

引用本文

陶鹏宇,宋文琦,姜芊叶,等.消防员烟热训练心理生理状态影响因素研究[J].消防科学与技术,2026,45(8):129-133.

Tao Pengyu, Song Wenqi, Jiang Qianye, et al. Study on influencing factors of psychological and physiological states in firefighters' smoke-heat training[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(8): 129-133.

消防员烟热训练心理生理状态影响因素研究

陶鹏宇, 宋文琦, 姜芊叶, 高 锐

(应急管理部天津消防研究所, 天津 300381)

摘 要:为分析影响消防员在烟热训练中心理生理状态的潜在因素,采用消防员智能化烟热训练装置,借助特征数据关联分析模型,通过采集100名消防员烟热训练时的心率、脑电、HRV等16个指标,对消防员烟热训练心理生理状态影响因素进行了研究。研究表明,年龄和消防员日常心理焦虑状态与烟热训练时心理焦虑状态 p 值均小于0.01,年轻消防员更容易产生训练时的焦虑问题,调节消防员日常心理状态可以缓解消防员烟热训练时的心理压力。而工龄与消防员烟热训练时的心理焦虑状态 p 值大于0.5,两者关联显著性较小。工龄与训练耗时的 p 值为0.054,回归系数为-19.494,表明工龄长的消防员具有更短的训练耗时。静息心率与训练时耗氧量的 p 值仅为0.016,回归系数为-0.128,表明静息时较低心率的消防员具有更少量的耗氧量。体重与训练耗时的 p 值大于0.5,两者关联显著性较小。

关键词:消防员;烟热训练;心理生理状态;最小二乘法

中图分类号:X913.4;TU366.3 文献标志码:A DOI:10.20168/j.1009-0029.2026.08.0129.05

Study on influencing factors of psychological and physiological states in firefighters' smoke-heat training

Tao Pengyu, Song Wenqi, Jiang Qianye, Gao Rui

(Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China)

Abstract: To analyze the potential factors influencing the psychological and physiological states of firefighters during smoke and heat training, this study employed an intelligent smoke and heat training device for firefighters and utilized a feature data correlation analysis model. By collecting 16 indicators (including heart rate, electroencephalogram, and heart rate variability) from 100 firefighters during smoke and heat training, the research explored the factors affecting their psychological and physiological states in such training. The results showed that both age and firefighters' daily psychological states had a p -value less than 0.01 with their psychological states during smoke and heat training, indicating that younger firefighters were more prone to psychological problems during training, and regulating their daily psychological states could alleviate psychological pressure during smoke and heat training. The p -value for years of service versus training duration was 0.054, with a regression coefficient of -19.494, indicating that firefighters with longer service experience exhibited shorter training durations. The p -value for resting heart rate and training oxygen consumption was merely 0.016, with a regression coefficient of -0.128, indicating that firefighters with lower resting heart rates exhibited reduced oxygen consumption. The p -value for body weight and training duration exceeded 0.5, suggesting a relatively insignificant correlation between the two variables.

Key words: firefighters; smoke and heat training; psychological and physiological states; least squares method

基金项目: 应急管理部天津消防研究所基科费项目(2025SJ31, 2025SJ32); 国家重点研发计划项目(2024YFC3016602-1); 天津市科技计划项目(24JCYBJC00020)

作者简介: 陶鹏宇, 应急管理部天津消防研究所, 副研究员, 主要从事应急消防实战化训练技术及装备研究、应急消防安全教育研究等工作, 天津市南开区卫津南路110号, 300381, taopengyu@tfri.com.cn。

收稿日期: 2024-12-30; **修回日期:** 2025-05-16

火灾是最为常见的灾害场景,影响着人民群众的生命财产安全。随着城市建筑结构的日趋复杂、新能源产业的迅猛发展,火场烟热环境越来越复杂,对于消防员生理状态能力及心理素质水平的要求越来越高。烟热训练以环境适应与基础体能训练为重点,在网栅隔断装置中通过构建高温、浓烟、黑暗环境,开展消防员心理和体能的环境适应性训练,是提升消防员未知恶劣环境下的心理抗压能力与体能适应的重要训练设施。因此,探究消防员烟热训练过程中心理生理状态的潜在影响因素,有效地评估训练结果,提升烟热训练的针对性,是建设高素质、高水平的消防救援队伍,降低火灾事故致伤致死率,减少火灾事故经济损失的有效途径之一。

国内外学者对消防员烟热训练心理生理状态分析评价方法进行了一系列研究。王玉晓等^[1]依托公安部消防局科研计划项目《多功能烟热模拟训练系统》开展了影响消防员行为的心理因素研究,梳理了影响消防员作战训练行为的内部因素与外部因素。张郑平等^[2]依照评价体系的建立原则,采用定量和定性相结合的方法给出了以时间为主的评价指标。孙宗良等^[3]为有效评估模拟训练系统效能,比较分析了几种现有的评估方法,归纳总结出各种方法的特点。郝文柱^[4]探讨了消防设备和实战化训练对消防灭火救援能力的提升作用。刘士建等^[5]为实时采集监测矿山救护队员训练和心理干预过程中的生理指标数据,设计了心率变异性指标监测电路、脑电信号监测电路、皮肤电反应数据监测电路、数据通信电路设计和上位机监测系统。张韧仁等^[6]以参加喀山世锦赛和里约世界杯的国家跳水队选手为例,监测其备战期间身心状态、探析其身心状态测评指标之间的相关性。

目前我国现有的烟热训练设施虽具备一些基本训练功能,但无法较好地监测消防员在训练过程中的心理生理状态^[7],更无法知晓影响消防员心理生理状态的潜在因素,存在考核内容及评价手段单一化、不系统、不科学的问题^[8]。因此,开展消防员烟热训练心理生理状态影响因素研究,利用消防员烟热训练监测数据进行探索性数据分析(EDA),分析影响消防员烟热训练心理生理状态的潜在因素,对提升烟热训练的科学性和针对性具有重要意义。

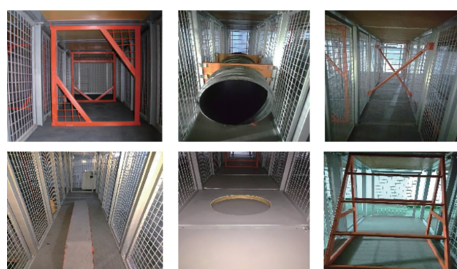
1 训练装置

训练装置系统由网栅隔断式烟热训练装置、金属网栅和架空走廊通道系统、高温蒸气及毒气侦检装置、电动门系统、集中控制系统、三维精准定位同步跟踪系统、AR智能作战训练头盔、消防员心理生理数据采集分析系统等组成,能够精确采集消防员烟热训

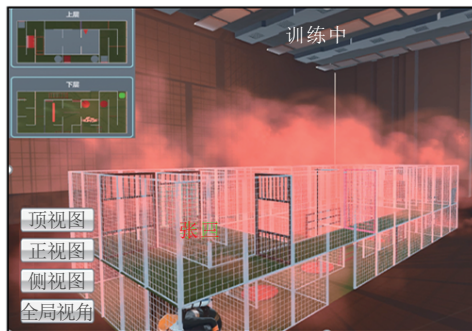
练时的实时参数,可实现烟热模拟、障碍设置、人员定位、数据采集及预警保护等功能,如图1所示。使用该装置对消防员进行烟热训练,监测记录其心率、脑电、HRV等数据。



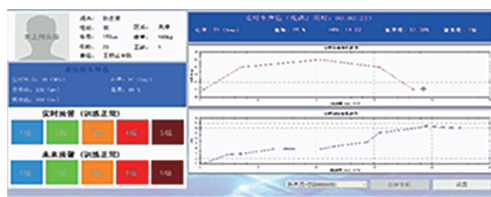
(a)网栅隔断式烟热训练装置



(b)金属网栅和架空走廊通道系统



(c)三维精准定位同步跟踪系统



(d)消防员心理生理数据采集分析系统

图1 消防员智能化烟热训练装置

Fig. 1 Intelligent smoke-heat training device for firefighters

2 消防员心理生理状态关联性分析模型

分析模型分为3个模块:状态评价标准、基于实时数据的身体状态实时收集系统、特征数据关联分析模型,如图2所示。

状态评价标准模型中,引入心理测量量表等手段评估消防员烟热训练时的心理状态,并且考虑到消防员训练成绩与生理体能具有显著关系,选取训练耗时

与耗氧作为生理状态的评价指标,进而为后续特征关联分析提供目标标签。实时采集不同阶段心率、耗时、耗氧等多维度数据。基于生理与心理状态指标,通过探索性数据分析以及最小二乘法回归等数据分析手段进一步得出心理与生理状态关联特征,探索潜在影响因素。此外,心理生理状态实时监测还可以预防训练过程中可能出现的意外情况。

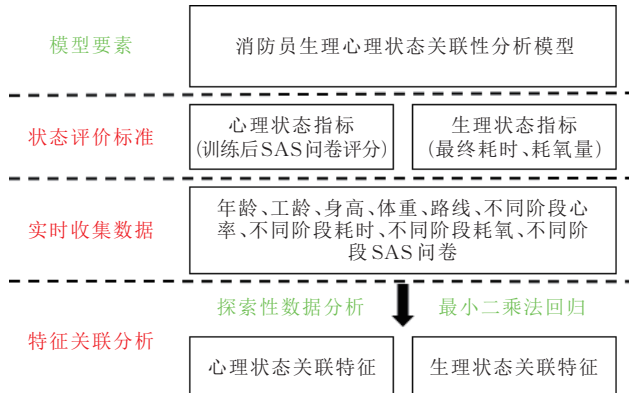


图2 消防员心理生理状态关联性分析模型

Fig. 2 Model for analyzing the correlation between firefighters' psychological and physiological states

2.1 心理生理状态评价标准

针对心理状态评估,考虑到大部分消防员主要面临的是紧张焦虑情绪,根据焦虑自评量表(SAS)的评估准则,将评估模型的输出结果设定为低紧张度、轻微紧张、中度紧张、重度紧张、严重紧张。不同紧张度的分类标准设定如表1所示。

表1 心理状态评估标准

Table 1 Evaluation criteria for psychological state

类别	阈值
低紧张度	45以下
轻微紧张	45~60
中度紧张	60~70
重度紧张	70~80
严重紧张	80以上

针对生理状态评估,考虑到不同训练路线、不同训练科目会对消防员的训练成绩产生不同影响,不设立具体的分类标准,并以连续值的方式作为关联分析的标签值。

2.2 消防员训练数据实时收集系统

实时检测心率变异性(HRV)、心率等参数,并实时输出评估结果。为了使结果具有参考意义,将会对上述评估模型所采集到的数据集进行噪声清洗。

2.3 特征数据关联分析模型

对于收集到的消防员信息,选取了年龄、工龄、身高、体重、路线、静息心率、各训练阶段心率、各训练阶段耗氧、各训练阶段耗时、各训练阶段心理焦虑状态

等16个参数作为特征,并将代表训练后生理状态的训练耗时、训练耗氧和代表训练后心理状态的训练后心理焦虑分数作为目标向量。进一步分析与消防员烟热训练心理生理状态可能关联的潜在因素。具体流程为:

1)在正式的建模前对数据进行探索性数据分析(EDA),包括初步检查与分析的过程,目的是了解数据的主要特征和结构,发现数据中的模式、异常、关键变量之间的关系。具体来说,采用了皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)作为衡量两个变量线性关系强度的一个指标。皮尔逊相关系数的值范围从-1到1,具体公式见式(1)。

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: x_i 和 y_i 是观测值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 是各自的均值。

2)基于上述探索性数据分析的结果,对存在潜在关联的特征进行了普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)回归的计算,目的是通过找到一组回归系数,使得模型预测值与实际观测值之间的残差平方和最小。

3 训练测试与分析研究

3.1 测试方案及过程

1)测试各项静息数据。消防员在开始正式训练前,在静息状态下需要进行生理和心理指标的测试,包括:静息心率、静息肌电、静息皮肤电、静息心理测量表成绩。

2)进行体能训练。消防员穿戴全套个人防护装备,在体能训练室跑步机上慢跑3 min。

3)第二次测试各项数据。消防员在跑步结束后,进入烟热训练前,需要测量和记录各项数据,包括心率变异性(HRV)、慢跑心率(3 min心率)、肌电、皮肤电、烟热训练前空气呼吸器压力、烟热训练前血氧等。

4)进行烟热训练。此时需要打开空气呼吸器,并记录进入训练的时间。

5)第三次测试和记录各项数据。消防员在烟热训练结束后,需要测量和记录各项数据,包括心率、肌电、皮肤电、训练后心理测量表成绩、烟热训练后空气呼吸器压力、烟热训练后血氧、训练结束时间等。

3.2 测试结果分析

测试工作分别在控制室和体能训练室中开展。项目共采集约100人次训练数据,每位消防员将重复进行两轮烟热训练并且两轮训练之间具有充足的休息时间。试验结果通过数据清洗、标准化、归一化等手段去除噪声、不同单位的影响。

3.2.1 消防员心理生理结果分析

根据已有消防员训练结果,针对训练耗时、耗氧量、心理焦虑分数3个维度进行数据分析,如图3~图5所示。

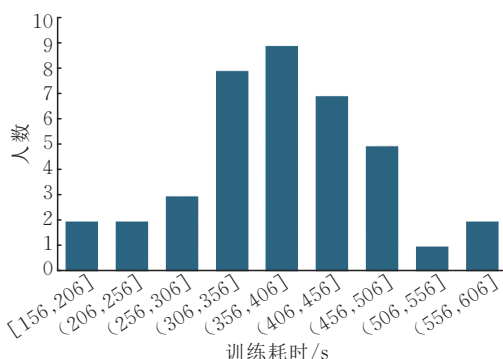


图3 消防员训练耗时图

Fig. 3 Firefighters training time consumption

通过图3可以看出,大部分消防员训练耗时集中在300~500 s,部分消防员则接近600 s,这体现了消防员之间存在体能或综合水平差异,消防员平均烟热训练耗时为381 s。

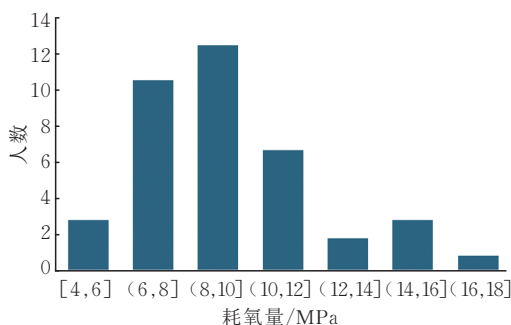


图4 消防员耗氧量图

Fig. 4 Firefighters oxygen consumption

由图4可以看出,不同消防员的耗氧量存在差异,其中,最大耗氧量为18 MPa,最小耗氧量为4 MPa。耗氧量的平均值与中间位接近,且接近四分位数,证明大部分消防员的耗氧量接近。

图5展示了消防员第一轮训练前后的心理焦虑分数变化,其中内环为训练前,外环为训练后。训练后,部分成员的焦虑分数出现了明显增加,有22.5%的人出现了5分以上的焦虑分数上涨,尤其是50分以上的中度紧张人数由1人变为4人,整体均值也有上升(均值差0.73分)。尽管统计检验未达到显著性(p 值=0.24),但提示烟热训练可能会对部分消防员产生焦虑心理影响。

3.2.2 消防员关联分析结果

图6展示了各特征间皮尔逊相关系数的热力图,数值越接近1或-1证明越具有关联性,数值的绝对值大于0.3时可以说明两者具有一定关联。可以看出,训练耗时与工龄、体重、慢跑心率等因素有潜在可

能的关联。而消防员训练耗氧量也与身高、体重、慢跑心率等因素存在关联。对于消防员的训练时心理焦虑状态,相关系数表明可能与静息心理焦虑状态、慢跑心率等参数有关。

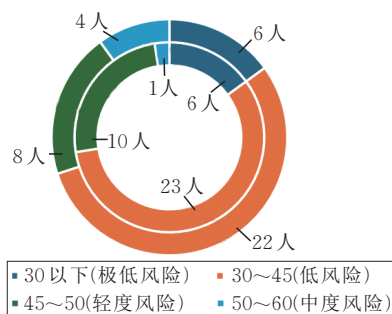


图5 心理评估分数分布图

Fig. 5 Psychological assessment scores

基于上述探索性数据分析的结果,对存在潜在关联的特征进行了普通最小二乘法回归的计算。其中选取了年龄、工龄、慢跑心率、训练心率、初始心理分数作为训练后心理分数的潜在关联因素;选取了年龄、工龄、体重、慢跑心率、训练心率作为训练耗时的潜在关联因素;选取了年龄、工龄、身高、静息心率、慢跑心率作为训练耗氧的潜在关联因素。表2展示了训练后消防员心理焦虑状态对于各特征之间的关联情况,表3、表4展示了训练后消防员生理状态对于各特征之间的关联情况,其中参数分别为回归系数、标准误差、 t 值、 p 值以及置信区间(CI)。一般 p 值小于0.1时说明两者具有统计学上的关联。

对于消防员训练时心理焦虑状态,可以发现其与初始时消防员心理焦虑状态关联十分显著, p 值为0.001,表明日常时就具有心理问题的消防员更容易在训练时紧张焦虑。此外,年龄与慢跑心率也与训练时心理焦虑状态的关联性较为显著, p 值小于0.1,这表明年龄大的消防员具有更加稳定的心理焦虑状态(回归系数为-0.599 1),运动时可以保存稳定心率的消防员也会有更好的心理表现(回归系数为0.198 2)。而工龄与消防员烟热训练时的心理焦虑状态关系较小。

对于消防员生理状态,可以看出,工龄与训练耗时的 p 值仅为0.054,回归系数为-19.494 0,展现出了显著的关联性,表明工龄长的消防员具有更短的训练耗时。此外慢跑心率也与耗时具有一定的显著关联,回归系数为-3.110 3,说明慢跑心率低的消防员可以更加快速地完成训练项目。与训练时耗氧量有关联的特征较少,只有静息心率展示出了显著的关联性,其 p 值为0.016,回归系数为-0.128,这表明静息时较低心率的消防员会具有更少的耗氧量。

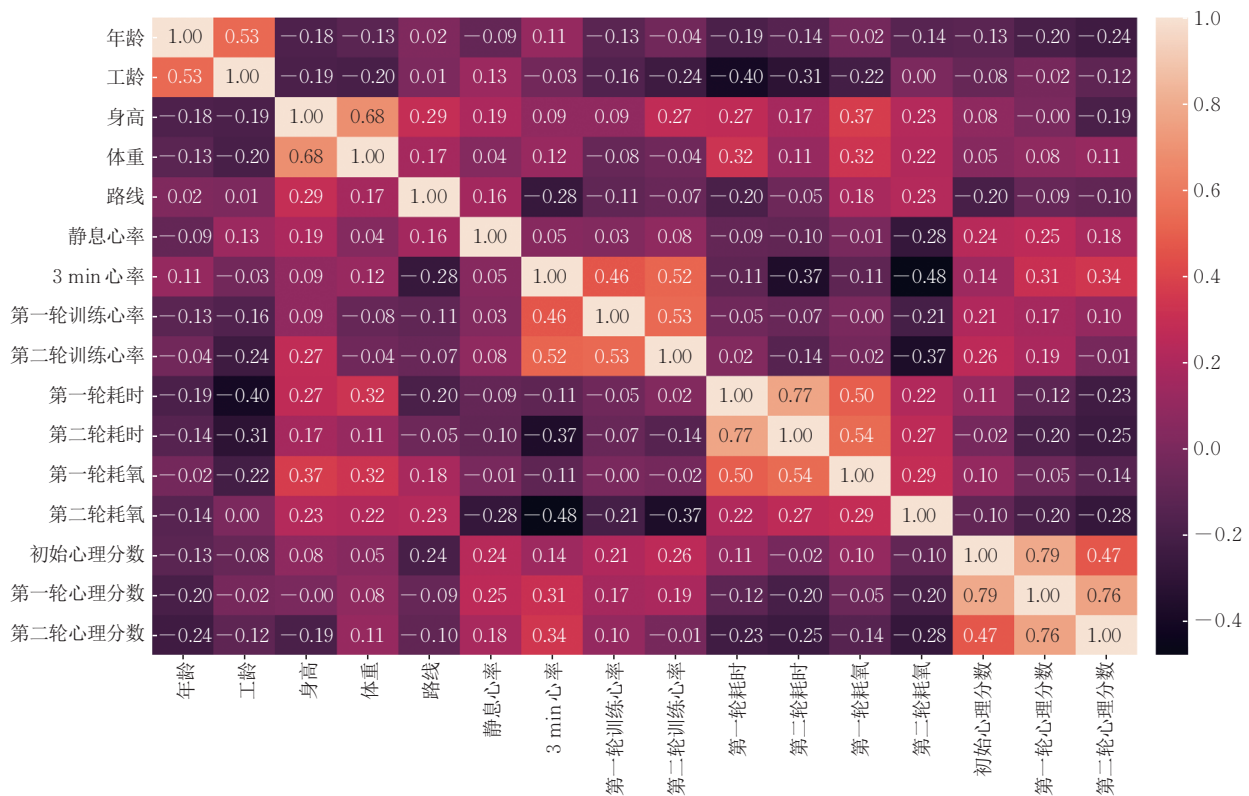


图6 各特征间相关系数热力图

Fig. 6 Heatmap of correlation coefficients between various features

表2 消防员心理焦虑状态特征关联系数表

Table 2 Coefficients for psychological state characteristics of firefighters

训练后心理分数	回归系数	标准误差	<i>t</i>	<i>p</i>	95%CI 下限	95%CI 上限
年龄	-0.599 1	0.339	-1.769	0.087	-1.292	0.094
工龄	-0.187 4	0.455	-0.412	0.684	-1.119	0.744
慢跑心率	0.198 2	0.072	2.753	0.010	0.051	0.345
训练心率	-0.105 9	0.075	-1.414	0.168	-0.259	0.047
初始心理分数	0.487 0	0.134	3.643	0.001	0.214	0.760

表3 基于训练耗时的消防员生理状态特征关联系数

Table 3 Correlation coefficients of firefighters' physiological characteristics based on training duration

训练耗时	回归系数	标准误差	<i>t</i>	<i>p</i>	95%CI 下限	95%CI 上限
年龄	6.559 6	7.619	0.861	0.396	-9.023	22.142
工龄	-19.494 0	9.697	-2.010	0.054	-39.327	0.339
体重	-0.940 9	3.075	-0.306	0.762	-7.230	5.348
慢跑心率	-3.110 3	1.584	-1.963	0.059	-6.351	0.130
训练心率	-0.698 7	1.734	-0.403	0.690	-4.244	2.847

4 结论

1) 消防员年龄、慢跑心率以及初始状态下的心理焦虑状态与消防员烟热训练心理焦虑状态 p 均小于

0.1, 说明三者与消防员烟热训练心理焦虑状态均有显著关联性, 并且初始状态下的心理焦虑状态关联性最强。而工龄与消防员烟热训练时的心理焦虑状态 p 值大于 0.5, 关联性较小。

表4 基于训练耗氧的消防员生理状态特征关联系数

Table 4 Correlation coefficients of firefighters' physiological characteristics based on training oxygen consumption

训练耗氧	回归系数	标准误差	<i>t</i>	<i>p</i>	95%CI 下限	95%CI 上限
年龄	-0.136 0	0.157	-0.867	0.393	-0.457	0.185
工龄	0.167 5	0.211	0.795	0.433	-0.264	0.599
身高	0.193 3	0.120	1.609	0.118	-0.052	0.439
静息心率	-0.128 0	0.050	-2.555	0.016	-0.230	-0.026
慢跑心率	-0.052 4	0.033	-1.573	0.127	-0.121	0.016

2) 消防员的工龄、慢跑心率、静息心率与消防员烟热训练时生理状态 p 值均小于 0.1, 说明三者与消防员烟热训练生理状态均有显著关联。而体重与消防员烟热训练时的心理焦虑状态 p 值大于 0.5, 关联性较小。

3) 年龄与日常心理焦虑状态与消防员烟热训练时的心理焦虑状态具有显著关联性, 关注消防员日常心理状态可以缓解消防员烟热训练时的心理压力, 且较为年轻的消防员更容易产生训练时的心理问题。工龄长的消防员通常具有更短的训练耗时, 建议对短工龄消防员加强训练以进一步提高训练成绩。

(下转第 139 页)

- gency materials under earthquake disasters[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2025.
- [4] Rui L. Research on emergency supplies demand forecasting model[C]//2010 The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, 2010: 244-247.
- [5] Zhang H Q, Xu J Y. Research on emergency material demand forecasting model in disaster based on MLR-CBR[C]//International Conference of Logistics Engineering & Management. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2015: 2888-2994.
- [6] 汪贻生, 张英慧, 王金梅, 等. 基于CBR的突发事件应急物资动态需求预测方法研究[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(6): 8-21.
- Wang Y S, Zhang Y H, Wang J M, et al. Dynamic demand forecasting method of emergency supplies based on CBR[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(6): 8-21.
- [7] 张斌, 陈建国, 吴金生, 等. 台风灾害应急物资需求预测模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7): 891-895.
- Zhang B, Chen J G, Wu J S, et al. Emergency material demand forecast model for typhoon disaster response[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(7): 891-895.
- [8] 王兰英, 郭子雪, 张玉芬, 等. 基于直觉模糊案例推理的应急物资需求预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 775-780.
- Wang L Y, Guo Z X, Zhang Y F, et al. An emergency supplies demand prediction model based on intuitionistic fuzzy case reasoning[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 775-780.
- [9] 吴斯亮. 大型地震应急物资动态需求预测模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- Wu S L. Research of dynamic demand forecasting model for large earthquake emergency supplies[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] 胡凌锋. 基于案例推理的台风灾害应急物资需求预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Hu L F. Research on the forecast of emergency materials demand for typhoon disaster based on case-based reasoning[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] 刘雅玉. 基于案例推理的台风灾害快速评估方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- Liu Y Y. Rapid assessment of typhoon disaster based on case-based reasoning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [12] 兰培真. 基于GM(1, 1)模型的台风灾害救灾物资需求量预测[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2013, 18(6): 440-444.
- Lan P Z. Demand forecasting of typhoon disaster relief supplies based on GM(1, 1) model[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2013, 18(6): 440-444.

(责任编辑:李艳娜)

(上接第133页)

参考文献:

- [1] 王玉晓, 孙军田. 网栅隔断式多功能烟热模拟训练系统应用技术研究[C]//2014中国消防协会科学技术年会, 2014: 87-90.
- [2] 张郑平, 吴慧斌. 烟热模拟训练评价考核系统的研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(12): 83-85.
- Zhang Z P, Wu H B. Research of evaluation and assessment system of smoke and heat simulation training[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(12): 83-85.
- [3] 孙宗良, 盛文, 同伟. 模拟训练系统效能评估方法研究[J]. 空军雷达学院学报, 2009(5): 341-343.
- Sun Z L, Sheng W, Tong W. Research on effectiveness evaluation of simulative training systems[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2009(5): 341-343.
- [4] 郝文柱. 浅谈消防设备和实战化训练对消防灭火救援能力的提升[J]. 中国设备工程, 2024(23): 245-247.
- Hao W Z. Discussion on the improvement of fire fighting equipment and actual combat training on fire fighting and rescue ability[J]. China Plant Engineering, 2024(23): 245-247.
- [5] 刘士建, 宋岩, 王善礼. 矿山救护队员训练和心理干预生理指标监测系统设计[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(1): 177-180.
- Liu S J, Song Y, Wang S L. Design of physiological indicator monitoring system for training and psychological intervention of mine rescue team members[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2024, 42(1): 177-180.
- [6] 张韧仁, 张忠秋. 国家跳水队队员备战国际大赛的身心状态及测评指标相关性探析[J]. 上海体育学院学报, 2017, 41(4): 88-94.
- Zhang R R, Zhang Z Q. Analysis of correlation between the physiological and psychological state and evaluation indexes of athletes in national diving team preparing for world sporting events[J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2017, 41(4): 88-94.
- [7] 李恒. 新入职消防员职业体能训练管理体系构建研究[J]. 消防科学与技术, 2026, 45(S1): 186-191.
- Li H. Research on the construction of a professional physical training management system for newly hired firefighters[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(S1): 186-191.
- [8] 房娟, 景珂, 梁铭轩, 等. 消防救援人员自我效能感与心理健康的关系及职业倦怠的中介作用[J]. 职业与健康, 2026, 42(8): 1009-1012, 1019.
- Fang J, Jing K, Liang M X, et al. Relationship between firefighters' self-efficacy and mental health and the mediating role of burnout[J]. Occupation and Health, 2026, 42(8): 1009-1012, 1019.

(责任编辑:董里)