

基于改进 HFACS 的危化品道路运输事故致因分析

朱希望,王建豪*,咸化彩,于源琳

山东交通学院交通与物流工程学院,山东 济南 250357

摘要:为预防危险化学品道路运输事故,考虑人因分析与分类系统(human factors analysis and classification system, HFACS)中各致因类别在危险化学品道路运输事故中的具体表现形式,改进 HFACS 模型。采用改进后的 HFACS 模型对 2000—2020 年 67 起危险化学品道路运输事故的致因因素按各人因失误层级和致因类别进行归类统计与分析,采用卡方检验与让步比分析相邻层级间的内在联系。结果表明:个体层面的主要致因因素集中在违规和不良状态,具体为超载运输、行车前未进行车辆安全检查和注意力分散;组织层面的主要致因因素为安全教育培训不到位、动态监测不足及重效益轻安全;指导和监督不足是外部层面的重要因素。改进 HFACS 模型中相邻层级间的因素存在显著因果关系,导致事故发生的关键路径为组织外监管因素→组织过程漏洞→监督不到位→人员因素→违规。针对引发事故的关键路径及频数较大的致因因素,从外部监管和企业内部管理 2 方面提出针对性预防措施。

关键词:危险化学品;道路运输事故;HFACS;事故致因;卡方检验;让步比

中图分类号:U491.31

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)01-0001-08

引用格式:朱希望,王建豪,咸化彩,等. 基于改进 HFACS 的危化品道路运输事故致因分析[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(1): 1-8.

ZHU Xiwan, WANG Jianhao, XIAN Huacai, et al. Causal analysis of hazardous chemicals road transport accidents based on improved HFACS model [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(1): 1-8.

0 引言

我国是危险化学品(以下简称危化品)生产与使用大国,资源产业分布不均,90%以上的危化品需跨区域运输,道路运输量约占运输总量的 70%,道路运输是事故发生频率最高的运输方式^[1-3]。造成危化品道路运输事故的原因众多,其中人为因素高达 67%,占主导地位^[4]。从人因角度识别和分析危化品道路运输事故致因,并提出相应措施,对保障危化品道路运输安全具有重要意义。

学者们主要通过定性与定量的方法,分析危化品道路运输事故致因及风险预测等问题:刘子暄^[5]聚焦多起危化品道路运输事故案例,采用多元回归分析法识别与事故密切相关的因素;王欢欢等^[6]基于扎根理论分析危化品道路运输事故,绘制事故鱼刺图,构建灰色关联度计算模型,确定事故关键影响因素;张沚芊等^[7]采用贝叶斯网络对危化品道路运输事故进行参数学习,提出改进的风险预测模型,推理分析危化品道路运输事故风险因子间的影响关系。危化品道路运输事故研究中,人为影响因素的分析相对较少。

收稿日期:2024-05-13

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52102412);山东省自然科学基金项目(ZR2023QE060);济南市“新高校 20 条”自主培养创新团队项目(202333036)

第一作者简介:朱希望(2000—),男,山东无棣人,硕士研究生,主要研究方向为交通安全,E-mail:zhuxiwan@mail@163.com。

***通信作者简介:**王建豪(1988—),男,山东莱阳人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为交通安全与事故预防,E-mail:jianhaomail@163.com。

人因分析与分类系统(human factors analysis and classification system, HFACS)模型作为人因分析的重要工具之一,广泛应用于煤矿^[8-11]、建筑^[12-15]、航空^[16-18]、化工^[19-20]、特种设备^[21]等领域,并取得较好效果。王彪等^[22]为提高化工行业临时用电的安全管理水平,调整模型要素,构建化工行业的 HFACS 模型,从人因角度分析事故致因机理;许素睿等^[23]采用 HFACS 模型探讨建筑施工起重伤害事故的致因因素,通过软件 SPSS 的卡方检验和让步比分析,揭示模型中相邻层级间因素的相关性,为事故预防提供重要依据。目前采用 HFACS 模型开展危化品道路运输事故人因分析的研究相对较少。

为分析危化品道路运输事故的人为因素,以我国 2000—2020 年的 67 起危化品道路运输事故案例为研究对象,构建适用于危化品道路运输事故的 HFACS 模型,开展事故人因研究,为危化品道路运输事故预防与安全管理提供工作提供参考。

1 改进的 HFACS 模型

Shappell 等^[24]基于瑞士奶酪模型提出 HFACS 模型,最早应用于航空领域,HFACS 模型包括组织影响、不安全监督、不安全动作的前提条件、不安全动作 4 个人因失误层级,用于识别事故的潜在影响因素。

HFACS 模型具有开放性,能根据不同行业的具体特征适当改进,构建适合本行业的 HFACS 模型。以 2000—2020 年的 67 起危化品道路运输事故报告作为数据源,以标准 HFACS 模型为样例,参照危化品仓储事故人因分析与分类系统-煤矿(human factors analysis and classification system-mine, HFACS-MI)模型^[25],在专家的指导下改进 HFACS 模型,结构如图 1 所示。

在原模型框架基础上增加诱发事故的外部因素作为新的原因层级,包括组织外监管因素和相关方的影响,并细化具体原因因素。危化品道路运输行业涉及为企业提供安全咨询、体系构建、风险评估、安全检测等服务的诸多相关方,若相关方工作不到位,易导致事故发生。其次,将不安全动作的前提条件层级中的原因因素调整为人员因素和环境因素两类,考虑原操作者状态与人员因素的内涵较相似且在进行事故原因识别时易混淆,本文将操作者状态中的生理因素、心理因素合并为不良状态,并统一归到人员因素中。最后,删除不安全监督层级中的计划任务不恰当因素,因诸如管理者休息不足、工作任务过重等影响监管的因素在危化品道路运输行业中并不常见,且通过现有事故调查报告不易识别。

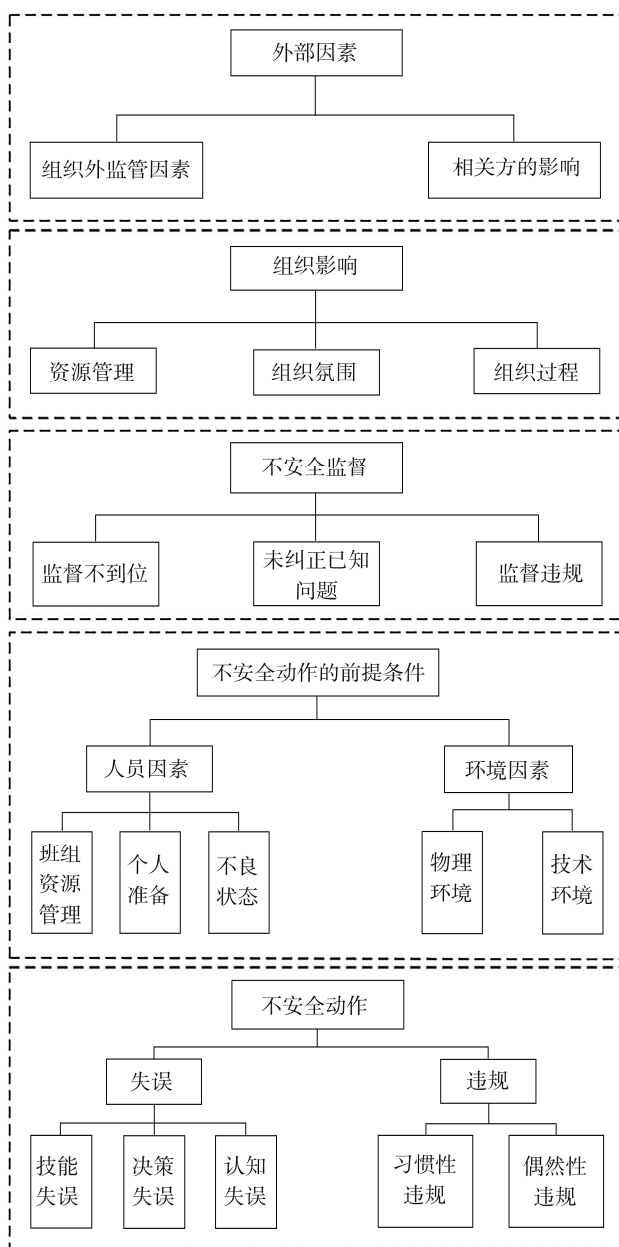


图 1 改进的 HFACS 模型

2 致因因素分析

通过查阅文献、各省市应急管理网站等,选取 2000—2020 年的 67 起危化品道路运输事故作为典型案例,将每起危化品道路运输事故依次按不安全动作、不安全动作的前提条件、不安全监督、组织影响及外部因素 5 个人因失误层级分类识别致因因素,统计事故中不同致因因素出现的频数,重点分析各层级中频数较大的致因因素。

2.1 不安全动作

根据事故致因机理,不安全动作是诱发事故的直接原因,主要涉及失误和违规两类,分类识别、统计导致危化品道路运输事故的所有不安全动作出现的频数,结果如表 1 所示。

表 1 不安全动作频数统计

不安全动作	致因因素	具体表现形式	频数	依据
失误	技能失误	驾驶技术不佳	8	事故调查报告
		不注意操作细节	11	
	决策失误	制动措施不当	15	事故调查报告
		事故后未及时报警	2	
	认知失误	视觉错误	8	事故调查报告
		误判距离	12	
违规	习惯性违规	疲劳驾驶	11	《中华人民共和国道路交通安全法》
		超速行驶	22	《中华人民共和国道路交通安全法》
		行车前未进行车辆安全检查	32	《道路危险货物运输管理规定》
		超载运输	38	《道路危险货物运输管理规定》
		违规载运	17	《道路危险货物运输管理规定》
	偶然性违规	紧急情况未按应急预案处理	4	《道路危险货物运输管理规定》

由表 1 可知:频数最大的不安全动作主要体现在习惯性违规层面,包括超载运输、行车前未进行车辆安全检查、超速行驶,频数分别为 38、32、22。通过事故调查报告发现事故中“小车大罐”“大吨小标”等现象频发,一旦车辆存在缺陷,行车中突遇紧急情况时极易引发事故;行车中因罐体缺陷、轮胎爆裂、轮胎起火、制动失效及无安全警示标志等多种因素引发的事故频频出现,故驾驶员在行车前对车辆进行安全检查是事故预防的关键环节之一;汽车的制动距离随车速的增大而增大,超速行驶时,制动距离大幅增大,极易发生追尾等事故,在弯道处超速行驶时,易发生侧翻等事故,故驾驶员在行车时须严格按照规定车速行驶。

2.2 不安全动作的前提条件

HFACS 模型将不安全动作的前提条件视为不安全动作产生的重要影响层级,该层级包含各类主观原因,分为人员因素和环境因素。分类识别、统计导致危化品道路运输事故的所有不安全动作的前提条件出现的频数,结果如表 2 所示。

由表 2 可知:注意力分散和不良天气出现频数较大,分别为 25 和 13。驾驶员因生理或心理原因导致的注意力分散,易引发如未保持安全车距、未按规定车道行驶及夜间会车时未切换灯光等危险行为,极易引发车辆碰撞导致危化品泄露爆炸;雨、雪、雾等恶劣天气同样影响行驶环境,据事故调查报告可知因路面结冰发生 3 起事故,能见度低发生 4 起事故,雨天发生 6 起事故,驾驶员在不良天气运输时应提前做好充足准备。

表 2 不安全动作的前提条件频数统计

不安全动作的前提条件	致因因素	具体表现形式	频数	依据
人员因素	不良状态	注意力分散	25	事故调查报告
		驾驶警惕性差	10	
		急躁心理	4	
		疲劳	11	
		疾病	2	
	班组资源管理	沟通不畅	7	事故调查报告
		缺乏团队合作	4	
	个人准备	违反休息规定	9	事故调查报告
环境因素	物理环境	不良天气	13	事故调查报告
		照明条件不良	2	事故调查报告
		路基松软	4	事故调查报告
		无警示标志	3	《危险化学品安全管理条例》
	技术环境	车辆安全设施不足	5	《道路危险货物运输管理规定》
		道路设计缺陷	4	事故调查报告

2.3 不安全监督

不安全监督层级的致因大类主要是监督不到位。分类识别、统计导致危化品道路运输事故的所有不安全监督出现的频数,结果如表 3 所示。

表 3 不安全监督频数统计

致因因素	具体表现形式	频数	依据
监督不到位	动态监测不足	22	《道路运输车辆动态监督管理办法》
	监督人员水平不足	6	《道路运输车辆动态监督管理办法》
	安全教育培训不到位	38	《道路危险货物运输管理规定》
	安全生产资质审查工作不到位	2	《中华人民共和国安全生产法》
未纠正已知问题	未处理安全隐患	4	事故调查报告
	缺乏整改追查	5	
监督违规	允许无资质人员操作	14	《道路危险货物运输管理规定》
	虚假记录	7	事故调查报告

由表 3 可知:安全教育培训不到位的频数最大,为 38,主要源于相关单位或部门未严格执行危险货物道路运输的相关规定,所提供的培训内容不合理或不完善,导致驾驶员和押运员技能经验不足,未能有效识别运输过程中的风险因素并做出正确决策,影响应急处置行为。动态监测不足出现频数较大,事故调查报告显示,有 22 家企业未严格执行车辆动态监督的相关规定,车辆动态监控形同虚设或监控设备安装不全面、离线率较高,危化品运输过程中未能实时监督与管理驾驶员行为,导致运输过程中的一些安全隐患未及时发现。

2.4 组织影响

根据组织行为学原理,组织行为通过影响个体行为导致事故发生,组织层面的影响因素是诱发事故的根本原因。组织影响频数统计如表 4 所示。

表 4 组织影响频数统计

致因因素	具体表现形式	频数	依据
资源管理不当	持证上岗管理缺失	9	《危险化学品安全管理条例》
	专职安全管理人员不足	8	《道路危险货物运输管理规定》
	车辆管理缺失	25	《道路危险货物运输管理规定》
不良的组织氛围	管理人员安全意识缺失	18	事故调查报告
	企业负责人法制意识缺失	8	
	重效益轻安全	34	
组织过程漏洞	安全生产主体责任未落实	31	《中华人民共和国安全生产法》
	应急管理不到位	18	《道路危险货物运输管理规定》
	安全管理制度执行不到位	21	《道路危险货物运输管理规定》
	隐患排查治理制度执行不到位	9	《危险化学品安全管理条例》

由表 4 可知:组织影响层级的主要表现形式为重效益轻安全和安全生产主体责任未落实,频数分别为 34、31,因企业对安全文化建设不足,组织结构设置不合理,导致组织内缺乏安全意识,未形成保障危化品安全运输的良性环境。车辆管理也是必不可少的环节,危化品运输前需根据危化品特性选择特定车辆,并定期检查和维修,防止因设备老化或缺失等原因引发道路运输事故。

2.5 外部因素

根据事故致因理论,外部因素是事故发生的诱因之一,主要涉及政府层面的监管因素和相关方的影响,频数统计如表 5 所示。

表 5 外部因素频数统计

致因因素	具体表现形式	频数	依据
组织外监管因素	应急响应不足	8	《道路危险货物运输管理规定》
	指导和监督不足	34	《危险化学品安全管理条例》
	安全宣传不足	14	《危险化学品安全管理条例》
	隐患排查不全面	11	《危险化学品安全管理条例》
相关方的影响	签发虚假证书	3	事故调查报告
	安全服务不足	21	

由表 5 可知:指导和监督不足的频数最大,主要由于交通运输部门对企业动态监控监督不足及安全监管部門工作不力等所致。政府及相关部门需按国家法律法规、标准规范的要求,指导和监督企业落实国家及地方法律法规,严禁车辆挂靠经营,积极开展车辆年检及安全教育培训等监督检查工作。相关方的影响主要表现为安全服务不足,如未能为企业提供全面有效的安全咨询、缺乏深入细致的风险评估及安全检测不全面等,对危化品道路运输安全构成潜在威胁。

3 卡方检验与让步比分析

卡方检验是检验 2 个及以上分类变量关联程度的方法。采用该方法研究上、下层级间致因因素的相关性,若显著性概率 $p < 0.05$,说明上、下层级间致因因素的因果关系显著。让步比(odds ratio, OR) x_{OR} 是用来判断上层因素缺失后是否导致下层因素出现的指标,可衡量 HFACS 框架中相邻层级间致因因素的

因果关系,若 $x_{OR}>1$,表示上层因素的缺失使得下层因素出现的可能性增大。

基于 67 起危化品道路运输事故人为因素的统计数据,采用软件 SPSS 对 HFACS 模型中相邻层级间进行卡方检验与让步比分析,层级 1~5 分别代表外部因素、组织影响、不安全监督、不安全动作的前提条件、不安全动作,统计满足 $p<0.05, x_{OR}>1$ 的结果,如表 6 所示。

表 6 改进 HFACS 模型中不同层级间因果关系的卡方检验和让步比分析

相邻层级	致因因素	卡方检验		x_{OR}	95%的置信区间	
		卡方	p		下限	上限
1 与 2	组织外监管因素 * 组织过程漏洞	9.639	0.002	3.036	1.491	6.179
	组织外监管因素 * 资源管理不当	4.329	0.037	2.364	1.044	5.352
2 与 3	组织过程漏洞 * 监督不到位	10.484	0.000	3.074	1.542	6.127
	资源管理不当 * 监督违规	4.054	0.044	2.922	1.014	8.423
3 与 4	监督不到位 * 人员因素	15.659	0.001	4.063	1.999	8.257
	监督违规 * 人员因素	3.918	0.048	2.519	0.996	6.366
4 与 5	人员因素 * 违规	15.967	0.000	3.267	1.812	5.890
	人员因素 * 技能失误	4.073	0.044	2.786	1.009	7.691

注: * 表示致因因素间的因果关系, * 前的因素为因, * 后的因素为果。

由表 6 可知:层级 1 中的组织外监管因素与层级 2 中的组织过程漏洞有显著因果关系, $x_{OR}=3.036$, 表明组织外监管因素缺失导致组织过程漏洞发生的可能性增大 3 倍;层级 2 与层级 3 中存在 2 组显著因果关系,其中组织过程漏洞与监督不到位因果关系最显著, $x_{OR}=3.074$,说明组织过程漏洞导致监督不到位发生的可能性增大 3 倍;层级 3 中的监督不到位与层级 4 中人员因素的因果关系最显著, $x_{OR}=4.063$ 。表明组织外监管因素、组织过程漏洞及监督不到位增大危化品道路运输事故的可能性。

根据表 6 中统计数据绘制相邻层级间的因果关系,如图 2 所示。危化品道路运输事故发生的关键路径为组织外监管因素→组织过程漏洞→监督不到位→人员因素→违规,该路径中的层级类别均存在大频数的致因因素(频数不小于 25),且相邻层级间均为强关联关系($3\leq x_{OR}<5$)。因此,需加强层级 1 中组织外监管工作,旨在切断其与层级 2 中组织过程的联系,同时,需进一步巩固和提升企业的安全管理与监督机制,确保一切操作均符合规范,杜绝违规行为,降低危化品道路运输事故率。

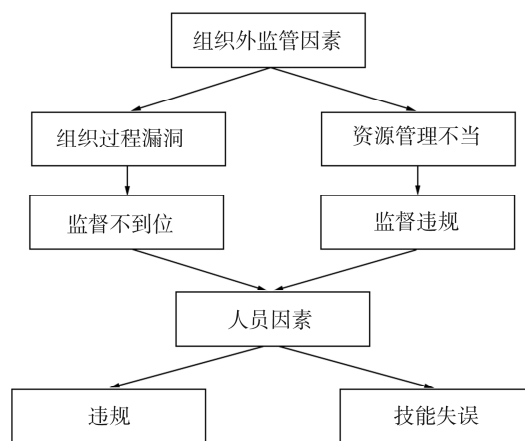


图 2 相邻层级因素间因果关系

4 预防措施

将 2000—2020 年的 67 起危化品道路运输事故的致因因素按改进后 HFACS 模型中的层级进行分类,重点分析引发事故的关键路径及高频人因因素,从外部监管和企业内部管理两方面提出管理措施。

4.1 外部监管

1) 提高相关部门监管效能,严格落实运输企业、驾驶员、押运员及相关方等各方责任,将危化品道路运输安全的重点工作纳入地方政府年度考核,强化执法和监管力度。

2) 强化车辆和驾驶员管理,实施严格的审核机制,全面评估车辆和驾驶员的资质。加大打击“大吨

小标”和非法改装车辆企业的力度,排除安全隐患。全面落实“四看三核两查”的要求,定期监督检查,确保在实践中贯彻执行各项规章制度。

4.2 企业内部管理

1)强化安全监管部门的队伍建设,提高企业管理人员监督水平,有效履行监管职责;完善车辆动态监控系统,提高危化品道路运输安全监控管理水平;加强对安全教育培训的督导,有效提高企业管理人员和作业人员安全意识;督促作业人员遵守规章,如行车前检查车辆安全等,确保运输过程的安全性和可控性。

2)强化组织过程管理,落实安全生产主体责任;加强应急体系建设,提高突发事件快速处置能力;在资源管理方面,企业应完善车辆管理制度,确保车辆定期维护、保养及计划性检修工作等。

5 结论

1)基于改进的 HFACS 模型,系统分析危化品道路运输事故致因因素,得到事故中人因因素的具体表现形式,频数最大的是不安全动作层级;组织过程和习惯性违规类别出现频数较大;超载运输、安全教育培训不到位、重效益轻安全、指导和监督不足等致因因素出现频数大,须引起重视和解决。

2)通过卡方检验与让步比分析,确定改进 HFACS 框架中相邻层级间的因果关系,得到不同层级间因素的因果关系图,确定危化品道路运输事故发生的關鍵路径为组织外监管因素→组织过程漏洞→监督不到位→人员因素→违规。

3)根据引发危化品道路运输事故的关键路径及高频人因因素,从外部监管和企业内部管理两方面提出切实有效的预防措施。

参考文献:

- [1] 肖建华,杨小川.我国危险化学品道路运输事故分析研究:基于2013—2018年危险化学品道路运输事故统计数据[J].政法学刊,2020,37(3):122-128.
- [2] 苏磊.基于深度数据挖掘的危险品运输事故关键影响因素及致因模型研究[D].青岛:青岛科技大学,2019.
- [3] 王建豪,曹瑞祥,宁泽辉,等.重特大危险化学品道路运输事故原因与预防[J].山东交通学院学报,2021,29(3):17-24.
- [4] 沈小燕,李小楠,谢培,等.886起危险品罐式车辆道路运输事故统计分析研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):43-48.
- [5] 刘子暄.基于多元回归的危化品道路运输事故风险影响因素分析[J].山西交通科技,2021(3):103-106.
- [6] 王欢欢,李润求,涂源原,等.基于扎根理论与灰色关联的危化品道路运输事故致因分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(1):17-23.
- [7] 张沁芊,陈文瑛,邵海莉.危化品道路运输事故风险因子影响关系研究[J].安全,2023,44(5):24-31.
- [8] 张应语,刘琳.基于HFACS的中国特别重大煤矿事故研究[J].安全,2019,40(9):56-63.
- [9] 白彦龙,李海立,陈昱,等.基于HFACS的煤矿一般事故人因分析[J].煤矿安全,2021,52(5):250-255.
- [10] 沈中芹,曾旺,王瑞强,等.基于改进HFACS-MI模型的煤矿透水事故致因分析[J].安全与环境工程,2020,27(3):178-184.
- [11] 贺莹鸽.基于HFACS的煤矿工人习惯性违章行为形成机理研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [12] 李易淞,徐琴,周光毅.基于HFACS和SD的建筑工人不安全行为影响因素[J].沈阳大学学报(自然科学版),2023,35(6):521-528.
- [13] 马书美,苏义坤,郑志哲.基于改进HFACS的住宅工程质量缺陷致因分析[J].工程管理学报,2023,37(2):141-146.
- [14] 周艳.改进HFACS模型的地铁盾构安全事故人因研究[D].兰州:兰州理工大学,2023.
- [15] 李珏,李佳文.基于STAMP-HFACS的建筑坍塌事故风险因素分析[J].工程管理学报,2022,36(5):148-153.
- [16] 陈帮.基于HFACS-ME的典型航空维修人为差错原因分析及对策研究[J].内燃机与配件,2024(3):63-65.

- [17] 于郝欣,谢中朋. 基于 HFACS 模型的通用航空飞行事故致因研究[J]. 安全, 2021, 42(12): 31-35.
- [18] 陈高杰,杨晖. 基于 HFACS 的航空器维修不安全行为研究和应用[J]. 航空维修与工程, 2022(3): 66-68.
- [19] 徐德宇,王天瑜,梁跃强,等. 基于 HFACS 的化工企业火灾爆炸事故人因分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(11): 66-70.
- [20] 王晶,樊运晓,高远. 基于 HFACS 模型的化工事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(9): 81-86.
- [21] 许素睿. 基于 HFACS 的电梯事故人因分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 70-75.
- [22] 王彪,孟子尧,张晓磊,等. 化工行业临时用电安全 HFACS 模型及安全管理框架构建[J]. 安全, 2023, 44(6): 100-104.
- [23] 许素睿,韩梦. 基于 HFACS 的建筑施工起重伤害事故致因分析[J]. 安全, 2023, 44(7): 37-42.
- [24] SHAPPELL S A, WIEGMANN D A. The human factors analysis and classification system: HFACS: final report[R]. Washington, United States: Civil Aeromedical Institute, 2000.
- [25] 栗婧,蔡忠杰,任远,等. HFACS-MI 改进模型在危险化学品仓储事故人因分析中的应用[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 1052-1060.

Causal analysis of hazardous chemicals road transport accidents based on improved HFACS model

ZHU Xiwang, WANG Jianhao^{*}, XIAN Huacai, YU Yuanlin

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To prevent hazardous chemicals road transport accidents, the human factors analysis and classification system(HFACS) model improved by considering the specific manifestations of various causal categories in hazardous chemicals road transport accidents. The improved HFACS model is applied to categorize and analyze the causal factors of 67 hazardous chemicals road transport accidents occurring between 2000 and 2020, based on human error levels and causal categories. Chi-square tests and odds ratio analysis are used to explore the intrinsic connections between adjacent levels. The results show that the main causal factors at the individual level are violations and poor conditions, specifically including overloaded transportation, failure to conduct vehicle safety checks before driving, and distracted attention. At the organizational level, the key causal factors are inadequate safety education and training, insufficient dynamic monitoring, and a focus on profit over safety. Inadequate guidance and supervision are significant external-level factors. The improved HFACS model reveals significant causal relationships between factors at adjacent levels, with the key causal path for accidents being external regulatory factors→organizational process flaws→inadequate supervision→human factors→violations. Based on the identified key causal path and high-frequency causal factors, targeted preventive measures are proposed from both external regulation and internal corporate management perspectives.

Keywords: hazardous chemical; road transportation accident; HFACS; accident cause; chi-square test; odds ratio

(责任编辑:赵玉真)