

## 森林防火多出救点应急调度算法

冯 雪<sup>1</sup>, 吴达胜<sup>2</sup>, 骆文建<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 在森林重大火灾应急调度时, 要保证在灭火时间最短的前提下使出救点个数尽可能少。当前火灾应急调度模型均是基于目标变量(即需求的灭火资源总量)确定的前提下提出的, 但灭火资源所需数量是随时间、气候、地形地貌等变化而变化的, 需要结合林火蔓延模型来求解目标变量, 进而结合“灭火时间最短”和“出救点个数最少”2个约束条件, 得出一次性消耗的应急多出救点资源调度的计算方法。以王正非等的林火蔓延模型为基础, 在考虑火速、风力、坡度等因素下, 得出不同着火时间下灭火资源动态需求量, 结合模糊规划方法求解救火时间最短以及出救点个数最少的森林资源火灾应急调度优化出救方案, 并给出了仿真案例, 旨在为森林扑火行动提供一定的理论和实践指导。图 1 表 5 参 15

**关键词:** 森林保护学; 森林资源; 模糊规划; 应急资源调度

**中图分类号:** S762.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2013)02-0257-06

## A multi-depot emergency scheduling algorithm for forest fire prevention

FENG Xue<sup>1</sup>, WU Dasheng<sup>2</sup>, LUO Wenjian<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;  
2. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** During current forest conflagration emergency scheduling, fire emergency dispatch models are mainly based on determinate target variables that employ the total demand for fire-fighting resources, but do not consider changes in time, climate, topography, or other factors. In this research, a forest fire spread model was used to obtain target variables; these variables were then combined with constraints of “shortest fire-fighting time” and “least number of the rescue points” so as to obtain an emergency scheduling algorithm based on one-time consumption and multiple depots. This research utilized Wang Zhengfei's forest fire spread model to consider the rate of forest fire spread, wind level and slope to calculate the dynamic need for fire-fighting resources at different fire-times. Then the fuzzy programming method for conditions of “shortest fire-fighting time” and “least number of the rescue points” was used to optimize a fire emergency rescue plan which was tested with a simulation case. Results showed that this model could provide a theoretical and practical guide for forest fire-fighting operations. [Ch, 1 fig. 5 tab. 15 ref.]

**Key words:** forest protection; forest resources; fuzzy programming; emergency resource scheduling

在森林发生重大火灾时, 首先要考虑在保证连续扑救前提下, 尽量缩短灭火时间; 其次要考虑联合调度多个出救点的多种资源, 并使出救点个数尽可能的少(即出救资源费用最少), 即求出在“灭火所需时间最短”和“出救点个数最少”2个约束条件下的优化出救方法。文献[1-9]对应急系统中路径问题以及多出救点的组合出救问题进行了研究, 并给出了一系列数学证明, 但这些文献都是基于目标变量(即需

收稿日期: 2012-02-29; 修回日期: 2012-04-10

基金项目: 浙江省重大科学技术专项(2011C12047)

作者简介: 冯雪, 从事林业信息化研究。E-mail: 51416161@qq.com。通信作者: 吴达胜, 副教授, 博士, 从事林业信息化研究。E-mail: 458752249@qq.com

求的灭火资源总量)确定的前提下提出的。灭火资源所需数量是随时间、气候、地形地貌等变化而变化的,因此,需要结合林火蔓延模型来求解目标变量,进而结合“灭火时间最短”和“出救点个数最少”2个约束条件,得出一次性消耗的应急多资源调度的计算方法。

### 1 问题描述

#### 1.1 调度算法定义

本研究基于下列约束条件对应急调度进行研究。假设有:①出救行动一旦开始,中途不中断,即连续提供应急物资;②每个出救点到火灾事故点之间都有明确道路可行,即都可顺利运输物资到达应急点;③灭火的开始时间为第一辆车到达应急点的时间,应急所需的总资源变化量以最后一个出救点到达应急点并完成灭火的总时间(包括从出救点到达应急点所需的路程时间和该出救点用完所有应急物资所需的扑火时间)来计算。

假设,  $A_1, A_2, \dots, A_n$  为  $n$  个应急物资供应点(可出救点),  $A$  为应急地点,  $x$  为应急物资需求量,  $A_n$  的资源可用量为  $x_i > 0, i=1, 2, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i \geq x$ , 从  $A_i$  到  $A$  并完成救火一共需要的时间  $t_i > 0$ 。为了表示一般性,不妨设  $t_1 \leq t_2, \dots, \leq t_n$ , 必要时假设  $x_0=t_0=0$ , 要求给出一个方案(确定参与应急的出救点及各自提供的应急资源数量)使得应急时间最短、出救点数目最少。可行性方案  $\varphi$  表示为  $\varphi = \{(A_{i1}, x_{i1}), (A_{i2}, x_{i2}), \dots, (A_{im}, x_{im})\}$ 。根据需要,本研究讨论一次性消耗的应急多资源调度方法,把最后一个出救点到达应急点并完成灭火的总时间,记为  $T(\varphi)$ , 则  $T(\varphi) = \max_{j=1,2,\dots,m} t_{ij}$ 。用  $N(\varphi)$  表示对应于方案  $\varphi$  的出救点数目,问题变为:  $\min \begin{cases} T(\varphi) \\ N(\varphi) \end{cases}$ 。

#### 1.2 林火蔓延模型

参考王正非等<sup>[10-14]</sup>的林火蔓延模型。模型(图1)中先由火头按风向前进的纵向速度  $a=v_H t$  (其中  $t$  为火场蔓延时间,  $v_H$  为火的蔓延速度)定出对称轴及长度,再根据不同风速  $v_F$  ( $v_F$  为风速)下纵横向比例关系确定出图中横向距离  $2b$ , 从而确定出抛物线部分,火尾部分以  $2b$  为直径的半圆形,纵横比例关系  $\lambda=a:b$ 。根据文献[7]中的资料得出,纵横比例关系见表1。

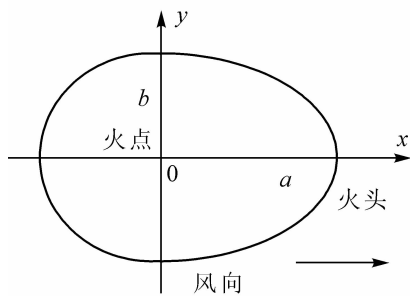


图1 火场蔓延模型  
Figure 1 Fire spread model

表1 纵横向比例

Table 1 Vertical and horizontal ratio

风速 $v_F/(m \cdot s^{-1})$	比例 $\lambda$	风速 $v_F/(m \cdot s^{-1})$	比例 $\lambda$
0	1.0	8.5~11.2	3.3
0.1~2.8	1.2	11.3~14.0	5.0
2.9~5.6	1.5	>14.0	7.0
5.7~8.4	2.2		

火的蔓延速度的预测:火的蔓延速度指单位时间内火线向前推进的直线距离。根据林火蔓延模型可以按如下公式进行计算:  $v_H=K_1 K_2 \times e^{0.154 7v_F}$ 。其中,  $K_1$  为火速在不同可燃物类型中的修正系数;  $K_2$  为火速在不同坡度条件下的修正系数;  $v_F$  为风速。

根据参考文献[12],当风力等级在1级到12级的情况下,得出风速  $v_F$  和火场蔓延速度  $v_H$  的相关数据(表2),火场蔓延速度在不同可燃物类型中的修正系数  $K_1$  和火场在不同林地地形下蔓延速度的修正系数  $K_2$ (表3),其中坡度正数值表示林火上山时蔓延时的坡度,负数值则表示下山蔓延时的坡度。因此,以火线速度来推算火场面积  $S_D(m^2 \cdot min^{-1})$  得:  $S_D = \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{\lambda^2} + \frac{4}{3} \times \frac{1}{\lambda} \right) \times (v_H t)^2$ 。其中:  $t$  为火势蔓延的时间(min)。

表 2 不同风速下火场蔓延速度

Table 2 Fire spread rate in different wind speeds

风力等级	$v_F / (m \cdot s^{-1})$	$v_H / (m \cdot min^{-1})$	风力等级	$v_F / (m \cdot s^{-1})$	$v_H / (m \cdot min^{-1})$	风力等级	$v_F / (m \cdot s^{-1})$	$v_H / (m \cdot min^{-1})$
1	2.0	6.2	5	9.8	83.0	9	20.8	500.0
2	3.6	13.9	6	12.3	144.0	10	24.2	559.0
3	5.4	50.0	7	14.9	250.0	11	27.8	625.0
4	7.4	64.6	8	17.7	353.0	12	$\geq 29.8$	833.0

火场蔓延速度在不同可燃物类型中的修正系数  $K_1$  各不相同。当可燃物类型为草甸时，其修正系数为 1.0；当可燃物类型为次生林时，其修正系数为 0.7；当可燃物类型为针叶林时，其修正系数为 0.4。

表 3 不同林场地形下火场蔓延速度的修正系数  $K_2$

Table 3 Fire spread rate correction factor  $K_2$  in the different topography

坡度范围/(°)	修正系数 $K_2$	坡度范围/(°)	修正系数 $K_2$	坡度范围/(°)	修正系数 $K_2$
-27~-23	0.32	-7~3	0.90	8~12	1.60
-22~-18	0.46	-2~0	1.00	13~17	2.10
-17~-13	0.63	0~2	1.00	18~22	2.90
-12~-8	0.83	3~7	1.20	23~27	4.10

### 1.3 模糊规划应急调度算法

现根据经典的模糊多目标规划的思路方法，以及刘春林等<sup>[15]</sup>所做出的应急系统调度研究，给出计算方法，完成对  $\min \begin{cases} T(\varphi) \\ T(\varphi) \end{cases}$  问题的求解。首先必须解出以下 2 个问题： $\min_{\varphi \in x} T(\varphi)$  和  $\min_{\varphi \in x} N(\varphi)$ 。

不妨设  $t_p = \min_{\varphi \in x} T(\varphi)$ ,  $r = \min_{\varphi \in x} N(\varphi)$ 。下面可以来讨论更特殊的模型：

$$\min N(\varphi), \text{ s.t. } \begin{cases} T(\varphi) = t_p \\ \varphi \in x \end{cases}, \min T(\varphi), \text{ s.t. } \begin{cases} N(\varphi) = r \\ \varphi \in x \end{cases}。$$

设： $\varphi_1^*$  和  $\varphi_2^*$  分别为上式的最优解，构造 2 个模糊目标集  $F_1$  和  $F_2$ ，如下：

$$\varphi_{F_1}(\varphi) = \max\{[T(\varphi_2^*) - T(\varphi)]/[T(\varphi_2^*) - T(\varphi_1^*)], 0\} = \max\{[T(\varphi_2^*) - T(\varphi)]/[T(\varphi_2^*) - T(t_p)], 0\};$$

$$\varphi_{F_2}(\varphi) = \max\{[N(\varphi_1^*) - N(\varphi)]/[N(\varphi_1^*) - N(\varphi_2^*)], 0\} = \max\{[N(\varphi_1^*) - N(\varphi)]/[N(\varphi_1^*) - N(r)], 0\}。$$

因此，模糊规划问题就可以表示为  $\max \lambda$ ：

$$\text{s.t. } \begin{cases} [T(\varphi_2^*) - T(\varphi)]/[T(\varphi_2^*) - t_p] \geq \lambda \\ [N(\varphi_1^*) - N(\varphi)]/[N(\varphi_1^*) - r] \geq \lambda \\ \varphi \in x \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases}。 \tag{1}$$

若求式(1)，则必须求出  $T(\varphi_2^*)$ ,  $N(\varphi_1^*)$ ,  $t_p$ ,  $r$ 。

设： $\varphi^* = \{(A_1, x_1), (A_2, x_2), \dots, (A_{p-1}, x_{p-1}), (A_p, x - \sum_{k=0}^{p-1} x_k)\}$ ，使得  $\sum_{k=0}^{p-1} x_k < x \leq \sum_{k=0}^p x_k$ , ( $x_0=0$ )，因为  $t_1 \leq t_2, \dots, \leq t_n$ ，因此，在  $t_p$  之前能够到达的应急物资量一定小于  $x$ ，故最早应急时间一定不会小于  $t_p$ ，则  $t_p$  为  $\min_{\varphi \in x} T(\varphi)$  的最短时间， $\varphi^*$  为其最优解。下面将给出求解  $r$  的过程。

对序列  $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}$  ( $i_1, i_2, \dots, i_n$  为  $1, 2, \dots, n$  子列的一个排列)，若存在  $k$ ,  $1 \leq k \leq m < n$ ，使得  $\sum_{j=0}^{k-1} x_{i_j} < x \leq \sum_{j=0}^k x_{i_j}$ , ( $x_{i_0}=0$ ) 则称  $k$  为该序列对  $x$  的临界下标。

让  $x_1, x_2, \dots, x_n$  从大到小排列，得到  $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}$ ,  $x_{i_1} \geq x_{i_2} \geq \dots \geq x_{i_n}$  (其中  $i_1, i_2, \dots, i_n$  为  $1, 2, \dots, n$

子列的1个排列), 求出该序列对  $x$  的临界下标  $r$ , 让  $\bar{\varphi} = \{(A_{i_1}, x_{i_1}), (A_{i_2}, x_{i_2}), \dots, (A_{i_r}, \sum_{c=1}^{k-1} x_{i_c})\}$ , 若方案  $\varphi$  可行, 则  $N(\varphi) \geq r$ , 因为  $N(\bar{\varphi}) = r$ , 所以  $\bar{\varphi}$  为  $\min_{\varphi \in x} N(\varphi)$  的最优解。

让  $j$  从大到小变化, 取  $j=1, \dots, n$ , 对  $x_1, x_2, \dots, x_j$  从大到小排列得  $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_j}, \dots, x_{i_n}$ , 求出序列对  $x$  的临界下标  $\mu$ , 并给出相应组合方案  $\varphi = \{(A_{i_1}, x_{i_1}), (A_{i_2}, x_{i_2}), \dots, (A_{i_\mu}, \sum_{c=1}^{\mu-1} x_{i_c})\}$ , 这时  $T(\varphi) \leq t$ , 让  $j=j-1$ , 这样一直做下去, 直到不存在临界下标, 最终得到一系列的方案。方案  $\varphi^j (j=1, 2, \dots, v)$ , 其  $T(\varphi^1, \varphi^2, \dots, \varphi^v)$ , 根据方案集  $\Gamma$  的性质, 可以求出式①中的  $T(\varphi^j)$  和  $N(\varphi^j)$ , 分别记为  $T_m$  和  $N_m$ , 且一定存在方案  $\varphi^v = \Gamma$ , 使得问题①最优。

此时, 式(1)变成  $\max \lambda_i$ ,

$$\begin{aligned} & (T_m - T(\varphi)) / (T_m - t_p) \geq \lambda_j \\ \text{s.t.} & \begin{cases} [N_m - N(\varphi)] / [N_m - r] \geq \lambda_j, (j=1, 2, \dots, v) \\ \varphi \in x \\ 0 \leq \lambda_j \leq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

设它们的最优目标值分别为  $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_n^*$ ,  $\lambda_j^* = \max\{0, \min\{[T_m - T(\varphi)] / (T_m - t_p), [N_m - N(\varphi)] / (N_m - r)\}\}$ , 若  $\lambda_i^* = \max\{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_n^*\}$ , 则  $\varphi^i$  为式①最优解,  $\lambda_i^*$  为最优目标值。

具体步骤如下: ①  $j=n, v=0$ ; ② 让  $x_1, x_2, \dots, x_j$  从大到小排列得  $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_j}$ , 求出序列对  $x$  的临界下标  $\mu$ , 若存在  $\mu$ , 则  $v=v+1$ , 组合方案  $\varphi^v = \{(A_{i_1}, x_{i_1}), (A_{i_2}, x_{i_2}), \dots, (A_{i_\mu}, \sum_{c=1}^{\mu-1} x_{i_c})\}$ , 求出  $T(\varphi^v)$ ,  $N(\varphi^v)$  和  $\lambda_\varphi^*$ ; 若不存在  $\varphi$ , 则转⑤; ③  $j=j-1$ ; ④ 若  $t_j = t_{j+1}$ , 转③; 否则转②; ⑤ 求出  $\lambda_i^*$ ,  $\lambda_i^* = \max\{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_n^*\}$ , 这时  $\varphi^i$  为式(1)的最优解。

### 2 基于林火蔓延模型的应急调度算法

因为本研究是在考虑林火蔓延的情况下求解算法, 应急点所需要的救火资源随时间的变化而变化, 根据上文所引用的林火蔓延模型, 可得出林火面积的蔓延公式为:  $S_D = \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{1}{\lambda^2} + \frac{4}{3} \times \frac{1}{\lambda}\right) \times (v_{Ht})^2 (S_D)$  单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 。假设刚开始着火就被发现, 此时火场受灾面积与之后蔓延面积相比可忽略不计; 现为了便于计算, 我们提出相应的假设条件: ① 假设发生火灾的地区当时的风速为  $0 \sim 2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ② 发生火灾当时的风力等级为1级; ③ 火场内的可燃物类型为草甸且坡度范围为  $-2^\circ \sim 2^\circ$ ; ④ 将出救点的多种出救资源总量进行量化, 首先规定1份单位资源量的大小, 然后把各种人力物力资源折算成单位资源量, 那么每个出救点的可供出救总资源量则相应计为  $X$  份资源量; ⑤ 假设每一份出救的资源在单位时间内能够扑灭的林火面积为  $p = 17 \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

根据表1和表2, 可以分别得到与之对应的  $\lambda$  和  $V_H$ 。由此可以计算出: 随着时间的变化, 火灾蔓延的面积为  $S_D = \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{1}{\lambda^2} + \frac{4}{3} \times \frac{1}{\lambda}\right) \times (v_{Ht})^2 \leq 85 \text{ t}^2 \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ , 而所需应急的总资源量  $X = S_D / p \leq 5 \text{ t}^2$  份。

结合上文中的模糊规划算法, 将  $X$  代入, 然后求解出最优解即可。

### 3 算例验证

仿真数据: 设共有11个出救点, 每个出救点到达应急点并完成扑火工作所需的时间为  $t_i (\text{min})$ , 每个出救点拥有的资源量为  $x_i$  (份) 及应急所需的总资源量  $X$  (份), 如表4所示。计算过程及结果如表5所示。  $t_p = 9$  分,  $r = 4$  个,  $T_m = 11$  分,  $N_m = 6$  个。可以计算出,  $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \lambda_3^* = 0$ ,  $\lambda_4^* = \min\{(11-10)/(11-9), (6-5)/(6-4)\} = 0.5$ ,  $\lambda_5^* = 0$ 。

故,  $\lambda_i^* = \max\{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_3^*, \lambda_4^*, \lambda_5^*\} = \lambda_4^* = 0.5$ , 所以  $\varphi^4 = \{(x_8, 150), (x_4, 110), (x_6, 110), (x_7, 100), (x_3, 80)\}$  为最优应急调度方案。

表 4 仿真数据表  $X=5t^2$

Table 4 Simulation data

出救点	$t_i/\text{min}$	$x_i/\text{份}$	出救点	$t_i/\text{min}$	$x_i/\text{份}$	出救点	$t_i/\text{min}$	$x_i/\text{份}$
1	5	20	5	8	60	9	11	200
2	5	40	6	9	110	10	12	15
3	6	80	7	10	100	11	15	500
4	7	110	8	10	150			

表 5 计算过程表

Table 5 Calculation process

$j$	$X$	可出救点资源量(从大到小排列)	$\mu$	$v$	$N(\varphi)$	$T(\varphi)$
11	1 125	$x_{11}, x_{10}, x_9, x_8, x_4, x_6, x_7, x_3, x_5, x_2, x_1$	4	1	$\{(x_{11}, 500), (x_{10}, 300), (x_9, 200), (x_8, 150)\}$	15
10	720	$x_{10}, x_9, x_8, x_4, x_6, x_7, x_3, x_5, x_2, x_1$	4	2	$\{(x_{10}, 300), (x_9, 200), (x_8, 150), (x_4, 110)\}$	12
9	605	$x_9, x_8, x_4, x_6, x_7, x_3, x_5, x_2, x_1$	4	3	$\{(x_9, 200), (x_8, 150), (x_4, 110), (x_6, 80)\}$	11
8	500	$x_8, x_4, x_6, x_7, x_3, x_5, x_2, x_1$	5	4	$\{(x_8, 150), (x_4, 110), (x_6, 110), (x_7, 100), (x_3, 80)\}$	10
7		$t_8=t_7$ , 跳过不计	6	5	$\{(x_4, 110), (x_6, 110), (x_3, 80), (x_5, 60), (x_2, 40), (x_4, 20)\}$	9
6	405	$x_4, x_6, x_3, x_5, x_2, x_1$				
5	320	不存在				

### 4 结论

本算法以王正非等的林火蔓延模型为基础，在考虑火速、风力、坡度等因素下，得出不同着火时间下灭火资源动态需求量，结合模糊规划方法求解开始时间最短以及出救点个数最少的森林资源火灾应急调度优化出救方案，可为森林扑火行动提供理论指导。当然，由于模型中部分参数值来自于经验数据，其可靠性如何需要更多的实际案例来检验。

同时，在今后的研究中，需进一步考虑每个出救点扑火完成时的剩余着火范围问题，如第一个出救点到达并结束救火时的时间为  $t_1$ ，则剩余火场面积相应变为  $S_{D_1}=S_D-\left(\frac{\pi}{2}\times\frac{1}{\lambda^2}+\frac{4}{3}\times\frac{1}{\lambda}\right)\times[v_H(t-t_1)]^2$ ，后续出救点连续出救依次完成扑火时间为  $t_2\cdots t_n$ ，第  $n$  个点扑火完成时剩余火场面积表示为  $S_{D_n}=S_D-\left(\frac{\pi}{2}\times\frac{1}{\lambda^2}+\frac{4}{3}\times\frac{1}{\lambda}\right)\times[v_H(t-t_1)]^2-\cdots-\left(\frac{\pi}{2}\times\frac{1}{\lambda^2}+\frac{4}{3}\times\frac{1}{\lambda}\right)\times[v_H(t-t_1-\cdots-t_n)]^2$  一直到  $S_{D_n}=0$  表示灭火完成。这是模型修正的重点。

### 参考文献：

[1] SANNOMIYA N, TATEMURA K. Application of genetic algorithm to a parallel path selection problem [J]. *Int J Syst Sci*, 1996, **27** (2): 269 - 274.

[2] YAMAD T. A network flow approach to a city emergency evacuation planning [J]. *Int J Syst Sci*, 1996, **27** (10): 931 - 936.

[3] RENAUD J. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem [J]. *Comput & Oper Res*, 1996, **23** (3): 229 - 235.

[4] 刘春林, 何建敏, 施建军. 一类应急物资调度的优化模型研究[J]. *中国管理科学*, 2001, **9** (3): 29 - 36.  
LIU Chunlin, HE Jianmin, SHI Jianjun. Emergency supplies scheduling optimization model [J]. *Chin J Manage Sci*, 2001, **9** (3): 29 - 36.

[5] 何建敏, 刘春林, 尤海燕. 应急系统多出救点的选择问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2001 (11): 89 - 93.  
HE Jianmin, LIU Chunlin, YOU Haiyan. Choices of rescue points in emergency systems [J]. *Syst Eng Theory & Pract*, 2001 (11): 89 - 93.

[6] 刘春林, 沈厚才. 一类离散应急供应系统的两目标优化模型[J]. *中国管理科学*, 2003, **11** (4): 27 - 31.

- LIU Chunlin, SHENG Houcai, Two objective optimization model for discrete emergent supply systems [J]. *Chin J Manage Sci*, 2003, **11** (4): 27 – 31.
- [7] 高淑萍, 刘三阳. 应急系统调度问题的最优决策[J]. 系统工程与电子技术, 2003, **25** (10): 1222 – 1224.  
GAO Shuping, LIU Sanyang. Optional decision for scheduling problem in emergency systems [J]. *Syst Eng Electron*, 2003, **25** (10): 1222 – 1224.
- [8] 潘芳, 卞艺杰, 潘郁. 多资源多出救点组合应急调度模型[J]. 统计与决策, 2010 (20): 25 – 27.  
PAN Fang, BIAN Yijie, PAN Yu. Emergency management model of multi resources and rescue points [J]. *Stat Decisi*, 2010 (20): 25 – 27.
- [9] 高本河, 伍慧飞. 多资源调度中应急物流出救点最少问题的优化[J]. 物流技术, 2009, **28** (1): 68 – 69.  
GAO Benhe, WU Huifei. The optimization problem of minimum rescue points in multi resource scheduling emergency logistics [J]. *Logist Technol*, 2009, **28** (1): 68 – 69.
- [10] 王正非. 通用森林火险级系统[J]. 自然灾害学报, 1992, **1** (3): 39 – 44.  
WANG Zhengfei. Current forest fire danger rating system [J]. *J Nat Disasters*, 1992, **1** (3): 39 – 44.
- [11] 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 Guangyu, LIU Yong. The mathematical model of fire spread and application [J]. *J Northeast For Univ*, 1994, **22** (2): 31 – 36.
- [12] 宋志杰. 林火原理和林火预报[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 295 – 299.
- [13] 郑焕能. 火场参数的计算与应用[J]. 森林防火, 1988, **4** (3): 9 – 10.  
ZHENG Huanneng. Fire parameters calculation and application [J]. *For Fire Prev*, 1988, **4** (3): 9 – 10.
- [14] 汪新凡. 数学建模与信息技术[J]. 教学研究, 2006, **29** (4): 326 – 329.  
WANG Xinfan. Mathematical modeling and information technology [J]. *Teach & Res*, 2006, **29** (4): 326 – 329.
- [15] 刘春林, 何建敏, 盛昭瀚. 应急系统调度问题的模糊规划方法[J]. 系统工程学报, 1999, **14** (4): 351 – 355.  
LIU Chunlin, HE Jianmin, SHENG Zhaohan. Fuzzy programming for scheduling problem in emergency systems [J]. *J Syst Eng*, 1994, **14** (4): 351 – 355.