文章编号:1008-1534(2024)02-0124-09

基于系统动力学的危险化学品运输风险因素研究

刘紫玉,乾文慧,陈军霞

(河北科技大学经济管理学院,河北石家庄 050018)

摘 要:为了降低危化品运输事故频次,规避危化品在运输过程中的风险,基于系统动力学模型,从人、机、环、管 4 个维度构建危化品运输风险因素指标体系,使用 AHP 法对指标权重进行赋值,结合风险因素间的因果关系构建参数方程,利用 Vensim 软件仿真模拟危化品运输风险水平的变化趋势,确定单因素变量值和人、机、环、管风险子系统权重的变化对危化品运输风险系统动力学模型的影响程度。结果表明:安全意识薄弱、设备故障等风险因素的变动以及人、机、环、管风险子系统的权重变动都会影响危化品运输风险水平,人、机、环、管 4 个子系统对危化品运输风险的影响程度从高到低依次是人、管、环、机。研究结果可为降低危化品运输过程中的风险和制定危化品运输事故预防策略提供一定参考。

关键词:物流系统管理;危险化学品;运输风险;风险因素;系统动力学

中图分类号:U492.3+36.3 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2024yx02006

Research on risk factors of hazardous chemicals transportation based on system dynamics

LIU Ziyu, QIAN Wenhui, CHEN Junxia

(School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to reduce the frequency of hazardous chemicals transportation accidents and avoid the risk of hazardous chemicals transportation, based on the system dynamics model, a risk factor index system of hazardous chemicals transportation was constructed from the four dimensions of man-machine-environment-management, the AHP method was used to assign the index weights, and parametric equations were built combining the causal relationship between risk factors. Vensim was used to simulate the change trend of the risk level of hazardous chemicals transportation, and the influence of the changes in the value of single factor variables and the weight value of the man-machine-environment-pipe subsystem on the whole model was determined. The results show that the changes in risk factors such as weak safety awareness, equipment failure, and the weight changes of the four subsystems of man-machine-environment-management will affect the risk level of hazardous chemicals transportation, and the impact degree of the four subsystems of man, machine, environment and management. The results can provide a certain reference for reducing the risk in the process of hazardous chemicals

收稿日期:2024-01-01;修回日期:2024-03-12;责任编辑:王海云

基金项目:河北省重点研发计划项目(22375414D)

第一作者简介:刘紫玉(1975—),女,河北赵县人,教授,博士,主要从事物流与供应链管理、信息化理论与方法等方面的研究。

E-mail:purpleyuliu@163.com

刘紫玉,乾文慧,陈军霞. 基于系统动力学的危险化学品运输风险因素研究[J]. 河北工业科技,2024,41(2):124-132.

LIU Ziyu,QIAN Wenhui,CHEN Junxia. Research on risk factors of hazardous chemicals transportation based on system dynamics[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2024,41(2):124-132.

transportation and formulating the prevention strategy of hazardous chemicals transportation accidents.

Keywords: logistics system management; hazardous chemicals; transportation risk; risk factors; system dynamics

伴随着中国经济的迅猛发展，现代工业化水平的不断提高，企业使用的危险化学品（以下简称危化品）种类和数量也在不断增加，由此引发的事故率也呈现上升趋势。危化品事故灾害具有破坏性大、毒性强、影响范围广、经济损失严重、人员伤亡众多等显著特点。根据中国物流与采购联合会危化品物流分会资料显示，2023 年中国危险货物运输总量保持在 18 亿 t 左右，道路运输是其主要的运输方式，占比 63%。运输车辆的移动性以及危化品特殊的理化性质，导致危化品运输车辆成为一个流动的风险源，危化品运输面临着严峻的安全挑战。

目前学者们对危化品运输风险的研究主要集中在 2 个方面。1）风险因素的识别：施式亮等[1]从系统工程中“4M”因素出发，综合考虑影响危化品道路运输安全的人的因素、物的因素、环境因素、管理因素，并将其作为准则层，具体划分了 21 个指标，构建出危化品道路运输风险因素评估体系；涂源原等[2]从人员、装备、货物、管理及环境等多个角度，剖析危化品道路运输事故的致灾机理，并构建了风险量化评估指标体系；GUO 等[3]根据以往运输风险的研究进展和相关理论，结合中国沿海地区危化品事故特征，将影响危化品运输的风险因素分为 6 类，分别是驱动因素、车辆因素、气象环境因素、道路环境因素、管理因素及危化品因素。2）风险因素的评估：CHENG 等[4]提出了一种多米诺事故定量风险模型，并以此对上海市金山区的一起案例进行分析，得出驾驶人状态、道路类型、天气因素和车辆间距对危化品运输事故社会风险有重要影响；杨璧帆等[5]提出组合赋权-灰色聚类风险评价方法，对某企业的甲醇运输风险进行评价，得出“违规驾驶”“液态危化品特性”和“驾驶员安全意识”3 项风险指标对事故的影响程度较大，应重点防控；王旭磊等[6]将 DEMATEL 法与 ISM 法结合起来，对影响危化品运输事故的风险因素进行分析，得出危化品公路运输事故的关键原因；王欢欢等[7]通过收集整理危化品道路运输事故信息，利用灰色绝对关联分析法对选取的 158 起事故案例进行分析，有效识别出危化品道路运输事故的关键因素；陈文瑛等[8]利用 2017—2021 年的危化品道路运输事故数据进行机器学习，建立动态风险预测模型，推理分析得出“疲劳驾驶”会造成危化品运输事故风险的增加。

同时，系统动力学方法在危化品运输的相关研究中也得到了广泛应用，程志友等[9]在演化博弈模型的基础上，利用系统动力学模型仿真分析不同参数变化下博弈双方的策略选择机制，为港口危化品运输管理提出对策建议；孙广林等[10]利用系统动力学方法，通过调整安全投入比例进行情景仿真模拟，揭示了危化品运输路线安全系统结构及风险动态演化规律；吕植勇等[11]利用系统动力学方法对内河危化品运输系统安全进行了仿真模拟。以上研究论证了系统动力学模型在危化品运输方面的可行性，为危化品运输风险仿真分析提供了理论基础与方法支撑。

综上所述，目前研究主要集中于危化品运输风险因素的识别，也有一些学者对风险因素体系进行评估研究，寻求对危化品运输风险有效管控的方法。现有对风险影响因素的研究多是静态的，但在危化品运输风险系统中，风险因素及其相互之间的作用使风险水平值在风险链传播过程中是不断变化的，因此需要动态地、全局性地剖析危化品运输风险变化规律，然而，此类研究鲜有文献报道。基于此，本文在已有研究的基础上，将危化品运输风险因素划分为人员因素、机的因素、环境因素和管理因素，结合系统动力学理论，建立危化品运输风险系统动力学模型，利用 Vensim 软件进行仿真分析，直观地研究人员因素、机的因素、环境因素及管理因素对危化品运输风险的影响，并提出风险规避方面的建议，旨在降低危化品在运输过程中的风险。

1　危化品运输风险因素分析

一般来说，风险是事故发生的可能性，其大小决定了事故导致后果的严重程度。由文献分析可知，学者们对于风险因素的类别划分多是基于“人、机、环、管”4 个方面来进行的。安全管理理论中的“人、机、环、管”四要素最初是从工业制造企业管理中“人、机、料、法、环”引申而来的，并被广泛应用于多个领域，目前已成为系统内因素分析的划分方式。其最大优势是把人、设备、环境及管理看作系统的四大要素，通过对 4 个系统的性能、特性进行深入研究，并利用系统之间的相互连接、信息传递、影响关联等，将它们融为一体，形成一个互相关联的复杂系统。

本文基于文献分析和危化品特性，对危化品运输风险因素进行梳理、筛选并归类，并结合《中华人民共和国道路运输条例》《危险化学品安全管理条例》等相关法律法规，将事故的产生原因划分为人员因素、机的因素、环境因素以及管理因素，初步构建了危化品运输风险因素指标体系，如表 1 所示。

表 1 基于文献分析的危化品运输风险因素指标体系

Tab. 1 Risk factor index system of hazardous chemicals transportation based on literature analysis

风险因素	表征指标	指标选取文献来源
人员因素(A)	安全意识薄弱(A_1)	[1,6,12-14]
	疲劳上岗(A_2)	[3,8,12,15-16]
	司机错误判断路况(A_3)	[17-18]
	心理素质不稳定(A_4)	[1,17]
	专业能力不足(A_5)	[1,6,12-13]
	操作不当(A_6)	[3,8,16]
	违规操作(A_7)	[8,16]
机的因素(B)	危化品自身性质(B_1)	[1-2,6]
	危化品包装不合格(B_2)	[3,6,16]
	运输载态(B_3)	[1,17-19]
	设备老化磨损(B_4)	[8,16]
	设备未定期检修(B_5)	[1,6,20]
	设备故障(B_6)	[1-3,16]
环境因素(C)	气象情况(C_1)	[1-3,12,16]
	道路状况(C_2)	[1,3,6,8,16]
	交通运输状况(C_3)	[1-2,6,19]
管理因素(D)	人员安全培训不足(D_1)	[1,3,12]
	应急管理能力不足(D_2)	[1-2,12-13]
	监控预警投入不足(D_3)	[1,19]
	安全体系不健全(D_4)	[1,19]
	安全激励制度不完善(D_5)	[1,19]
	设备管理不到位(D_6)	[2-3,12,16]

同时考虑到大数据、人工智能等新兴信息化技术在物流行业的应用,本文引入了“智能化监控预警不足”指标,以评估企业借助智能化平台进行风险发现和预警的能力。本文最终构建的指标体系如图 1 所示。

2 基于系统动力学的危化品运输风险模型构建

2.1 系统动力学方法概述

系统动力学是一门分析和解决系统问题的交叉综合学科,它既做定性研究也做定量研究。系统动力学根据系统内部构成因素互为因果的反馈特征,从系统内部结构出发,探寻问题产生的根本原因,重点研究系统的行为模式与特征,并以此为基础,利用计算机技术,结合模型仿真分析,探寻系统结构与行为规律间的动态关联。

本文利用 Vensim PLE 9.3.5 软件进行仿真模拟,系统动力学模型建立步骤如图 2 所示。

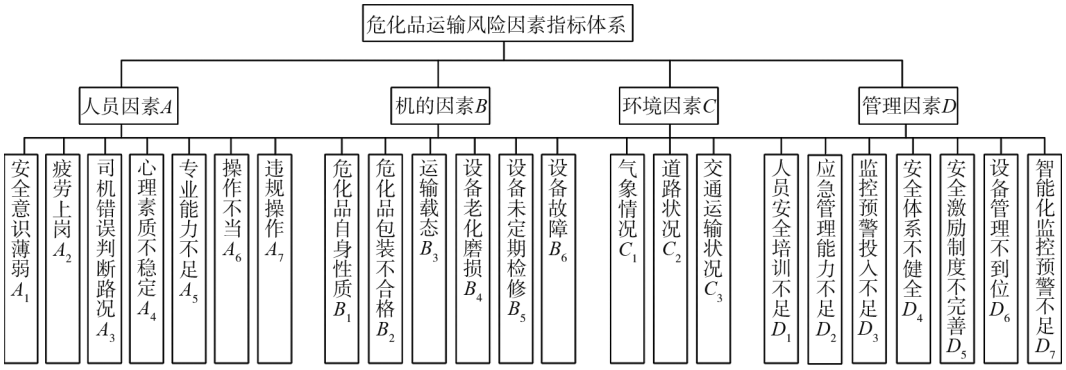


图 1 危化品运输风险因素指标体系

Fig. 1 Risk factor index system for the transportation of hazardous chemicals

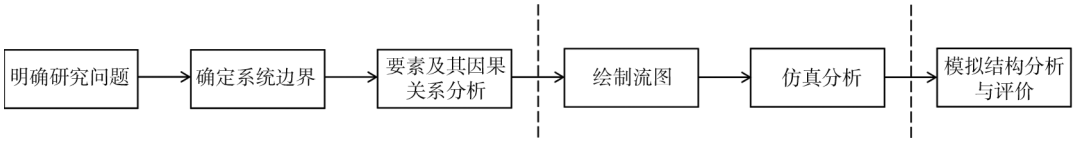


图 2 系统动力学模型建立步骤

Fig. 2 Steps of system dynamics model building

2.2 因果关系分析

通过前文分析,将模型分为 4 个子系统,分别是人员风险子系统、机的风险子系统、环境风险子系统和管理风险子系统(以下简称人、机、环、管风险子系统)。根据因素间的作用关系构建因果关系模型,进而分析各因素之间的反馈类型。其中,人、机、环、管风险子系统都会在一定程度上对危化品运输的整体风险水平造成影响。人员是危化品运输的直接接触者,其安全意识、专业能力对危化品运输的风险水平有很大的影响。除此之外,管理风险也在一定程度上影响人员风险与机的风险,如对员工进行安全培训,可以提高员工的安全意识,减少员工因安全意识薄弱造成的操作不当等情况,进而影响人员风险水平;对设备进行管理可以减少设备故障出现

的频次，减少机的风险的发生。根据子系统中各因素的因果机制和各子系统之间的关联性，构建危化品运输风险的因果关系图，其因果关系如图 3 所示。

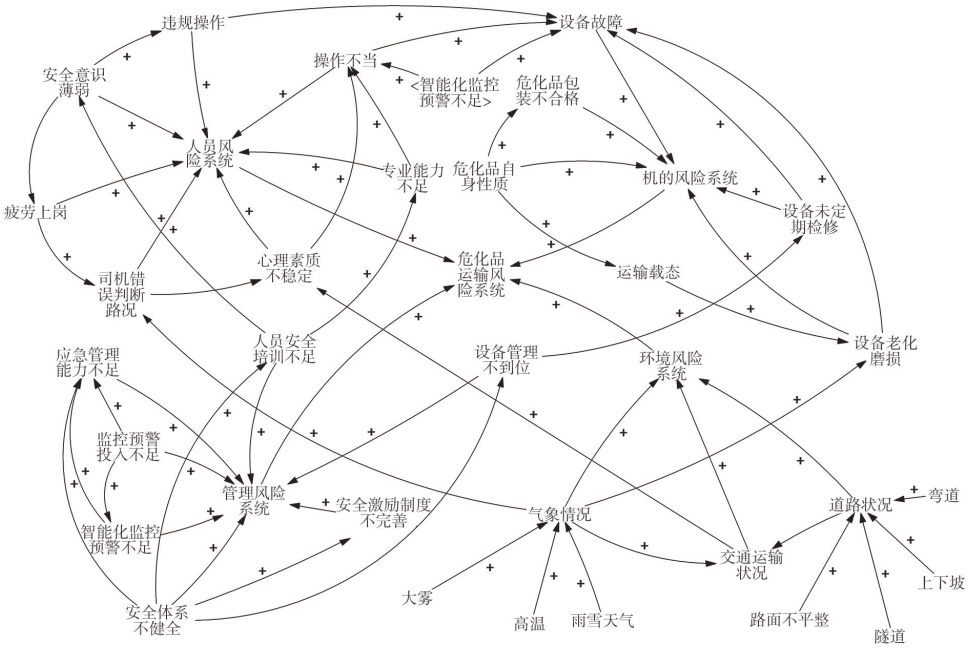


图 3　危化品运输风险因果关系图

Fig. 3　Causal diagram of the risk of transportation of hazardous chemicals

根据危化品运输风险系统因果关系图，可得到 6 条危化品运输风险系统主要的反馈回路：

1）安全意识薄弱→疲劳上岗→司机错误判断路况→心理素质不稳定→操作不当→人员风险→危化品运输风险；

2）人员安全培训不足→安全意识薄弱→违规操作→设备故障→机的风险→危化品运输风险；

3）安全体系不健全→设备管理不到位→设备未定期检修→设备故障→机的风险→危化品运输风险；

4）安全体系不健全→人员安全培训不足→专业能力不足→操作不当→人员风险→危化品运输风险；

5）危化品自身性质→运输载态→设备老化磨损→设备故障→机的风险→危化品运输风险；

6）气象情况→司机错误判断路况→心理素质不稳定→操作不当→人员风险→危化品运输风险。

2.3　存量流量图构建

基于因果关系，绘制出危化品运输风险存量流量图，如图 4 所示。

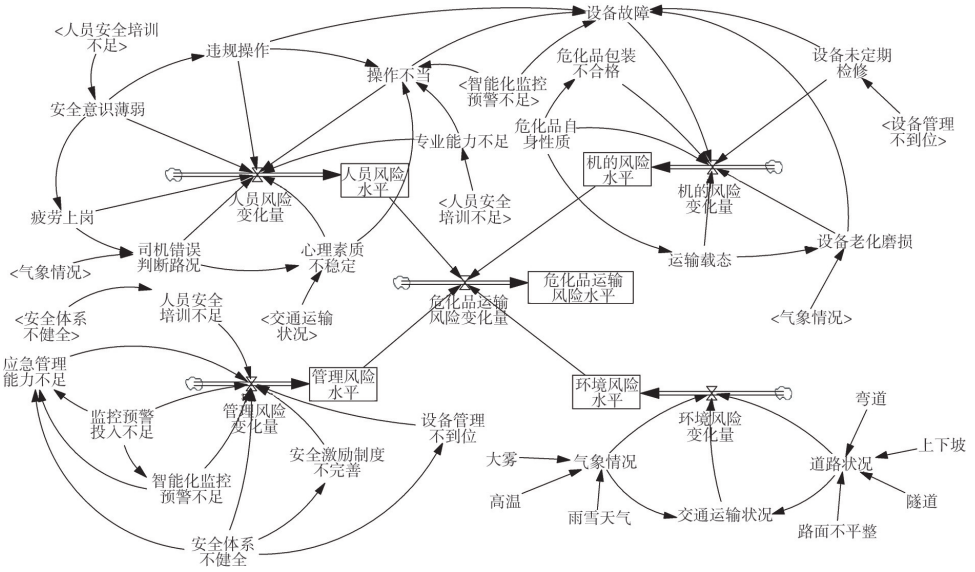


图 4　危化品运输风险存量流量图

Fig. 4　Hazardous chemicals transportation risk stock flow chart

该图主要涉及状态变量、速率变量和常量，其中包括：人员风险水平、机的风险水平、环境风险水平和管理风险水平 4 个状态变量；人员风险变化量、机的风险变化量、环境风险变化量及管理风险变化量 4 个速率变量；以及安全意识薄弱、违规操作、设备故障、危化品自身性质等 23 个常量。

2.4 方程的构建

基于危化品运输风险因素和系统动力学存量流量图，对危化品运输风险系统动力学模型建立系统动力学方程，主要变量的系统动力学方程如表 2 所示。

表 2 危化品运输风险的系统动力学部分方程

Tab. 2 Equations for the system dynamics part of the risk of transporting hazardous chemicals

类型	变量名称	表达式
状态	危化品运输风险水平(L)	$L=\mathrm{INTEG}(R)$
状态	人员风险水平(L_A)	$L_A=\mathrm{INTEG}(R_A)$
状态	机的风险水平(L_B)	$L_B=\mathrm{INTEG}(R_B)$
状态	环境风险水平(L_C)	$L_C=\mathrm{INTEG}(R_C)$
状态	管理风险水平(L_D)	$L_D=\mathrm{INTEG}(R_D)$
速率	危化品运输风险变化量(R)	$R=L_A\times W_1+L_B\times W_2+L_C\times W_3+L_D\times W_4$
速率	人员风险变化量(R_A)	$R_A=A_1\times W_{11}+A_2\times W_{12}+A_3\times W_{13}+A_4\times W_{14}+A_5\times W_{15}+A_6\times W_{16}+A_7\times W_{17}$
速率	机的风险变化量(R_B)	$R_B=B_1\times W_{21}+B_2\times W_{22}+B_3\times W_{23}+B_4\times W_{24}+B_5\times W_{25}+B_6\times W_{26}$
速率	环境风险变化量(R_C)	$R_C=C_1\times W_{31}+C_2\times W_{32}+C_3\times W_{33}$
速率	管理风险变化量(R_D)	$R_D=D_1\times W_{41}+D_2\times W_{42}-D_3\times W_{43}+D_4\times W_{44}+D_5\times W_{45}+D_6\times W_{46}+D_7\times W_{47}$

3 仿真模拟与敏感性分析

3.1 指标权重分析

通过模型构建，进而对实际情况的仿真模拟，本文采用层次分析法(AHP 法)对指标权重进行赋值，为此邀请 6 位专家(包括 3 位危化品运输企业的高级管理者和 3 位从事危化品运输风险研究的学者)组成专家组进行问卷调查，对危化品运输风险的影响因素(指标)进行打分，采用 9 标度法构造两两比较判断矩阵，使用 AHP 方法中的和积法，确定了各风险因素的相关权重，具体结果详见表 3。

表 3 危化品运输风险指标权重

Tab. 3 Weight of the risk index of hazardous chemicals transportation

一级指标	权重值	二级指标	权重值
人员风险 W_1	0.313 3	安全意识薄弱 W_{11}	0.264 2
		疲劳上岗 W_{12}	0.090 0
		司机错误判断路况 W_{13}	0.067 3
		心理素质不稳定 W_{14}	0.062 5
		专业能力不足 W_{15}	0.107 8
		操作不当 W_{16}	0.202 3
		违规操作 W_{17}	0.205 9
机的风险 W_2	0.251 1	危化品自身性质 W_{21}	0.066 2
		危化品包装不合格 W_{22}	0.067 2
		运输载态 W_{23}	0.102 7
		设备老化磨损 W_{24}	0.209 2
		设备未定期检修 W_{25}	0.214 7
		设备故障 W_{26}	0.340 1
环境风险 W_3	0.156 3	气象情况 W_{31}	0.315 3
		道路状况 W_{32}	0.350 1
		交通运输状况 W_{33}	0.334 5
管理风险 W_4	0.279 3	人员安全培训不足 W_{41}	0.117 3
		应急管理能力不足 W_{42}	0.104 0
		监控预警投入 W_{43}	0.153 5
		安全体系不健全 W_{44}	0.281 8
		安全激励制度不完善 W_{45}	0.057 7
		设备管理不到位 W_{46}	0.105 8
		智能化监控预警 W_{47}	0.179 8

3.2 仿真分析

引入系统中变量的系统动力学方程，由于变量初始值对危化品运输风险系统动力学模型的运行结果影响较小(见表 3)，所以将危化品运输风险水平、人员风险水平、机的风险水平、环境风险水平和管理风险水平等 5 个水平变量的初始值设为 0，安全意识薄弱、违规操作、危化品自身性质等 23 个常量初始值设为 1，设置仿真时间为 2 年，仿真步长为 1 个月。通过系统动力学 Vensim PLE 9.3.5 软件对模型进行仿真，能够直观地了解到危化品运输风险水平的变动趋势，如图 5 所示。

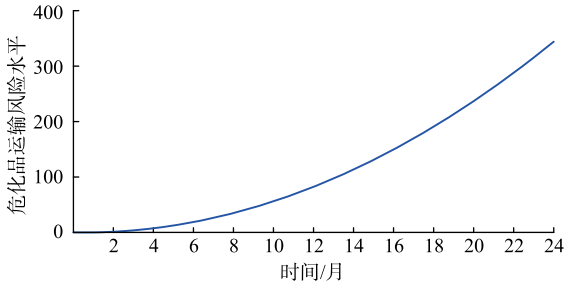


图 5 危化品运输风险水平曲线

Fig. 5 Risk level curve of hazardous chemicals transportation

从风险水平曲线可以看出，运行 4 个月后，危化品运输风险水平呈现指数上升的趋势，其风险的累积效应较为明显。通过仿真模拟，可以观察到危化品运输风险系统中各子系统风险水平的动态变化，从而对未来的发展趋势进行预测，进而对其进行有效监控。

3.3　灵敏度分析

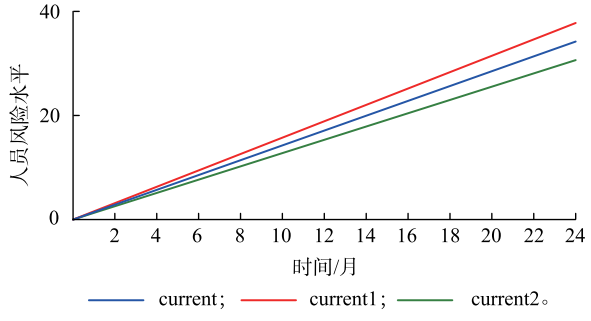
灵敏度分析是指通过改变某一变量的值，来观察单一因素变量对其他变量的影响方式和影响程度，从而确定该变量的数值改变对于整个模型的影响程度[21]。灵敏度分析可以检查模型选取的变量是否正确，是否能正确反映真实系统的决策过程。本文以安全意识薄弱和设备故障 2 个指标为例，进行灵敏度分析。具体情况如表 4 所示，仿真结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知，指标数值的改变并不会影响子系统风险水平和整体危化品运输风险水平的发展趋势，且该走势与指标变化情况呈正相关，说明该模型较为稳定，可以进行下一步分析。

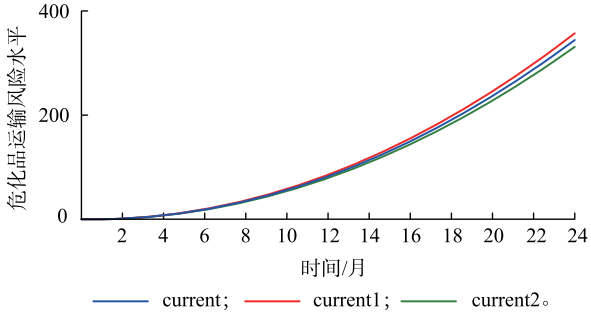
表 4　危化品运输风险各因素变化情况

Tab. 4　Changes in the risk factors of hazardous chemicals transportation

组别	变　量	具体描述
1	仅改变安全意识薄弱	current 代表初始情况，current1 代表安全意识薄弱增加 50% 的情况，current2 代表安全意识薄弱降低 50%的情况
2	仅改变设备故障	current 代表初始情况，current3 代表设备故障增加 50% 的情况，current4 代表设备故障降低 50%的情况



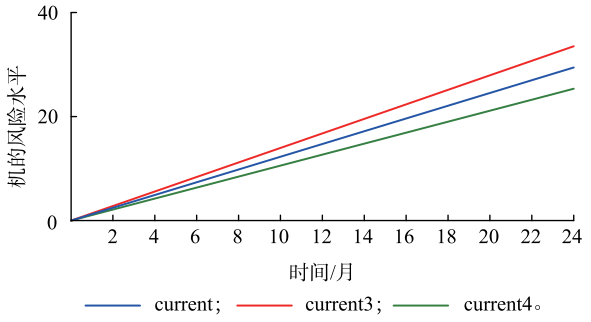
a）改变安全意识薄弱时的人员风险水平



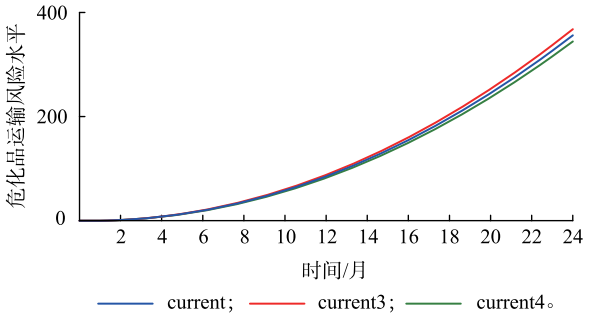
b）改变安全意识薄弱时的危化品运输风险水平

图 6　仅改变安全意识薄弱的风险水平变化趋势

Fig. 6　Trend of risk level when only changing the weak security awareness



a）改变设备故障时的机的风险水平



b）改变设备故障时的危化品运输风险水平

图 7　仅改变设备故障时的风险水平变化趋势

Fig. 7　Trend of the risk level when only changing the equipment failure

3.4 情景分析

通过依次调整人、机、环、管风险子系统的权重，分别对其危化品运输风险水平的影响程度进行仿真分析。具体调整情况如表 5 所示，运行结果如图 8 所示。

表 5　不同情景下的危化品运输风险水平

Tab. 5　Risk levels of hazardous chemicals transportation under different scenarios

模型	曲 线	人员因素	机的因素	环境因素	管理因素
1	current	0.313 3	0.251 1	0.156 3	0.279 3
2	current9	0.463 3	0.201 1	0.106 3	0.229 3
3	current10	0.263 3	0.401 1	0.106 3	0.229 3
4	current11	0.263 3	0.201 1	0.306 3	0.229 3
5	current12	0.263 3	0.201 1	0.106 3	0.429 3

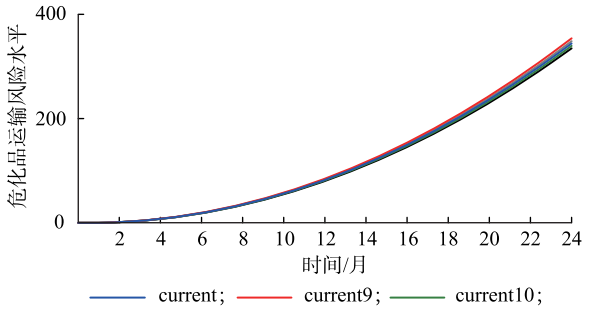


图 8　不同情景下的危化品运输风险水平曲线

Fig. 8　Transport risk curve of hazardous chemicals under different scenarios

由图 8 可知，当依次改变人、机、环、管风险子系统的权重时，都会造成危化品运输风险水平的变化，其中当人员风险子系统和环境风险子系统的权重依次变大时，会加大危化品运输风险，而当机的风险和管理风险的权重依次变大时，会降低危化品运输风险。仿真结果表明，当增大人员风险对危化品运输风险的影响程度时，危化品运输风险水平的变动程度最大，其次是管理风险对危化品运输风险的影响，最后是环境风险和机的风险。

虽然增加机的风险子系统和管理风险子系统的权重可以降低危化品运输风险水平，但最根本的措施是降低各子系统的风险水平，进而有效降低危化品运输风险。在管理风险子系统和人员风险子系统中，管理需要人作为执行者达到管理的目的，所以人是直接作用者，而且通过相关措施，可以控制人员因素在危化品运输风险系统中的影响程度，进而达到降低危化品运输风险的目的。机的风险子系统主要是由危化品自身和运输过程中涉及到的设备设施造成的，危化品自身特殊的理化性质易使相关设备设施造成磨损，减少使用寿命，在日复一日的使用过程中易造成机的不安全状态，影响危化品运输的风险水平。当加大管理系统中的监控预警投入，并借助大数据等新兴技术实现智能化监控预警时，危化品运输过程将会更加透明和安全，同时使用智能化监控预警可以降低人员风险与机的风险。智能化监控预警主要对人员和设备进行监控，当人员工作状态与设备运行过程存在风险时，可以给出相应提醒，及时采取相应措施应对风险，减少了人员的操作不当风险与设备故障风险。环境风险的变化主要是由天气、道路状况等难以控制的因素影响，恶劣天气会更加考验驾驶员的专业能力，比如：在大雾天气时驾驶员的视线会受影响，雨雪天气导致运输途中车辆打滑，甚至造成车辆翻撞等严重后果，这时往往需要驾驶员的丰富经验来保障安全运输。因此，环境因素对危化品运输风险的影响主要体现在难以控制性，需要对症下药，提出针对性的措施，从而有效降低危化品运输风险。

3.5 对比分析

现有文献大都是以系统风险辨识为基础，如施式亮等[1]、涂源原等[2]、王欢欢等[8]、郑时求等[20]，都是以危化品运输系统风险为主体建立多级风险评估指标体系，结合定量或定性模型，如层次分析法[1,22]、模糊综合评估法[22-24]、贝叶斯网络[23]等，确定系统风险等级。选取文献[24]与本文研究结果进行比较分析。韦相宇等[24]基于模糊联系度，以西安某公司至上海的运输任务为例，评估危化品公路运输安全风险，将指标体系分为人员因素、道路因素、自然环境因素、车辆因素、危化品因素、组织管理因素 6 类；研究结果得出一级指标中除危化品因素外，其他因素均存在风险上升趋势；风险上升趋势越明显，危化品公路运输整体风险越大。本文通过系统动力学仿真模拟，得出人、机、环、管风险子系统中，单个子系统风险上升，导致危化品运输整体风险也呈上升趋势。调整人、机、环、管 4 个子系统的权重，进行情景分析，得出不同情境下人、机、环、管对危化品运输风险系统的影响程度也会造成危化品运输整体风险水平的变动。通过对比可知，2 种方法对于系统整体的风险评估结果基本一致，均显示风险因素的不安全状态会导致风险水平的上升。

韦相宇等[24]利用模糊联系度，对构建的指标体系进行评价，确定静态风险等级，并对系统动态风险趋势进行预测，重点突出动态风险变化过程，实现安全风险等级评定，但是在风险评价过程中，更多的是将因素视为单独的个体，缺乏对风险因素间互相影响的描述。在危化品运输风险系统中，每个因素并不是单独存在的，风险因素间的互相影响造成风险水平的波动，如人的不安全状态会造成机的风险加剧，管理层面的健全与落实，又可以在一定程度上减少人员风险和机的风险，因此在进行风险研究的过程中，可以将风险因素间的因果关系纳入考虑范围，而本文使用系统动力学方法建立了风险因素间的因果关系，利用 Vensim 软件仿真模拟出改变单因素的变量值和人、机、环、管风险子系统的权重时，危化品运输风险水平的变化趋势，从而确定其对整个模型的影响程度，有效弥补了韦相宇等[24]评价方法的不足，能更全面地反映危化品运输风险系统中风险因素的影响情况。

4 结 语

本文利用系统动力学方法，构建了危化品运输风险仿真模型，通过调整人、机、环、管风险子系统的权重进行情景分析，研究其对危化品运输风险的影响程度，主要结论如下。

1)从人、机、环、管 4 个方面构建了危化品运输风险因素指标体系，通过文献、法律法规的分析初步得出 22 个指标，又考虑到信息化技术在物流行业中的应用，引入了智能化监控预警不足指标。共计 23 个指标，较为全面地覆盖了危化品运输风险的影响因素。

2)通过仿真分析，得出人、机、环、管 4 类子系统风险均与整体风险变化正相关，且危化品运输

风险是一个复杂的动态系统，整体风险存在显著的累积效应。

3）通过调整人、机、环、管风险子系统的权重并进行仿真模拟，可知人员风险对危化品运输风险系统的影响最大，其次依次是管理风险、环境风险和机的风险。

本文所得危化品运输风险系统动力学模型仿真结果，对降低危化品运输风险与制定事故预防策略具有一定参考价值。但随着数智化物流的发展，危化品运输过程中可能会增加新的风险因素，因此，不断丰富指标体系是下一步研究必须考虑的内容。

参考文献/References：

[1] 施式亮，陈晓勇，刘勇，等. 基于 AHP 耦合度的危化品道路运输风险因素耦合特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版)，2021，36(1)：23-29.
SHI Shiliang，CHEN Xiaoyong，LIU Yong，et al. Research on the coupling characteristics of risk factors of dangerous chemicals in road transportation based on AHP coupling degree[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)，2021，36(1)：23-29.

[2] 涂源原，李润求，王欢欢，等. 基于改进分级指数法的危化品道路运输风险评估[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版)，2021，36(4)：8-14.
TU Yuanyuan，LI Runqiu，WANG Huanhuan，et al. Risk assessment of road transportation of hazardous chemicals based on improved grading index method[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)，2021，36(4)：8-14.

[3] GUO Jian，LUO Cheng，MA Kaijiang. Risk coupling analysis of road transportation accidents of hazardous materials in complicated maritime environment[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，229：108891.

[4] CHENG Jinhua，WANG Bing，CAO Chenxi，et al. A quantitative risk assessment model for domino accidents of hazardous chemicals transportation[J]. Processes，2023，11(5)：1442.

[5] 杨璧帆，周荣义，李丽，等. 基于组合赋权-灰色聚类法的液态危化品道路运输风险评价[J]. 矿业工程研究，2023，38(2)：65-72.
YANG Bifan，ZHOU Rongyi，LI Li，et al. Risk assessment of road transportation of liquid hazardous chemicals based on combination weighting and grey clustering method[J]. Mineral Engineering Research，2023，38(2)：65-72.

[6] 王旭磊，孙春薇. 危险化学品公路运输事故致因分析及安全管理对策[J]. 公路交通科技，2022，39(1)：167-174.
WANG Xulei，SUN Chunwei. Analysis on causes of accidents in hazardous chemicals road transport and safety management countermeasures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2022，39(1)：167-174.

[7] 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.
WANG Huanhuan，LI Runqiu，TU Yuanyuan，et al. Analysis of the causes of road transportation accidents for hazardous chemicals based on grounded theory and grey relation[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)，2022，37(1)：17-23.

[8] 陈文瑛，邵海莉，张沚芊. 驾驶疲劳对危险化学品道路运输事故风险的影响规律[J]. 安全与环境学报，2024，24(2)：644-653.
CHEN Wenying，SHAO Haili，ZHANG Zhiqian. Influence of driving fatigue on the risk of road transport accidents of hazardous chemicals[J]. Journal of Safety and Environment，2024，24(2)：644-653.

[9] 程志友，罗锋，吴蕊，等. 基于系统动力学模型的港口危化品运输管理演化博弈[J]. 上海海事大学学报，2023，44(3)：71-78.
CHENG Zhiyou，LUO Feng，WU Rui，et al. Hazardous chemical transportation management evolutionary game in ports based on system dynamics model[J]. Journal of Shanghai Maritime University，2023，44(3)：71-78.

[10] 孙广林，刘君. 危化品道路运输路线安全风险演化系统动力学仿真[J]. 公路与汽运，2020(6)：43-48.

[11] 吕植勇，赵裕，易俊威，等. 基于系统动力学的内河危化品运输系统安全管理研究[J]. 安全与环境学报，2021，21(5)：2114-2120.
LYU Zhiyong，ZHAO Yu，YI Junwei，et al. Research on the safety management of the inland river dangerous chemicals transportation system based on the system dynamics[J]. Journal of Safety and Environment，2021，21(5)：2114-2120.

[12] LI Xin，CHEN Chao，HONG Yidu，et al. Exploring hazardous chemical explosion accidents with association rules and Bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，233：109099.

[13] 卢建锋，王彪. 基于 ISM 和 BN 的危险品仓储系统安全风险评估[J]. 消防科学与技术，2021，40(12)：1770-1774.
LU Jianfeng，WANG Biao. Safety risk assessment of dangerous goods storage system based on ISM and Bayesian network[J]. Fire Science and Technology，2021，40(12)：1770-1774.

[14] 马国乐. 石化企业危化品仓储风险评估及对策研究[J]. 中国经贸导刊，2020(29)：128-130.

[15] LI Yuntao，WANG Yumeng，LAI Yuying，et al. Monte carlo-based quantitative risk assessment of parking areas for vehicles carrying hazardous chemicals[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，231：109010.

[16] 骆成，陈霞，路亚妮，等. 中国沿海危化品道路运输系统风险耦合分析[J]. 西安科技大学学报，2022，42(5)：975-984.
LUO Cheng，CHEN Xia，LU Yani，et al. Risk coupling analysis of hazardous chemicals road transportation system in China's coastal areas[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology，2022，42(5)：975-984.

[17] 吕永伟. 港口危化品物流风险耦合作用分析及仿真研究[D]. 邯郸：河北工程大学，2022.
LYU Yongwei. Analysis on Risk Coupling of Port Hazardous Chemicals Logistics and Simulation Research[D]. Handan：Hebei University of Engineering，2022.

[18] 李丽,周荣义,王凌睿,等.基于后悔理论的危化品公路桥梁运输风险评估[J].安全与环境工程,2022,29(2):71-77.
LI Li,ZHOU Rongyi,WANG Lingrui,et al. Risk assessment of road bridge transportation of hazardous chemicals based on regret theory[J]. Safety and Environmental Engineering,2022,29(2):71-77.

[19] 迟钧鸿.道路危险货物运输安全风险耦合分析及保险优化[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2016.
CHI Junhong. Based on Analysis of Transport Safety Risk Coupling of Dangerous Goods and Insurance Optimization[D]. Shenyang:Shenyang Aerospace University,2016.

[20] 郑时求,周荣义,杨璧帆,等.危化品槽罐车运输事故关键致因及传递路径研究[J].中国安全科学学报,2023,33(4):172-178.
ZHENG Shiqiu,ZHOU Rongyi,YANG Bifan,et al. Research on key causes and transmission paths of hazardous chemicals tank truck transportation accidents[J]. China Safety Science Journal,2023,33(4):172-178.

[21] 孙国帅,姜德龙,张小令,等.基于系统动力学的绿色建造企业生产力影响因素研究[J].建筑经济,2021,42(10):99-104.
SUN Guoshuai,JIANG Delong,ZHANG Xiaoling,et al. Study on the influencing factors of green construction enterprise productivity based on system dynamics[J]. Construction Economy,2021,42(10):99-104.

[22] 孔志军,郭延辉,胡东平,等.基于AHP和模糊综合评价法的生态文旅景区运营安全风险评价[J].河北工业科技,2021,38(5):382-387.
KONG Zhijun,GUO Yanhui,HU Dongping,et al. Operational safety risk assessment of ecological cultural tourism scenic spots based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2021,38(5):382-387.

[23] 瞿英,王旭茗,王玉恒,等.基于多态模糊贝叶斯网络的城市燃气管道事故风险预测与诊断研究[J].河北科技大学学报,2023,44(4):411-420.
QU Ying,WANG Xuming,WANG Yuheng,et al. Risk prediction and diagnosis of urban gas pipeline accidents based on polymorphic fuzzy Bayesian network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2023,44(4):411-420.

[24] 韦相宇,田世祥,代张音,等.基于模糊联系度的危化品公路运输安全风险评估[J].河北工业科技,2022,39(5):373-380.
WEI Xiangyu,TIAN Shixiang,DAI Zhangyin,et al. Safety risk assessment of hazardous chemicals in highway transportation based on fuzzy relation degree[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2022,39(5):373-380.