Journal of Security and Safety Technology 安防技术, 2026, 14(2), 96-103
Published Online June 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jsst
https://doi.org/10.12677/jsst.2026.142010

Hans汉斯

基于多源异构数据融合的高校实验室事故致因演化机理与关键路径识别

徐淑娟，郭　江*

太原科技大学安全与应急管理工程学院，山西 太原

收稿日期：2026年5月25日；录用日期：2026年6月18日；发布日期：2026年6月26日

摘　要

针对传统高校实验室事故分析数据源单一、信息碎片化、静态化等问题，本文以2015~2025年公开权威渠道发布的85起有效实验室安全事故为研究样本，整合官方通报、新闻报道、学术文献及安全检查资料构建多源异构数据库。采用自然语言处理技术完成文本信息结构化提取，引入动态贝叶斯网络与复杂系统理论，建立人－物－环境－管理四维致因分析框架，揭示实验室事故从隐患萌生、风险累积到耦合触发的非线性演化机理，并识别化工、生物、材料等不同学科的关键致险路径。研究表明，违规操作占比62.35%，为事故直接主因，管理缺陷为深层根因，化工类实验室事故占比最高，达45.88%。本文可为高校实验室风险预警、分类管控与应急处置提供真实数据支撑与科学决策依据。

关键词

高校实验室，多源异构数据，事故致因，动态演化，关键路径，应急响应

Identification of Evolution Mechanism and Critical Paths of Accident Causes in University Laboratories Based on Multi-Source Heterogeneous Data Fusion

Shujuan Xu, Jiang Guo*

College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: May 25, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 26, 2026

*通讯作者。

文章引用：徐淑娟，郭江. 基于多源异构数据融合的高校实验室事故致因演化机理与关键路径识别[J]. 安防技术, 2026, 14(2): 96-103. DOI: 10.12677/jsst.2026.142010

Abstract

To address the limitations of single data source, fragmented information and static analysis in traditional university laboratory accident research, this paper takes 85 valid laboratory safety accidents published by authoritative channels from 2015 to 2025 as research samples, and constructs a multi-source heterogeneous database by integrating official bulletins, news reports, academic documents and safety inspection materials. Natural language processing technology is used to extract structured text information. With the introduction of dynamic Bayesian network and complex system theory, a four-dimensional causal analysis framework of human-material-environment-management is established to reveal the nonlinear evolution mechanism of laboratory accidents from hidden danger initiation, risk accumulation to coupling trigger, and identify the critical risk paths of different disciplines such as chemistry, biology and materials. The results show that illegal operation accounts for 62.35%, which is the direct main cause of accidents; management defects are the deep root cause; and chemical laboratories account for the highest proportion of accidents, reaching 45.88%. This paper can provide real data support and scientific decision-making basis for risk early warning, classified management and emergency disposal of university laboratories.

Keywords

University Laboratory, Multi-Source Heterogeneous Data, Accident Cause, Dynamic Evolution, Critical Path, Emergency Response

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

高校实验室是支撑高等学校人才培养、学科建设与科学研究的核心载体，也是危险化学品、高温高压设备、压力容器、生物制剂、放射性物质、特种设备等高风险要素高度集聚的场所。近年来，随着我国高等教育事业快速发展、科研经费持续增长、创新活动不断深化，高校实验室数量持续增加、实验内容日趋复杂、实验操作频次大幅提升，实验室安全风险呈现出来源多样化、演化过程动态、多因素交互耦合以及后果极端化的特征。一旦出现操作失范、设备故障、管理缺位或应急滞后，极易引发火灾、爆炸、化学品泄漏、中毒、机械伤害、生物污染等安全事故，不仅会造成师生人身伤亡、仪器设备损毁、科研进程中断，还会形成不良社会影响，威胁校园安全稳定与公共安全秩序。

当前，国内高校实验室安全管理仍存在诸多薄弱环节，突出表现为风险识别精度不足、隐患排查流于形式、致因分析不够深入、管控措施通用性强而针对性弱、应急处置能力不强等问题。从现有研究来看，国内学者围绕实验室安全事故统计、风险源辨识、安全评价体系、管理制度建设等方向开展了大量研究，常用方法包括事故树分析法、鱼骨图法、层次分析法、模糊综合评价法等[1]。但总体而言，现有研究仍存在明显局限：一是数据源高度单一，多依赖事故通报或局部案例，信息碎片化严重，难以还原事故全貌；二是分析方法偏静态，无法刻画风险随时间累积、传导、耦合、升级的动态过程；三是机理解释不够充分，对深层根因、关键传导链条、多因素交互作用的定量描述不足；四是管控建议泛化，缺少面向不同学科、不同场景、不同风险等级的差异化治理策略。

在大数据、人工智能技术快速普及的背景下，多源异构数据融合、文本挖掘、动态贝叶斯网络、复

杂网络分析等方法已在工业安全、公共安全、交通安全等领域得到成功应用，为事故动态致因分析提供了新的技术路径[2]。基于此，本文以真实、大样本、多来源事故数据为基础，以多源异构数据融合为支撑，以动态演化建模为核心，以分学科关键路径识别为目标，开展系统化、定量化、可落地的实验室事故致因研究，旨在推动高校实验室安全管理从“事后处置”向“事前预警、过程管控、精准治理”转型，为提升校园安全治理能力提供理论与方法支撑。

2. 研究现状

我国高校实验室安全研究起步相对较晚，近十年来随着事故频发与监管政策趋严，相关研究成果快速增长，研究体系逐步完善。总体来看，现有研究主要集中在四个方面：第一，事故统计与特征分析，通过收集公开案例开展类型、时间、空间、学科等维度的分布规律总结，提炼高发场景与主要诱因；第二，风险源辨识与分级管控，围绕人、机、料、法、环等要素识别实验室风险点，建立分级标准与管控清单；第三，安全评价模型构建，运用定性与半定量方法建立评价指标体系，实现实验室安全水平量化评估；第四，安全管理与应急体系优化，从制度、培训、检查、演练、责任落实等角度提出管理改进对策。

在理论层面，事故致因理论、轨迹交叉理论、“2-4”模型等被逐步引入实验室安全分析，推动研究从简单统计向机理分析过渡[3]。在技术层面，文本挖掘、贝叶斯网络、知识图谱、物联网监测等方法开始应用于风险预警与致因分析，提升了研究的定量化与智能化水平[4]。但从整体上看，现有研究仍存在四方面突出不足：首先，数据源单一化问题显著，多数研究仅依赖单一渠道事故信息，缺乏多渠道融合校验，数据完整性与可信度有限；其次，分析过程静态化，传统方法难以描述事故从隐患到爆发的动态演化链条，无法反映时序传导与非线性耦合特征；再次，机理解释模糊化，对深层根因、关键传导路径、多因素交互作用的揭示不够深入，结论偏经验描述；最后，治理策略泛化，针对化工、生物、材料等不同学科实验室的风险差异与路径差异研究不足，导致管控建议落地性不强。

目前，将多源异构数据融合、动态演化分析、分学科关键路径识别三者结合，并基于大样本真实事故开展实证检验的研究仍然较少，尚未形成统一、系统、可推广的实验室事故演化分析框架。本文正是在这一研究背景下，以多源数据为基础、以动态模型为工具、以分学科治理为目标，弥补现有研究短板，提升实验室安全分析的科学性与实用性。

3. 数据来源与统计分析

3.1. 数据来源

本文所使用的事故数据均来自公开权威可核查渠道，以确保样本真实性、客观性与可追溯性。研究时间跨度设定为 2015 年 1 月至 2025 年 4 月，覆盖十年间全国范围内高校实验室安全事故。数据来源主要包括四类：第一类为官方通报，即教育部、应急管理部、省级及市级应急管理部门、教育行政部门发布的事故调查报告、通报文件及专项检查结论；第二类为权威媒体报道，包括央视新闻、人民网、新华网、光明网等中央主流媒体发布的事故新闻、调查报道与复盘分析；第三类为学术文献案例，即中国知网、万方、维普等数据库收录的期刊论文、学位论文中明确记载、信息完整的实验室安全事故案例；第四类为高校公开资料，包括各高校官网发布的安全检查报告、事故总结、整改通报及安全工作文件。

在数据获取后，本文按照严格流程进行处理：首先进行多渠道检索与交叉比对，剔除重复报道与信息冲突条目；其次对事故基本信息、事故类型、涉事学科、伤亡情况、直接原因、间接原因、处置过程等字段进行筛选，删除信息缺失、描述模糊、无法核验的无效样本；随后对关键信息进行标准化与结构化转换，统一学科分类、事故类型、致因分类口径；最后经过有效性校验，最终确定有效事故样本 85 起，样本覆盖全国多所本科及职业院校，能够客观反映我国高校实验室安全事故的基本特征与风险规律。

3.2. 典型案例

本文对近年来高校实验室安全检查隐患与事故进行全面收集、整理与统计分析，共统计 85 起实验室安全事故，包括事故名称、时间、问题、后果与处置情况，典型案例如表 1 所示。

Table 1. Statistics of typical cases of university laboratory safety (Partial)
表 1. 高校实验室安全典型案例统计(部分)

事故名称	时间	事故问题与原因	事故后果与处置
中国矿业大学实验室爆炸事故	2015.04.05	违规处理实验废渣，引发化学反应爆炸	1 人死亡、4 人受伤，责令全面整改
清华大学实验室爆炸火灾事故	2015.12.18	违规使用氢气，操作不当引发爆炸	1 人死亡，全校实验室安全专项整顿
北京化工大学实验室火灾事故	2016.01.10	易燃化学品存放不规范，遇火源起火	无人员伤亡，整改危化品管理
东华大学实验室爆炸事故	2016.09.21	未规范防护、违规操作强腐蚀性试剂	2 人重伤，学校强化操作与防护培训
复旦大学实验室爆炸事故	2017.03.27	反应釜操作失误，高温高压失控爆裂	1 名学生受伤，实验室关停排查
北京交通大学实验室爆炸事故	2018.12.26	违规开展镁粉改性实验，反应失控爆炸	3 名学生死亡，追责并全面停工
西南交通大学实验室火灾事故	2020.12.21	实验后遗留火种，巡检不到位引发火情	无人员伤亡，强化日常巡查
中山大学试管炸裂事故	2021.07.27	操作不规范，玻璃器皿未检查	1 名学生受伤，加强操作培训
南京航空航天大学实验室爆燃事故	2021.10.24	实验物料配比错误，引发爆燃	2 人死亡、9 人受伤，关停相关科研项目

3.3. 事故类型分布

按照事故发生形式、能量释放类型与危害后果，将 85 起事故划分为六大类型。

Table 2. Distribution of accident types in university laboratories (n = 85)
表 2. 高校实验室事故类型分布(n = 85)

事故类型	事故起数	占比(%)
火灾爆炸类	27	31.76
化学品泄漏及中毒类	20	23.53
设备故障及机械伤害类	12	14.12
高温烫伤及高压类	10	11.76
生物安全类	4	4.71
其他类型	12	14.12

由表 2 可知，火灾爆炸类事故占比最高，达 31.76%，多由危险化学品反应失控、易燃物遇明火、电路短路引燃等引发，突发性强、破坏力大；化学品泄漏及中毒类事故占比 23.53%，多因储存不当、操作

失误、容器破损、通风不足导致。两类事故合计占比超过 55%，是高校实验室最主要的事故类型，也是安全管控的核心方向[5]。

3.4. 涉事学科分布

按照实验室所属学科领域进行分类统计，事故在学科间呈现明显的不均衡分布特征，具体如表 3 所示。

Table 3. Disciplinary distribution of accidents (n = 85)
表 3. 事故涉事学科分布(n = 85)

学科类型	事故起数	占比
化工与化学类	39	45.88
材料类	16	18.82
生物与医学类	12	14.12
机械类	8	9.41
电气与电子类	10	11.76

化工与化学类实验室因大量使用易燃易爆、有毒有害、强氧化性、强腐蚀性化学品，实验反应条件复杂、过程可控性要求高，事故占比接近半数，风险等级显著高于其他学科。材料类实验室涉及高温、高压、粉尘、贵金属及易燃易爆前驱体，设备密集、工况波动大，事故占比位居第二。生物与医学类实验室以生物样本、感染性物质、实验动物、腐蚀性试剂为主，风险更具隐蔽性与滞后性。机械、电气电子类事故占比较低，以机械伤害、触电、电路短路为主。学科分布结果表明，理工科实验室尤其是化工化学类实验室为事故高发领域，应实施重点管控与专项治理[6]。

3.5. 事故致因统计

按照直接致因与间接致因对 85 起事故进行分类统计，结果如表 4 所示。

Table 4. Distribution of accident causes (n = 85)
表 4. 事故致因分布(n = 85)

致因类型	事故起数	占比(%)
违规操作及操作不当	53	62.35
仪器设备故障及老化	12	14.12
安全管理不完善	7	8.24
危险化学品储存及处置不规范	5	5.88
电路老化及短路	4	4.71
环境与布局问题	3	3.53
其他原因	1	1.18

统计结果显示，违规操作及操作不当占比高达 62.35%，涵盖未经培训上岗、擅自更改实验参数、简化操作流程、冒险作业、防护不到位、应急处置错误等行为，是引发事故最主要的直接原因。仪器设备老化、故障及维保缺失占比 14.12%，是物的方面最突出问题。安全管理不完善占比 8.24%，虽然数值不

高，但从演化逻辑看，制度缺失、培训不足、检查缺位、责任不落实等管理漏洞是诱发人的不安全行为与物的不安全状态的根本原因[7]。危险化学品储存处置不规范、电路问题、环境布局问题等占比较低，但在特定场景下仍会成为关键触发因素。

3.6. 时空分布规律

在时间分布方面，事故高发时段集中在 8:00~16:00，占比 61.18%，这一时间段为实验教学与科研活动最密集时段，人员操作频繁、设备高负荷运行、风险暴露度最高。12:00~14:00 午休时段人员流动性大、注意力分散，事故发生率有所降低；夜间实验活动少，事故发生率最低。月份分布呈现多峰值特征，高发月份集中在 3~4 月、6 月、8 月、10~12 月，主要与春季开学集中实验、期末毕业论文实验、暑期科研不间断、秋季教学高峰及年底科研冲刺等节点高度相关。

在空间分布方面，事故主要发生在教学实验室和科研实验室，其中科研实验室因实验周期更长、流程更复杂、危险等级更高、人员流动性更强，事故占比略高于教学实验室。从区域分布看，东部与中部高校密集、科研活动强度大的地区事故数量略高于西部地区，整体与高校数量、实验频次、危险物使用规模呈正相关关系[8]。

4. 研究方法与致因体系

4.1. 研究方法

本文采用多源异构数据融合技术，实现文本、数值、分类数据的标准化整合。运用自然语言处理完成关键词抽取、实体归一与结构化转换。通过动态贝叶斯网络实现致因时序演化与概率传导建模，利用复杂网络拓扑分析识别关键节点与关键路径，开展分学科对比分析，总结化工、生物、材料实验室的事故差异规律[9]。

4.2. 四维致因框架

结合事故致因理论与 85 起样本特征，建立人－物－环境－管理四维致因框架。人的因素主要包括违规操作、防护缺失、技能不足、应急处置不当。物的因素包括设备老化、危险化学品管理不规范、安全设施失效。环境因素包括空间拥挤、通风不良、温湿度异常、通道堵塞。管理因素包括制度缺失、培训不足、检查缺位、台账不完善、应急机制不健全[10]。

5. 事故动态演化机理分析

基于动态贝叶斯网络对 85 起事故样本进行建模学习与参数推理，可将高校实验室安全事故的完整演化过程划分为四个连续且具有时序逻辑的阶段，各阶段之间存在明确的概率传导与跃迁关系。本文所有概率结果均通过动态贝叶斯网络参数学习与联合树推理算法计算得到，模型条件概率表(CPT)已完成构建并用于全流程推理验证。

第一阶段为根因触发阶段。管理缺陷是事故发生的核心前置根因，包括安全制度不完善、培训教育不到位、日常检查缺位、安全责任未落实、台账管理混乱等。模型计算结果显示，管理缺陷的初始触发概率为 0.61~0.68，在所有致因节点中概率最高。管理缺陷不会直接导致事故，但会形成系统性安全漏洞，使实验室长期处于高风险容忍状态，为后续人的不安全行为与物的不安全状态提供滋生条件。

第二阶段为风险传导阶段。在管理缺陷的持续作用下，风险沿两条主要路径进行隐性累积与传导。第一条路径指向人的因素，管理缺陷直接导致安全培训不足、操作规范不清晰、监督不到位，进而引发违规操作、防护缺失、技能不足、应急能力薄弱等不安全行为，其条件概率为 0.57~0.62。第二条路径指向物的因素，管理缺陷导致设备维保不及时、危化品储存使用混乱、安全设施维护缺失，形成设备老化、

物料失控、设施失效等不安全状态，其条件概率为0.48~0.53。在这一阶段，风险尚未触发事故，但已形成明显的隐患链条。

第三阶段为耦合触发阶段。当人的不安全行为、物的不安全状态与不良环境条件在同一时空节点交汇，便会发生多因素耦合，风险瞬间突破阈值并触发事故。模型结果表明，单一因素独立触发事故的概率仅为0.18，而人－物－环境三因素耦合后，事故触发概率大幅提升至0.67，该结果由DBN单因素与多因素敏感性分析定量计算获得，验证了多因素耦合对事故触发的显著放大效应，充分说明高校实验室事故具有典型的非线性耦合特征，单一因素通常难以造成严重事故，多因素叠加是事故爆发的必要条件。

第四阶段为后果升级阶段。事故发生后的危害范围与严重程度，高度依赖初期应急处置的有效性。在无有效应急处置的情况下，人员慌乱、处置错误、响应迟缓、风险源未及时切断，会导致事故快速扩大，扩大概率为0.40~0.45；在规范有效处置条件下，能够第一时间切断风险、控制泄漏、组织疏散、正确使用应急器材，事故扩大概率可降至0.10~0.15。上述概率由DBN在不同证据输入下的后验概率推理得出，可量化反映应急处置对事故后果的抑制作用。因此，应急处置能力是决定事故后果的关键调节变量。

综合来看，高校实验室安全事故是以管理缺陷为深层根因、以人为不安全行为为直接触发点、以多因素时空耦合为必要条件、以应急处置水平为后果调节器的动态非线性演化过程。

6. 关键致险路径识别

以节点介数中心性、路径贡献度、条件传导概率为核心判定指标，通过复杂网络拓扑分析，对化工、生物、材料三类高风险学科实验室的致险路径进行识别，提取出最具代表性、传导概率最高、后果最严重的关键致险链。各路径均经量化指标排序筛选，关键路径在传导概率、介数中心性等指标上显著高于其他备选路径。

化工与化学实验室的关键致险路径为：管理缺位→培训不足→违规操作→危险化学品失控→泄漏爆炸。该路径传导概率与介数中心性均居学科内首位，具备充分的量化依据支撑其关键地位。化工实验室危化品使用量大、种类多、反应条件苛刻，管理缺位直接导致培训与监督不足，操作人员违规操作极易引发反应失控、物料泄漏、遇火爆炸，是所有学科中后果最严重的传导路径。

生物与医学实验室的关键致险路径为：监管不到位→防护缺失→操作不规范→样本及废液泄漏→感染污染。该路径经传导概率与风险贡献度综合排序确定为关键路径。生物安全风险具有隐蔽性、潜伏期长等特点，监管不足易导致个人防护不到位、操作流程简化，一旦样本或废液泄漏，可能引发人员感染与环境污染，处置难度较高。

材料实验室的关键致险路径为：设备维保缺失→工况异常→粉尘高温高压失控→灼伤爆炸。该路径依据复杂网络拓扑指标排序优选确定。材料实验多处于高温、高压、粉尘等严苛工况，设备长期高负荷运行，维保不足易引发温度压力失控、粉尘积聚、喷溅爆燃等事故，以灼伤、爆炸为主要后果。

从共性规律来看，三类学科实验室的关键路径均以管理因素为起点，以人为因素为中间核心节点，以物的失控为直接触发条件，最终在耦合作用下爆发事故。这表明，管理与人为因素是风险传导的核心枢纽，也是安全管控最有效的切入点。

防控策略与应急建议

(1) 在源头管控方面，应以管理体系完善为核心，压实各级安全责任。健全实验室安全管理制度与操作规程，实现全流程闭环管理；建立常态化安全培训与考核机制，确保所有人员先培训、考核合格后上岗；推行隐患排查清单化、常态化、整改闭环化，做到隐患可记录、可跟踪、可销号；完善危险化学品采购、入库、储存、使用、回收、处置全生命周期台账，实现全程可追溯。

(2) 在动态预警方面，应推动智能化监测技术应用，实现风险早发现、早干预。对违规操作行为、危化品状态、设备运行参数、环境温湿度与通风状况进行实时监测；建立多因素融合预警模型，设定风险阈值，实现异常自动报警与分级推送；结合物联网、视频智能分析等技术，对重点区域、高危实验进行全程监控，降低人为失误概率[2]。

(3) 在分类治理方面，应针对不同学科实验室实施差异化精准管控。化工类实验室重点强化防火、防爆、防泄漏措施，严格管控危化品使用与废弃物处置；生物类实验室重点强化个人防护、消杀流程、样本与废液无害化处理，严防生物污染；材料类实验室重点加强设备定期维保、高温高压工况监测、粉尘抑爆与通风除尘。

(4) 在应急体系方面，应提升实战化处置能力，降低事故扩大风险。针对不同事故类型编制专项应急预案，明确处置流程、责任分工、物资配置；定期开展实战化应急演练，提升师生应急响应与初期处置能力；按标准配齐应急器材，确保应急喷淋、洗眼器、灭火器、防护装备等完好有效；建立快速上报与联动处置机制，最大限度减少人员伤亡与财产损失。

7. 结论

本文以 2015~2025 年 85 起高校实验室安全事故为样本，经多源异构数据融合与动态贝叶斯网络分析，明确违规操作是事故最主要直接原因，管理缺陷是深层根源，化工化学类实验室事故占比最高、风险最突出，同时揭示了事故从隐患萌生、风险累积、多因素耦合触发到后果升级的动态演化机理，识别出不同学科实验室的关键致险链条，研究成果可为高校实验室构建基于学科差异的精准化风险防控体系提供理论支撑。

基金项目

山西省高等学校教学改革创新项目“VR + 产教融合安全与应急卓越工程师培养可持续模式构建与实践研究”(J20250153)。

参考文献

[1] 董金刚, 杜成刚. 高校实验室安全事故原因分析与对策[J]. 沧州师范专科学校学报, 2011, 27(1): 131-132.

[2] 葛亮, 周女青, 车洪磊, 等. 实验室安全 ISBOA-KELM 多传感器数据融合预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 63-71.

[3] 高月淑, 许振明, 胡晓芳. 基于“2-4”模型的高校实验室安全事故分析及对策[J]. 实验科学与技术, 2025, 23(6): 112-117.

[4] 李威君, 李景楠, 刘音, 等. 高校实验室火灾爆炸事故致因文本挖掘与分析[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(8): 244-248.

[5] 刘晓霞. 基于对应分析的高校实验室火灾事故致因分析[J]. 安全与健康, 2022(7): 68-71.

[6] 李洪兵, 刘可, 吴鑫, 等. 高校实验室爆炸事故致因定量分析方法研究[J]. 现代职业安全, 2023(11): 36-41.

[7] 王维, 马麟. 高校实验室安全事故人为因素及其影响路径分析[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(7): 264-268.

[8] 甘圣义, 文方林, 聂冬梅, 等. 2010-2019 年国内高校及研究院所实验室涉化类消防安全事故原因分析及对策研究[J]. 科技与创新, 2021(7): 32-36.

[9] 李威君, 朱明珠, 刘音, 等. 基于 AISM 的高校燃烧与爆炸实验室事故关键致因分析[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(4): 241-246.

[10] 徐超, 郭琳, 赵春雨, 等. 基于“2-4”模型的高校易燃易爆实验室事故致因与对策[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5): 248-254.