

第一章 绪 论

一、我国洪涝灾害危害与形势

洪涝灾害分为“洪灾”和“涝灾”两种。“洪灾”，指大雨或暴雨引起水道急流、山洪暴发、河水泛滥，淹没农田、毁坏环境与各种设施等。“涝灾”，指水过多或过于集中或返浆水过多造成的积水成灾^[1]。洪水可分为河流洪水、湖泊洪水、风暴潮洪水等。其中，河流洪水因成因不同又分为以下几种类型。①暴雨洪水：是最常见、威胁最大的洪水，它是由较大强度的降雨形成的，又简称雨洪。②山洪：是指强降雨后，山区溪沟中发生暴涨、暴落的洪水。山洪具有突发性、雨量集中、破坏力强等特点，常伴有泥石流、山体滑坡、塌方等灾害。③融雪洪水：主要发生在高纬度积雪地区或高山积雪地区。④冰凌洪水：常发生在黄河、松花江等北方江河中。由于河道中的某一河段由低纬度流向高纬度，在气温回升时，低纬度河段上游先解冻，而高纬度河段仍在封冻，上游来水和冰块堆积在下游河床，形成冰坝，造成洪水泛滥；另外，河流封冻时也可能产生冰凌洪水。⑤溃坝洪水：是指大坝或水库突然决堤、溃塌而造成的洪水。

洪涝灾害是中国自然灾害体系中具有高度频发性与破坏性的灾害类型之一，长期以来对国家经济社会稳定、公民生命财产安全、生态环境保护构成重大威胁。洪涝灾害影响范围广、破坏性强，特大洪涝灾害还常伴随山洪、泥石流、堤坝决口等衍生事故，极易造成严重的人员伤亡和财产损失。尤其是当特大洪涝发生在我国中西部山区、丘陵、河道等复杂地理环境的村镇时，受限于当地落后的经济、教育、医疗及防灾减灾工程设施，承灾和救灾能力有限，对当地居民的日常生活、生产及社会经济的可持续发展可造成毁灭性的打击。根据成因和空间特征，洪涝灾害可分为流域暴雨型、山洪型、城市积涝型洪涝等^[2]，分布具有明显的时间与地区差异性，南方在季风性雨季，多地易发生山洪；北方则以强集中暴雨引发局地内涝为主。

本章以系统梳理中国洪涝灾害的危害特征与发生形式为起点，从洪涝灾

害的总体概况入手，深入剖析其在人员、经济、社会与生态层面的典型危害，并进一步探析其诱因机制，包括极端天气背景、地理水利条件、城市化演变以及管理体制缺陷等。其次，介绍与探讨我国航空应急救援的现状与困境，引出本书的主要研究内容。一方面为后续航空应急救援机制建设提供背景支撑，另一方面明确研究所聚焦的关键领域与问题，为本书整体研究奠定基础。

（一）中国洪涝灾害概况

从新中国成立早期至改革开放前，我国就已频繁遭受洪涝灾害，且规模巨大。以1990—2008年为例，全国各类自然灾害平均每年受灾人口约3亿人次，倒塌房屋超过300万间，紧急安置900余万人，年度直接经济损失超过2000亿元人民币，其中洪涝灾害占据主导地位^[3]。在上述年间，长江、松花江、淮河、珠江流域的特大洪灾频发，尤其是1998年特大洪涝造成了严重损失，堪称该时期洪涝灾害影响的集中体现。1979—2000年间，随着国家防洪基础设施建设的推进、水利工程标准的提升，以及应急体系逐步完善，洪涝灾害的人员伤亡呈下降趋势，但经济损失仍偏高。总体而言，这一阶段虽有波动，但保障能力正在提升。2001—2020年间，在全球升温与厄尔尼诺效应共同作用下，中国极端降水事件趋于早发、集中频发、强度高，导致洪涝灾害由区域性的季节性现象，逐步演变为多区域、多时期、多机制叠加式的高风险态势。此20年间，我国洪涝灾害年均受灾人口超过1亿人次，年均直接经济损失约为1678.6亿元人民币，且洪涝灾害造成的死亡失踪人数占全部气象灾害死亡人数比例的一半以上^[4]。这一阶段南方省份受灾尤为严重，洪涝损失集中于长江流域和珠江流域，区域差异明显。

近5年来，中国已进入气候变暖加速阶段，洪涝灾害呈现出更高频率、更重破坏力、更广覆盖面的转折趋势，尤其南北部影响差异缩小，北方洪涝事件日趋明显，灾害常态已发生结构性变化。

2021年7月，河南中北部地区遭遇历史罕见大暴雨，北部城市如郑州、新乡、开封、周口、焦作等地部分地区出现特大暴雨并造成严重洪涝灾害，造成河南省150个县（市、区）1478.6万人受灾，因灾死亡失踪398人^[5]。

2022年7月底至8月上旬，辽宁省中西部、东南部等地出现暴雨到大暴雨，引发洪涝灾害，造成锦州、阜新、盘锦等9市31个县（市、区）54.9万人受灾，直接经济损失76亿元人民币^[6]。

2023年受台风“杜苏芮”残余环流影响，京津冀等地遭受极端强降雨，引发严重暴雨洪涝、滑坡、泥石流等灾害，造成北京、河北、天津551.2万人不同程度受灾，因灾死亡失踪107人，直接经济损失1657.9亿元人民币^[7]。

2024年7月中下旬，陕西出现持续强降雨过程，引发严重暴雨洪涝灾害，造成商洛、宝鸡等地56.7万人不同程度受灾，死亡失踪95人，紧急转移安置14.1万人，直接经济损失164.1亿元人民币^[8]。

2025年7月24日至7月底，受副热带高压外围暖湿气流影响，北京全市平均降雨量达到暴雨等级，城区达到大雨等级，截至2025年7月31日12时，北京全市因灾死亡44人，失踪失联9人^[9]。

《中国气候变化蓝皮书（2025）》《中国适应气候变化进展报告（2024）》显示，2024年中国全国平均气温与气候极端事件发生频率（或强度）均创历史新高。气候变化导致的暴雨频次正在逐年增高、强度逐年增强，不仅在南方降水异常偏多，北方此前较少受影响亦出现“雨季降水偏多80%以上”的情形，灾害常态已发生结构性变化。

（二）洪涝灾害的典型危害表现

1. 人员伤亡与公共健康危害 洪涝灾害对人员安全与公共健康的危害呈现出显著的阶段性特征。在灾害发生的初期，直接的人员伤亡主要源于突发性洪水导致的溺水以及伴随的次生灾害，如建筑物坍塌、山体滑坡等，这一阶段的人员伤亡往往具有瞬时性和高致死性的特点^[10]。而在灾后阶段，随着洪水退去，卫生条件恶化、疾病传播风险上升以及医疗资源短缺等问题逐渐凸显，公共健康危机成为灾害长期危害的主要表现形式^[11]。这两个阶段相互关联，初期的高强度物理致灾为后续公共卫生问题的暴发埋下隐患，而灾后健康风险的蔓延又可能进一步加剧灾害的社会经济影响，形成复合型灾害链。

（1）从致灾机制来看，洪涝灾害直接造成人员伤亡的核心因素，包括高速水流冲击、浸泡引发的建筑结构失稳、地质灾害以及次生事故。暴雨引发的山洪具有突发性强、流速快、破坏力大的特点，尤其在山区河谷地带，地形抬升效应会加剧洪水冲击力，导致人员撤离困难。同时，持续性强降雨会引发土壤饱和，进而诱发山体滑坡和泥石流，对交通干道沿线及居民区构成严重威胁。此外，洪水淹没电力设施可能引发电击事故，而灾民转移过程中的拥挤和恐慌情绪也可能导致踩踏事件。这些致灾因素的时空叠加，使得灾

害初期的人员伤亡呈现高集中性和高死亡率特征，而灾区应急资源往往因交通中断或通信瘫痪难以快速响应，进一步放大了灾害损失。

(2) 在公共健康层面，洪涝灾害通过多种途径破坏灾区的卫生防疫体系，进而引发复杂的健康风险。洪水泛滥导致污水倒灌、垃圾堆溢和动物尸体腐败，使地表水和地下水遭受严重污染，饮用水中的病原微生物浓度显著升高，大幅增加霍乱、伤寒、甲型肝炎等水源性传染病的暴发概率^[12]。同时，积水环境为蚊、蝇、啮齿类动物等病媒生物提供了滋生条件，加速疟疾、登革热、钩端螺旋体病等媒介传染病的传播。灾后临时安置点的公共卫生管理同样面临严峻挑战：过度拥挤的居住环境、不完善的卫生设施、清洁用水短缺以及医疗服务的可及性下降，共同构成了呼吸道和肠道传染病暴发的温床。值得注意的是，公共卫生系统的脆弱性在灾害中被放大，若灾前监测预警机制不健全或防疫物资储备不足，将导致疫情控制窗口期延误。为此，现代灾害医学强调“防-救-治”一体化应对策略，即在灾前强化疾病监测网络和疫苗接种覆盖率，灾中快速实施环境消杀和饮用水净化，灾后重点恢复基层医疗服务能力，从而阻断“灾害-疫情-贫困”的恶性循环。从本质上看，洪涝灾害的健康危害机制可归纳为物理致灾因子直接作用与公共卫生系统崩溃的间接效应双重驱动，而灾害响应时效性、安置方案科学性和卫生基础设施韧性则是决定健康风险管控成效的关键变量。

2. 经济损失与基础设施破坏 洪涝灾害对经济系统与基础设施的破坏常呈现出“广域、多层、系统性”的特征^[13]。洪涝灾害对经济系统的冲击表现为直接资产损毁和间接产业链中断的双重效应，其影响范围往往超出灾区的空间边界，甚至波及区域或国家经济体系。在直接经济损失方面，洪水淹没导致农业、工业、商业及居民财产遭受严重破坏。农业作为受洪涝影响最为敏感的产业之一，作物淹没、农田淤积及土壤养分流失可造成当季绝收，并导致长期土地生产力下降。工业部门则面临厂房设备浸水、原材料损毁及生产线停滞等问题，特别是电子、纺织等对生产环境要求较高的行业，洪水可能导致精密设备报废，恢复周期漫长。商业活动中，零售业、物流业及旅游业因交通中断、市场停摆而遭受重创，灾后消费信心低迷进一步延缓经济复苏。除直接损失外，洪涝灾害的间接经济影响更为深远。供应链中断可能引发上下游产业连锁反应，如洪水冲毁交通干线导致原材料运输延误，进而影响跨区域工业生产。同时，灾害导致的劳动力流失（如人员伤亡、迁移）

和生产力下降（如疾病蔓延、心理创伤）会削弱区域经济活力。保险业和公共财政亦承受巨大压力，灾后重建资金需求激增可能挤占其他社会支出，而长期反复的洪涝风险还会降低投资吸引力，阻碍区域可持续发展。《2023年全球自然灾害评估报告》显示，全球洪涝灾害年均造成的经济损失超过300亿美元，其中间接损失占比可达40%~60%，凸显灾害经济影响的复杂性和系统性。

洪涝灾害对基础设施的破坏具有广泛性、系统性及长期性特征，交通、能源、通信、水利等关键系统的瘫痪会严重削弱灾区的应急响应与恢复能力。交通基础设施是洪涝冲击的首要对象，道路、桥梁、铁路等因洪水冲刷、地基软化或泥石流掩埋而损毁，导致救援物资运输受阻，灾民疏散困难。2021年德国洪灾中，超过600 km公路和数十座桥梁被毁，部分地区成为“孤岛”，极大延缓了救援进度。能源系统同样脆弱，变电站、输电线路受淹可能引发大面积停电，而水电站、石油储备设施受损则威胁能源供应安全。例如，2011年泰国洪灾导致多家汽车和电子工厂因电力中断停产，全球硬盘供应一度减少30%。水利基础设施在洪涝灾害中面临双重挑战：一方面，堤防溃决、水库溢洪会加剧灾情；另一方面，供水管网污染和排水系统失效会衍生次生危机。城市内涝尤为突出，由于地下管网排水能力不足或河道淤塞，暴雨积水难以快速排出，造成商业区、居民区长时间浸泡，建筑结构安全受到威胁。通信系统的破坏则直接影响灾情监测、预警发布和救援协调，基站损毁或光缆中断可能导致灾区与外界失联，延误最佳救援时机。此外，学校、医院等公共服务设施的损毁不仅会加剧灾民安置压力，还可能长期影响教育和医疗资源的可及性。

此外，基础设施的破坏往往引发连锁反应，形成“灾害-瘫痪-次生灾害”的恶性循环。例如，交通中断阻碍救灾物资运输、能源短缺影响医疗设备运行、通信故障导致指挥系统失灵，这些因素叠加会大幅延长灾后恢复周期。更严峻的是，在气候变化背景下，极端降雨事件频率增加，传统基础设施的设计标准可能无法应对未来风险，亟须通过韧性规划（如抬高关键设施、强化排水能力）提升抗灾能力。因此，洪涝灾害下的基础设施保护不仅是技术问题，更是涉及城市规划、资金投入和风险管理的系统性工程。

3. 社会秩序与民生影响 洪涝灾害对社会秩序和民生保障的冲击主要体现在以下几个维度：

(1) 居民安置与迁居挑战：大规模洪灾往往造成人口的大范围被动迁移。以2020年长江流域洪灾为例，全国累计紧急转移安置群众超过400万人次。这些被迫迁移的人口面临着严峻的生存挑战：临时安置点通常由学校体育馆、会展中心等公共场所仓促改造而成，人均居住面积普遍低于3 m²，远低于国际红十字会建议的灾民安置标准，生活配套设施严重不足。相关研究指出^[14]：约65%的安置点存在饮用水供应不稳定问题，40%的安置点卫生设施无法满足基本需求。更值得关注的是，这种非自愿迁移往往持续数周甚至数月，导致灾民长期处于“临时性”生存状态，正常社会生活陷入停滞。

(2) 民生服务系统受压：民生服务系统的瘫痪构成了第二重冲击。洪涝灾害对现代城市生命线工程的破坏呈现出连锁反应特征：电力中断导致供水系统停摆，交通瘫痪阻碍物资配送，通信中断影响救援协调。这种系统性崩溃使医疗、教育等基本公共服务陷入困境。某省三甲医院的灾后评估报告显示，洪灾期间急诊接诊能力下降72%，手术室使用率不足平时的30%。在教育领域，灾区学校平均停课时间达23天，偏远地区甚至超过2个月。这种公共服务的中断不仅造成即时影响，更可能产生代际传递效应，特别是对儿童发展和患者康复造成难以弥补的损失。

(3) 心理健康与群体行为风险增加：研究表明，洪灾幸存者中创伤后应激障碍（post-traumatic stress disorder, PTSD）症状检出率达34.2%，抑郁症状检出率为28.7%，显著高于普通人群。这种心理创伤呈现出独特的“涟漪效应”：初期表现为对灾害场景的闪回和噩梦，中期发展为持续性的焦虑和警觉性增高，后期可能演变为社会适应障碍。更值得警惕的是，这种心理影响具有明显的群体传播特征，通过社会网络扩散形成“集体创伤记忆”。某灾区社区的追踪数据显示，灾后18个月仍有19%的居民存在明显的心理症状，且呈现出家庭聚集性特征^[15]。

(4) 社会秩序与公共管理负担加重：灾情应对期间，基层政府往往面临“三重压力”：应急指挥体系在信息不全情况下的决策压力，有限救援资源的分配压力，多元主体协同的组织压力。某市灾后统计显示，应急管理热线接听量达到平日的17倍，行政申诉案件增长320%。这种管理压力在灾后重建阶段持续存在，表现为：补偿标准争议引发的群体性事件，重建进度滞后导致的不满情绪累积，以及资源分配不公引发的社会信任危机等。特别值得注意的是，这种社会管理挑战往往持续到灾后3~5年，成为考验社会治理能力的

长期命题。

4. 生态环境与长效影响

(1) 河道与湿地系统失衡：洪水过程引起河床淤积、堤岸冲蚀，改变原有河道形态与流域水文特征。湿地生态系统受到淤泥堆积、水质改变的破坏，使物种栖息地丧失，生态服务功能显著退化。

(2) 土壤与农业可持续性弱化：洪水可导致农田盐渍化、养分流失或过度沉积，影响后续耕地产能；泥沙淤积改变土地地貌，抑制耕作效率和农作物产出潜力。

(3) 水体污染与生态链断裂：洪水期间带入工业污染物、有机废弃物、农药化肥及生活垃圾，使水体负荷恶化，破坏河流、湖泊与地下水生态健康，威胁渔业、生物多样性和饮用水安全。

从系统恢复的角度看，生态环境的重建成本高、周期长，需要采取生态修复工程、水土保持治理、湿地恢复、污染净化等多种措施联合干预^[16]。若忽视生态系统服务功能的修复，将削弱区域生态韧性，直接影响未来洪涝抵御能力与可持续发展水平。

(三) 中国洪涝灾害的形势

洪涝灾害作为中国最主要的自然灾害类型之一，发生形式受地理环境、气候特征、水文条件以及人类活动等多重因素共同作用，呈现出明显的区域性、季节性和多样化态势。

1. 地域分布特点 中国地域辽阔、地形复杂，水系分布广泛，洪涝灾害的地域分布具有显著的不均衡性，南多于北、东多于西的空间格局尤为突出。

(1) 南部和东部地区：尤其是长江中下游、珠江流域、太湖流域等，是中国洪涝灾害的高发区。这些地区降雨丰沛，水网密布，人口密集且经济发达。历史上，东部地区频繁发生大规模洪灾。以长江流域为例，2020年持续性强降雨导致多地水位超警，形成了1998年以来最严重的汛情，涉及江西、湖南、湖北、安徽等地，水位突破历史极值，造成严重的灾害影响。此外，珠江流域与太湖流域也常受到季风影响，暴雨频发，易发生较大规模的洪涝灾害。

(2) 中部地区：包括湖南、湖北、河南、陕西等省，虽然其降水量相对

东部地区较少，但由于特殊的地理位置和水系条件，洪涝灾害呈现出较强的集中性。尤其是长江与黄河水系的交汇地带，水资源密集且人口较多，一旦出现持续性暴雨或上游来水增多，容易发生大规模的洪涝灾害。2016年，湖北武汉发生大规模水灾，多个区域因暴雨和上游来水导致堤坝溃口，城市基础设施受损严重，灾情长时间无法恢复，成为该地区洪涝灾害的典型案例。

（3）西部地区：受地形高差大、地质结构复杂的影响，洪涝灾害多伴随山洪和泥石流发生，突发性强、预警难度大。特别是青藏高原及其周边地区，虽然降水总量相对较低，但一旦集中降水发生，极易引发山洪暴发，给当地基础设施与居民生命财产安全带来巨大威胁。西藏、四川、云南等地的山区经常出现因强降水引发的山洪和泥石流，灾后恢复难度较大。2021年，四川省汶川地区因暴雨引发山洪，造成大量房屋倒塌，交通中断，灾后经济损失巨大。

（4）北部地区：虽然洪涝灾害相对较少，但近年来随着气候变化的影响，极端降水事件逐渐增多，灾害频率呈上升趋势。北方地区的特点是干旱与暴雨交替，土壤蓄水能力较差，一旦遭遇暴雨，极易造成城市内涝与河流泛滥。特别是黄淮海平原及京津冀地区，受季风气候影响较大，暴雨来临时，排水系统往往无法及时应对，导致严重的城市内涝和农田淹没。2021年郑州市“7·20”暴雨洪涝灾害事件便是北方地区洪涝灾害频率上升的典型代表，暴雨造成的地铁积水、交通瘫痪和电力中断等问题，暴露了北方城市防洪基础设施的脆弱性。

总体来看，中国洪涝灾害的地域分布呈现出东部高发、中部集中、西部突发、北方频率上升的空间格局。东部地区降水丰沛、水网密集，是洪涝灾害的“重灾区”；中部地区则由于长江与黄河水系交汇，洪涝灾害具有较强的集中性；西部地区山地地形、地质结构复杂，洪涝灾害常伴随山洪和泥石流等次生灾害；北方地区，在全球气候变化的背景下，洪涝灾害频率逐渐增多，城市内涝问题日益突出。

2. 季节演化规律 中国洪涝灾害具有明显的季节性，主要集中在每年的5月至9月，即传统汛期。其中6月至8月为高峰期，占全年洪涝灾害发生总数的80%以上，这一时段洪灾活动与东亚季风密切相关。春末夏初季节，南海与西太平洋副热带高压北移，暖湿气流与北方冷空气频繁交汇，则会形成大范围强降雨^[17]。南方地区（如广西、广东、湖南、江西等省/自治区）

在5月至6月进入“龙舟水”期，强降雨频发，江河水位迅速上涨。7月以后，华北和东北地区陆续进入主汛期，暴雨多由台风、冷涡及西风槽共同影响形成。

随着近年来受全球气候变化影响，洪涝灾害的季节性已呈现出以下新趋势^[18]：①强降雨事件开始出现“提前”或“延后”现象，汛期边界模糊；②单次降水强度增强，“短时强降雨”频次升高；③极端天气事件更趋频繁，2023年和2024年多次出现24 h降雨量突破历史极值的现象，打破了原有的气候统计稳定性。

3. 地貌特征与诱发因素 中国地貌类型复杂多样，不同地貌区所对应的洪涝灾害类型亦有所不同，形成了平原洪涝、山区山洪与滑坡泥石流、城市内涝三大基本类型。

(1) 平原洪涝：主要集中于长江中下游、淮河流域、黄淮海平原等地。此类地区地势低平，排水不畅，一旦江河上游来水量大或局地持续强降雨，极易形成大面积洪涝^[19]。平原洪涝的范围广、持续时间长，对农业生产和农村居民影响尤为显著。

(2) 山区山洪与泥石流：如四川盆地周边、秦岭-淮河地带、滇黔山区，地形起伏大，坡度陡峭，土壤易失稳。强降雨时，山洪暴发迅速，常伴随滑坡和泥石流灾害，形成“复合型灾害链”，极大增加了灾害防控的复杂性和难度。

(3) 城市内涝：近年来在快速城市化背景下，城市洪涝问题日益严重。由于大量不透水地表（如水泥、柏油路面）覆盖、排水系统老化或设计滞后，使得城市在极端降雨下出现“看海”现象。如2021年郑州市“7·20”暴雨洪涝灾害事件反映出中大型城市在暴雨极值面前的基础设施脆弱性和应急机制不足^[20]。

此外，人类活动也是重要的诱发因素^[21]，如围垦湖泊、城市无序扩张、过度采砂破坏河床、森林覆盖率下降等，均加剧了洪涝灾害的暴发风险。

4. 洪涝灾害未来发展趋势 气候变化背景下，中国洪涝灾害的发生态势呈现出多重变化趋势，未来形势更趋复杂、挑战更加严峻。

(1) 极端降雨事件持续上升：《中国气候变化蓝皮书（2024）》^[22]指出，过去60年，中国年均暴雨日数呈现显著上升趋势，尤其是短历时、强强度的“极端暴雨”事件显著增多，预计未来仍将持续。

(2) 复合型灾害风险加剧：洪涝灾害常与台风、地质灾害、城市内涝等叠加发生，形成多灾并发态势。如2023年台风“杜苏芮”期间，福建、广

东、河北等地先后出现山洪、滑坡、城市积涝等灾害联动，极大考验应急响应能力。

(3) 灾害影响重心北移趋势显现：研究表明，随着北方地区夏季气温和降水量上升，黄淮海平原、京津冀地区的暴雨和内涝事件明显增多。北方城市防洪基础设施建设滞后，未来面临更高的系统性风险。

(4) 城市洪涝将成为治理重点：《“十四五”全国城市基础设施建设规划》^[23]已将“城市排水防涝能力提升”作为重要任务，表明政策层面高度重视“韧性城市”建设，防范城市暴雨内涝引发的次生灾害。

综合分析，中国洪涝灾害的发生形式正由“自然型”向“自然-社会复合型”演化，其治理思路也需从单一工程防控向综合治理、多元协同的方向转变。只有基于对灾害发生形式的全面理解，才能科学构建区域差异化、层级响应式的应急救援体系。

(四) 特大洪涝灾害情景的时空多变性

特大洪涝灾害具有极强的随机性和不确定性，从受灾空间而言，由于城镇、山区、丘陵、河道、水库、蓄滞洪区等区域地貌特征迥异，不同地貌特征的环境因素及灾害情景的演化过程也不甚相同，从而导致灾害情景下的应急任务极具多样性与复杂性；从受灾时间而言，特大洪涝灾害从孕育、发生、发展到终结阶段，承灾体所处的状态及受损程度亦有极大的区别，而在应急救援过程中任务的紧迫程度也随着时间序列发生变化。此外，现有应急情景的推演研究多以分析突发事件的个体演化为主。然而，现实中多数如特大洪涝灾害的大灾巨灾一般均有政府应急管理措施的干预作用。在针对情景演化路径的问题研究时，仍需考虑灾害个体与应急管理措施间的耦合效应。因此，针对特大洪涝灾害，考虑区域地貌特征、承灾体状态与应急措施效果，构建特大洪涝灾害的情景演化模型，梳理不同时空特征下的应急救援任务，制定有针对性的救援预案是当前亟待解决的一个关键科学问题。

二、我国航空应急救援现状与困境

(一) 航空应急救援发展的必要性

洪涝灾害往往伴随大范围城市内涝、农村道路塌陷、山区滑坡等交通系

统瘫痪现象。据2023年湖南岳阳、2024年广东梅州及江西抚州等地的灾害案例分析，洪涝期间超过60%的乡村公路出现“断头路”现象，传统地面应急物资和人员调度体系面临严重制约。在此背景下，传统以地面力量为主的应急响应体系在“灾情突发-响应迟滞-交通受阻-救援受限”的路径困局中效率受限。而航空应急救援具有部署速度快、响应半径大、可越障救援能力强等优势，能够有效突破地面通行瓶颈，为大面积、广地域、多灾种交织的洪涝灾害现场提供快速反应的关键能力，是实现“黄金救援时间”抢救目标的重要依托。尤其是在复杂地理环境下，航空平台的快速投送、高空侦察、垂直起降等特性可有效打破“孤岛型”灾区救援瓶颈。例如，旋翼型直升机可在城市积水区垂直升降，固定翼无人机可承担前沿信息回传任务，提升灾害态势感知能力与指挥调度效率。因此，建立以航空平台为核心支撑的空地一体应急体系，已成为国家灾害响应能力现代化转型的关键支点。

从全球视角来看，航空应急力量已成为衡量国家应急管理水平的一个重要指标之一。美国联邦紧急事务管理局（Federal Emergency Management Agency, FEMA）与海岸警卫队在飓风“卡特里娜”“哈维”等事件中，均依托航空平台实现人员转移与高空监测^[24]。日本自“3·11”大地震以来，持续强化直升机与固定翼机队的灾害救援功能，并设立空中消防与医疗后送专用中队^[24]。相比之下，我国当前航空应急体系建设仍处于“碎片化配置、任务化调动、应急化启动”的初级阶段，缺乏统一调度平台、任务分工机制与常态保障体系，导致航空资源在重大灾害中难以发挥应有效能^[25]。因此，从国家安全体系现代化与灾害治理体系能力提升的战略高度出发，航空应急救援的系统化构建不仅是紧迫的现实需求，更是未来国家应急战略能力的核心环节。

尤其在我国低空空域改革背景下，低空经济已成为国家战略性新兴产业的重要增长极，预计2030年前后我国低空经济年产值有望突破3万亿元人民币^[26]。航空应急救援作为低空经济中最具公共服务性质与社会价值的应用场景之一，在推动低空飞行服务网络构建、推动通航机场布局、促进航空器国产化制造与运营机制创新方面具有明显带动效应。通过构建“任务牵引-机制保障-产业联动”的航空应急救援体系，不仅可提升公共安全服务供给能力，还可激活通用航空产业链条在运输、制造、运营、培训等多环节的发展活力，为我国低空经济发展提供“以用促产、以需带产”的政策牵引与市场空间。

此外，近年来我国部分地区在洪涝灾害中多次尝试使用直升机、高空无

人机等平台开展应急调度与信息采集任务。例如,2021年河南郑州市“7·20”暴雨洪涝灾害事件中,政府部门动用多型航空器实施人员搜救、物资空投,极大缓解了地面通行瘫痪的救援困境。2023年黑龙江鹤岗山洪中,公安与应急部门协同调动多架直升机实施转移任务,成为典型空地协同案例。这些实战经验表明,航空应急平台在极端灾害情境中具备独特的战术与战略价值。然而,我国航空力量仍以军用或政府特批调度为主,缺乏常态化的预案支撑与专业运营机制,亟待从顶层设计到应急流程层面推动航空应急救援力量体系化建设。

(二) 我国航空应急救援发展现状与困境

尽管航空应急救援的潜力巨大,但目前我国航空应急救援在体制和机制层面仍面临诸多发展瓶颈。以下将从体系建设、规章制度、协作机制、信息流通、资源配置、体系建设、预案建设等方面对我国航空应急救援的现状进行分析。

1. 航空应急救援体系不完善 我国航空应急救援体系虽已逐步建设,但整体体系的完善程度远未达到预期^[27]。现有的航空应急力量以军用力量为主,民航和社会力量的参与相对较少。特别是在灾后快速反应和跨区域、跨部门协同方面,我国航空应急救援体系仍存在较大的不足。在实际操作中,各类航空应急力量的协调性差、分工不明确,导致在重大灾害发生时,航空器的配置和调度存在重复与空白的情况。例如,地方政府通常依赖地方航空队伍和军方力量进行应急救援,但由于资源的分散和任务的临时性调度,航空救援任务的响应时间往往无法达到最佳效果。此外,缺乏统一的调度平台和机制,导致航空器和地面力量的配合难度增大,整体效率不高。

2. 相关规章制度不健全 目前,尽管我国已经出台了多项应急管理 with 航空领域的相关政策与文件,如《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确指出,“十四五”期间应“加强和完善航空应急救援体系与能力”。2022年2月《国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知》中更加强调了针对大灾巨灾推进航空应急方式进行灾害应对的战略部署。可见,航空救援在应对突发事件过程中可发挥重要作用,且具有广阔的应用前景。但是,针对航空应急救援的专项法规和制度体系仍不完善。我国的航空应急救援尚未形成系统化的法律框架和

常态化的操作标准，导致在实际应急救援过程中出现“有法不依、执行不力”的问题^[28]。例如，对于低空空域的使用、航空器调配与飞行员调度、航空器维护与保障等方面的具体规定尚不明确，相关法规的执行和监管仍较为薄弱。此外，由于各地区和部门对航空应急救援的理解和执行标准存在差异，不同地区的航空应急救援操作流程往往存在较大的差异，这使得在面对突发大规模灾难时，协调和统一行动成为一大挑战。

3. 政府与社会组织间在航空应急救援中的协作不足 我国各级政府、军队与社会组织的应急救援协调机制尚不成熟，特别是在航空应急救援领域，协同机制的缺失已成为制约救援效率的重要因素^[25]。目前，各级政府对航空应急救援的依赖程度和协作方式存在差异，许多地方政府依赖地方航空公司和应急队伍，但缺乏与国家级航空应急救援体系的有效衔接，导致在大型灾害中，国家级与地方级的应急响应常无法形成有效联动。社会组织的参与度较低，尤其是在民间航空力量的调度与利用方面，社会力量对航空应急救援体系的作用未能得到充分挖掘和发挥^[29]。

此外，地方政府与军方、民航之间的协作机制尚未完全理顺，尤其是在信息共享、资源调配和指令传递等方面的协同效率较低。这种协作不力的局面，不仅影响了航空应急救援的效率，还使得部分灾区的救援工作面临着资源浪费和调度滞后的问题。

4. 应急救援体系中的信息流通障碍 信息流通是应急救援中的核心环节，但在我国航空应急救援体系中，信息流通的效率和透明度存在严重问题。在面对大规模灾害时，信息不畅通、不对称往往导致决策滞后、资源调度失误，影响救援效率。

目前，我国在航空应急救援中的信息流通仍依赖于传统的通信手段，且大多数地区仍未建设完善的应急信息平台，导致在灾害发生初期，实时灾情的收集、分析和反馈较为缓慢^[30]。例如，在一些偏远地区，由于网络通信设施不足，航运救援信息的传递往往受到地理环境的严重制约，致使航空资源无法及时调度到灾区。更为严重的是，航空器与地面指挥中心之间的信息传递不畅，导致飞行任务和地面需求脱节，增加了执行成本和时间。这种信息流通的障碍严重影响了航空应急救援的响应速度和精准度，降低了救援行动的整体效能。

5. 航空器和通航机场资源配置不均 尽管我国民用航空器数量不断增

加，但航空器的配置不均衡、区域性资源分布不合理仍是制约航空应急救援效率的主要问题。特别是在部分偏远地区，航空器数量匮乏，通航机场的建设和运营能力不足，严重影响了航空应急救援的可及性和响应速度。

以中西部地区为例，由于地理位置较为偏远，交通基础设施滞后，民用航空器和直升机的配置普遍不足。一旦发生大规模洪涝灾害或其他突发事件，资源调配困难，航空器难以快速到达灾区，导致应急救援反应不及时。这一问题在低空空域改革的背景下尤为突出，低空经济的迅速发展带来了对航空资源的需求增加，但通航机场的建设却未能同步跟上，造成了航空资源的短缺与不均衡。

6. 空地结合不佳 目前，我国航空应急救援体系中存在空地结合不佳的问题。在灾害救援过程中，航空器与地面救援力量之间的协调常处于低效或无效状态。航空器在提供空中支援的同时，往往缺乏与地面力量的实时信息对接，导致空地协作不紧密，无法高效地调度救援资源，增加了救援的时间成本和操作复杂性^[25]。

例如，在某些突发事件中，地面救援人员未能及时获取空中救援的相关信息，航空器的投放和人员转移任务无法高效完成。未来，航空应急救援的发展将依赖于更紧密的空地协作，必须在信息共享、指令传递、资源调配等方面实现更高效对接。

7. 航空应急救援预案不完善 尽管我国已在部分灾害类型上制定了应急预案，但针对航空应急救援的专门预案依然存在不完善、不系统的问题。很多地区应急预案的设计仍停留在传统地面救援范畴，缺乏将航空救援力量融入其中的有效机制^[31]。现有的应急预案尚未考虑到航空器的资源调度与空地协作，导致在灾难发生时，航空资源的调度与利用效率低下。应急预案的体系化建设是提升航空应急救援能力的基础性工作，必须从国家到地方逐步建立符合实际需求的航空应急救援预案，且还需根据洪涝灾害机制动态调整和完善。

（三）空地结合应急救援模式中应急任务分配与流程衔接的复杂性

特大洪涝灾害“空地一体化”救援模式涉及航空救援与传统陆地救援两种模式，救援任务多、涉及的责任主体广、需求的资源和装备范围大。因此，结合航空救援优势与情景任务需求，构建“空地一体化”应急救援预案的推

演模型,分析两种救援模式的应急任务序列,是完成预案推演的先决条件。此外,在面对特大洪涝灾害时,“空地一体化”应急救援预案中应急任务的流程衔接是评判预案实用性与可操作性的重要依据。虽然可以通过应急演练的方式对预案进行测试与评估,但限于灾害的复杂和多变性,演练实验难以完全真实地呈现突发事件所伴随的各类次生灾害,且仍需耗费大量的人力和物力进行重复性演练。因此,针对特大洪涝灾害的“空地一体化”应急救援预案,构建应急救援的层次任务网络,确定应急主题、厘清任务主体、梳理救援逻辑、构建协同机制进而优化救援流程,是本书拟解决的另一个科学问题。

三、国内外研究与发展动态梳理

本书研究的对象是不同区域地貌特征环境下特大洪涝灾害的航空应急救援机制与能力建设,研究的主题是“情景-任务”决策模式下的航空救援,研究的内容隶属于突发事件应急管理的基础研究领域,涉及公共安全研究中“多因素风险评估和多尺度预测预警”^[32]和“复杂条件下的应急决策”^[33]两大科学问题的交叉融合,是“科学安全”和“精准安全”的直接体现和国家治理体系和治理能力现代化的现实需要。近年来,航空应急救援能力建设逐渐成为一个备受国内外专家学者广泛关注的研究焦点,中国工程院院士刘大响等呼吁尽快制定“国家航空应急救援体系建设总体规划”,加强航空装备、航空基础设施建设,设立国家航空抗灾救援管理机构,加快低空空域开放,发展专业航空应急救援队伍,建设具有中国特色的国家航空应急救援体系^[34]。

1. 从研究方法的角度来看 目前国内外学者大多采用两种方法研究“空地一体化”应急救援机制,一种是归纳法^[35],另一种是计算机仿真建模法^[36, 37]。归纳法主要是通过调研国外航空发达国家的应急救援立法^[38]、组织机构^[39]、运行模式^[40]、救援队伍建设^[41]等方面的经验,博采众家之长,为我国航空应急救援体系建设提供参考。这种方法符合顶层设计的视角,总体研究偏宏观。计算机仿真建模法主要利用数学建模和计算机编程的方法对航空救援和传统救援机制中的物资调配^[42, 43]、中转联运^[44]、装备和任务协同^[45, 46]等核心问题进行多目标规划建模,计算分析不同方案的救援效果。建模仿真方法对场景多样的环境,具有可重复性、参数可调、先期预测的特点,研究偏技术层面,备受研究人员青睐。但仿真模型必须经过历史案例数据的验证或校准,方可应用于实际问题的分析和解决。

2. 从研究内容的角度来看 在航空应急救援体系建设研究层面, 目前我国航空应急救援法规体系整体立法层次较低^[47], 航空应急救援标准覆盖面和内部逻辑链缺失^[48], 航空救援力量“大动脉基本畅通, 而微循环不畅”已经成为制约我国航空应急救援发展的重大桎梏。目前, 世界上航空应急救援主要有三种运行模式: 政府直接参与模式、通航企业救援模式和政府购买航空救援服务模式。我国主要是政府直接参与模式, 航空应急救援不同于一般的准公共物品, 对通航应急救援企业灵活进行财政补偿^[49], 有助于我国航空应急救援体系的建设。应急救援队伍是灾害现场救援的直接实施者, 整合扩充航空救援技术能力, 进行专业化的分级和认定, 建立标准化的训练内容和方法, 是全面提升我国航空应急救援能力的重要保障^[50]。完善立法和行业标准, 建立相应的组织构架和响应机制, 科学编制航空应急救援预案, 重视队伍建设和演练已成为业界共识。在航空协同应急救援任务实现层面, 应急物流是航空应急救援的重点内容。按照时间顺序, 应急物流可分为灾前准备阶段、灾中响应阶段和灾后恢复阶段, 而航空协同应急救援则主要覆盖后两个阶段。灾后响应和恢复阶段的救援任务主要包括应急物资的输送、受灾人员的转运撤离和灾区受损房屋道路的恢复等内容^[51]。研究的核心为多目标组合优化问题, 优化准则包括成本、响应时间、移动距离、覆盖率、可靠性、安全性和公平性等内容。具体研究涵盖了军民联合救援研究^[52], 多周期航空器调度模型^[37], 空地协同应急调度模型^[53, 54], 航空医疗救援研究^[55, 56], 资源调度^[57, 58]和航迹优化^[59, 60]研究等方面的内容。其中, 空地协同应急的横向分流联合调度研究居多, 纵向接力联合调度的研究较少。空中侦察勘测和目标搜救也是航空应急救援的重要内容, 按搜救主体可以分为有人机^[61]、无人机^[62, 63]和有人机-无人机协同搜救^[64, 65], 它们之间最主要的区别在于是否考虑人的信息加工水平和行为决策过程。按搜救主体数量可以分为单机搜救^[66]和多机混合协同搜救^[67]。上述任务协同机制包含了自组织模型、群智模型和市场协调机制等, 具体实现算法包括粒子群和遗传算法、蚁群算法、凸优化算法、分层搜救算法、启发式算法、A*算法等。郑州市“7·20”特大暴雨中翼龙无人机的跨区域长途飞行执行应急通信任务, 使无人机应急通信^[68, 69]再次成为焦点。无人机灵活的飞行能力可以保证航空器在第一时间到达灾区进行勘测活动。应急通信的建立和受灾情况的勘察, 对于应急指挥决策至关重要。而“空地一体化”救援中涉及航空器、

地面保障、指挥调度等多个方面，只有科学合理地动态分配航空救援和陆地救援的应急任务，将上述既有研究内容有机融合，实现应急主体与资源的关联，方可形成高效、快速的“空地一体化”救援模式。

3. 从研究需求的角度来看 近年来以情景构建^[70, 71]和“情景-任务-能力”应急预案编制^[72]为核心的“情景-应对”型突发事件应急管理体系，已经成为普遍认可的科学准则，对于本书的研究主题较为适用。然而，当前我国的应急预案总体上还处于“应急处置方案”阶段，尚未形成实质性应急准备体系^[73]。重大突发事件的情景构建是应急预案中应急准备的先导和基础，通过情景构建理论可以提升风险应对能力。然而，目前鲜有研究在“情景-任务”决策模式中考虑空地结合的救援对突发事件应急救援效率的影响和预案科学性进行评估。此外，在不同地貌特征环境下特大洪涝灾害的情景事件间、事件与环境间存在显著的区别和时空特征，虽然此前对城市内涝中承灾体的损伤概率、灾变过程和救援措施等^[74]方面已进行了充足的研究，但救援方式多为传统陆地救援。随着近年来“空地协同”的模式逐渐得到相关学者的重视，然而，当前针对航空救援因子的贡献度、空地协同应急任务的动态化调整、部门间的技术化联动和分工等方面的研究却仍是相对空白。从顶层设计到联动运行、从预案制定到任务协同等均是需要一一考量的重要科学命题。客观而言，目前尚未有一种模型可以适用于任何应用场景，因此使得研究呈现出理论模型发展日益丰富而实证分析相对匮乏、视角偏宏观、技术模块缺少支撑的态势。从落地指导生产生活的社会实际需求出发，开展复杂地貌特征环境下特大洪涝灾害的空地协同救援的应急预案推演与编制实例研究显得更为迫切。

4. 从研究视角的角度来看 当前国内外研究人员主要关注的是突发事件中航空应急救援资源调配^[75, 76]、多机协同搜救^[77, 78]等主题，针对“空地一体化”协同调度的研究主要侧重于地震等灾害情景下偏远山区的横向联合应急救援模拟分析，鲜有研究从网络系统视角细致地探讨特大洪涝灾害中“空地一体化”救援模式下多主体-多主题-多承灾体-多任务的社会联动应急机制、航空资源的非常规征用与补偿机制、航空参量对特大洪涝灾害演化发展的影响规律和情景预案的模型构建贡献因子、道路瘫痪场景中空地纵向联合调度、无人机实时勘测条件下的应急决策生成理论和动态调整方法等一系列问题。洪涝灾害常导致道路阻塞或道路不通，使受灾人群呈现“面大点多”

的分布特点，部分地区甚至处于失联和瘫痪状态，这对应急救援工作提出了更高更苛刻的要求。因此，需要通过科学的方法来提炼、分析、总结这些规律，构建更加精确可靠的系统化的科学理论模型，用于指导特大洪涝灾害中“空地一体化”应急救援工作与实践势在必行。

已有研究所取得的成果有助于深入理解特大洪涝灾害的应急过程，但仍需进一步扩展，主要体现在以下几个方面：

(1) 不同地貌特征环境下特大洪涝灾害情景演化规律与网络分析模型：从特大洪涝灾害受灾空间看，包含城镇、山区、丘陵、水库等不同地貌特征，而地貌特征的多样性导致应急预案编制过程中的情景演化过程和规律更具复杂性与多变性。但现有研究多集中于城市内涝与山洪泥石流等场景，面对具有多地貌特征的复杂地理环境仍需构建更为详细的情景演化网络，从而更为科学地研判灾害从孕育、发生、发展到终结各个阶段的承灾体状态，并制订响应措施。

(2) “空地一体化”应急救援模式的任务匹配算法及救援流程设计：特大洪涝灾害的“空地一体化”救援模式包含了航空救援与传统陆地救援。既有研究主要集中于传统陆地救援模式，虽然涉及救援技术、责任主体、资源装备等多个方面，然而，鲜有研究针对重特大突发事件构建“空地一体化”应急救援模式的任务匹配算法，进而基于时间序列和逻辑关系设计救援流程。

(3) “空地一体化”应急救援预案的完整性和可操作性评估方法：特大洪涝灾害的“空地一体化”救援子任务复杂且存在多向联系的因果关系，使救援流程的完整性和可操作性极具不确定性。现有研究主要围绕应急预案编制导则中的关键环节部分，采用量化评分的方式进行预案评估，在一定程度上会造成评估指标的缺失和评估结果的不准确。综合考虑“空地一体化”的救援模式和响应流程，提出科学的评估方法是保证预案有效性的先决条件。

四、国际经验对比与启示

美国在洪涝灾害航空救援领域具有成熟的体系和实践经验，主要体现在多层次机构协作、装备体系多样化以及流程标准化等方面。联邦、州与地方三级共同构成应急响应链条，其中FEMA、国民警卫队和海岸警卫队在重大灾害中发挥核心作用，能够迅速实现跨区域资源动员。州政府依托国民警卫队和消防部门开展初期响应，地方政府与社区组织则负责现场救援和群众转

移。这种纵向贯通、横向协同的体制保障了快速动员与高效执行。在装备上，美国配置了直升机以及固定翼运输机、无人机等多层次机型，涵盖搜救、投送与勘察任务。近年来，无人机与传感器的应用显著增强了态势感知，为指挥中心提供实时灾情信息。在流程上，美国形成了较为规范的作业模式，从情报侦察、任务分配到救援复盘均有标准化程序，并注重常态化演练，以提升跨机构协作效率。在德克萨斯洪灾中，联邦与州地方迅速组建联合指挥体系，采用空中搜救与物资空投结合的方式实现快速反应。在制度保障方面，美国依托法律与政策支持，如临时飞行限制制度保障空域安全，跨机构通信协议促进了信息共享，整体呈现出联邦主导、地方协同、多机构联动的格局。

欧洲的洪涝灾害航空救援以跨国协作为显著特征，依托欧盟框架的制度化安排并结合各国实践。欧洲民防机制与rescEU计划推动了资源共享与跨境支援，使航空装备能够在成员国间快速调动。与美国相比，欧洲更强调标准化与跨境协调，建立共同的预警系统与任务规范，以应对跨流域洪灾。德国、荷兰和比利时等低地国家注重堤坝监测、洪水预警和大范围水域救援，无人机与航空遥感被广泛用于水位监测与淹没范围模拟。法国民防直升机队伍承担洪灾应急任务，强化夜间和低能见度条件下的作业能力，同时重视机组的医疗与救援技能。瑞士空中救援组织Rega虽以山地救援为主，但其快速调度与高效协作在山洪事件中也具有示范价值。总体而言，欧洲普遍重视信息化和可视化应用，通过无人机、三维模型与地理信息系统（geographic information system, GIS）技术为决策提供支持，救援流程强调跨部门合作与多级别信息共享。其主要挑战在于国家间制度和语言差异导致的协调难题，虽然欧盟提供统一框架，但跨国调度效率仍有差异。整体上，欧洲展现出跨国合作与科技驱动的特点，航空救援在预警、监测和应急决策中的信息化水平较高。

日本在洪涝灾害航空救援方面的经验表现为制度化程度高、技术信息化强和社会力量参与度大。由于地理与气候因素，日本长期面对台风、暴雨和山洪，因此在《灾害对策基本法》等法律框架下建立了覆盖灾前、灾中与灾后的完整应急体系。国家层面由消防厅、国土交通省和自卫队承担航空救援任务，地方政府在实施中发挥关键作用，两者通过制度机制实现联动。在装备上，日本常规直升机，可在海上与内陆洪涝环境中开展行动。流程上，日本将灾前预警、灾中响应和灾后评估制度化，灾前侧重监测和风险地图绘制，

灾中依托统一指挥平台调度航空与地面资源，灾后则注重经验总结与公众防灾教育。民间力量的参与是日本的另一特征，地方航空公司和私营企业在灾时承担物资投送和医疗运输等任务，形成政府与社会协作的综合救援格局。

总体而言，美国、欧洲和日本在洪涝灾害航空救援方面各具特色：美国强调多层次联动与流程标准化，欧洲突出跨国协作与技术驱动，日本注重制度保障与社会参与。其共性在于建立统一指挥机制、强化态势感知与信息化能力，并通过标准化演练提升效率与安全；差异则表现在资源配置模式、法律制度环境与社会参与程度^[77]。对中国而言，国际经验提供了多方面启示：需建立覆盖中央与地方的统一航空救援指挥体系，确保快速响应与高效调度；加强无人机、遥感与知识图谱等技术的融合应用，提升灾前预警与灾中监测水平；丰富航空装备结构，提升复杂气象条件下的救援能力，并探索两栖飞机等新型机型的应用；通过常态化演练和标准化程序强化跨部门协同；同时鼓励民间与私营力量参与，推动政府与社会的联合行动。吸收与整合这些经验，将有助于中国在情景演化、流程推演、知识图谱和能力仿真等研究成果的基础上，进一步完善“空地一体化”救援体系，提升洪涝灾害航空救援的科学化与智能化水平。