

引用本文

郭昕曜,李嘉毅,王远声.基于SPN的森林火灾空地联动应急救援流程建模分析[J].消防科学与技术,2026,45(5): 143—148.

Guo Xinyao, Li Jiayi, Wang Yuansheng. Modeling and analysis of forest fire air-ground coordination emergency rescue process based on SPN[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(5): 143—148.

基于SPN的森林火灾空地联动应急救援流程建模分析

郭昕曜¹, 李嘉毅¹, 王远声²

(1. 郑州航空工业管理学院 民航学院, 河南 郑州 450046;

2. 华北水利水电大学 生态环境学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为提高森林火灾空地联动应急救援效率并明确救援流程的关键环节,本文借鉴非常规突发事件应急救援工作流程,设计了结合“航空灭火”和“地面灭火”的森林火灾空地联动救援流程;以2018年山东省沂源县“4·6”森林火灾救援过程为例,基于随机Petri网模型仿真分析了空地联动救援系统的救援效率和关键环节,探讨了制约救援效率的关键问题和产生原因,揭示了救援流程中关键环节间影响机制。结果显示,余火清理、吊桶作业控制火势、救援航空器申请批准3个环节的变迁利用率较高,是制约救援效率的关键环节;吊桶作业和余火清理对总体救援时间的影响更为敏感,但航空器申请批准环节可进一步提升上述2个环节的效率。研究结论为森林火灾应急管理部门制定空地联动救援流程提供决策依据。

关键词:森林火灾;空地联动救援;救援效率;救援流程;SPN模型

中图分类号:X913.4;S762.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.05.0143.06

Modeling and analysis of forest fire air-ground coordination emergency rescue process based on SPN

Guo Xinyao¹, Li Jiayi¹, Wang Yuansheng²

(1. School of Civil Aviation, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou Henan 450046, China; 2. School of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan 450046, China)

Abstract: To enhance the efficiency of air-ground coordinated emergency rescue in forest fires and identify the critical links in the rescue process, this study draws on the emergency rescue workflows for unconventional emergencies to design a forest fire air-ground coordination rescue process integrating both "aerial firefighting" and "ground firefighting". Taking the 2018 "4·6" forest fire rescue operation in Yiyuan County, Shandong Province as a case study, a simulation analysis of the efficiency and key links of the air-ground coordination rescue system was conducted based on the Stochastic Petri Net (SPN) model. The key issues constraining rescue efficiency are explored, their underlying causes are analyzed, and the interaction mechanisms among critical links in the rescue process are revealed in the study. The results indicate that fire mop-up, bucket operations for fire suppression, and the approval of rescue aircraft requests have high transition utilization rates, making them the key constraints on rescue efficiency. Bucket operations and fire mop-up exhibit greater sensitivity to overall res-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72304253); 教育部人文社会科学研究项目 (22YJC630027); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2024GGJS098); 河南省科技攻关项目 (252102321022); 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (26HASTIT058); 河南省重点研发专项项目 (261111322500)

作者简介: 郭昕曜, 郑州航空工业管理学院副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事航空应急救援方面的研究, 河南省郑州市郑东新区, 450046。

通信作者: 王远声, 华北水利水电大学副教授, 硕士生导师, wangyuansheng@ncwu.edu.cn。

收稿日期: 2025-02-27; **修回日期:** 2025-05-06

cue time, while the aircraft request approval process can further enhance the efficiency of these two links. The findings provide decision-making support for emergency management authorities in formulating air-ground coordinated rescue processes for forest fire response.

Key words: forest fire; air-ground coordination emergency rescue; rescue efficiency; rescue processes; SPN

文献数据显示,近年来由全球气候变暖导致的森林火灾事故显著增加^[1]。就我国而言,2024年共发生森林火灾292起,因灾死亡13人,虽然较历年林火发生起数有所降低,但为应对此类自然灾害,各级应急部门仍出动了近14.6万人次的消防救援人员开展扑救工作。为提升救援范围可达性和响应快速性,近年来业界做了大量的研究工作,探索如何利用航空器灵活性、机动性和地理条件弱限制性的特点,参与森林灭火的应急响应。在实践应用层面,目前我国已建成大庆和昆明2个森林消防航空救援支队和南、北方2个航空护林总站,但从历次森林火灾的航空扑救情况看(如2018年山东省沂源县“4·6”森林火灾^[2]和2022年浙江省景宁县“4·12”森林火灾^[3]),在航空器进场时机、应急任务分配和空地联动救援流程等方面仍存在效率不高的问题。在学术研究层面,朱新平等^[4]结合OODA循环理论和协同决策理论,按照“信息感知-灾情研判-科学决策-调度执行”的思路,设计了一种促进空地联动的空地一体化指挥体系;顾寅等^[5]建立了航空消防大飞机灭火任务顶层指标半物理半经验模型,提出了航空灭火任务的顶层指标分解分配方法;宋洋等^[6]基于遗传算法和灰狼算法,建立了森林火灾场景下的救援直升机多目标调度模型;骆晨等^[7]引入了双隶属度函数用以表征森林火灾航空救援决策中的派遣特性;余威等^[8]通过对比国外森林灭火技

木的整体情况,指出了当前我国在森林灭火技术方面存在的不足。综上所述,既有研究主要集中于森林火灾航空应急体系建设、航空灭火剂使用、救援直升机调度等层面,较少关注航空救援如何与地面救援形成高效的联动救援机制。

因此,本文通过分析救援航空器在森林火灾中的应用情况,基于随机Petri网(SPN)模型和马尔科夫链分析模型,设计空地联动救援流程模型,并以2018年山东省沂源县“4·6”森林火灾为例,探讨空地联动的森林火灾救援流程的效率,确定关键环节与优化方向,以期为提高森林火灾救援效率提供决策参考。

1 森林火灾空地联动救援流程设计

数个森林火灾航空救援的现实案例表明,林火发生后救援航空器并非第一时间直接参与到应急响应和扑救工作中。一般流程为:地方政府接到林火警情后,启动森林火灾应急处置预案,组织地面救援力量进行响应工作。若地面响应遇到火场风力大、地势陡峭等困境,临时采取避险行动,暂时撤出林火现场并向省森林草原防灭火指挥部报告,请求航空灭火增援。本文参考非常规突发事件应急管理的一般工作原则^[9],按照“火情监测→信息传递→态势研判→出动救援→明火扑灭→余火清理”的逻辑框架和应急思路,结合航空救援在森林火灾中的运作机制构建森林火灾空地协同救援流程模型,如图1所示。

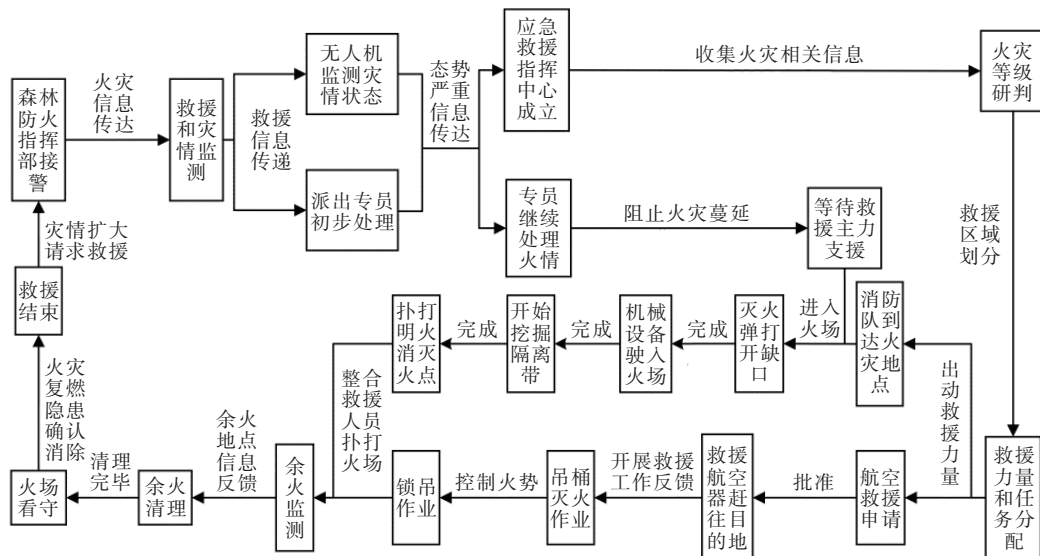


图1 森林火灾空地联动救援流程

Fig. 1 Forest fire air-ground coordination rescue process

林火发生后,由森林防火指挥部就近组织救援力量前往受灾地点。同时,派出无人机监控林火现场,进行态势反馈。若灾情升级,则成立应急救援指挥中心,结合无人机监测等手段进行火灾态势研判,制定空地联动应急救援方案并组织救援力量。其中,地面救援力量到达林火现场后,用机械设备挖掘隔离带,阻止火势蔓延。同时,航空救援力量在通过空域等审批后前往现场实施吊桶作业,从中心位置控制火势。火势减弱后,由航空吊索将救援人员投放至火场,“由内至外”实施扑救工作,最终与“由外至内”灭火的地面救援力量整合,完成多点突破和分段扑救。待灭火作业结束后,采取航空器携带红外摄像设施持续监测余火并进行火场看守。

2 基于 SPN 的森林火灾空地联动救援流程模型

2.1 模型构建

用SPN模型对森林火灾空地联动应急救援流程进行建模分析,根据森林火灾应急救援流程和SPN模型各关键环节间的输入和输出关系,将任务资源、信息、条件表示为有限的库所集(P),将救援活动中的时间、动作和信息的发送和接收表示为有限的变迁集(T)。根据优化后的前期信息反馈、中期火灾救援及后期火场处置之间的关系建立随机SPN,见图2。

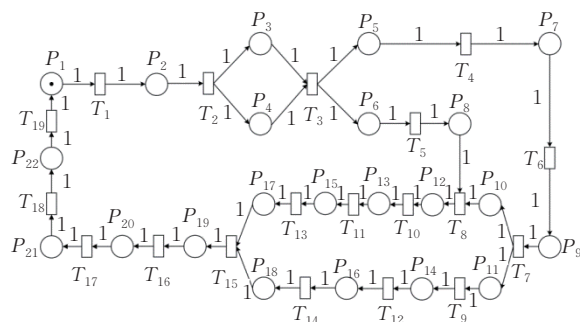


图2 森林火灾空地联动救援流程的Petri网模型

Fig. 2 Petri net model of forest fire air-ground coordination rescue process

本文旨在探讨森林火灾空地联动应急救援效率及耗时较长的救援环节。因此,设置应急流程中各变迁权重均为1,初始库所(P_1)拥有1个托肯。模型含义为:当接到森林火灾发生信息时, P_1 开始向下传递托肯。 T_1 和 T_2 为林火发生后,应急部门派遣专员前往现场进行初步处理并调遣无人机收集火势相关信息。 T_3 为根据现场专员和无人机信息反馈判定火灾态势并开始空地救援部署。 T_4 、 T_6 和 T_7 为确定火灾等级并派遣救援队伍前往分配好的救援区域开展救援活动。 T_5 为先遣专员继续留在现场组织初步火灾扑救,并与后续地面救援主力(T_8)进行整合。 T_9 至 T_{15} 为航空救援和地面救援两部分的各项救援任务,并在 T_{15} 处进行整合(双线协同作业)。 T_{16} 到 T_{18} 为后

期处置工作,组织进行余火清理和火场看守环节。 T_{19} 为灾情进一步扩大,需要增援。模型中所包含的22个库所和19个变迁具体含义如表1所示。

表1 模型中库所和变迁的含义

Table 1 Meaning of repository and transition in the model

库所	含义	变迁	含义
P_1	森林防火指挥部接警	T_1	火灾信息传达
P_2	救援和灾情监测	T_2	救援信息传递
P_3	无人机监测灾情状态	T_3	态势严重信息传达
P_4	派出专员初步处理	T_4	收集火灾相关信息
P_5	应急救援指挥中心成立	T_5	阻止火灾蔓延
P_6	专员继续处理火情	T_6	救援区域划分
P_7	火灾等级研判	T_7	出动救援力量
P_8	等待救援主力支援	T_8	进入火场
P_9	救援力量和任务分配	T_9	航空救援申请批准
P_{10}	消防队到达火灾地点	T_{10}	缺口打开完成
P_{11}	航空救援申请	T_{11}	机械设备驶入完成
P_{12}	灭火弹打开缺口	T_{12}	航空器开展救援工作反馈
P_{13}	机械设备驶入火场	T_{13}	隔离带挖掘完成
P_{14}	救援航空器赶往目的地	T_{14}	吊桶作业控制火势
P_{15}	开始挖掘隔离带	T_{15}	整合救援人员扑打火场
P_{16}	吊桶灭火作业	T_{16}	余火地点信息反馈
P_{17}	扑打明火消灭火点	T_{17}	余火清理完毕
P_{18}	锁吊作业	T_{18}	火灾复燃隐患确认消除
P_{19}	余火监测	T_{19}	灾情扩大请求救援
P_{20}	余火清理	—	—
P_{21}	火场看守	—	—
P_{22}	救援结束	—	—

2.2 模型有效性分析

运用 PIPE 软件对上述模型进行性能分析与检测, 可得模型的可达标识图, 如图 3 所示。分析表明, 森林火灾空地联动救援流程的 SPN 模型中托肯流动正常, 每个库所中仅存在一个托肯, 未出现锁死现象。

由图3可知,本文构建的森林火灾空地联动应急救援流程模型具有安全性、有界性、活性和可达性。图中状态节点 $S_0 \sim S_{36}$ 与可达标识 $M_0 \sim M_{36}$ 一一对应,则初始可达标识 $M_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$,表明在初始状态下,库所 P_1 有1个托肯,而其他库所均无托肯,简化为 $M_0 = (1)$ 。同理,将SPN模型中所有标识进行简化,可得具体分布情况为: $M_0 = (1), M_1 = (2), M_2 = (3, 4), M_3 = (5, 6), M_4 = (5, 8), M_5 = (6, 7), M_6 = (7, 8), M_7 = (6, 9), M_8 = (8, 9), M_9 = (6, 10, 11), M_{10} = (8, 10, 11), M_{11} = (6, 10, 14), M_{12} = (8, 10, 14), M_{13} = (11, 12), M_{14} = (6, 10, 16), M_{15} = (8, 10, 16), M_{16} = (12, 14), M_{17} = (11, 13), M_{18} = (6, 10, 18), M_{19} = (8, 10, 18), M_{20} = (12, 16), M_{21} = (13, 14), M_{22} = (11, 15), M_{23} = (12,$

18), $M_{24}=(13, 16)$, $M_{25}=(14, 15)$, $M_{26}=(11, 17)$, $M_{27}=(13, 17)$, $M_{28}=(15, 16)$, $M_{29}=(14, 17)$, $M_{30}=(15, 18)$, $M_{31}=(16, 17)$, $M_{32}=(17, 18)$, $M_{33}=(19)$, $M_{34}=(20)$, $M_{35}=(21)$, $M_{36}=(22)$ 。

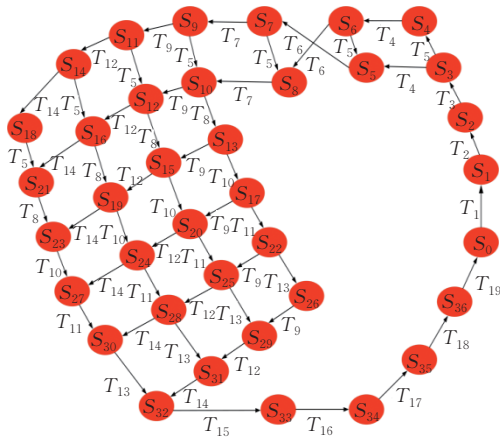


图3 森林火灾空地联动救援模型的可达标识图

Fig. 3 Reachable mark diagram of the forest fire air-ground coordination rescue model

2.3 模型系统性能分析

1)结合马尔科夫链稳态分布与切普曼-柯尔莫哥洛夫方程,求解各标识的状态稳定概率^[10],见式(1)。

$$\begin{cases} PQ=0 \\ \sum_{i=1}^n P(M_i)=1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P=[P(M_1), P(M_2), \dots, P(M_n)]$,表示各标识的稳态发生率; $Q=(\xi_{ij})_{n \times n}$,为变迁激发率矩阵。

当 $i \neq j$,且马尔可夫链中 M_i 到 M_j 之间存在有向弧,则 ξ_{ij} 等于弧上的变迁激发率;若两者间不存在有向弧,则 ξ_{ij} 为0;当 $i=j$ 时,则 $\xi_{ij}=-\sum_{i \neq j} \xi_{ij}$ 。

2)库所的概率密度函数为式(2)。

$$P[M(P_i)=1]=\sum_j P[M_j] \quad (2)$$

式中: M_j 表示库所 P_i 中含有托肯的状态标识。

3)变迁利用率表示能触发变迁的所有标识稳态概率之和,变迁利用率高,说明该救援环节在森林火灾“空地协同”救援流程中应急决策与响应的耗时较长,计算见式(3)。

$$U(T)=\sum_{M \in E} P[M] \quad (3)$$

式中: E 为让变迁 T 可实施的所有可达标识的集合。

4)系统的平均延迟工作时间。根据Little原则以及平衡原理^[11],通过式(4)可得系统的平均延迟工作时间,据此可描述整体救援系统的效率。

$$t=\bar{N}/[R(T,P)] \quad (4)$$

式中: $\bar{N}$ 为系统稳定状态下库所标的平均标记数; R 为流入系统的标记流速。

$R(T,P)=W(T,P)U(T_1)\lambda_1$,其中 $W(T,P)$ 表示变迁 T 指向库所 P 的有向弧权值, $U(T_1)$ 为变迁 T_1 的变迁利用率, λ_1 为变迁 T_1 的平均实施速率。

5)确定关键环节。推导式(1)~式(4),可得系统总体运行时间 t 与可达标识的稳定状态概率 $P(M_i)$ 的函数关系,见式(5)。

$$t=\frac{\bar{N}}{R(T,P)}=\frac{\sum_{m=2}^{18} U(T_m)}{w \cdot U(T_1) \cdot \lambda_1}=\frac{1}{\alpha_i \cdot P(M_i)}+\beta_i \quad (5)$$

式中: α_i, β_i 均为常数。

分析表明,系统的运行时间与各环节的实施速率为负相关,即随着救援任务实施速度的增加,总体救援时间减少。据此,本文选取变迁利用率最高的环节作为关键研究对象,探讨关键环节实施速率对流程运行时间的影响,通过调试关键环节的实施速率,分析总体救援运行时间的变化。

3 沂源县森林火灾“空地一体化”应急救援仿真

以2018年山东省沂源县“4·6”森林火灾救援过程为例,基于本文构建的森林火灾空地联动救援模型,仿真分析系统的总体救援效率并识别关键环节,探讨制约救援效率的关键问题和产生的原因。通过查阅相关资料和文献[2]确定山东省沂源县“4·6”森林火灾中总体救援时长为18 h,并确定部分变迁的实施速率,如航空救援申请批准、吊桶作业控制火势等,其他变迁参考相关文献中变迁实施的比例进行估算,各个变迁实施速率具体值如表2所示。

表2 各变迁的平均实施速率

Table 2 Average rate of implementation of variations

变迁	实施速率/次/h	变迁	实施速率/次/h
T_1	3.00	T_{11}	3.00
T_2	1.50	T_{12}	1.70
T_3	150	T_{13}	0.92
T_4	6.00	T_{14}	0.53
T_5	1.00	T_{15}	1.00
T_6	2.00	T_{16}	1.00
T_7	10.00	T_{17}	0.43
T_8	1.33	T_{18}	1.50
T_9	0.80	T_{19}	1.50
T_{10}	4.50	—	—

3.1 模型仿真结果分析

将表2中各变迁实施速率代入式(1),可得全部可达标识的稳态概率,如表3所示。

利用式(2)计算各库所中含有托肯的概率,计算可得22个库所繁忙概率,继而通过式(3)得到各变迁利用率,如表4所示。结果表明,模型中变迁利用率较高的3个变迁为 T_{17} 余火清理完毕、 T_{14} 吊桶作业控制火势、 T_9 救援航空器申请批准,概率分别为0.199 03、

0.161 49、0.106 97。变迁利用率高,说明该环节在救援流程中占用时间比重大,是制约救援效率的关键环节,也是需要优化的重点环节。

表3 可达标识的稳态概率结果

Table 3 Steady state probability result of reachable mark

标识	稳态概率	标识	稳态概率
$P(M_0)$	0.028 53	$P(M_{19})$	0.011 16
$P(M_1)$	0.057 05	$P(M_{20})$	0.005 87
$P(M_2)$	0.005 71	$P(M_{21})$	0.001 82
$P(M_3)$	0.012 23	$P(M_{22})$	0.016 02
$P(M_4)$	0.002 04	$P(M_{23})$	0.003 99
$P(M_5)$	0.024 45	$P(M_{24})$	0.009 81
$P(M_6)$	0.018 34	$P(M_{25})$	0.003 37
$P(M_7)$	0.004 45	$P(M_{26})$	0.018 42
$P(M_8)$	0.004 11	$P(M_{27})$	0.007 72
$P(M_9)$	0.024 70	$P(M_{28})$	0.030 76
$P(M_{10})$	0.030 90	$P(M_{29})$	0.003 96
$P(M_{11})$	0.003 59	$P(M_{30})$	0.042 88
$P(M_{12})$	0.004 86	$P(M_{31})$	0.087 05
$P(M_{13})$	0.007 75	$P(M_{32})$	0.085 58
$P(M_{14})$	0.010 57	$P(M_{33})$	0.085 58
$P(M_{15})$	0.017 43	$P(M_{34})$	0.199 03
$P(M_{16})$	0.001 41	$P(M_{35})$	0.057 05
$P(M_{17})$	0.009 18	$P(M_{36})$	0.057 05
$P(M_{18})$	0.005 60	—	—

表4 变迁利用率结果

Table 4 Utilization of the transition

变迁	利用率	变迁	利用率
T_1	0.028 53	T_{11}	0.028 53
T_2	0.057 05	T_{12}	0.019 01
T_3	0.005 71	T_{13}	0.093 03
T_4	0.014 27	T_{14}	0.161 49
T_5	0.036 68	T_{15}	0.085 58
T_6	0.042 79	T_{16}	0.085 58
T_7	0.035 35	T_{17}	0.199 03
T_8	0.064 35	T_{18}	0.057 05
T_9	0.106 97	T_{19}	0.057 05
T_{10}	0.019 02	—	—

余火清理环节耗时较长的原因在于:该案例中起火位置为山顶,继而向下蔓延,在风力作用下形成下山火。当日风力为5~6级,阵风可达7级,风速较高,且当地植被茂密,形成蔓延更快、火势更强烈的树冠火。同时,由于山势险峻,海拔较高,救援人员前往余火地点速度较慢,无法第一时间阻止火势蔓延,导致多处火场死灰复燃,并形成燃爆,突破隔离带,进一步增加了余火清理工作的难度。

直升机吊桶灭火作业耗时较长的原因在于:林火

当日风力过大,增加了救援航空器的操控难度。为确保飞行安全,驾驶员降低飞行速度,从而延长了作业时间。此外,参与此次救火的直升机为1架M-26重型直升机(单次载水量为15 t)和1架M-8中型直升机(单次载水量为3 t),载水量较小的M-8中型直升机需要频繁地进行取水工作,且取水点距火场平均航距达12 km,直升机大部分作业时间均消耗在往返取水途中,严重延长了吊桶灭火作业时间。

救援航空器申请批准环节耗时较长的原因在于:部分基层防火指挥部门不了解森林火灾救援直升机的申请流程,且空域问题一直为制约我国航空应急的关键,从而致使任务审批、航线规划、机组协调等环节衔接不畅,延误了直升机救援的时效性。

通过对2018年山东省沂源县“4·6”森林火灾空地联动救援时间的仿真计算,得到该系统的平均实施时间为13.65 h,比现实案例中地面救援和航空救援先后响应的原方案(18 h)缩短了4.35 h,效率提高24.2%。具体计算见式(6)。

$$t = \frac{\bar{N}}{R(T, P)} = \frac{\sum_{m=2}^{19} U(T_m)}{w \cdot U(T) \cdot \lambda_1} = 13.65 \text{ h} \quad (6)$$

3.2 救援关键环节分析

为了分析关键环节的运行速率大小对整体救援时间的影响,本文分别拟合了 T_{17} 、 T_{14} 和 T_9 3个关键环节的实施速率(λ_{17} 、 λ_{14} 、 λ_9)与总体救援时间的变化关系(图4),设置步长为0.1。

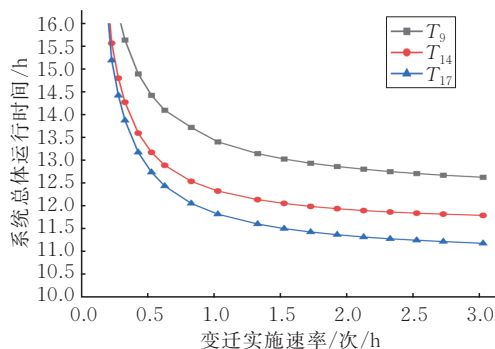


图4 3个救援关键环节的实施速率与总体救援时间的变化关系

Fig. 4 Relationship between the implementation rate of 3 key rescue links and the overall rescue time

对比可知,随着变迁实施速率的变大,总运行时间逐渐变小,总体救援时间的变化幅度随之变小,逐渐趋于平稳。当 $\lambda_{17} \geq 0.83$ 次/h、 $\lambda_{14} \geq 1.33$ 次/h,以及 $\lambda_9 \geq 1.53$ 次/h时,总体救援用时变化甚微。

此外,从应急管理阶段来看,3个关键环节中航空救援申请批准 T_9 属于灾害的前期信息反馈阶段,吊桶作业控制火势 T_{14} 属于中期火灾救援阶段,余火清理完毕 T_{17} 属于后期火场处置。就我国航空应急现

状而言,救援航空器审批(如空域申请等)一直是制约航空救援发展的主要愿意之一。为了探讨救援航空器审批环节对其他关键环节以及系统总体运行时间的影响,本文仿真了 T_9 实施速率不变、0.75倍频次和0.5倍频次3种不同状态下, T_{14} 和 T_{17} 与系统总体运行时间的变化规律,见图5。

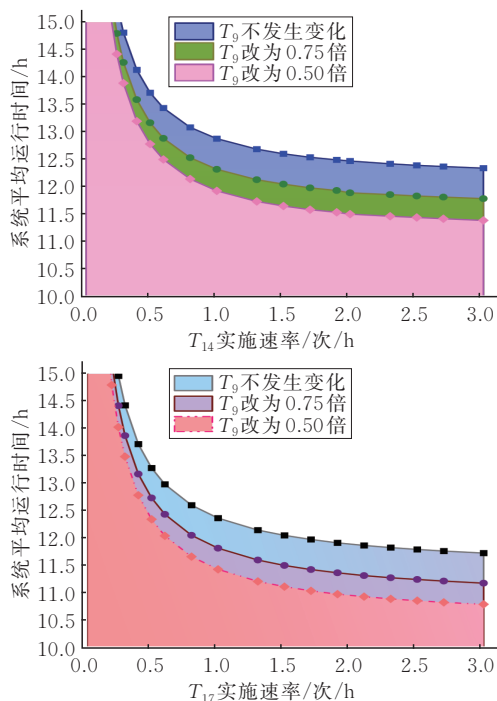


图5 T_{14} 和 T_{17} 不同实施速率下总体救援时间的变化

Fig. 5 Total rescue time under different implementation rates of T_{14} and T_{17}

仿真结果表明:当 T_{14} 和 T_{17} 实施速率较低时,改变 T_9 对系统运行时间影响不明显,而随着实施速率的增加,3种情况下系统运行时间的差异逐渐加大, T_9 实施速率的改变对于系统整体时间的影响相较于 T_{14} 和 T_{17} 并不明显,但其速率增大能够加快航空器进入工作环节,减缓火场的蔓延速度,进而减少吊桶作业和余火清理环节的工作量,提高效率。同时,系统运行时间可从13.65 h进一步减少1.92 h,将救援时长缩短为11.73 h。由此给予决策人员一定的启发,即不仅要考虑关键变迁自身的实施速率变化对系统总体运行时间的影响,同时也要考虑不同变迁之间的联系,综合考虑3个变迁间的联动性,可进一步提升救援效率。通过分析关键变迁实施速率在独立调节与联合调节两种方案下对系统总体运行时间的影响,探究系统运行效率提升的效益拐点,此时的实施速率视为资源投入与运行效率间的最优平衡点。因此,本文将该节点的速率定义为最优变迁实施速率。若上述3个变迁实施速率达到最优,则救援时间可以从11.73 h进一步缩短至10.90 h。

为提高森林火灾应急救援效率,应急部门可优先

调度航空器向距离较近的取水点和火源点执行吊桶灭火,最大限度减少飞行时间和任务间隙,通过优化前期环节间接提升后续救援任务的响应效率;同时,建立实时反馈机制,利用无人机红外探测等技术确保余火监测,及时掌握火场状况,并通过信息化平台简化审批流程,加快审批,确保航空器快速投入作业。

4 结论

1)构建了地面救援力量“由外至内”和航空救援力量“由内至外”的森林火灾空地联动应急救援流程SPN模型,结合沂源县“4·6”森林火灾的应急救援过程,可将救援时间由18 h缩短至13.65 h,整体效率提高24.2%。

2)余火清理完毕、吊桶作业控制火势和救援航空器申请批准3个环节的变迁利用率较高,是森林火灾空地联动应急救援流程模型中的关键及待优化环节,最优变迁实施速率分别为0.83、1.33、1.53次/h,对应的救援时间可以从13.65 h降低至10.90 h。

3)救援航空器审批相对于吊桶作业控制火势和余火清理,对整体救援时长影响较弱,但审批速度的加快可提高吊桶作业控制火势和余火清理的效率。

参考文献:

- [1] ZHAO J, YUE C, WANG J, et al. Forest fire size amplifies post-fire land surface warming[J]. Nature, 2024, 633:828—834.
- [2] 宋宁. 空地联合扑救山区森林火灾——以沂源县“4·6”森林火灾为例[J]. 森林防火, 2023, 41(3):59—62.
- [3] 陈春广, 王灵祥, 赵晨晨, 等. 森林航空消防力量扑救森林火灾探析——以浙江景宁“4·12”森林火灾为例[J]. 安徽林业科技, 2022, 48(4):49—51.
- [4] 朱新平, 瞿菁菁, 徐川. 森林火灾救援空地一体化指挥体系设计[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(9):1287—1290.
- [5] 顾寅, 林凯毅, 项拓宇, 等. 航空消防大飞机灭火任务顶层指标分解分配方法及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(6):934—940.
- [6] 宋洋, 程嘉敏. 多场景森林火灾灭火直升机调度策略[J]. 综合运输, 2024, 46(3):103—108.
- [7] 骆晨, 潘卫军, 朱新平, 等. 通用航空森林火灾救灾决策模型研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(12):1784—1787.
- [8] 余威, 陆强. 我国森林灭火技术装备应用现状与发展趋势[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(3):421—424.
- [9] 吴超. 应急管理的基础理论研究[J]. 安全, 2025, 46(1):55—63.
- [10] 黄品, 付鹏, 许叶军. 基于随机Petri网的多部门协同农业抗旱应急处置流程建模——以内蒙古巴彦淖尔市为例[J]. 系统管理学报, 2021, 30(6):1142—1151.
- [11] 郭昕曜, 孙延杰, 吕伟. 洪涝灾害“空地一体化”应急救援响应流程建模及时效分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(1):48—55.

(责任编辑:邢玉军)