

## 危化品道路运输路线安全风险演化系统动力学仿真\*

孙广林, 刘君

(公安部道路交通安全研究中心, 北京 100062)

**摘要:** 危化品道路运输具有高风险性, 安全风险变化是非线性演化的过程。为揭示危化品运输路线安全系统结构及风险动态演化规律, 采用系统动力学方法建立系统变量因果关系图、流图及系统动力学方程, 刻画变量间反馈与控制的作用关系, 以指定运输路线交通安全数据量化模型参数, 通过调整安全投入配置比例组合形成 7 类仿真情景。仿真结果表明, 降低安全投入 1.6% 的条件下, 提高管理机制和安全培训教育投入, 同时降低车辆安全技术投入比例, 可实现系统风险下降 61.9% 的防控目标。

**关键词:** 道路运输; 危化品运输; 安全风险; 风险演化; 系统动力学

中图分类号: U492.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0043-06

危化品具有易燃、易爆、毒性等, 危化品道路运输的风险高, 从风险致因要素出发明晰运输安全风险演化过程及规律, 对危化品运输路线事故风险防控具有重要意义。危化品道路运输系统是由复杂关联的若干元素及子系统组成的动态系统, 包含人、物、环境、管理单因素耦合风险和多因素耦合风险。陈晓等采用 N-K 模型量化危化品道路运输风险, 发现耦合过程中参与的风险因素越多, 事故发生的概率越大。科学的风险防控措施能有效预防危化品运输车辆事故, 通过系统动力学方法仿真分析不同安全管理策略对运输风险的影响, 发现危险行为处罚与问责措施与运输风险信息总量成负相关关系, 信息反馈渠道建设与运输风险信息总量成正相关关系。此外, 危化品运输风险评估对于风险控制策略选择具有重要参考意义。20 世纪 80 年代开始美国运输部制定了一系列危险品运输风险评价指南, 多类危险品运输风险评估方法逐渐完善。中国危化品运输风险评估主要是从历史事故特征中识别风险因素, 建立评价指标体系和风险评估模型, 依据风险评价标准划分风险等级或接受值域。危化品运输风险评估中, 除交通事故风险外, 还需考虑储罐安全阀泄漏等非交通事故风险及未来新技术的研究特征和预期成果对风险的影响。应用系统动力学方法研究系统安全问题, 能结合定量与定性分析的优势, 从内部机制、微观结构建模, 模拟系统内部结构与动态行为的关系, 适合于分析危化品运输风险演化过程。该

文采用系统动力学方法建立系统变量间的因果关系和反馈路径及风险系统动力学方程, 描述危化品运输路线安全风险演化过程, 通过实例仿真不同安全成本投入及配置情景, 得到系统各类风险演化趋势, 为防控危化品运输路线安全风险提供指导。

## 1 风险演化过程与模型

### 1.1 系统边界与风险因素

(1) 系统边界。划分系统边界的目的是确定危化品运输安全系统包含的风险要素及风险要素之间的相互作用关系, 形成完整的闭合回路。依据危化品运输路线历史交通事故致因及形态统计数据, 运输风险因素可归结为人员、车辆、环境和管理 4 个方面, 各因素间相互作用表现为交通事故发生的概率及损失。此外, 风险要素相互影响不包含恶劣天气、不可抗力等外部事故致因。

(2) 风险因素。危化品运输路线交通安全风险因素, 既是诱发交通事故风险的诱因, 也是风险演化传导的载体。其主要影响如下: 1) 人的失误。人员风险包括驾驶员和管理人员风险, 人在从事运输或安全管理的过程中, 由于安全行车意识和从业能力的限制, 导致出现高风险行为。2) 车辆故障。危化品运输车辆长时间运行致使可靠性下降, 造成车辆故障引发车辆安全风险。3) 环境干扰, 危化品运输环境主要由道路环境和交通环境组成, 其综合影响可采用交通事故进行表征, 其中道路环境中线形设

\* 基金项目: 公安部技术研究计划项目(2018JSYJB05)

计指标要素与交通事故直接相关。4) 管理缺陷。通过危化品运输车辆 GPS 与远程视频监控,可实现远端安全风险预警,实时发布安全提示等管理干预措施,有效降低运输安全风险。

### 1.2 风险演化过程

危化品道路运输交通安全风险演化是风险因素在外界条件干扰下相互作用的过程,当系统风险由量变突破一定阈值发生质变时,则诱发交通事故。危化品运输安全风险演化过程见图 1。

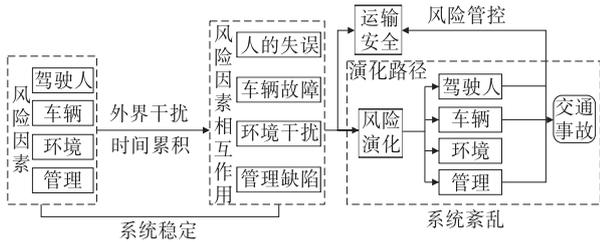


图 1 危化品运输安全风险演化过程

危化品道路运输过程中,车辆驾驶人是安全风险源的核心要素,当驾驶人、车辆、环境和管理风险子系统受外界条件影响相互作用时,若安全风险处于可调控范畴,则系统处于稳定状态。当驾驶人的失误、车辆故障、环境干扰或管理缺陷相互叠加作用,随时间演进导致其中一个或多个子系统风险突破一定阈值时,若及时控制风险发展趋势,则系统重回运输安全稳定状态;若系统风险失控,则会发生交通事故,系统处于紊乱状态。

### 1.3 风险演化模型

危化品运输系统安全风险是由人员、运输车辆、环境、管理 4 个风险子系统相互作用影响的结果,建立各子系统变量因果关系图和系统动力学流图,量化各子系统间的反馈与控制,能表征系统风险要素之间的作用关系。因果关系图中“+”表示变量间为正相关关系,“-”表示变量间为负相关关系。

(1) 人员风险子系统。安全教育培训与运输人员风险直接相关,主宰驾驶人安全行车意识和从业能力及管理员从业能力。人员风险子系统因果关系见图 2。其中包含 3 个负反馈回路:负反馈回路 I 为人员风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  安全教育培训  $\rightarrow$  从业能力  $\rightarrow$  管理员风险  $\rightarrow$  人员风险。负反馈回路 II 为人员风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  安全教育培训  $\rightarrow$  安全行车意识  $\rightarrow$  操作失误  $\rightarrow$  驾驶人风险  $\rightarrow$  人员风险。负反馈回路 III 为

人员风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  安全教育培训  $\rightarrow$  行车安全意识  $\rightarrow$  操作失误  $\rightarrow$  驾驶人风险  $\rightarrow$  人员风险。

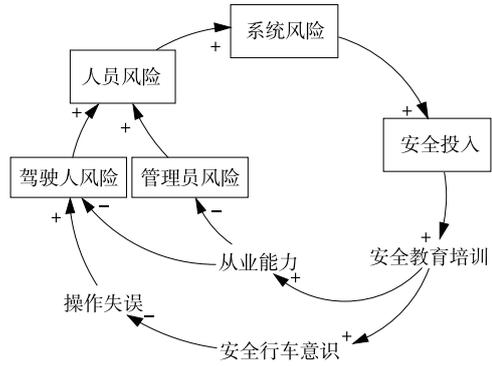


图 2 人员风险子系统的因果关系

(2) 车辆风险子系统。运输车辆风险主要取决于车辆安全技术水平,能有效降低车辆故障引发的事故风险。车辆风险子系统因果关系见图 3。其中包含 1 个负反馈回路:车辆风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  车辆安全技术水平  $\rightarrow$  车辆风险。

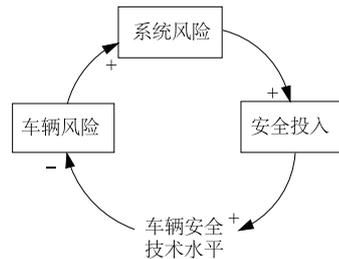


图 3 车辆风险子系统的因果关系

(3) 环境风险子系统。危化品运输环境风险包括道路环境、交通环境 2 个要素,交通事故是表征其风险的关键要素,而驾车操作失误、道路线形设计指标是造成交通事故的主要原因。环境风险子系统因果关系见图 4。其中包含 2 个负反馈回路:负反馈回路 I 为环境风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  安全教育培训  $\rightarrow$  安全行车意识  $\rightarrow$  操作失误  $\rightarrow$  交通事故  $\rightarrow$  道路风险  $\rightarrow$  环境风险。负反馈回路 II 为环境风险  $\rightarrow$  系统风险  $\rightarrow$  安全投入  $\rightarrow$  安全教育培训  $\rightarrow$  安全行车意识  $\rightarrow$  操作失误  $\rightarrow$  交通事故  $\rightarrow$  交通风险  $\rightarrow$  环境风险。

(4) 管理风险子系统。危化品运输管理风险是

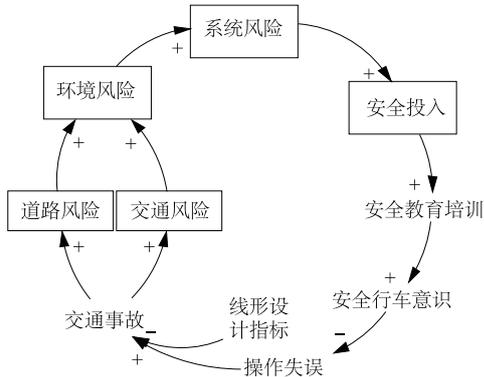


图 4 环境风险子系统的因果关系

风险要素相互作用缓慢累积变化的结果,取决于风险预警能力,而风险预警能力与管理机制完善程度及参与人员安全教育培训相关。管理风险子系统因果关系见图 5。其中包含 2 个负反馈回路:负反馈回路 I 为管理风险  $\xrightarrow{+}$  系统风险  $\xrightarrow{+}$  安全投入  $\xrightarrow{+}$  安全教育培训  $\xrightarrow{+}$  风险预警  $\xrightarrow{-}$  管理风险。负反馈回路 II 为管理风险  $\xrightarrow{+}$  系统风险  $\xrightarrow{+}$  安全投入  $\xrightarrow{+}$  管理机制  $\xrightarrow{+}$  风险预警  $\xrightarrow{-}$  管理风险。

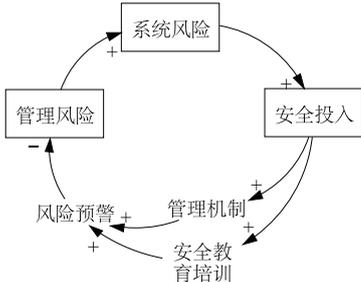


图 5 管理风险子系统的因果关系

(5) 系统流图。依据人员、车辆、环境、管理 4 个风险子系统因果关系包含的 8 个负反馈回路,借助 Vensim\_PLE 软件建立系统流图,描述危化品运输安全系统风险演化的累积效应(见图 6)。

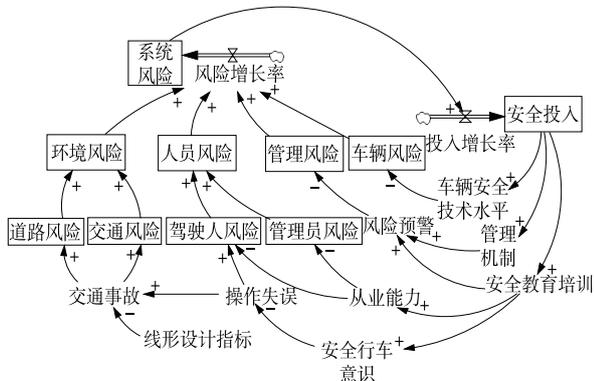


图 6 危化品运输安全系统流图

## 2 风险系统动力学方程

### 2.1 系统变量

危化品运输安全系统动力学模型变量包括状态变量、辅助变量、速率变量(见表 1)。

表 1 危化品运输安全系统变量符号

变量	符号	变量	符号
系统风险	$S_R$	环境风险	$C_R$
人员风险	$P_R$	交通风险	$T_R$
状态变量		道路风险	$R_R$
驾驶人风险	$D_R$	管理风险	$M_R$
管理员风险	$M_{Rs}$	安全投入	$S_{SI}$
车辆风险	$V_R$	投入增长率	$I_{gr}$
速率变量		车辆安全技术水平	$V_{st}$
风险增长率	$R_{gr}$	管理机制	$M_m$
从业能力	$P_a$	风险预警	$R_{pw}$
操作失误	$M_{iso}$	交通事故	$R_a$
辅助变量			
安全行车意识	$S_{dc}$		
安全教育培训	$S_{et}$		
常量			
线形设计指标	$L_i$		

### 2.2 动力学方程

系统动力学的建模过程体现了危化品运输安全风险蔓延、转化、衍生和耦合的演化过程,通过仿真风险演化过程和演化阶段,可进一步揭示风险演化机理。采用系统动力学软件 Vensim\_DSS 建立模型,定义  $\lambda$  为变量的影响因子,建立危化品运输安全系统动力学方程。状态方程见式(1)~(10),速率方程见式(11)、式(12),辅助方程见式(13)~(20)。

$$S_R = A + R_{gr} \cdot D_T \quad (1)$$

$$P_R = \lambda_{11} \cdot D_R + \lambda_{12} \cdot M_{Rs} \quad (2)$$

$$D_R = B - \lambda_{111} \cdot P_a + \lambda_{112} \cdot M_{iso}^a \quad (3)$$

$$M_{Rs} = C - \ln(P_a) \quad (4)$$

$$V_R = D - \lambda_{21} \cdot \ln(V_{st}) \quad (5)$$

$$C_R = \lambda_{31} \cdot R_R + \lambda_{32} \cdot T_R \quad (6)$$

$$R_R = \lambda_{311} \cdot R_a \quad (7)$$

$$T_R = \lambda_{321} \cdot R_a \quad (8)$$

$$M_R = E - \lambda_{41} \cdot \exp(R_{pw}/b) \quad (9)$$

$$S_{SI} = F + \text{STEP}(I_{gr}, t_1) \quad (10)$$

$$R_{gr} \cdot K_L = \lambda_1 \cdot P_R + \lambda_2 \cdot C_R + \lambda_3 \cdot M_R + \lambda_4 \cdot V_R - G \quad (11)$$

$$I_{gr} \cdot K_L = H + c \cdot \exp(-S_R/\lambda_5) \quad (12)$$

$$M_{iso} = L - \lambda_{ms} \cdot S_{dc} \quad (13)$$

$$S_{dc} = \lambda_{sis} \cdot S_{et} \quad (14)$$

$$P_a = \lambda_{ps} \cdot S_{et} \quad (15)$$

$$R_a = \lambda_{rm} \cdot M_{iso} + \lambda_{rl} \cdot L_i \quad (16)$$

$$V_{st} = \lambda_{sv} \cdot S_{st} \quad (17)$$

$$M_m = \lambda_{sm} \cdot S_{st} \quad (18)$$

$$S_{et} = \lambda_{ss} \cdot S_{st} \quad (19)$$

$$R_{pw} = \lambda_{mr} \cdot M_m + \lambda_{sr} \cdot S_{et} \quad (20)$$

式(1)、式(10)中,系统风险和安全投入为累积变量,其数值变化取决于时间累积  $D_T$  和增长率  $R_{gr}$ 、 $I_{gr}$  的变化;式(10)中,STEP 为阶跃函数,表示安全投入是在既定时刻突然改变的状态变量,具有阶段特性; $t_1$  为安全投入发生时刻,阶段性投入对长期决策不具有参考价值,需利用阶跃函数转化为平稳变化的投入策略。

### 2.3 模型参数量化

选取山东东营市河口区政府指定的危化品运输路线海昌路(见图7)作为系统仿真对象,确定仿真范围为顺河路—黄河路段,全长7.5 km。数据采集时段为2019年1—10月,主要来自视频卡口、122报警平台和运输企业车辆GPS监控平台。

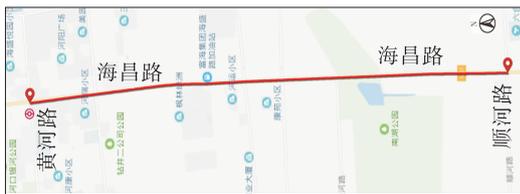


图7 危化品运输路线(海昌路)

海昌路布设的视频卡口数据显示,2019年1—10月本地注册危化品运输车辆占比超过90%。此外,本地危化品运输车辆、人员与管理安全投入全部来自运输企业,主要用于更新运输车辆以提高车辆安全技术水平( $V_{st}$ )、完善安全管理机制( $M_m$ )以增强风险预警能力、加大人员安全教育培训( $S_{et}$ )以提升其从业能力3个方面,降低危化品运输系统交通安全风险。危化品运输企业安全投入情况见表2。

表2 危化品运输企业安全投入情况

月份	投入额度/万元	各用途 $[V_{st}, M_m, S_{et}]$ 的金额/万元
2	1 840	[1 400, 200, 240]
4	140	[0, 80, 60]
6	120	[0, 60, 60]
8	110	[0, 60, 50]
10	110	[0, 60, 50]

依据海昌路卡口视频数据采集时限,系统仿真时限设定为10个月,仿真步长为2周。依据表2中企业安全投入配置额度,用于 $V_{st}$ 、 $M_m$ 、 $S_{et}$ 的资金比例为0.6、0.2、0.2,即 $\lambda_{sv} = 0.2$ 、 $\lambda_{sm} = 0.2$ 、 $\lambda_{ss} = 0.2$ 。

系统动力学方程中无法定量描述的系统变量采用打分法赋值,分值范围为0~10分,“0”表示最弱或水平最低,“10”表示最强或水平最高。海昌路道路线形为平直路段,线形设计指标 $L_i$ 较高,取值为9。根据获取的数据对系统动力学方程的变量初值与参数值进行标定,结果见表3。

表3 危化品运输安全系统变量初值与参数值

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\lambda_1$	0.425	$\lambda_{311}$	0.05	C	200
$\lambda_2$	0.04	$\lambda_{321}$	0.95	G	4 351
$\lambda_3$	0.02	$\lambda_{ms}$	0.6	D	1 500
$\lambda_4$	0.015	$\lambda_{sis}$	0.4	H	500
$\lambda_5$	18 000	$\lambda_{ps}$	0.3	b	80
$\lambda_{11}$	0.9	$\lambda_{rm}$	0.9	A	5 000
$\lambda_{12}$	0.1	$\lambda_{ri}$	0.1	E	1 500
$\lambda_{111}$	0.3	$\lambda_{sv}$	0.6	L	8 000
$\lambda_{112}$	0.000 1	$\lambda_{sm}$	0.2	c	2 500
$\lambda_{21}$	100	$\lambda_{ss}$	0.2	$L_i$	9
$\lambda_{41}$	0.1	$\lambda_{sr}$	0.3	B	5 000
$\lambda_{31}$	0.015	$\lambda_{mr}$	0.6	F	2 000
$\lambda_{32}$	0.085	a	2	$t_1$	2

## 3 系统仿真与结果分析

### 3.1 模型检验

为检验危化品运输系统动力学模型与系统风险演化实际表现的吻合情况,选取安全投入和交通事故指标,系统仿真时限设定为1—6月。运行仿真实验,输出2019年6月预测结果并与实际统计数据进行比较,结果见表4。

表4 仿真模型检验结果

项目	预测结果	统计数据	相对误差/%
安全投入	2 320	2 284	1.58
交通事故	7.1	7.0	1.43

由表4可知:仿真模型检验结果中,安全投入和交通事故仿真结果的误差均小于2%,具有较高的可信度,可应用系统动力学模型仿真危化品运输路线交通安全风险演化过程。

### 3.2 仿真情景设计

将仿真路段采集数据标定的模型参数及变量初值作为现实仿真情景1,通过调整车辆安全技术水平、管理机制、安全教育培训安全投入比例进行策略组合,与现实情景1共同形成7类仿真情景。各情景参数设置与变化幅度见表5。

表 5 仿真情景参数设置与变化幅度

仿真情景	车辆安全技术投入比例 $\lambda_{sv}$		管理机制投入比例 $\lambda_{sm}$		安全教育培训投入比例 $\lambda_{ss}$	
	资金比例	变化幅度/%	资金比例	变化幅度/%	资金比例	变化幅度/%
情景 1	0.6	—	0.20	—	0.20	—
情景 2	0.5	-16.7	0.10	-50	0.40	+100
情景 3	0.4	-33.3	0.30	+50	0.30	+50
情景 4	0.5	-16.7	0.40	+100	0.10	-50
情景 5	0.7	+16.7	0.25	+25	0.05	-75
情景 6	0.8	+33.3	0.10	-50	0.10	-50
情景 7	0.7	+16.7	0.05	-75	0.25	+25

注:变化幅度中,“+”表示较情景 1 增加的比例,“-”表示较情景 1 降低的比例。下同。

3.3 仿真结果分析

按照仿真情景参数设置,运行系统动力学模型模拟系统风险、安全投入、人员风险、车辆风险、环境风险、管理风险的变化趋势,通过与现实情景 1 对

比,分析不同安全投入分配条件对危化品运输系统要素安全风险的影响。不同仿真情景下危化品运输累积风险与安全投入指标变化见表 6。

(1) 系统风险。7 类情景下危化品运输系统风

表 6 不同仿真情景下危化品运输累积风险与安全投入指标变化

仿真情景	系统风险	安全投入	人员风险	车辆风险	环境风险	管理风险
情景 1	5 080	2 491	10 068	769	578	1 472
情景 2	+28.7%	+0.8%	+1.0%	+2.3%	+0.8%	-30.8%
情景 3	-61.9%	-1.6%	-2.0%	+2.6%	-1.5%	+0.2%
情景 4	-33.6%	-0.8%	-1.0%	+5.4%	-0.7%	-26.5%
情景 5	+47.4%	+1.3%	+1.6%	-2.2%	+1.1%	+0.6%
情景 6	+31.5%	+0.9%	+1.0%	-3.9%	+0.8%	+1.8%
情景 7	-15.6%	-0.4%	-0.5%	-2.0%	-0.4%	+1.7%

险变化趋势仿真结果见图 8。由图 8 可知:情景 2、5、6 与情景 3、4、7 下系统风险值,以现实情景 1 为分界线出现高低分列趋势。其中情景 1 下系统风险变化呈抛物线趋势,先上扬后降低;相较于情景 1,情景 5 下同时提高车辆安全技术水平投入 16.7%和管理机制投入 25%,降低安全教育培训投入 75%,累积系统风险增加幅度最大,为 47.4%,并呈线性增长趋势。情景 6 下车辆安全技术水平投入提高 33.3%,同时降低管理机制和安全教育培训投入 50%;情景 2 下安全教育培训投入提高 100%,同时车辆安全技术水平投入降低 16.7%、管理机制投入降低 50%。情景 6、2 下系统风险值及变化趋势基本一致,较情景 1 下累积系统风险分别增加 31.5%、28.7%。情景 3、4、7 下系统风险值均较现实情景 1

降低,降幅依次为 61.9%、33.6%、15.6%,其中情景 3 下同时提高管理机制和安全教育培训投入 50%、降低车辆安全技术水平投入 33.3%,累积系统风险呈抛物线下降趋势最显著。

(2) 安全投入。7 类情景下危化品运输系统安全投入变化趋势仿真结果见图 9。由图 9 可知:7 类仿真情景下,危化品运输系统安全投入总体呈线性增长趋势,且增长比例与系统风险变化正相关,即随着系统风险的增加,安全投入不断加大,反之安全投入减少。系统仿真时段内累积安全投入额度从大到小依次为  $S_{SI5} > S_{SI6} > S_{SI2} > S_{SI1} > S_{SI7} > S_{SI4} > S_{SI3}$ 。根据系统风险变化趋势,情景 3 下累积安全投入最小,对应的累积系统风险下降幅度最大,为

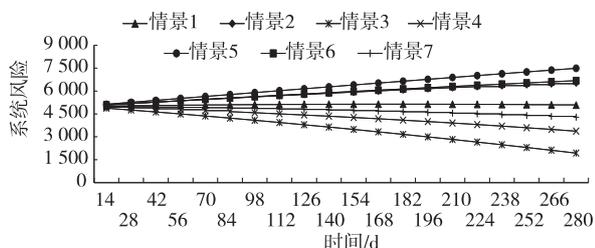


图 8 7 类情景下危化品运输系统风险变化趋势

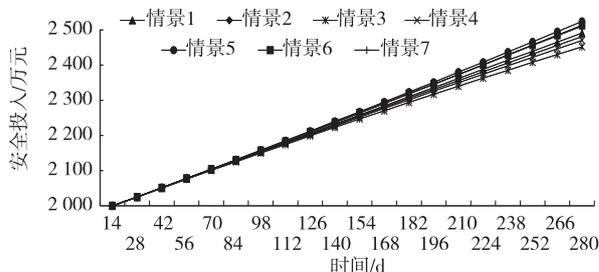


图 9 7 类情景下危化品运输系统安全投入变化趋势

61.9%；反之，情景5下累积安全投入最大，对应的累积系统风险增幅最大，为47.4%。

(3) 人员风险。7类情景下危化品运输系统人员风险变化趋势仿真结果见图10。由图10可知：7类仿真情景下危化品运输系统人员风险总体呈线性平行下降趋势。风险值大小排列顺序与系统风险值一致，即情景5下人员风险最高，较情景1下增加1.6%；情景3下人员风险最低，较情景1降低2%；

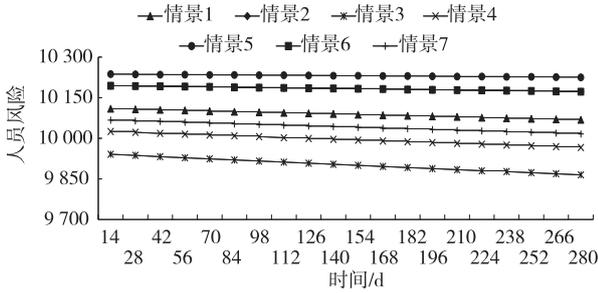


图10 7类情景下危化品运输系统人员风险变化趋势

情景2、6下人员风险值相同。

(4) 车辆风险。7类情景下危化品运输系统车辆风险变化趋势仿真结果见图11。由图11可知：7类仿真情景下危化品运输系统车辆风险总体呈线性平行下降趋势，风险值大小排列顺序为  $V_{R4} > V_{R3} > V_{R2} > V_{R1} > V_{R7} > V_{R5} > V_{R6}$ 。情景4下累积车辆风险最高，较情景1下累积车辆风险高5.4%；情景6下车辆风险下降最显著，较情景1下累积车辆风险降低3.9%；情景3、2下累积车辆风险值相近；情景7、5下累积车辆风险值相近。

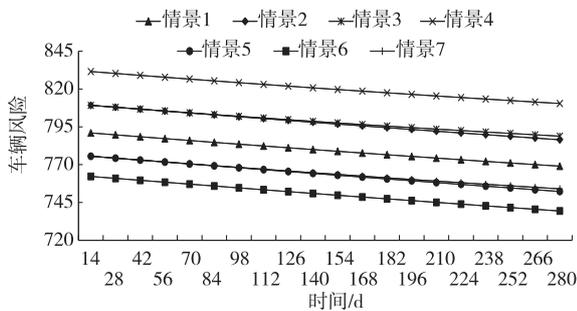


图11 7类情景下危化品运输系统车辆风险变化趋势

(5) 环境风险。7类情景下危化品运输系统环境风险变化趋势仿真结果见图12。由图12可知：7类仿真情景下危化品运输系统环境风险总体呈线性平行下降趋势，累积环境风险值大小排列顺序为  $C_{R5} > C_{R2} > C_{R6} > C_{R1} > C_{R7} > C_{R4} > C_{R3}$ ，其中情景2、6下风险值相近，情景2略高0.01。

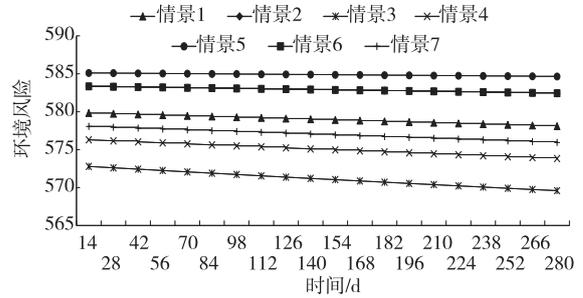


图12 7类情景下危化品运输系统环境风险变化趋势

(6) 管理风险。7类情景下危化品运输系统管理风险变化趋势仿真结果见图13。由图13可知：情景6、7、5、3下累积管理风险值依次降低，均略高于情景1下管理风险值，总体呈线性平行缓慢下降趋势。情景2、4下累积管理风险呈抛物线趋势下降最显著，较情景1下累积管理风险分别降低30.8%、26.5%。

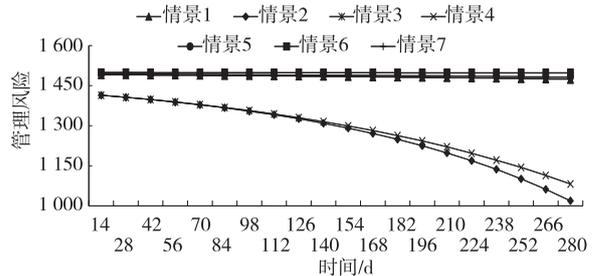


图13 7类情景下危化品运输系统管理风险变化趋势

### 4 结论

危化品运输路线交通安全风险演化系统动力学仿真结果表明，通过调节安全投入的配置比例，可实现不同系统风险防控效果。研究结论如下：

(1) 危化品运输安全总体投入降低1.6%的条件下，通过提高50%管理机制和安全培训教育投入，同时降低33%车辆安全技术投入配置比例，系统风险呈抛物线显著下降趋势，可实现系统风险61.9%的最大降幅。

(2) 危化品运输安全总体投入增加1.3%的条件下，提高16.7%车辆安全技术水平投入和25%管理机制投入，降低75%安全教育培训投入，系统风险仍呈线性增长趋势，系统风险最高增长47.4%。

### 参考文献：

[1] 黄崇福,刘安林,王野.灾害风险基本定义的探讨[J].自然灾害学报,2010,19(6):8-16.

(下转第64页)

种混合料的疲劳寿命大小为 10% TLA+10% 废胶粉复合改性沥青混合料 > 20% TLA+10% 废胶粉复合改性沥青混合料 > 40% TLA 改性沥青混合料, 10% TLA+10% 废胶粉复合改性沥青混合料的耐疲劳性最好, 其次是 20% TLA+10% 废胶粉复合改性沥青混合料, 40% TLA 改性沥青混合料的耐疲劳性最差。这可能是由于废胶粉的掺入增强了混合料的弹性, 从而提高了沥青混合料的耐疲劳性。

### 3 结论

(1) 与 40% TLA 改性沥青混合料相比, 20% TLA+10% 废胶粉、10% TLA+10% 废胶粉改性沥青混合料的高温稳定性有所降低, 但仍然表现优良。

(2) 与 40% TLA 改性沥青混合料相比, 20% TLA+10% 废胶粉、10% TLA+10% 废胶粉改性沥青混合料的低温抗裂性和耐疲劳性均明显提高。

(3) 与 40% TLA 改性沥青混合料相比, 20% TLA+10% 废胶粉改性沥青混合料的水稳定性略有提高, 而 10% TLA+10% 废胶粉改性沥青混合料的水稳定性略有下降, 但都满足规范要求。

### 参考文献:

[1] 冯新军, 郝培文, 查旭东. TLA 改性沥青及混合料的路用性能研究[J]. 公路, 2007(5): 161-166.

[2] 王琛艳. TLA 改性沥青评价指标试验对比分析[J]. 中

---

\*\*\*\*\*

(上接第 48 页)

[2] 李健, 白晓昀, 任正中, 等. 2011—2013 年我国危险化学品事故统计分析及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 142-147.

[3] 陈晓, 丁光. 基于 N-K 模型的危化品道路运输安全风险因素耦合研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 709-714.

[4] 赵江平, 刘小龙. 基于系统动力学的危化品物流企业安全管理策略仿真研究[J]. 物流科技, 2019(12): 30-35.

[5] LIST G F, MIRCHANDANI P B, TURNQUIST M A, et al. Modeling and analysis for hazardous materials transportation; Risk analysis, routing/scheduling and facility location[J]. Transportation Science, 1991, 25(2): 100-114.

[6] RHYNE W R. Hazardous materials transportation; Quantitative approach for truck and train [M]. Van Nostrand Rein hold, 1994.

[7] ROBERTO Bubbico, GIUSEPPE Mashie, BARBARA Mazzarotta, et al. Risk management of road and rail

外公路, 2016, 36(3): 325-327.

[3] 梁星敏, 黄康旭, 朱林. TLA 掺量对湖沥青改性沥青高低温性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(4): 614-618.

[4] 欧阳君, 陈春羽, 张垒. 天然湖沥青复配 SBS 改性沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(2): 40-42.

[5] 杨昆, 刘栋. 天然湖沥青+SBS 复合改性沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(7): 28-32.

[6] 田迎春, 韩森. RET 复配胶粉改性沥青混合料路用性能与耐久性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(1): 171-178.

[7] 刘向东. 活化橡胶改性沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 255-259.

[8] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[9] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[10] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[11] 张争奇, 罗要飞, 张苛. 沥青混合料汉堡车辙试验评价研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(3): 96-105.

[12] 郭寅川, 赵宾, 申爱琴, 等. 基于正交设计法的橡胶沥青性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(2): 7-14.

收稿日期: 2019-12-18

transport of hazardous materials in sicily[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006(19): 32-38.

[8] 杨强, 李延来. 基于质量功能配置法的危险品运输风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 65-70.

[9] 贾红梅, 米雪玉, 段满珍. 危险品道路运输定量风险分析研究[J]. 河北理工大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 188-192.

[10] 郭健, 陶行行, 赵钦, 等. 危险品公路运输安全保障技术的评估方法[J]. 公路交通科技, 2017, 34(增刊 2): 1-7.

[11] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

[12] 黄合来, 罗启章, 彭韵颖, 等. 山区高速公路隧道群路段危化品运输风险评价体系研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2107-2114.

收稿日期: 2020-05-08