

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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.002

TU Y Y, LI R Q, WANG H H, et al. Risk Assessment of Road Transportation of Hazardous Chemicals Based on Improved Grading Index Method [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(4): 8-14. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.002

# 基于改进分级指数法的危化品 道路运输风险评估

涂源原<sup>1</sup>,李润求<sup>1,2,3\*</sup>,王欢欢<sup>1</sup>,崔燕<sup>1,2,3</sup>,刘勇<sup>1,2,3</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为提升危化品道路运输风险评估的准确性,运用轨迹交叉事故致因理论,从危化品道路运输全路段的人员素质、运输装备、危险货物、安全管理及环境条件等方面分析事故致灾机理,构建风险量化评估指标体系,提出风险指数综合评估数学模型,完善并修正风险分级指数法的路径影响因子与安全补偿因子。通过实例分析不同路段组成的16条运输路径的风险特性和综合风险指数,获得了最佳运输路径。结果表明:改进的风险分级指数法能更加客观地反映危化品道路运输风险,为事故预防与控制提供了方法与思路。

**关键词:**危险化学品;道路运输;风险评估;分级指数;安全管理

中图分类号:X951 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)04-0008-07

## Risk Assessment of Road Transportation of Hazardous Chemicals Based on Improved Grading Index Method

TU Yuanyuan<sup>1</sup>, LI Runqiu<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Huanhuan<sup>1</sup>, CUI Yan<sup>1,2,3</sup>, LIU Yong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Key Laboratory of Safety Mining Techniques for Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of risk assessment for road transportation of hazardous chemicals, the theory of trajectory intersection accidents was used to analyze the disaster mechanism of the accident from the quality of personnel, transportation equipment, dangerous goods, safety management and environmental conditions of the entire section of road transportation of hazardous chemicals. A risk quantitative evaluation index system was constructed, a comprehensive risk index evaluation mathematical model was put forward, the path impact factor and safety compensation factor of the risk classification index method was improved and modified. By analyzing the risk characteristics and comprehensive risk index of 16 transport routes composed of different

收稿日期:2021-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074118);湖南省教育厅科学研究资助项目(19A167;18B210);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50152);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划资助项目(201943)

\*通信作者, E-mail: lirq\_hn@sina.com

road sections by example, the best transportation path was obtained, and the results show that the improved risk grading index method more objectively reflects the road transportation risks of hazardous chemicals, and provides methods and ideas for accident prevention and control.

**Keywords:** hazardous chemicals; road transportation; risk assessment; grading index; safety management

近年来,我国化工业的飞速发展,化工产品尤其是危险化学品(以下简称危化品)的种类与数量剧增.危化品多涉及异地运输,由于我国公路系统建设完善,具有连贯性与灵活性等特点,适合各种距离的危化品运输,因此,道路运输已成为危化品运输的主要运输方式<sup>[1]</sup>.据统计,我国危险货物道路运输量已占危险货物物流量的80%<sup>[2]</sup>,但道路运输危化品的过程存在较大风险,若发生泄露或爆炸,将造成重大人员伤亡与巨大财产损失,危化品运输事故的后果严重,安全形势严峻.

风险评估是研究危化品道路运输安全的主要方法,通过辨识风险与路径优化指标,结合事故定性或定量的评估模型进行风险评估,评估结果对运输中的路径选择、救援与安全管理等优化提供依据.国内外有关专家学者进行了各方面研究,如吴宗之等<sup>[3]</sup>通过引入路径风险评估与优化,提出了结构化过程运输风险评估体系;张明广等<sup>[4]</sup>通过变异系数法进行事故演变因素耦合,建立了危化品道路运输事故演化模型;施式亮等<sup>[5]</sup>将突变理论引入危化品道路运输,建立了突变模型与突变安全指标体系;陈文瑛等<sup>[6]</sup>将事故致因与D-S证据理论引入危化品运输风险评估模型,建立了运输情景模拟;Tubis A等<sup>[7]</sup>将危化品的运输过程、路线、时间与运输物引入TMS(Transport Management System)中,建立了高效经济的道路运输路线优化系统.

上述研究表明国内外学者从事事故统计、路径优化、引入新的理论等方面对危化品道路运输进行了研究,为危化品道路运输安全奠定了坚实的基础.由于运输条件的改变、法律法规的健全等,运输事故致因存在关联性、复杂性与动态变化性等特性,风险评估体系有待改进.分级指数法将现实运输风险快速分级,是一种有效的事故预防与控制的半定量方法,该方法将事故统计资料、运输货物潜在风险与安全运输措施结合分析.因此,文章运用轨迹交叉事故致因理论分析危化品道路运输全路段事故的致灾机理,构建风险量化评估指标体系,提出风险指数综合评估数学模型,即改进风险分级指数(Improved Risk Index)法,结合实例量化与分析路段风险,为运输安全研究提供一些有利的思路与参考性意见.

## 1 危化品道路运输事故致灾原因分析

依据轨迹交叉事故致因理论,事故的发生是多种关联事物顺序发展的结果,即人的不安全行为与物的不安全状态的轨迹在时空上交错<sup>[8]</sup>.运用轨迹交叉理论分析危化品运输事故,其事故致灾机理如图1所示.

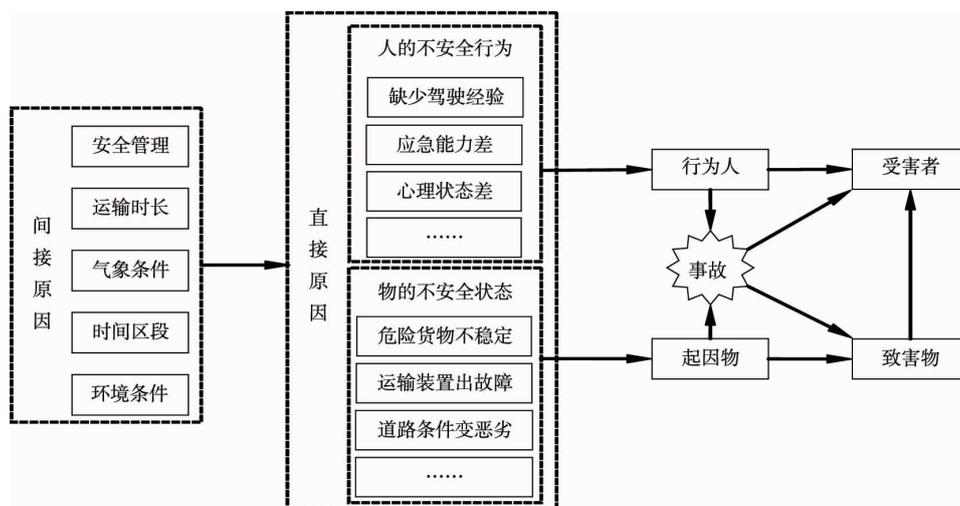


图1 危化品道路运输事故致灾机理

危化品道路运输事故的发生是由企业及物流公司的安全管理(简称为安全管理)、货物道路运输全过程所花费的时间长短(简称为运输时长)、货物道路运输过程中沿途的天气状况(简称为气象条件)、道路运输在0:00—24:00时间线上的具体时间段(简称为时间区段)以及货物道路运输路线历经的环境(简称为环境条件)这些间接因素相互影响而造成的.

安全管理涉及管理机构的职责、教育与培训、车辆管理、人员管理、应急措施等方面;运输时长也会影响运输安全,长时间工作导致驾驶员疲惫而易发生事故;气象条件对运输也有极大影响,当出现极端天气,如多雾会影响运输人员的视线,道路结冰会影响道路驾驶的安全性;根据最新的相关法律法规,每日0:00—6:00是限制危化品车辆在高速公路上通行的,表明时间区段对运输过程也会造成影响;环境条件有多种情况,如穿过人口集聚地区时就可能因为人群拥挤增加事故发生的概率以及扩大事故的危害性。

危化品道路运输事故的直接原因是人的不安全行为与物的不安全状态.人的不安全行为表现为运输人员缺少驾驶经验、应急能力差、心理状态差等;物的不安全状态表现为危险货物不稳定、运输装置出故障、道路条件变恶劣.危险货物的影响因素有健康危害性、易燃性、反应活性、特殊危险性;运输装置的影响因素有车辆类型、载重、维修保障;道路条件的影响因素有车道数量、公路等级、地形、特殊路段。

可见,事故的发生是直接原因与间接原因综合作用的结果,因此,在运用分级指数法进行评估危化品运输风险时,要贴合实际全方面地分析事故的直接原因风险与间接原因风险,根据事故致灾机理完善并修正影响危化品道路运输的相关因子,为事故预防与控制提供依据。

## 2 风险分级指数法改进

### 2.1 风险评估程序

风险分级指数(Risk Index)是为了预防与控制运输事故的发生,将运输风险进行快速分级,基于危化品的特性、路径运输影响因子以及安全措施补偿因子3个方面,对其进行半定量分析的一种方法<sup>[9]</sup>.依据风险分级指数理论,建立危化品道路运输风险分级指数评估程序如图2所示。

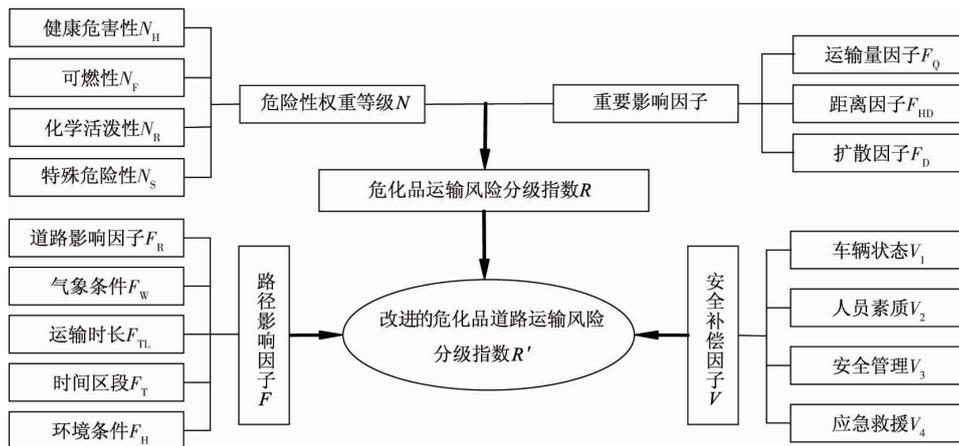


图2 危化品道路运输风险分级指数评估程序

### 2.2 风险评估模型

评估模型是依据前人对大量事故统计与危化品特性分析、风险分析与安全措施等建立的。

1) 依据美国消防协会<sup>[10]</sup>,危险品的危险性权重等级  $N$  的计算公式为

$$N = \frac{N_H^2 + N_F^2 + N_R^2 + N_S^2}{N_H + N_F + N_R + N_S} \quad (1)$$

2) 依据文献[9]设置危化品运输量  $F_Q$ 、住宅区与泄漏点的距离  $F_{HD}$ 以及危化品的扩散因子  $F_D$  的等级均为0~4级。

3) 危化品道路运输风险分级指数  $R$ :

$$R = NF_Q F_{HD} F_D \quad (2)$$

危险品道路运输的危险性权重等级设置为4个等级, $R$ 最大值为256<sup>[10]</sup>。

### 2.3 风险评估模型改进

随着运输条件的改变、危化品道路运输法律法规的健全等,原有的风险分级指数模型不能对实际的运输风险、事故预防与潜在隐患进行准确地评估,改进的风险分级指数模型对于评估危化品道路运输风险具有重要的意义.改进的风险评估模型需要完善并修正路径影响因子与安全补偿因子,将相关因子代入原有的风险分级指数模型来建立改进的分级指数模型,再依据最大风险指数与平均风险指数量化出综合风险

指数,建立综合评估数学模型,提高风险评估结果的准确性.

1) 建立改进的危化品道路运输风险分级指数  $R'$ :

$$R' = RF_R F_W F_{TL} F_T F_H (1 - \alpha V_1 V_2 V_3 V_4). \tag{3}$$

式中: $\alpha$  为其他安全措施补偿调节系数,通常取值 0.2.

2) 建立多路段中最大风险指数  $R'_{max}$ :

$$R'_{max} = (R'_{L_i})_{max}. \tag{4}$$

式中: $R'_{L_i}$  为各路段长度的风险分级指数; $L$  为路径总长; $L_i$  为路径各路段长度.

3) 建立多路段平均风险指数  $R'_{av}$ :

$$R'_{av} = \sum_{i=1}^i \left( \frac{L_i}{L} R' \right). \tag{5}$$

4) 建立多路段综合风险指数  $R'_{cp}$ :

$$R'_{cp} = \omega R'_{av} + (1 - \omega) R'_{max}. \tag{6}$$

式中: $\omega$  为路径综合风险指数的权重.

## 2.4 评估模型相关因子确定

### 2.4.1 危化品危险性权重等级 $N$ 、重要影响因子与风险分级指数 $R$ 的确定

对于危险品物质健康危害  $N_H$ 、可燃性  $N_F$ 、反应活性  $N_R$ 、特殊危险性分级  $N_S$ 、危化品运输量等级  $F_Q$ 、住宅区与泄漏点的距离因子  $F_{HD}$ 、危化品扩散因子  $F_D$  以及危化品运输风险分级指数  $R$  均依据文献[9]确定.

### 2.4.2 路径影响因子 $F$ 的确定

道路影响因子  $F_R$  从公路等级、地形、车道以及弯道进行分析;气象条件  $F_W$  从视野、运输稳定性等方面来确定;运输距离通过运输时长  $F_{TL}$  反映;每个时间区段  $F_T$  涉及驾驶人员心理、驾驶环境、交通量表现出不同的影响;运输过程周围环境  $F_H$  的影响因素主要是人口密度、水源、自然区域等.

所有设定均是在能到达合理运输的条件下进行的.依据文献[11-13]中已经统计的各种场景的事故数量,该数据具有差异与不确定性,一般运用模糊综合安全评估法<sup>[14]</sup>进行修正处理,依据每个类别选取合适的事故数值定为基数“1”,再将每个具体事故数值以基数“1”进行修正,得到具体修正系数如表 1.

表 1 路径影响因子  $F$  修正系数

路径影响因子	特征分类	修正系数	路径影响因子	特征分类	修正系数	
$F_{R1}$	公路等级	高速、一级公路	气象条件 $F_W$	气象类别	雾、大雨	1.30
		二级公路			霜降、冰雹、小雨	1.20
		三、四级公路			高温( $\geq 35^\circ\text{C}$ )	1.10
		城市公路			低温( $\leq -10^\circ\text{C}$ )	1.10
		等外公路			晴朗、多云、阴天	1.00
道路影响因子 $F_R$	地形	山岭	时间区段 $F_T$	时间段	0:00—3:00	0.62
		重丘			3:00—6:00	0.99
		微丘			6:00—9:00	1.06
		平原			9:00—12:00	1.01
$F_{R3}$	车道	两车道		12:00—15:00	0.88	
		两车道以上		15:00—18:00	0.81	
$F_{R4}$	弯道	直路		18:00—21:00	0.52	
		弯路( $r \geq 200\text{ m}$ )		21:00—24:00	0.51	
		弯路( $r < 200\text{ m}$ )				
运输时长 $F_{TL}$	运输时长/h	<3	环境条件 $F_H$	环境类型	路段人口密度大	2.20
		3~6(不包含 6)			桥梁、隧道	1.80
		6~9(不包含 9)			水源区、自然保护区或其他无人区	1.40
		$\geq 9$			具有缓冲区域	1.00

注:道路影响因子  $F_R = F_{R1} F_{R2} F_{R3} F_{R4}$ ;时间区段  $F_T$  依据湖南省交通运输厅规定“对于危化品高速公路运输,在 0:00—6:00 限制通行”,但是该运输考虑了非高速公路路段,所以时间区段并没有舍弃 0:00—6:00

### 2.4.3 安全补偿因子 $V$ 的确定

根据车辆的有关数据,可将车辆状态  $V_1$  分为优、良、中、差 4 个等级;人员素质  $V_2$  从文化水平、驾龄、应急能力以及心理状态分析,人员素质  $V_2 = V_{21}V_{22}V_{23}V_{24}$ ;安全管理  $V_3$  各阶段进行评分通常评为 5 个等级;应急救援将救援时间与危化品、公路等级进行关联,应急救援  $V_4 = V_{41}V_{42}V_{43}$ .依据文献[13-15]中得到各条件下的事故统计量,该数据具有不稳定性,使用模糊综合安全评估法<sup>[14]</sup>进行修正处理,对不同类别选取合适的事故数值作为基数“1”,每项具体事故数值依据基数“1”进行修正,修正后的系数如表 2.

表 2 安全补偿因子人员素质  $V$  修正系数

安全补偿因子	特征分类	修正系数	安全补偿因子	特征分类	修正系数		
车辆状态 $V_1$	状态等级	优(各部件健康,无维修或小维修)	人员素质 $V_2$	文化水平 $V_{21}$	高中	0.80	
		良(各部件运行正常,有大维修)		大专	0.90		
		中(各部件有小问题,不影响运行)		本科	1.10		
		差(有部件异常,需要维修或更换)		研究生及以上	1.40		
应急救援 $V_4$ (救援时间)	货物形态 $V_{41}$	固态	1.00	驾龄 $V_{22}$	2~3 a	0.70	
		气态	0.80		3~5 a	0.90	
		液态	0.40		5~10 a	1.20	
	货物类型 $V_{42}$	易燃类	1.60		10 a 及以上	1.60	
		爆炸品	1.20	应急能力 $V_{23}$	优	1.80	
		毒性	1.00		良	1.50	
	腐蚀性	1.30	中		1.00		
	公路等级 $V_{43}$	其他	其他	2.40	差	0.50	
			高速、一级公路	2.00	心理状态 $V_{24}$	优	1.00
			二级公路	1.00		良	0.80
三级、四级公路			0.40	中		0.50	
城市公路			1.50	差		0.20	
等外公路	0.50	安全管理 $V_3$	评分	$\geq 90$		1.20	
				90~80	1.00		
				80~70	0.80		
				70~60	0.50		
				<60	0.30		

注:相关规定“危险货物运输驾驶员需取得经营性道路旅客运输或者货物运输驾驶员从业资格 2 年以上”,驾驶员的驾龄至少为 2 年,对于驾驶员文化水平并没有具体规定,但对于押运人员要求初中文凭以上,而目前普遍危化品押运人员兼驾驶人员,因此,驾驶人员默认要求初中文凭以上,文化水平为中专视为高中水平

## 3 实例应用

以湖南岳阳一家危化品物流公司运送危险品乙酸甲酯至湘西吉首为例.乙酸甲酯为易燃液体,易挥发生成有毒性气体,存储在通风情况良好、温度较低的环境中,作为有机溶剂、喷漆人造革及香料等的原料.由相关特性资料得知乙酸甲酯的危险性权重等级为 3,扩散因子等级为 4.

该物流公司的安全管理评分为 98 分,易燃液体运输车辆核载 6.7 t,状态为优,安排运输乙酸甲酯的运输人员文化为大专水平,驾龄为 6 年,应急能力为中,心理状态为优.

为了体现实际不同路径下的运输风险,将走高速与不走高速的运输道路进行分段,其中包括全程高速(杭瑞高速)和不开高速(240 国道、319 国道).由于所选高速与国道是相邻较近的,此路线人口集聚密度不大,泄漏点距离居民区的距离因子等级取为 2,为了运输的客观性都选择 6:00 开始进行运输,每行驶 4 h 休息一次,对高速与国道各路段进行编号处理,各路段的相关特性、长度、地形、气象条件以及时间区段情况如表 3 所示.

由于 2 条路径的沿线方向一致,为便于分析计算路径的影响,将 2 条路径的节点简化为 3 处,对于 2 条路径中的各路段可以相互交错,将一段走高速与一段不走高速进行组合,对各路段编号得到的路径示意图如图 3 所示.

表 3 路径分段情况

路径	路段	道路等级	长度/km	地形	气象条件	行驶时长/h	时间区段
杭瑞高速	岳阳段①	高速	106	平原	阴	1.18	6:00—9:00
	常德段②	高速	178	微丘	小雨	2.09	6:00—9:00
	怀化段③	高速	99	重丘	大雨	1.36	9:00—12:00
	吉首段④	高速	52	山岭	小雨	0.74	9:00—12:00
国道	岳阳段 a	二级	112	平原	阴	1.92	6:00—9:00
	常德段 b	二级	189	微丘	小雨	3.43	9:00—12:00
	怀化段 c	二级	127	重丘	大雨	2.64	12:00—15:00
	吉首段 d	二级	87	山岭	小雨	2.02	15:00—18:00

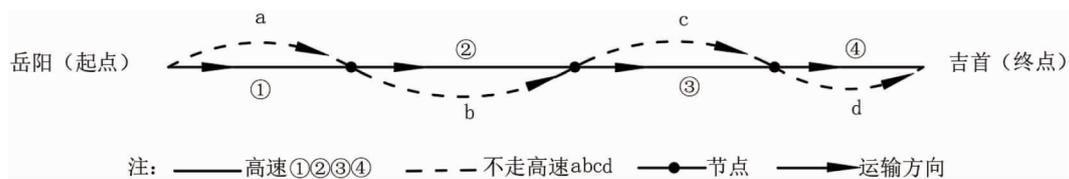


图 3 岳阳-吉首运输路径分段

通过不同的路段组合得到 16 条不同运输路径,运用前面的评估模型对该物流运输公司在不同路径下运送乙酸甲酯进行风险评估,将不同路段对应的数据带入风险分级指数评估模型中,通过计算得到对应各路段的风险指数、最大风险指数、平均风险指数以及综合风险指数如表 4 所示.其中,综合风险指数的权重  $\omega$  取 0.5 进行计算.

表 4 各路段风险指数

路径组合	各分段风险指数				最大风险指数 $R'_{\max}$	平均风险指数 $R'_{\text{av}}$	综合风险指数 $R'_{\text{cp}}$
	岳阳段	常德段	怀化段	吉首段			
路径①—②—③—④	70.986	104.356	121.232	141.437	141.437	104.477	122.957
路径①—②—③—d	70.986	104.356	121.232	146.343	146.343	108.146	127.301
路径①—②—c—④	70.986	104.356	135.890	130.186	135.890	108.258	122.074
路径①—②—c—d	70.986	104.356	135.890	134.702	135.890	110.587	123.239
路径①—b—③—④	70.986	107.976	131.334	141.437	141.437	108.250	124.844
路径①—b—③—d	70.986	107.976	131.334	146.343	146.343	111.571	128.957
路径①—b—c—④	70.986	107.976	135.890	130.186	135.890	109.616	122.753
路径①—b—c—d	70.986	107.976	135.890	134.702	135.890	111.796	123.843
路径 a—b—c—d	48.966	107.976	135.890	134.702	135.890	105.966	120.928
路径 a—b—c—④	48.966	107.976	135.890	130.186	135.890	103.976	119.933
路径 a—b—③—d	48.966	107.976	131.334	146.343	146.343	105.397	125.870
路径 a—b—③—④	48.966	107.976	131.334	141.437	141.437	102.169	121.803
路径 a—②—c—d	48.966	104.356	135.890	134.702	135.890	104.650	120.270
路径 a—②—c—④	48.966	104.356	135.890	130.186	135.890	101.906	118.898
路径 a—②—③—d	48.966	104.356	121.232	146.343	146.343	101.891	124.117
路径 a—②—③—④	48.966	104.356	121.232	141.437	141.437	97.777	119.607

由表 4 可知:对于不同路径的最大风险指数均多为怀化段或吉首段,由于该路段的地形与气象条件较为恶劣,风险指数均较高.普遍来说,通过不走高速岳阳段 a 开始的路线的平均风险指数均小于以高速岳阳段①起步的路径,得益于岳阳地形较为平坦并选择了同一运输时间.依据最低综合风险指数,该运输最优的路径为 a—②—c—④,并不是全程走高速或全程不走高速的路径综合风险指数最低.

## 4 分析讨论

1) 在起始运输时间区段进行了同一规定,但在实际生活中会根据实际情况而定.由于危化品运输在 0:00—6:00 是无法上高速的,但是不会限制这个时间段在非高速路上运输,在 0:00—6:00 是夜晚时间,

道路上的车流量大大降低,比较利于危化品运输,实际上夜晚运输危化品较常见。

2)在实例设定时,为便于计算将节点数简化,实际上高速与国道的节点比较多,路径网络也比较复杂,存在多种道路网络运输组合.在细化运输安全风险时,应将多个节点与多种组合考虑进去。

3)在实例综合风险指数计算时,取 $\omega=0.5$ 进行计算.针对该权重问题,一般情况下可取0.5计算,面对多路段复杂的路径系统时,将组合赋权的多种方法引入研究该权重也是值得探索的。

4)在原有的风险分级指数法的计算模型下得出的最优路径为①-②-③-④,可见在原有的计算模型下,全程高速的运输路线风险更低.在改进的风险分级指数法的综合评估模型下最优路径为a-②-c-④,并非全程高速或非高速的运输路线风险最低,优化了危化品运输路径。

5)改进的风险分级指数法对危化品道路运输风险评估进行优化,提升了实际运输风险评估的准确性,此外,该方向还有进一步深入研究的可能,将实际运输成本等因素引入分级指数法中,建立新的评估模型。

6)有关降低危化品道路运输风险的安全措施:改善管理制度,提升应急能力;优化路径选择,对路径地形进行熟悉;做好运输行驶记录,对车辆进行保养维修,对运输人员心理状况进行了解与辅导,防止疲劳驾驶、情绪驾驶。

## 5 结论

1)运用轨迹交叉理论事故致因理论,从人员素质、运输装备、危险货物、安全管理及环境条件等方面,分析了危化品道路运输事故的致灾机理,为构建实际运输状况下的风险量化评估指标体系提供了依据。

2)通过改进的分级指数法,完善并修正路径影响因子与安全补偿因子,提出了风险指数综合评估数学模型,该模型更加适用于现有运输条件与法律法规下危化品道路运输的风险评估和多变因子下的评估过程,能提升危化品道路运输风险评估的准确性。

3)运用实例分析,将高速与非高速多路段结合评估,结果表明单一路段并非最优路径,路段组合复杂化是安全评估模型构建的客观性与普遍性的体现,改进的分级指数法为道路运输风险研究提供了重要的指导。

## 参考文献:

- [1] 李景娜,王静虹,潘旭海,等.不同空间尺度下危化品运输路径优化[J].中国安全生产科学技术,2018,14(8):152-157.
- [2] 周荣义,林金玉,刘勇.危险货物道路运输风险概率模型及应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):21-27.
- [3] 任常兴,吴宗之,唐少佳.危险品道路运输过程风险管理体系探讨[J].中国安全生产科学技术,2007(1):16-20.
- [4] 冷源,张明广,燕然,等.易燃液态危化品道路运输燃爆事故演化概率研究[J].工业安全与环保,2016,42(12):21-24.
- [5] 王阳,施式亮,周荣义,等.基于突变理论的危化品道路运输系统安全评估[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):29-34.
- [6] 陈文瑛,王影,李启华.危险化学品道路运输风险预测模型研究[J].安全与环境学报,2020,20(5):1683-1689.
- [7] Tubis A. Route Risk Assessment for Road Transport Companies[C]//International Conference on Dependability and Complex Systems, 2018, 761: 492-503.
- [8] 赵江平,刘小龙,东淑,等.STAMP模型在危化品道路运输事故分析中的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(5):160-165.
- [9] 任常兴,吴宗之.危险品道路运输风险分级指数法研究[J].安全与环境学报,2006,6(4):126-129.
- [10] Fabiano B, Currò F, Reverberi A P, et al. Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2005,18: 403-413.
- [11] Fabiano B, Currò F, Palazzi E, et al. A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation[J]. Journal of Hazardous Materials,2002,93(1):1-15.
- [12] 姜滢.基于轨迹数据的危险货物道路运输路径优化研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [13] 曹建,施式亮,鲁义,等.2013—2018年罐车公路运输危化品事故分析[J].中国安全科学学报,2020,30(2):119-126.
- [14] 黄韬,江诗咏.模糊综合评估法在液氯运输过程安全性评估的应用[J].中国安全生产科学技术,2007(3):58-64.
- [15] 孙云,李鹏,陈莉.道路运输驾驶员心理适宜性测评系统重测信度检验报告[J].交通节能与环保,2020,16(5):76-80.