

基于元胞遗传算法的多目标应急资源配置*

王飞跃,裴重伟,郭换换,杨宸宇

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所 湖南 长沙 410075)

摘要:为解决不同灾情下多目标多周期灾后救援问题,减少受灾损失,对灾后应急资源配置进行研究。从物流成本和系统损失2个方面最小化救灾行动的成本和最大化有限救灾资源的分配,建立基于路况的多目标应急资源配置模型,将帕累托前沿和超体积作为元胞遗传算法的求解性能指标,开展元胞遗传算法与遗传算法对模型的求解对比实验。结果表明:元胞遗传算法能较好地求解多目标多周期应急资源配置模型,且求解性能比遗传算法更好;通过对模型的求解,可为决策者基于不同灾情下的应急决策提供参考。

关键词: 应急资源配置;元胞遗传算法;多目标优化

中图分类号: X913.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-193X(2020)-02-0174-06

Multi-objective emergency resource distribution based on cellular genetic algorithm

WANG Feiyue, PEI Chongwei, GUO Huanhuan, YANG Chenyu

(Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: In order to solve the problem of multi-objective and multi-period post-disaster rescue under different disaster situation and mitigate the disaster losses, the post-disaster emergency resource distribution was studied. A multi-objective emergency resource distribution model based on the road conditions was established to minimize the cost of disaster rescue operation and maximize the distribution of limited disaster rescue resource from two aspects of logistics cost and system losses. The solving and comparison experiments of the model with the cellular genetic algorithm and genetic algorithm were carried out by taking the Pareto front and hypervolume as the solving performance indexes of cellular genetic algorithm. The results showed that the cellular genetic algorithm could solve the multi-objective and multi-period emergency resource distribution model well and the solving performance was better than that of genetic algorithm. Through the solving of the model, it can provide reference for the emergency decision-making of decision-makers under different disaster situation.

Key words: emergency resource distribution; cellular genetic algorithm; multi-objective optimization

0 引言

近年来自然灾害频发,造成大量的人员伤亡和财产损失,其中地震、台风等大型自然灾害还会造成次生灾害^[1-4]。为减少灾害带来的损失,许多学者对应急资源分配进行研究。Richardson等^[5]指出灾前应急资源储备选址对应急准备的重要性,并提出多项影响选址的重要因素;Caunhye等^[6]提出选址—路径2阶段模型用于应急资源的准备和响应;Yi等^[7]提出涉及物流和人员疏散的动态应急模型,减少受灾地区的人员。上述所提出的应急模型主要考虑出救点与受灾点之间的关系,而针

对救援过程的路况并未涉及。除此之外,由于应急资源配置模型相较于一般物流模型,不仅需要考虑救援过程中的物流成本,同时还需考虑受灾地区受灾程度等问题。因此本文构建基于不同受灾情况下的多目标应急资源配置模型,以物流成本和受灾地区的系统损失为目标,解决救援过程中资源分配和决策问题,使救援效率最大化。

由于应急资源配置模型的复杂性,学者提出不同的算法求解模型^[8-15],如Zheng等^[16]设计开发1种有效的多目标禁忌搜索算法,该算法使用基于决策者偏好的加权函数指导搜索帕累托最优。本文采用元胞遗传算法

收稿日期: 2020-02-13

* 基金项目: 湖南省2017年度安全生产专项资金项目(201720)

作者简介: 王飞跃,博士,副教授,主要研究方向为建设项目的安全评估理论与方法,岩土工程防灾减灾。

通信作者: 裴重伟,硕士研究生,主要研究方向为应急管理、应急资源配置。

对所提模型进行求解,并利用帕累托前沿(PF)及其平均超体值(Ave. HV)2项指标衡量算法性能。

1 应急资源配置问题描述

当自然灾害发生时,基于道路网络的合理应急分配计划对减轻灾害造成的损失至关重要。本文建立的模型中,假设由出救点(SP)、受灾点(AP)和道路网络3部分组成,来自SP的资源通过道路网络传输到AP。由于不同的灾害情况下SP和AP之间的路况不同。因此,在该模型中,每个SP通过可用道路将各种应急资源传输到AP,最小化系统损失。除系统损失外,物流成本也是评估分配计划的重要因素。因此,本文提出基于路况的多目标应急资源分配模型。

1.1 假设

1)在不同的灾害情况下,SP储备的资源类型与数量以及AP的需求是已知的。

2)在救援过程中,从SP到AP的应急资源是单向的,不能超过SP的物流运输能力。

3)在分配之前,SP和AP之间的路况是已知的,如果道路受损,则2点之间没有资源运输。

4)在模型中,应急资源的运输采用单一运输方式,因此运输时间与距离成正比,物流成本与资源重量和距离的乘积成正比。

1.2 多目标应急资源配置模型

1) 目标函数

①最小化救援过程中的物流成本,表示从SP运输到AP的所有类型的应急资源的物流成本的总和,目标函数如式(1)所示:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x_{ijh} d_{ij} \quad (1)$$

式中: x_{ijh} 为从出救点*i*到受灾点*j*的应急资源*h*的运输量; d_{ij} 为出救点*i*和受灾点*j*间的距离; *I*表示出救点*i*集合; *J*表示受灾点*j*集合; *H*表示应急资源*h*集合。

②最大限度地降低因救援过程中AP不满意的需求而导致的系统损失,其不仅与AP的不满足需求有关,而且与资源到达的顺序有关。目标函数如式(2)所示:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (f_{jh}^1 d_{S_{j-1}j} + \sum_{m=1}^{l-1} f_{jh}^{m+1} (d_{S_{j-(m+1)}j} - d_{S_{j-(m+1)}j}) + f_{jh}^{l+1} (d_{\max} - d_{S_{j-l}j})) \quad (2)$$

$$p_{c_{ij}} = \begin{cases} p_c + (1 - p_c) K_1 \tanh \left\{ \frac{F(C_{a,b}^*) - F(C_{ij}^*) p_c}{K_2 [F(C_{ij}^*) - F(C_{a,b}^*) 1]} \right\} & F(C_{ij}^*) \neq F(C_{a,b}^*) \\ p_c & F(C_{ij}^*) = F(C_{a,b}^*) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $p_{c_{ij}}$ 表示元胞个体 C_{ij} 向邻居学习的强度; p_c 表示种群中交叉的概率; $C_{a,b}^*$ 表示 C_{ij} 的邻居中的最优

式中: f_{jh}^m 为第 $m-1$ 个出救点运输 *h* 类应急资源抵达受灾点*j*后的需求函数; S_{j-m} 为在出救点中,距离受灾点*j*的距离第 m 近的出救点; d_{\max} 为最大可分配距离。

物流成本和系统损失均为评估分配计划的重要因素,但随着物流成本的降低,可能会导致AP的不满意需求增加。因此,提出1个多目标优化模型进行同时优化。

2) 约束条件

①运输方向约束。确保各点间资源运输是单向的,如式(3)所示:

$$x_{ijh} \geq 0 \quad i \in I \quad j \in J \quad h \in H \quad (3)$$

②出救点容量限制。确保从SP传输的资源不超过自身存储,如式(4)所示:

$$\sum_{j=1}^J x_{ijh} \leq G_{ih} \quad i \in I \quad h \in H \quad (4)$$

式中: G_{ih} 为出救点*i*中应急资源*h*的储备量。

③受灾点容量限制。确保传输到AP的资源不超过需求总量,如式(5)所示:

$$\sum_{i=1}^I x_{ijh} \leq D_{jh} \quad j \in J \quad h \in H \quad (5)$$

式中: D_{jh} 为受灾点*j*中应急资源*h*的需求量。

④需求函数约束。动态需求函数的递归公式如式(6)~(7)所示:

$$f_{jh}^1 = D_{jh} \quad j \in J \quad h \in H \quad (6)$$

$$f_{jh}^{m+1} = f_{jh}^1 - \sum_{l=1}^m x_{S_{j-l}jh} \quad m \in I \quad j \in J \quad h \in H \quad (7)$$

⑤运输距离函数。在不同路况下从SP到AP的距离如式(8)所示。

$$d_{ij} = \begin{cases} d_{ij} & r_{ij} = 1 \\ +\infty & r_{ij} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_{ij} 为出救点*i*和受灾点*j*间的路况。

2 元胞遗传算法

针对提出的多目标应急资源配置模型,本文采用元胞遗传算法(CGA)求解。将初始种群分配到二维网络结构中,赋予元胞领域结构并加强邻居之间的交互。本文在交叉操作中引入自适应交叉算子,使全局最优个体在优化过程中起到指导作用,交叉操作如公式(9)~(10)所示:

$$C_{ij}' = (1 - p_{c_{ij}}) C_{ij} + p_{c_{ij}} C_{a,b}^* \quad (9)$$

个体; C_{ij}^* 表示元胞空间中的最优个体; $F(C_{a,b}^*)$, $F(C_{ij}^*)$ 分别表示 $C_{a,b}^*$ 和 C_{ij}^* 的适应度; K_1 , K_2 为常数;

$F(C_{ab}^*)$ 和 $F(C_{ij}^*)$ 的差距越大, $p_{c_{ij}}$ 越小。

CGA 的伪代码见表1, 其中假设求解过程中有 N 个优化目标, 用各个体 C_{ij} 不同目标的函数值乘积表示每个个体的适应度 $F(C_{ij})$ 。

表1 CGA 的伪代码

Table 1 Pseudo codes of CGA

算法:CGA	
1) 参数初始化	
N : 目标个数	
$Nind$: 种群大小, $Nind = n \times n$	
$Maxgen$: 最大迭代数	
p_c : 种群交叉概率	
p_m : 种群变异概率	
2) 种群初始化	
随机生成种群大小为 $Nind$ 的个体并映射到 $n \times n$ 的二维网格中, 用 C_{ij} ($i, j \in n$ 表示网格中的个体) 计算个体适应度 $F(C_{ij})$	
3) 寻优	
$gen = 0$	
while($gen < Maxgen$)	
for $i = 1:n$	
for $j = 1:n$	
交叉: 选择个体 C_{ij} 及其最优领域个体 C_{ab}^* 进行交叉. 如果子代个体 C'_{ij} 不满足模型中的约束, 则用 C_{ij} 直接替代子代个体 C'_{ij}	
变异: 随机在 $[0, 1]$ 中生成数 r , 如果 $r < p_m$, 则生成子代 C'_{ij} , $C'_{ij} = C_{ij} + K\varepsilon$, 其中 K 是常数, ε 是 $[0, 1]$ 中的随机数. 如果子代个体 C'_{ij} 不满足模型中的约束, 则用 C_{ij} 直接替代子代个体 C'_{ij}	
$gen = gen + 1$;	
end while	
4) 输出	
迭代后获得的最佳个体	

3 模型求解

实验由参数选取和案例分析组成。为了验证 CGA 的性能, 本文引入了遗传算法(GA)作为参考, 采用超体积(HV)衡量 CGA 和 GA 的求解质量。以汶川地震中受灾严重的灾区为背景, 以成都市、德阳市等4个城市为出救点, 向汶川县、北川县、绵竹县等10个受灾点进行应急资源配送。需要说明的是, 实验中所用到的应急资源供给量、需求量以及各出救点与受灾点之间在不同灾情下的路况和运输距离仅出于说明目的而生成, 见表2~4。

3.1 参数选取

交叉算子和变异算子是 CGA 和 GA 的2个重要参数, 决定着个体间的交叉和变异的概率。为找出 CGA 和 GA 的最优交叉算子和变异算子, 本文选取轻度灾情, 将种群大小设为100、迭代次数设为100, 将交叉算子和变异算子分别从0.1逐渐增加至0.9进行5次独立实验, 得出不同交叉算子和变异算子下的 $Ave. HV$, 如图1~2所示。解集与参考点所构成的超体积值能整体衡量算法求解应急资源配置模型的寻优性能, 所求得的配置方案数量越多、目标函数值越小、方案间差异性越大等优秀寻优性能均会对应更大的超体积值。由图1~2中可知, 当 $p_c = 0.1$, $p_m = 0.8$ 时, GA 的 $Ave. HV$ 最高, 即 GA 的整体寻优性能最好。当 $p_c = 0.6$, $p_m = 0.1$ 时, CGA 的 $Ave. HV$ 最高, 即 CGA 的整体寻优性能最好, 且高于 GA 的最高 $Ave. HV$ 。因此在本文的实验中, GA 的交叉概率和变异概率分别设为0.1和0.8, CGA 的交叉概率和变异概率分别设为0.6和0.1。

表2 出救点的供给量和受灾点的需求量

Table 2 Supply amount of SPs and demand amount of APs

应急资源	出救点				受灾点									
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9	AP-10
粮食	1 030	410	410	200	112	161	516	433	25	104	484	622	186	770
帐篷	4 960	1 975	1 975	987	560	805	2 580	2 165	125	520	2 420	3 110	930	3 850
医疗物资	6 113	3 045	3 045	2 022	1 820	2 310	5 160	5 030	950	1 740	5 540	6 920	2 560	7 000

表3 出救点与受灾点的距离

Table 3 Distances between SPs and APs

出救点	受灾点									
	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9	AP-10
SP-1	149	185	121	89	309	204	120	62	329	52
SP-2	186	127	57	34	252	240	63	99	211	62
SP-3	227	92	86	85	220	235	28	141	239	126
SP-4	360	199	218	218	173	340	172	237	317	258

表4 不同灾情下的路况

Table 4 Road conditions under different disaster situation

出救点	受灾程度	受灾点									
		AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9	AP-10
SP-1	轻度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	重度	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0
SP-2	轻度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	重度	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
SP-3	轻度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	重度	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
SP-4	轻度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	重度	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1

注:1表示道路可通行;0表示道路阻断。

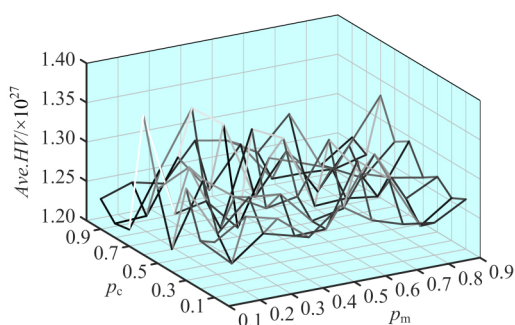
图1 不同 p_c 和 p_m 下 CGA 的平均超体积

Fig.1 Average hypervolume of CGA with different

p_c and p_m

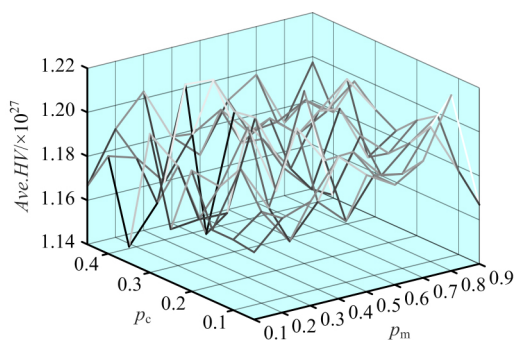
图2 不同 p_c 和 p_m 下 GA 的平均超体积

Fig.2 Average hypervolume of GA with different

p_c and p_m

3.2 案例分析

由于实际救援过程中存在因灾害导致救援通道损毁的现象,本文将灾情分为轻度、重度2种情况,运用CGA分别实验模拟和优化不同灾情中多目标应急资源配置,减少救援过程中的系统损失和物流成本,同时引入GA比较优化性能。GA和CGA在不同灾情下的PF分布如图3~4。PF分布表示解集中占优个体的分布,

能直观地衡量算法求解应急资源配置模型所得候选优秀决策方案在不同救援目标函数上的分布。由图3~4可知,GA生成的PF几乎被CGA生成的PF支配,即通过CGA所生成的候选应急资源配置方案比GA生成的候选方案更优,在解决不同救援问题的表现上更优。在

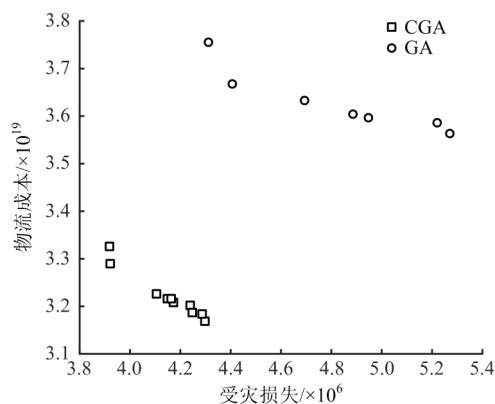


图3 轻度灾情下的PF分布

Fig.3 Distribution of PFs under mild disaster situation

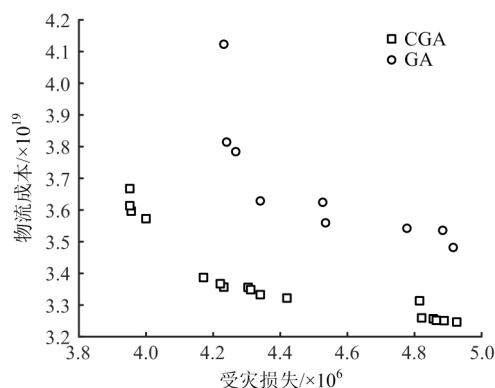


图4 重度灾情下的PF分布

Fig.4 Distribution of PFs under severe disaster situation

实际救援决策过程中,所生成的 PF 集合可作为实际救援候选方案,通过 PF 的分布对比,得出在不同灾情下 CGA 能为决策者提供更为优秀的决策候选方案。

根据 CGA 所得到基于多目标下的 PF 集合,在实际救援过程可由决策者对目标的重视程度进行最后决策。从重度灾情的 PF 集合选取 1 个 PF 作为应急资源配置过程中物流流向的演示,见表 5。由表 5 可知,由于道路因灾损毁而导致部分出救点与受灾点间没有物资流动,

出救点无法对最近受灾点开展救援,如受灾点 AP-3 与出救点 SP-2 虽然距离最近,但是由于道路阻断,AP-3 的物资需求只能由其他出救点进行满足。在实际救援过程中可能出现由于道路损毁、交通管制而导致运输道路阻断现象,为救援行动增添许多困难,通过采用多目标应急资源的配置能为应急决策在开展救援行动时提供更为可靠的应急候选决策方案,减少受灾区域损失,为科学决策提供理论依据。

表 5 重度灾情下出救点和受灾点间的资源配置

Table 5 Resources distribution between SPs and APs under severe disaster situation

受灾程度	出救点	应急资源	出救点									
			AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5	AP-6	AP-7	AP-8	AP-9	AP-10
重度	SP-1	1	59	0	0	95	25	98	0	622	33	0
		2	117	0	0	2 165	98	144	0	2 299	86	0
		3	281	0	0	5 030	25	44	0	150	42	0
	SP-2	1	34	11	0	0	0	0	19	0	12	329
		2	3	74	0	0	0	0	106	24	20	1 726
		3	1 069	137	0	0	0	0	23	114	91	1 476
	SP-3	1	19	19	270	0	0	2	84	0	0	11
		2	12	71	21	0	0	102	1 597	23	0	124
		3	106	168	441	0	0	178	2 056	16	0	34
	SP-4	1	0	48	69	0	0	0	8	0	9	66
		2	0	603	182	0	0	0	44	0	26	34
		3	0	1 910	5	0	0	0	6	0	43	6

注:应急资源中 1 为粮食;2 为帐篷;3 为医疗物资。

4 结论

1) 基于实际救援过程存在高效合理配置的要求和因灾害而导致运输道路损毁的现象,本文从物流成本和系统损失 2 方面出发,设计了基于多目标灾情变化的应急资源配置模型,解决了不同灾情下救援过程中的成本和合理配置问题。

2) 提出元胞遗传算法对模型进行求解,实验表明,通过帕累托前沿和超体积等指标对比,元胞遗传算法较遗传算法性能更优,对模型求解效果较好,对于制定高效、合理的应急资源配置方案,减少资源运输物流成本和灾后损失有实际意义。

3) 仅考虑了救援过程中的单向物资配置问题,而实际情况可能还存在人员运输和车辆往返的现象,因此存在一定局限性,在后续研究中仍需进一步完善。

参考文献

[1] ZHANG S, GUO H, ZHU K, et al. Multistage assignment optimization for emergency rescue teams in the disaster chain [J]. Knowledge-

Based Syst 2017, 137:123-137.

- [2] LI J, CHEN C. Modeling the dynamics of disaster evolution along causality networks with cycle chains [J]. Physica A Statistical Mechanics and its Applications 2014, 401:251-264.
- [3] 葛敏, 陈晓平, 吴凤平. 灾害链、不确定供求和复杂应急资源分配网络的动态配置 [J]. 科技管理研究 2017, 37(13):205-214.
- GE Min, CHEN Xiaoping, WU Fengping. Multi-period optimal scheduling model of complex emergency resource allocation networks based on disaster chain and uncertain demand and supply [J]. Science and Technology Management Research 2017, 37(13):205-214.
- [4] PEI R. Characteristics of secondary mountain disaster chain in wenchuan earthquake [J]. American Journal of Civil Engineering 2018, 5:408.
- [5] RICHARDSON D A, DE L S, DULLAERT W. Factors affecting global inventory prepositioning locations in humanitarian operations: a delphi study [J]. Journal of Business Logistics 2016, 37:59-74.
- [6] CAUNHYE A M, ZHANG Y, LI M, et al. A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies [J]. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review 2016, 90:161-76.
- [7] YI W, ÖZDAMAR L. A dynamic logistics coordination model for

- evacuation and support in disaster response activities[J]. *European Journal of Operational Research* 2007 ,179(3):1177-1193.
- [8] CHEN A Y ,YU T Y. Network based temporary facility location for the emergency medical services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response[J]. *Transportation Research Part B Methodological* 2016 ,91:408-423.
- [9] YI W ,KUMAR A. Ant colony optimization for disaster relief operations[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review* 2007 ,43(6):660-672.
- [10] LIU Y ,LI Z ,LIU J ,et al. A double standard model for allocating limited emergency medical service vehicle resources ensuring service reliability[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies* 2016 ,69:120-133.
- [11] 王飞跃,郭换换,裴甲坤,等. 不确定条件下应急资源分配区间规划模型研究[J]. *中国安全生产科学技术* ,2019 ,15(10):107-113.
WANG Feiyue ,GUO Huanhuan ,PEI Jiakun ,et al. Study on interval programming model for allocation of emergency resource under uncertain conditions [J]. *Journal of Safety Science and Technology* , 2019 ,15(10):107-113.
- [12] 詹沙磊,刘南. 基于灾情信息更新的应急物资配送多目标随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践* 2013 ,33(1):159-166.
ZHAN Shalei ,LIU Nan. Multi-objective stochastic programming model for relief allocation based on disaster scenario information updates [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice* 2013 ,33(1):159-166.
- [13] 张彦琦,石凯,易东,等. 系统动力学建模在卫生资源配置研究中的应用[J]. *中国卫生经济* 2011 ,30(9):40-44.
ZHANG Yanqi ,SHI Kai ,YI Dong ,et al. Application of system dynamics modeling in health resource allocation research [J]. *Chinese Health Economics* 2011 ,30(9):40-44.
- [14] 李丹,刘晓. 需求不确定下的应急资源公平配置策略[J]. *工业工程与管理* 2013 ,18(6):54-60,90.
LI Dan ,LIU Xiao. Emergency resources allocation with fair considerations under uncertain demand [J]. *Industrial Engineering and Management* 2013 ,18(6):54-60,90.
- [15] 门红,王晶. 基于情景分析的生产安全事故应急物资的协调储备优化研究[J]. *中国安全生产科学* 2017 ,13(10):64-68.
MEN Hong ,WANG Jing. Research on coordination reserve optimization model of emergency materials for work safety accidents based on scenario analysis [J]. *Journal of Safety Science and Technology* , 2017 ,13(10):64-68.
- [16] ZHENG Y ,CHEN S ,LING H. Efficient multi-objective tabu search for emergency equipment maintenance scheduling in disaster rescue [J]. *Optimization Letters* 2013 ,7(1):89-100.

(责任编辑:袁文静)