

复杂适应系统理论视角下我国应急 科技系统发展研究

钱洪伟^{1,2} 郭晶¹ 李甜甜³¹

(1. 河南理工大学 应急管理学院; 2. 河南理工大学 应急科学与工程研究中心,
河南 焦作 454000; 3. 天津大学 应急医学研究院, 天津 300072)

【摘要】: 近年来, 我国突发事件呈多发态势, 亟需由强有力应急科技系统支撑的应急产业作为保障。基于应急科技系统的复杂性特征, 从四大主体属性及三大体系架构出发, 对应急科技系统复杂属性进行分析。通过对我国应急科技系统发展历程进行梳理, 运用复杂适应系统理论的刺激反应模型、回声模型、涌现模型, 以新冠肺炎疫情应对为例研究应急科技系统发展机制, 提出应急科技进步促进应急产业长效发展的实践启示。研究发现, 应急科技系统具有复杂适应系统的7个特征, 是典型的复杂适应系统; 在应急科技系统中, 政府、事业单位、应急企业等主体通过自适应行为不断积累经验并革新内部模型; 应急科技系统发展遵循复杂适应系统刺激反应机制、资源交互机制、受限生成机制; 应急科技系统发展历程表明, 其存在并遵循上述发展机制。

【关键词】: 复杂适应系统 应急科技系统 应急产业 应急管理

【中图分类号】: D630.8 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001-7348(2022)17-0019-11

0 引言

近年来, 全球进入洪水、地震、各种流行病等突发事件高发期, 对人民生命和财产安全造成严重威胁。例如, 2019 年暴发的新冠肺炎疫情严重影响社会稳定与经济发展; 我国发生的唐山地震、汶川地震、玉树地震、雅安地震等造成灾难性人员伤亡, 对人员、建筑物、经济社会发展造成不可估量的损失。那么, 应如何最大限度地缓解新冠肺炎疫情对人类生产生活造成的影响? 减轻灾害对人民生命财产造成的威胁? 关键要靠科技。历史经验表明, 只有依靠科学技术, 人类才能从根本上找到战胜疫病的有效解决方案, 疫苗、快速检测设备等科技产品的支撑能够有效缓解新冠肺炎疫情对人民生命安全的威胁。同时, 依靠科技进步是防震减灾事业的根本原则和必由之路, 对地震预测预报技术进行持续探索, 通过对新科技成果的不断运用, 能够在一定程度上减缓地震对人民生命财产安全造成的严重威胁。可见, 重大突发事件预防与应对离不开科技的有效支撑。

目前, 我国应急科技产业正处于起步阶段, 关键核心技术装备缺乏、产品种类不齐全等问题凸显。以防震减灾工作为例, 与发达国家相比, 我国地震科学技术存在明显差距。我国政府和科技部门日益重视应急产品、应急专用装备研发工作, 《国家中

作者简介: 钱洪伟(1979—), 男, 河北沧州人, 博士, 河南理工大学应急管理学院副教授、硕士生导师, 应急科学与工程研究中心主任, 研究方向为应急科技创新、应急技术与管理; 郭晶(1998—), 女, 河南许昌人, 河南理工大学应急管理学院硕士研究生, 研究方向为应急技术与管理; 李甜甜(2000—), 女, 河南驻马店人, 天津大学应急医学研究院硕士研究生, 研究方向为应急技术与管理。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1904210); 中国工程院咨询项目(2020-XZ-3); 河南省科技厅计划项目(202102310304)

期科技发展规划纲要》明确指出：“全面提高突发事件应对能力，必须依靠应急科技和应急产业支撑。”针对新冠肺炎疫情防控，习近平总书记数次强调科技的重要作用，明确指出“最终战胜疫情，关键要靠科技”。

应急科技投入是应对突发事件的重要方式之一，科学技术被认为是推动社会发展的强大力量，在应急管理体系中起强大支撑作用。因此，研究我国应急科技系统发展规律，提升应急产业发展水平，最大限度地降低突发事件造成的危害，是和社会和政府当前面临的主要任务。应急工作发展需要强有力的经济保障，应急产业是为经济发展提供持续保障的动力源，从这个意义上讲，应急工作的落脚点是应急产业，而应急产业发展需要应急科技的支撑。当前，对于应急科技系统结构功能和科学发展理论的探讨亟待深入，借鉴国内外应急科技相关文献非常必要。美国、德国等发达国家已具备完善的应急科技支撑体系，相关学者对应急科技进行了积极探索。Markakis 等^[1]、Chen 等^[2]、Lin 等^[3]、Alsamhi 等^[4]对应急通信技术展开研究，分别介绍了基于 EMYNOS 项目、物联网技术、系留气球技术即时紧急通信服务。关于应急管理系统，Tiberkak 等^[5]提出一种新颖的家庭紧急情况管理系统；Vizvari 等^[6]针对遭受严重地震灾害的大都市设计出一种救灾系统。此外，Zaldivar-Colado 等^[7]、Stewart 等^[8]分别从应急交通技术、急诊医学人工智能技术等角度对应急科技进行研究。

我国在应急领域科研投入持续加大，科研条件、平台建设、团队建设得到快速发展，研究成果较为丰富。游青山等^[9]、陈建国等^[10]、张炜超等^[11]、董炳艳等^[12]、余海燕等^[13]对我国应急科技产业发展现状、趋势、路径和恢复趋势进行了积极探索。关于应急科技体系构建，马颖等^[14]、张海玉等^[15]对应急产业技术支撑、应急科技支撑能力体系构建进行研究；何沙等^[16]、蒋勋等^[17]、周剑等^[18]、钟剑峰等^[19]基于大数据、无人机技术、5G 技术，对应急决策指挥技术、应急通信保障技术进行研究。关于应急科技创新，钱洪伟^[20]、黄恒学^[21]、高小平^[22]、刘一弘等^[23]对我国应急管理创新体系、应急科技创新体系进行探讨。

可以看出，国外应急科技水平较高，为应对突发事件创新性地探究适用于实际操作的应急技术。国内主要对应急科技重要性、应急科技创新体系构建与发展进行探讨，对应急科技系统概念认知、应急科技系统发展机制鲜有关注，而这些基本规律对于应急科技研发和产业化具有重要支撑。因此，本文从复杂适应系统理论 (Complex Adaptive System, 简称 CAS) 视角对我国应急科技系统发展进行研究，通过分析我国应急科技系统的复杂适应性特征，回顾其发展历程，揭示我国应急科技管理基本规律，以期为我国应急科技发展提供决策参考，并为应急企业科技创新提供借鉴。

1 概念界定与理论基础

1.1 应急科技系统概念

我国关于应急产业的研究起步较晚，应急科技系统作为应急产业发展的支撑，学者对其概念的界定尚未形成共识。本文梳理相关文献发现，钟书华^[24]较早对应急科技支撑体系进行研究并作出如下定义：当发生突发性重大灾难时，为及时监测、评估、调动、控制和救助(治理)，政府对科技组织或活动实施的某种制度安排。随后，范维澄等^[25]、黄明解等^[26]、卢文刚(2010)、程芳芳等^[27]基于应急管理实践，从体系建设、内部构成、政策保障措施等角度对应急科技体系进行研究。还有学者认为，应急科技是指在突发事件前、中、后整个周期内，利用应急科技手段研究全面预防和应对的规律和策略。

综合来看，应急科技系统是指为有效应对突发事件，由相互依存、相互影响的应急科技实体要素组成具有应急功能的有机整体，其中应急科技实体要素包括事前预防产品和科技服务体系、事中处置产品和科技服务体系、事后恢复产品和科技服务体系、产业创新体系等。应急科技系统服务于突发事件应对的全过程(预防、准备、响应和恢复)，各阶段不同类型突发事件对应急科技的功能要求不同。

1.2 应急产业

目前，相关部门、学术界从不同角度提出“应急产业”“安全应急产业”“安防产业”“防灾减灾产业”等(闪淳昌, 2011)。

其中，2009 年工信部颁发的《关于加强工业应急管理工作的指导意见》正式提出“应急产业是新兴产业，要加快发展”，并指出应急产业一般是指为预防、处置突发事件而提供产品和服务的活动集合。从政府政策文件对应急产业、安全产业、安全应急产业的定义和发展方向看，安全应急产业属于应急产业范畴(李湖生，2018)，本文统一将其称之为“应急产业”。

1.3 复杂适应系统理论

CAS 理论由 Holland 教授提出，核心思想是适应性造就复杂性，CAS 具有聚集、多样性、非线性、流四大特征，包括内部模型、标识、积木块三大机制。同时，CAS 理论包含一些经典模型，如刺激反应模型反映主体如何与外界环境进行交互，回声模型反映主体之间如何交互与聚集，涌现模型反映如何从低层次主体涌现生成复杂宏观系统。

CAS 理论较早被运用于物理科学领域，随着理论不断完善，随后在诸多领域得到广泛应用(张永安、李晨光，2010)，如产业集群、城市化发展、企业管理领域。CAS 理论在应急管理领域主要应用于协同治理、疫后恢复组织协调机制等研究，尚未用于应急科技系统发展。CAS 理论广泛融合多学科领域，能够转变学科趋于碎片化和专业化的趋势，从而探索出解决实际问题的统一、全面的框架。应急科技系统作为应急管理体系的重要组成部分，基于复杂适应系统理论对其结构功能以及发展规律进行探讨，有助于发挥科技应对突发事件的关键作用。

2 我国应急科技系统：一种复杂适应系统

面对复杂性和国际化突发事件，我国应急科技系统形成从传统应急向智慧应急转变的发展模式，科技系统建设和产业研发方向不断调整。应急科技系统建设需要多主体参与，通过复杂的交互关系推动应急产业发展。

2.1 应急科技系统主体构成

应急科技系统主体包括具有应急产业行动能力的人、相关组织和机构以及参与应急产业活动的人造物等。具体而言，应急科技系统适应性主体由政府、事业单位、应急企业、其它应急机构及社会组织等微观主体构成，如图 1 所示。

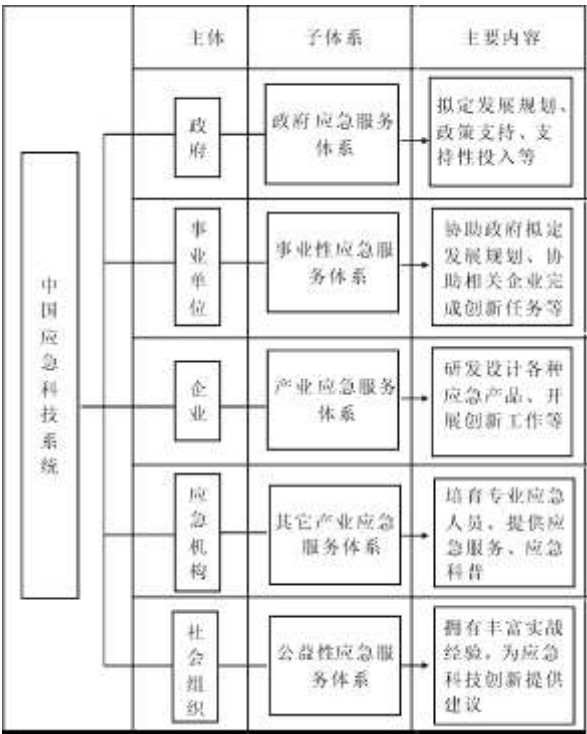


图 1 应急科技系统适应性主体构成

2.2 应急科技系统复杂适应性特征

2.2.1 主体属性

(1) 应急科技系统主体聚集性特征。

据统计,自 2009 年以来我国共建立 11 个国家安全产业示范园区,自 2015 年以来共建设 20 个国家应急产业示范基地(张广泉,2021)。与此同时,在政策导向下,我国应急产业发展聚集性特征趋于明显,大量应急科技要素通过聚集形成长三角、珠三角、西南区域应急科技产业聚集及国家示范基地(尹宗贻,2018)。并且,随着新兴科技的不断发展,以及物联网、大数据、人工智能研究的不断深入,科研院所、科技部门、科技公司等应急科技系统主体积极响应智慧应急政策的号召,从思想上或资源上为应急产业注入较强活力,与其它应急科技主体协同应对突发事件,构成新的应急科技系统化、聚集型主体。可见,应急科技系统具备复杂适应系统主体的聚集性特征。

(2) 应急科技系统各主体之间存在非线性关系。

应急科技产业集群不是简单线性关系发展而成的企业聚集群落,而是具有密切关联的组织网络。比如,很多应急科技企业与政府部门、高校、科研院所存在密切联系。与此同时,集群主体之间往往会开展非线性创新活动,应急科学研究、应急监测、预警等技术创新均是复杂行为,投入与产出之间存在高度不确定性;而且,应急科技产品从设计研发到最终上市销售要经过研发策划、方案设计、设计验证、试生产、批量生产等多个阶段,每个阶段都充满不确定性。伴随着突发事件日益复杂化,影响应急科技产业发展的不确定性因素增多,导致应急科技系统朝着非线性方向发展。因此,应急科技系统具备 CAS 非线性特征。

(3) 应急科技系统各主体间存在要素流。

从我国现有应急产业聚集情况看,徐州、合肥、西安、温州、唐山等应急产业基地建设特点不同。例如,徐州国家安全科技产业园将研发重点放在“感知矿山”的应用上;合肥应急产业集群重点开展信息技术应用;广东佛山率先发展智慧安防、应急救援类产品和信息安全等细分产业。然而,各大产业之间并非相互孤立、彼此竞争的关系,彼此之间存在业务交叉领域。为促进东部沿海地区、中部产业连接轴、西部崛起地区应急科技产业全方位发展,各产业园区之间会积极进行应急人才、技术、资源、信息流的交叉互动。因此,应依托环渤海区域人力资源、技术开发与转化优势,长三角区域经济发达、市场化程度高的优势,珠三角区域高端智能、技术、资金、人才密集等优势,加强各区域优势流互动,发挥各产业园区优势,促进区域应急产业融合与发展。

(4) 应急科技系统具有多样性特征。

具体体现为:①科技诉求多样性。应急管理各个阶段需要不同类型科技设备的支撑,如事前预防阶段的风险感知和风险评估、事发监测预警阶段的信息收集和信息研判、事中处置阶段的应急指挥与联动以及事后恢复阶段的信息统计、灾后评估等都需要应急科技支撑;②主体多样性。从主体结构看,应急科技系统各主体之间以及主体与环境之间的联结形式较为复杂,使应急科技主体呈现结构多样性特征,从主体资源看,系统资源来源渠道和资源类型多样,资源来源渠道涉及政府、非政府组织、企业、学术团体等,资源类型包括资金、人才、信息、应急产品、技术等;③应急产业集群多样性。应急高新技术产业集群、应急文化产业集群、常用设备产业集群所需资金和管理运营方式各不相同。

2.2.2 系统机制

“机制”一词来源于希腊文，最初是指机器构造及运作原理，后来引申为事物的内在工作方式(龚艳萍、陈艳丽，2010)。陶倩等^{[28][28]}基于机制对复杂适应系统进行分析，将复杂适应系统定义为在底层机制的相互作用下不断涌现出的动态机制。

(1) 应急科技系统主体标识。

标识是指主体通过聚集形成系统过程中发挥识别、指引作用的机制，主体通过标识选择互动对象，进而形成有选择的互动，该机制能够解释应急科技产业聚集区的要素流动。应急科技系统主体之间包括以下 5 种标识：①政策标识，即政府出台的应急科技发展总体规划、科技产业结构优化政策，如河北省在 2020 年 3 月印发的《河北省应急产业发展规划(2020—2025)》；②知识标识，即应急科技体系中与应急产业发展相关的科学技术知识。就我国应急科技产业发展而言，专家建议要建立国内外高校、科研机构、企业创新资源，使之与本地应急产业创新发展需求相对接，加强物联网、大数据等高新技术知识在应急产业领域的应用，推动应急产业数字化升级；③产品标识，即以应急预防与准备、应急监测检测、应急通信、应急物流等某一类产品为标识，形成各种资源聚集，如中国地震应急搜救中心研发的 VR 废墟被困自救沉浸体验系统等科技创新成果，充分运用灾害仿真建模与再现技术，生动再现地震发生、灾害形成、应急避险、自救互救、应急救援行动等场景和画面，让观众沉浸于突发灾害环境，牢记应急避险知识与自救技能(陈莉等，2021)；④平台标识，即应急科技系统产业设备创新研发平台。2010 年，我国成立了国家救灾应急装备工程技术研究中心，各省为推动应急管理数字化转型和信息化能力提升也构建了各类创新平台，如浙江省组建的应急管理创新应用和技术支撑平台；⑤技术标识，即在大数据、物联网等高新技术背景下，智慧应急发展所需的专业技术，如我国地震防灾减灾科普充分运用灾害仿真建模与再现技术、实时渲染技术、现代多媒体合成技术、虚拟现实技术等。

(2) 应急科技系统积木块。

积木块与“主体”的作用相似，区别在于主体不能再次拆分而积木块可再次拆分，便于对复杂系统层次问题进行分解。利用这一概念可以封装下一层次的子系统，使其作为整体参与更高层次的互动。结合应急产业的特点，对应急科技系统中的积木块进行分类，提炼应急创新研究、技术转移、成果转化、应用服务、资金保障、政府管理系统^{[29][29]}，各子系统共同具备主体聚集特征，人才、资源等要素流在子系统中不断循环流动。

(3) 内部模型。

内部模型反映主体之间的相互作用，主体通过对事物的预见性判断，对自身互动行为产生适应性变化。面对复杂多变的突发事件，应急科技体系主体内部模型在适应过程中不断完善，各主体在适应性科研活动中可使用内部模型，将其用于组织结构调整和交互方式创新，并形成新的内部模型，如图 2 所示。

由图 2 可知，应急创新研究系统是以政府为主导，以研究院所、高校科研团队为核心，以企业研发团队为技术支撑，在国家应急科研工作部署下，由众多主体广泛参与的具有知识创新、产出创新、技术创新、平台创新等属性的公共管理系统。应急技术转移系统是应急科学技术向生产力转化的关键环节，即在政府宏观指导下，集研究院所、高校等主体的科技资源优势，以物联网等网络化信息系统为支撑，实现跨部门、跨行业、跨地区的应急技术转移系统，有利于加强科研机构、企业、高校之间的合作。应急科技成果转化系统是指基于应急管理实际技术需求，通过多种方式，将应急科技成果从科学研究与技术形态转化为具有实用价值的实践成果。应用服务系统是指科技中介机构凭借自身资源、技术、政策优势，面向从事应急产业的企业开展管理咨询、应急技术创新决策、创新资源配置、应急科技成果评估等专业化服务的综合服务体系。资金保障系统是指以政府为主导、基金会等社会组织参与，提供资金以保障子系统正常运行。政府管理系统是指政府相关部门采取行政或法律手段，指导和规范各应急科研主体的行为。通过政策制定、标准执行，对应急科技系统运行进行监管，助推应急产业发展，完善应急科技系统。

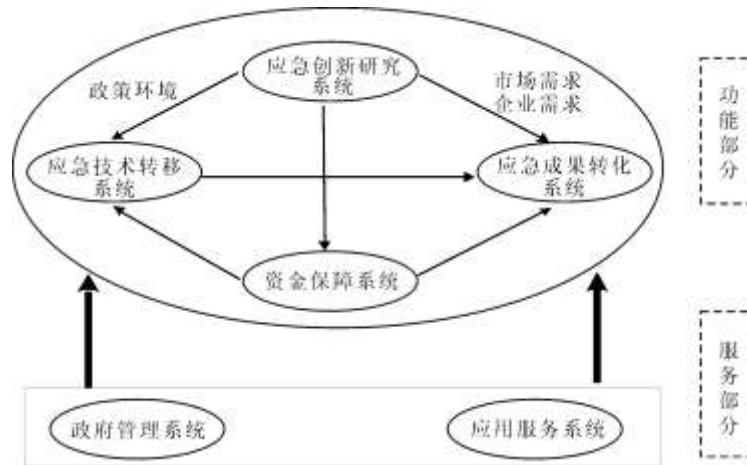


图2 应急科技系统内部模型

综合来看，应急科技系统各子系统之间存在严谨的逻辑关系，政府、科研院所、高校、企业、社会组织等主体是应急科技体系研究的出发点；主体运动表现为主体聚集；人才、资源、技术和信息等要素流是主体之间发挥作用的载体；政策、技术等标识作为重要机制，影响要素流活跃程度和流动方向；通过主体之间的相互聚集以及要素流之间的相互作用达成应急科技系统关于科技诉求、主体、应急产业集群等“多样性”；非线性发展存在于主体聚集、要素流运动、系统多样性运动等过程；对不同应急科技子系统进行封装，构成积木块；内部模型是主体或子系统之间相互作用的行为规则。上述四大特性和三大机制作为认识 CAS 理论的基本概念，对应急科技系统及其发展模式进行研究具有一定启发意义。

3 CAS 理论下我国应急科技发展历程

自非典疫情暴发以来，受到汶川地震、南方雨雪冰冻灾害等突发事件需求的刺激，我国应急科技系统在短时间内得到迅速发展。政府、研发机构、企业等诸多主体在外界突发事件刺激下，通过各类标识的引导进行非线性交互，并形成复杂的交互关系网络，促进应急科技系统不断完善，进而形成独具中国特色的应急科技发展模式。虽说“应急科技”在我国是新兴概念，但是“应急”思想早已存在。早在 2007 年“应急产业”概念提出之前，一些相关行业就取得很大发展，如安全产业、安防产业、紧急救援产业、消防产业。可以说，从 2003 年我国全面建立应急管理体系开始，应急产业的思想与实践已具备雏形。应急科技作为应急产业发展的重要支撑，不断得以延伸和发展，传统产业所涉及的科技均属于应急科技范畴，只是尚未用“应急科技”这一概念统一界定。

因此，本文基于 CAS 理论，结合应急产业政策标识，将我国应急科技系统演化过程划分为萌芽形成阶段、稳步发展阶段和快速成长阶段(宋烜懿, 2018; 赵乃瑄等, 2022), 形成由传统应急向智慧应急逐渐转化的发展模式。此外，本文通过分析高德红外集团发展历程探讨应急科技系统演化发展趋势。

3.1 我国应急科技系统演化萌芽形成阶段(2003—2007 年)

2003—2007 年，我国应急科技系统演化处于萌芽形成阶段。这一阶段，我国应急事业刚刚起步，各部门对突发事件应对准备不充分，亟需应急科技系统的支撑。应急科技系统在一系列政策标识、事件需求的刺激下应运而生，应急企业、应急机构等适性主体也逐渐建立。

2003 年非典疫情暴发后，国家高度重视突发事件应急管理，推动应急科技系统构建。国家颁布一系列政策标识推进应急产

业发展，如 2003 年非典疫情应对中，国务院印发的《突发公共卫生事件应急条例》指出，在处置保障中要加强科研能力及国际合作，通过引进国外技术和装备提高突发公共卫生事件的应对能力；2006 年，国务院发布的《国家突发公共事件总体应急预案》指出要依靠科技支撑，加大对公共安全监测、预警、处置技术的研发；2007 年第十届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议审议通过的《中华人民共和国突发事件应对法》为我国应急事业发展提供了法律依据。这些应急产业支持性文件作为政策标识引导着我国应急科技产业的形成与发展。

从武汉高德红外公司发展历程看，受非典等事件刺激及政策引导，该公司处于起步阶段。该公司于 1999 年正式成立，经过几年发展，在 2003 年阻击非典战役中利用自身技术优势开发红外测温产品，用于商场、车站等人员密集场所发热人群的自动、快速筛查。2006—2008 年，高德公司产品在 H1N1 流感防控、汶川地震等突发事件应对中起到重要作用。这一时期，国内红外热像仪市场仍处于产业发展初期，市场规模较小，系统相对封闭。在非典疫情、H1N1 流感、汶川地震等一系列事件需求的刺激下，高德红外公司陆续参与国防建设，与政府初步产生互动，但产业聚集现象不明显，各红外公司之间竞争激烈，且受资金流、信息流、人才流等制约，该时期公司研发能力不足。

综合来看，这一阶段我国应急科技系统按照一定的结构方式运行，但受科技水平的限制，系统内部能量转化效率较低，参与应急科技研发的研究院所、企业等适应性主体较少，主体效应强度一般，处于初步发展阶段。

3.2 我国应急科技系统演化稳步发展阶段

2008—2017 年，我国应急科技系统演化处于稳步发展阶段。这一阶段，我国应急科技系统适应性主体开始增多，随着一系列政策标识的形成，参与应急科技产业发展的科研企业随之增多，国家大力支持应急关键技术研发，加之各主体信息流、资金流等要素流的支撑，极大程度上推动了应急科技系统演化发展。

一系列突发事件需求刺激及政策标识明确了应急科技产业演化方向。如 2008 年汶川大地震、2010 年玉树地震、2012 年松花江透水事件等突发事件的发生，凸显出我国在突发事件应急管理方面的不足，形成事件需求刺激，促进应急科技产业发展。此外，2009 年国家工业和信息化部《关于加强工业应急管理的指导意见》首次明确应急产业发展重点。2014 年，国务院办公厅出台《关于加快应急产业发展的意见》，其中对应急工作发展任务与方向、关键技术突破等提出具体要求。2017 年，国家工业和信息化部发布《应急产业培育与发展行动计划(2017—2019)年》，指出到 2019 年力争建成应急物资生产能力储备库 30 个左右，在 20 多个重要领域完成应急产品和服务综合应用处理方法，培育约 10 家具有关键竞争力的大规模企业。在政策标识引导下，越来越多的企业把应急产品研发和创新作为业务重点。在复杂环境中，单个企业往往不能很好地适应环境变化，企业为维持生存与发展，在进攻防御标识、粘着机制、条件交换机制等作用下，与科研院所、高校等其它主体建立合作关系，形成聚集体，采取分工合作、各取所需的模式提升自身市场竞争力，应急科技系统呈集聚化发展态势。

这一时期，高德红外公司面临技术突破与转型。2012 年，随着市场和工业客户的扩大，红外产品深入到生产生活的各个领域，高德红外公司不断拓展研发范围，以红外热像研发为核心，将产业链向上游综合光电系统、下游基础工业及核心元件延伸，打造了红外行业国际知名、国内领导企业的市场形象。2013 年，红外热成像产业化基地正式投入运行，实现探测器国产化，打破了国外技术封锁。2016 年，公司紧抓红外热成像产业快速发展和军民融合政策机遇，不断加大研发投入力度，研发投入占营业收入比例高达 27.5%，依托红外焦平面探测器产业化带动政府装备产业朝着高端化、系统化和集成化方向发展。同时，公司积极与政府、企业等主体产生互动，构建军民并进发展态势，主体之间持续进行资金流、信息流、人才流互动，推动红外热成像技术在民用产品领域普及应用，多主体协同参与为产业发展带来一定的复杂性和多样性。

3.3 我国应急科技系统演化快速成长阶段(2018 至今)

2018 年以来，我国应急科技系统演化进入快速成长阶段。2018 年，应急管理部的成立给应急科技产业发展带来新机遇。2019

年国家发展和改革委员会颁布的《产业结构调整指导目录(征求意见稿)》鼓励支持有关投资、科研计划中的应急产品和服务。在一系列政策标识的引导下,为更好地适应复杂环境,我国已成功建立长三角区域、珠三角区域、西南区域等应急科技产业聚集区,由低层次单个主体跃升至较高层次聚集体。聚集体集产品研发、生产、学术、创新于一体,拥有强大的环境适应性,能够高效应对来自外界的各种刺激与挑战。此外,随着社会的不断进步,互联网+、大数据、人工智能技术迅速发展。应急科技总探测器将接收到的刺激反应压缩为信息流,在各种规则集的作用下,各主体将智能化技术与应急工作相结合,提出“智慧应急”理念,激励许多应急企业、科研机构等进行新一轮应急产品创新,将应急科技推向智能化、无人化、高端化。

这一时期,高德红外公司产业链逐渐发展至成熟阶段,技术创新不断突破。该公司利用先进的国外红外技术进行技术创新,在国内率先建立信息中心、研发设计网络中心,构建完善的红外产业链。在技术创新战略布局中,高德红外极为重视寻找世界领先的科学技术,与国内核心技术团队组建战略联盟,积极收集民营市场需求信息,有针对性地为市场提供所需红外产品。在人才培养方面,高德红外积极与高校、科研院所开展合作,定向培养红外领域专业人才,长期聘请行业领先的技术和专业管理人员,定期举办内部交流和外部培训。在此阶段,产业集聚现象明显,众多主体高效互动形成红外技术研发联盟,在军品市场和民品市场全面发展,市场敏感度不断提升。另外,政策环境、应急产业市场机遇的优化以及多主体间交互也给应急科技系统带来新能量,在智慧应急背景下,系统结构和层次不断改善,成功实现质的飞跃。

4 我国应急科技系统发展机制

依据上述分析可知,应急科技系统是一个复杂系统。应急科技系统发展机制是指复杂系统中的各类主体在自适应、自学习过程中,通过不断积累学习经验而形成的能够有效应对各类外界刺激的规则集合,其同样具备应急科技系统的复杂性、适应性特征。本文借助 CAS 理论的刺激—反应模型、回声模型、受限生产涌现模型,深入分析应急科技系统中各主体如何与外界交互、主体之间如何交互与聚集、各子系统如何涌现形成复杂宏观的应急科技系统,揭示我国应急科技系统作用机制。

4.1 刺激—反应机制

受突发事件需求的刺激,应急科技系统逐渐产生适应性行为,各子系统根据应急实际需求不断调整自身行为,应急科技系统发展和应急产业产出是各适应性主体面对突发事件不断进行刺激—反应活动的多级循环过程。因此,刺激—反应模型可用于分析应急科技系统中主体集成内在运行机制。刺激—反应模型能够反映主体与外界环境进行交互时的基本行为。主体与环境交互是指主体对接受的各种刺激进行信息处理的过程,其中信息处理的关键是执行系统,执行系统由相互作用的效应器、规则集、探测器构成,如图 3 所示。

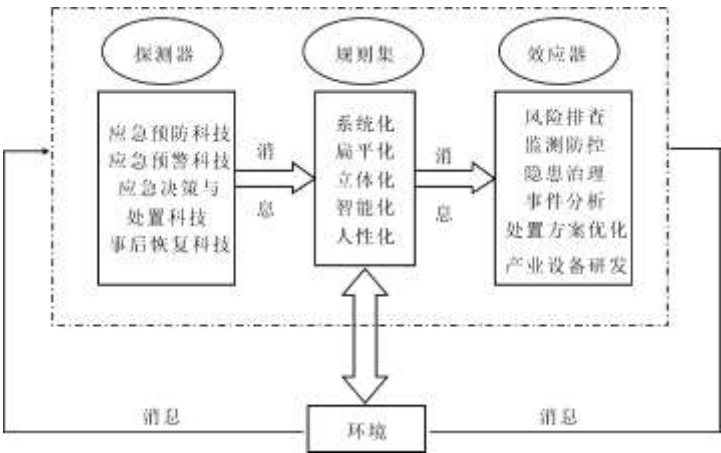


图 3 我国应急科技系统刺激反应机制

探测器感知到突发事件应急科技需求相关信息，基于应急管理全过程理论，探测器获取到的应急科技需求刺激主要涉及应急预防阶段、预警阶段、决策与处置阶段及事后恢复阶段的科技需求。具体来说：①感知应急预防阶段的科技需求能够加强预测分析模型以及方法、技术研究，促进应急预防阶段设备、平台等科技产出；②感知应急预警阶段的科技需求能够改进和提高监测预警技术水平，加强综合预警系统研究，提高突发事件预警防范能力；③感知应急决策与处置阶段的科技需求有利于集成应急技术，推动应急指挥平台构建，借助应急科技提升政府突发事件决策指挥能力；④感知事后恢复科技需求能够强化灾后评估技术研究与灾后损失评估，加快先进机械设备研发，促进灾后各项工作的恢复与开展。

探测器能够把获取的刺激转化为信息流，进一步传递给规则集，主体将按照系统规则对信息进行处理。其中，规则集包括系统化规则、扁平化规则、立体化规则、智能化规则、人性化规则。应急科技系统规则集对信息进行分析处理后，将指令传递给效应器，被指令激活的效应器会采取相应行动，并对环境产生作用。应急科技系统效应器包含风险排查、监测防控、隐患治理、事件分析、处置方案优化、产业设备研发六大响应机制。效应器的响应行为会作用于环境，将新的应急科技产业、装备需求反馈给应急科技系统探测器，开展新一轮应急科技产业、装备循环，直至研发出符合应急管理实际需求的应急科技装备，使应急突发事件得到高效处置。

在我国应急科技系统中，地震、雨雪冰冻灾害、旱灾、洪涝灾害、重大传染病等突发事件均会对应急科技产业形成事件需求刺激。以新冠肺炎疫情这一突发公共卫生事件为例，应急科技系统存在并遵循刺激—反应机制。在探测器层面，应急创新研究子系统中科研型企业、科研院所、高校科研团队等主体积极查找传染源、传播途径，及时确定疫苗或其它应急资源研发方向，政府管理子系统公开疫情防控信息，保障信息的时效性和准确性，并进行疫情防控知识科普，制定有效可行的疫情防控政策。在规则集方面，应急技术转移子系统、应急科技成果转化子系统、应急创新研究子系统遵循以实战为指引、明确结果导向、注重创新产出等规则开展疫苗科技研发攻关。在效应器层面，政府管理子系统迅速在国家层面开展应急科技研发，进行病毒溯源、检测、疫苗研发等部署；资金保障子系统、应用服务子系统借助资金、信息资源优势，为病毒源头追溯和应急创新研究子系统检测方法研究、中药防治、疫苗研发等科研行为提供资金保障。

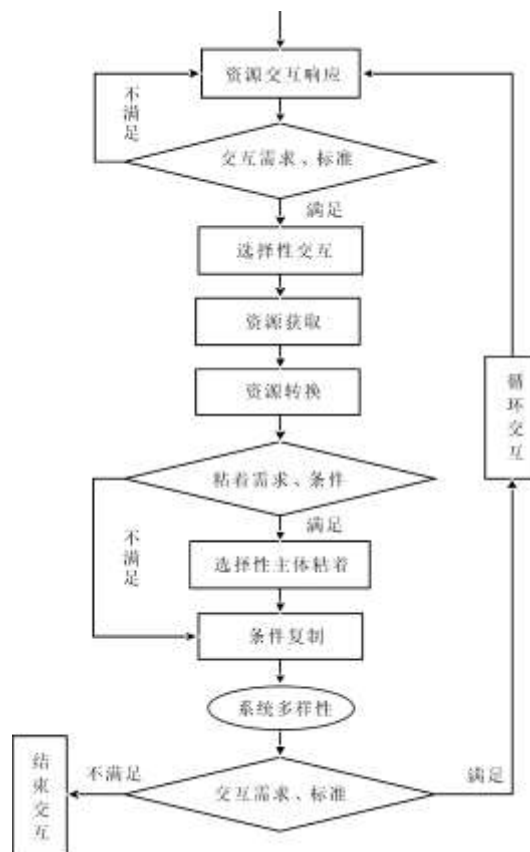


图 4 我国应急科技系统资源交互模型

4.2 资源交互机制

应急科技系统各主体以及主体与外部环境之间进行多种多样的资源交互，保障应急科技系统及应急产业发展所需资源合理、高效地使用。本文基于回声模型分析应急科技系统中的资源交互模式，基本回声模型包括进攻标识、防御标识、资源库等机制。在该模型中，多主体之间通过匹配交换资源，并进行资源存储加工，当资源足够时，会产生新的主体。由于系统行为的复杂性，基本回声模型不能对其进行全面描述，因此霍兰教授在 1995 年对回声模型进行扩展，增加条件复制、资源变换、学习和创新等多种机制。参考已有文献，本研究认为，应急科技系统回声模型主要包括以下内容：选择性交互、资源获取、资源转换、选择性主体粘着、条件复制和循环交互，如图 4 所示^{[30][30]}。

具体而言：①选择性交互：各主体根据应急预防、预警、决策与处置及事后恢复阶段的多样性科技需求，与其它主体开展人才、信息、资金等资源交互；②资源获取：在资源交互的基础上，根据各主体特征确定需要获取资源的数量、形式、渠道和类型；③资源转换：在获得所需资源后，各主体结合自身优势转换所获得的资源；④选择性主体粘着：主体根据相关资源需求以及交互区域等条件选择下一步合作主体并粘着在一起，多个主体选择性粘着形成新聚合体，以团队形式创新应急成果，或形成跨专业、跨国界应急产业；⑤条件复制：受资源数量、科技成果研发时间等制约，应急科技系统中各主体资源存在允许或禁止交互两种状态，当资源处于允许交互状态时，会促进资源交互和科技成果研发，相关科技成果复制以及迭代发展会形成应急产业多样性；⑥循环交互：各主体与环境之间不断进行资源交互，满足相关条件可决定交互行为是否继续。

以新冠肺炎疫情应对为例，在应对过程中应急科技体系遵循资源交互机制。应急创新研究子系统中科研型企业、科研院所、高校科研团队等主体根据疫情工作需要选取资源交互主体，进行资源分享与互动；根据各类型主体的科研特点、疫情环境、科研进展等条件确定系统如何获取资源，资金保障子系统、应用服务子系统提供信息、资金、技术、政策等资源；基于各主体不同的科研目标及科研成果产出去向等因素转换所获得的研发资源；与其它主体进行成果产出合作，在疫苗研发过程中组建跨领域、跨行业科研力量；各国家基于自身新冠肺炎疫情环境及资源状态，各主体基于自身优势开展针对性科研攻关，促进科研产出多元化；随着科研工作的稳步推进，各主体间依旧存在资源交互行为。我国自新冠肺炎疫情出现以来，各地积极整合区域内应急科研力量，努力实现跨领域、多学科协同攻关，加强科技研发工作与临床应用合作，如福建立项支持厦门大学新冠肺炎疫苗科研项目；北京对各方资源进行整合，支持公共卫生重点实验室建设，加快应急药物研制及设备研发，提高科研效率。以上案例表明，在突发事件应对过程中，应急科技系统存在并遵循资源交互机制。

4.3 受限生成机制

涌现是复杂适应系统的一个重要特征，是主体之间进行非线性交互、粘着、耦合从而形成高层次聚集体的过程。应急科技系统作为复杂适应系统，多主体积极协作，促进应急产业发展，进行高新应急装备研发，规模不断扩大、结构趋于复杂、功能持续增加，各子系统间较为复杂的非线性作用促进涌现现象的产生，如图 5 所示。

受限生成过程模型(Constrained Generating Procedures, 简称 CGP)是研究涌现现象的基础模型。CGP 模型的核心思想为：复杂系统由相互制约的基本要素组成，其制约关系减少了复杂系统的可能状态集，而系统发展过程就是状态演化过程(王宇星等，2019)。CGP 一般性过程体现在：①主体会在其它主体或环境发生变化时自动匹配变化标志，考察其它主体的反应，通过适应性学习，依靠积累的适应性学习机制给出适应性期望，即主体能够根据已有信息对未来进行预测，形成决策判断，并适时调整自身行为；②主体在模拟环节要先判断基本要素的初始状态，然后根据一些简单规则(if-then 规则)生成自适应集，并在可能情况中选取最佳结果，从而给出回声反馈。

在复杂系统中，不同主体的自适应性行为表现出一致性，本文把这种现象称之为主体间趋同效应。在这种效应的作用下，各

主体交互影响，开展类似的适应性活动，之后各涌现现象之间通过相互影响进行类似活动，并在主体非线性作用下向更高层次涌现跃升。以此类推，在涌现层次不断跃升过程中，系统整体逐渐呈现巨大、复杂的涌现现象。

综上所述，在应急科技这一复杂系统中，当企业、政府等主体感受到外部环境变化时，会基于 CGP 模型进行自适应活动，即主体内部进化。由于主体之间的趋同效应，同一层次各主体在非线性交互作用下形成涌现，由简单的主体层次跃升至低层次应急科技产业集群；涌现之间通过相互影响，由低层次应急科技集群向高层次跨区域应急科技产业集群（珠三角地区、长三角地区等）层次跃升；位于高层次的主体在趋同效应和主体间非线性机制的作用下，迭代涌现形成宏观复杂应急科技系统，如图 5 所示。涌现现象发生后，整体具有原始主体所不具备的功能和特征，表现为更复杂的结构，且具有不可还原性。即如果对涌现生成的整体进行拆分，虽然在结构上还原为原始主体，但整体具有的复杂特征将不复存在（李明睿，2018）。

新冠肺炎疫情背景下，在事件发展不同阶段、不同环境下，应急创新研究子系统、应急技术转移子系统、应急科技成果转化子系统中各主体研发重点、研发方案、所需资源、研究方法等根据疫情发展不断变化；在趋同效应下，各主体间的交互影响促进相似主体适应性学习行为的产生。各主体在经验、优势、资源等方面的差异在趋同效应作用下逐渐形成应急科技系统的高级涌现。在新冠肺炎疫情防控过程中，对相关药物、技术、设备等的需求不断更新，应急科技各子系统形成迭代涌现。我国在新冠肺炎疫情发生之后迅速成立新型冠状病毒联防联控工作机制科研攻关小组，由上海药物所、武汉病毒所等多家单位构成联合攻关力量，在快速诊断技术、诊疗模式等多个方面开展科技攻关，为科技“战役”作出重要贡献。由此可见，新冠肺炎疫情背景下，应急科技体系存在并遵循受限生成机制的主体趋同效应。

5 我国应急科技进步促进应急产业发展的实践启示

在我国应急产业发展道路上，应急科学是基础，为应急产业发展提供科学支撑；应急技术是关键，为应急产品研创提供技术支撑（钱洪伟，2019）。近年来，我国应急科技事业在国家高度重视下虽然取得较好成效，但在监测预警、应急救援等方面仍存在部分亟需攻关的“卡脖子”技术（王久平，2021）。关键核心技术是衡量应急科技实力的标尺，只有掌握关键核心技术，才能高效应对突发事件。本文基于 CAS 理论，探讨应急科技系统发展机制和发展历程，得到如下实践启示：

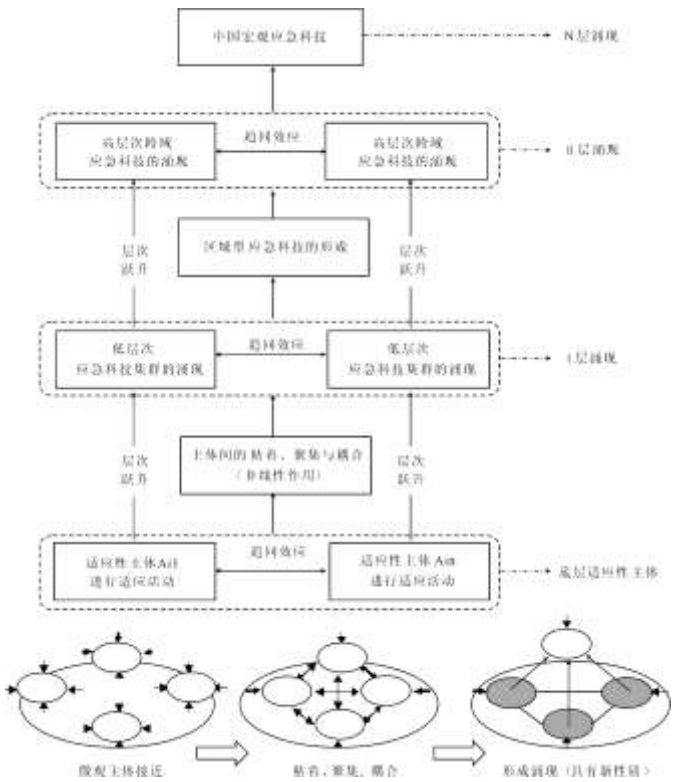


图 5 我国应急科技系统受限生成机制

(1)加强应急核心技术研发，加强应急关键技术攻关。

依据突发事件各阶段应急科技的实际需要，基于应急科技系统刺激反应机制，加大应急科研投入，促进应急科技系统资源共享，提高各主体应急技术创新能力。

(2)加大应急人才培养力度，适应智慧应急发展。

应急人才数量和质量决定应急科技产业发展。在智慧应急背景下，人工智能、无人机技术、大数据技术等新兴技术要与应急产业发展相结合，把应急产品、应急服务推向智能化、无人化、高端化，培养一批应急科技创新人才。应急科技系统可以依托各主体资源密集、资源交互优势，推动产学研合作，促进应急创新人才培养和输出。

(3)完善应急科研成果转化系统，解决转化过程中的信息不对称问题。

随着智慧应急模式发展，信息和数据成为应急产业发展不容忽视的资源。因此，应借助应急科技产业示范园区和信息网络建设，建立并推动应急科研成果转化长效机制，优化应急科研成果转化模式。

6 结语

本文基于 CAS 理论，从四大主体属性及三大系统架构出发对我国应急科技系统复杂属性进行分析，提出我国应急科技系统是一个复杂适应系统，涵盖政府、事业单位、企业等众多适应性主体，通过政策、知识、产品、平台、技术 5 大标识进行聚集，根据环境变化不断适应学习，进行人才、资源、技术、信息等要素流交互。基于 CAS 理论的 3 个模型，对中国应急科技系统发展机制进行研究。应急科技发展主要经历萌芽形成期、稳定发展期和快速成长期，逐渐形成宏观复杂的应急科技系统，由传统应急向智慧应急转变。我国应急科技体系发展存在刺激反应机制、资源交互机制、受限生成三大核心运行机制，并以新冠肺炎疫情应对为例，论证重大突发事件背景下应急科技系统遵循的三大机制。基于应急科技系统 CAS 理论分析，提出应急科技系统发展的实践启示。根据突发事件应急科技需要，推进应急核心技术研发，加大应急科技领军人才培养力度，完善应急科研成果转化系统，完善应急科研成果转化长效机制，促进应急产业发展。

参考文献:

- [1]MARKAKIS E K,LYKOURGIOTIS A,POLITIS I.EMYNOS:next generation emergency communication[J].IEEE Communications Magazine,2017,55(1):139-145.
- [2]CHEN L W,CHUNG J J.Mobility-aware and congestion-relieved dedicated path planning for group-based emergency guiding based on internet of things technologies[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2017,18(9):2453-2466.
- [3]LIN C H,HSIEH C,CHI C H.Hospital emergency management of emerging infectious disease using instant communication technology[J].Prehospital and Disaster Medicine,2020,35(4):473-473.
- [4]ALSAMHI S H,ALMALKI F A,MA O U.Performance optimization of tethered balloon technology for public safety and emergency communications[J].Telecommunication Systems,2019,75(2):235-244.

-
- [5]TIBERKAK A, LEMLOUMA T, BELKHIR A. A novel approach for generic home emergency management and remote monitoring[J]. Software: Practice and Experience, 2018, 48(4):761-774.
- [6]VIZVARI B, GOLABI M, NEDJATI A. Top-down approach to design the relief system in a metropolitan city using UAV technology, part I: the first 48 h[J]. Natural Hazards, 2019, 99(1):571-597.
- [7]ZALDIVAR-COLADO A, TRIPP-BARBA C, BRITO-ROJAS J A. Management of traffic lights for emergency services[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2017, 24(2):643-648.
- [8]STEWART J, SPRIVULIS P, DWIVEDI G. Artificial intelligence and machine learning in emergency medicine[J]. Emergency medicine Australasia, 2018, 30(6):870-874.
- [9]游青山, 苟怡, 孙中光. 矿井安全监控备用电源系统发展现状及趋势[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6):223-225, 229.
- [10]陈建国, 赵秀娟, 范维澄. 中国公共安全科技发展及其在澳门的应用实践[J]. 科技导报, 2019, 37(23):17-24.
- [11]张炜超, 郭安宁, 孙昱, 等. 现阶段我国地震应急技术框架分析及评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11):107-112.
- [12]董炳艳, 张自强, 徐兰军, 等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11):1-25.
- [13]余海燕, 沈桂龙, 余嘉勉. 后疫情时代产业链发展的趋势与应急管理[J]. 党政研究, 2021, 37(3):121-128.
- [14]马颖, 谢莹莹, 吴陈. 我国应急产业发展的技术支撑能力评价研究[J]. 科学学研究, 2018, 36(3):464-473.
- [15]张海玉, 王新政, 许如意. 应急管理科技支撑能力体系构建及模糊综合评价研究[J]. 科技和产业, 2020, 20(10):121-126.
- [16]何沙, 胡尧, 王林元, 等. 基于大数据技术的应急决策指挥体系构建——以中国国际石油合作突发事件为例[J]. 科技管理研究, 2017, 37(3):163-168.
- [17]蒋勋, 张志祥, 朱晓峰, 等. 大数据驱动智库应急决策的情报架构[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(8):25-32, 16.
- [18]周剑, 贾金岩, 张震, 等. 面向应急保障的 5G 网联无人机关键技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(4):511-518.
- [19]钟剑峰, 王红军. 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信技术[J]. 电讯技术, 2020, 60(11):1290-1296.
- [20]钱洪伟. 探索应急科技创新体系应对应急科技发展挑战[N]. 中国社会科学报, 2020-04-21(007).
- [21]黄恒学. 创新和完善我国应急管理体系的若干思考[J]. 人民论坛, 2020, 29(26):67-69.
- [22]高小平. 党的理论创新引领应急管理体系和能力现代化[J]. 公共管理与政策评论, 2021, 10(3):4-12.

-
- [23]刘一弘,高小平.新中国70周年应急管理制度创新[J].甘肃行政学院学报,2019(4):4-13,124.
- [24]钟书华.国家应急科技支撑体系框架构想[J].中国科技论坛,2004,20(5):33-36.
- [25]范维澄,翁文国,张志.国家公共安全和应急管理科技支撑体系建设的思考和建议[J].中国应急管理,2008,2(4):22-25.
- [26]黄明解,梁竞艳,陈汉梅,等.湖北省突发公共事件应急科技支撑体系建设研究[J].科技创业月刊,2008,22(1):12-14.
- [27]程芳芳,纪家琪,王声湧,等.突发事件应急管理科技支撑体系的研究[J].河南理工大学学报(社会科学版),2011,12(1):58-62.
- [28]陶倩,徐福缘.基于机制的复杂适应系统建模[J].计算机应用研究,2008,25(5):1396-1399.
- [29]郭翔.应急产业科技支撑体系构成与功能设计研究[J].科技进步与对策,2014,31(13):45-49.
- [30]惠娟,谭清美.重大突发公共卫生事件科技研发应急体系运行机制研究[J].科技进步与对策,2020,37(9):11-20.