

大兴安岭森林火灾应急资源优化调度研究

杨忠振*, 郭利泉, 董夏丹

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对大兴安岭森林火灾救援中的单出救点、多需求点的二级应急资源分配系统,首先,基于大兴安岭森林火灾的发生规律、火势蔓延的影响因子,以及火势蔓延模式,改进已有的林火火势蔓延趋势模型.其次,根据着火点火势蔓延速度,区分受灾点灾情程度,确定分配应急资源的优先度.最后,进行应急资源分配和救援消防车辆的优化调度.针对前者,以森林损失和救援开支费用最小为目标,建立资源分配优化模型;针对后者,以火灾应急物流系统所需时间最少和费用最小为目标,建立多目标优化模型,并用免疫克隆算法进行求解.实例证明该模型完善了森林火灾救援中应急资源调度体系,为资源的合理调配提供了指导.

关键词:系统工程;森林火灾;应急救援;车辆调度;物流工程

中图分类号: U-9

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201406008

0 引言

由于受全球气候变暖以及人为因素的影响,我国森林火灾发生频率较高,尤其是黑龙江省大兴安岭地区,作为我国重要的大面积国有及原始林区,受地理位置、气候等因素的影响,常常发生重大森林火灾,给自然生态系统带来巨大的破坏,使得森林资源损失严重,消耗大量的扑火费用,甚至威胁到人类的生命和财产安全,阻碍社会的可持续发展.因此,有必要及时了解和掌握该地区森林火灾火势蔓延的机理和规律,构建完善的森林火灾应急资源的调度体系,进而为森林防火指挥管理部门制定合理的林火应急管理策略和救援措施提供依据.

目前已经有许多学者针对自然灾害或者公共卫生事件等突发事件研究应急资源的分配和调度问题^[1-6],然而很少有学者以森林火灾这一类自然灾害为背景,研究森林火灾发生过程中应急资源的分配和调度问题.贾传亮等构建了一个多阶段扑火过程救援物资的布局模型,在该模型中,出救点即消防站是已知的,救援消防物资的总量是有限的,同时,该模型充分考虑到出救点在进行物资

配置过程中,还可能存在潜在的物资需求的情况^[7];姜丽珍等构建了一个森林火灾中灭火物资优化配置的模型,该模型以森林火灾过火面积最小为目标函数,同时,考虑了灭火条件和环境等问题,对灭火物资进行了优化配置^[8].

本文基于救火资源的多样性和多元性特点,用应急物流管理、林业学和运筹学的方法,预测森林火灾着火点的火势蔓延趋势,区分受灾严重程度,确定分配应急资源优先度,研究救援应急资源的分配与应急救援车辆的调度问题.

1 大兴安岭森林火灾火势蔓延模型

森林火灾火势蔓延模型是指在一定的假设条件下,林火行为与各种参数间的定量关系,它可以预测林火行为.最常用的是地表火蔓延模型,常用的该类模型有 Rothermel 模型、McArthur 模型、加拿大模型^[9-13].文献[13]模型适用于坡度在 60°以下的大兴安岭林区.这里对它进行改进,得到大兴安岭森林火灾火势蔓延模型,具体如下:

(1) 模型假设

A1: 森林火灾火势初始蔓延速度与气温和风力线性相关;

- A2:研究区域为丘陵地区,地势坡度在 60° 以下;
- A3:林场类型包括草甸、次生林和针叶林;
- A4:能够及时获取森林火灾区域的气象数据.
- (2)模型结构
- 火势蔓延模型:

$$v_f = v_0 K_s K_w K_{\varphi} = v_0 K_s K_{\varphi} e^{0.178\ 2v_w} \quad (1)$$

初始蔓延速度:

$$v_0 = aT + bW + c \quad (2)$$

式中: v_f 为火势蔓延速度, v_w 为风速, v_0 为火势初始蔓延速度, K_s 为可燃物类型修正系数, K_w 为风力修正系数, K_{φ} 为地形坡度修正系数, T 为温度, W 为风力.

(3) 模型参数

初始蔓延速度用地表可燃物取样火烧方法测算,回归取样数据可得到 v_0 与空气温度、风速或风力等的关系式;可燃物类型修正系数为草甸 $K_{s,g} = 1.0$;次生林 $K_{s,sl} = 0.7$;针叶林 $K_{s,cf} = 0.4$;草甸、零坡度地势、风力等级为 1 ~ 12 级时的 v_w 、 v_f 如表 1 所示^[14]. 坡度对蔓延速度的作用 K_{φ} 如表 2 所示. $a = 0.053, b = 0.048, c = 0.275$ ^[7].

表 1 风力-风速数据

Tab. 1 Data of wind speed and wind-force

风力/级	$v_w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_f / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
1	2.0	6.18
2	3.6	13.85
3	5.4	50.00
4	7.4	64.55
5	9.8	83.33
6	12.3	144.33
7	14.9	250.00
8	17.7	353.55
9	20.8	500.00
10	24.2	599.02
11	27.8	625.00
12	29.8	833.00

表 2 不同坡度条件下的火速修正系数

Tab. 2 Correction factor of fire velocity under different slopes

坡度范围	K_{φ}	坡度范围	K_{φ}	坡度范围	K_{φ}
$-42^{\circ} \sim -38^{\circ}$	0.07	$-12^{\circ} \sim -8^{\circ}$	0.83	$18^{\circ} \sim 22^{\circ}$	2.90
$-37^{\circ} \sim -33^{\circ}$	0.13	$-7^{\circ} \sim -3^{\circ}$	0.90	$23^{\circ} \sim 27^{\circ}$	4.10
$-32^{\circ} \sim -28^{\circ}$	0.21	$-2^{\circ} \sim 2^{\circ}$	1.00	$28^{\circ} \sim 32^{\circ}$	6.20
$-27^{\circ} \sim -23^{\circ}$	0.32	$3^{\circ} \sim 7^{\circ}$	1.20	$33^{\circ} \sim 37^{\circ}$	10.10
$-22^{\circ} \sim -18^{\circ}$	0.46	$8^{\circ} \sim 12^{\circ}$	1.60	$38^{\circ} \sim 42^{\circ}$	17.50
$-17^{\circ} \sim -13^{\circ}$	0.63	$13^{\circ} \sim 17^{\circ}$	2.10		

2 森林火灾应急资源分配与车辆调度模型

2.1 问题描述

出救点根据着火点的火势蔓延速度分配应急资源,调度车辆^[15]. 火势蔓延速度较快时,根据损失最小原则分配资源,安排多辆车分别向各着火点运输资源(图 1);火势蔓延速度较慢时,根据火灾严重程度分配资源,安排车辆向多个着火点运输资源(图 2)^[6,16].

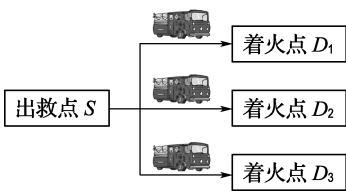


图 1 火势快速蔓延时的资源配送方式
Fig. 1 Distribution style for fast fire spreading

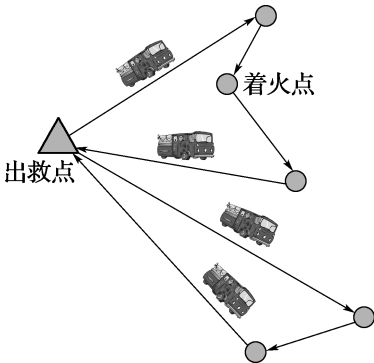


图 2 火势低速蔓延时的资源配送方式
Fig. 2 Distribution style for slow fire spreading

2.2 火势快速蔓延时应急资源调度模型

设救援应急分配系统是由一个出救点 S 与 I 个着火点构成,出救点的供应能力为 s ,着火点的需求量为 $D_i (i = 1, 2, \dots, I)$, $\sum_{i=1}^I D_i < s$. 分配救援资源时,要兼顾效率和公平使各着火点都能得到相应的资源. 因此,要根据受灾属性对着火点的受灾严重度排序,并按严重度配送资源. 这里将着火点的火势蔓延速度作为受灾属性,认为火势蔓延速度越快,着火点的受灾严重度越高,越应优先得到救灾资源.

2.2.1 模型假设条件

(1)着火点的火势由中心匀速环状向外蔓延,蔓延半径和时间成正比;

- (2)救援资源的量用灭火组合表示,单位组合内的人员和物资数量固定;
- (3)各消防员的灭火速度相同;
- (4)救援车辆同型号且行驶速度相同;
- (5)出救点的资源储备满足着火点的总需求.

2.2.2 模型参数

- C_1 : 烧毁单位面积森林的损失费;
- C_2 : 各灭火组合单位时间内的费用;
- C_3 : 单位灭火组合的一次性运输费;
- X_i : 出救点分派到着火点 i 的灭火组合数量;
- t_{i1} : 消防员在着火点 i 开始扑火的时刻;
- t_{i2} : 着火点 i 的扑灭时刻;
- v_{fi} : 着火点 i 的火势蔓延速度;
- $B(t_i)$: 着火点 i 在 t 时间内的过火面积;
- $C(t_i)$: 着火点 i 在 t 时间内森林火灾的损失;
- N : 各灭火组合中的消防员数量;
- v_1 : 灭火组合中的消防员的灭火速度;
- v_2 : 每辆救援车辆的平均行驶速度;
- d_i : 出救点到着火点 i 的距离;
- A_i : 出救点分派到着火点 i 的消防员总数;
- X_i^* : 出救点分派到着火点 i 的灭火组合的最佳数量.

2.2.3 模型结构 设着火时刻 $t_{i0} = 0$, 消防员到达着火点开始灭火时刻 $t_{i1} = d_i/v_2$, 林火扑灭时刻 t_{i2} ; 森林损失面积 $B(t_{i2})$, 森林损失费用 $C(t_{i2}) = B(t_{i2})C_1$. 由假设(1)可知损失面积的变化是一阶连续的, 增长速度为 $dB(t_i)/dt_i$. 在着火点 i 扑火开始(时刻 t_{i1}) 后, 火势蔓延速度递减, 直至时刻 t_{i2} 火势被扑灭. 此时损失的森林面积为图 3 中的三角形面积, 计算如下:

$$\frac{dB(t_i)}{dt_i} = \begin{cases} v_{fi}t_i; & 0 \leq t_i \leq t_{i1} \\ v_{fi}t_i - v_1X_i(t_i - t_{i1}); & t_{i1} < t_i \leq t_{i2} \end{cases} \quad (3)$$

当 $\frac{dB(t_i)}{dt_i} \Big|_{t_i=t_{i2}} = 0$ 时, $t_{i2} = t_{i1} + v_{fi}t_{i1}/(v_1X_i - v_{fi})$, 损失面积为 $B(t_{i2}) = v_{fi}t_{i1}^2/2 + v_{fi}^2t_{i1}^2/2(v_1X_i - v_{fi})$.

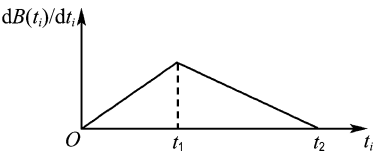


图 3 着火点火灾期间森林损失面积
Fig. 3 The area of the forest loss in a fire point

灭火涉及两类费用: 物资的一次性运输费; 灭火工具消耗和人员薪酬. 因此火灾的总损失费用为

$$C(X_i) = \left(\frac{v_{fi}^2t_{i1}^2}{2} + \frac{v_{fi}^2t_{i1}^2}{2(v_1X_i - v_{fi})} \right) C_1 + \frac{C_2v_{fi}t_{i1}X_i}{v_1X_i - v_{fi}} + C_3X_iN \quad (4)$$

求极值得到 X_i^* , 则出救点向各着火点直接运送 X_i^* 即可:

$$X_i^* = \frac{v_{fi}}{v_1} + \frac{1}{v_1} \sqrt{(C_1v_{fi}^2v_1t_{i1}^2 + 2C_2v_{fi}^2t_{i1}^2)/2C_3N} \quad (5)$$

$$A_i = NX_i^* = N \left(\frac{v_{fi}}{v_1} + \frac{1}{v_1} \sqrt{(C_1v_{fi}^2v_1t_{i1}^2 + 2C_2v_{fi}^2t_{i1}^2)/2C_3N} \right) \quad (6)$$

在该方案下, 火灾最早被扑灭的时刻为
$$T = \max \{t_{12}, t_{22}, \dots, t_{I2}\} = \max \left\{ t_{11} + \frac{v_{f1}t_{11}}{v_1X_1 - v_{f1}}, t_{21} + \frac{v_{f2}t_{21}}{v_1X_2 - v_{f2}}, \dots, t_{I1} + \frac{v_{fI}t_{I1}}{v_1X_I - v_{fI}} \right\} \quad (7)$$

2.3 火势低速蔓延时应急资源调度模型

应急资源要在要求的最晚期限前送达, 此时资源调度问题成为在额定载质量、着火点及时获得资源的约束下, 从出救点到着火点的 VRP 问题.

2.3.1 模型假设

- (1)出救点有足够的同类型救援车辆, 车辆额定载质量已知;
- (2)根据着火点的火势蔓延情况, 可预测应急资源需求;
- (3)不考虑装卸时间, 只考虑车辆运输时间;
- (4)火势蔓延速度越快的着火点灾情越重, 越要优先获得资源.

2.3.2 模型参数

- S : 出救点;
- D : $D = \{i | i = 1, 2, \dots, I\}$, 着火点集合;
- Z : $Z = \{m | m = 1, 2, \dots, M\}$, 车辆集合;
- A : $A = S \cup D$, 所有点的集合;
- C^m : 车辆 m 的固定成本;
- C_{ij}^m : 车辆 m 从点 i 到点 j 单位时间的运行成本;
- d_{ij} : 点 i 到点 j 的距离;
- Q^m : 车辆 m 的额定载质量;
- Q_S : 出救点 S 所拥有的灭火组合数量;

v_{fi} :着火点 i 的火势蔓延速度;
 v_1 :消防员的灭火速度;
 u_i :着火点 i 的灭火组合需求, $u_i = R_i/v_1$;
 t_i^m :车辆 m 到达着火点 i 的时间;
 t_i^l :着火点 i 要求资源最晚的到达时间;
 t_{ij}^m :车辆 m 从点 i 到点 j 的运行时间;
 v_{ij}^m :车辆 m 从点 i 到点 j 的平均速度;
 $x^m: x^m = \begin{cases} 1; & \text{车辆 } m \text{ 被使用时} \\ 0; & \text{车辆 } m \text{ 不被使用时} \end{cases}$;
 $y_{ij}^m: y_{ij}^m = \begin{cases} 1; & \text{车辆 } m \text{ 从点 } i \text{ 到点 } j (i \neq j) \text{ 时} \\ 0; & \text{其他} \end{cases}$.

2.3.3 模型结构

$$\min F_1 = \sum_{m \in Z} \sum_{i \in D} t_i^m$$
$$\min F_2 = \sum_{m \in Z} x^m C^m + \sum_{m \in Z} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} C_{ij}^m \frac{d_{ij}}{v_{ij}^m} y_{ij}^m$$

s. t.

$$\sum_{i \in A} y_{ij}^m - \sum_{h \in D} y_{hj}^m = 0$$
$$\sum_{j \in D} \sum_{m \in Z} y_{sj}^m > 0$$
$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in D} y_{ij}^m u_j \leqslant Q^m$$
$$\sum_{m \in Z} \sum_{i \in A} \sum_{j \in D} y_{ij}^m u_j \leqslant Q_s$$
$$t_i^m = t_j^m + t_{ji}^m y_{ji}^m$$
$$t_i^m \leqslant t_i^l$$

其中 $y_{ij}^m \in \{0,1\}, x^m \in \{0,1\}$. $\min F_1$ 是主目标, 表示在不考虑装卸时间、车辆返回时间时,所有车辆的总运输时间最小. $\min F_2$ 是次目标,表示运输总成本最小. 各约束条件分别为车辆到达一个着火点卸掉物资后即刻离开;出救点 S 肯定有车辆负责运送;车辆所服务的着火点对资源的需求总量不大于其额定载质量;所有着火点对资源的总需求不大于出救点 S 拥有的量;出救点 S 到着火点 i 的运输时间等于车辆到 i 的上一个着火点 j 的时间和 j 到 i 的时间之和;车辆到达着火点的时间不超过着火点对资源需求时间的上限.

3 实例分析

3.1 火势快速蔓延实例

实例 1 2003 年 3 月 19 日 10 时,大兴安岭松岭林业局南瓮河地区发生火灾,有 4 个着火点,火场的植被主要为草甸,灌丛和森林较少,火灾于 3 月 27 日 13 时被扑灭. 相关信息如表 3、4 所示,设 $C_1=15$ 元; $C_2=1.3$ 元; $C_3=0.82$ 元; $v_1=12.5$ m/min; $v_2=100$ km/h; $N=3$ 人.

表 3 实例 1 着火点的气象数据

Tab. 3 Meteorological data in the fire sites of Example 1

着火点	平均温度/℃	平均风速/ (m·s ⁻¹)	平均风力/级
卧都河($i=1$)	6.0	7.5	4
小孤山($i=2$)	7.0	6.2	4
那都里河东($i=3$)	5.5	5.1	3
597 高地($i=4$)	6.0	5.5	3

表 4 实例 1 着火点的地理数据

Tab. 4 Geographic data in the fire sites of Example 1

着火点	坡度/(°)	可燃物类型	到出救点距离/km
卧都河($i=1$)	0	草甸	24.7
小孤山($i=2$)	15	草甸	30.5
那都里河东($i=3$)	2	草甸	31.2
597 高地($i=4$)	10	草甸	28.6

根据火势蔓延模型得到各着火点的火势蔓延速度为 179.4、318.9、105.8、188.6 m/min. 根据资源分配模型得到各着火点需要的最佳灭火组合数和消防员数(见表 5、6). 此时,最晚的灭火时间为 9.3 h. 与实际的 8 d 相比,优化方案的效率增加,费用上升. 在优化方案中,动用消防员 27 903 人,比实际多 1 万多人,动用灭火物资组合 9 301 套,是实际的 2.4 倍.

表 5 应急资源分配调度方案

Tab. 5 Scheduling schemes of emergency supplies

着火点	最佳灭火 组合数/套	最佳消防 员数/人	灭火费 用/元	最短灭火 时长/h
卧都河($i=1$)	1 804	5 412	4 718.4	5.4
小孤山($i=2$)	3 951	11 854	10 332.9	8.9
那都里河东($i=3$)	1 350	4 049	3 529.3	9.3
597 高地($i=4$)	2 196	6 588	5 743.2	7.8

表 6 应急资源的调度优化结果与实际值对比

Tab. 6 Comparison between optimization results and actual ones for emergency supplies

	灭火 时长	灭火组 合数/套	消防员 数/人	灭火 费用/元	森林资源损 失费用/元
实际值	8 d	3 897	16 143	2 296	1 995 120
优化结果	9.3 h	9 301	27 903	24 324	1 803 611

3.2 火势低速蔓延实例

实例 2 2010 年 6 月 29 日 10 时,大兴安岭呼中林业局呼中林区发生火灾,有 7 个着火点,火灾于 7 月 3 日 11 时被扑灭. 着火点之间的距离、气象和地理数据如表 7~9 所示.

表 7 着火点之间的距离
Tab. 7 Distance between the fire sites

	林业局	1231 高地	31 号线	西 59 号线	呼 59 号线	12 号线	3 号线	6 号线
林业局	0	42	56	63	65	50	66	45
1231 高地	42	0	20	33	45	35	48	64
31 号线	56	20	0	46	53	44	42	58
西 59 号线	63	33	46	0	60	55	52	54
呼 59 号线	65	45	53	60	0	62	64	56
12 号线	50	35	44	55	62	0	65	66
3 号线	66	48	42	52	64	65	0	63
6 号线	45	64	58	54	56	66	63	0

表 8 实例 2 着火点的气象数据
Tab. 8 Meteorological data in the fire sites of Example 2

着火点	平均温度/℃	平均风速/(m·s ⁻¹)	平均风力/级
1231 高地	25	3.6	2
31 号线	23	2.0	1
西 59 号线	22	2.0	1
呼 59 号线	26	3.6	2
12 号线	24	3.6	2
3 号线	23	3.6	2
6 号线	22	2.0	1

表 9 实例 2 着火点的地理数据
Tab. 9 Geographic data in the fire sites of Example 2

着火点	坡度/(°)	可燃物类型	时间要求/h
1231 高地	10	草甸	4
31 号线	2	草甸	6
西 59 号线	5	草甸	6
呼 59 号线	15	草甸	3
12 号线	13	草甸	4
3 号线	8	草甸	5
6 号线	8	草甸	6

消防站用 3 辆救援车向 7 个着火点运输物资,车辆额定载质量 8 t,平均速度 80 km/h,固定运行费 150 元,单位时间的运行费 100 元/h. 1 套灭火物资组合由 1 个 2 号工具、1 个水枪、1 个水泵和 3 名消防员组成.

由火势蔓延模型得到 7 个着火点的火势蔓延速度(表 10),然后对着火点的优先度排序,编号越小表示越急需资源. 将出救点编号设为 0,根据灭火组合的灭火速度和着火点的火势蔓延速度,预测出各着火点所需的灭火组合数如表 11 所示.

免疫克隆算法是一种为适应多目标优化问题存在一系列无法相互比较的 Pareto-最优解的特点而发展起来的新算法,在收敛速度及多样性保持上有较优的效果,这里使用免疫克隆算法求解. 由于目标函数 1 和目标函数 2 的重要性不同,设

$w_1 = 0.9, w_2 = 0.1, F = w_1 F_1 + w_2 F_2$,其他参数为:抗体群规模 $M = 100$,抗体 $a_i(it)$ 编码长度 21,计算终止代数 $g_{\max} = 100$,克隆比例 $q = 5$,期望保留的抗体群规模 $M_n = 20$. 计算 50 次后收敛性见图 4,得到结果如下.

表 10 各着火点的火势蔓延速度
Tab. 10 Fire spread speeds of fire sites

着火点	火势蔓延速度/(m·min ⁻¹)	着火点	火势蔓延速度/(m·min ⁻¹)
1231 高地	5.16	12 号线	6.56
31 号线	2.20	3 号线	4.83
西 59 号线	2.55	6 号线	3.40
呼 59 号线	6.98		

表 11 各着火点的优先度和救灾资源的需求情况
Tab. 11 Priority and demands for emergency materials of fire sites

节点优先度	对应着火点	灭火组合需求量/套
1	呼 59 号线(着火点 1)	3
2	12 号线(着火点 2)	3
3	1231 高地(着火点 3)	2
4	3 号线(着火点 4)	2
5	6 号线(着火点 5)	1
6	西 59 号线(着火点 6)	1
7	31 号线(着火点 7)	1

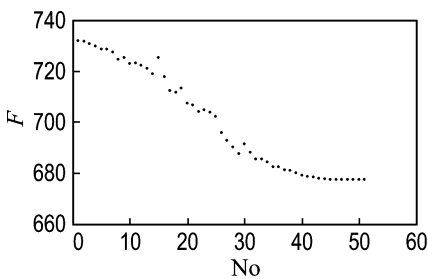


图 4 收敛结果
Fig. 4 Convergence result

(1)3 辆车的运输路线为 1;0→1→5→0;2;0→2→6→0;3;0→3→4→7→0. 车辆总运输时间为 6.05 h,总运输费用为 6 720 元.

(2)子路径上各车辆的到达时间、运输总成本和运输距离如表 12 所示,每辆车到达着火点的时间都小于 2 h.

表 12 各车辆的运输路径、运输成本与运输距离
Tab.12 Vehicle routes and the corresponding costs and distances

节点	到达着火点时长/h			运输总成本/元			运输距离/km		
	车辆 1	车辆 2	车辆 3	车辆 1	车辆 2	车辆 3	车辆 1	车辆 2	车辆 3
出救点 0				—	—	—			
着火点 1	0.65	—	—	—	—	—	65	—	—
着火点 2	—	0.50	—	—	—	—	—	50	—
着火点 3	—	—	0.42	—	—	—	—	—	42
着火点 4	—	—	0.90	—	—	—	—	—	90
着火点 5	1.21	—	—	—	—	—	121	—	—
着火点 6	—	1.05	—	—	—	—	—	105	—
着火点 7	—	—	1.32	—	—	—	—	—	132
出救点 0	1.66	1.68	1.88	—	—	—	166	168	188
合计	1.86	1.55	2.64	2 160	2 180	2 380	166	168	188

4 结 语

本文概括了森林火灾救援中应急资源调度的特征,构建了森林火灾中的应急资源调度优化模型. 针对不同火势蔓延趋势提出不同救援策略:当火势蔓延迅速时,为及时扑灭大火,出救点向各个着火点分别派遣一定数量的救援车辆,负责各个着火点灭火物资的运输服务,主要对各个着火点处的救援物资数量进行优化;当火势蔓延缓慢时,可以采用同一辆车向多个着火点配送应急资源的方式,通过对应应急救援车辆的路径进行优化,使得系统运输时间和成本均达到最小化.

本文研究完善了森林火灾救援中应急资源的调度体系,为森林火灾救援中应急资源的合理分配和调度提供指导,对于实现科学决策指挥、高效低耗扑救火势、确保资源环境安全都有重大的现实意义.

参考文献:

[1] Linet O, Ediz E, Beste K. Emergency logistics planning in natural disasters [J]. **Annals of Operations Research**, 2004, **129**(1-4):217-245.

[2] Sheu Jiuh-biing. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2007, **43**(6): 687-709.

[3] 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.

WANG Su-sheng, WANG Yan. Emergency resources allocation among multiple disaster places under fair priority principle [J]. **Operations Research and Management Science**, 2008, **17**(3):16-21. (in Chinese)

[4] Sheu Jiuh-biing. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2010, **46**(1):1-17.

[5] 姜金贵,梁静国. 基于粒子群优化算法的应急资源调度研究[J]. **统计与决策**, 2009(2):53-54.

JIANG Jin-gui, LIANG Jing-guo. Research on emergency resources scheduling based on particle swarm optimization algorithm [J]. **Statistics & Decision**, 2009(2):53-54. (in Chinese)

[6] 张 凡. 考虑救灾物资需求等级的应急救援车辆调度[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.

ZHANG Fan. Emergency vehicle scheduling based on commodity demand degree [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

[7] 贾传亮,池 宏,计 雷. 基于多阶段灭火过程的消防资源布局模型[J]. **系统工程**, 2005, **23**(9):12-15.

JIA Chuan-liang, CHI Hong, JI Lei. The allocation model of fire resource based on multistage fire protection process [J]. **Systems Engineering**, 2005, **23**(9):12-15. (in Chinese)

[8] 姜丽珍,刘 茂. 森林火灾灭火物资优化配置模型研究 [J]. **中国公共安全:学术版**, 2008(3):97-

- 100.
- JIANG Li-zhen, LIU Mao. A research to the allocated resources model of forest fires [J]. **China Public Security:Academy Edition**, 2008(3):97-100. (in Chinese)
- [9] Rothermel R C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires, INT-GTR-143 [R]. Ogden: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983.
- [10] Weise D R, Biging G S. A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects [J]. **Forest Science**, 1997, **43**(2):170-180.
- [11] Perry G L W. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review [J]. **Progress in Physical Geography**, 1998(2):222-245.
- [12] 岳金柱,冯仲科,姜伟. 大兴安岭林区重特大森林火灾扑救时限预测模型构建研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, **29**(增 2):128-131.
- YUE Jin-zhu, FENG Zhong-ke, JIANG Wei. Building time limited forecasting model of gravely extra large fire suppression in Daxing'anling Mountains Forest Region [J]. **Journal of Beijing Forestry University**, 2007, **29**(Supp. 2):128-131. (in Chinese)
- [13] Stocks B J, Lynham T J, Lawson B D, *et al.* Canadian forest fire danger rating system: an overview [J]. **The Forestry Chronicle**, 1989, **65**(4): 258-265.
- [14] 温广玉,刘勇. 林火蔓延的数学模型及其应用[J]. 东北林业大学学报, 1994, **22**(2):31-36.
- WEN Guang-yu, LIU Yong. A model of forest fires spread and its application [J]. **Journal of Northeast Forestry University**, 1994, **22**(2): 31-36. (in Chinese)
- [15] 姚树人,文定元. 森林消防管理学[M]. 北京:中国林业出版社, 2002.
- YAO Shu-ren, WEN Ding-yuan. **Fire Protection Management of Forest Science** [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [16] 孙颖,池宏,贾传亮. 多路径下应急资源调度的非线性混合整数规划模型[J]. 运筹与管理, 2007, **16**(5):5-8.
- SUN Ying, CHI Hong, JIA Chuan-liang. Nonlinear mixed-integer programming model for emergency resource dispatching with multi-path [J]. **Operations Research and Management Science**, 2007, **16**(5):5-8. (in Chinese)

Research on optimal allocation of rescue resources for forest fire in Daxing'anling

YANG Zhong-zhen*, GUO Li-quan, DONG Xia-dan

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: For the rescue resources allocation system consisting of single depot and multi-demand sites in Daxing'anling forest fire emergency, the existing flame spread trend model is firstly improved by studying the regularity and characteristics of the forest fires which had happened in Daxing'anling, the factors affecting the flame spread and the flame spread styles. Secondly, based on the flame spread speed, the damage degrees in the sites are distinguished and the allocation priority of rescue resources is determined. Finally, the problems of allocating rescue resources and dispatching fire engines are studied. For the former, a model is established under the condition of minimizing the forest loss and rescue cost. For the latter, a multi-objective optimization model is built with the objective to minimize the needed time and costs, and immune clonal algorithm is used to solve the model. Examples prove that the model can improve the rescue resources allocation system for forest fire, and provide guidance for reasonable resources arrangement.

Key words: systems engineering; forest fire; emergency rescue; vehicle scheduling; logistics engineering