

中文引用格式:路禹轩,杨春,韩梦,等. 事故致因“2-4”模型的传播与学术影响力研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(3):49-57.
英文引用格式:LU Yuxuan, YANG Chun, HAN Meng, et al. Study on dissemination and academic influence of 24Model[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 49-57.

事故致因“2-4”模型的传播与学术影响力研究^{*}

路禹轩¹, 杨春², 韩梦¹, 袁晨辉¹, 赵金坤¹, 解学才^{**3}

(1 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083; 2 华润电力技术研究院有限公司,广东 深圳 518001; 3 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

中图分类号:X913 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.1165

基金项目:国家自然科学基金资助(72204139);广西壮族自治区重点研发计划(桂科 AB23026055);山西汾西矿业集团水峪煤业有限公司科技项目(SJZBFX03020024F201V38)。

【摘要】 事故致因“2-4”模型(24Model)作为中国原创的系统性事故致因理论,自2005年以来,在国内安全领域得到广泛应用,但缺乏对其理论与应用趋势的综述研究。基于系统文献综述和元分析报告项目指南(PRISMA)框架,进行系统检索与分层筛选,采用范围性综述方法对筛选出的357篇中英文文献进行结构化编码与数据采集,并开展交叉分析及卡方检验等数据分析。结果表明:对24Model的研究呈现持续增长态势,并开始在世界范围内传播;应用领域从煤矿行业向化工等复杂系统行业拓展;应用模式实现从定性分析向定量建模、从事后分析向事前预防、从传统方法向数智化技术的转变;系统性模型在第5、6版中得到发展和完善,为复杂系统安全分析提供了新的理论框架,并建议24Model未来可在模型系统性理论深化、预防性应用创新、数智化技术融合等方向持续开展研究。

【关键词】 事故致因; “2-4”模型(24Model); 事故分析; 数智化应用; 风险辨识

Study on dissemination and academic influence of 24Model

LU Yuxuan¹, YANG Chun², HAN Meng¹, YUAN Chenhui¹, ZHAO Jinkun¹, XIE Xuecai³

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2 China Resources Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518001, China; 3 School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The 24Model, as an original and systematic accident causation theory in China, has been widely applied in the field of safety science since 2005. However, a comprehensive review of its theoretical development and application trends is still lacking. A systematic search and stratified screening were conducted based on the preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) framework. A scoping review approach was employed to perform structured coding and data extraction from the 357 screened Chinese- and English-language publications. Subsequently, data analyses, including

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)03-0049-09; 收稿日期:2025-10-23; 修稿日期:2026-01-08

^{**} 通信作者:解学才(1989—),男,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事事故致因理论研究。E-mail: xiexuecai1989@126.com。

cross-tabulation analysis and chi-square tests, were carried out. The results indicate that research on the 24Model has shown a sustained growth trend and has begun to disseminate globally. Its application domains have expanded from the coal mining industry to complex system industries such as the chemical sector. In addition, application paradigms have evolved from qualitative analysis to quantitative modeling, from post-accident analysis to proactive prevention, and from traditional analytical approaches to digital and intelligent technologies. The systematic model has been further developed and refined in the fifth and sixth editions, providing a new theoretical framework for safety analysis in complex systems. This study suggests that future research on the 24Model may continue to focus on deepening its systematic theoretical foundations, innovating preventive applications, and integrating digital and intelligent technologies.

Keywords: accident causation; "2-4" model(24Model); accident analysis; digital and intelligent applications; risk identification

0 引言

事故致因理论作为安全科学的基础理论框架,能够系统阐释事故产生与发展的内在机制,并经过长期实践验证,具备坚实的理论基础和应用价值^[1]。事故致因“2-4”模型(24Model)兼具线性事故致因理论清晰的模块划分及逻辑结构和系统性事故致因理论整体性、关联性、层次性、动态性的特点^[2],在中国得到了广泛的讨论与研究。24Model已成功应用于煤矿、建筑、化工、交通^[3-6]等多个领域。特别值得关注的是,24Model还开发了配套的实践应用工具,包括安全文化在线测评系统^[7]、事故案例培训系统^[8]等,形成了从理论研究到实践应用的完整的理论应用体系。因此,有必要对其传播情况与学术影响力进行深入研究和讨论。

文献调研显示,仅有 WU Yali 等^[8]曾对 24Model 进行过综述研究。然而,该研究主要聚焦于版本迭代差异及模型在事故分析、安全培训、安全文化测量等领域的应用介绍,存在以下局限:①缺乏系统性的文献检索策略;②研究范围仅覆盖至 2022 年,未能包含最新版本的有关成果;③缺乏基于时间维度的量化分析来揭示理论发展规律与应用趋势。

因此,笔者拟对 24Model 开展跨领域范围性综述,通过全面梳理中英文研究成果,构建其发展历程的描述性框架,并结合时间维度的量化分析深入剖析模型在不同行业的应用特征,进而评估其理论贡献、学术价值与创新特性,揭示未来发展趋势,以期全面理解 24Model 提供系统的理论参考——既为初涉该领域者铺设探索的起点,也为资深研究者指明深化研究的方向。

1 24Model 简介

傅贵团队吸纳多米诺骨牌模型^[9]、瑞士奶酪模型^[10]、MMOS 模型^[11]的逻辑结构,建立了以组织为研究范围、以事件为研究对象、定义明确、模块化分类清晰的 24Model。从 2005 年开始,该模型先后经历了 6 个版本的发展^[12]。模型中的“2”代表组织和个体 2 个行为层面,“4”指直接原因、间接原因、根本原因和根源原因 4 个递进层级,形成了完整的事 故致因分析框架^[8],如图 1 所示。

24Model 明确定义了各层级原因的具体内容和判定标准^[13],在直接原因层面,不再区分不安全动作与不安全物态,进一步细分为违章、不违章但曾引发事故、不违章未引发事故但高风险 3 个子类别;在间接原因层面,将个体安全能力分解为安全知识、安全意识、安全习惯、安全心理、安全生理 5 个维度,为精准识别能力缺欠提供了科学依据;在根本原因层面,参照职业健康安全管理体系标准,将安全管理体系缺欠细化为安全方针、组织结构、程序文件等具体缺欠类型;在根源原因层面,将安全文化细化为 32 个可量化评估的文化元素,用于解决文化因素描述过于抽象的问题。



图 1 第 6 版 24Model 静态结构^[14]
Fig. 1 Static structure of 24Model (6th Edition)

24Model 认为,安全文化、管理体系、安全能力、安全动作 4 个因素,决定了组织的一切事项和运转。事故和事件的发生实际上是 4 个因素间复杂的、非

线性的作用关系。24Model 也是一个行为演化系统,如图 2 所示。在特定时刻,组织的文化水平、管理体系状况、个体能力水平和个体行为状况都是确定的,它们之间存在大致的线性决定关系,这构成了 24Model 静态结构的另一种理论来源。

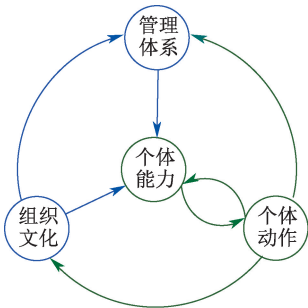


图 2 第 6 版 24Model 的动态结构^[14]

Fig. 2 Dynamic structure of 24Model (6th Edition)

2 24Model 相关的范围性文献综述方法

基于系统文献综述和元分析报告项目指南 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses, PRISMA)^[15],对 24Model 相关的所有研究文献进行综述。文献检索时间设置为 2013 年 1 月—2025 年 6 月(下文中所注 2025 年均指代该时间节点)。选取范围综述的研究方法,图 3 为确定综述文献的具体过程。

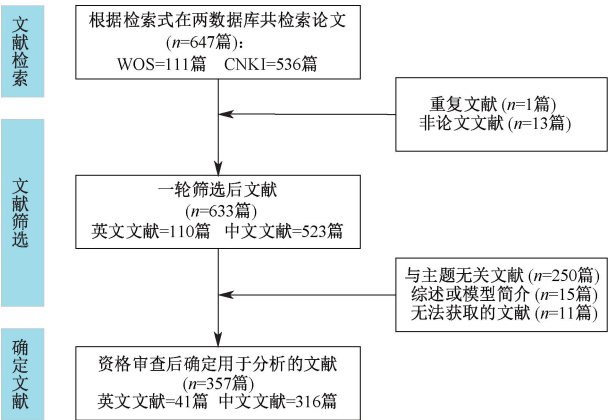


图 3 文献检索流程

Fig. 3 Literature retrieval flow chart

2.1 文献选取过程

2.1.1 检索目标文献

检索目标文献具体分为确定检索数据库和检索式 2 部分。在数据库选择上,同时选取中文和英文的数据库进行检索。选定的来源包括 Web of Science 和中国知网 (China National Knowledge

Infrastructure, CNKI) 数据库。文献检索时使用广泛的搜索检索式,以涵盖与 24Model 相关的所有研究文献。该检索式最初在 CNKI 中定义,随后转换为与 Web of Science 数据库设置兼容的形式。

鉴于 24Model 第一版处于模型结构和内容的探索阶段,没有形成确定的模型名称,且模型的应用没有形成一定规模,研究内容无法用特定的文字表述。因此,仅考虑形成稳定的模型结构和明确的模型名称后的应用情况。文献的检索词确定为事故致因“2-4”模型,考虑到模型在实际应用中存在多种书写变体,提取“2-4”模型及“24Model”作为检索词;此外,由于部分研究对于模型引用的不规范,因此,将模型的模糊表达形式“24 模型”纳入检索词,形成“SU=24 模型 +24Model + ‘2-4’ 模型”的检索式,在 CNKI 中检索,共检索到 536 个候选条目。经过初步审查,大部分条目符合分析要求,因此,采用上述检索式在其他数据库中进行检索,检索结果如图 3 所示。

2.1.2 筛选文献

在不同数据库中进行查询后,共得到 647 个符合搜索条件的条目。在初步数据清洗过程中,根据文献对象标识符和标题分析删除 1 个重复项。评估剩余文献条目,排除非同行评审的学术资源,包括报纸文章、图书章节、专利文件及标准等类型的 13 个条目。

2.1.3 内容审查

基于标题和摘要,对剩余的 633 个条目进一步筛选,其中 250 个条目被标记为超出研究范围。对通过标题和摘要筛选的 383 篇文献进行全文获取和评估。在此过程中,有 11 篇文献因无法获取完整全文而被排除。此外,通过全文内容分析,发现 12 篇文献为二次研究(综述性质),主要聚焦于事故致因模型理论或安全学科发展历程;另有 3 篇文献被识别为期刊社论或模型研究团队介绍性文章,不含原创性研究内容,共 15 篇因不符合本研究的纳入标准,予以排除。经过系统性地文献收集、筛选及审核,最终确定 357 篇文献作为分析对象,其中,中文文献 316 篇,英文文献 41 篇。

2.2 结构化文献分析框架

为确保分析结果的系统性与科学性,建立结构化分析框架,对前 30 篇文献进行预审,基于研究目标记录 24Model 的研究与应用相关信息。随后,通过合并重复类目、剔除单一结果类目等方式进行框架优化,最终形成结构化分析框架,见表 1。该框架

的前 5 项适用于所有文献条目,而第 6 项则基于第 5 项的分析结果确定。在识别文献所采用的 24Model 版本时,发现存在模型描述与图示不一致,或未明确指明版本等问题。为解决这一问题,建立版本识别的优先级判断标准,依次为模块的定义、文中明确的版本选择、采用的模型图、引用的参考文献,以保证版本识别的准确性。

表 1 文献结构化分析框架

Table 1 Structured analysis framework for literature

序号	审查信息	描述
1	论文的基本信息	论文的发表时间、作者、关键词等基本信息
2	所属行业	根据文献[16]的类别划分方法对所属行业进行分类。允许不同类别同时出现
3	24Model 的版本	根据文中使用的 24Model 的版本进行统计
4	模型的系统性应用	根据文中是否使用了 24Model 的系统特性进行研究进行判断
5	24Model 的应用类型	根据文中对于 24Model 具体应用可以分为事故分析、风险辨识、模型研究、模型数智化应用、安全文化和其他。允许不同类别同时出现
6	事故分析的类别	根据文中应用 24Model 对事故分析的数量和方法分为统计分析、单起事故分析、应用数学模型量化分析。允许不同类别同时出现

2.3 文献数据处理及分析

在建立文献结构化分析框架的基础上,采用表格形式对文献审查结果进行数据采集与预处理。对收集数据进行描述性统计分析,并通过交叉分析和卡方检验深入探究行业分布、版本演进、系统性应用以及模型应用类型随时间变化的差异性特征。

基于 24Model 迭代的时间特征,将分析时段划分为 3 个时期:第 1 个时期(2013—2016 年)被界定为 24Model 的研究起步阶段,该阶段共经历了 3 次版本更新,呈现出较高的更新频率和显著的模块变化;考虑到 2022 年为最新版 24Model 的发布节点,将后续时期划分为 2017—2021 年(占样本总量的 42.9%)和 2022—2025 年(占样本总量的 49.3%) 2 个阶段。

在数据分析方法上,采用 SPSS 26.0 统计软件进行交叉表分析。文中的部分交叉分析涉及大型列联表且存在显著的数据稀疏性,卡方检验的适用性

受到限制^[17],因此,对不满足卡方检验的数据采用蒙特卡罗精确检验方法,同时,计算相关性系数及列联系数等统计指标,全面评估变量间的关联强度。

3 文献量化统计结果

3.1 24Model 相关研究发文情况

24Model 从第 2 版明确模型结构和名称后得到快速地传播与发展。从总发文量来看,24Model 的研究发展呈现明显的阶段性特征,如图 4 所示。研究起步阶段(2013—2016 年),文献数量相对较少,年均约 7 篇。发展阶段(2017—2021 年),研究规模稳步增长,年均约 31 篇。成熟阶段(2022—2025 年),研究活跃度显著提升,2024 年达到峰值 65 篇,这表明 24Model 在近年来受到越来越多的学术关注。从发文增长率来看,24Model 的有关成果从 2015 年仅有 6 篇文献,到 2024 年达到 65 篇,10 年间年发文量增长约 11 倍,2013—2024 年的复合年均增长率约为 46.4%,增长显著。虽然 24Model 的学术影响力主要集中在中国,但自 2016 年开始,英文论文的发文量也呈现出稳步增长的趋势,英文论文 2016—2024 年的复合年均增长率约为 36.4%。上述数据表明:中英文学术圈都关注到了 24Model,并且模型的研究热度持续攀升。

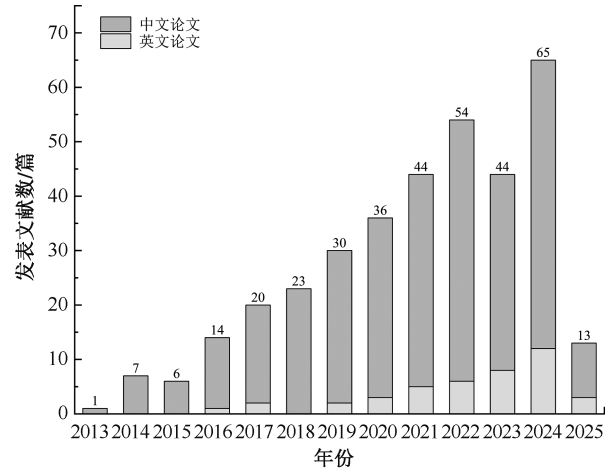


图 4 24Model 年度发文情况

Fig. 4 Annual distribution of publications on 24Model

3.2 24Model 在各行业的应用情况

根据所有经济活动的国际标准行业分类(International Standard Industrial Classification of all economic activities, ISIC),经济活动被划分为 21 个部门和 88 个类别^[16]。24Model 在其中的 12 个部门和 28 个类别得到应用。从行业分布来看,煤炭开采

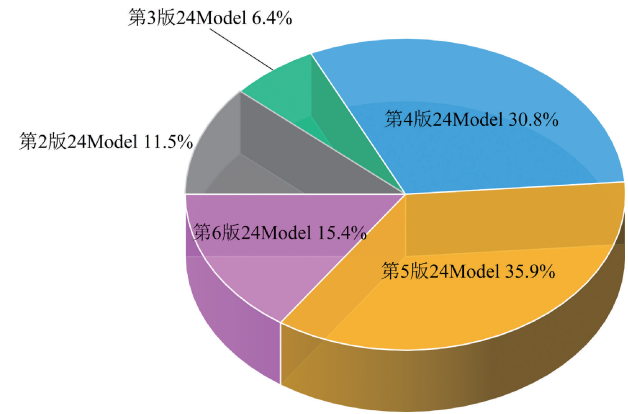


图6 24Model 各版本占比

Fig. 6 Publication distribution across different versions of 24Model

此,将系统性应用分析的范围界定为第5版和第6版的相关研究成果。文献计量分析结果显示,采用系统性模型的研究占比为9.3%。这表明24Model的系统性应用尚属早期发展阶段,其理论潜力有待进一步挖掘。

为进一步探析系统性模型应用的分布特征,分别对行业领域和模型版本进行交叉分析。发现科学研究与技术服务业以及教育行业在系统性模型应用方面表现最为活跃,各占总体研究的17.6%。航空运输业与化学原料及化学制品制造业紧随其后,占比均为11.8%。这一分布格局反映出系统性模型研究当前主要集中于理论探索阶段,教育行业更容易接触理论创新变化,成为推动模型系统性应用的重要力量。其次,航空运输等高风险、高复杂度行业对系统性安全建模方法的需求日益凸显,这与24Model系统性特性高度契合。

从模型版本演进的角度分析,第5版24Model在系统性应用中仍占主导地位,应用比例达58.8%,而第6版的应用比例为41.2%。值得注意的是,时间维度分析结果揭示了模型应用的演进趋势,在第5版系统性模型的应用成果中,90%的成果集中发表于2019—2022年。相比之下,第6版模型发布后,其系统性应用研究呈现快速增长态势,在相关研究成果中的占比已达63.6%。

3.5 24Model 的应用类型

对纳入分析的357篇文献中24Model的应用情况进行归类统计(部分文献同时涉及多种应用类型,因此,各应用类型文献计数之和大于文献总数)。结果显示,事故分析是24Model应用最为广泛的类型,77.6%的文献都使用该模型进行了事故分

析工作。其中,54.2%的文献对多起事故的分析结果进行了统计分析,为制定针对性的安全管理策略提供了循证依据;35.7%的文献对单起事故进行了深入的分析,这部分的研究侧重定性分析。

值得关注的是,定量建模拓展应用模式正逐渐兴起,37%的研究在24Model定性分析基础上,融合数学建模方法对事故影响因素进行了量化研究。这一应用类型和年份的交叉分析结果在统计学上有显著关联,斯皮尔曼相关系数($p=0.226, p<0.001$)呈现正相关,表明使用数学方法进行量化分析的研究正在逐年增加。模型自身的研究与发展也是24Model应用的常见类型,该类型的文献占总发文量的18.8%。其中,64.1%的文献聚焦于模型改进研究,旨在提升模型的解释力、适用性或操作性;另有35.9%的文献将24Model与其他事故致因理论、模型进行比较分析,归纳24Model的特点和局限性。这反映出学术界对24Model理论基础和应用潜力的持续关注与探索。

风险辨识作为24Model的预防性应用占比为总发文量的14.57%,显著低于事后分析。模型数智化应用占比为4.20%,在数字化转型的时代背景下,这一比例明显偏低。安全文化领域应用的占比为3.08%,表明24Model在软性管理要素方面的应用潜力尚未得到充分挖掘。

对5个应用类型与年份分类进行交叉分析,结果显示,事故分析在不同时期的应用比例保持在71.4%~78.4%,变化幅度仅7%。卡方检验不显著($p=0.712$)且相关系数接近0($r=0.023$),表明这类应用具有极强的稳定性。风险辨识应用随时间的推移呈现明显的递增趋势,从3.6%升至16.5%。模型数智化应用随时间变化呈现显著的增长趋势,特别是2022—2025年6月间,86.7%的数智化应用集中度,预示着这类应用正在经历爆发式增长。对24Model的理论研究占比呈现出下降趋势,由最初的28.6%降至15.3%。这一结果表明模型经过时间检验,日益成熟。

4 24Model 的传播与学术影响力探讨

4.1 24Model 的传播情况

24Model的发展模式符合Rogers创新扩散理论“缓慢起步期—快速发展期—稳定成熟期”3阶段的基本框架^[18]。46.4%的复合年均增长率不仅反映了学术界对该模型的高度认可,也侧面反映了该模型具有良好的扩散潜力。研究显示,越来越多的中

国学者将 24Model 的研究成果发表在国际期刊,以寻求模型影响力的进一步扩散,并得到了韩国^[19]、伊朗^[20]、土耳其^[21]等国家学者的研究和应用。但在发表的英文文献中,超过 90% 的文献中,第一作者来自中国,说明 24Model 的理论优势在国际学术界尚未得到广泛地传播。

24Model 的版本演进呈现出显著的累积效应,24Model 第 4 版和第 5 版的持续主导地位(合计 66.7%)表明:模型演进并非简单的替代关系,而是在继承中创新、在创新中完善。相较于其他领域的技术扩散,24Model 在科研群体中的传播速度相对较快,这与安全专业人员的专业能力和实践需求密切相关。

4.2 24Model 的创新特性

24Model 第 5 版引入的系统性概念代表了 24Model 理论发展的重要转变。系统性模型在描述事故发生路径上,认为事故致因因素之间既有层次关系,又有因果关系,交互错综形成网络,更接近真实的物质世界^[22-23]。

但理论创新与实践应用之间仍有差距,系统性模型表现出更高的复杂性,增加了分析难度,需要更多的时间、资源和专业知识的^[24-25]。另一方面,系统性模型对事故成因分析的一致性仍未达预期^[26]。此外,系统性事故致因模型还存在主观的分类结构、抽象的分析边界、模糊的概念定义等问题^[27]。正如 WIENEN 等^[28]的研究所述,尽管系统性模型更能反映客观世界的真实情况,但顺序性模型能够帮助分析人员快速绘制出清晰的事故致因,有助于在事件发生后迅速解决问题。

24Model 通过 6 个版本的完善,为上述问题提供了创新的解决方案。首先,24Model 采用的是模块化的结构并给出了模块的清晰定义,为分析者提供了标准化的分类体系,这一特性在提高资源利用效率的同时,也可以提高分析结果的可靠性。其次,作为一个兼具线性和系统特性的事故致因模型,为分析者提供更为丰富的分析场景。事故发生后,可以使用线性的 24Model 对事故原因进行快速诊断,给出对应的措施避免事故进一步扩大。在此之后可以通过系统性地使用 24Model 进一步分析事故背后的深层原因和行为动态演化过程。

4.3 24Model 的行业传播趋势

24Model 的行业应用情况体现出煤炭开采业、房屋建筑业等传统高风险行业对事故致因理论的需求。

上述行业普遍作业环境复杂,作业面长期处于动态变化状态,作业人员的操作行为、安全意识、技能水平等相对薄弱^[20]。早期的 24Model 关注不安全行为的发生机制和预防方法^[29],与行业需求相吻合。因此,上述行业率先使用模型用作行为预防的理论工具。

研究结果显示,24Model 行业应用在向多元化发展。航空运输业和水上运输业英文论文占比的显著优势,揭示了 24Model 在国际化传播中的路径特征。这些行业的国际化、标准化程度较高,为中国原创理论的国际传播提供了重要载体。值得注意的是,化学原料和化学制品制造业、电力、热力、燃气及水生产和供应业、铁路运输业以及航空运输业的相关文献主要集中发表于 24Model 的成熟发展阶段(2022—2025 年 6 月)。在此阶段,该模型开始展现出系统性特征。与煤炭开采业、房屋建筑业等传统高风险行业相比,上述行业具有显著的技术密集性和系统复杂性特征。24Model 提供了包含安全文化、管理体系、行为预防和技术防护的全面分析视角。这一特点不仅能够满足传统高风险行业对行为管控的刚性需求,同时也能通过其系统性分析能力,为应对复杂安全挑战提供有效支持。

4.4 24Model 的应用发展趋势

分析结果显示,77.6% 的文献采用 24Model 进行事故分析,表明事故分析已经成为了 24Model 的核心功能,具有明确的应用场景、标准化的分析流程和可验证的分析结果,这些特征提高了用户的感知有效性。同时,事故案例的可获得性和分析方法的成熟度,降低了应用门槛。37% 的文献在定性分析基础上引入了定量建模方法,且该比值有显著上升趋势,表明研究者随着理论框架的成熟,开始寻求多元的量化分析结果。

风险辨识的应用虽然呈增长趋势,但相较于事故分析,以风险辨识为代表的预防性应用仍显不足,且多项研究中的风险辨识结果是根据事故分析结果拓展而来^[30]。上述的应用模式体现了传统安全管理遵循“事故驱动”的改进逻辑,即通过分析已发生事故来防止类似事故再次发生。这种路径依赖的形成源于事故案例提供了完整的因果链条和丰富的经验数据,使得分析过程相对直接和可控。相比之下,风险辨识需要对未知情景进行推演,面临更大的不确定性和认知挑战^[24]。另一重要原因是预防性研究往往面临效果验证的困境,成功的预防意味着“无事发生”,难以确定是预防措施的作用还是其他

因素的影响^[31]。

尽管数智化应用目前仅占 4.20%,但在 2022—2025 年 6 月间的集中度达到 86.7%,呈现爆发式增长态势,预示着 24Model 应用的新方向。数智化技术的应用需要将开放性问题转化为标准化的共性认知,在此形式化推理过程中,框架问题构成了最主要的理论障碍^[32]。事故致因模型通过明确定义描述性要素,并为事故描述与推理提供符号化表达,能够为数智化应用构建坚实的理论基础^[33]。由此可见:数智化技术应用与 24Model 的系统分析框架具有内在的兼容性。目前,24Model 的数智化应用主要集中在事故案例的自动化分析^[34]、安全文化测量^[7]领域。实时监测技术与智能视觉识别系统的引入,为 24Model 的分析提供了更全面的数据支持,将进一步拓展 24Model 在数智化分析中的应用维度。

5 结 论

1) 24Model 研究热度持续攀升,并表现出良好的扩散潜力,中文文献虽然仍是 24Model 的主要成果来源,但英文论文发表量也呈现 36.4%的复合年均增长率,并得到韩国、伊朗、土耳其等国学者的关注和应用,但 90%以上英文文献第一作者仍来自中国,表明该模型的国际化传播仍有较大提升空间。

2) 24Model 正在从煤矿行业向系统复杂性高

的化学原料和化学制品制造业等行业传播。这一变化反映了 24Model 从关注个体不安全行为预防向处理技术系统、组织管理和个体行为复杂交互关系的系统性分析能力转变。

3) 24Model 在实践中呈现出从定性到定量、从事后到事前、从经验到智能的演进特征。24Model 的应用中事故分析占据稳定主导地位反映了路径依赖效应;以风险辨识为代表的预防性应用不足暴露了“事故驱动”思维定式;而数智化应用的爆发式增长预示着 24Model 正在完成从传统分析工具向智能决策平台的范式转变。

4) 24Model 的创新特性为系统性事故致因模型的实践应用提供了新的方案。24Model 通过模块化架构和标准化分类体系,解决了传统系统性模型主观性强、概念模糊的问题。其次,融合线性与系统性分析能力,实现了快速响应与深度分析的有机结合,突破了单一分析模式的局限。最后,以组织为分析的边界,使分析过程更加聚焦且对策更具可操作性。

5) 24Model 未来发展应当聚焦 3 个研究方向:①强化系统性模型的理论研究,提高系统性模型的可用性;②推动模型在预防性应用方面的研究,激发其在塑造安全文化、完善管理体系,提升安全能力方面的优势;③加速数智化技术融合,构建智能化的安全分析与决策平台。

参 考 文 献

- [1] 傅贵,韩梦,贾琳,等.事故致因理论及其发展综述[J].安全,2023,44(3):1-8.
FU Gui, HAN Meng, JIA Lin, et al. A review on accident cause theory and its development[J]. Safety & Security, 2023, 44(3): 1-8.
- [2] 傅贵,索晓,王春雪.24Model 的系统特性研究[J].系统工程理论与实践,2018,38(1):263-272.
FU Gui, SUO Xiao, WANG Chunxue. Study on the systematic characteristics of 24Model[J]. Systems Engineering, 2018, 38(1): 263-272.
- [3] HE Yiman, LI Jizu, YU Min, et al. Path analysis of coal mine accident risk factors based on the 24Model[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2025, 31(1): 45-58.
- [4] LI Wangxin, WU Ping, HUANG Jiaming, et al. A new paradigm for construction safety management in China: introducing knowledge graph and accident database into the early-stage of BIM[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 470: DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143367.
- [5] LYU Qian, FU Gui, WANG Yuxin, et al. Cause analysis framework from a safety capability perspective: application to Tianjiayi hazardous chemical explosion accident[J]. Process Safety Progress, 2023, 42(3): 567-577.
- [6] YAN Mingwei, CHEN Wentao, WANG Jianhao, et al. Characteristics and causes of particularly major road traffic accidents involving commercial vehicles in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8): DOI: 10.3390/ijerph18083878.
- [7] XIE Xuecai, FU Gui, SHI Zhao, et al. Development and application of safety culture analysis program: first online safety culture quantitative analysis and assessment system in China[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 89: DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105312.
- [8] WU Yali, FU Gui, WU Zhirong, et al. A popular systemic accident model in China: theory and applications of 24Model[J]. Safety Science, 2023, 159: DOI: 10.1016/j.ssci.2022.106013.
- [9] HEINRICH H W. Industrial accident prevention[M]. New York & London: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941: 72-111.
- [10] REASON J. Human error[M]. London: Cambridge University Press, 1990: 214-215.
- [11] STEWART J M. Managing for world class safety[M]. Toronto: Wiley, 2001: 6-26.

- [12] SUO Xiao, FU Gui, WANG Chunxue, et al. An application of 24Model to analyse capsizing of the Eastern Star Ferry[J]. Polish Maritime Research, 2017, 24(S3): 116-122.
- [13] FU Gui, FAN Yunxiao, TONG Ruipeng, et al. A universal method for the causation analysis of accidents (Version 4.0)[J]. Journal of Accident Prevention, 2017, 3(1): 1-7.
- [14] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 12-19.
- [15] FU Gui, CHEN Yiran, XU Surui, et al. Detailed explanations of 24Model and development of its 6th version[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 12-19.
- [16] MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement[J]. PLoS Medicine, 2009, 6(7): DOI:10.1371/journal.pmed.1000097.
- [17] United Nations. International standard industrial classification of all economic activities (ISIC)[M]. New York: United Nations, 2008:43.
- [18] MCHUGH M L. The chi-square test of independence[J]. Biochemia Medica, 2013, 23(2): 143-149.
- [19] ROGERS E M. Diffusion of innovations (5th ed.)[M]. New York: Free Press, 2003: 65-103.
- [20] YOON Y G, AHN C R, YUM S G, et al. Establishment of safety management measures for major construction workers through the association rule mining analysis of the data on construction accidents in Korea[J]. Buildings, 2024, 14(4): DOI: 10.3390/buildings14040998.
- [21] MIRZAEI A M, MOHAMMADFAM I, SHABANI K. Causal analysis of the Zemestan-Yurt coal mine explosion in Iran[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(2): 519-530.
- [22] TAÇGIN E, SAĞIR Z. Development of an intelligent knowledge base for identification of accident causes based on fu et al.'s model[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2022, 28(2): 824-841.
- [23] LEVESON N G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. Cambridge: The MIT Press, 2012: 54-65.
- [24] HOLLNAGEL E. Barriers and accident prevention[M]. New York & London: Routledge, 2016: 53-67.
- [25] PATRIARCA R, CHATZIMICHAILIDOU M, KARANIKAS N, et al. The past and present of system-theoretic accident model and processes (STAMP) and its associated techniques: a scoping review[J]. Safety Science, 2022, 146: DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105566.
- [26] SALMON P M, HULME A, WALKER G H, et al. The big picture on accident causation: a review, synthesis and meta-analysis of AcciMap studies[J]. Safety Science, 2020, 126: DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104650.
- [27] HULME A, STANTON N A, WALKER G H, et al. Are accident analysis methods fit for purpose? testing the criterion-referenced concurrent validity of AcciMap, STAMP-CAST and AcciNet[J]. Safety Science, 2021, 144: DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105454.
- [28] LOWER M, MAGOTT J, SKORUPSKI J. A system-theoretic accident model and process with human factors analysis and classification system taxonomy[J]. Safety Science, 2018, 110: 393-410.
- [29] WIENEN H, BUKHSH F A, VRIEZKOLK E, et al. Learning from accidents: a systematic review of accident analysis methods and models[J]. International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management, 2018, 10(3): 42-62.
- [30] 傅贵, 陆柏, 陈秀珍. 基于行为科学的组织安全管理方案模型[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(9): 21-27.
- [31] FU Gui, LU Bai, CHEN Xiuzhen. Behavior based model for organizational safety management[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(9): 21-27.
- [32] YUAN Chenhui, FU Gui, ZHANG Jiangshi, et al. Causal relationship analysis and risk assessment of contributing factors in coal mine ordinary accidents: a case study (2002-2023)[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: DOI: 10.1016/j.psep.2025.107065.
- [33] SWUSTE P, VAN G C, GROENEWEG J, et al. Occupational safety and safety management between 1988 and 2010[J]. Safety Science, 2020, 121: 303-318.
- [34] WINOGRAD T. Understanding natural language[J]. Cognitive Psychology, 1972, 3(1): DOI: 10.1016/0010-0285(72)90002-3.
- [35] QURESHI Z H. A review of accident modelling approaches for complex socio-technical systems[C]. The 12th Australian Workshop on Safety Related Programmable Systems, 2007: 47-59.
- [36] 张江石, 李泳瞰, 吴静茹, 等. 煤矿事故原因智能分析方法研究与应用[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2025, 65(3): 555-568.
- [37] ZHANG Jiangshi, LI Yongtun, WU Jingru, et al. Research and application of intelligent methods for analyzing the causes of coal mining accidents[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2025, 65(3): 555-568.

作者简介: 路禹轩 (1997—),男,河北秦皇岛人,博士研究生,研究方向为事故致因理论及其数智化应用。E-mail:lyx1097@126.com。

