

多阶段应急物资多目标连续分配问题建模与求解

张国富^{1,2,3}, 管燕妮¹, 苏兆品^{1,2,3}, 岳峰^{1,3}

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学智能互联系统安徽省实验室, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学工业安全与应急技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 大型自然灾害应急物资分配是展开受灾点应急救援的基础, 主要研究如何对受自然灾害地点周边的应急物资进行合理调配, 尽快从各个储备站将应急物资输送到受灾点, 保障事故救援顺利进行。然而, 已有研究大多局限于单个阶段的应急物资分配, 过于强调应急响应的时效性而忽视了物资消耗的连续性。为此, 构建了一种面向多储备站、多种应急物资、多受灾点、多阶段连续分配应急物资的多目标分配模型, 并分析推演了满足物资阶段内连续消耗的约束条件, 基于非支配排序遗传算法(NSGA)和启发式策略设计了一种应对大型自然灾害的应急物资多目标分配算法。仿真实验验证了所提算法的有效性。实验结果表明, 所提算法可以同时兼顾大型自然灾害应急响应的连续性和时效性要求, 为大型自然灾害应急救援提供更多且更优的应急物资分配方案。

关键词: 应急物资连续分配; 多目标优化; 非支配排序遗传算法; 启发式策略; 可持续灾害供应链

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0068634

Modeling and Solving of the Multi-Objective Continuous Distribution Problem for Multi-Stage Emergency Supplies

ZHANG Guofu^{1,2,3}, GUAN Yann¹, SU Zhaopin^{1,2,3}, YUE Feng^{1,3}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China;
2. Intelligent Interconnected Systems Laboratory of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Industry Safety and Emergency Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China)

【Abstract】 In large-scale natural disasters, emergency relief focuses on how to reasonably allocate emergency supplies around the natural disaster-stricken sites to expeditiously deliver the supplies from various reserve stations to ensure smooth implementation of accidental relief. However, most existing studies are limited to the distribution of emergency materials at a single stage, placing an inordinate emphasis on the timeliness of the emergency response and neglecting the continuity of material consumption. To this end, this study constructs a multi-objective allocation model for the continuous allocation of emergency supplies to multiple reserve stations, emergency supplies, and disaster points, in multiple stages, to analyze and deduce the constraints that satisfy the continuous consumption of supplies within each stage. Subsequently, a multi-objective allocation algorithm based on the non-dominated sorting genetic algorithm and a heuristic strategy is proposed for large-scale natural disaster emergency materials. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified through simulation experiments. The experimental results show that the proposed algorithm simultaneously considers the continuity and timelines requirements of large-scale natural disaster emergency responses and can provide better emergency material allocation in increasing supplies for large-scale natural disaster emergency relief.

【Key words】 continuous allocation of emergency supplies; multi-objective optimization; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm(NSGA); heuristic strategy; sustainable disaster supply chains

0 引言

近年来, 全球范围内自然灾害频发, 给各国带来巨大的生命和财产损失。随着资源危机和环境问题日益加剧, 中国仅在 2023 年上半年有 4 876.4 万人

次经历了不同程度的自然灾害, 直接经济损失 382.3 亿元^[1]。为应对这一挑战, 国务院制定了《“十四五”国家应急体系规划》, 强调到 2035 年要建立适应中国特色大国现代化的全面应急体系。其中, 在自然灾害发生后, 需充分利用智能决策理论和

收稿日期: 2023-10-19 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划(202104d07020001); 安徽省自然科学基金面上项目(2208085MF166); 中央高校基本科研业务费专项资金(PA2023IISL0097, PA2023GDSK0049)。

通信作者 E-mail: zgf@hfut.edu.cn

计算机辅助工具,迅速制定出合理高效的应急物资分配方案。这意味着各储备点的应急物资能够及时、连续地送达受灾点,为救灾提供强有力的物资支持。通过最大限度地降低受灾点的死亡风险和经济损失,保护人民群众生命财产安全,对确保经济高质量发展和社会稳定具有重要现实意义。

应急物资分配的早期研究关注的是不同目标函数和将物资进行合理分类对减轻伤亡的影响。例如,LIN 等^[2]提出多目标线性规划模型,并考虑了多物品、多车辆、多时间段、软时间窗口和分批交付策略等情况。HUANG 等^[3]探讨了为了兼顾效率、效能和公平,如何影响车辆路线的选择和物资分配的结果。文献^[4]提出使用物流成本和物资缺乏成本的总和作为灾后救援应急物资分配模型的首选目标函数。YANG 等^[5]提出在以受灾人群的伤亡随时间变化的背景下,以最大化分配资源的有效性和最小化资源的分配成本为目标的应急救援物资分配模型。HUANG 等^[6]提出对救生物资利用效率、延迟成本和公平性建立 1 个将资源分配与应急分配相结合的综合多目标优化模型。WANG 等^[7]基于多粒子群算法提出能兼顾效率和公平的多目标应急资源分配模型。SU 等^[8]在同时考虑响应时间和应急资源成本的情况下建立了 1 个多重约束的整数线性规划模型。

随着研究的深入,多阶段救援和将救援与调度路径优化相结合都是应急物资分配研究的重点。例如,ZHOU 等^[9]基于 MOEA/D 算法框架设计了多阶段动态应急资源调度问题的多目标优化模型。葛敏等^[10]提出一种多资源、多阶段调度的启发式算法来解决以目标函数为最短响应时间、最小灾民损失和最低运输成本的应急物资分配模型。张国富等^[11]提出一种基于二维非支配排序遗传算法(NSGA)-II 与蚁群优化的混合智能搜索算法,在优化调度路径的同时解决在多发点之间潜在的应急救援物资分配冲突问题。文献^[12]提出一种多周期混合整数线性规划优化模型,并证实在操作过程中减少物流成本的因素。WANG 等^[13]提出基于多目标蜂窝遗传算法和改进的 A* 算法,将资源分配与路径规划创造性地结合起来,避免了意外道路要素对救灾的影响。MA 等^[14]引入 k -means 算法来预测事故发生点并使用 EGA 确定最佳的物资资源分配策略。WANG 等^[15]提出基于区域自救和跨区域协同救援的多时段应急资源配置优化模型。

但是,已有研究没有考虑到应急物资在救援过

程中的连续性消耗问题。KATSORAS 等^[16]提出基于系统动力学实现了可持续性的救灾供应链系统。CAO 等^[17]考虑可持续性、多阶段、多类型灾害医疗废物定位运输综合优化问题,提出以最大限度地减少总碳排放和总潜在社会风险为目标的多目标混合整数规划模型。CAO 等^[18]在原始对偶优化算法的基础上加入分支界限法和期望值,以幸存者感知满意度来描述整个应急救援过程的连续性。ZHANG 等^[19]针对救援网络可持续运输救灾物资问题建立了多目标优化模型,最大限度地公平分配救援物资,同时最大限度地减少运输时间和运营成本。DEB 等^[20]设计 1 个物联网平台用于保证灾害期间的救济物资连续派送。但是这些研究都是从宏观角度考虑救灾物资的连续性,多集中在定义相关的目标函数和物资供应链,较少考虑储备点物资补给和受灾点消耗的连续性,容易忽略物资补给和消耗的连续性。此外,已有的多阶段工作通常将各阶段视为独立,未考虑阶段间的连续性,可能导致整个救灾过程中断。对应急物资连续性,即受灾点对应急物资的消耗是否能满足连续性还有待深入探讨。

因此,本文关注大型自然灾害应急物资分配中连续性和时效性这 2 个目标,构建面向多储备站、多种应急物资、多事故点的应急物资多目标分配模型,引入了满足阶段物资连续消耗的约束条件。在此基础上,设计了满足连续约束的启发式策略,并提出一种基于 SPEA2+SDE 和启发式策略的大型灾难应急物资多目标分配算法。

1 问题描述

一旦发生大型自然灾害,为了降低灾害损失,必须第一时间启动应急响应,尽可能在较短的服务时间内完成应急救援。在应急救援活动开始后,应急物资会以一定的速率消耗。为了避免灾情扩大,必须保证应急物资不中断。基于上述考虑,假设在大型自然灾害区周围部署了 $n \in N$ 个应急物资储备站, $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, $m \in N$ 个受灾点, $B = \{b_1, \dots, b_m\}$, 阶段变量 s 。本文的变量符号及其含义如表 1 所示。

表 1 模型中各符号的含义

Table 1 Meaning of each symbol in the model

符号	含义
n	储备站数
m	需求站数
r	物资种类数

表 1(续)

符号	含义
s	阶段数
$i \in \{1, \dots, n\}$	储备站索引
$j \in \{1, \dots, m\}$	需求站索引
$k \in \{1, \dots, r\}$	物资种类索引
$b_{k,s}^i \in Z_0^+$	阶段 s 储备站 i 存储物资 k 的数量
$d_{k,s}^j \in Z_0^+$	阶段 s 需求站 j 需要物资 k 的数量
$dm_{k,s}^j \in Z_0^+$	阶段 s 经修正后需求站 j 需要的物资 k
$t_{k,s}^{i,j} \in Z^+$	阶段 s 物资 k 从储备站 i 到需求点 j 单位部署时间
$v_{k,s}^j \in Z^+$	阶段 s 需求点 j 的物资 k 的消耗率
$res_{k,s}^i \in Z^+$	在阶段 s 内储备站 i 的物资 k 的剩余供应量
$p_{k,s}^j \in Z_0^+$	在阶段 s 内向需求点 j 发送物资 k 的储备点数量
$cp_{k,s}^j \in Z_0^+$	在阶段 s 内连续向需求点 j 发送物资 k 的储备点数量
$w_k^{j,s}$	在阶段 s 需求点 j 等待 k 物资的总时间
$T_{j,s}$	在阶段 s 需求点 j 被服务的时间
\bar{T}_s	在阶段 s 需求点被服务的平均时间
$x_{k,s}^{i,j} \in Z_0^+$	阶段 s 从储备站 i 分配需求点 j 的物资 k 的数量

基于上述定义,本文把在 s 阶段内面向多储备站、多种应急物资、多事故点的应急物资连续分配问题构建一个约束多目标优化模型,其中 $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$:

$$\min f_1(X) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{j,s} - \bar{T}_s)^2}{m-1}} \quad (1)$$

$$\min f_2(X) = \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^m (p_{k,s}^j - C cp_{k,s}^j) \quad (2)$$

$$\min f_3(X) = \max_{j=1}^m \max_{k=1}^r \max_{i=1}^n (t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j}) \quad (3)$$

$$\min f_4(X) = \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^m w_k^{j,s} \quad (4)$$

式中: $f_1(X)$ 表示分配方案要求的各需求点服务时间的标准差,标准差越小,说明各需求点的服务时间越接近,在灾害点之间的物料输送越能满足公平性要求,如果各需求点的服务时间不接近,则有的需求点没有提前完成救援,而有的需求点却很晚才完成救援,那么这种物资传输方案就不能更好平衡各个需求点的救援,降低了公平性; $f_2(X)$ 表示在物资转移过程中物资不连续性的间断次数,对于受灾现场的灾民,物资的到达时间与他们的需求保持一致

可以确保后续批次的新物资在现有资源耗尽之前到达受灾现场,如果灾区的物资在下一批物资到达之前就被消耗殆尽,灾情可能会进一步恶化,阻碍救援工作进行,因此,必须保持物资的持续流动,最大限度地减少资源供应中断出现的次数,最终促进更有效的救灾工作; $f_3(X)$ 表示救灾持续时间,从供应点的角度看,要求各供应点的最近服务时间(即最后一批物资的到达时间)尽可能小,以便合理分配各供应点的物资需求,使各供应点能够尽快响应; $f_4(X)$ 表示物资的等待时间。如果物资的等待时间较短,说明物资到达较为连续。

满足如下约束:

$$\sum_{j=1}^m x_{k,s}^{i,j} \leq b_{k,s}^i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} \leq d_{k,s}^j, \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{k,s}^{i,j} \leq \min\left(\sum_{i=1}^n b_{k,s}^i, \sum_{j=1}^m d_{k,s}^j\right) \quad (7)$$

式中:约束条件式(5)表示每个储备站的每种应急物资的实际贡献量不能超过自身的储备量;约束条件式(6)表示储备站贡献的每种应急物资总量要小于等于各受灾点对该种物资的需求量,避免出现物资浪费;约束条件式(7)表示当物资不充足时,储备站贡献的每种应急物资总量要等于储备站对该物资的存储量。当物资充足时,储备站贡献的每种应急物资总量要等于各受灾点对该种物资的需求量。

2 连续性约束条件的分析

2.1 阶段内连续性约束条件分析

式(1)~式(4)是从时效性、公平性和连续性的角度综合考虑各种时间和效率目标,式(5)~式(7)是从应急物资需求和供给角度分析约束条件。除了时效性和公平性,应急物资消耗的连续性也是自然灾害救援中的一个非常重要因素。本文将重点分析阶段内连续性约束和物资供需约束之间的内在联系。

从决策变量 $x_{k,s}^{i,j}$ 来看,在 s 阶段中,对于同一种应急物资 k ,各储备点 i 到不同受灾点 j 的部署时间 $t_{k,s}^{i,j}, x_{k,s}^{i,j}$ 各不相同。本文首先对不同储备站的部署时间按照从小到大的递增顺序进行排序。不失一般性,为了便于后续的描述,在满足式(7)的条件下,本文假设 $\forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$,根据 $t_{k,s}^{i,j}, x_{k,s}^{i,j}$ 排序后的应急物资分配量和对应的单位部署时间分别为 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$ 和

$T_{k,s}^j = \{t_{k,s}^{1,j}, \dots, t_{k,s}^{i,j}, \dots, t_{k,s}^{n,j}\}$, $i = 1, \dots, n$ ($x_{k,s}^{i,j} = 0$ 的变量不参与排行), 即:

$$t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j} \leq \dots \leq t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j} \leq \dots \leq t_{k,s}^{n,j} x_{k,s}^{n,j} \quad (8)$$

对于受灾点 j , 储备点 a_1 的物资最先到达而 a_n 的物资最后到达。对于中间任意一个储备点 a_i , 为了满足应急物资消耗的连续性, 前期所有储备站运达受灾点的应急物资总量可供消耗的时间应不小于 a_i 与 a_1 之间的物资部署时间间隔, 对于 $\forall i \in \{2, \dots, n\}, \forall k \in \{2, \dots, r\}$, 即:

$$\frac{\sum_{i^*=1}^{i-1} x_{k,s}^{i^*,j}}{v_{k,s}^j} \geq t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j} - t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j} \quad (9)$$

综合考虑式(8)和式(9), 对 $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$, 可得:

$$L_{k,s}^{j,i} \leq x_{k,s}^{j,i} \leq U_{k,s}^{j,i} \quad (10)$$

$$L_{k,s}^{j,i} = \frac{x_{k,s}^{j,(i-1)} t_{k,s}^{j,(i-1)}}{t_{k,s}^{j,(i-1)}} \quad (11)$$

$$U_{k,s}^{j,i} = \min \left\{ \frac{x_{k,s}^{j,1} t_{k,s}^{j,1}}{t_{k,s}^{j,1}} + \frac{\sum_{i^*=1}^{i-1} x_{k,s}^{i^*,j}}{v_{k,s}^j t_{k,s}^{j,i}}, s_k^i \right\} \quad (12)$$

想要满足在第 k 种应急物资上的连续消耗, 排序后的决策变量 $x_{k,s}^{j,i}$ 应该在区间 $[L_{k,s}^{j,i}, U_{k,s}^{j,i}]$ 内, 这个区间与前期储备站已经运达的应急物资密切相关。

命题 1 对 $\forall i \in \{2, \dots, n\}, \forall k \in \{2, \dots, r\}$, 式(10)是排序后的决策变量 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$, 满足阶段内连续消耗的充分必要条件。

证明 充分性: 由式(10)可以得到式(9), 即任意 a_i 与 a_1 的部署时间间隔没有超过前期抵达事故点的应急物资总量的维持时间, 可以满足连续消耗条件。

必要性: 已知排序后 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$ 可以满足连续消耗。本文使用反证法, 假设:

$$L_{k,s}^{j,i} \geq x_{k,s}^{j,i}, i \in \{2, \dots, n\} \quad (13)$$

$$x_{k,s}^{j,i} \geq U_{k,s}^{j,i}, i \in \{2, \dots, n\} \quad (14)$$

由式(13)可得:

$$t_{k,s}^{(i-1),j} x_{k,s}^{(i-1),j} \geq t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j}$$

这与式(8)的排序关系相矛盾。此外, 因为在供需约束下 $x_{k,s}^{i,j}$ 不可能大于 $U_{k,s}^{j,i}$, 因此由式(14)可得:

$$\frac{\sum_{i^*=1}^{i-1} x_{k,s}^{i^*,j}}{v_{k,s}^j} < t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j} - t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j}, i \in \{2, \dots, n\}$$

即 a_i 与 a_1 的部署时间间隔超过了前期抵达事故点的应急物资总量的维持时间, 不可能满足连续消耗条件, 这与 $X_{k,s}^j$ 满足连续消耗的初始条件相矛盾。

证明成立。

应急物资的供需约束与储备站的应急物资储备量和应急物资需求量有关, 而阶段内连续约束不仅与应急物资消耗的速率和部署时间有关, 还与各储备站的应急物资储备量和应急物资需求量也相关, 实现连续约束要远比供需约束困难得多。同时满足供需约束和连续约束可行解的空间非常小, 给求解方法带来极大的挑战。因此, 在规划自然灾害的应急物资储备站时需要充分考虑上述各因素, 才能在自然灾害发生时尽可能满足供需约束和连续约束条件, 从而保证快速有效地进行应急处置和救援。

2.2 阶段间连续性约束条件的分析

本文将重点分析阶段间连续性约束和物资供需约束之间的内在联系。

为了保证阶段间的连续性, 本文首先需要在上一个阶段 $s-1$ 内对不同储备站 i 的部署时间 $t_{k,s-1}^{i,j} x_{k,s-1}^{i,j}$ 按照从小到大的递增顺序进行排序。为了便于后续描述, 在满足式(7)的条件下, 本文假设 $\forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$, 经过 $t_{k,s-1}^{i,j} x_{k,s-1}^{i,j}$ 排序后的应急物资分配量和对应的单位部署时间分别为 $X_{k,s-1}^j = \{x_{k,s-1}^{1,j}, \dots, x_{k,s-1}^{i,j}, \dots, x_{k,s-1}^{n,j}\}$ 和 $T_{k,s-1}^j = \{t_{k,s-1}^{1,j}, \dots, t_{k,s-1}^{i,j}, \dots, t_{k,s-1}^{n,j}\}$, $i = 1, \dots, n$ ($x_{k,s-1}^{i,j} = 0$ 的变量不参与排行), 即:

$$t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j} \leq \dots \leq t_{k,s-1}^{i,j} x_{k,s-1}^{i,j} \leq \dots \leq t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} \quad (15)$$

然后, 本文在 s 阶段中对不同储备站 i 的部署时间 $t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j}$ 按照从小到大的顺序进行排序。为了便于后续描述, 在满足式(7)的条件下, 本文假设 $\forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$, 经过 $t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j}$ 排序后的应急物资分配量和对应的单位部署时间分别为 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$ 和 $T_{k,s}^j = \{t_{k,s}^{1,j}, \dots, t_{k,s}^{i,j}, \dots, t_{k,s}^{n,j}\}$, $i = 1, \dots, n$ ($x_{k,s}^{i,j} = 0$ 的变量不参与排行), 即:

$$t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j} \leq \dots \leq t_{k,s}^{i,j} x_{k,s}^{i,j} \leq \dots \leq t_{k,s}^{n,j} x_{k,s}^{n,j} \quad (16)$$

从 $s-1$ 阶段的传输物资和部署时间可以得出 $s-1$ 阶段最后一批物资到达后, 事故点的应急物资还可以维持的时间。为了保证 2 个阶段间能够连续, 需要保证 s 阶段的第一批物资的部署时间要小于 $s-1$ 阶段最后一批物资到达后事故点的应急物资还可以持续的时间, 即 $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, r\}, \forall j \in \{1, \dots, m\}$:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - \frac{[t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})]}{t_{k,s}^{1,j}} \geq t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j} \quad (17)$$

因此,要保证 2 个阶段连续,就需要这一阶段 s 的第一批物资量要满足:

$$x_{k,s}^{1,j} \leq \frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - \frac{[t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})]}{t_{k,s}^{1,j}} \quad (18)$$

命题 2 对 $\forall i \in \{2, \dots, n\}, \forall k \in \{2, \dots, r\}$, 式(18)是排序后的决策变量 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$ 满足阶段间连续消耗的充分必要条件。

证明 充分性:由式(18)可以得到式(17),即通过 s 阶段任意 b_j 的第一批应急物资量满足阶段间连续的范围,从而推出阶段 s 第一批应急物资的部署时间不大于 $s-1$ 阶段最后一批物资达到后应急物资可持续的时间。

必要性:已知排序后 $X_{k,s}^j = \{x_{k,s}^{1,j}, \dots, x_{k,s}^{i,j}, \dots, x_{k,s}^{n,j}\}$ 可以满足阶段间连续消耗,则有:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - \frac{[t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})]}{t_{k,s}^{1,j}} \geq t_{k,s}^{1,j} x_{k,s}^{1,j}$$

则可得到:

$$x_{k,s}^{1,j} \leq \frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - \frac{[t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})]}{t_{k,s}^{1,j}}$$

通过 s 阶段第一批到达应急物资的部署时间要 不大于 $s-1$ 阶段最后一批物资到达后应急物资还能持续的时间,从而能达到阶段间的连续性推出 s 阶段第一批到达的应急物资量,使其符合阶段性连续的范围。

证明成立。

从以上推导可以看出,阶段间连续约束不仅与 应急物资消耗的速率和部署时间有关,还与上一阶段运输的应急物资量也相关,实现阶段间连续约束 要远比供需约束困难得多。对于多阶段的连续性修正,前一个阶段的分配方案约束了后一阶段的分配 方案,使得后面的每一个阶段能得到可行解的空间

更小,给求解带来了更大的挑战。因此,在规划自然 灾害的应急物资分配方案时除了要考虑各阶段的供 需约束以外,还需要考虑阶段内和阶段间的连续性 约束,从而获得更好的救济方案。

3 应急物资多目标分配算法

本文在 SPEA2+SDE 算法^[20]的基础上引入多 阶段间和阶段内的连续性修正来求解大型自然灾害 多阶段应急物资多阶段分配问题。SPEA2+SDE 算法是当前最流行的多目标进化算法之一,具有速 度快、鲁棒性强和解集均匀等优点,已成为评价众多 其他多目标进化算法性能的基准。而且,SPEA2+SDE 在多目标优化方面表现出色,有效解决自然灾 害应急物资分配问题。

SPEA2+SDE 算法中传统的一维实数编码 与本文探讨的大型自然灾害应急物资多目标分 配问题的二维组合特征并不太相符,且式(6)的 供需约束和式(9)的连续消耗约束均是非常苛刻 的约束条件。SPEA2+SDE 算法的个体在进化 过程中很容易违背这些约束,导致个体对应的分 配方案不可行。虽然 SPEA2+SDE 可以根据约 束违背程度来增大不可行解被淘汰的概率,但在 双重约束的极小可行域下,SPEA2+SDE 仅仅依 靠约束违背度来探索可行解,其效率和效果都会 大打折扣。因此,本文在原始算法的基础上设计 了二维实数编码方案和个体启发式修正策略,以 提升 SPEA2+SDE 算法求解大型自然灾害应急 物资多目标分配问题的性能。如果在实际应用中 要求决策变量 $x_{k,s}^{i,j}$ 为离散型变量(如整数变 量),则可以在种群初始化、交叉和变异操作中对 产生的 $x_{k,s}^{i,j}$ 值进行相应的向上或向下取整。本 文所提的基于启发式的 SPEA2+SDE 算法的基 本流程描述如下。

1)设置初始迭代次数 $t=0$,设置最大迭代次数 t_{\max} 。根据实际问题随机生成初始进化种群 Q_t 和 外部种群 Q'_t 。根据 Q'_t 中 N' 个个体编码和多目标 函数计算每个个体在每个目标函数上的值。

2)根据 Q_t 中 N 个个体的编码和多目标函数来 计算所有个体在各个目标函数上的值。

3)将 Q_t 和 Q'_t 合并成 1 个组合种群 $V_t = Q'_t + Q_t$,并对 V_t 中每个个体的每个目标函数值进行 min-max 标准化。

4)对 V_t 进行适应度分配。对于 V_t 中的每个个 体 x ,对应 1 个支配强度值 $S(x)$,为 x 能够支配的 点的数目,即:

$$S(x) = \{y \mid y \in V_t \wedge x > y\}$$

据此,基于小生境法可得 x 的原始适应度,即 x 支配者的强度值之和:

$$R(x) = \sum_{y \in V_t, x > y} S(y)$$

此外,每个个体 x 还有 1 个拥挤度值:

$$D(x) = \frac{1}{\epsilon_x^y + 2}$$

式中: ϵ_x^y 为个体 x 到迁移后个体 y 的距离。 ϵ_x^y 表达式如下:

$$\epsilon_x^y = \sqrt{\sum_{i=1, f_i^y < f_i^x}^{nobj} (f_i^y - f_i^x)^2}$$

根据上述的 $R(x)$ 和 $D(x)$,计算 V_t 中的每个个体的适应度值:

$$F(x) = R(x) + D(x)$$

5) 对 V_t 进行环境选择。在 V_t 中,所有 $F(x) < 1$ 个体被全部复制到新的外部种群 Q'_{t+1} 。如果 $|Q'_{t+1}| = N'$,则此时环境选择结束。如果 $|Q'_{t+1}| < N'$,则外部种群没有填满,那么对于在 V_t 中剩下所有支配的个体(即 $F(x) > 1$),按照适应度值 $F(x)$ 进行升序排序,选择前面适应度值最小的 $N' - |Q'_{t+1}|$ 个个体进入 Q'_{t+1} 。如果 $|Q'_{t+1}| > N'$,即外部种群过大,则进行截尾操作,依次从 Q'_{t+1} 中删除 1 个与临近个体距离最小(收敛性最差)的个体,直到满足 $|Q'_{t+1}| = N'$ 。

6) 如果 $t \geq t_{max}$,则算法终止,输出 Q'_{t+1} 中的所有非支配个体作为最终的最优解集,否则算法继续迭代。

7) 对新的外部种群 Q'_{t+1} 进行 min-max 标准化和适应度值分配。

8) 对 Q'_{t+1} 进行交配选择。运用锦标赛选择方式依次从 Q'_{t+1} 中选择 2 个父代个体 x'_1, x'_2 进行模拟二进制交叉,依照如下方式生成 2 个子代 x'_1, x'_2 :

$$x'_1 = 0.5 \times [(1 + \gamma)x'_1 + (1 - \gamma)x'_2]$$

$$x'_2 = 0.5 \times [(1 - \gamma)x'_1 + (1 + \gamma)x'_2]$$

其中:

$$\gamma = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{else} \end{cases}$$

$u \in U(0, 1), \eta > 0$ 为分布指数,再将新生成的个体放入新的进化种群 Q'_{t+1} 中,直到 $|Q'_{t+1}| = N'$ 。

9) 对新的进化种群 Q'_{t+1} 进行多项式变异,其变异算子形式是:

$$\delta =$$

$$\begin{cases} [2u + (1 - 2u)(1 - \delta_1)^{n_m+1}]^{\frac{1}{n_m}} - 1, & u \leq 0.5 \\ 1 - [2u + (1 - 2u)(1 - \delta_2)^{n_m+1}]^{\frac{1}{n_m}}, & u > 0.5 \end{cases}$$

式中: u 是 1 个 $[0, 1]$ 内的随机数; n_m 是分布指数; $\delta_1 = (x - l) / (\omega - l); \delta_2 = (\omega - x) / (\omega - l)$, x 表示一个个体, $x \in Q_{t+1}, l = \min x, \omega = \max x$ 。

10) $t = t + 1$, 转步骤 2)。

3.1 个体编码与种群初始化

从式(1)~式(4)可以看出,本文所提的大型自然灾害应急物资多目标分配主要考虑如何在多阶段内 n 个储备站中给 m 个受灾点分配应急物资,具有典型的二维组合优化特征。因此,对于种群中的个体,本文设计二维整数向量编码来表征候选解,如图 1 所示。

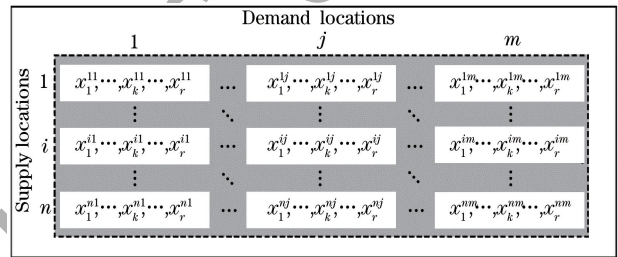


图 1 各阶段个体编码方案

Fig.1 Individual coding scheme for each stage

在图 1 所示的个体编码中,每一行代表 1 个储备站 a_i ,每一列表示 1 个需求点 b_j ,每个基因位表示由储备点 a_i 贡献给需求点 b_j 的 k 类救灾物资的决策变量 $x_{k,s}^{j,i}$,即储备站 a_i 在第 k 种应急物资对受灾点 j 上的实际贡献。

对种群中的每个个体进行初始化,对 $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, r\}$ 和 $\forall j \in \{1, \dots, m\}$, 执行以下公式:

$$x_{k,s}^{j,i} \leftarrow \text{rand}(0, \min\{d_{k,s}^j, b_{k,s}^j\}) \quad (19)$$

式中: $\text{rand}(0, \min\{d_{k,s}^j, b_{k,s}^j\})$ 表示在 $[0, \min\{d_{k,s}^j, b_{k,s}^j\}]$ 之间服从均匀分布的随机数。

显然,产生的每个 $x_{k,s}^{j,i}$ 均满足约束条件式(5)和式(6),但是并不一定满足约束条件式(7)和式(10),即使个体满足了式(7)和式(10),在个体经过交叉和变异之后每个 $x_{k,s}^{j,i}$ 都可能发生改变,这时个体可能再次违背约束条件式(7)和式(10),导致个体不可行。如果种群中出现大量的不可行个体,将会大大降低算法的收敛性和搜索效率。为此,在下一节,本文设计一种启发式策略对每个不可行解进行修正,以驱使每个个体快速接近可行域,提高算法探索可行解的能力。

3.2 启发式修正策略的设计

对于任何 1 个待评估的个体,本文对于每个受灾点收到的每种物资都应该与储备站的储存量和受灾点需求量的最小值相等,即满足约束条件式(7)。此外,这种分配方案能否满足物资的连续消耗,即满足约束条件式(10),本文需要对每个个体的编码进行检查。如果有违背约束的情形,则需要进一步对个体编码进行修正,使其成为可行个体或者尽可能地减小个体的约束违背程度,从而驱使种群快速地向可行区域收敛。在编码检查中,需要明确每个决策变量的值并使其尽可能满足式(7)和式(10)。

基于上述思想,本文设计的个体编码启发式修正策略如下:

1) 如果 $s > 1$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j} < d_{k,s-1}^j$, 即不是第 1 个阶段,且上一个阶段的供应量少于需求量,则将上一个阶段不满足的供应量转移到这个现阶段,所以需要修正 $d_{k,s}^j$:

$$\vec{d}_{k,s}^j \leftarrow d_{k,s}^j + (d_{k,s-1}^j - \sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}) \quad (20)$$

2) 如果 $\sum_{j=1}^m d_k^j \leq \sum_{i=1}^n b_{k,s}^i$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} > d_{k,s}^j$, 即储备量充足,但是供应量超过了需求量,则需要修改传输量 $x_{k,s}^{i,j}$:

$$\vec{x}_{k,s}^{i^*,j} \leftarrow \max(0, x_{k,s}^{i^*,j} - (\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} - d_{k,s}^j)) \quad (21)$$

3) 如果 $\sum_{j=1}^m d_{k,s}^j \leq \sum_{i=1}^n b_{k,s}^i$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} \leq d_{k,s}^j$, 即储备量充足,但是供应量为满足需求量,则需要随机挑选一个 $x_{k,s}^{i^*,j} \leq b_{k,s}^i$ 进行修正:

$$\vec{x}_{k,s}^{i^*,j} \leftarrow \min(b_{k,s}^i, x_{k,s}^{i^*,j} + (d_{k,s}^j - \sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j})) \quad (22)$$

4) 如果 $\sum_{j=1}^m d_{k,s}^j > \sum_{i=1}^n b_{k,s}^i$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} \leq d_{k,s}^j$, 即储备量不充足且供应量不能够满足需求量,则先减少 $\sum_{j=1}^m d_{k,s}^j$, 然后再修改传输量 $x_{k,s}^{i^*,j} \leq b_{k,s}^i$:

$$\vec{d}_{k,s}^{j^*} \leftarrow \frac{d_{k,s}^{j^*}}{\sum_{j=1}^m d_{k,s}^j} \sum_{i=1}^n b_{k,s}^i \quad (23)$$

$$\vec{x}_{k,s}^{i^*,j} \leftarrow \min(b_{k,s}^i, x_{k,s}^{i^*,j} + (d_{k,s}^j - \sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j})) \quad (24)$$

5) 如果 $s > 1$, 即不是第 1 个阶段,需要考虑当前阶段 s 与上一个阶段 $s-1$ 间是否能满足连续性,如果:

$$x_{k,s}^{1,j} \leq \frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - [t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})] t_{k,s}^{1,j} \quad (25)$$

满足阶段间连续性,则进入下一步,若不满足,则修改:

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow r_{res_{k,s}}^i + x_{k,s}^{1,j} - \frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - [t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})] t_{k,s}^{1,j} \quad (26)$$

$$\vec{x}_{k,s}^{1,j} \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n x_{k,s-1}^{i,j}}{v_{k,s-1}^j} - [t_{k,s-1}^{n,j} x_{k,s-1}^{n,j} - (\omega_k^{j,s-1} - t_{k,s-1}^{1,j} x_{k,s-1}^{1,j})] t_{k,s}^{1,j} \quad (27)$$

6) 如果 $x_{k,s}^{i,j} > U_{Up_{k,s}^{i,j}}$, 那么传输量就违背了阶段内连续性要求,则需要进行修改:

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow r_{res_{k,s}}^i + x_{k,s}^{i,j} - U_{Up_{k,s}^{i,j}} \quad (28)$$

$$\vec{x}_{k,s}^{i,j} \leftarrow U_{Up_{k,s}^{i,j}} \quad (29)$$

7) 如果 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} = 0$ 且 $d_{k,s}^j \neq 0$ 且 $r_{res_{k,s}}^i > 0$

$$\vec{x}_{k,s}^{i,j} \leftarrow x_{k,s}^{i,j} + 1 \quad (30)$$

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow r_{res_{k,s}}^i - 1 \quad (31)$$

然后更新 $Up_{k,s}^{i^*,j}$, $i^* = i + 1, \dots, n$ 。

8) 如果 $r_{res_{k,s}}^i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} < d_{dm_{k,s}^j}$ 且 $x_{k,s}^{i,j} < U_{Up_{k,s}^{i,j}}$ 。当 $r_{res_{k,s}}^i > U_{Up_{k,s}^{i,j}} - x_{k,s}^{i,j}$ 时,则:

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow r_{res_{k,s}}^i - U_{Up_{k,s}^{i,j}} + x_{k,s}^{i,j} \quad (32)$$

$$\vec{x}_{k,s}^{i,j} \leftarrow U_{Up_{k,s}^{i,j}} \quad (33)$$

其他情况下:

$$\vec{x}_{k,s}^{i,j} \leftarrow x_{k,s}^{i,j} + r_{res_{k,s}}^i \quad (34)$$

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow 0 \quad (35)$$

然后,更新 $Up_{k,s}^{i^*,j}$, $i^* = i + 1, \dots, n$ 。

9) 如果 $r_{res_{k,s}}^i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^n x_{k,s}^{i,j} \leq d_{dm_{k,s}^j}$, 则:

$$\vec{x}_{k,s}^{i,j} \leftarrow x_{k,s}^{i,j} + r_{res_{k,s}}^i \quad (36)$$

$$r_{res_{k,s}}^{\rightarrow i} \leftarrow 0 \quad (37)$$

3.3 整体算法设计

本文所提的启发式 HSPEA2+SDE 算法具体描述如下:

1) 在当前阶段内采用二维实数编码并根据约束条件随机生成进化种群和外部种群,判断当前阶段是否为第 1 个阶段,如果是,进入步骤 2),如果不是,则按照式(20)修正需求量;

2) 根据式(21)~式(24),对当前阶段 2 个种群中每个个体的编码进行启发式修正;

3) 判断当前阶段是否为第 1 个阶段,若不是,则判断种群是否满足阶段间连续条件,若不满足阶段间连续条件,则对 2 个种群按照式(26)和式(27)进行阶段间连续修正;

4) 判断当前阶段的种群是否满足阶段内连续,若不满足,则对 2 个种群按照式(28)~式(37)进行阶段内连续修正;

5) 将进化种群和外部种群合并为重组种群;

6) 将适应度值分配给重组群体中的每个个体;

7) 对重组种群进行环境选择,创建新的外部种群;

8) 将适应度值分配给更新后外部群体中的每个个体;

9) 对外部种群进行二元竞赛选择和模拟二元交叉,生成新的进化种群;

10) 对进化种群进行多项式变异;

11) 若达到最大迭代数,保存当前阶段外部种群结果,判断是否为最后阶段,若不是,则进入下一阶段,进入步骤 1);若未达到最大迭代数,则继续迭

代,进入步骤 2);

12) 所有阶段都已完成,输出所有阶段结果。

4 实验结果与分析

4.1 参数设置和评价指标

为验证本文所提方法的有效性,本节采用实例验证法模拟多阶段大型自然灾害,设置参数为 10 个灾难点,20 个储备点可供物资调配和 5 种物资, $t_{k,s}^{i,j} \in [1,3]$, $v_{k,s}^j \in [0.3,0.9]$, $b_{k,s}^i \in [10,50]$ 。

在物资不充分的情况下, $\sum_{i=1}^n b_{k,s}^i = \frac{8}{9} \sum_{j=1}^m d_{k,s}^j$;在物

资充分的情况下, $\sum_{i=1}^n b_{k,s}^i = \frac{9}{8} \sum_{j=1}^m d_{k,s}^j$;在物资部分

充足的情况下设定物资 1、物资 2 和物资 3 是不充分的,物资 4 和物资 5 是充分的。每种情况均根据上述参数和取值区间随机生成 30 个不同的测试实例,每个测试实例在 AMD Ryzen 7 CPU 1.8 GHz、16 GB 内存、Windows10 操作系统的计算机上独立运行,并根据运行结果进行统计分析。用本文所提方法求解出各阶段相应的物资分配方案和持续时间,并把本文提出的算法 HSPEA2+SDE 分别和 NSGA-II^[21]、NSGA-III^[22] 和 MOEA/D-IEpsilon^[23] 方法的实验结果进行对比。考虑到一开始救灾物资在大部分情况下都是不充分的,随着救灾进程的推进,物资会逐渐充分,所以设定第 1 个阶段物资为不充分。第 2 阶段为物资部分充分。第 3 阶段为物资完全充分。所有算法的具体参数设置如表 2 所示。

表 2 实验参数设置

Table 2 Experimental parameter settings

算法	种群大小	迭代次数/次	交叉率	变异率
HSPEA2+SDE	250	200	0.9	0.050
NSGA-II	250	200	0.9	0.050
MOEA/D-IEpsilon	250	200	0.9	0.002
NSGA-III	250	200	0.9	0.050

本文采用经典的容量值和覆盖值^[24],以及阶段内间断次数来证明不同算法在连续性方面的优劣。其中容量值是在算法运行完毕后得到的非支配满足约束的可行解个数,体现了算法的搜索能力;覆盖值可以对比 2 个算法非支配的优越性,当一个算法对另一个算法的覆盖值高过另一个算法对这个算法的覆盖值时,说明这个算法获得的解集更优,是更好的分配方案。对于多阶段的对比,通过展示 2 个阶段间后一阶段首批物资运输时间与前一阶段最后一批

物资可持续时间的比较来展现两阶段间是否连续,通过阶段间是否连续来展现不同算法在多阶段连续性上的优劣。

4.2 HSPEA2+SDE 的有效性

表 3~表 5 所示为在不充分、部分充分、充分物资情况下的覆盖值结果,其中 A、B、C、D 分别指 HSPEA2+SDE、NSGA-II、NSGA-III 和 MOEA/D-IEpsilon。从表 3~表 5 可以看出,无论是哪种环境,HSPEA2+SDE 基本上能全面覆盖其他算法的解。

表 3 在物资不充分情况下的覆盖值
Table 3 Coverage values in the case of insufficient material

实例	C_v (A,B)/%	C_v (B,A)	C_v (A,C)/%	C_v (C,A)	C_v (A,D)/%	C_v (D,A)
1	100	0	100	0	100	0
2	100	0	100	0	100	0
3	100	0	100	0	100	0
4	100	0	100	0	100	0
5	100	0	100	0	100	0
6	100	0	100	0	100	0
7	100	0	100	0	100	0
8	100	0	100	0	100	0
9	100	0	100	0	100	0
10	100	0	100	0	100	0
11	100	0	100	0	100	0
12	100	0	100	0	100	0
13	100	0	100	0	100	0
14	100	0	100	0	100	0
15	100	0	100	0	100	0
16	100	0	100	0	100	0
17	100	0	100	0	100	0
18	100	0	100	0	100	0
19	100	0	100	0	100	0
20	100	0	100	0	100	0
21	100	0	100	0	100	0
22	100	0	100	0	100	0
23	100	0	100	0	100	0
24	100	0	100	0	100	0
25	100	0	100	0	100	0
26	100	0	100	0	100	0
27	100	0	100	0	100	0
28	100	0	100	0	100	0
29	100	0	100	0	100	0
30	100	0	100	0	100	0

表 4 在部分物资不充分情况下的覆盖值

Table 4 Coverage values in the case of insufficient supply of some materials

实例	C_v (A,B)/%	C_v (B,A)	C_v (A,C)/%	C_v (C,A)	C_v (A,D)/%	C_v (D,A)
1	100	0	100	0	100	0
2	100	0	100	0	100	0
3	99	0	100	0	98	0
4	100	0	100	0	99	0
5	98	0	100	0	98	0
6	99	0	100	0	99	0
7	99	0	100	0	100	0
8	100	0	100	0	100	0
9	100	0	100	0	100	0
10	100	0	100	0	99	0
11	100	0	100	0	100	0
12	100	0	100	0	100	0
13	99	0	100	0	100	0

表 4(续)

实例	C_v (A,B)/%	C_v (B,A)	C_v (A,C)/%	C_v (C,A)	C_v (A,D)/%	C_v (D,A)
14	100	0	100	0	99	0
15	100	0	100	0	98	0
16	99	0	100	0	100	0
17	97	0	100	0	99	0
18	100	0	100	0	99	0
19	98	0	100	0	100	0
20	100	0	100	0	100	0
21	100	0	100	0	100	0
22	98	0	100	0	98	0
23	100	0	100	0	97	0
24	98	0	100	0	100	0
25	100	0	100	0	100	0
26	100	0	100	0	99	0
27	99	0	100	0	100	0
28	100	0	100	0	100	0
29	100	0	100	0	100	0
30	100	0	100	0	100	0

表 5 在物资充分情况下的覆盖值

Table 5 Coverage values in the case of sufficient material

实例	C_v (A,B)/%	C_v (B,A)	C_v (A,C)/%	C_v (C,A)	C_v (A,D)/%	C_v (D,A)
1	96	0	100	0	100	0
2	93	0	100	0	100	0
3	98	0	100	0	100	0
4	100	0	100	0	100	0
5	95	0	100	0	100	0
6	95	0	100	0	100	0
7	98	0	100	0	100	0
8	97	0	100	0	100	0
9	97	0	100	0	100	0
10	100	0	100	0	100	0
11	96	0	100	0	100	0
12	98	0	100	0	100	0
13	98	0	100	0	100	0
14	95	0	100	0	100	0
15	95	0	100	0	100	0
16	99	0	100	0	100	0
17	97	0	100	0	100	0
18	98	0	100	0	100	0
19	95	0	100	0	100	0
20	99	0	100	0	100	0
21	97	0	100	0	100	0
22	100	0	100	0	100	0
23	100	0	100	0	100	0
24	96	0	100	0	100	0
25	98	0	100	0	100	0
26	96	0	100	0	100	0
27	100	0	100	0	100	0
28	100	0	100	0	100	0
29	99	0	100	0	100	0
30	95	0	100	0	100	0

表 6~表 8 所示为在完全不充分、部分不充分、完全充分情况下的超体积结果,其中括号中的数据表示方差。从表 6~表 8 可以看出,HSPEA2+SDE、NSGA-II 和 NSGA-III 在 3 种环境下都能探索到数量可观的可行解,MOEA/D-IEpsilon 只能找到少量的可行解。随着不满足度

的提升,NSGA-II、NSGA-III 和 MOEA/D-IEpsilon 的表现相较于 HSPEA2+SDE 更弱,所能探索的可行域就更小。上述实验结果表明,当处理大规模问题时,HSPEA2+SDE 对可行解的探索能力要远优于其他 3 种算法,具有更好的稳定性。

表 6 在物资完全不充分情况下的超体积指标

Table 6 Ultra-volume index in the case of complete shortage of supplies

实例	HSPEA2+SDE	NSGA-II	NSGA-III	MOEA/D-IEpsilon
1	$1.039\ 19 \times 10^9 (1.733\ 70 \times 10^8)$	$3.688\ 01 \times 10^8 (1.617\ 13 \times 10^8)$	$6.558\ 21 \times 10^7 (3.798\ 90 \times 10^7)$	$3.908\ 26 \times 10^8 (1.111\ 37 \times 10^8)$
2	$1.470\ 18 \times 10^9 (1.697\ 80 \times 10^8)$	$6.889\ 15 \times 10^8 (1.718\ 38 \times 10^8)$	$7.078\ 30 \times 10^7 (2.055\ 63 \times 10^7)$	$5.474\ 79 \times 10^8 (1.371\ 43 \times 10^8)$
3	$1.527\ 93 \times 10^9 (1.472\ 45 \times 10^8)$	$6.291\ 32 \times 10^8 (1.526\ 24 \times 10^8)$	$7.753\ 95 \times 10^7 (2.575\ 67 \times 10^7)$	$4.399\ 44 \times 10^8 (1.946\ 03 \times 10^8)$
4	$6.335\ 20 \times 10^8 (1.477\ 29 \times 10^8)$	$2.512\ 12 \times 10^8 (8.240\ 17 \times 10^7)$	0(0)	$2.712\ 02 \times 10^8 (7.025\ 33 \times 10^7)$
5	$1.899\ 66 \times 10^9 (2.559\ 79 \times 10^8)$	$8.555\ 26 \times 10^8 (2.687\ 66 \times 10^8)$	0(0)	$7.131\ 93 \times 10^8 (1.991\ 17 \times 10^8)$
6	$6.776\ 78 \times 10^8 (4.774\ 09 \times 10^7)$	$2.243\ 78 \times 10^8 (7.159\ 96 \times 10^7)$	0(0)	$1.839\ 85 \times 10^8 (5.211\ 15 \times 10^7)$
7	$1.247\ 59 \times 10^9 (1.928\ 65 \times 10^8)$	$5.212\ 20 \times 10^8 (1.589\ 54 \times 10^8)$	0(0)	$5.150\ 21 \times 10^8 (1.139\ 09 \times 10^8)$
8	$1.174\ 34 \times 10^9 (1.154\ 91 \times 10^8)$	$4.812\ 98 \times 10^8 (1.056\ 75 \times 10^8)$	0(0)	$4.627\ 24 \times 10^8 (1.184\ 57 \times 10^8)$
9	$2.395\ 38 \times 10^9 (2.132\ 95 \times 10^8)$	$1.037\ 10 \times 10^9 (3.439\ 28 \times 10^8)$	$6.245\ 05 \times 10^7 (3.567\ 42 \times 10^7)$	$7.648\ 56 \times 10^8 (3.063\ 11 \times 10^8)$
10	$1.002\ 46 \times 10^9 (8.988\ 74 \times 10^7)$	$3.468\ 90 \times 10^8 (9.197\ 56 \times 10^7)$	0(0)	$2.907\ 35 \times 10^8 (9.632\ 75 \times 10^7)$
11	$8.104\ 36 \times 10^8 (8.296\ 92 \times 10^7)$	$2.734\ 54 \times 10^8 (8.568\ 23 \times 10^7)$	0(0)	$2.147\ 18 \times 10^8 (7.055\ 24 \times 10^7)$
12	$9.097\ 40 \times 10^8 (1.342\ 61 \times 10^8)$	$3.450\ 03 \times 10^8 (1.049\ 91 \times 10^8)$	0(0)	$2.848\ 25 \times 10^8 (8.439\ 82 \times 10^7)$
13	$1.477\ 89 \times 10^9 (1.271\ 11 \times 10^8)$	$5.411\ 82 \times 10^8 (1.537\ 08 \times 10^8)$	0(0)	$4.279\ 21 \times 10^8 (1.729\ 06 \times 10^8)$
14	$1.732\ 74 \times 10^9 (2.246\ 14 \times 10^8)$	$6.423\ 00 \times 10^8 (2.121\ 96 \times 10^8)$	$4.675\ 47 \times 10^7 (5.857\ 20 \times 10^6)$	$6.201\ 71 \times 10^8 (1.530\ 05 \times 10^8)$
15	$5.841\ 74 \times 10^8 (8.045\ 44 \times 10^7)$	$2.219\ 84 \times 10^8 (6.960\ 74 \times 10^7)$	0(0)	$1.964\ 23 \times 10^8 (5.222\ 05 \times 10^7)$
16	$1.068\ 01 \times 10^9 (1.938\ 96 \times 10^8)$	$4.616\ 34 \times 10^8 (1.405\ 26 \times 10^8)$	$1.257\ 02 \times 10^8 (0)$	$3.842\ 69 \times 10^8 (1.213\ 27 \times 10^8)$
17	$4.252\ 74 \times 10^8 (4.374\ 21 \times 10^7)$	$1.300\ 67 \times 10^8 (4.214\ 05 \times 10^7)$	0(0)	$1.520\ 95 \times 10^8 (4.942\ 10 \times 10^7)$
18	$1.097\ 43 \times 10^9 (1.587\ 73 \times 10^8)$	$4.194\ 15 \times 10^8 (1.157\ 07 \times 10^8)$	0(0)	$4.053\ 20 \times 10^8 (1.264\ 42 \times 10^8)$
19	$1.184\ 16 \times 10^9 (1.287\ 31 \times 10^8)$	$4.172\ 06 \times 10^8 (1.533\ 46 \times 10^8)$	$2.193\ 75 \times 10^7 (0)$	$3.707\ 14 \times 10^8 (1.087\ 90 \times 10^8)$
20	$7.626\ 82 \times 10^8 (1.090\ 48 \times 10^8)$	$2.818\ 78 \times 10^8 (1.034\ 93 \times 10^8)$	0(0)	$2.330\ 83 \times 10^8 (6.959\ 89 \times 10^7)$
21	$1.804\ 97 \times 10^9 (1.667\ 68 \times 10^8)$	$6.843\ 88 \times 10^8 (2.127\ 36 \times 10^8)$	$2.383\ 73 \times 10^7 (0)$	$7.416\ 75 \times 10^8 (1.726\ 18 \times 10^8)$
22	$1.113\ 92 \times 10^9 (1.711\ 87 \times 10^8)$	$5.702\ 42 \times 10^8 (9.511\ 90 \times 10^7)$	$1.158\ 08 \times 10^7 (0)$	$4.443\ 77 \times 10^8 (1.168\ 46 \times 10^8)$
23	$7.073\ 52 \times 10^8 (7.003\ 10 \times 10^7)$	$2.241\ 07 \times 10^8 (7.253\ 90 \times 10^7)$	0(0)	$2.620\ 62 \times 10^8 (6.030\ 10 \times 10^7)$
24	$1.105\ 98 \times 10^9 (1.555\ 97 \times 10^8)$	$5.241\ 19 \times 10^8 (1.192\ 11 \times 10^8)$	$6.529\ 40 \times 10^7 (1.479\ 22 \times 10^7)$	$4.962\ 66 \times 10^8 (1.152\ 65 \times 10^8)$
25	$4.421\ 91 \times 10^8 (1.092\ 02 \times 10^8)$	$1.657\ 79 \times 10^8 (4.540\ 17 \times 10^7)$	0(0)	$1.607\ 95 \times 10^8 (4.023\ 78 \times 10^7)$
26	$1.777\ 25 \times 10^9 (1.934\ 82 \times 10^8)$	$6.568\ 70 \times 10^8 (2.454\ 49 \times 10^8)$	0(0)	$7.388\ 94 \times 10^8 (1.585\ 41 \times 10^8)$
27	$1.795\ 64 \times 10^9 (2.213\ 03 \times 10^8)$	$8.706\ 22 \times 10^8 (2.306\ 24 \times 10^8)$	$1.024\ 80 \times 10^8 (5.410\ 98 \times 10^7)$	$5.873\ 71 \times 10^8 (2.051\ 48 \times 10^8)$
28	$1.479\ 96 \times 10^9 (1.216\ 18 \times 10^8)$	$4.841\ 15 \times 10^8 (2.077\ 12 \times 10^8)$	$6.534\ 90 \times 10^7 (2.680\ 35 \times 10^7)$	$5.813\ 78 \times 10^8 (1.240\ 83 \times 10^8)$
29	$2.257\ 31 \times 10^9 (2.306\ 66 \times 10^8)$	$8.441\ 12 \times 10^8 (1.999\ 80 \times 10^8)$	$1.207\ 43 \times 10^8 (2.037\ 80 \times 10^7)$	$6.278\ 70 \times 10^8 (3.019\ 43 \times 10^8)$
30	$1.241\ 31 \times 10^9 (1.613\ 98 \times 10^8)$	$4.253\ 16 \times 10^8 (1.883\ 08 \times 10^8)$	$6.782\ 16 \times 10^7 (0)$	$4.720\ 46 \times 10^8 (1.288\ 79 \times 10^8)$

表 7 在部分物资不充分情况下的超体积指标

Table 7 Ultra-volume index in the case of insufficient supply of some supplies

实例	HSPEA2+SDE	NSGA-II	NSGA-III	MOEA/D-IEpsilon
1	$9.746\ 94 \times 10^8 (1.466\ 39 \times 10^8)$	$5.458\ 81 \times 10^8 (1.405\ 89 \times 10^8)$	0(0)	$3.975\ 01 \times 10^8 (1.568\ 84 \times 10^8)$
2	$6.808\ 75 \times 10^8 (6.271\ 60 \times 10^7)$	$3.997\ 03 \times 10^8 (9.315\ 38 \times 10^7)$	0(0)	$3.354\ 98 \times 10^8 (8.836\ 50 \times 10^7)$
3	$5.197\ 03 \times 10^8 (3.423\ 48 \times 10^7)$	$2.654\ 02 \times 10^8 (8.673\ 08 \times 10^7)$	0(0)	$2.112\ 69 \times 10^8 (7.264\ 70 \times 10^7)$

表 7(续)

实例	HSPEA2+SDE	NSGA-II	NSGA-III	MOEA/D-IEpsilon
4	5.137 61×10 ⁸ (7.912 16×10 ⁷)	3.417 64×10 ⁸ (9.322 89×10 ⁷)	9.725 47×10 ⁶ (0)	2.128 23×10 ⁸ (8.629 28×10 ⁷)
5	8.963 47×10 ⁸ (1.431 41×10 ⁸)	4.820 11×10 ⁸ (1.480 94×10 ⁸)	1.169 82×10 ⁷ (0)	3.955 17×10 ⁸ (1.379 07×10 ⁸)
6	1.253 22×10 ⁹ (1.279 58×10 ⁸)	5.972 10×10 ⁸ (1.770 23×10 ⁸)	0(0)	5.994 95×10 ⁸ (1.590 56×10 ⁸)
7	1.125 65×10 ⁹ (5.551 24×10 ⁷)	6.209 29×10 ⁸ (1.558 90×10 ⁸)	1.553 79×10 ⁷ (0)	5.071 58×10 ⁸ (1.304 97×10 ⁸)
8	9.354 94×10 ⁸ (1.210 63×10 ⁸)	4.705 92×10 ⁸ (1.225 64×10 ⁸)	8.947 33×10 ⁶ (0)	3.448 35×10 ⁸ (9.079 85×10 ⁷)
9	1.860 98×10 ⁸ (3.294 48×10 ⁷)	1.046 69×10 ⁸ (3.529 85×10 ⁷)	0(0)	9.008 91×10 ⁷ (2.548 00×10 ⁷)
10	2.553 06×10 ⁸ (2.944 47×10 ⁷)	1.254 78×10 ⁸ (3.697 95×10 ⁷)	0(0)	9.978 54×10 ⁷ (3.255 70×10 ⁷)
11	1.073 93×10 ⁹ (5.630 81×10 ⁷)	4.417 19×10 ⁸ (1.399 10×10 ⁸)	6.671 56×10 ⁷ (0)	4.399 98×10 ⁸ (1.382 40×10 ⁸)
12	6.844 33×10 ⁸ (8.643 02×10 ⁷)	3.640 44×10 ⁸ (8.699 46×10 ⁷)	0(0)	2.366 26×10 ⁸ (7.899 26×10 ⁷)
13	9.603 36×10 ⁸ (4.606 06×10 ⁷)	5.132 03×10 ⁸ (1.669 62×10 ⁸)	3.198 41×10 ⁷ (0)	4.076 14×10 ⁸ (1.363 71×10 ⁸)
14	1.065 75×10 ⁹ (6.673 84×10 ⁷)	6.728 99×10 ⁸ (1.127 21×10 ⁸)	0(0)	3.754 08×10 ⁸ (1.129 27×10 ⁸)
15	1.389 54×10 ⁹ (8.794 70×10 ⁷)	5.930 90×10 ⁸ (1.682 75×10 ⁸)	0(0)	4.991 66×10 ⁸ (1.651 97×10 ⁸)
16	8.694 57×10 ⁸ (2.204 80×10 ⁸)	4.804 22×10 ⁸ (1.616 45×10 ⁸)	0(0)	4.100 83×10 ⁸ (1.616 87×10 ⁸)
17	5.340 28×10 ⁸ (5.799 53×10 ⁷)	3.403 46×10 ⁸ (9.609 76×10 ⁷)	4.899 24×10 ⁶ (0)	2.161 84×10 ⁸ (7.327 98×10 ⁷)
18	1.078 70×10 ⁹ (8.118 53×10 ⁷)	4.399 78×10 ⁸ (1.526 46×10 ⁸)	0(0)	4.337 78×10 ⁸ (1.362 99×10 ⁸)
19	9.362 15×10 ⁸ (1.277 30×10 ⁸)	4.633 03×10 ⁸ (1.659 44×10 ⁸)	3.389 57×10 ⁷ (0)	4.966 00×10 ⁸ (1.379 01×10 ⁸)
20	4.388 27×10 ⁸ (5.413 41×10 ⁷)	2.404 22×10 ⁸ (6.656 44×10 ⁷)	9.639 05×10 ⁶ (0)	2.029 26×10 ⁸ (7.015 97×10 ⁷)
21	1.005 39×10 ⁹ (2.391 21×10 ⁸)	5.245 63×10 ⁸ (1.354 33×10 ⁸)	0(0)	3.804 61×10 ⁸ (1.425 48×10 ⁸)
22	3.807 78×10 ⁸ (6.118 21×10 ⁷)	2.179 63×10 ⁸ (6.162 11×10 ⁷)	0(0)	1.920 88×10 ⁸ (5.600 59×10 ⁷)
23	3.664 49×10 ⁸ (4.122 09×10 ⁷)	1.849 79×10 ⁸ (5.251 74×10 ⁷)	0(0)	1.470 10×10 ⁸ (5.113 02×10 ⁷)
24	1.244 45×10 ⁹ (7.859 12×10 ⁷)	7.927 07×10 ⁸ (2.158 36×10 ⁸)	3.369 58×10 ⁷ (1.172 47×10 ⁷)	6.715 67×10 ⁸ (1.861 92×10 ⁸)
25	9.830 54×10 ⁸ (1.103 12×10 ⁸)	6.193 02×10 ⁸ (1.883 88×10 ⁸)	0(0)	4.646 18×10 ⁸ (1.378 17×10 ⁸)
26	4.274 74×10 ⁸ (3.375 67×10 ⁷)	1.705 29×10 ⁸ (5.630 00×10 ⁷)	0(0)	1.217 43×10 ⁸ (4.017 84×10 ⁷)
27	1.042 22×10 ⁹ (1.009 33×10 ⁸)	6.507 21×10 ⁸ (1.574 78×10 ⁸)	5.047 14×10 ⁷ (1.382 36×10 ⁷)	3.628 11×10 ⁸ (1.002 67×10 ⁸)
28	1.308 17×10 ⁹ (1.236 09×10 ⁸)	6.956 46×10 ⁸ (2.001 91×10 ⁸)	0(0)	5.118 85×10 ⁸ (1.427 80×10 ⁸)
29	7.561 51×10 ⁸ (1.068 95×10 ⁸)	3.928 36×10 ⁸ (1.268 20×10 ⁸)	1.978 00×10 ⁷ (1.658 38×10 ⁷)	3.132 91×10 ⁸ (1.007 94×10 ⁸)
30	5.795 18×10 ⁸ (7.005 99×10 ⁷)	3.600 74×10 ⁸ (9.568 16×10 ⁷)	1.356 90×10 ⁷ (4.038 01×10 ⁶)	3.343 28×10 ⁸ (8.897 75×10 ⁷)

表 8 在物资完全充分情况下的超体积指标

Table 8 Ultra-volume index in the case of fully sufficient supplies

实例	HSPEA2+SDE	NSGA-II	NSGA-III	MOEA/D-IEpsilon
1	5.187 14×10 ⁸ (7.839 83×10 ⁷)	2.271 98×10 ⁸ (9.669 59×10 ⁷)	0(0)	2.051 46×10 ⁸ (8.009 93×10 ⁷)
2	3.189 08×10 ⁸ (6.949 03×10 ⁷)	2.737 91×10 ⁸ (7.427 85×10 ⁷)	1.014 02×10 ⁷ (4.987 26×10 ⁶)	2.654 10×10 ⁸ (6.632 76×10 ⁷)
3	7.524 53×10 ⁸ (5.082 62×10 ⁷)	4.216 76×10 ⁸ (1.040 98×10 ⁸)	0(0)	4.013 77×10 ⁸ (1.102 65×10 ⁸)
4	1.048 70×10 ⁹ (1.041 99×10 ⁸)	6.141 42×10 ⁸ (1.603 65×10 ⁸)	0(0)	5.247 90×10 ⁸ (1.376 47×10 ⁸)
5	4.756 51×10 ⁸ (9.513 28×10 ⁷)	3.027 98×10 ⁸ (7.948 42×10 ⁷)	6.845 40×10 ⁶ (0)	2.603 07×10 ⁸ (7.576 92×10 ⁷)
6	8.626 83×10 ⁸ (1.087 68×10 ⁸)	5.625 49×10 ⁸ (1.195 12×10 ⁸)	2.061 87×10 ⁷ (0)	4.427 11×10 ⁸ (1.537 43×10 ⁸)
7	7.684 76×10 ⁸ (1.014 08×10 ⁸)	4.283 41×10 ⁸ (1.235 80×10 ⁸)	1.765 27×10 ⁷ (8.208 32)	3.944 25×10 ⁸ (1.142 08×10 ⁸)
8	9.220 08×10 ⁸ (8.374 11×10 ⁷)	6.057 82×10 ⁸ (1.513 05×10 ⁸)	7.588 66×10 ⁶ (0)	3.908 88×10 ⁸ (1.299 89×10 ⁸)
9	1.592 67×10 ⁹ (1.648 79×10 ⁸)	9.661 80×10 ⁸ (2.351 80×10 ⁸)	0(0)	6.664 63×10 ⁸ (1.831 52×10 ⁸)
10	4.620 94×10 ⁸ (6.847 00×10 ⁷)	2.323 05×10 ⁸ (8.263 29×10 ⁷)	0(0)	2.460 38×10 ⁸ (7.069 59×10 ⁷)
11	1.228 91×10 ⁸ (1.765 56×10 ⁷)	7.601 16×10 ⁷ (3.021 20×10 ⁷)	0(0)	7.289 63×10 ⁷ (1.795 11×10 ⁷)
12	9.426 04×10 ⁸ (5.197 34×10 ⁷)	6.577 31×10 ⁸ (1.519 37×10 ⁸)	3.851 01×10 ⁷ (3.249 19×10 ⁷)	5.715 50×10 ⁸ (1.493 72×10 ⁸)
13	4.796 28×10 ⁸ (4.068 87×10 ⁷)	2.552 57×10 ⁸ (8.936 98×10 ⁷)	0(0)	2.149 76×10 ⁸ (5.313 20×10 ⁷)

表 8(续)

实例	HSPEA2+SDE	NSGA-II	NSGA-III	MOEA/D-IEpsilon
14	4.147 52×10 ⁸ (5.811 43×10 ⁷)	2.157 20×10 ⁸ (6.882 80×10 ⁷)	0(0)	1.632 03×10 ⁸ (6.516 92×10 ⁷)
15	1.124 59×10 ⁹ (1.251 93×10 ⁸)	5.981 48×10 ⁸ (1.785 26×10 ⁸)	1.632 34×10 ⁷ (0)	6.554 74×10 ⁸ (1.552 94×10 ⁸)
16	9.192 73×10 ⁸ (1.417 90×10 ⁸)	5.687 62×10 ⁸ (1.490 43×10 ⁸)	3.084 84×10 ⁷ (0)	5.220 52×10 ⁸ (1.453 75×10 ⁸)
17	3.456 29×10 ⁸ (6.052 87×10 ⁷)	2.001 89×10 ⁸ (7.302 74×10 ⁷)	5.647 06×10 ⁶ (0)	1.971 31×10 ⁸ (5.673 20×10 ⁷)
18	4.564 53×10 ⁸ (6.705 34×10 ⁷)	2.381 58×10 ⁸ (8.912 20×10 ⁷)	0(0)	2.339 28×10 ⁸ (6.494 39×10 ⁷)
19	8.136 88×10 ⁸ (1.541 50×10 ⁸)	7.159 08×10 ⁸ (1.176 99×10 ⁸)	1.871 30×10 ⁷ (1.286 17×10 ⁷)	5.960 08×10 ⁸ (1.360 22×10 ⁸)
20	1.402 79×10 ⁸ (5.697 89×10 ⁷)	1.463 65×10 ⁸ (3.520 90×10 ⁷)	2.547 21×10 ⁶ (4.791 91)	1.362 29×10 ⁸ (3.411 14×10 ⁷)
21	4.770 43×10 ⁸ (5.570 27×10 ⁷)	3.314 73×10 ⁸ (8.520 59×10 ⁷)	0(0)	2.085 54×10 ⁸ (7.167 98×10 ⁷)
22	9.589 03×10 ⁸ (1.363 40×10 ⁸)	6.269 03×10 ⁸ (1.294 88×10 ⁸)	1.960 58×10 ⁷ (6.505 93×10 ⁶)	4.468 97×10 ⁸ (1.387 53×10 ⁸)
23	1.477 45×10 ⁹ (1.720 98×10 ⁸)	9.082 63×10 ⁸ (2.336 97×10 ⁸)	2.036 07×10 ⁷ (0)	6.481 60×10 ⁸ (2.543 05×10 ⁸)
24	6.042 49×10 ⁸ (9.237 08×10 ⁷)	4.292 71×10 ⁸ (1.209 16×10 ⁸)	0(0)	3.166 91×10 ⁸ (9.244 87×10 ⁷)
25	7.346 66×10 ⁸ (1.106 06×10 ⁸)	4.873 39×10 ⁸ (1.659 05×10 ⁸)	2.920 67×10 ⁷ (0)	4.217 80×10 ⁸ (1.277 60×10 ⁸)
26	8.533 53×10 ⁸ (1.571 91×10 ⁸)	6.284 81×10 ⁸ (1.821 27×10 ⁸)	5.475 66×10 ⁷ (1.539 70×10 ⁷)	5.226 37×10 ⁸ (1.622 60×10 ⁸)
27	1.388 62×10 ⁹ (1.640 26×10 ⁸)	8.546 54×10 ⁸ (2.036 70×10 ⁸)	1.288 27×10 ⁷ (0)	7.251 17×10 ⁸ (1.813 72×10 ⁸)
28	2.497 25×10 ⁸ (4.509 46×10 ⁷)	1.633 35×10 ⁸ (4.738 71×10 ⁷)	0(0)	1.242 43×10 ⁸ (3.942 14×10 ⁷)
29	8.694 94×10 ⁷ (1.616 07×10 ⁷)	4.411 34×10 ⁷ (1.821 86×10 ⁷)	0(0)	4.917 76×10 ⁷ (1.585 40×10 ⁷)
30	6.602 36×10 ⁸ (1.200 33×10 ⁸)	4.703 12×10 ⁸ (1.187 64×10 ⁸)	2.103 09×10 ⁷ (1.823 05×10 ⁷)	4.526 73×10 ⁸ (1.096 32×10 ⁸)

表 9 所示为在 3 个阶段内供应物资中断次数, A, B, C, D 分别指 HSPEA2+SDE、NSGA-II、NSGA-III、MOEA/D-IEpsilon。从表 9 可以看出, HSPEA2+SDE 的非连续断点远少于其他 3 个算法。在经过启发式修正后,物资会更加均匀地按照每个受灾点所需分配物资,避免出现其他算法为了偏向完成阶段内物资的连续传输,导致某个受灾点的某种物资提供量为 0。

表 9 3 个阶段内物资供应中断次数
Table 9 Number of material supply interruptions during the three phases

实例	第 1 个阶段				第 2 个阶段				第 3 个阶段			
	中断次数/次				中断次数/次				中断次数/次			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	1	1	17	0	1	0	21	0	0	1	18
2	0	1	2	14	0	0	1	16	0	0	0	20
3	0	1	2	9	0	0	1	15	0	0	1	16
4	0	1	2	12	0	0	0	15	0	0	1	9
5	0	1	1	19	0	0	0	35	0	0	2	26
6	0	3	3	15	0	1	1	17	0	0	1	16
7	0	2	3	19	0	0	0	10	0	0	0	14
8	0	1	3	24	0	0	0	10	0	0	1	16
9	0	1	2	15	0	1	2	13	0	1	2	15
10	0	1	1	11	0	1	1	12	0	0	0	17
11	0	3	1	23	0	1	0	19	0	0	0	11
12	0	0	1	10	0	0	1	15	0	1	2	15
13	0	2	1	19	0	0	1	10	0	0	2	12
14	0	1	3	14	0	0	1	41	0	0	1	18

表 9(续)

实例	第 1 个阶段				第 2 个阶段				第 3 个阶段			
	中断次数/次				中断次数/次				中断次数/次			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
15	0	1	1	14	0	0	0	18	0	0	1	11
16	0	0	0	12	0	1	1	33	0	0	1	35
17	0	2	3	16	0	0	0	15	0	1	3	16
18	0	1	3	24	0	0	1	8	0	0	0	12
19	0	1	1	12	0	0	2	15	0	0	2	20
20	0	3	1	16	0	1	0	17	0	0	0	12
21	0	2	2	15	0	1	1	18	0	0	0	12
22	0	0	2	7	0	2	1	15	0	0	0	11
23	0	2	1	15	0	2	1	20	0	1	2	23
24	0	1	2	15	0	1	1	13	0	0	1	10
25	0	1	0	12	0	1	1	21	0	0	1	16
26	0	1	2	15	0	1	1	18	0	0	1	14
27	0	2	2	20	0	0	1	18	0	0	1	13
28	0	2	1	15	0	0	1	14	0	0	0	14
29	0	2	2	17	0	1	2	15	0	0	1	22
30	0	1	1	8	0	0	0	16	0	0	0	15

表 10 ~ 表 13 所示为 HSPEA2+SDE、NSGA-II、MOEA/D-IEpsilon 和 NSGA-III 的阶段连续性,其中 E、F、G、H 分别指第 1 个阶段最后最短持续时间、第 2 个阶段的首批布置时间、第 2 个阶段的最后最短持续时间和第 3 个阶段的首批布置时间。通过阶段最后一批物资持续时间和下一阶段第一批物资部署时间可以看出,由于第 1 个阶段物资全部都不充分,因此 NSGA-II、NSGA-III 和

MOEA/D-IEpsilon 得到的物资分配方案在分发完储备物资的情况下,需要等待第 2 个阶段的开启,这段时间就会导致第 1 个阶段和第 2 个阶段是不连续的。而修正后的 HSPEA2+SDE 经过确认了第 1 个阶段最早消耗结束的物资和受灾点,从而提前开启了下一个阶段的物资分配。因此,后续每个阶段的第一批物资的布置时间都在前一个阶段的物资满足持续消耗的时间内,从而实现了阶段间连续的衔接。而其他 3 种算法在第 1 个阶段物资不充足的情况下都无法达到阶段间的连续性,在第 2 个阶段大部分也无法达到与第 3 个阶段的连续衔接。因此,修正后 HSPEA2+SDE 的救灾分配方案要优于 NSGA-II、NSGA-III 和 MOEA/D-IEpsilon 的救灾物资分配方案。

表 10 HSPEA2+SDE 阶段连续性
Table 10 Phase continuity of HSPEA2+SDE

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个 阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个 阶段间连续性
1	12.5	1	连续	15.7	1	连续
2	14.5	1	连续	26.3	1	连续
3	11.8	1	连续	26.1	1	连续
4	20.6	1	连续	18.2	1	连续
5	25.7	1	连续	25.3	2	连续
6	13.8	1	连续	9.1	2	连续
7	29.8	2	连续	6.1	2	连续
8	33.6	2	连续	25.6	1	连续
9	19.0	1	连续	19.6	2	连续
10	13.7	1	连续	15.6	2	连续
11	11.0	1	连续	25.9	1	连续
12	18.2	2	连续	21.0	1	连续
13	24.0	1	连续	21.9	1	连续
14	20.7	1	连续	27.1	1	连续
15	13.1	1	连续	17.7	1	连续
16	31.0	2	连续	20.7	1	连续
17	16.1	1	连续	29.8	1	连续
18	12.9	1	连续	23.3	1	连续
19	22.3	3	连续	18.0	2	连续
20	14.2	2	连续	27.1	1	连续
21	21.5	1	连续	13.9	1	连续
22	14.3	3	连续	11.4	1	连续
23	19.8	1	连续	26.1	1	连续
24	12.4	1	连续	23.7	1	连续
25	39.4	1	连续	24.4	3	连续
26	39.5	1	连续	15.0	1	连续
27	17.8	2	连续	14.1	1	连续
28	21.3	2	连续	23.6	1	连续
29	11.7	2	连续	15.7	1	连续
30	18.7	1	连续	17.7	2	连续

表 11 NSGA-II 阶段连续性
Table 11 Phase continuity of NSGA-II

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个 阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个 阶段间连续性
1	1.7	12	不连续	15.7	10	连续
2	22.6	69	不连续	20.4	1	连续
3	1.4	19	不连续	2.2	29	不连续
4	1.3	29	不连续	1.8	25	不连续
5	1.4	38	不连续	2.2	29	不连续
6	2.6	41	不连续	7.7	29	不连续
7	19.8	59	不连续	18.4	3	连续
8	1.3	40	不连续	2.2	29	不连续
9	1.7	45	不连续	1.8	19	不连续
10	4.3	15	不连续	1.3	3	不连续
11	2.6	50	不连续	6.6	2	连续
12	0	20	不连续	16.2	7	连续
13	1.7	51	不连续	0	29	不连续
14	6.7	56	不连续	16.7	4	连续
15	5.9	69	不连续	0	20	不连续
16	0	20	不连续	16.7	1	连续
17	1.3	15	不连续	11.8	3	连续
18	5.7	56	不连续	1.8	20	不连续
19	0	30	不连续	1.3	19	不连续
20	1.3	29	不连续	1.8	20	不连续
21	2.5	10	不连续	14.9	17	不连续
22	0	22	不连续	13.3	2	连续
23	0	19	不连续	4.3	18	不连续
24	1.4	19	不连续	3.6	22	不连续
25	0	46	不连续	2.2	18	不连续
26	1.3	19	不连续	1.8	19	不连续
27	0	17	不连续	0	20	不连续
28	1.3	35	不连续	2.2	14	不连续
29	0	62	不连续	7.1	10	不连续
30	12.7	56	不连续	11.3	2	连续

表 12 MOEA/D-IEpsilon 阶段连续性
Table 12 Phase continuity of MOEA/D-IEpsilon

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个 阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个 阶段间连续性
1	6.7	9	不连续	21.7	3	连续
2	44.1	70	不连续	25.8	39	连续
3	22.5	60	不连续	18.4	8	不连续
4	34.3	62	不连续	18.4	1	不连续
5	18.1	57	不连续	16.3	10	不连续
6	13.3	30	不连续	15.1	12	不连续
7	30.6	38	不连续	17.2	1	连续
8	31.0	39	不连续	27.4	9	不连续
9	30.8	39	不连续	15.8	1	不连续
10	19.6	78	不连续	13.7	2	不连续
11	55.5	68	不连续	21.1	37	不连续

表 12(续)

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个阶段间连续性
12	20.2	63	不连续	20.5	17	不连续
13	35.7	47	不连续	17.4	22	不连续
14	40.8	56	不连续	17.1	12	不连续
15	41.3	54	不连续	17.1	20	连续
16	26.2	41	不连续	18.1	21	不连续
17	9.7	38	不连续	21.8	10	不连续
18	8.3	41	不连续	19.3	2	不连续
19	8.7	55	不连续	13.2	4	不连续
20	34.6	44	不连续	13.2	12	不连续
21	28.5	42	不连续	17.1	2	不连续
22	41.1	66	不连续	19.3	8	不连续
23	4.3	44	不连续	16.3	6	不连续
24	58.4	69	不连续	21.1	18	不连续
25	20.5	43	不连续	18.4	15	不连续
26	26.6	60	不连续	18.4	8	不连续
27	16.3	41	不连续	13.8	4	不连续
28	31.1	33	不连续	19.6	5	不连续
29	16.7	23	不连续	19.3	6	不连续
30	41.7	51	不连续	18.1	2	连续

表 13(续)

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个阶段间连续性
22	0	48	不连续	15.3	20	不连续
23	0	55	不连续	0	18	不连续
24	0	20	不连续	0	19	不连续
25	0	38	不连续	2.2	19	不连续
26	0	20	不连续	1.8	14	不连续
27	0	38	不连续	2.2	19	不连续
28	0	60	不连续	2.2	14	不连续
29	0	62	不连续	7.1	19	不连续
30	17.2	65	不连续	12.3	5	连续

4.3 与已有方法的对比

在前面已经证明了启发式修正后的算法相较于其他传统进化算法在目标函数上有着更优的表现,能获得更优的分配方案。本节将启发式修正后的算法与文献[25]的多目标优化模型进行对比。

文献[25]算法的目标函数为最小经济成本和最大限度地减少紧急救援行动产生的损失,其中最大限度地减少紧急救援行动产生的损失与本文目标函数 f_4 计算的原理较为相似。鉴于目标函数数目和目标函数的不同,将随机生成的实例放入算法中得到分配方案,再根据分配方案的数值求出本文设置的 4 个目标函数值。

本文从连续性的角度出发,选择对比的解首先考虑取最小的 f_2 ,在 f_2 相同的情况下对比 f_4 , f_4 越小表明灾区等待救济物资的时间越短,对救灾更有利。在 f_2 和 f_4 相同的情况下, f_1 和 f_3 越小说明整个物资分配的总服务时间越短,救灾更及时,且每个受灾点服务的时长相近,具有更好的救济公平性。HSPEA2+SDE 和文献[25]算法对比结果如表 14 所示。从表 14 可以看出,在物资完全不充分的情况下,由 f_2 的值可以看出文献[25]算法的救济物资分配方案并没有完成微观上的连续,虽然 f_4 的值会更小一些,但是在整个运输物资的过程中会出现多次断点,并没有达到真正连续运输救济物资的目的。在物资部分充分和物资完全充分的情况下,文献[25]算法大部分例子的 f_2 为 0,达到正在的连续性,但是 f_1 、 f_3 、 f_4 都要大于 HSPEA2+SDE。即使文献[25]算法和 HSPEA2+SDE 都达到了连续性传输,但是 HSPEA2+SDE 在等待物资的时间更短,被服务的时长更短且更平均。综上所述,启发式修正后的 HSPEA2+SDE 更优于文献[25]算法。

表 13 NSGA-III 阶段连续性

Table 13 Phase continuity of NSGA-III

实例	E/h	F/h	第 1 个和第 2 个阶段间连续性	G/h	H/h	第 2 个和第 3 个阶段间连续性
1	0	67	不连续	14.4	3	连续
2	17.1	8	不连续	17.1	2	连续
3	0	30	不连续	0	30	不连续
4	0	36	不连续	1.8	25	不连续
5	0	30	不连续	2.2	29	不连续
6	1.4	19	不连续	2.2	39	不连续
7	16.7	57	不连续	18.4	6	连续
8	0	37	不连续	2.2	29	不连续
9	2.2	42	不连续	0	20	不连续
10	0	60	不连续	0	15	不连续
11	1.3	51	不连续	0	20	不连续
12	1.3	29	不连续	20.7	28	不连续
13	0	66	不连续	1.8	2	不连续
14	5.0	57	不连续	15.6	26	不连续
15	4.2	69	不连续	6.5	3	连续
16	0	35	不连续	19.3	20	不连续
17	16.2	18	不连续	16.9	21	不连续
18	1.4	68	不连续	0	20	不连续
19	0	62	不连续	0	29	不连续
20	0	28	不连续	1.8	2	不连续
21	0	58	不连续	10.7	20	不连续

表 14 HSPEA2+SDE 和文献[25]算法对比结果

Table 14 Comparison results between HSPEA2+SDE and literature [25] algorithms

实例	算法	物资完全不充分				物资部分充分				物资完全充分			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	HSPEA2+SDE	30.89	0	57	66.00	46.89	0	84	81.00	27.15	0	62	88.00
	文献[25]算法	51.61	88	93	59.29	58.84	0	105	93.00	36.08	1	78	96.77
2	HSPEA2+SDE	9.54	0	42	76.00	11.18	0	48	91.00	31.50	0	60	78.00
	文献[25]算法	42.13	9	87	76.52	48.38	1	99	92.55	65.73	0	99	81.00
3	HSPEA2+SDE	9.95	0	48	89.00	14.00	0	54	75.00	28.83	0	63	83.00
	文献[25]算法	39.97	53	81	72.42	53.98	0	99	84.00	81.88	2	126	95.76
4	HSPEA2+SDE	15.81	0	48	73.00	19.39	0	54	76.00	35.50	0	66	93.00
	文献[25]算法	63.29	61	117	50.74	69.94	0	132	77.00	54.25	0	96	94.00
5	HSPEA2+SDE	32.50	0	72	76.00	21.49	0	58	76.00	23.30	0	57	75.00
	文献[25]算法	71.33	123	114	57.69	37.62	1	93	94.14	44.90	0	96	74.00
6	HSPEA2+SDE	43.61	0	66	77.00	32.97	0	75	80.00	23.79	0	57	88.00
	文献[25]算法	77.88	44	99	63.87	65.98	0	114	81.00	37.11	1	81	97.29
7	HSPEA2+SDE	17.26	0	45	70.00	35.30	0	72	77.00	22.83	0	54	87.00
	文献[25]算法	39.41	11	84	59.24	61.40	0	105	77.00	30.94	0	75	113.00
8	HSPEA2+SDE	35.04	0	57	75.00	13.75	0	48	83.00	24.98	0	60	77.00
	文献[25]算法	67.91	83	87	70.17	62.31	1	120	84.00	34.10	0	81	84.00
9	HSPEA2+SDE	16.43	0	48	69.00	31.65	0	69	84.00	21.86	0	56	85.00
	文献[25]算法	49.64	42	81	54.07	39.96	1	78	93.97	86.43	0	120	87.00
10	HSPEA2+SDE	34.15	0	63	72.00	16.91	0	48	84.00	17.09	0	60	88.00
	文献[25]算法	47.29	64	84	69.32	53.24	1	96	85.94	50.85	0	102	94.00
11	HSPEA2+SDE	40.30	0	72	81.00	24.70	0	48	73.00	21.38	0	57	92.00
	文献[25]算法	59.83	49	96	66.09	59.53	0	90	75.00	47.15	1	93	99.91
12	HSPEA2+SDE	12.73	0	50	75.00	14.66	0	50	68.00	38.64	0	62	76.00
	文献[25]算法	37.04	41	87	61.89	37.68	0	87	69.00	49.73	0	93	77.00
13	HSPEA2+SDE	21.45	0	54	77.00	22.27	0	0	82.00	31.61	0	60	73.00
	文献[25]算法	52.60	47	93	68.27	60.05	0	111	92.00	75.78	1	114	73.75
14	HSPEA2+SDE	23.94	0	57	67.00	47.54	0	99	83.00	27.60	0	66	73.00
	文献[25]算法	53.22	2	96	59.68	22.25	0	63	78.00	62.45	0	87	75.00
15	HSPEA2+SDE	30.03	0	66	70.00	22.96	0	60	89.00	24.84	0	57	81.00
	文献[25]算法	46.85	13	84	69.68	43.68	3	96	99.36	45.87	0	90	86.00
16	HSPEA2+SDE	20.15	0	57	70.00	21.24	0	51	82.00	19.54	0	54	95.00
	文献[25]算法	61.21	107	96	59.98	49.64	0	93	85.00	95.72	0	114	100.00
17	HSPEA2+SDE	28.72	0	57	81.00	12.61	0	50	90.00	15.39	0	51	95.00
	文献[25]算法	59.78	99	90	60.56	50.61	0	105	91.00	41.22	2	96	99.30
18	HSPEA2+SDE	28.71	0	57	69.00	17.75	0	54	92.00	17.86	0	51	92.00
	文献[25]算法	48.57	5	88	66.87	50.82	2	2	97.88	54.99	0	96	102.00
19	HSPEA2+SDE	13.67	0	48	70.00	18.73	0	54	62.00	17.46	0	57	80.00
	文献[25]算法	32.26	69	78	58.74	67.44	0	108	65.00	60.65	1	102	87.77
20	HSPEA2+SDE	31.69	0	69	76.00	34.63	0	72	86.00	34.35	0	66	84.00
	文献[25]算法	61.77	71	114	69.23	57.11	0	105	87.00	40.82	0	81	87.00
21	HSPEA2+SDE	17.64	0	45	72.00	79.00	0	48	74.00	13.34	0	48	82.00
	文献[25]算法	38.69	21	21	56.91	50.41	0	99	79.00	40.82	1	90	98.67

表 14(续)

实例	算法	物资完全不充分				物资部分充分				物资完全充分			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
22	HSPEA2+SDE	26.23	0	57	69.00	20.42	0	51	72.00	35.20	0	69	74.00
	文献[25]算法	40.45	84	81	64.17	35.17	0	75	82.00	75.33	0	108	76.00
23	HSPEA2+SDE	17.06	0	51	76.00	17.18	0	48	76.00	13.34	0	48	89.00
	文献[25]算法	39.27	70	81	74.51	69.78	1	114	82.30	52.12	0	93	99.00
24	HSPEA2+SDE	13.34	0	45	90.00	22.63	0	51	80.00	13.60	0	44	75.00
	文献[25]算法	34.28	104	75	68.34	59.70	0	105	84.00	59.04	1	105	91.67
25	HSPEA2+SDE	20.98	0	54	68.00	20.25	0	48	72.00	15.49	0	48	71.00
	文献[25]算法	60.36	66	90	56.70	54.01	0	90	72.00	35.59	0	66	75.00
26	HSPEA2+SDE	30.07	0	69	69.00	12.04	0	51	83.00	13.64	0	48	74.00
	文献[25]算法	54.51	102	99	59.04	38.88	0	99	94.00	44.14	0	78	84.00
27	HSPEA2+SDE	28.98	0	57	79.00	14.53	0	45	79.00	28.93	0	60	77.00
	文献[25]算法	78.57	119	93	68.02	42.33	0	78	80.00	39.13	0	99	88.00
28	HSPEA2+SDE	13.23	0	45	77.00	21.59	0	56	69.00	14.73	0	51	73.00
	文献[25]算法	50.91	118	93	56.42	71.69	1	114	68.15	54.42	0	96	84.00
29	HSPEA2+SDE	26.91	0	45	68.00	33.14	0	63	78.00	24.33	0	51	79.00
	文献[25]算法	66.63	86	78	57.73	76.13	1	117	80.10	43.12	1	90	85.94
30	HSPEA2+SDE	19.70	0	60	75.00	11.22	0	39	87.00	31.97	0	60	70.00
	文献[25]算法	45.97	8	78	59.39	51.87	1	87	96.67	66.98	0	105	75.00

5 结束语

大型自然灾害物资分配是灾害发生后开展应急处置和救援的基本前提。为此,本文在分析和总结相关工作的基础上,首先从公平性和连续性角度构建了一种面对多储备点、多应急物资、多事故点的应急物资多目标分配模型,重点分析了满足应急物资连续消耗的约束条件,并基于启发式修正的 SPEA2+SDE 和个体启发式修正策略,设计了一种应急物资多目标分配算法 HSPEA2+SDE 并与相关已有的方法进行对比。实验结果表明,本文所提的个体启发式修正策略能够驱使个体迅速满足应急物资的供需约束和连续消耗约束,显著增强 HSPEA2+SDE 的探索能力,为决策者提供更好的应急物资分配方案。后续将考虑动态的物资变化,研究应急物资需求动态变化下的分配问题。

参考文献

- [1] 应急管理部. 2019 年上半年全国自然灾害基本情况[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 172.
Ministry of Emergency Management. Basic situation of natural disasters nationwide in the first half of 2019[J]. China Production Safety Science and Technology, 2019, 15(7): 172. (in Chinese)
- [2] LIN Y H, BATT A R, ROGERSON P A, et al. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2011,

- 45(4): 132-145.
- [3] HUANG M, SMILOWITZ K, BALCIK B. Models for relief routing: equity, efficiency and efficacy[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(1): 2-18.
- [4] HOLGUÍN-VERAS J, PÉREZ N, JALLER M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. Journal of Operations Management, 2013, 31(5): 262-280.
- [5] YANG Z S, ZHOU H X, GAO X Y, et al. Multiobjective model for emergency resources allocation[EB/OL]. [2023-09-08]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2013/538695>.
- [6] HUANG K, JIANG Y P, YUAN Y F, et al. Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 75: 1-17.
- [7] WANG Y Y, SUN B Q. A multiobjective allocation model for emergency resources that balance efficiency and fairness[EB/OL]. [2023-09-08]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2018/7943498>.
- [8] SU Z P, ZHANG G F, LIU Y, et al. Multiple emergency resource allocation for concurrent incidents in natural disasters[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 17: 199-212.
- [9] ZHOU Y W, LIU J, ZHANG Y T, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 99: 77-95.
- [10] 葛敏, 陈晓平, 吴凤平. 基于受灾人员损失的应急资源网络多周期配置[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017(4): 105-114.
GE M, CHEN X P, WU F P. Disaster chain, loss of victims in the disaster and multi-period allocation of complex

- emergency resources networks [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2017(4): 105-114. (in Chinese)
- [11] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 86-92. ZHANG G F, WANG Y Q, SU Z P, et al. Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 86-92. (in Chinese)
- [12] SOUZA J S, LIM-APO F A, VARELLA L, et al. Multi-period optimization model for planning people allocation in shelters and distributing aid with special constraints [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, 79:101087.
- [13] WANG F Y, XIE Z L, LIU H, et al. Multiobjective emergency resource allocation under the natural disaster chain with path planning [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(13): 7876.
- [14] MA Q D, ZHANG D Z, WAN C P, et al. Multi-objective emergency resources allocation optimization for maritime search and rescue considering accident black-spots[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 261: 112178.
- [15] WANG Y Y. Multiperiod optimal allocation of emergency resources in support of cross-regional disaster sustainable rescue[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2021, 12(3): 394-409.
- [16] KATSORAS E, GEORGIADIS P. A dynamic analysis for mitigating disaster effects in closed loop supply chains[J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 4948.
- [17] CAO C J, LI J, LIU J, et al. Sustainable development-oriented location-transportation integrated optimization problem regarding multi-period multi-type disaster medical waste during COVID-19 pandemic[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 335:1401-1447.
- [18] CAO C J, LIU Y, TANG O, et al. A fuzzy bi-level optimization model for multi-period post-disaster relief distribution in sustainable humanitarian supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 235: 108081.
- [19] ZHANG P Y, LIU Y K, YANG G Q, et al. A multi-objective distributionally robust model for sustainable last mile relief network design problem[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 309(2): 689-730.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] LI M Q, YANG S X, LIU X H. Shift-based density estimation for Pareto-based algorithms in many-objective optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(3): 348-365.
- [22] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
- [23] FAN Z, LI W J, CAI X Y, et al. An improved epsilon constraint-handling method in MOEA/D for CMOPs with large infeasible regions[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(23): 12491-12510.
- [24] LI M Q, YAO X. Quality evaluation of solution sets in multiobjective optimisation [J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, 52(2): 1-38.
- [25] LIU Y H, LI Y C, HUANG D. A multiobjective optimization model for continuous allocation of emergency rescue materials[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 5693182.

编辑 薛晋栋