

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.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.004

Zhou R Y, Lin J Y, Liu Y. A Risk Probability Model for Road Transportation of Hazardous Materials and Its Application [J].
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34 (1): 21 - 27. doi: 10.
13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.004

危险货物道路运输风险概率模型及应用

周荣义^{1,2*}, 林金玉², 刘勇^{1,2}

(1.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;

2.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对危险货物道路运输风险概率评估方法的不足,在运用事故致因理论深入分析危险货物道路运输事故机理及其风险影响因素的基础上,提出了一种新的危险货物道路运输风险概率评估模型,给出了模型的数学计算公式及各参数确定的方法.该模型在危险货物道路运输风险概率一般方法计算的基础上,从事前预防和事中进行2个方面,将企业的安全管理水平、道路条件、气象条件、交通流量、行驶时段及危险货物特性等因子引入模型中作为修正系数,使模型更趋实际和完整.实例应用表明,该模型能很好的评估危险货物道路运输风险概率,客观的反映危险货物道路运输风险大小实际状况,避免了风险概率评估结果过高或过低的问题,并为风险概率的降低提供参考和决策依据.

关键词: 风险概率;危险货物;道路运输;事故机理;计算模型

中图分类号:X951

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)01-0021-07

A Risk Probability Model for Road Transportation of Hazardous Materials and Its Application

Zhou Rongyi^{1,2}, Lin Jinyu², Liu Yong^{1,2}

(1. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques for Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Considering the deficiencies of current probability models for hazmat road transportation, a novel risk probability model for hazmat road transportation was presented, based on a deep analysis of accident mechanism for hazmat road transportation by using accident causation theories. This model, with the common risk probability algorithm as the basis and from the two aspects of accident prevention and driving process, was taken enterprises' safety management level, road condition, meteorological condition, traffic flow, driving span of time and property of hazmat as the correction factors of risk probability, which made the model more practicable and complete. Finally, a case study was illustrated, which shows that this model correctly assess the risk probability of hazmat road transportation and effectively avoid over-assessing or de-assessing.

Keywords: risk probability; hazardous materials; road transportation; accident mechanism; algorithm model

随着经济发展,危险货物需求日益增长,危险货物物流亦日趋频繁.由于我国道路交通发达,道路运输

收稿日期:2018-07-02

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2089);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2019JJ50152)

*通信作者,E-mail:jackyzry@163.com

机动灵活,长短距离适应性强,因此,道路运输已成为我国危险货物物流的主要方式,据不完全统计,我国危险货物道路运输量已占危险货物物流量的80%^[1].同时,由于我国的道路交通流量较大,有的临近或穿过城市边缘,甚至经过人口稠密区或环境敏感区等重要区域,因此,危险货物运输过程中一旦发生事故,其所具有的爆炸、易燃、毒害、腐蚀、放射等危害性,极易对沿线车辆行人及周边环境造成重大的人员伤亡、财产损失和环境破坏.如2012年8月26日,在陕西包茂高速公路上,1辆客车与1辆大型甲醇罐车发生追尾事故,造成大客车内36人死亡、3人受伤的特别重大事故^[2];2014年7月19日,湖南省邵阳市境内沪昆高速公路发生特别重大道路交通危险货物爆燃事故,造成54人死亡、6人受伤(其中4人因伤势过重医治无效死亡)的特别重大事故^[3].危险货物道路运输安全问题已引起了政府部门的高度重视和人们的广泛关注,并逐渐成为众多专家学者研究的重要课题之一.

风险辨识和评估是预防和降低危险货物道路运输事故的起点和基础,其不仅可以弄清危险货物道路运输事故发生的机理和原因,且能对运输过程中存在的风险给出定性或定量的结果,并能为如何降低危险货物道路运输风险提供依据和方法,同时也是道路运输选线优化和道路运输网络规划的重要前提,因此,风险评估方法的正确与否直接关系到后续各项决策的结果与成效.近年来,诸多专家和学者在这方面展开了深入的研究.如刘海霞^[4]利用危险货物道路运输事故概率对高速公路运输过程风险进行了评价,提出了防护措施;夏鹏飞^[5]利用事故概率对大桥危险货物运输风险进行了评价;任常兴^[6]利用道路运输事故概率和影响区人员总风险对易燃易爆危险货物的道路运输风险进行了评价;宋洋^[7]从道路事故概率、道路上人口暴露、道路附近人口暴露、财产损失、环境污染和应急响应效率等方面建立了危险货物运输风险评价模型;吴宗之^[8]通过将危险物质事故易发性、车辆设备、人员素质和安全管理等因素引入危险货物道路运输风险概率中作为修正系数建立了定量风险评价模型;Fabiano B^[9-10]将道路特征、天气状况和交通条件引入事故概率计算中,建立了危险货物道路运输风险评估模型.上述研究中,对于风险构成的一个重要方面,风险后果的评估方法几乎没有异议,但对于风险概率的度量存在一些差别:有些仅以危险货物道路运输统计得出的概率作为模型的计算概率,未考虑运输过程中具体路径的运输条件和风险影响因素,因此用统计得出的道路运输事故概率的一般水平代替具体路线的概率做法有些欠妥;有些虽然考虑了运输过程中的时变风险因素,但仍不系统和全面,顾此失彼,导致模型与实际仍然存在一些偏差.显然,忽略或缺失理解危险货物道路运输过程中的风险概率变化因素都可能导致风险评估结果与客观实际不符.为此,本文试图通过借鉴已有研究,从运输企业前期安全预防和危险货物车辆运输过程的角度,根据事故致因机理,并在结合运输路线风险影响因素数据资料的基础上,探讨危险化学品道路运输风险概率计算模型及方法,以期道路危险货物运输风险概率计算和风险的降低提供一些积极的思路 and 参考.

1 危险货物道路运输事故致因机理分析

危险货物道路运输是一个由人、车辆、危险货物、道路以及环境构成的复杂系统.危险货物道路运输风险概率因素,从时间层面考虑,无非是在运输前产生的和在运输过程中产生的2大类.运输前的风险概率因素与企业事故预防工作的好坏有重大关系,主要取决于企业的安全管理,如安全教育与培训、运输车辆和运输工具的维护与保养、货物的装卸过程、安全装置的配备、安全规章制度的建设、安全监测监控平台建设、应急管理与应急处置能力等.而运输过程的风险概率因素,除与当时的司押人员、运输车辆、货物及包装物状态有关外,还与道路条件、天气状况、交通流量及运输时段有关.

根据轨迹交叉理论和系统事故致因理论,危险货物道路运输事故可以看成是由人、物(车辆、危险货物)、环境(道路、气象、交通流量)和企业安全管理综合作用的结果,如图1所示.事故的直接原因是司押人员的不安全行为和运输车辆与危险货物的不安全状态,其对危险货物运输事故的发生起了决定性的作用.司机的驾驶水平、安全意识、心理和生理状态以及应变和应急处置能力对运输车辆的交通事故影响很大,押送人员对货物的安全监控和监管能力可将危险货物的潜在安全隐患消灭在萌芽状态.车辆的安全性能、安全配置和安全监测监控装备与平台对保障车辆和危险货物不发生事故起到重要的基础作用.而企业安全管理、道路条件、气象条件、交通流量和运输时段则是事故的间接原因,其对事故直接原因起重大的影

响作用,可导致司押人员出现不安全行为及运输车辆和危险货物出现不安全状态.如企业安全管理,主要体现在运输之前的日常安全工作上,包括对司机和押货人员的安全教育、安全制度规范、安全文化熏陶以及对车辆和装运设备的安全维修、维护、保养和危险货物的装卸等环节,良好的安全管理在一定程度上有助于减少人的失误和设备的故障.企业安全管理可以看成是危险货物道路运输环节所做的前期安全预防与准备工作,因此,它的好坏对事故的直接原因有重要的推进或抑制作用.道路的等级、弯度、坡度、线形、特殊路段(桥梁、隧道)情况及交通量的大小对行车安全及危险货物的安全有重要影响.恶劣的天气状况如大雨、大雾、冰雪等可能会造成路滑、视线不清等情形而导致交通事故,高温的天气容易对危险货物储运条件产生重大影响.当道路交通流量较大时,车辆之间的安全间距会随之缩小,发生交通事故的概率增大.运输行驶时段除了可能遇到不同的交通流量外,更重要的是影响司押人员的意识和清醒度,文献[11]统计表明,早上3时~6时和9时~12时为危险货物道路运输车辆事故多发时间.因此,尽管危险货物道路运输事故是由司押人员、运输车辆和危险货物及包装直接导致的,但企业安全管理、道路条件、气象条件、交通流量和运行时段等对直接原因起到了重大的影响作用.故在建立危险货物道路运输风险概率模型时,除考虑直接风险因素外,还必须同时考虑间接风险因素的抑制或增长作用.

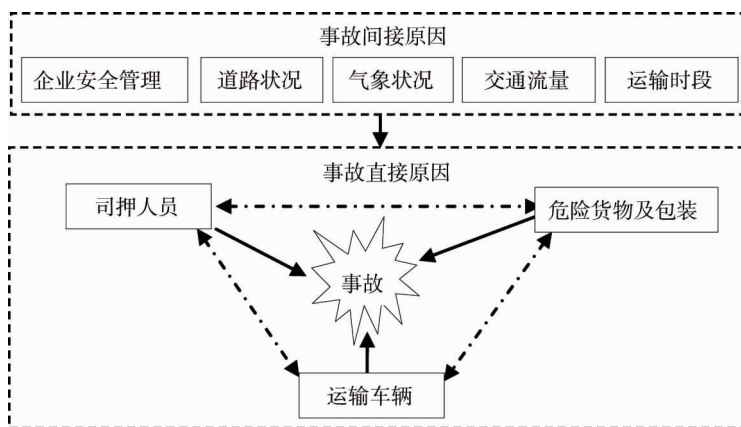


图1 危险货物道路运输事故致因机理

2 危险货物道路运输风险概率模型

2.1 概率模型

危险货物道路运输事故大致上可分为2种情形,一种是在危险货物运输过程中,其本身包装物故障或储存条件发生变化可能引起的事故.另一种是由车辆交通事故而引起的危险货物泄漏、扩散、中毒、火灾或爆炸等事故.考虑到危险货物道路运输过程中,其所处的运输道路条件、气候条件、交通流量、行驶时段、危险货物受到外界环境的影响等会随着运输过程发生变化,因而对危险货物道路运输事故的影响程度亦会发生变化.同理,不同的运输企业由于其安全管理的方法和成效不同,对事故的直接原因司押人员、运输车辆以及危险货物的影响也不同,为此,本文提出了如图2所示的危险货物道路运输风险概率计算模型.

设 F_i 表示某危险货物运输车辆在某路段 i 上的事故概率; k 表示运输路径上的路段数; r_0 表示危险货物运输车辆交通事故率(次/(车·km)),它反映了由事故的直接原因(人员、车辆和危险货物及包装作为一个整体对象)导致发生交通事故率的一般水平有多大, r_0 一般通过统计分析可得,与道路的等级有关^[12-13]; m 表示安全管理修正系数; h_i 表示第 i 路段的道路因素修正系数; c_i 表示第 i 路段的气候因素修正系数; n_i 表示第 i 路段的交通流量修正系数; t_i 表示第 i 路段的行驶时间修正系数; l_i 表示第 i 路段的距离(km); B 表示危险货物事故易发性修正系数; p_s 表示由交通事故引发危险货物事故场景 S 的条件概率; f 表示运输过程中危险货物自身发生事故的概率(次/km).则根据图2的概率模型,路段上某危险货物运输车辆发生事故的的概率可表示为

$$F_i = r_0 m h_i c_i n_i t_i l_i p_s + f m B l_i. \quad (1)$$

则整条路径危险货物运输车辆发生事故的概率可表示为

$$F = \sum_{i=1}^k F_i.$$

(2)

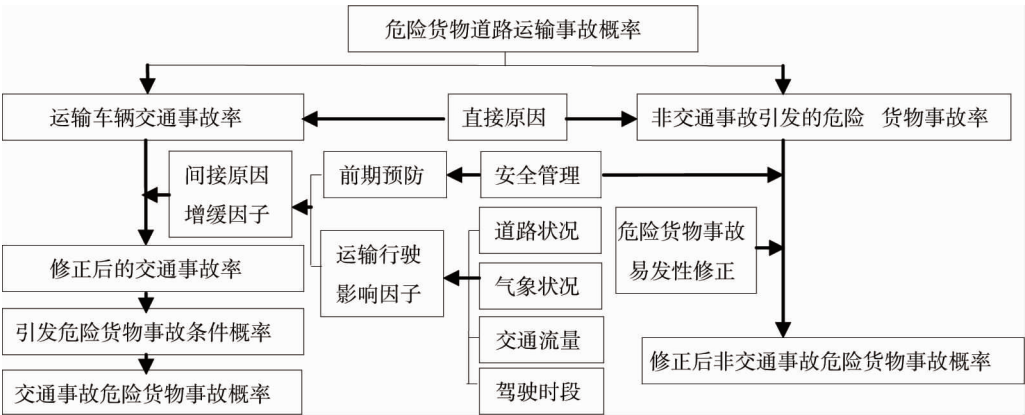


图 2 危险货物道路运输事故概率模型

2.2 参数的确定

2.2.1 安全管理修正系数 m 确定

安全管理修正系数与运输企业的安全管理绩效水平密切相关,其值的大小直接取决于安全管理的好坏,因此,要获得安全管理修正系数必须首先获得企业安全管理评估的等级,进而根据等级的大小确定相应的修正系数.考虑到企业安全管理涉及的范围和内容比较广,且各评估等级之间具有一定的不确定性,因此,一般采用模糊综合安全评价法^[14-15].假定企业安全管理等级如表 1 所示.然后以“中”等级安全管理水平作为基准,代表大多数运输企业的一般安全管理水平.则企业的安全管理等级越好,则说明其安全管理工作成绩越好,抑制运输风险的能力越强,故修正系数越小;反之越大.以“中”等级的修正系数为 1,则“很好”“好”“差”和“非常差”的修正系数分别为 0.2,0.6,1.7 和 2.8.

表 1 企业安全管理评估等级

得 分	≥90	80~90	70~80	60~70	< 60
评价等级	很好	好	中	差	非常差

2.2.2 道路修正系数 h_i 确定

道路的修正系数必须考虑道路的特点,包括道路的弯曲度、水平度、车道数以及特殊路段等.文献[9-10]通过研究,给出了如表 2 所示的修正因子系数.

表 2 道路修正系数

道路特性		h_{i_1}	h_{i_2}	h_{i_3}	h_{i_4}
弯度	直路	1.0			
	弯路($r \geq 200$ m)	1.3			
	弯路($r < 200$ m)	2.2			
坡度	平路		1.0		
	上坡路(坡度 $< 5\%$)		1.1		
	陡上坡路(坡度 $\geq 5\%$)		1.2		
	下坡路(坡度 $< 5\%$)		1.3		
	陡下坡路(坡度 $\geq 5\%$)		1.5		
车道	2 车道与应急车道			1.2	
	3 车道与应急车道			0.8	
特殊路段	隧道				0.8
	桥梁				1.2

故道路修正系数可表示为 $h_i = h_{i_1} h_{i_2} h_{i_3} h_{i_4}$.

2.2.3 气候修正系数 c_i 确定

气候修正系数主要从天气的好坏考虑,其修正系数 c_i 的取值如表 3^[9] 所示.

表 3 气候修正系数

气候条件	修正系数 c_i
良好天气	1.0
雨雾天气	1.5
冰雪天气	2.5

2.2.4 交通量修正系数 n_i 的确定

交通流量既要考虑道路总的交通量,还要考虑运输货车量在交通量中的比重,其修正系数的取值如表 4^[9] 所示.

表 4 交通流量修正系数

交通流量	修正系数 n_i
低流量(<500 辆/h)	0.8
中流量(<1 250 辆/h 且货车量<125 辆/d)	1.0
高流量(>1 250 辆/h)	1.4
高流量(>1 250 辆/h 且货车量>250 辆/d)	2.4

2.2.5 行驶时段修正系数 t_i 的确定

不同的行驶时段给驾驶员的意识和清醒度不同,在凌晨时由于人易于疲倦,出现交通事故的概率增大,文献[13]通过统计分析和研究,得出了如下表 5 所示的修正系数.

表 5 行驶时段修正系数

时段	修正系数 t_i	时段	修正系数 t_i
0 时~3 时	0.91	12 时~15 时	1.04
3 时~6 时	1.45	15 时~18 时	0.87
6 时~9 时	1.28	18 时~21 时	0.85
9 时~12 时	1.16	21 时~24 时	0.47

2.2.6 危险货物自身发生事故的的概率 f 的确定

一般来讲, f 可根据事故场景,采用故障树(FTA)方法求得,但考虑到导致事故发生的各基本原因事件的故障率还没有建立完善的数据库系统,在获取上有一定的难度,因此,一般根据运输车辆的类别采用统计分析的方法获得.如文献[13,16]通过统计研究发现,非交通事故引发和交通事故引发的危险货物公路罐车运输事故比例约为 1 : 5.

2.2.7 事故易发性修正系数 B 的确定

危险货物由于其理化性质不同,对外界环境或刺激的变化所造成的感度有很大差别,因此,在运输具体的危险货物时,必须考虑不同危险货物的事故易发性. B 可按式(3)进行计算^[8].

$$B = 2.91\alpha B_0 / (B_{\min} + B_{\max}) .$$

(3)

式中: α 为危险物质所属大类的权重系数,为该类危险化学品事故易发性的实际分值; B_{\min} 为该类危险化学品事故易发性的最小分值; B_{\max} 为该类危险化学品事故易发性的最大分值.

2.2.8 条件概率 p_s 的确定

交通事故转化为危险货物 S 事故场景的条件概率 p_s 与发生交通事故的类别有关,表 6^[6] 为给定事故类型下的条件泄漏概率.

表 6 给定事故下的条件泄露概率

事故类型		条件泄漏概率
单车非碰撞事故	冲去路外	0.331
	路上倾翻	0.375
	其他非碰撞事故	0.169
单车碰撞事故	与停止车辆碰撞	0.031
	与非机动车碰撞	0.015
	与固定物碰撞	0.129
	其他碰撞	0.059
多车碰撞事故	与乘客车辆碰撞	0.035
	与重型车辆碰撞	0.094
	与其他车辆碰撞	0.037

3 应用实例

以湖南长沙甲乙 2 家危险货物物流公司运送液化石油气至衡阳为例,可选运输路线分别为京珠高速 G4 和国道 G107.甲公司安全管理评估等级为“优”,乙公司安全管理评估等级为“中”,运用上述风险概率评估模型计算甲乙 2 家公司分别在不同路线下的风险概率.

根据线路的实际情况,将线路进行分段,各段相关道路、气象、交通流量、运行时段情况如表 7 所示.根据前述各参数的取值选择及相关计算方法,得出各段风险概率如表 8 所示.

表 7 线路分段情况表

线路	路段	道路等级	长度/km	车流量	气候	行驶时段
线路 1 (G4-S80)	长沙段	高速	30	1 317 辆/h 且货车量 1 719 辆/d	雨	9 时~10 时
	株洲段	高速	79	1 028 辆/h 且货车量 1 327 辆/d	雨	10 时~12 时
	衡东段	高速	64	824 辆/h 且货车量 1 065 辆/d	阴	12 时~14 时
	衡阳段	高速	59	689 辆/h 且货车量 472 辆/d	阴	12 时~14 时
线路 2 (国道 107)	长沙段	一级	50	842 辆/h	雨	9 时~10 时
	湘潭段	一级	75	735 辆/h	雨	10 时~12 时
	衡山段	二级	66	528 辆/h	阴	12 时~14 时
	衡阳段	二级	67	579 辆/h	阴	14 时~16 时

表 8 各路段风险概率

次/10⁶km

公司	路线 1					路线 2				
	长沙段	株洲段	衡东段	衡阳段	总概率	长沙段	湘潭段	衡山段	衡阳段	总概率
甲	6.512	2.397	1.294	0.954	11.157	37.555	9.740	5.714	5.801	58.81
乙	10.853	3.965	2.157	1.590	18.565	62.592	16.233	9.523	9.668	98.016

计算结果表明:对于路线 1 和路线 2 中的长沙段,由于交通流量大且货车多,同时气候为雨天,因此通过因素修正后,扩大了事故发生的基本概率,故该路段发生危险货物道路运输事故概率比其他路段均大.线路 1 和线路 2 比较,由于线路 2 的危险货物道路运输交通事故发生率 r_0 较大,故线路 2 的事故发生风险较线路 1 要大得多.同时,对于甲乙 2 家公司,由于甲公司的安全管理水平比乙公司高出较多,其修正因子降低了事故发生的概率,故在其他同等条件下,甲公司的危险货物道路运输事故发生概率比乙公司低近 1 倍左右.

由此,危险货物道路运输公司在改善和降低危险货物道路运输事故风险方面,可采取如下措施:(1)加强安全文化建设,提高企业安全管理水平,强化作业人员安全意识,加强技术培训和安全教育,提高司押人员的应急反应处置能力,严格把控驾驶作业时长和时段,杜绝疲劳驾驶;(2)合理选择和规划运输路径,

尽量选择路况好,交通流量小的线路,并对运输线路进行勘察,熟悉运输线路状况及地理环境;(3)提前掌握运输线路的天气状况,根据天气的变化,及时调整,对恶劣天气,取消和暂停相关运输任务;(4)加强运输车辆、装卸设备设施的维护和保养,使之达到相关技术标准要求,并做好出车之前的日常检查等。

4 结论

1)危险货物道路运输事故的发生是直接原因和间接原因多因素综合作用的结果,其直接风险因素是运输过程中的司押人员、车辆和危险货物及其包装物,间接风险因素是企业前期的安全管理成效,以及运输过程中的可变因素道路条件、天气状况、交通流量及运输时段.因此,在计算风险概率时,除考虑直接风险因素外,必须考虑这些间接因素的影响。

2)将危险货物道路运输事故的间接风险因素作为风险概率的修正系数,在一定程度上更系统、更全面的完善了危险货物道路运输风险概率模型,使得预测计算更加合理.应用实例表明,该概率模型能很好的评估危险货物道路运输过程的风险概率,客观的反映运输过程中的风险概率情况。

参考文献:

- [1] 任常兴,吴宗之,李晋. 基于风险分析的危险货物道路运输多目标 Pareto 最优选线[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(2): 9-13.
- [2] 8·26 包茂高速特大交通事故[EB/OL]. 360 百科, <https://baike.so.com/doc/6980237-7202948.html>. 2018-3-25.
- [3] 陈晓勇,施式亮,任竞舟,等. 2013~2014 年我国道路危险化学品运输事故统计分析对策[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 92-95.
- [4] 刘海霞,徐明,唐璐. 高速公路危险货物运输环境风险评价及防护应急对策[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(2): 88-90.
- [5] 夏鹏飞,赵慕华,陆建. 崇启大桥危险货物运输风险分析及预防措施[J]. 交通标准化, 2011, (10): 151-155.
- [6] 任常兴,王婕,吕东,等. 易燃易爆危险货物道路运输风险指数评价法[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(8): 17-19.
- [7] 宋洋,孙俊富. 危险货物道路运输网络风险-成本综合优化研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(10): 141-145.
- [8] 吴宗之,多英全,刘茂,等. 危险货物道路运输过程风险分析与评价方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004 (12): 36-44.
- [9] 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.
- [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] 沈小燕,李小楠,谢培,等. 886 起危险货物罐式车辆道路运输事故统计分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 43-48.
- [12] Bubbico R, Cave S D, Mazzarotta B. Risk analysis for road and rail transportation of hazardous materials: a simplified approach [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(6): 477-482.
- [13] 刘凯峥. 毒性气体公路罐车运输危险性辨识及风险评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [14] 刘越琪,肖心远,李怀俊,等. 基于层次分析和模糊综合评价法的危险货物运输安全评价研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2011, 10(4): 16-19.
- [15] 任竞舟,周荣义,钟岸. 基于物元分析的危化品储存安全评价模型[J]. 矿业工程研究, 2016, 32(2): 76-80.
- [16] 沈小燕. 道路危险货物运输企业安全评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.