

• 自然灾害防治体系 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0007

自然灾害应急救援体系建设的多维度整合与创新发展路径*

许建华¹ 郑学召^{2**} 马海涛³ 张远达⁴ 童鑫^{5**} 齐松¹

1. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049
2. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 西安 710054
3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012
4. 应急管理大学(筹) 应急技术与管理学院, 廊坊 065200
5. 内蒙古科技大学 经济与管理学院, 包头 014010

[摘要] 随着气候变化加剧和城市化进程的加速,我国自然灾害形势更为复杂严峻,对应急救援响应速度、协调能力、资源配置和科技支撑提出更高要求。为构建高效、有序、协同的现代化应急救援体系,本文回顾应急救援理论从经验驱动到智慧化管理的发展演变,梳理灾情监测、通信指挥、人员搜救、物资配送等关键技术的现状与瓶颈,分析应急救援管理中多层级指挥与跨部门协同机制的痛点。提出以下优化路径:一是构建多灾种耦合、动态演化的风险评估框架;二是统一多源数据标准与融合平台;三是研发低时延、多体制通信调度技术;四是提升多模态生命探测算法的鲁棒性;五是构建智慧化应急物资保障与社会协同机制;六是完善跨部门联动与统一指挥体制。为完善中国特色现代应急管理体系、提升灾害风险治理能力及实施国家安全战略提供理论支持和决策参考。

[关键词] 自然灾害;理论创新;技术赋能;管理协同;应急救援体系

我国地震、洪涝、干旱、台风、暴雪、滑坡、崩塌等多种自然灾害并存^[1],自然灾害的突发性和系统性风险相互叠加,呈现出高频、多样、复合化的复杂态势^[2],对应急救援体系的响应效率、组织协调、资源调配与科技支撑能力提出更高要求。“十四五”以来,我国应急管理体系和能力现代化建设取得显著成效^[3],在应对如台风“杜苏芮”、北京“23·7”特大暴雨、甘肃积石山地震等一系列重大自然灾害过程中,迅速启动应急响应、协调多部门力量开展高效救援,积累了优化应急处置流程、强化应急资源配置、完善指挥决策体系的宝贵经验^[4,5]。国际先进经验方面,日本气象厅自2007年面向公众上线地震预警(Earthquake Early Warning, EEW)系统^[3],依托密集台网实现秒级预警,并与轨道交通、电梯等场景联

动以降低强震次生风险;美国则在联邦紧急事务管理局(Federal Emergency Management Agency, FEMA)主导的国家事件管理体系(NIMS/NRF)框架下^[6],结合州际互助协定(Emergency Management Assistance Compact, EMAC),形成“地方主责、联邦支援、跨州协同”的快速增援与资源调配机制,明确资质互认、法律责任与费用结算等规则。

然而,上述体系直接套用到我国仍存在局限:一是日本EEW高度依赖超高密度强/弱观测网络与特定城市化场景,其在我国西部广域、地形与构造多样区的覆盖与成本约束下难以同强度复制;二是美国以州为基本单元的自治体系与依法运行的州际互助机制,与我国集中统一的行政体制、军地协同与央地一体化调度逻辑存

收稿日期:2025-06-27; 修回日期:2025-09-27

* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: zhengxuezhao@xust.edu.cn; 2022059@imust.edu.cn

本文受到国家重点研发计划项目(2023YFC3010905)的资助。

引用格式: 许建华, 郑学召, 马海涛, 等. 自然灾害应急救援体系建设的多维度整合与创新发展路径. 中国科学基金, 2025, 39(6): 939-949.

Xu JH, Zheng XZ, Ma HT, et al. The multi-dimensional integration and innovative development path of the emergency rescue system construction for natural disasters. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 939-949. (in Chinese)

在制度差异,移植成本与配套法规环境不同。基于此,我国正处于从“被动响应”向“主动防御”转型的关键期^[7],更需突出以全国一体化的应急管理架构为底座,强化跨层级指挥与军地政企协同,打通监测预警—指挥决策—资源保障的链路,并发挥北斗、高分遥感、应急通信等数字化能力的集成优势,塑造具有中国特色的现代应急救援体系。

构建高效、有序、协同的现代化应急救援体系尤为关键。自然灾害应急救援体系是一个多主体协同、全过程联动的复杂系统,在灾害发生前、中、后,政府、社会组织与公众在法律法规和制度保障下,整合人力、物资、技术和信息资源,按照统一指挥、分级响应、快速集结、科学决策的原则,系统开展监测预警、应急处置、医疗救援和恢复重建等全过程、多环节协作的机制体系,不仅能最大限度降低人员伤亡和财产损失,缩短社会恢复周期,还将提升公众安全感与社会韧性,是衡量国家治理能力与治理体系现代化水平的重要标志。因此,本研究深入分析我国自然灾害应急救援体系的发展现状,如图1所示,从理论、技术、管理三个方面分析现存的关键问题与优化路径,为完善现代应急管理体系、提升灾害风险治理能力、实现高质量发展与国家安全战略目标提供科学决策支撑。

1 应急救援体系多维度分析

1.1 应急救援理论体系

应急救援理论的发展经历了从经验驱动到科学化、从被动响应到主动预控、从单一主体到多元协同、从效

率优先到韧性导向的深刻演进,如图2所示。最初应急救援主要依赖现场经验和军事化指挥,以实现灾后即时响应、抢险救灾和紧急处置为核心,侧重灾害发生后的应急行动效率,强调统一调度与快速反应,但对事前的预防和事后的恢复缺乏系统性思考。此后应急管理生命周期理论将应急管理划分为减缓、准备、响应和恢复四个环节,打破重响应处置阶段的局限,实现了从“事中处置”到“全过程管理”的战略跃升^[8,9]。

基于风险的应急管理理论进一步强调以潜在灾害风险的科学识别、评估和控制为导向,将风险分析贯穿于减缓、准备等事前阶段,从而推动应急体系建设从被动应对向主动风险管控转型^[10]。随后突发事件情景构建理论填补了风险分析与预案推演之间的“桥梁”空缺^[11],主张在多元不确定情境下,通过构建若干高、中、低三类典型灾害情景,明确各类情景下的关键演化路径、影响因子及应对节点,进而在仿真平台与桌面推演中检验预案可行性,动态调整资源储备与指挥流程,提升预案的情境适应性 with 实战有效性。

进入二十一世纪后,全球气候变化加剧和自然灾害频发,面对日益复杂的巨灾风险以及跨部门、跨层级、跨区域的联动需求,需进一步引入系统理论和协同治理理论^[12]。救援体系并非单一线性结构,而是由政府、军队、企业、社会组织与公众等多元主体构成的复杂适应系统,通过信息流、资源流与指令流的动态交互与自组织演化,实现整体联动与协同响应,倡导整合社会资源、形成全社会应急合力,构建政府主导、多元主体共同参与、网络化协同应对的治理格局。韧性理论的引入,将

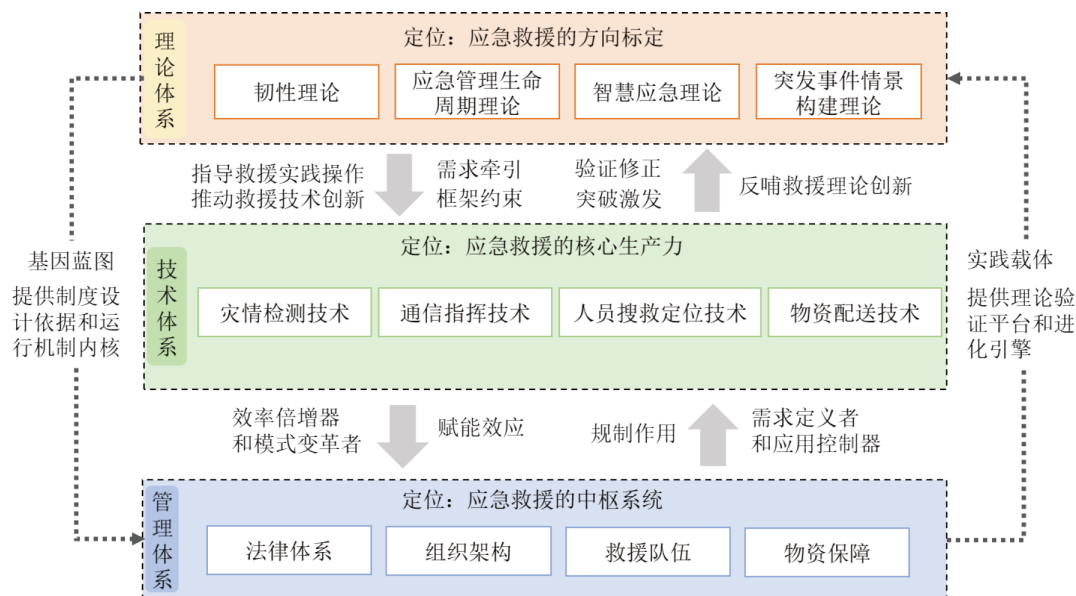


图1 自然灾害应急救援体系建设架构图

Fig.1 Architecture Diagram of the Emergency Rescue System for Natural Disasters

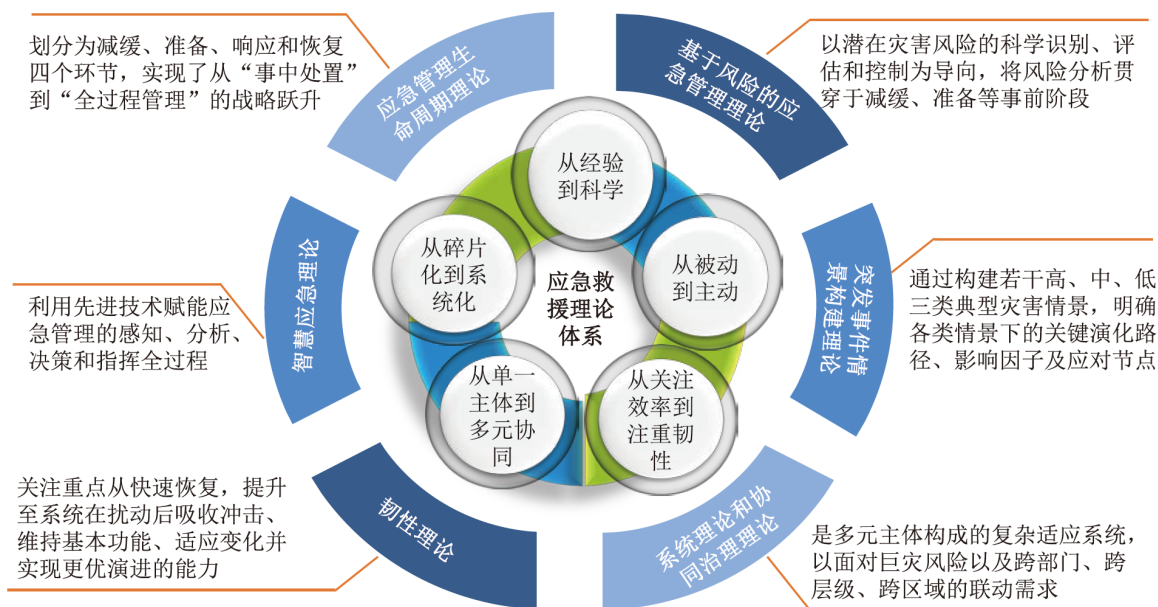


图2 应急救援理论体系

Fig.2 The Theoretical System of Emergency Rescue

关注重点从快速恢复提升至系统在扰动后吸收冲击、维持基本功能、适应变化并实现更优演进的能力^[13],以应对不确定性与长期性风险挑战。

随着大数据、人工智能、物联网等现代信息技术的发展与深度应用,催生了技术驱动的应急管理范式^[3],利用先进技术赋能应急管理的感知、分析、决策和指挥全过程,“智慧应急”理论加速形成。以海量异构数据的实时采集与融合分析为基础,通过机器学习与可视化平台提升灾情感知、态势预测与精准决策能力,并借助无人机、传感网等技术进行远程监测与自主调度,提升救援效率与安全保障水平^[14]。纵观应急救援理论体系发展,经历了从经验到科学、从被动到主动、从碎片化到系统化、从单一主体到多元协同、从关注效率到注重韧性的转型,各理论相互补充、融合发展,共同构筑了现代应急救援体系建设的理论基石。

1.2 应急救援技术体系

面对自然灾害突发性强、破坏力大的特点,构建科学高效的应急救援技术体系是提升救援响应速度与处置效率的关键。本文梳理并构建了涵盖灾情监测技术、通信指挥技术、人员搜救定位技术、物资配送技术的自然灾害应急救援技术体系架构,如图3所示。

1.2.1 灾情监测技术

灾情监测是应急救援的第一道防线,能够在灾害发生的早期阶段快速捕捉灾情动态、准确把握灾害演变趋势,为指挥决策、资源调配和人员撤离赢得宝贵时间,最大限度降低人员伤亡和财产损失。监测预警装备主要由传统地质勘察装备逐步发展而来^[15],当前,主要的灾

情监测技术可以划分为四类:遥感监测、地面传感、无人平台、大数据与人工智能。

(1)遥感监测:利用可见光、多光谱、高光谱成像和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等多种传感器,通过卫星(如哥白尼Sentinel系列、高分系列)或航空平台获取大范围、高频次的灾区影像,再结合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[16]、影像正射纠正和变化检测算法^[17](如归一化植被指数、差分图像分析)对洪水淹没、山体滑坡裂缝扩展和森林火情蔓延等灾变特征进行定量分析,实现宏观态势的实时监控与评估。

(2)地面传感:使用环境传感器、雨量计、地质倾斜仪、裂缝伸缩计、地下水位传感器和微震监测仪等^[18],通过LoRaWAN、NB-IoT或Mesh自组网将数据传输至边缘计算设备,依托实时数据流和阈值判别模型捕捉降雨骤增、地表沉降或微震异常。

(3)无人平台:以多旋翼/固定翼无人机搭载高清相机、热成像仪和激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR),通过自动航线规划与编队飞行快速开展低空航拍、红外生命探测与三维点云重建^[19],同时结合水面无人艇的声呐探测和无人潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)的水下地形扫描^[20],形成立体化、全覆盖的空地一体化监测能力。

(4)大数据与人工智能:依托遥感影像、地面传感、气象预报、历史档案和社交媒体等多源时空数据,构建统一的数据湖,结合卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、时序Transformer、图神经网络(Graph

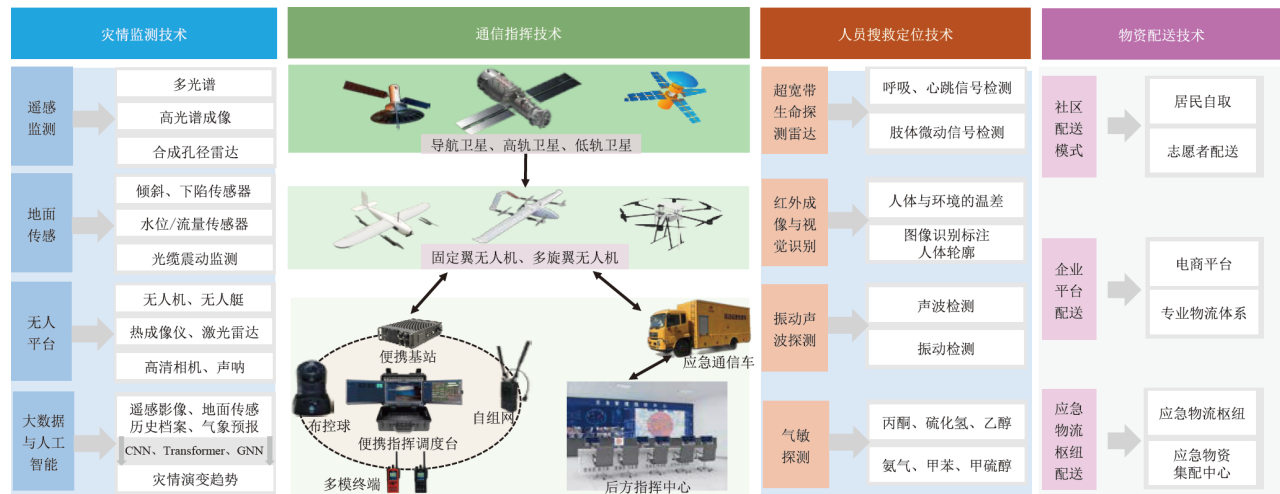


图3 自然灾害应急救援技术体系

Fig.3 Technical System for Emergency Rescue in Natural Disasters

Neural Network, GNN)等深度学习模型对灾情演变趋势进行模拟预测^[21,22]。

随着灾情监测与评估领域新技术的发展,越来越多的新型监测装置和数据采集手段不断涌现。以“遥感监测+地面传感+无人平台+大数据”为代表的“天空—地—网”多源一体化监测技术,凭借部署灵活、数据获取快速和高精度的特点,已在现场获得广泛应用。以粤北江流域2021年8月暴雨洪水灾情监测评估为例,中山大学王先伟等^[23]将地面雨量计、河道水位监测站、网络众包淹没影像、Sentinel卫星SAR、现场RTK测绘、多旋翼无人机低空航测与HAND水文模型及ArcGIS空间分析技术相结合,成功实现洪水淹没范围和深度的精准识别,并对淹没区内农田面积、建筑物数量及受灾人口等关键要素进行了定量统计。

但灾情监测技术体系在不同区域的适用性存在一定差异。东部沿海和中部地区的通信网络、算力基础设施和边缘节点部署较为完善,西部及偏远山区的网络带宽有限,算力基础设施薄弱,直接在前端终端部署深度学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)等复杂智能算法存在较大挑战。应结合各地区经济条件和灾害类型,因地制宜,逐步形成“高性能中心+普适性前端”的互补格局,提高应急救援技术体系的科学性与可持续性。

以洪水监测为代表的應用已取得显著成效,但还需注意该体系在不同灾害类型中的泛化适用性,在地震、滑坡、泥石流等场景下仍有待进一步验证。跨部门数据在格式与语义上存在差异(如GeoTIFF影像与JSON传感器数据),亟需中间件与标准化接口支持;山区复杂地形条件下,自组网多跳传输可能导致时延与抖动累积,未

来需结合典型灾区场景开展仿真与实测。

1.2.2 通信指挥技术

为构建高效、可靠的现场应急救援指挥体系,通常在应急救援指挥部下设专家组与技术组,两者协同合作、分工明确^[24]。专家组负责综合会商与决策支持,技术组则具体承担监测预警、数据采集与分析等任务^[25]。技术组按照设备类别与地理位置划分为若干监测站,各监测站再细分为多个监测点,并在各监测点部署对应型号的监测装备,以实现对风险源的全方位、多维度监控。技术组依托专家会商机制,以单个监测点为单位,按照“红、橙、黄”三级预警初值分别设定响应措施:红色预警时可立即发布警报并组织人员撤离;橙色预警时采取停止工程扰动等限制性措施;黄色预警时则减少现场作业人员数量。各监测点在出现红色预警情形时,可直接对外发布警报;在橙、黄色预警及日常监测过程中,应将监测项、监测设备、监测点位及数据特征(包括峰值、均值、变化趋势、时序曲线等)按照既定格式与频率上报至上级信息平台,以支持指挥中心的纵向信息流转与决策调整。

在通信保障方面,应急指挥体系需突破天空地一体化在高覆盖、大容量、快速组网和智能化调度等方面的技术瓶颈。为有效应对网络中断、局部通信受阻以及信息孤岛等特殊情況,应进一步深化卫星通信、宽带自组网(专网)与移动公网的自动切换、链路冗余与抗毁性设计。通过统一的数据标准和协议,结合边缘计算能力,形成“存储—转发”机制,打破信息壁垒,避免形成孤岛。同时,充分整合遥感、大数据、人工智能、移动互联网、地理信息系统与虚拟现实等技术手段,以增强指挥平台与终端的性能与智能化水平,已成为灾害事故应急救援领

域的主流发展趋势。

针对极端灾害事故环境下的协同救援需求,目前已研发集感知、通信、决策与指挥于一体的数字战场实战指控平台与协同作战指挥终端^[26]。数字战场实战指控平台具备全要素物联感知、融合通信、辅助决策与可视化调度功能,可实现前后方实时共享灾情信息、力量部署与周边资源状态,构建覆盖指挥中心、现场指挥部及一线救援队伍的天空地一体化协同指挥体系。协同指挥作战终端则随救援班组或单兵移动,将平台核心能力延伸至前线,支持无人机控制、协同标绘、辅助决策与移动“一张图”显示,并兼容多种网络接入方式,实现与现场指挥部及各救援单元的可视化数据交互。

2024年川渝毗邻地区(合川·广安)^[27]建立“一库一网一图一台”一体化防灾减灾救灾综合应用系统,接入11个数字化应用,入库1.31万处风险点、3 649处防护目标、2 388组减灾能力和1 931条资源信息,实时监测397座自动气象站、174座水情站及52路防汛监控,全面强化一线决策与调度能力。

1.2.3 人员搜救定位技术

人员搜救定位是搜救行动的核心环节,能够在灾害发生后第一时间捕捉被困人员的生命体征和位置,为指挥决策、救援力量调度和现场作业路线规划赢得宝贵时间,最大限度提高搜救效率和人员存活率。生命探测仪的种类很多,根据工作原理、使用方式、受影响因素的种类和适用场景等特点的不同,可分为雷达生命探测仪、音频生命探测仪、红外生命探测仪和气敏生命探测仪^[28]。

(1)超宽带生命探测雷达:通过发射纳秒级脉冲并分析回波中的微多普勒特征,实现对瓦砾缝隙中呼吸、心跳信号的高精度探测与定位^[29],具备厘米级的空间分辨能力和强抗多路径干扰性能,是复杂废墟环境下的首选手段。

(2)红外热成像与视觉识别:依托红外成像仪捕捉人体与环境的温差,结合图像识别算法自动标注人体轮廓,有效筛查夜间或烟尘浓重条件下的生命热点^[30];移动终端或无人机搭载该技术,可实现大范围快速巡航搜救。

(3)微振动声波探测:利用高灵敏度声波与振动传感器捕捉被困者敲击声、呼救声或瓦砾微动^[31],辅以自适应滤波和聚类算法剔除环境噪声,可在狭窄通道和深度掩埋区域开展精准点位式检测。

(4)气敏探测:基于被困者特征气味(来源于人体呼出气、血液、汗液、排出物的标志性气体:丙酮、硫化氢、乙醇、氨气、甲苯、甲硫醇等)在密闭或半密闭空间中的

富集效应,气敏传感器可通过特征气味浓度变化来判断生命存在^[32],并与其他探测手段联用以提高定位精度与可靠性,特别适合烟尘、瓦砾充斥而其他设备受限的环境。

(5)机器人辅助搜救:地面机器人能够搭载超宽带雷达、气敏传感器和高清摄像头等先进传感器,深入倒塌建筑、涵洞、管廊等狭小、危险空间,突破传统探测手段的视线和障碍物限制,实现精准探测。无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)可搭载红外热成像仪、高分辨率可见光相机以及小型气敏传感器进行大范围快速巡航,在初期侦察、定位热点区域以及监测人员撤离路径方面发挥关键作用,在数据采集、实时传输和灾情态势构建方面提供强大支持,通过多机器人协同作业,可构建局部通信网络,加速救援决策^[33]。

1.2.4 物资配送技术

应急物资保障是国家应急管理体系的重要支撑。自2003年非典暴发后,我国应急物资配送方案经历了从“简单储备”向“精细化管理”再到“智慧化运作”的演进^[34]。2003—2008年,重点在中央与地方建立生活救灾物资储备库,构建初步的库网体系;汶川地震后(2008年),配送模式加入“应急快速通道”与军地联动机制,配送效率显著提升。2018年,国家发展和改革委员会牵头应急资源信息服务平台建成并上线运行,实现了对全国应急物资储备、运输与调度环节的实时监控和动态调配。2020年新冠疫情期间,集中检验了“社会化物流+冷链运输”体系的抗风险能力,视频调度和大数据预测成为常态。根据《“十四五”国家综合防灾减灾规划》,目前,我国物资储备总体规模不足、布局不优、种类单一,产能与调运能力薄弱,亟需完善^[35]。为此,应着力于以下三个方面:一是优化储备体系,扩建中央和地方库房,建设七大区域性国家储备基地,确保30大类440余种物资充实到位;二是提升产能保障,依托国家应急物资管理平台,构建重点生产企业数据库,合理布局、精准投放生产能力,重点强化西部和边疆地区;三是推进调配现代化,搭建中央—省级调运平台及区域配送中心,整合社会化物流资源,完善“最后一公里”配送机制,提高装卸和流转效率。

通过配送主体及网络架构分类,可将应急物资配送划分为三大类:社区末端配送、企业主导的平台配送和应急物流枢纽配送。

(1)社区配送模式:建立基层组织主导的社区末端配送体系,将需求收集机制与社区服务站临时仓储功能相融合,收集居民需求后统一采购配送。在社区内设置服务站作为临时存储和分发点,居民自取或志愿者按需

配送。

(2)企业主导的平台配送模式:建立电商平台、本地生活服务平台、大型商超与专业物流企业协同的综合配送网络,集成线上下单、干线运输与末端配送一体化流程,形成应急物资优先保障机制。京东无人机编队在涿州洪灾中空投了3 000件救生衣、药品等应急物资,为受灾群众提供了急需的救援物资,成为灾后企业主导应急物资低空配送的成功范例^[36]。然而灾时空域管理法规尚不完善,禁飞区与应急空域开放缺乏统一细则,大规模机群调度易引发管控风险。在极端环境条件下无人机的稳定性不足,需完善协同作业机制和抗扰强化设计,以增强抗风性和任务连续性。

(3)应急物流枢纽配送:在城市不同区域建立应急物流枢纽作为中转、仓储和分发中心,通过信息技术对资源进行实时监控和统一调配。现有23处国家区域性公路交通应急装备储备中心^[37]。其中,湖北省鄂州市临空区的华中区域应急物资供应链与集配中心建设应急物资储备中心、应急救援装备集配中心、应急物资供应链中心、捐赠物资管理平台“三中心一平台”,具备铁、水、公、空四位一体的应急物资及装备快速配送能力,可实现1.5小时应急物资保障覆盖半个中国^[38]。

1.3 应急救援管理体系

自然灾害应急救援管理体系是保障救援行动合法、

有序、高效开展的制度基础与运行中枢。如图4所示,该体系主要涵盖法律制度、组织架构、救援力量与物资保障三个核心维度。其中,法律制度确立了救援的法理依据与行为规范,立体化组织架构解决了“谁来指挥、如何协同”的关键问题,而多元力量与物资储备则为救援行动提供了坚实的物质与人力支撑。

完善的法律制度是应急救援管理体系建设的基石。从国家层面到地方层面,我国已相继出台《突发事件应对法》《安全生产法》《消防法》等法律法规,形成涵盖灾害预防、监测、预警、响应、救援、恢复与重建全流程的法律规范体系,为应急救援的组织体系、职责分工、资源配置、应急响应和救援行动提供了法治保障。《应急救援法》《自然灾害防治法》等新法规的制定,进一步填补法律空白,细化应急救援全过程的制度规范,配套的国家 and 行业规章如《国家突发公共事件总体应急预案》《生产安全事故应急条例》,以及即将发布的《应急救援队伍管理办法》《应急物资储备管理办法》,从预案编制、队伍管理到物资储备等方面,为救援行动提供了操作指引和制度保障,对提升救援工作的科学化、规范化水平具有重要意义。

高效的立体化组织架构是实现应急管理全周期、全覆盖、快速响应的关键^[39]。纵向层面,遵循“统一领导、分级负责、属地管理为主”原则^[40],构建国家、省、市、县

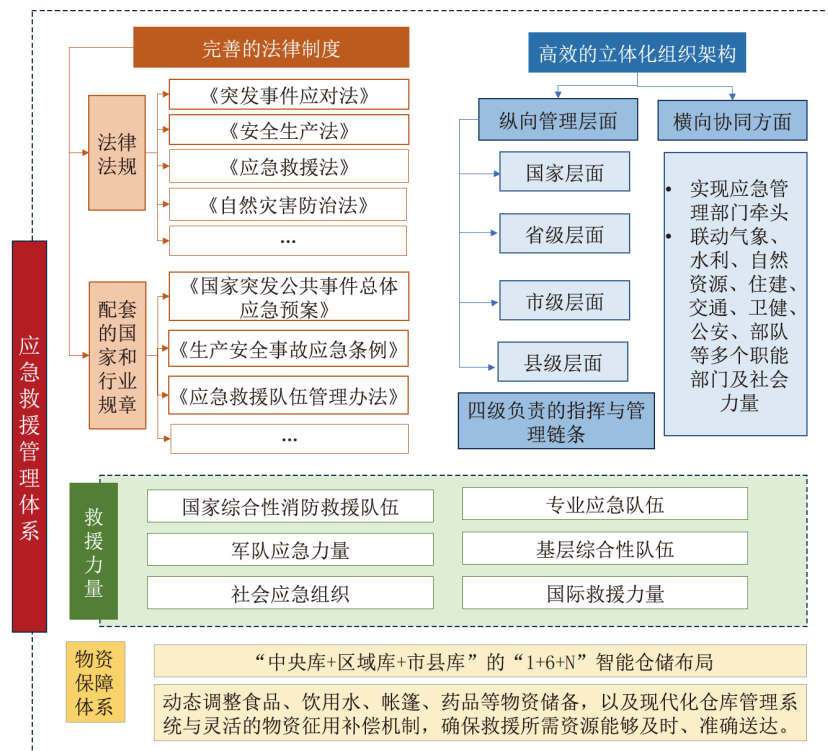


图4 应急救援管理体系

Fig.4 Emergency Rescue Management System

四级层层负责的指挥与管理链条。国家层面负责顶层设计、法律规范制定、宏观战略协调以及跨区域资源调控;省级层面侧重区域资源的整合、跨市联动及省级指挥中心的运行;市级层面承担连接上下、落实具体行动和辖区资源调配的“枢纽”功能;县级层面是应急响应的第一现场,负责灾情初判、先期处置和基层力量组织。横向协同方面,强调跨部门、跨行业、跨区域的联动,通过制度化的军地联动协议规范军队作为突击力量的参与机制,设立政社协作准入标准引导和规范企业、社会组织、志愿者等非政府力量有序参与,建立一体化的应急信息共享平台,实现应急管理部门牵头,联动气象、水利、自然资源、住建、交通、卫健、公安、部队等多个职能部门及社会力量的立体化协同网络,打破信息壁垒,形成应对合力^[41]。

多层次、多类型的救援力量与物资保障体系共同支撑应急救援的快速反应与持续能力^[42]。多元化的救援力量以国家综合性消防救援队伍为主力,专业应急队伍、军队应急力量、基层综合性队伍和社会应急组织互为补充;国际救援力量在重大灾害中提供外部支援,形成了协同作战的救援矩阵。高效的物资保障方面,依据“中央库+区域库+市县库”的“1+6+N”智能仓储布局,动态调整食品、饮用水、帐篷、药品等物资储备,以及现代化仓库管理系统与灵活的物资征用补偿机制,确保救援所需资源能够及时、准确送达。持续推进能力建设专项,依托重大科技专项推动国产化救援装备研发与标准化建设,并在重点区域进行示范试点,通过“一专多能”培训、装备下沉和动态演练不断提升县域队伍的综合救援能力和实战水平。

2 存在问题与挑战

2.1 应急救援理论体系建设面临的难题

自然灾害应急救援理论体系仍存在风险评估模型不完善、协同决策机制标准化缺失、应急体系柔性适配理论不足、复杂环境下的应急决策理论研究不足、跨学科理论需进一步深度融合等问题。当前风险评估模型多局限于单一灾种或单一环节,难以对多灾种耦合效应与链式传导进行整体化、动态化评估,亦无法兼顾区域差异与时空演化特征,制约了预警精准度与资源配置效率;多主体、多层级的救援管理亟待标准化的协同决策机制支撑,现有机制在信息共享与指挥联动方面效率低下,尚未充分利用人工智能与大数据技术,实现实时决策支持平台;传统应急预案过度强调刚性流程,缺乏“柔性适配”理论框架,使其在复杂多变或局部环境差异显著的情境下难以灵活调整;针对多灾种复合与次生灾害

叠加的决策模型尚不完善,难以在高不确定性条件下兼顾时效性与连锁风险管控;应急救援实践涉及地理信息、人工智能、社会心理学、生态环境等多学科领域,但学科交叉尚处于初步探索阶段,缺乏系统化的融合框架,不利于提升灾情感知、风险识别、资源调度等环节的协同性能。

2.2 应急救援技术体系建设面临的难题

(1) 灾情监测技术

尽管当前灾情监测已形成“卫星遥感+地面传感+无人平台+大数据AI”多元融合格局,但在实际运行中仍存在明显瓶颈:各类监测设备数据标准不统一,导致遥感影像、传感器数据与无人机航拍难以无缝衔接;卫星影像可快速揭示洪水淹没区的总体格局,但受云层遮挡和过境时间影响,难以及时获取最大淹没范围;地面传感网络在山区或废墟环境下易遭受干扰,数据丢包频发;而大数据与人工智能模型又依赖海量、高质量的历史与现场标注样本,难以实现灾害初期的高精度预测。

(2) 通信指挥技术

应急通信指挥需要在卫星通信、专网自组网与公网之间实现高效切换,并兼顾覆盖范围与网络时延,但不同系统在频段、协议与接入方式上的差异,使得深度融合与智能调度能力不足;一线救援队伍与指挥中心常因网络拥塞或链路中断而无法实时共享精细化态势图;现有平台对多源数据的汇聚与可视化仍需大量人工干预,难以满足灾害现场指挥部对快速、动态决策的需求。

(3) 人员搜救定位技术

超宽带雷达、红外成像、声呐探测与气敏传感各自具备探测优势,但在瓦砾、烟尘、金属障碍物等复杂环境中易受多路径干扰或信号衰减影响;不同探测设备在供电接口、通信协议和数据输出格式上存在较大差异,难以实现即插即用的联合作业;同时,依托深度学习和自适应滤波的定位算法在样本不足与现场噪声剧增时,往往出现误报或漏报,制约搜救效率和精度。

(4) 物资配送技术

我国应急物资保障已从简单储备向智慧化运作演进,但中央与地方库网布局不均,西部与边疆地区库房数量与物资品类不足,跨区域调配效率受到制约;重点生产企业与应急需求错配,导致“最后一公里”配送仍多依赖传统车辆与人工作业;社会化物流、无人配送与冷链系统在应急状态下的可视化调度、大数据预测和无人化配送技术仍停留在试点阶段,难以在大规模灾害中快速、精准满足多样化物资需求。

2.3 应急救援管理体系建设面临的难题

自然灾害应急救援管理体系仍存在应急管理体制

机制不够健全、关键应急救援能力仍有不足、应急处置保障体系还不完善、社会各方共治格局尚未形成等问题。领导指挥体制改革需进一步深化,跨部门、跨区域协同联动机制有待理顺,相关法律法规与标准化预案体系仍需完善以构建全链条闭环;国家与地方应急力量配置失衡,专业队伍与基层综合救援力量薄弱,社会应急组织处于起步阶段,航空应急体系建设相对滞后,各类力量协作效率亟需提升;物资储备结构与布局需优化,紧急调运机制与社会协同参与水平较低,科技创新与人才培养体系有待系统构建,产业支撑作用尚未充分发挥;基层组织网络与人员配置不匹配,公众应急意识与能力素养偏低,激励引导及配套政策尚需强化,从而难以实现应急管理的可持续发展与社会动员的全面覆盖。

3 未来研究方向与创新发展路径

3.1 风险评估与预警精准化

构建多灾种耦合与动态演化的风险评估框架。针对现有风险评估模型局限于单一灾种或静态环节的问题,应以复杂系统理论为指导,构建覆盖“多灾种耦合—时空演化—区域差异”三大维度的动态风险评估框架。对多源异构数据进行融合分析,实现灾害间链式传导的整体化定量评估,结合多级网格化分区与时序仿真,兼顾区域风险特征与时空演化规律,提升预警精准度与资源配置的针对性与效率。

3.2 技术支撑与智能化升级

(1)统一多源数据标准与融合框架研究。未来应构建覆盖遥感影像、地面传感、无人平台与大数据平台的统一数据标准,设计可扩展的多层级融合框架,实现异构数据的自动预处理、格式转化与语义对齐;通过中台化架构与微服务接口,将数据流、元数据和模型输出统一纳入共享管控,为实时态势感知与预测分析提供高效、可复用的基础设施和统一接入规范。

(2)高可靠低时延多体制通信调度技术。着力研究卫星通信、专网自组网与公网的协议适配与智能切换算法,结合边缘计算与网络切片技术,实现多网络并行组网与动态负载均衡;同时,运用深度强化学习优化链路选择,提升极端环境下的信道恢复速度和容错性能,保障指挥中心、一线作业与无人平台之间的端到端低时延、高可靠数据传输。

(3)复杂环境下多模态生命探测算法优化。面对瓦砾、烟尘及金属障碍物引发的信号衰减与多路径干扰,将持续推进超宽带雷达、红外成像、声呐与气敏探测数据的多模态融合,并在实景灾害环境下建立鲁棒性评测体系,以降低区域差异导致的误报率。针对自监督学习

过度依赖模拟废墟数据的问题,引入迁移学习与域适配策略,缩小“仿真—实景”落差。考虑基层应用的算力与成本约束,提出轻量化方案:以<10 MB量级模型(如MobileNetV3)实现无人机端实时推理,同时探索国产化芯片(如Ascend310、RK3588、K210)替代高价进口方案。

3.3 管理机制与社会协同强化

(1)完善应急物资保障与社会协同参与机制研究。为提升物资储备及紧急调运效率,应以大数据与物联网为支撑,构建全国统一的应急物资信息平台,实现储备结构精细化、布局科学化;在此基础上,制定多元化的社会协同参与政策,鼓励企业、公益组织与社区共同参与物资生产、存储与配送,形成“政产学研用”一体化的协同网络;同时,健全紧急调运预案与临时租赁机制,利用数字孪生模拟不同灾情下的物资流转路径,并加强交通与冷链运输网络建设,确保关键物资在灾情发生后能够实现快速、透明、可追溯的调拨与分发,为应急决策提供数据支撑和运行反馈。

(2)完善统一指挥与跨部门联动的体制机制。明确跨部门、跨区域应急联动的职责分工与资源共享机制,建立常态化的联合演练与考核评估体系,检验体制机制效能,通过设立区域级应急协同办公室或指挥中心,实现中央与地方、政府与社会组织之间的信息互通与指令协同,确保应急响应的闭环执行。

(3)优化专业力量与社会力量的资源配置。针对国家与地方应急力量失衡、基层与社会组织薄弱的问题,应在中央统筹和地方统建下,优化资源投入与队伍编制,加大对地震、气象、消防等专业救援队伍的训练与装备升级投入,培育和规范社会应急志愿者组织,推动“政府主导—社会参与—市场支撑”的混合式队伍模式,并通过绩效化激励和培训考核,提高整体救援能力。

参考文献

- [1] 李伟,刘嘉晨,张伟源,等.一种可实现位姿自由调整的应急救援机器人属具快换装置.华南理工大学学报(自然科学版),2025,53(5):11—19.
Li W, Liu JC, Zhang WY, et al. A quick coupling device with free posture adjustment used for emergency rescue robot attachments. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(5): 11—19. (in Chinese)
- [2] 黄莉,徐凤凰,张晨钰,等.粤港澳大湾区复合灾害系统敏感性评估.水土保持学报,2024,38(1):167—175.
Huang L, Xu FH, Zhang CY, et al. Sensitivity assessment of complex disaster system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 167—175. (in Chinese)
- [3] 周利敏,童星.数字韧性视角下应急管理新模式:特征、内涵与实践

- 探索. 中国行政管理, 2024, 40(12): 129—140.
- Zhou LM, Tong X. Disaster governance innovation from the perspective of digital inclusion: Technological empowerment, fair participation, and indicator construction. *Chinese Public Administration*, 2024, 40(12): 129—140. (in Chinese)
- [4] 姚添, 冯鹏宇, 韩春梅. 公安机关地震应急救援体系建设研究——以甘肃积石山地震为例. *中国应急救援*, 2024(3): 39—43.
- Yao T, Feng PY, Han CM. Research on earthquake emergency rescue system building in public security organs: Taking the Jishishan earthquake in Gansu Province as an example. *China Emergency Rescue*, 2024(3): 39—43. (in Chinese)
- [5] 陈亨攀, 李国进. 统筹防灾减灾救灾和灾后恢复重建 写实写细写好“应急为民”文章. *中国减灾*, 2025(2): 28—31.
- Chen HP, Li GJ. Coordinate disaster prevention, mitigation and relief with post-disaster recovery and reconstruction, and write a realistic, detailed and excellent article on “emergency response for the people”. *Disaster Reduction in China*, 2025(2): 28—31. (in Chinese)
- [6] 刘洪洁, 江振春, 周维培. 美国审计署突发公共事件应急管理审计研究. *审计研究*, 2022(5): 56—62.
- Liu HJ, Jiang ZC, Zhou WP. Research on the audit of public emergency management by the US Government Accountability Office. *Auditing Research*, 2022(5): 56—62. (in Chinese)
- [7] 朱莉, 杨耀星, 储德水, 等. 脆弱性视角下异质应急储备库选址-分配研究. *系统科学与数学*, 2025, 45(4): 1044—1063.
- Zhu L, Yang YX, Chu DS, et al. Research on location-allocation problem for heterogeneous emergency reserve facilities from the perspective of vulnerability. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2025, 45(4): 1044—1063. (in Chinese)
- [8] Bennett D, Phillips BD, Davis E. The future of accessibility in disaster conditions: How wireless technologies will transform the life cycle of emergency management. *Futures*, 2017, 87: 122—132.
- [9] Han JH, Zhang P, Song YH. The construction of emergency management whole process model based on the emergency life-cycle: Wenchuan case study// Tan HH, eds. *Technology for Education and Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 235—242.
- [10] Körte J. Risk-based emergency decision support. *Reliability Engineering & System Safety*, 2003, 82(3): 235—246.
- [11] 王永明. 完善与发展重大突发事件情景构建技术方法的核心问题. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(2): 5—9.
- Wang YM. Core issues of perfecting and developing technical methods for scenario construction of major emergencies. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(2): 5—9. (in Chinese)
- [12] 彭宗超, 卜凡, 赵芸. 新安全格局下的城乡基层社会风险治理. *行政管理改革*, 2023(7): 4—12.
- Peng ZC, Bu F, Zhao Y. The social risk governance of urban and rural grassroots under the new security pattern. *Administration Reform*, 2023(7): 4—12. (in Chinese)
- [13] 罗通元. 安全韧性学基本概念和理论体系探讨. *安全与环境学报*, 2022, 22(1): 280—291.
- Luo TY. Discussion on the basic concept and theoretical system of safety resilience science. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(1): 280—291. (in Chinese)
- [14] 王冬冬, 郝竹君, 王黎珣, 等. 危险化学品事故应急救援信息实时采集与需求分析研究. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(S2): 122—129.
- Wang DD, Hao ZJ, Wang LX, et al. Research on real-time collection and demand analysis of emergency rescue information for hazardous chemicals accidents. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(S2): 122—129. (in Chinese)
- [15] 马海涛. 重特大地质灾害应急救援现场监测预警保障体系研究. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(S1): 5—10.
- Ma HT. Study on on-site monitoring and early-warning guarantees system for emergency rescue of major geological disasters. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(S1): 5—10. (in Chinese)
- [16] 朱文彩, 陈江军, 崔学杰, 等. 综合遥感技术在黄龙滩库区地质灾害监测中的应用. *中国地质调查*, 2025, 12(2): 96—103.
- Zhu WC, Chen JJ, Cui XJ, et al. Application of integrated remote sensing technology in geological disaster monitoring of Huanglongtan reservoir area. *Geological Survey of China*, 2025, 12(2): 96—103. (in Chinese)
- [17] 宁晓刚, 张翰超, 张瑞倩. 遥感影像高可信智能不变检测技术框架与方法实践. *测绘学报*, 2024, 53(6): 1098—1112.
- Ning XG, Zhang HC, Zhang RQ. Practical framework and methodology for high-performance intelligent invariant detection in remote sensing imagery. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(6): 1098—1112. (in Chinese)
- [18] 方蕾, 关通, 吴瑶瑶, 等. 自然灾害综合监测业务思路探讨. *中国减灾*, 2024(18): 38—39.
- Fang L, Guan T, Wu YY, et al. Discussion on the business ideas of comprehensive monitoring of natural disasters. *Disaster Reduction in China*, 2024(18): 38—39. (in Chinese)
- [19] 杨栩, 朱大明, 杨润书, 等. 匹配点云结合HSI色彩分量的无人机RGB影像信息提取方法. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 295—301.
- Yang X, Zhu DM, Yang RS, et al. Method for extracting UAV RGB image information based on matching point cloud and HSI color component. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 295—301. (in Chinese)
- [20] 金志伟, 冯登夷, 张旸, 等. 决口险情监测系统在防汛抢险中的应用. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(2): 87—90.
- Jin ZW, Feng DY, Zhang Y, et al. Application of breach monitoring system in flood control and rescue. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(2): 87—90. (in Chinese)
- [21] 周利敏. 融合数字风险管理的现代应急管理创新实践与理论建构. *南京社会科学*, 2024(12): 73—83.
- Zhou LM. Innovation and theoretical construction of modern emergency management integrating digital risk management. *Nanjing Journal of Social Sciences*, 2024(12): 73—83. (in Chinese)
- [22] 熊励, 郭佳璐. 新一代信息技术驱动的突发自然灾害应急管理研究热点与展望. *灾害学*, 2025, 40(3): 124—131.
- Xiong L, Guo JL. Research hotspots and prospects of emergency management for sudden natural disasters driven by new generation information technology. *Journal of Catastrophology*, 2025, 40(3): 124—131. (in Chinese)
- [23] 王先伟, 宁亚洲, 方勇军, 等. 暴雨洪涝灾情快速监测评估技术框架体系与应用: 以2022年6月北江流域洪水灾情分析为例. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 1—20.
- Wang XW, Ning YZ, Fang YJ, et al. A technique framework and implementation for rapidsurvey and assessment of flood disasters: A

- case study in the North River Basin in June 2022. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(3): 1—20. (in Chinese)
- [24] 付瑞平, 高文静, 赵莲, 等. 查问题 提对策 推动提升防灾减灾救灾能力——如何做好自然灾害调查评估工作大家谈. *中国应急管理*, 2025(2): 30—35.
- Fu RP, Gao WJ, Zhao L, et al. Identifying problems and proposing countermeasures to enhance disaster prevention, mitigation and relief capabilities - How to do a good job in the investigation and assessment of natural disasters? Let's talk about it. *China Emergency Management*, 2025(2): 30—35. (in Chinese)
- [25] 赖祥威, 郑万波, 吴燕清, 等. 矿山事故应急救援数字预案的任务协同流程网络模型及时效分析. *计算机科学*, 2021, 48(S1): 596—602.
- Lai XW, Zheng WB, Wu YQ, et al. Task collaborative process network model and time analysis of mine accident emergency rescue digital plan. *Computer Science*, 2021, 48(S1): 596—602. (in Chinese)
- [26] 文虎, 刘一丹, 郑学召, 等. 极端条件下应急通信系统关键技术. *西安科技大学学报*, 2025, 45(2): 224—235.
- Wen H, Liu YD, Zheng XZ, et al. Key technologies for emergency communication systems under extreme conditions. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2025, 45(2): 224—235. (in Chinese)
- [27] 张柳妞. 实现应急救援联动“一盘棋”. *重庆法治报*, 2024-12-25(3).
- [28] 郑学召, 杨卓瑞, 郭军, 等. 灾后救援生命探测仪的现状和发展趋势. *工矿自动化*, 2023, 49(6): 104—111.
- Zheng XZ, Yang ZR, Guo J, et al. The current status and development trend of post-disaster rescue life detectors. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(6): 104—111. (in Chinese)
- [29] 郑学召, 丁文, 黄渊, 等. 不同领域下超宽带雷达探测呼吸心跳信号研究综述. *雷达学报(中英文)*, 2025, 14(1): 204—228.
- Zheng XZ, Ding W, Huang Y, et al. A review of UWB radar detection of respiration and heartbeat signals in different scenarios. *Journal of Radars*, 2025, 14(1): 204—228. (in Chinese)
- [30] 刘尚争, 杨旭. 红外图像识别在舰船火灾中的应用分析. *舰船科学技术*, 2017, 39(20): 162—164.
- Liu SZ, Yang X. Application of infrared image recognition in ship fire. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(20): 162—164. (in Chinese)
- [31] 高娜, 严瑾, 代博洋, 等. 重特大地震灾害生命搜索策略研究. *中国应急救援*, 2025(2): 59—63.
- Gao N, Yan J, Dai BY, et al. Research on life detection strategies for extremely large earthquake disasters. *China Emergency Rescue*, 2025(2): 59—63. (in Chinese)
- [32] 丁明慧, 王小平, 曾志刚. 基于忆阻的嗅觉感知及跨模态联想电路设计与实现. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(12): 2561—2576.
- Ding MH, Wang XP, Zeng ZG. Emrivative circuit design and implementation of olfactory perception and cross-modal association. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2023, 53(12): 2561—2576. (in Chinese)
- [33] 赵晨暉. 多机器人协同智能搜救与应急组网优化. 上海: 东华大学, 2024.
- Zhao CW. Multi-robot collaborative intelligent search and rescue and emergency networking optimization. Shanghai: Donghua University, 2024. (in Chinese)
- [34] 李定洋. 突发公共卫生事件中多元主体协同治理研究. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- Li DY. Research on multi subject collaborative governance in public health emergencies. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022. (in Chinese)
- [35] 邵舒羽, 王晴, 李亚铎, 等. 应急物流研究现状及其未来发展趋势. *物流技术*, 2024, 43(1): 148—160.
- Shao SY, Wang Q, Li YD, et al. Current status of emergency logistics research and its future development trends. *Logistics Technology*, 2024, 43(1): 148—160. (in Chinese)
- [36] “十四五”国家综合防灾减灾规划. *中国安全生产*, 2022, 17(8): 6.
- National comprehensive disaster prevention and mitigation plan for the 14th Five-Year Plan Period. *China Occupational Safety and Health*, 2022, 17(8): 6. (in Chinese)
- [37] 朱贝特. 驰援京津冀 物流快递和商用车企在行动. *中国物流与采购*, 2023(16): 27—30.
- Zhu BT. Logistics, express delivery and commercial vehicle enterprises are taking action to support the Beijing-Tianjin-Hebei region. *China Logistics & Purchasing*, 2023(16): 27—30. (in Chinese)
- [38] 张燕. 应急物资保障体系现状及优化策略. *城市与减灾*, 2024(3): 6—10.
- Zhang Y. Current situation and optimization strategies of emergency material assurance system. *City and Disaster Reduction*, 2024(3): 6—10. (in Chinese)
- [39] 王燕青, 陈红. 应急管理理论与实践演进: 困局与展望. *管理评论*, 2022, 34(5): 290—303.
- Wang YQ, Chen H. Evolution of emergency management theory and practice: Dilemma and prospect. *Management Review*, 2022, 34(5): 290—303. (in Chinese)
- [40] 赵润滋. 城市社区应急准备能力评估研究. 西安: 西北大学, 2018.
- Zhao RZ. Study on evaluation system of urban community emergency preparedness Ability. Xi'an: Northwest University, 2018. (in Chinese)
- [41] 熊先兰, 王思懿, 黄颖. 突发事件应急信息共享平台构建与运行——基于弱势群体权益保护的目标. *河北经贸大学学报*, 2023, 44(6): 99—108.
- Xiong XL, Wang SY, Huang Y. Construction and operation of emergency information sharing platform for sudden incidents—Based on the goal of protecting the rights and interests of vulnerable groups. *Journal of Hebei University of Economics and Business*, 2023, 44(6): 99—108. (in Chinese)
- [42] 尉馨元. 基层应急管理五年规划的工具属性与内生性矛盾. *行政论坛*, 2021, 27(5): 122—127.
- Wei XY. The contradiction between the tool attribute and the endogeneity of the five-year plan for grassroots emergency management. *Administrative Tribune*, 2021, 27(5): 122—127. (in Chinese)

The Multi-dimensional Integration and Innovative Development Path of the Emergency Rescue System Construction for Natural Disasters

Jianhua Xu¹ Xuezhao Zheng^{2*} Haitao Ma³ Yuanda Zhang⁴ Xin Tong^{5*} Song Qi¹

1. China Earthquake Emergency Search and Rescue Center, Beijing 100049, China

2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China

4. University of Emergency Management, Langfang 065200, China

5. College of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract With the intensification of climate change and the acceleration of urbanization, the situation of natural disasters in China has become increasingly complex and severe, placing higher demands on the speed of emergency response, coordination capabilities, resource allocation, and technological support. To build an efficient, orderly, and collaborative modern emergency rescue system, this paper reviews the evolution of emergency response theory from experience-driven models to intelligent management. It examines the current state and limitations of key technologies such as disaster monitoring, communication and command, personnel search and rescue, and material distribution, and analyzes the pain points in multi-level command and cross-departmental coordination mechanisms in emergency management. The following optimization paths are proposed: (1) establishing a risk assessment framework that accounts for multi-hazard coupling and dynamic evolution; (2) unifying multi-source data standards and integration platforms; (3) developing low-latency, multi-protocol communication and dispatching technologies; (4) enhancing the robustness of multimodal life detection algorithms; (5) constructing intelligent emergency supply assurance and social coordination mechanisms; and (6) improving cross-departmental coordination and unified command systems. These efforts aim to provide theoretical support and policy recommendations for improving China's modern emergency management system, enhancing disaster risk governance capabilities, and advancing national security strategy.

Keywords theoretical innovation; technological empowerment; management collaboration; emergency rescue system; natural disasters

许建华 中国地震应急搜救中心科技发展部负责人,应急管理部地震和地质灾害生命搜索救援技术重点实验室办公室主任,高级工程师。长期从事地震、地质灾害现场应急救援无人机灾情获取、技术研发应用及培训演练等工作。多次参与汶川8.0级地震、九寨沟7.0级地震、缅甸7.9级地震等多次现场及后方应急救援任务。负责和参与科学技术部863计划项目、重点研发计划项目、工业和信息化部工程化攻关专项项目等10余项科研项目。

郑学召 西安科技大学应急技术与管理系主任,教授,博士生导师。主要围绕应急救援理论、应急救援装备研发及应急决策优化开展科学研究。主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划项目等项目,主持国家能源领域行业标准《矿用钻孔通信装置》(NB/T 10752-2021)编撰及发布工作。

童鑫 内蒙古科技大学应急管理系专任教师,国家注册安全工程师。研究方向为突发事件风险评估与应急技术。主持内蒙古自治区自然科学基金项目、内蒙古哲学社会科学规划项目等课题。在*Energy*、*Safety Science*等发表学术论文10余篇,参编国家能源领域行业标准《矿用钻孔通信装置》(NB/T10752-2021)、团体标准《矿山智慧应急救援系统建设指南》(T/ZGCIT043—2025)。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Authors, Email: zhengxuezhao@xust.edu; 2022059@imust.edu.cn