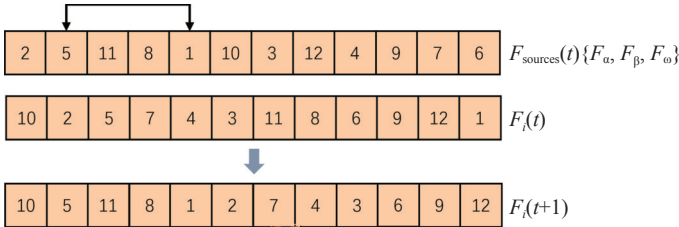


图2 顺序交叉算子示例
Fig.2 Example of order crossover operator

2.5 两点交换算子

两点交换(two-points exchange)算子即随机选择父代个体的两个位置,并将对应位置进行交换操作。为了避免出现不可行解的情况,在选择两点位置时需在客户点之间进行操作。具体流程如下:

步骤1 在父代染色体中随机设置两个随机交换点,记作位置a和位置b;

步骤2 交换位置a和位置b的编码信息从而生成新一代个体。

图3给出了两点交换算子的具体示例,假设父代个体被选择的位置为2和5,其对应的编码信息为5和1,交换位置2和位置5从而得到新的个体。

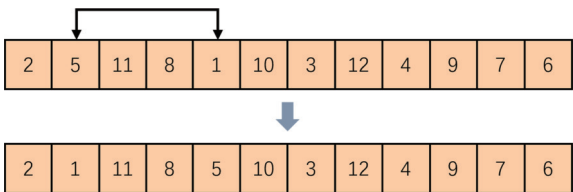


图3 两点交换算子示例
Fig.3 Example of two-points exchange operator

2.6 单点插入算子

单点插入(single-point mutation)算子即随机选

a和位置b(食物源和领导者个体被选择的位置相同);

步骤2 生成一个新的子代,将食物源个体中位置a到位置b的编码信息保留在子代相同位置处;

步骤3 找出领导者个体中除去位置a到位置b的编码信息的剩余信息,再将剩余编码信息按从左向右的顺序放入上一步生成的子代个体中。

图2给出了OX算子的具体示例,假设在第 t 次迭代中,被选择的食物源个体 $F_{sources}(t)$ 以及领导者个体 $F_i(t)$ 的位置为2和5,将 $F_{sources}(t)$ 个体位置在2和5之间的编码信息[5,11,8,1]保留到新个体 $F_i(t+1)$ 的相同位置,找出 $F_i(t)$ 的剩余信息[10,2,7,4,3,6,9,12],按照从左到右的顺序依次插入 $F_i(t+1)$ 的剩余位置当中,从而得到第 i 个个体更新后的编码信息。

择父代个体的两个位置,并将第一个位置的编码插入第二个位置的前方。具体流程如下:

步骤1 在父代染色体中随机设置两个随机交换点,记作位置a和位置b;

步骤2 将位置a的编码信息插入位置b前用于生成新个体。

图4给出了单点插入算子的具体示例,假设父代个体被选择的位置为2和5,其对应的编码信息为5和1,将编码5插入编码1前方,从而得到新的个体。

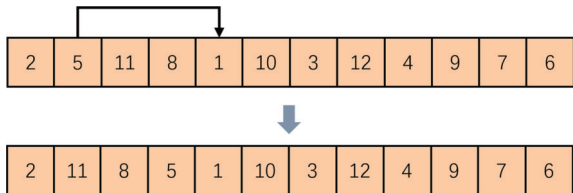


图4 单点插入算子示例
Fig.4 Example of single-point mutation operator

2.7 变异算子

为了提高算法全局搜索能力,同时很好地保留自身信息并且增强种群多样性,本文引入变异(swap mutation)算子。具体流程如下:

步骤 1 随机选中父代个体中的两个位置, 记为位置 a 和位置 b ;

步骤 2 将位置 a 和位置 b 之间的序列进行反向排序操作, 而原个体中位置 a 和位置 b 之外的编码信息固定不变。

图 5 给出了变异算子的具体示例, 假设父代个体被选择的位置为 2 和 5, 其对应的编码信息为 [5,11,8,1], 将其反向排序后得到 [1,8,11,5], 剩余位置保持不变, 从而得到新的个体。

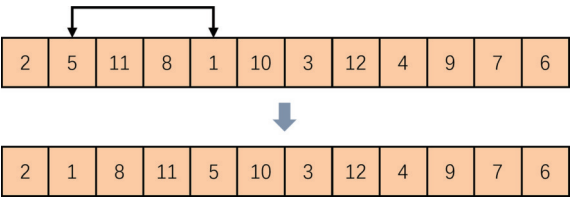


图 5 变异算子示例

Fig.5 Example of swap mutation operator

2.8 精英保留策略

在种群更新迭代过程中, 具有最优适应度值的个体为精英个体。精英保留策略即在每一代评估完所有个体的适应度后, 选择适应度最高的一

部分个体作为精英保留到下一代中。这部分个体的数量可以根据问题的复杂性和算法的需求来调整。同时, 种群中其余个体则通过交叉、变异等算子进行更新, 与精英个体一同构成下一代种群。精英保留策略是一种非常有效的进化计算策略, 避免种群迭代过程中丢失精英个体, 有助于提高算法的性能。

2.9 算法流程

根据本文设计的 2E-LRPSPD 模型特征, 对 SSA 进行改进, 图 6 给出了 ISSA 的流程图, 具体步骤描述如下:

步骤 1 初始化算法参数, 包括种群规模 N 、最大迭代次数 T 、非线性调节系数 ε 、自适应权重因子初值 r_0 与终值 r_1 ;

步骤 2 种群初始化, 采用贪心聚类算法生成初始种群个体;

步骤 3 计算个体适应度值并排序, 将位于前三的个体确定为食物源;

步骤 4 根据自适应权重因子 r 分配领导者与追随者, 根据种群适应度值排序, 位于前端的个体为领导者, 否则为追随者;

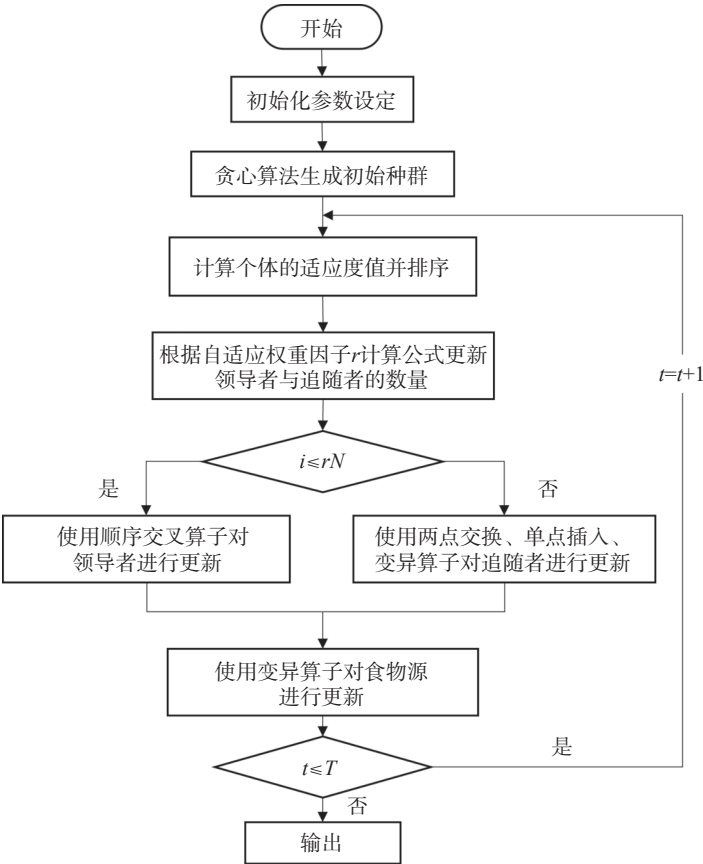


图 6 ISSA 流程图

Fig.6 Flow chart of ISSA

- 步骤5 根据2.4节更新策略对领导者进行更新;
- 步骤6 根据2.5至2.7节更新策略对追随者进行更新;
- 步骤7 根据2.7节更新策略对食物源进行更新。
- 步骤8 满足终止条件,达到最大迭代次数则输出最优解,否则返回步骤3。

3 算例分析

本文所有实验均使用 Matlab R2021b 编程实

现,在 Intel(R)Core(TM)i5-12500H 2.50 GHz、16 GB 内存、操作系统为 64 位 Window 11 的笔记本电脑上进行测试。

由于 2E-LRPSPD 没有标准算例,本文对 2E-LRP 标准算例中的 Prodhon 数据进行相应改进,采用 AM 分离法生成客户的取送货需求,即客户送货需求为算例中的原需求,取货需求由式 (28) 所示。本文 λ 取 0.2 和 0.8,生成两个不同类型的问题,称为 Z 型和 W 型算例^[18]。表 3 给出了标准算例库中 8 组算例的具体数据。

表 3 算例数据
Tab.3 Data of tested instances

算例	算例名称	需求点数量	设施点数量	第一阶段车辆容量	第一阶段车辆启用成本	第二阶段车辆容量	第二阶段车辆启用成本
1	Coord20-5-1-2e	20	5	210	5 000	70	1 000
2	Coord20-5-2-2e	20	5	210	5 000	70	1 000
3	Coord50-5-1-2e	50	5	630	5 000	70	1 000
4	Coord50-5-2-2e	50	5	525	5 000	70	1 000
5	Coord50-5-3-2e	50	5	630	5 000	70	1 000
6	Coord100-5-2-2e	100	5	1 260	5 000	70	1 000
7	Coord100-5-3-2e	100	5	1 260	5 000	70	1 000
8	Coord100-10-2-2e	100	10	840	5 000	70	1 000

$$p_c = \begin{cases} (1 + \lambda)q_c, & c \text{ 为奇数} \\ (1 - \lambda)q_c, & c \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (28)$$

3.1 参数设置

本文采用 ISSA 求解问题模型,为了得到优秀的参数组合,选取算例 3 作为测试数据。经过多次实验后,将最大迭代次数设置为 800。ISSA 的相关参数包括种群规模 N 、自适应权重因子初值 r_0 以及终值 r_1 。其中, N 取 $0.5n$ 、 n 、 $1.5n$ 、 $2n$ 、 $2.5n$ 、 $3n$ (n 为算例中需求点的数量), r_0 和 r_1 的取值如表 4 所示。在分析某个参数性能时,其他参数保持不变。将实验反复独立运行 20 次得到平均结果 (AVG)、最大结果 (MAX)、最小结果 (MIN) 以及平均运行时间 (TIME),实验结果如表 5、6 所示。根据表 5、6 统计的数据可以得到参数水平趋势图,如图 7 所示。由表 5 和图 7 可以看出: N 取值 100 时,Z 型算例均能取得较好的结果;W 型算例的平均结果和最大结果较好。种群规模过小会导致算法陷入局部最优,平均运行时间受到种群大小的影响并随种群规模的扩大而增加,综合考虑解的质量和运行时间,种群规模设置为 100。由表 6 和图 7 可得,两组算例均在参数组合 3 下获

得最佳的平均结果和最小结果,且不同组合的自适应因子取值对运行时间影响不大。综上所述,本文选取 $r_0=0.6$ 、 $r_1=0.4$ 作为实验标准。

表 4 参数设置
Tab.4 Parameters setting

参数	参数组合					
	1	2	3	4	5	6
r_0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
r_1	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

3.2 算例结果与分析

针对每组算例,本文对比分析原始樽海鞘算法求解 2E-LRPSPD 的运行结果。在其他条件保持不变的前提下,对上文给出的每组算例反复独立运行 20 次,将平均结果、最大结果、最小结果以及平均运行时间与本文提出的 ISSA 进行对比。SSA 由 Matlab 编写,运行环境参照上文,运行结果如表 7 所示。由表 7 可知,ISSA 的平均结果、最大结果、最小结果均优于 SSA 相应的运算结果,在求解时间上相比 SSA 略有增加,但仍在可

表 5 种群规模对解的影响

Tab.5 Influence of the popsize on the solutions

种群规模	Z型				W型			
	AVG	MAX	MIN	TIME/s	AVG	MAX	MIN	TIME/s
25	47960	48 161	47900	8	46 568	49068	39 336	8
50	47 525	48 067	39 438	15	44 192	48 944	39 301	15
75	47 521	48 040	39 371	22	43 703	48 185	39 300	22
100	46 639	47 952	39 274	28	43 214	48 034	38 430	29
125	46 650	47 973	39 315	36	44 153	48 982	39 301	36
150	47 089	47 997	39 370	43	44 926	48 083	38 343	43

表 6 自适应权重因子对解的影响

Tab.6 Influence of the adaptive weight factors on the solutions

参数组合	Z型				W型			
	AVG	MAX	MIN	TIME/s	AVG	MAX	MIN	TIME/s
1	47 508	48 003	39 357	29	44 535	48 090	39 246	30
2	47 076	47 979	39 319	29	43 734	48 926	39 252	29
3	46 172	47 980	38 243	29	42 778	48 137	38 240	29
4	46 639	47 952	39 274	28	43 214	48 034	38 430	29
5	47 089	48 023	39 371	28	46 432	48 979	39 335	28
6	47 523	48 003	39 380	28	47 292	48 971	39 184	28

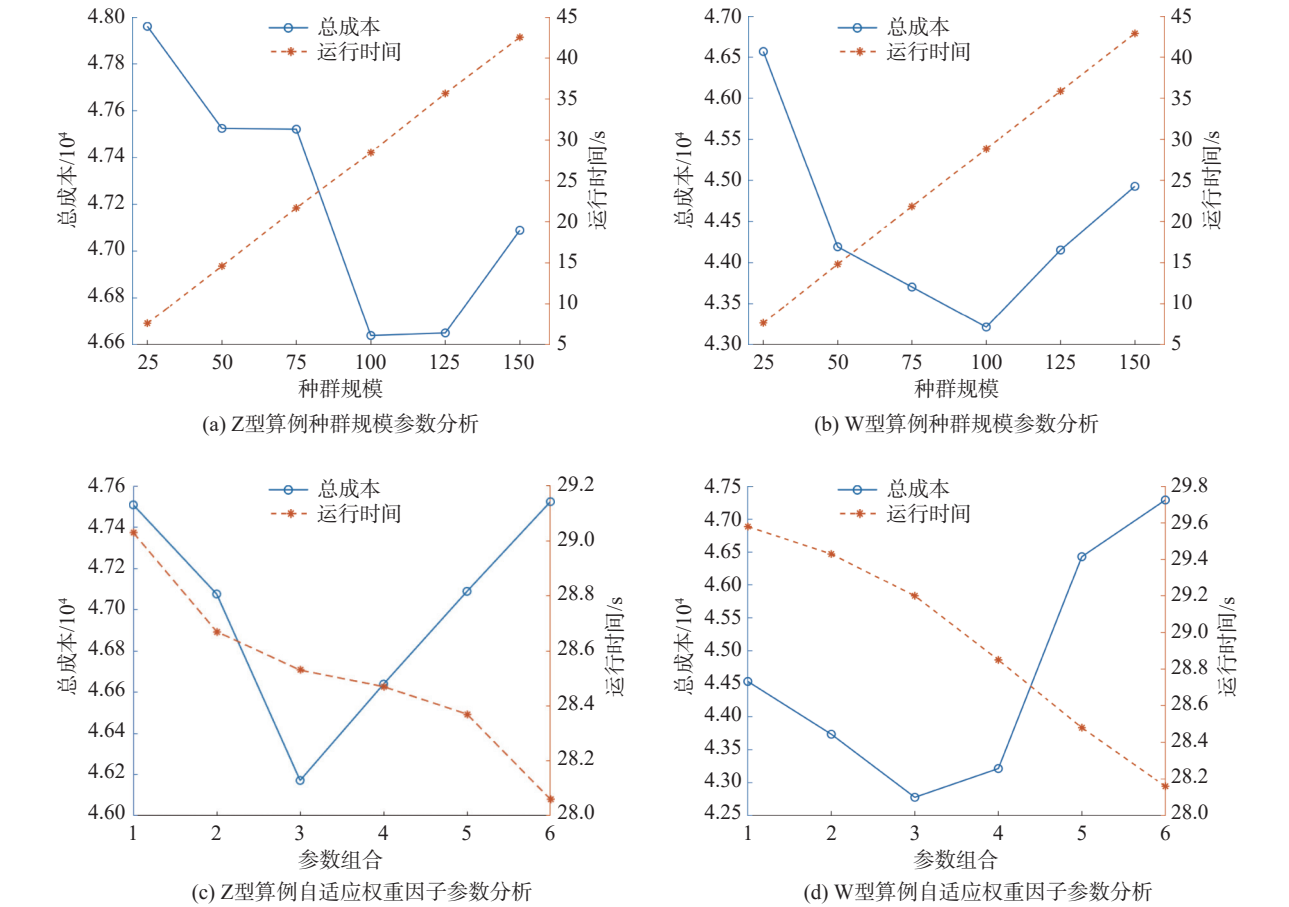


图 7 参数灵敏度分析

Fig.7 Sensitivity analysis of parameters

接受范围内，这说明本文的 ISSA 在处理 2E-LRPSPD 上是值得信服的。

表 8 给出了 W 型算例 3 的最优选址与路径规划方案：仓库编号为 0，客户编号为 1~50，配送中心编号为 51~55。该方案对配送中心 53 和 54 进行开放，而未出现的配送中心编号则表示该配送中心不开放。车辆编号为 1、2 的路线为第一阶段仓库为配送中心提供的服务顺序方案，车辆编号为 3~14 的路线为第二阶段配送中心为客户提供的服务顺序方案。

为了进一步说明 ISSA 求解 2E-LRPSPD 的有效性，本文选取遗传算法 (genetic algorithm,

GA)、免疫算法 (immune algorithm, IA)、灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO)、鲸鱼算法 (whale optimization algorithm, WOA) 进行对比分析。GA 和 IA 为经典的群智能优化算法，GWO 的算法流程参考文献 [19]，WOA 的算法流程参考文献 [20]。上述实验均由 Matlab 软件编写，运行环境参照上文，求解结果如表 9 所示。从表 9 数据可以看出，ISSA 求解得到的最优结果优于其他算法，尤其在 100 个客户规模的算例上提升较为显著；其次，在求解时间上，ISSA 的求解速度相比 IA、GWO 和 WOA 较优，而对比 GA 稍有增加。由此证明，ISSA 求解 2E-LRPSPD 具有一定优势，相比

表 7 SSA 与 ISSA 结果对比
Tab.7 Comparison of results between SSA and ISSA

算例	类型	SSA				ISSA			
		AVG	MAX	MIN	TIME/s	AVG	MAX	MIN	TIME/s
1	Z	29251	29283	29238	14	29238	29241	29230	16
	W	31774	33825	29271	14	29257	29270	29243	16
2	Z	30263	30278	30251	14	30246	30251	30243	16
	W	30861	40832	30249	14	30264	30302	30248	17
3	Z	48002	48075	47947	28	46172	47980	38243	29
	W	48735	49052	48177	28	42777	48137	38240	29
4	Z	52591	53447	52429	28	52414	52487	52356	29
	W	53571	53662	53468	29	53195	53468	52469	31
5	Z	34013	34113	33968	26	33965	33991	33930	27
	W	35143	35219	35062	27	34750	35062	34035	29
6	Z	126432	139094	125241	49	125254	126238	124367	50.
	W	134805	142286	127633	52	127175	128552	125464	53
7	Z	124889	125137	124717	48	124666	124872	123849	50
	W	126931	127366	126230	51	125582	126088	124874	52
8	Z	187966	190807	187181	52	187083	187267	186126	54
	W	217348	234234	189299	56	189088	190235	188154	57

表 8 W 型算例 3 的最优选址与路径规划方案
Tab.8 Optimal location and routing planning scheme of W-type tested instance 3

车辆编号	车辆路线	车辆编号	车辆路线	车辆编号	车辆路线
1	0—54—53—0	6	54—41—19—14—54	11	54—50—47—17—26—54
2	0—53—0	7	53—13—22—8—45—37—53	12	54—2—3—39—34—54
3	53—12—48—23—33—53	8	54—15—10—19—54	13	53—29—36—32—7—53
4	53—44—31—9—35—4—53	9	53—43—1—28—6—53	14	53—42—40—24—27—25—53
5	54—11—18—38—16—30—54	10	54—21—20—5—46—54		

表 9 不同算法结果对比

Tab.9 Comparison of results from different algorithms

算例	类型	ISSA			GA			IA			GWO			WOA		
		AVG	MIN	TIME/s	AVG	MIN	TIME/s	AVG	MIN	TIME/s	AVG	MIN	TIME/s	AVG	MIN	TIME/s
1	Z	29 238	29 230	16	29 488	29 245	14	29 345	29 262	48	29 253	29 230	23	29 321	29 253	17
	W	29 257	29 243	16	31 802	29 266	15	29 663	29 268	48	31 293	29 245	23	29 409	29 317	17
2	Z	30 246	30 243	16	30 269	30 243	14	30 258	30 246	48	30 263	30 243	23	30 327	30 285	17
	W	30 264	30 248	17	30 321	30 250	14	30 322	30 253	488	30 294	30 250	25	30 384	30 339	19
3	Z	46 172	38 243	29	47 603	39 536	28	47 754	39 968	120	46 773	39 497	60	46 843	39 976	30
	W	42 777	38 240	29	47 426	39 550	29	46 862	39 864	120	45 175	39 421	62	46 712	40 021	32
4	Z	52 414	52 356	29	52 651	52 454	28	52 955	52 495	120	52 489	52 442	58	53 004	52 786	30
	W	53 195	52 469	31	53 531	52 690	30	53 541	52 909	121	53 404	52 496	59	53 986	53 880	32
5	Z	33 965	33 930	27	34 120	34 068	26	34 154	34 076	118	34 066	34 008	61	34 432	34 354	28
	W	34 750	34 035	29	35 117	34 183	28	35 136	34 594	119	35 089	35 057	58	35 475	35 366	33
6	Z	125 254	124 367	50	136 693	125 560	49	135 341	125 806	271	128 386	125 461	88	140 028	139 932	52
	W	127 175	125 464	53	134 685	126 790	51	136 553	128 060	266	127 680	126 546	89	139 964	131 454	57
7	Z	124 666	123 849	50	125 366	125 261	49	125 374	124 636	262	124 965	124 227	88	126 094	125 956	52
	W	125 582	124 874	52	126 569	125 543	50	126 420	125 902	265	125 819	125 261	89	127 964	127 269	58
8	Z	187 083	186 126	54	190 137	187 568	53	190 932	187 886	266	188 614	187 347	94	191 190	188 383	56
	W	189 088	188 154	57	193 879	190 917	56	194 220	191 289	270	191 329	189 573	95	194 303	191 665	61

其他群智能优化算法，在求解质量和运行时间上表现都更为优秀。

4 结 论

为适应当今物流行业发展的实际状况，满足客户在取送货方面的多样化需求，本文以最小化配送中心建设成本以及车辆成本为目标构建 2E-LRPSPD 模型，并使用改进的樽海鞘算法进行求解。针对 2E-LRPSPD 这一类组合优化问题，通过引入自适应权重策略、调整食物源数量策略、精英保留策略以及多种搜索算子，ISSA 增强了种群多样性，同时也提升了全局搜索能力，显示出良好的计算性能。改进的 ISSA 具备可扩展性，能够灵活应用于其他类型的选址路径问题中，从而增强其实际应用的广泛性和有效性。为了深化该问题的应用价值，后续研究将进一步构建绿色低碳的 2E-LRPSPD 模型，考虑碳排放的因素并设计相应的 ISSA 进行求解。

参考文献:

[1] VON BOVENTER E. The relationship between

transportation costs and location rent in transportation problems[J]. [Journal of Regional Science](#), 1961, 3(2): 27–40.

[2] JACOBSEN S K, MADSEN O B G. A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem[J]. [European Journal of Operational Research](#), 1980, 5(6): 378–387.

[3] CUDA R, GUASTAROB A G, SPERANZA M G. A survey on two-echelon routing problems[J]. [Computers & Operations Research](#), 2015, 55: 185–199.

[4] PICHKA K, BAJGIRAN A H, PETERING M E H, et al. The two echelon open location routing problem: mathematical model and hybrid heuristic[J]. [Computers & Industrial Engineering](#), 2018, 121: 97–112.

[5] NIKBAKHSH E, ZEGORDI S H. A heuristic algorithm and a lower bound for the two-echelon location-routing problem with soft time window constraints[J]. [Scientia Iranica](#), 2010, 17(1): 1755–1759.

[6] RAHMANI Y, CHERIF-KHETTAF W R, OULAMARA A. A local search approach for the two-echelon multi-products location-routing problem with pickup and delivery[J]. [IFAC-PapersOnLine](#), 2015, 48(3): 193–199.

[7] WANG Y, PENG S G, ZHOU X S, et al. Green logistics location-routing problem with eco-packages[J].

Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 143: 102118.

[8] WANG X W. Research on hybrid immune algorithm for solving the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. Journal of Cases on Information Technology, 2022, 24(5): 1–17.

[9] 刘冬, 张惠珍, 刘亚平, 等. 改进蘑菇算法求解开放式同时送取货选址-路径问题 [J]. 控制工程, 2023, 30(10): 1801–1811.

[10] HUANG S H. Solving the multi-compartment capacitated location routing problem with pickup-delivery routes and stochastic demands[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 87: 104–113.

[11] NADIZADEH A, KAFASH B. Fuzzy capacitated location-routing problem with simultaneous pickup and delivery demands[J]. Transportation Letters, 2017, 11(1): 1–19.

[12] KUSUMA R M R, YU V F, VANANY I, et al. Mathematical modeling of the two-echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery and parcel locker[C]//Proceedings of 2024 International Conference on System Science and Engineering. Hsinchu, China: IEEE, 2024: 1–6.

[13] YILDIZ E A, KARAOĞLAN İ, ALTIPARMAK F. An exact algorithm for two-echelon location-routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120598.

[14] FAN H M, WU J X, LI X, et al. Presenting a multi-start hybrid heuristic for solving the problem of two-echelon location-routing problem with simultaneous pickup and delivery (2E-LRSPD)[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(1): 9743841.

[15] DU J H, XU W, WU X, et al. Multi-objective optimization for two-echelon joint delivery location routing problem considering carbon emission under online shopping[J]. Transportation Letters, 2023, 15(8): 907–925.

[16] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: a bioinspired optimizer for engineering design problems[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114: 163–191.

[17] 鲍秀麟, 张惠珍, 马良, 等. 考虑公众风险的多目标医疗废物选址路径问题及樽海鞘算法求解 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(3): 710–716.

[18] KARAOĞLAN İ, ALTIPARMAK F, KARA İ, et al. The location routing problem with simultaneous pickup and delivery: formulations and a heuristic approach[J]. Omega, 2012, 40(4): 465–477.

[19] 张坤, 张惠珍, 马良, 等. 分布估计灰狼算法求解低碳选址路径问题 [J]. 系统管理学报, 2023, 32(4): 701–711.

[20] SI Q, LI C Y. Indoor robot path planning using an improved whale optimization algorithm[J]. Sensors, 2023, 23(8): 3988.

(编辑: 丁红艺)