

王伟, 余志成, 王芸清, 等. 国家应急物资储备基地选址模型与平台设计[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 173–181. [WANG Wei, YU Zhicheng, WANG Yunqing, et al. Multi-objective Programming Model for a Class of Flood Disaster Emergency Materials Transportation [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 173–181. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.027.]

考虑经济损失的城市防汛应急物资调配 多目标优化研究^{*}

王伟¹, 余志成¹, 王芸清¹, 黄莉², 卢恒³

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 公共管理学院, 江苏 南京 211100;
3. 江苏省水利防汛物资储备中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 城市防汛是自然灾害防治的热门话题, 为减少洪涝带来的高密度经济损失, 需在应急响应期内科学合理地将防汛应急物资配送至各受灾点。以优化响应阶段直接损失、恢复阶段额外缺货损失、物资调运总耗时等多目标, 基于江苏省历史洪涝灾害及防汛应急物资储备数据, 构建解决多出救点、多受灾点、多类应急物资的城市防汛应急物资调配的多目标优化模型, 采用基于 Pareto 概念的进化算法求解并通过计算机仿真模拟演算, 最终用逼近理想解的排序方法得到优化结果, 给出了三套可行的防汛应急物资调配方案, 可为我国城市防汛应急物资调运提供决策参考。

关键词: 自然灾害; 城市防汛; 应急物资; 多目标优化; 直接经济损失; 物资满意度

中图分类号: X43; X915.5; TV871.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0173-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.027

洪涝灾害是我国城市最主要的自然灾害之一, 全球变暖、我国城镇化迅速发展等原因造成我国城市洪涝灾害现象越来越严重。近年来呈现如2021年7月河南省郑州市遭遇历史罕见特大暴雨遭受重大人员伤亡和财产损失, 引起了全国范围的广泛关注。防汛应急物资在洪涝灾害发生时起着关键性支撑作用, 关乎到防汛抢险工作的顺利实施^[1-2], 根据实时灾害监测评估灾情走向^[3-4], 将应急物资调运到位^[5], 尽可能减少灾害损失一直是学者们研究的热门话题。

洪涝作为与地震相似的大规模自然灾害具有广域性, 灾发时, 城市内多处辖区均会受到影响^[6], 所以防汛抢险工作是需要从多需求点、多储备点角度出发的。国内外早有学者对多对多物资调运开展了各个角度的研究^[7-10], FENG等^[11]针对出救点选址问题, 同时考虑经济型和实效性以及出救单位的疲劳程度, 建立了多目标优化模型; FIEDRICH等^[12]依据幸存人数等关键影响因素建立震后智能物资分配模型, 有效地结合现代科技进行灾后救援; 刘芳等^[13]也基于改进蚁群优化BP神经网络算法(IACO-BP)建立了洪涝发生时初步预测转移人数的模型, 并给出了根据结果预测应急物资需求的思路; 张庆等^[14]则综合灾前

准备和灾后响应两阶段, 建立了一种两阶段多目标混合整数规划模型, 优化出多种防汛方案, 在保证应急救灾及时有效以及物资分配公平的前提下, 给出了供决策取舍的空间。

当然, 防汛物资也分一次性物资(救生艇、帐篷)和持续性消耗物资(药品、食品)^[15-17], 后者在抗洪抢险过程中不断消耗需要补充, 如果出现断供也会妨碍救援开展, 在应急决策中往往难度更大, 也更重要。刘春林等^[18]从多出救点的角度引入了连续可行方案的概念, 并提出了以花费时间最短的模型, 在该概念的基础上, 戴更新等^[19]完成了从单资源到多资源连续可行方案的延伸, 提出了相关求解方法。宋晓宇等^[20]沿用这一思路引入了灰色理论的知识, 建立了应急开始时间最短、出救点个数最少以及需求约束偏爱度最大的多目标灰色规划模型。卢建锋等^[21]以缺货损失最小、调运时间最短和调运总环境风险最小为优化目标, 将应急中心物资数量限制和救援时间限制作为约束条件建立了多对一, 多物资调运优化模型。王苏生等^[22]提出一种多对多, 多种物资的应急资源配置模型, 能够快速求取双层应急资源配置模型的全局最优解, 还能保证复杂度在较高水准。

^{*} 收稿日期: 2022-10-12 修回日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于需求驱动的三防应急物资储备优化与集成调度研究”(71974052); 国家重点研发计划项目“粤港澳大湾区衍生复合灾害评估与应急避险关键技术”课题“复合灾害衍生风险及多灾种组合灾变风险传递叠加评估”(2021YFC3001002); 江苏省水利科技计划项目“江苏省防汛防旱物资应急物流体系建设运行关键技术研究与应用”(2020023)

第一作者简介: 王伟(1979-), 男, 汉族, 湖北天门人, 教授, 主要从事水灾害应急管理理论与应用研究. E-mail: 13813826667@163.com
通信作者: 余志成(1998-), 男, 汉族, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究方向为港口物流和应急物流. E-mail: 201303030010@hhu.edu.cn

在城市防汛应急物流方面,现有的成果大多研究交通、选址、效率问题。而针对城市洪涝特性,从实际情况出发的多出救点、多受灾点、多种物资的应急物流优化成果尚且稀缺,本文立足洪涝直接经济损失估算和物资连续消耗假设,以2020年历史洪涝灾害数据及江苏省防汛物资储备情况为依据,提出了多目标规划模型,采用基于Pareto概念的进化算法求解并通过计算机仿真来模拟演算,最终运用Topsis排序法选择出最佳优化方案和耗时最少方案供决策者参考。

1 建模准备

本文所研究问题可以如此描述:某区域遭遇强降雨,范围内的各受灾城市短期会因防汛物资的匮乏承受巨大损失,而实际应急行动中往往需要确保首批物资及时安置到位,所以将受灾地承受的经济损失按照响应阶段和恢复阶段两个阶段分别计算。以目前的科学技术水平,决策者也无法精确地评估缺少某指定物资会带来多少损失,所以以物资均匀消耗为前提设计物资满意度来量化经济损失,以确保主要城市或严重灾情的优先救援为前提,选取最优调度方案。

1.1 模型符号说明

为了形象地表达模型,现将构成模型的几项重要符号予以说明:

(1) $A \& B \& M$ (出救点集合 & 受灾点集合 & 应急物资集合),即每一个出发地、目的地以及运送货物都拥有自己的编号。 A_i 表示出救点 ($i=1, 2, \dots, m$), B_j 表示受灾点 ($j=1, 2, \dots, n$), M_k 表示 B_j 所需要的第 k 种物资 ($k=1, 2, \dots, s$);

(2) 决策变量 x_{ij}^k , 指方案决定由 A_i 送往 B_j 的第 k 种物资数量, x_{ij}^k 的大小将直接决定各受灾点应急救援过程中的损失,单位为托盘 (pallet);

(3) $0 \sim 1$ 变量 R_{ij}^l , 用于判断灾害发生时 A_i 是否为 B_j 提供物资, $R_{ij}^l = 1$ 为提供, $R_{ij}^l = 0$ 为不提供, l 则表示到达受灾点的顺序,需要视调运时间而定 ($l=1, 2, \dots, m$);

其余建模用符号见后续说明。

1.2 模型假定

在物资总量及调运速度有限的情况下,各个受灾点的需求间往往会形成冲突,在博弈论中称之为非合作博弈,且实际上考虑进地形、道路堵塞等因素后会更加复杂,为规避其影响,保证模型的合理及有效性,需提出如下假定:

假定1 各地统一救援开始时间 (记为 T_0), 降水以及救援开始后各点各应急物资的消耗视作匀速,速率分别为 E_j 和 V_j^k (见1.3);

假定2 洪涝所造成的经济损失分阶段进行理想的估算,灾害发生后,在响应阶段物资未到达的情况下,各受灾点所承受的直接经济损失增长率按照1.4.1计算,首批响应物资到达一瞬间进入恢复阶段,额外缺货损失增长按照1.4.2计算;

假定3 在恢复阶段,仅在物资再度陷入短缺时才会承担经济损失,有物资的情况下损失判定为零,不考虑其他任何因素;

假定4 出救点 A_i 到受灾点 B_j 所需的运输时间 t_{ij} 为理想情况,即不考虑因洪水而导致的道路封堵等情况。

1.3 物资连续消耗

首批物资在配送到达受灾点后开始被分发或使用,消耗速率视作匀速,那么其中第 k 种物资的

库存量随时间的变化关系应如图1所示。

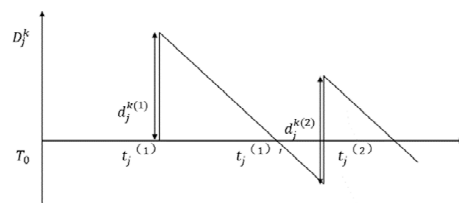


图1 受灾点 B_j 的第 k 种物资连续消耗下库存量变化图

图1中,当物资库存量曲线降至0以下时,并非库存量真的变成了负数, $t_j^{(1)} \sim t_j^{(2)}$ 如表示在恢复阶段中这段时间,首批物资分发殆尽,再次陷入了短缺状态,直至第二批资源到达前,“下欠”了这么多资源,如此设计可以将物资未满足时造成的缺口一定程度上可视化。引入一个判断变量 R_{ij}^l , 设定 $R_{ij}^l = 1$ 时为出救点 A_i 在 T_0 时决定为 B_j 提供物资,由此我们可以得到如下3条关系式:

$$\sum_{l=1}^m R_{ij}^l = 1; \quad (1)$$

$$t_j^l = \sum_{l=1}^m R_{ij}^l t_{ij}; \quad (2)$$

$$d_j^{k(l)} = \sum_{l=1}^m R_{ij}^l x_{ij}^k. \quad (3)$$

式(1)表示 m 个出救点中有且只有一个是第 l 个到达受灾点 B_j ; 式(2)表示第 l 个到达受灾点 B_j 的时间只能是 m 个应急中心中的一个; 式(3)表示第 l 个到达受灾点的物资只能是 m 个出救点中的一个。

1.4 损失定量

1.4.1 直接经济损失

某地灾发瞬间起至首批应急物资到达的时间段内,通常受灾点将毫无应对措施地完全暴露在灾害中,承受损失较大,损失量称为直接经济损失。已有的城市灾害定损研究通常是基于灾害链中的载体理论,依托大量灾害案例,针对特定类别的财产(如房屋、公用设施、农作物)或资源(土地、动植物)进行统计、损失评估,涉及到大量的分类、脆弱性处理、动态监测等操作,宜在单独对一个受灾点开展对症下药的救援指挥工作时采用,对于多出救点多受灾点来说,却是操作复杂且泛用性低,为了客观反应经济损失与持续时间关系,选取大多数城市都具备的数据作为评估要素较为合理。

LI等^[4]曾基于最大3d降水量将洪水强度分为35~150mm、150~250mm、超过250mm三级并作出了洪水损失评估,将直接经济损失转为经济损失率(即直接经济损失与该地区经济总量的比值)以消除不同地区经济体量之间的差异,最后进行拟合得到了不同强度洪水下经济损失率与降水量关系的曲线(图2)。

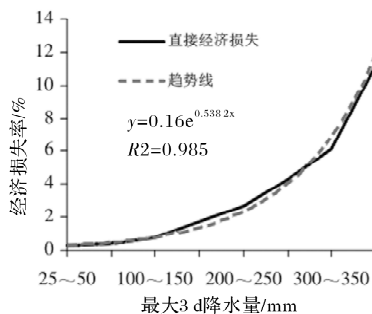


图2 直接经济损失率曲线(引自文献[4])

不难看出该拟合曲线的原式为自然底数的指数函数, 本文拟合经济损失的目的则是将其作为目标函数的一部分, 以便实时优化出更经济的物资配置方案, 借由 LI^[4] 等的思路, 可以在拟合时将自变量的总降水量拆分成小时降水量时间, 因变量表示为直接经济损失国内生产总值, 达到类似的效果。

$$p = a + be^{cEt}. \quad (4)$$

式中: E 指时均降水量 (mm/h); t 为时间 (h); a 、 b 、 c 皆为待拟合的参数。

如上, 为保障拟合结果所得直接经济损失更接近真实值, 应额外设定一个经济损失系数来修正人口、建成区面积、总面积等会对定损造成一定影响的要素, 并且按照暴雨分级标准划定累计降水量小于 50 mm 时, 不产生经济损失, 如此得到某地响应阶段直接经济损失的计算公式应为:

$$P_j = \begin{cases} (a + be^{c \times E_j \times t}) \times G_j \times del_j, & E_j \times t > 50; \\ 0, & E_j \times t \leq 50. \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_j 表示 B_j 点前年国内生产总值 (亿元); del_j 为经济损失系数, 可以根据当地人口、建成面积、总面积等数据估算得到 $del_j \in (0, 1)$ 。

从中国国家减灾网、国家气象科学数据中心以及各地级市政府统计年鉴整理数据 (表 1), 选取 2020 年主汛期国内 33 次大范围强降水中的 10 次, 根据式 (4) 使用 origin 软件进行非线性拟合, 得到的结果如图 3 所示。至此, 我们可以得出在假定好的地区抗灾能力前提下, 一个地区的直接经济损失函数 P_j 的表达式。

$$P_j = \begin{cases} (-0.01793 + 0.02554e^{0.00631 \times E_j \times t}) \times G_j \times del_j, & E_j \times t > 50; \\ 0, & E_j \times t \leq 50. \end{cases} \quad (6)$$

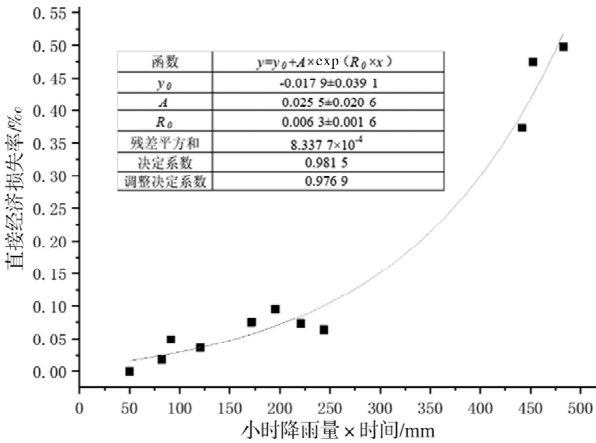


图3 直接经济损失率曲线

1.4.2 额外缺货损失

依托于建立的物资连续消耗假设, 设 $t^{(l)} \leq T$, 且 $t^{(m+1)} = T$, 则在 $t^{(l)}$ 时刻受灾点 B_j 的第 k 种物资存量为:

$$\begin{aligned} D_j^k(t^{(l)}) &= \sum_{i=1}^l d_j^{k(i)} - v_j^k(t^{(l)} - T_j) \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m R_{ij}^l - v_j^k \left(\sum_{j=1}^m R_{ij}^l t_j^{(l)} - T_j \right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

当然, 会存在物资量再次小于 0 的情况, 譬如图 1 中 $t_j^{(1)} \in [t^{(1)}, t^{(2)}]$, 两批物资到达的间隔里, 该资源会消耗殆尽再次陷入短缺状态, 此时

则有 $t_j^{(l)'} = \frac{1}{v_j^k} \sum_{i=1}^l d_j^{k(i)} + T_j$, 且有 $0 \leq D_j^k(t^{(l)}) \leq v_j^k(t^{(l+1)} - t^{(l)})$, 将所有的间隔时段进行积分并求和即为整个应急中 B_j 可能的第 k 种物资缺口:

$$\begin{aligned} L_j^k &= \sum_{l=1}^m \int_{t_j^{(l)'}}^{t_j^{(l+1)'}} v_j^k t dt = \frac{1}{2} v_j^k \sum_{l=1}^m [(t_j^{(l+1)'})^2 - (t_j^{(l)'})^2] \\ &= \frac{1}{2} v_j^k \sum_{l=1}^m \left[\left(\sum_{j=1}^{m-1} R_{ij}^{l+1} t_{ij} \right)^2 - \left(\frac{1}{v_j^k} \sum_{j=1}^l d_j^{k(l)} + T_j \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

不同于响应阶段, 恢复阶段物资短缺的损失函数若想要通过数据进行拟合, 则需要从历史洪涝案例中获取到起码细微至以一天为跨度的救灾进展和损失情况, 显然这是不切实际的, 故引入物资总价值、物资权重等概念建立起响应阶段经济损失函数。

建立起的损失函数应具有以下特点:

- (1) 在相同条件下, 物资越重要 (如医疗用品)、缺口越大, 损失越大^[20];
- (2) 在相同条件下, 物资缺乏的时间越长, 损失越大, 且损失是时间的累积效应;
- (3) 在相同条件下, 城市经济越发达, 损失越大。

综上设想, 若添加以首批物资到达时间为起点, 物资消耗速率为斜率的曲线并求积分, 能够将有物资支援下仍面临的空缺和不做任何措施面临的空缺的大小关系较为清晰地表现出来 (图 4), 其面积比值和输送到该地物资总价值的乘积可以地看作承受的损失。

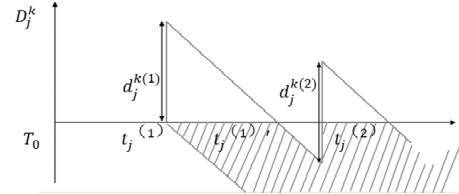


图4 物资理想缺口与最坏情况下缺口

于是有:

$$q_j = \begin{cases} del_j \times \sum_{l=1}^m d_j^{(l)} \varepsilon \times \sum_{k=1}^s \frac{\omega_k L_j^k}{v_j^k (T - T_j)^2}, & D_j^k(t^{(l)}) \leq 0; \\ 0, & D_j^k(t^{(l)}) > 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε 为物资平均缺货损失 (亿元); ω_k 为物资权重系数, 取值越大说明该物资越重要, $\sum_{k=1}^s \omega_k = 1$ 。

首批物资的意义与价值固然更高, 但后续补充的物资也同样重要, 为了避免不同受灾点之间响应阶段和恢复阶段发生恶性的非合作博弈, 譬如大城市早早进入恢复阶段, 而小城市仍在响应阶段迟迟不分配物资, 即保证公平性, 需要确定一个价值系数, 使模型的优化结果更具科学性和有效性, 具体步骤如下:

步骤 1, 客观条件有统一标准 del_j (经济损失系数) 的前提下, 灾情越严重, 经济损失越大, 灾情以降水量为尺度衡量, 得到度量系数 $\varphi 1$,

$$\varphi 1 = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^n E_j}. \quad (10)$$

表 1 2020 年汛期各城市洪水数据取样

序号	发生地	历时/d	直接经济损失/亿元	总降水/mm	常住人口/万	建成面积/万 m ²	总面积/万 m ²	GDP/亿元
1	四川绵阳	5	1.43	482.84	486.82	15 862	2 028 100	3 010.08
2	江西赣州	2	0.07	82.12	982.10	19 047	3 937 964	3 645.20
3	海南海口	6	0.85	452.41	183.39	140.59	314 593	1 791.58
4	湖南郴州	4	0.91	441.69	533.7	3 067.83	1 938 700	2 410.89
5	黑龙江黑河	2	0.03	91.05	128.64	2 000	6 872 600	614.40
6	广西河池	3	0.07	171.58	433.83	4 500	3 350 000	927.71
7	湖北宜昌	3	0.16	120.51	390.94	17 618	2 100 000	4 460.82
8	福建三明	5	0.19	220.66	288.54	3 958	2 296 500	2 601.56
9	黑龙江绥化	2	0.11	195.55	375.61	4 500	3 500 000	1 150.20
10	安徽合肥	3	0.60	243.74	818.90	48 100	1 144 500	9 409.40

表 2 度量系数计算结果

发生地	初始降水量 E_j	度量系数 $\varphi 1$	模拟响应损失 P_j	度量系数 $\varphi 2$
四川绵阳	54.02	0.203	54.118	2.66×10^5
江西赣州	51.73	0.195	63.716	3.27×10^5
湖南郴州	54.65	0.206	43.674	2.12×10^5
福建三明	51.80	0.195	45.503	2.33×10^5
安徽合肥	53.38	0.203	167.852	8.34×10^5

步骤 2, 参考实际拟合数据, 给出如下约束:
①单位观测时间内, 同一城市恢复阶段损失一般低于响应阶段; ②即便是发展最好的城市, 其恢复阶段单位观测时间内承受的损失不能高于最低城市响应阶段的损失。需根据实际数据提出度量系数 $\varphi 2$ 。

步骤 3, 对前面得出的 $\varphi 1$ 和 $\varphi 2$, 将两系数相乘确定应急点重要性权值为:

$$\varphi = \varphi 1 \times \varphi 2. \quad (11)$$

取图 3 中实际经济损失低于预期的数据 (即位于曲线以下的 5 个点) 建立集合, 设定观测时间为 1 h, 经济损失系数 del_j 统一设定为 1, 仅有一种物资 (平均价值依旧为 0.001), 消耗速率设定为 20/h, 若要求①单位观测时间内, 同一城市恢复阶段损失一般低于响应阶段; ②即便是发展最好的城市, 其恢复阶段单位观测时间内承受的损失不能高于最低城市响应阶段的损失, 应满足如下两个不等式:

$$\varphi_j \times 0.001 \leq (-0.017\ 93 + 0.025\ 54e^{0.006\ 31 \times E_j}) G_j; \quad (12)$$

$$\max_5 \varphi_j \times 0.001 \leq (-0.017\ 93 + 0.022\ 54e^{0.006\ 31 \times E_j}) G_j. \quad (13)$$

得到 $\varphi 2$ 的解集如表 2 所示, 从表 2 中不难看出, 为了满足式 (8) 的条件并保证在沿用到本文算例中时, 误差保持在可接受范围内, $\varphi 2$ 不应超过 2.12×10^5 , 取 $\varphi 2 = 2 \times 10^5$ 用于模型的计算。最后得出的某受灾点 B_j 恢复阶段因物资匮乏而随时间承受的损失 Q_j 如下:

$$Q_j = \begin{cases} \varphi_j \times del_j \times \sum_{l=1}^m d_j^{(l)} \varepsilon \times \sum_{k=1}^s \frac{\omega_k L_j^k}{\frac{1}{2} v_j^k (T - T_j)^2} D_j^k(t^{(l)}) \leq 0; \\ 0, D_j^k(t^{(l)}) > 0. \end{cases} \quad (14)$$

救点 A_1, A_2, \dots, A_m 负责提供物资, 有 n 个受灾点 B_1, B_2, \dots, B_n , 受灾点普遍需要共 s 种物资, 出救点 A_i 对第 k 种物资的存储量为, 由 A_i 往 B_j 配送物资, 受灾点 B_j 对第 k 种物资的持有量随时间的变化为 $D_j^k(t)$, x_{ij}^k 为 A_i 送往 B_j 的第 k 种物资数量, 记分配方案集合为 θ , 所有分配方案中的可行方案为 θ_v , 那么应急物流模型如下:

目标函数:

$$\min P(\theta) = \sum_{j=1}^n P_j; \quad (15)$$

$$\min Q(\theta) = \sum_{j=1}^n Q_j; \quad (16)$$

$$\min T(\theta) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij}^t t_{ij} \quad (17)$$

该模型为一个多目标规划模型, 式 (15) 表示直接经济损失最小; 式 (16) 表示额外缺货损失最小; 式 (17) 表示调运所用总时间最短。

约束条件:

$$0 \leq \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq S_i^k; \quad (18)$$

$$0 \leq d_j^{k(l)} \leq \sum_{i=1}^m R_{ij}^t S_i^k; \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij}^k \geq v_j^k (T - T_j); \quad (20)$$

$$T_j = T_0 + t_j^{(l)}, T_0 < T_0 + t_j^{(l)} < T_0 + t_j^{(l+1)} \leq T; \quad (21)$$

$$0 \leq x_{ij}^k \leq s_{ij}^k. \quad (22)$$

式 (18) 表示给出的物资量不能超过出救点的储量; 式 (19) 表示各出救点提供的物资量在 0 到其总数之间; 式 (20) 表示各类物资总供应量大于总需求量; 式 (21) 表示第一批物资到意味着响应结束, 以及各个阶段的时间关系; 式 (22) 定义了决策变量的属性。

2.2 模型求解

2.2.1 多目标规划求解

由以上描述可知, 该模型存在三个优化目标, 是一个多目标规划问题, 可以用逼近理想解的排

2 应急物流多目标规划模型

2.1 模型描述

设在灾害发生时间 T_0 , 灾害范围内有 m 个出

序方法 (Topsis) 对该模型进行求解。具体步骤如下:

步骤 1, 用向量规范法得出规范决策矩阵。假设模型有 m 个多目标属性, n 个决策方案。原决策矩阵 $Y = \{y_{ij}\}$, 规范化后的决策矩阵 $Z = \{z_{ij}\}$, 则

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (23)$$

步骤 2, 构成加权规范矩阵。设多属性的权向量 $\omega = \{w^1, w^2, \dots, w^n\}^T$, 则 $x_{ij} = \omega_{ij} z_{ij}$ 。

步骤 3, 求理想解 x^+ 和负理想解 x^- 。设理想解 x^+ 的第 j 个属性值为 x_j^+ , 设负理想解 x^- 的第 j 个属性值为 x_j^- , 正理想解为 $x_j^+ = \max_i x_{ij}$ (j 为效益型属性), 或 $x_j^+ = \min_i x_{ij}$ (j 为成本型属性)。负理想解为 $x_j^- = \max_i x_{ij}$ (j 为成本型属性), 或 $x_j^- = \min_i x_{ij}$ (j 为效益型属性)。

步骤 4, 计算各备选方案到理想点和负理想点的距离, 备选方案到理想点和负理想点的距离分别为:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^+)^2}; \quad (24)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2}. \quad (25)$$

步骤 5, 计算各方案排队指示值(综合评价指数)

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (26)$$

步骤 6, 根据 C_i 值由大到小排列方案的优劣次序, 给出结果。

2.2.2 模型求解

使用非劣分层遗传算法 NSGAII。NSGAII 在 NSGA 算法基础上加入精英策略、快速非支配排序策略以及密度值估计策略。借鉴 NSGAII 算法中的选择机制, 对交叉和变异算子进行适当修改。具体步骤如下:

步骤 1, 初始化种群规模 Popsiz, 对最大迭代次数、交叉概率和变异概率进行设置, 计数器;

步骤 2, 生成满足约束的个体 Popsiz, 计算对每个个体的目标函数值, 对所有个体进行非支配

排序, 生成父代种群;

步骤 3, 利用锦标赛选择、多点交叉和实值变异方法, 对父代进行遗传操作, 生成临时种群;

步骤 4, 判断临时种群的个体是否满足约束条件, 找出不满足这些约束的个体, 产生满足这些约束的相同数量的个体替代, 得出子代种群, 计算个体后代的目标函数值;

步骤 5, 将父群体和子群体合并, 并进行非支配排序, 将 Popsiz 值最高的个体作为父代种群, $gen = gen + 1$;

步骤 6, 如果 $gen \leq \max gen$, 转入步骤 3, 否则结束。

以上算法的关键部分操作说明如下。

染色体编码: 用 1 个染色体来表示从出救点 A_i 至受灾点 B_j 的物资调度方案。染色体的每个基因对应每个出救点各类应急物资配送到哪个受灾点以及对应的数量; 适应度函数: 适应度由目标函数值决定, 每个染色体都由 3 个适应度值 f_1, f_2, f_3 。遗传操作: 选择根据快速非支配的排序以及拥挤距离大小, 采用锦标赛法做选择。交叉和变异采用遗传算法的多点交叉算子, 加快了求解空间的搜索速度, 避免了早熟收敛。利用实值变异和区域扫描限制变异范围, 使新个体无法跳出解空间中的相应解。

3 算例分析

现有一强降水发生在江苏省南部长江流域及太湖水域, 范围内南京、镇江、扬州、常州、无锡、泰州 6 个地级市遭受影响, 经专家讨论, 决定由防储物资仓库南京分中心、镇江分中心、扬州分中心、苏州分中心以及句容块石基地出救本次灾情。设定本次救援开始时间 $T_0 = 0$, 结束时间 $T = 5$, 共运送块石、救生衣等 10 项应急物资。

3.1 算例数据

3.1.1 出救点数据

出救点所储备物资的相关数据见表 3, 平均缺货损失 ε 单位为亿元, 储量单位为托盘; 各出救点通过公路运输至受灾点所需的时间如表 4 所示。

表 3 出救点物资信息及储量 S_i^k

出救点	块石	救生衣	照明灯	医疗用品	机油	口罩	干粮	饮用水	沙袋	救生绳
平均缺货损失 ε	0.01									
权重系数 ω_k	0.13	0.15	0.07	0.19	0.03	0.08	0.09	0.1	0.11	0.05
南京分中心	0	1 200	5 600	6 700	1 120	30 000	8 500	1 000	3 000	500
镇江分中心	0	9 500	18 430	15 300	4 080	50 000	30 000	3 000	2 000	5 000
扬州分中心	0	1 600	2 000	4 500	2 800	8 000	6 600	1 000	1 500	1 500
苏州分中心	0	6 000	14 070	3 500	1 960	12 000	6 150	5 000	1 500	1 000
句容块石基地	25 000	0	0	0	0	0	0	0	10 000	0

表 4 出救点至受灾点的运输时间表 t_{ij} h

出救点	南京	镇江	扬州	常州	无锡	泰州
南京分中心	0.50	1.50	1.50	1.75	2.50	2.00
镇江分中心	1.50	0.50	0.75	1.25	1.75	1.25
扬州分中心	1.50	0.75	0.50	1.50	2.25	1.00
苏州分中心	2.75	2.00	2.50	1.50	1.00	2.00
句容块石基地	1.25	1.00	1.50	1.25	2.00	1.50

表 5 受灾点基本信息

城市	常住人口/万人	建成面积/万 m ²	总面积/万 m ²	GDP/亿元	降水量 E_j /(mm/h)	经济损失系数 del_j
南京	931.46	82 297	658 854	14 817.95	25	0.90
镇江	270.16	14 462	108 800	4 127.32	20	0.75
扬州	455.97	28 200	235 800	6 048.33	30	0.80
常州	451.28	27 285	283 865	7 805.31	25	0.80
无锡	659.15	34 703	164 388	12 461.33	25	0.85
泰州	497.15	43 000	156 712	5 312.81	20	0.70

表 6 受灾点各物资消耗速率 v_i^k

城市	块石	救生衣	照明灯	医疗用品	机油	口罩	干粮	饮用水	沙袋	救生绳
南京	1 000	800	1 800	1 000	500	7 000	3 000	400	600	200
镇江	1 400	900	2 300	1 500	400	3 000	1 800	500	500	600
扬州	1 700	1 350	2 500	1 600	800	5 000	3 500	400	1 500	500
常州	900	850	1 100	1 000	600	3 000	1 400	500	700	300
无锡	600	600	1 500	800	200	4 000	1 100	400	400	200
泰州	750	500	1 300	1 400	300	3 000	2 000	600	400	250

3.1.2 受灾点数据

受灾点基本数据为常住人口、建成面积、总面积和 2020 年国内生产总值,小时降水量由监测得来,经济损失系数则根据城市建设程度和降水强度由专家法事先设定,具体如表 5 所示。各受灾点消耗物资的速率见表 6。

3.2 计算与分析

在 Intel Core i7-9750H CPU @2.60 GHz, 16 GB 内存的计算机上使用 MATLAB 语言编写 NSGAII 算法程序对算例仿真,求解出救点分配给受灾点 B_j 的物资数量 x_{ij}^k 。设置种群规模为 500,惩罚系数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率 0.04,最大代数达到 1 000 时停止。模型目标函数共求得 49 个 Pareto 解,如图 5 所示,在最优面上的点即为非支配解。

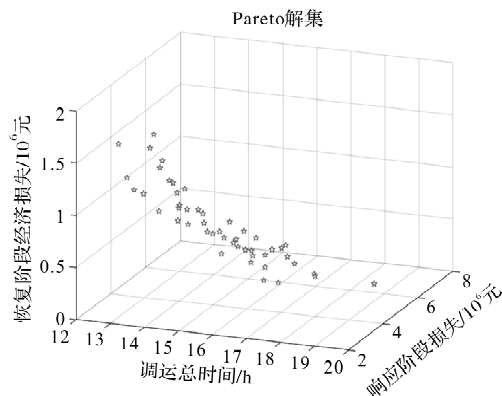


图 5 pareto 解示意图

用以上解构造一个 493 的决策矩阵。设定响应阶段损失、恢复阶段损失、调运总时间的权值向量 $[0.4, 0.2, 0.4]$ 。再运用 TOPSIS 法,对 49 个

Pareto 解进行排序,最大值对应的解为最优解,其响应阶段损失、恢复阶段损失、调运总时间向量值为 $[1.935 \times 10^6, 1.241 \times 10^6, 7.8]$,可作为应急物流推荐方案,如表 7 所示。此外,响应阶段经济损失最小对应解和总经济损失最小对应解分别如下表 8、表 9 所示,两种方案的响应阶段损失、恢复阶段损失、调运总时间向量值分别为 $[1.572 \times 10^6, 1.594 \times 10^6, 9]$, $[1.754 \times 10^6, 0.744 \times 10^6, 8.6]$ 。

为了直观地反应三种方案在应急过程中的优劣,以时间为 x 轴,直接经济损失为 y 轴,将执行最优方案、响应损失最小方案、总经济损失最小方案所带来的经济损失随时间的变化绘制成三条折线,如图 6 分别为响应阶段损失、恢复阶段损失、总经济损失的变化对比图。

由于受灾点之间降水速率的差异,进入响应阶段的时间点各不相同,所以动态描绘经济损失增长趋势是通过计算某特定时间点的对应经济损失并连接完成的(图中取每 0.5 h 为节点),从图 6 中可以看出,由于选择标准的不同,三种方案在各项上有着较大的差距,最优方案在恢复阶段损失、总损失两项数值上并非最小值,甚至在响应阶段损失的控制上效果最差,但着眼于 Topsis 法对总调运时间的重视,它依旧是综合评价最高,最值得推荐的方案,画出三张对比图的目的除了说明向量权值对最终方案比选的影响较大,还说明供决策者视情况判断,譬如实际中有运力得到社会援助突然提升的情况下,可以考虑选取其他方案(如响应优先),能够提早结束应急救援,且较好控制经济损失。

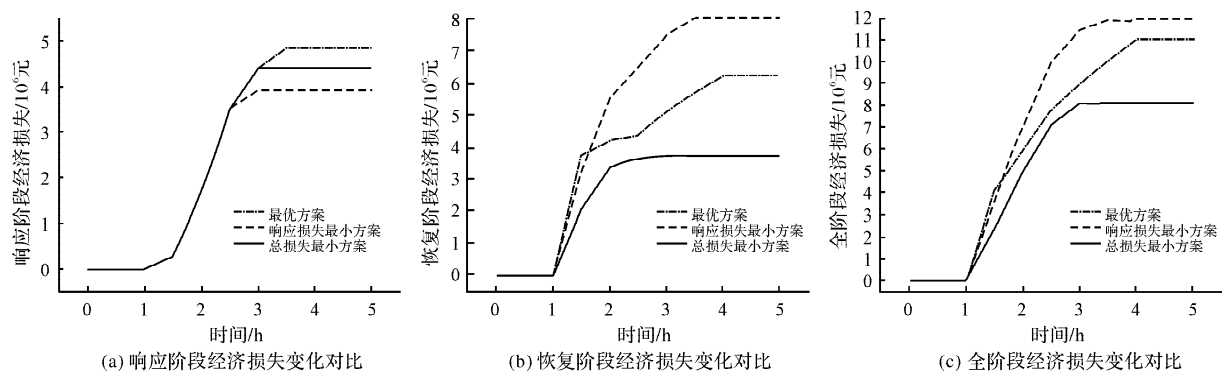


图6 三方案对比损失折线图

4 结论

本文以城市洪涝灾害为背景,依据现实情况,将应急物资配置拆分为两个阶段,分别拟合定量了因降水量和物资未满足引起的随时间的经济损失,以直接经济损失最小、总体受损失最小、调运总时间最短为目标,建立了应急物流规划模型。并以南京、镇江、扬州等6个城市为例模拟强降水环境,使用进化算法对物流配置问题进行优化求解,最终得到了结论如下:

(1) 基于前人研究成果,通过降水量和物资满足程度提出了城市洪涝灾害随时间所承受经济损失分阶段评估方法,在与实际数据拟合后准确度较高;

(2) 利用物资均匀消耗假说和物资未满足度概念以及根据实际情况设定的价值系数,一定程度上能将物资缺乏与地区受灾严重程度建立起联系,是有效的度量手段;

(3) 共求解出49个可行方案,使用逼近理想解的排序法进行筛选,得到最优方案后将其与直接经济损失最小、总损失最小方案进行比较分析优劣,结果令人满意。

各向量为 $[1.935 \times 10^6, 1.241 \times 10^6, 7.8]$ 的结果不光有着较好的执行效率,物资配送范围也足够广泛,说明由经济损失函数确定的多出救点多受灾点多种物资的应急物流调度策略是可行的。在该研究的基础上还可以深入探讨考虑可回收型应急物资,考虑衍生灾害的多目标应急物流规划模型。

参考文献:

[1] 云小鹏. 基于CNKI和CiteSpace的应急管理研究进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 185-193.
 [2] 华庆莉, 韦建斌. 江苏省级防汛物资储备管理现状与对策思考[J]. 江苏水利, 2020(10): 65-67.
 [3] BENDIMERAD. Loss estimation: a powerful tool for risk assessment and mitigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineer-

ing, 2001, 21(5): 467-472.

[4] LI K Z, WU S H, DAI E F, et al. Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China[J]. Natural Hazards, 2012, 63(2): 737-760.
 [5] 宋英华, 白明轩, 马亚萍, 等. 考虑区域灾情分级的应急物资公平调度优化模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 172-179.
 [6] 胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1148-1162.
 [7] AM CAUNHYE, NIE X F, S POKHAREL. Optimization models in emergency logistics: a literature review[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(1): 4-13.
 [8] 陈雷雷, 王海燕. 大规模突发事件中基于满意度的应急物资优化调度模型[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(5): 46-52.
 [9] 汪欲, 何建敏. 应急系统中多资源出救方案的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 510-513.
 [10] 杨继君, 许维胜, 黄武军, 等. 基于多灾点非合作博弈的资源调度建模与仿真[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 1620-1623.
 [11] FENG J R, GAI W M, LI J Y. Multi-objective optimization of rescue station selection for emergency logistics management[J]. Safety Science, 2019, 120: 276-282.
 [12] FIEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters[J]. Safety Science, 2000, 35(1-3): 41-57.
 [13] 刘芳, 冯丹, 宫雪然. 基于IACO-BP算法的洪涝灾害应急物资需求预测[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(3): 332-338.
 [14] 张庆, 余森. 基于两阶段混合整数规划模型的洪涝灾害应急管理研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(9): 62-69.
 [15] 霍达, 吴耀华. 基于地区特性的应急物资分类研究[J]. 物流技术, 2010, 29(16): 11-12, 24.
 [16] 夏萍, 刘凯. 应急物流中基于PPSVM的应急物资分类研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(2): 174-177.
 [17] 孙敏, 潘郁. 多资源复杂网络的应急调度研究[J]. 运筹与管理, 2009, 18(6): 165-169.
 [18] 刘春林, 盛昭瀚, 何建敏. 基于连续消耗应急系统的多出救点选择问题[J]. 管理工程学报, 1999, 13(3): 19-22.
 [19] 戴更新, 达庆利. 多资源组合应急调度问题的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 52-55.
 [20] 宋晓宇, 刘春会, 常春光. 面向应急物资调度的一种灰色规划模型[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1259-1262.
 [21] 卢建锋, 牟瑞芳, 赵佳虹, 等. 危化品事故连续消耗型应急物资调度模型[J]. 工业工程, 2020, 23(5): 103-108, 117.
 [22] 王苏生, 王岩. 基于公平优先原则的多受灾点应急资源配置算法[J]. 运筹与管理, 2008, 17(3): 16-21.

Multi – objective Programming Model for a Class of Flood Disaster Emergency Materials Transportation

WANG Wei¹, YU Zhicheng¹, WANG Yunqing¹, HUANG Li², LU Heng³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Jiangsu Water conservancy and Flood Control Material Reserve Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: Urban flood control is a hot topic of disaster prevention and control, in order to reduce the high – density economic losses caused by floods, it is necessary to effectively and reasonably distribute emergency materials to the disaster sites in the emergency cycle, to control the loss of the response stage, recovery phase loss, the total time spent on material transfer as the goal, based on the 2020 historical flood disaster data and the flood control material reserve situation in Jiangsu Province, a comprehensive multi – rescue point, multi – disaster point, multi – purpose planning model of various materials is set up. Using the evolutionary algorithm based on Pareto concept and simulating the calculation by computer simulation, the optimization results are discussed by the sorting method approaching the ideal solution, and two feasible emergency plans are given, which can provide reference for the transportation of emergency materials for urban flood control.

Keywords: natural disaster; urban flood prevention; emergency logistics; multi – objective planning; direct economic losses; supply satisfaction

(上接第 161 页)

- [43] 生态环境部. 关于印发《京津冀及周边地区、汾渭平原 2020 – 2021 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知 [Z/OL]. (2020 – 10 – 13) [2022 – 08 – 01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202011/t20201103_806152.html.
- [44] 生态环境部. 关于印发《长三角地区 2020 – 2021 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知 [Z/OL]. (2020 – 10 – 30) [2022 – 08 – 01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202011/t20201103_806151.html.
- [45] ZHOU W, KOU A, LI J, et al. Network Mapping of the Grey

- Model Research——A Visualized Analysis Using CiteSpace [J]. Journal of Grey System, 2019, 31(4): 122 – 142.
- [46] LIN J J, SUN P T, CHEN J J R, et al. Applying gray model to predicting trend of textile fashion colors [J]. The Journal of the Textile Institute, 2010, 101(4): 360 – 368.
- [47] 国务院. 关于印发《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》的通知 [Z/OL]. (2022 – 11 – 10) [2022 – 11 – 11]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/17/content_5727605.htm.

Research on Hot Spot Prediction of Air Pollution Disasters Based on Knowledge Evolution Method

ZHAO Jiqiang¹, WU Xianhua¹, ZHAO Hongmei²

(1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the relevant documents of air pollution disaster research in CNKI database from 1980 to 2021, a prediction model suitable for hot spots of air pollution disaster research is established by using the method of knowledge evolution, and an empirical study is carried out on the research of air pollution disaster management in 2021. The results show that the accuracy of the prediction model is 21.43% higher than that of the traditional gray prediction model; Environmental policy and other external factors have a greater impact on the hot spot prediction model; In 2023, the prevention and control of ozone disasters and the coordinated treatment of regional air pollution disasters will be a hot topic in the research field of air pollutant disasters. Under the influence of external policies, the elimination of heavy pollution weather and the treatment of diesel truck pollution will become new research hotspots.

Keywords: air pollution disaster; knowledge evolution; trend prediction; air pollution disaster control