

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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.004

SHI S L, CHEN X Y, LIU Y, 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 and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):23-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.004

基于 AHP 耦合度的危化品 道路运输风险因素耦合特征

施式亮^{1*}, 陈晓勇², 刘勇¹, 周荣义¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省交通科学研究院有限公司 交通运输安全应急信息保障技术及设备交通运输行业研发中心, 湖南 长沙 410015)

摘要: 为分析危化品在道路运输过程中的风险因素相互耦合情况, 构建以人、物、环境、管理 4 大风险因素为准则层的危化品道路运输安全风险因素指标体系, 将层次分析法(AHP)和耦合度模型有机结合起来, 建立了危化品道路运输耦合度评价模型, 通过实例应用研究表明, 该评价方法能够用来分析评价危化品承运企业道路运输的风险等级, 为企业预防和控制危化品道路运输安全事故提供理论支持与决策依据。

关键词: 风险耦合; 安全管理; 耦合度模型; 危险化学品

中图分类号: X951 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2021)01-0023-07

Research on the Coupling Characteristics of Risk Factors of Dangerous Chemicals in Road Transportation Based on AHP Coupling Degree

SHI Shiliang¹, CHEN Xiaoyong², LIU Yong¹, ZHOU Rongyi¹

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

2. Hunan Communications Research Institute Co., Ltd., Research and Development Center of Transportation Safety
Emergency Information Security Technology and Equipment, Changsha 410015, China)

Abstract: For the analysis of hazardous chemicals, the risk factors in the process of road transport in the mutual coupling was analyzed, and the index system of safety risk factors in the transportation of dangerous chemicals, which based on the four major risk factors of human, material, environment and management, was established. Analytic hierarchy process (AHP) and coupling model of organic combination, risk goods road transport coupling degree evaluation model was established, through the application examples, the results show that the evaluation method is able to analyze the evaluation of road transportation of hazardous chemicals transportation enterprises the level of risk for the enterprise, the prevention and control of hazardous chemicals transportation safety accidents to provide theoretical support and decision-making basis.

Keywords: risk coupling; security management; coupling degree model; hazardous chemicals

收稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774135; 51974120; 52074118); 湖南省安全生产专项资金资助项目(湘财企指[2017]20号); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2089)

* 通信作者, E-mail: hnustssl@qq.com

危险化学品是影响国民经济发展的基础性原料或制成品,对化工、石油等多方面产业的发展具有至关重要的作用.而危化品无论是在生产、经营或储存、运输和使用诸环节都涉及道路运输,目前我国每年运输的危险化学品中有80%是通过道路运输.超过10亿t危险化学品处于道路运输过程的储存与运输各环节,南北穿行、东西拉运.一旦防护或处置不当,极易引发灾害事故.近年来,危险化学品的运输灾害事故频发,损失惨重.例如,2015年8月28日,在广东陆丰市沈海高速陆丰龙山路段,一辆装载亚硝酸铵的货车与客车追尾,造成5人死亡,20余人受伤;2016年3月19日,一台装有汽油的油罐车在京港澳高速公路汨罗市何家垄段行驶时发生爆炸,导致5人死亡.从上述典型重大灾害事例可知,道路运输过程中危险化学品灾害事故具有破坏性大、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,是安全生产过程中面临的重大灾害事故类型,但随着危化品道路运输行业发展规模的迅速增大,危化品物种愈来愈多,危险性质愈发复杂,危险程度愈来愈高,企业安全管理、运输车辆及其设备、人员素质、环境因素等之间的矛盾也越发凸显,风险因素也在不断演化,且由于危化品具有某些特殊的理化性质,导致道路上行驶的危化品运输车辆成了一个流动的危险源,道路运输过程中人、物(危化品、运输车辆及其他设备设施)、环境、管理等4个子系统间风险因素可能会不断耦合形成不同的新风险,从而导致危化品道路运输仍然面临着严峻的安全挑战.

为解决这一严重问题,诸多学者做了一定研究,如:Considine等研究了危险化学品隧道事故发生的概率^[1];Saccomanno等统计分析了在不同气象条件、路程类型、时段的危化品运输事故,并通过计算得到影响事故的重要因素为道路类型^[2];刘越琪等^[3]针对我国危险品运输经营安全的现状,建立了危险品运输模糊层次评价模型指标集;肖心远等^[4]构建了危险品运输三级评价模型指标体系,张增博等^[5]分析影响铁路危险品运输安全5方面主要因素,利用模糊层次分析法(FAHP)的基本原理及评价方法建立危险品运输安全综合评价模型;齐玉超等^[6]建立了特大桥危险品运输集对变权评价模型,吴艳群等^[7]利用集对分析原理,建立了危险品运输集对联系度函数评价模型;魏航等^[8]从人口风险、环境风险和财产风险3个方面对时变条件下的道路危险品运输风险进行了研究;沈小燕^[9]构建了道路危险品运输风险评价模型;卢均臣等统计分析了2012年全球发生的危化品运输事故,并分析得到运输事故高发月份为7月、12月,而常见事故类型分别为泄漏与爆炸^[10];迟钧鸿将保险方案与危化品运输结合起来,优化了责任保险方案^[11].这些学者的研究,在一定程度上促进了危险化学品道路运输安全风险评估技术的发展.然而,针对危险化学品道路运输过程中安全风险是如何发生和发展却鲜有研究.其中对演化过程中的风险耦合情况研究更为稀缺.因此本文将AHP与耦合度量模型结合起来,定量分析各风险因素的耦合情况,为企业制定预防和控制危化品道路运输安全事故管理对策提供理论参考.

1 危化品道路运输安全风险单因素和多因素耦合分析

在物理学中,耦合通常是指把各种相互依赖、相互作用及相互影响的2个或2个以上的实体联合起来的现象^[12].而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复杂动态系统,其安全风险因素耦合指的是运输过程中各种风险因素相互依赖和相互影响的关系,根据危化品道路运输安全风险因素耦合参与的情况,将危化品道路运输系统中人、物、环、管不同情况下的耦合风险分为单因素耦合风险、双因素耦合风险、多因素耦合风险,如图1~图3所示.

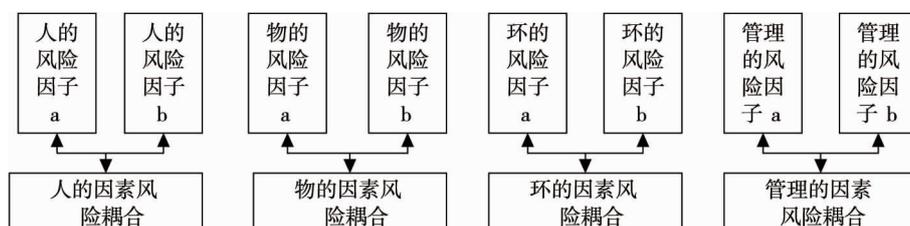


图1 单因素风险耦合

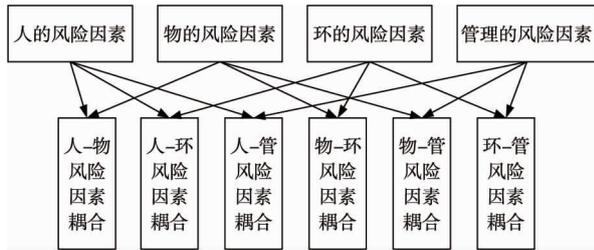


图 2 双因素风险耦合

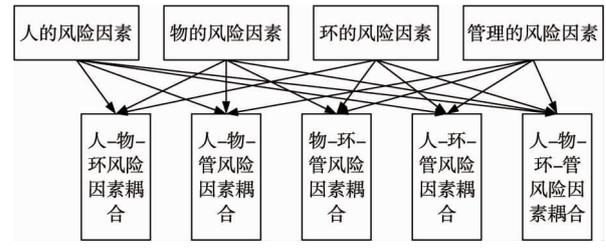


图 3 多因素风险耦合

2 基于 AHP 耦合度的危化品道路运输风险因素评价模型

2.1 评价指标体系的构建

危化品运输事故的发生往往不是由某一个风险因素造成的,而是多个风险因素相互影响、相互作用,相互耦合而导致发生的,因此为更好地预防和控制危化品运输过程中的事故,本文从系统工程中“4M”因素^[13]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、环境的因素、管理的因素为准则层,构建危化品道路运输风险因素评估指标体系,并利用 yaahp 软件作图,而 yaahp 是一款层次分析法辅助软件,可以利用构建的层次模型,将指标重要性输入到软件中,可以直接计算得到最大特征值、权重.它可以保证数据计算的准确性与方便性,具体如图 4 所示.

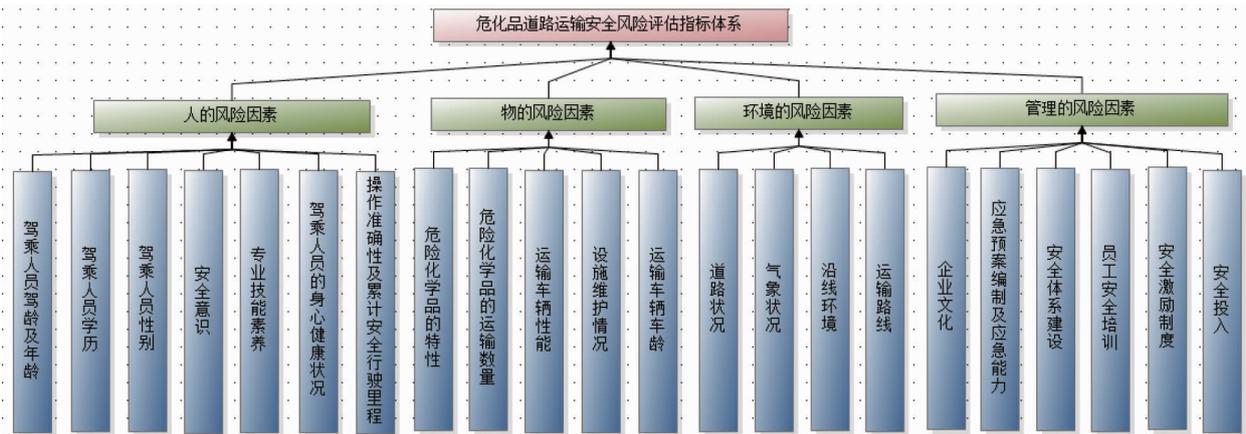


图 4 危险道路运输安全风险评估指标体系

2.2 耦合度的计算

2.2.1 权重分值的确定

本文采用层次分析法(AHP)^[14]来确定各参数指标的权重系数,由于采用 yaahp 软件计算判断矩阵及直接计算权重数值,在此具体步骤不再细说.

2.2.2 功效函数的构建

变量集 $u_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 是耦合系统的序参量,其值是 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$. 系统稳定临界点上序参量的上、下限分别为 a_i, b_i . 故而可以用式(1)表示各风险因素对耦合系统的影响.

$$u_i = \frac{(X_i - b_i)}{(a_i - b_i)}, \quad u_i \text{ 具有正有效 } (i = 1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

根据式(1)构造的结构函数,可以知晓功效函数系数具有以下特点: u_i 反应实现目标的满意度,当 $u_i = 0$ 最不满意,当 $u_i = 1$ 最满意的,所以当 $0 \leq u_i \leq 1$ 时各风险因素内各序参量的有序程度的总贡献可以通过采用几何平均法或线性加权法的应用集成方法实现.

$$U_A(u_i) = \left(\prod u_i \right)^{\frac{1}{n}} = \sum \lambda_i u_i, \quad 0 \leq \lambda_i \sum \lambda_i = 1. \quad (2)$$

式中: u_i, λ_i 为风险因素对总系统的总序参量和每个序参量的权重分值.

2.2.3 耦合度函数的构建

通过分析复杂的动态的危化品道路运输系统,结合上述函数构建方法,得到耦合度函数为

$$C_n = \left\{ \frac{[(U_A(u_1) U_A(u_2) \cdots U_A(u_n))] }{(\prod (U_A(u_i) + U_A(u_j)))} \right\}^{\frac{1}{n}}. \tag{3}$$

显然,耦合度值域为 [0,1].

2.2.4 耦合系统耦合度的计算

利用 2.2.1 节的层次分析法,通过 yaahp 软件构建出判断矩阵,并计算出各个准则层及其指标的权重值,将各个归一化的风险权重值代入到公式中,可计算出风险因素间耦合的数值.

1) 双因素耦合

2 个风险因素的耦合公式可以由式 (3) 推导导出,即 $C_{u_1,u_2} = \{ [U_A(u_1) U_A(u_2)] / [(U_A(u_1) + U_A(u_2))(U_A(u_1) + U_A(u_2))] \}^{1/2}$.

$$\tag{4}$$

同理可以推出其他双因素耦合公式.

2) 三因素耦合,耦合度为

$$C_{u_1,u_2,u_3} = \{ [U_A(u_1) U_A(u_2) U_A(u_3)] / \{ [U_A(u_1) + U_A(u_2)] [U_A(u_1) + U_A(u_3)] [U_A(u_2) + U_A(u_3)] \} \}^{1/3}. \tag{5}$$

同理,可导出 4 个因素之间的耦合度.

3) 单因素内指标与该因素耦合度

针对各子系统下的风险因素指标,首先要计算子系统下一个指标对另一个指标的影响度 $a_i^l(t)$, 它表示 t 年第 i 个因素内第 l 个指标对 j 指标的影响.一般不认为 $a_i^l(t) = a_i^l(t)$, 当 l 对 j 起促进作用时,取 $a_i^l(t) > 0$; 反之取 $a_i^l(t) < 0$, 若无影响取 $a_i^l(t) = 0$. 指标本身之间有影响时, $a_i^l(t) = 1$. 计算其他指标 $l(l \neq j)$ 对 j 指标的总影响量 $b_i^l(t)$

$$b_i^l(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n a_i^j S_i^l(t), \quad (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, \dots, N). \tag{6}$$

这里只计算其他指标 l 对 j 指标的影响结果,即不考虑自身的影响,得到单个风险指标耦合度.

$$C_i^l(t) = \frac{b_i^l(t)}{\sum_{i=1}^n b_i^l(t)}. \tag{7}$$

2.3 耦合度区间

各风险因素的耦合值可以由各风险因素之间的耦合度计算得到,由于风险耦合数值区间是介于 0~1 之间,那么耦合值的大小也就代表了风险程度的高低.风险越大则耦合数值大,风险越小,则耦合数值越小,具体的区域划分如下图 5 所示.

从图 5 中可以看出,耦合值共分为 6 个不同的区间,其具体区间分别为 $0, (0, 0.25), [0.25, 0.50), [0.50, 0.75), [0.75, 1), 1$. 一般来说, 0 代表风险因素之间没有耦合, $(0, 0.25)$ 区间代表风险因素间耦合程度很低,处于相对安全状态, $[0.25, 0.50)$ 区间表明虽然存在风险因素的耦合,但风险程度仍处于可控制范围, $[0.50, 0.75)$ 区间为耦合程度较大,已处于危险区, $[0.75, 1)$ 区间表示表示风险因素耦合程度极高,处于事故常发区间, 1 表示风险耦合满值.危化品道路运输风险因素共包含人、物、环境和管理 4 个子系统因素,共包括 15 种风险因素耦合方式,计算不同风险因素耦合的耦合值,而不同的耦合区间对应不同的分值,将得到的风险分值求和可以得到企业的总风险耦合值.具体耦合区间的对应分值如表 1 所示.

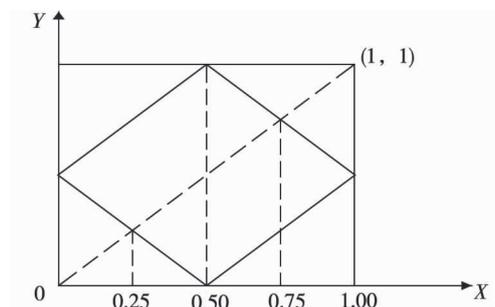


图 5 耦合值区域分布

表 1 风险耦合值

耦合度区间	0	(0,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,1)	1
对应分值	0	3	5	7	9	10

2.4 企业危化品道路运输耦合风险等级的划分

为了方便地对企业运输业务的风险情况进行评估和分析,根据各因素计算出的耦合值,可以知道耦合程度越大,风险越高,事故发生的可能性越大,相应的得分越高.企业运输业务风险耦合评价分值区间为 0~150 分,以及相应的风险等级和程度随分值变化.具体情况如表 2 所示.

表 2 企业风险分值划分

企业分值	[0,30]	(30,60]	(60,90]	(90,120]	(120,150]
风险等级	I	II	III	IV	V
风险程度	低风险	较低风险	一般风险	较高风险	极高风险

如表 2 所示,当危化品道路运输业务风险等级评分区间为 0~30 分时为 I 级,代表风险为可接受的低水平,企业具有非常高的安全管理水平;危化品道路运输业务风险等级评分区间为 30~60 分时为 II 级,风险较低,一般情况下为可接受的风险,风险管理水平较高,评分区间为 60~90 分时企业风险等级为 III,表明风险有增长的趋势,需提高安全管理水平;而危化品道路运输业务风险等级评分区间为 90~120 分时,企业风险等级为 IV 级,表示风险较大,事故产生的频率增加,需要增加一定的安全生产投入,消除危险源及隐患;危化品道路运输业务风险等级评分区间为 120~150 分时,企业风险等级为 V 级,代表事故发生频率极高,必须采取安全有效措施.

3 实例分析

本文以湖南某公司的某一次从湖南长沙到江西赣州运输某危化品的业务为例,对其此次运输业务安全耦合风险进行评估从而评定企业运输业务的风险等级,针对建立的耦合度模型对企业运输业务进行评价并对危化品道路运输业务风险等级进行划分.在充分了解企业基本数据和运输路线的基础上,运用基于 AHP 的公路危险品运输风险评价模型,对危险化学品道路运输的风险水平进行评价.

3.1 风险因素权重的计算和归一化处理

利用 yaahp 软件对所有风险因素进行计算并进行归一化处理,并邀请 10 位安全专家对危化品运输安全风险因素指标进行打分,并四舍五入取平均值,为更好地进行运算,对风险因素实际得分进行归一化处理,具体结果如表 3.

表 3 全部风险因素权重排序

序号	风险因素	权重值	专家平均分	实际得分	归一化处理值
1	安全意识	0.097 5	80	7.800	0.091 0
2	驾乘人员身心健康状况	0.079 8	90	7.182	0.083 0
3	专业技能素养	0.072 3	83	6.000	0.070 0
4	驾乘人员的驾龄及年龄	0.069 3	78	5.405	0.063 0
5	危险化学品的特性	0.060 7	88	5.340	0.062 0
6	运输路线	0.049 8	81	4.033	0.047 0
7	沿线环境	0.047 4	86	4.076	0.047 0
8	设施维护情况	0.046 0	75	3.450	0.403 0
9	危险化学品的运输数量	0.045 0	86	3.870	0.045 0
10	驾乘人员的学历	0.044 4	87	3.862	0.045 2
11	驾乘人员的性别	0.042 8	82	3.509	0.041 0
12	操作准确性及累计安全行驶里程	0.042 0	90	3.780	0.044 0
13	道路状况	0.040 9	73	2.985	0.034 0
14	气象状况	0.040 9	85	3.476	0.040 0

续表

序号	风险因素	权重值	专家平均分	实际得分	归一化处理值
15	运输车辆车龄	0.040 0	84	3.360	0.039 0
16	安全激励制度	0.032 3	92	3.970	0.046 4
17	企业文化	0.030 7	90	2.763	0.032 0
18	运输车辆性能	0.030 2	83	2.506	0.029 0
19	安全投入	0.029 3	93	2.724	0.031 8
20	员工安全培训	0.024 0	81	1.944	0.022 0
21	应急预案编制级应急能力	0.022 5	84	1.890	0.022 0
22	安全体系建设	0.018 1	89	1.611	0.018 8

3.2 耦合度的计算

根据归一处理后的风险值,依据式(1)和式(2)构建的功效函数和耦合函数,并根据风险耦合度公式分别计算出企业风险因素中双因素和多因素的耦合度.根据式(6)和式(7)构建的耦合度公式,计算单因素的耦合度.由于较多的耦合形式,共15种,和较大的数学计算量,计算过程不详细列出,最终的计算结果如表4所示.

表4 风险因素间耦合值

耦合形式	耦合值	耦合形式	耦合值
人	0.320 1	物-环	0.484 2
物	0.268 3	物-管	0.494 3
环境	0.230 1	环-管	0.499 8
管理	0.224 6	人-物-环	0.614 8
人-物	0.468 3	人-环-管	0.601 0
人-环	0.444 3	人-物-管	0.603 1
人-管	0.428 3	物-环-管	0.543 3
人-物-环-管	0.722 1		

3.3 企业运输业务整体风险的计算

运输过程中各风险因素之间的耦合程度越大,表明风险越大,事故越容易发生.根据计算出各因子的耦合值和查找表1不同耦合值对应的分值,将分值进行求和得到总的评分数,如表5所示.

表5 企业风险耦合值

序号	耦合形式	耦合值	分值	总得分
单因素 风险耦合	人	0.320 1	5	81
	物	0.268 3	5	
	环境	0.231 0	3	
	管理	0.224 6	3	
双因素 风险耦合	人-物	0.468 3	5	
	人-环	0.444 3	5	
	人-管	0.428 3	5	
	物-环	0.484 2	5	
	物-管	0.494 3	5	
	环-管	0.499 9	5	
	人-物-环	0.613 4	7	
	人-环-管	0.601 0	7	
多因素 风险耦合	人-物-管	0.603 1	7	
	物-环-管	0.543 3	7	
	人-物-环-管	0.722 1	7	

3.4 危化品道路运输风险等级及评价结果分析

对该次运输业务进行风险等级的划分,按照表5所示,最终得到耦合风险总得分为81分,参考表2所

示,得到此次运输风险耦合评价等级为 III 级,属于一般风险.从表 5 中也可以看出,单因素中人的风险因素耦合度最大,表明企业在制定安全管理措施时,应着重预防人的不安全行为;而双因素与多因素风险耦合均大于单因素风险耦合.

4 结论

1)建立了基于 AHP 耦合度的危化品道路运输风险因素评价模型,通过对各风险因素耦合度的计算得到 4 个风险因素耦合值最大,其次为 3 个风险因素耦合的情况,且 3 个因素耦合风险值大于双因素耦合风险值,这与日常生活中发生的危化品道路运输事故原因相符合.

2)通过湖南某危化品公司实例应用分析和计算,得到该次危化品运输风险耦合评价等级为 III 级,属于一般风险,也证明了该评价方法的具有很好的优越性和可行性.

参考文献:

- [1] Considine M. Risk Assessment of the transportation of hazardous substances through road tunnels [J].Transportation Research Board, 1986;178-185.
- [2] Saccomanno F F, Chan Y W. Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments [J]. Transportation Research Record, 1985, 1020: 12-18.
- [3] 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品运输安全评价研究[J].广东交通职业技术学院学报,2011,10(4):16-19.
- [4] 肖心远,李怀俊,刘越琪,等.危险品运输安全评价指标体系的构建及权重的确定[J].交通标准化,2011(24):93-97.
- [5] 张增博.铁路危险品运输安全性模糊综合评价[J].交通科技与经济,2010,12(4):39-42.
- [6] 齐玉超,张卫刚,陆键.基于集对变权特大桥危险品运输安全评价研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(4):589-593.
- [7] 吴艳群.基于集对分析的危险品道路运输安全水平评价[J].兰州交通大学学报,2017,36(1):23-28.
- [8] 魏航,刘璇.时变随机网络下基于成功和风险的应急路径选择研究[J].管理工程学报,2010,24(2):68-74.
- [9] 沈小燕,刘浩学,谢培.基于主成分分析法的危险货物运输企业安全评价[J].中国安全科学学报,2012,22(1):124-130.
- [10] 卢均臣,王延平,袁纪武,等.2012 年全球危化品运输事故统计分析[J].安全·健康和环境,2013,13(9):7-10.
- [11] 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.
- [12] 刘堂卿,罗帆.空中交通安全风险构成及耦合关系分析[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2012,34(1):93-97.
- [13] Coulter S, Bras B.Reducing environmental impact through systematic product evaluation[J].The International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing,1997,6(2):1-10.
- [14] 孙宏才,田平,王莲芬.网络层次分析法与决策科学[M].北京:国防科学出版社,2011.