

山区高速公路隧道群路段危化品运输风险评价体系研究

黄合来¹, 罗启章¹, 彭韵颖¹, 王杰¹, 李祥², 张弛²

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 湖南省公安厅交通管理局, 湖南 长沙, 410003)

摘要: 以湖南雪峰山隧道群路段为研究对象, 针对其严峻的危化品运输安全管理形势, 调研事故路段特征、危化品运输信息及交通事故特征, 构建交通安全评价模型。以该模型为基础, 通过建立各要素修正因子库, 构建危化品运输风险识别和风险值评价模型, 提出危化品运输风险评价体系。研究表明: 事故预测结果与实际结果较一致, 事故识别与评价模型、评价原则共同构建的危化品运输风险评价体系具有一定的现实指导意义。

关键词: 交通工程; 交通安全管理; 风险识别; 危化品运输; 山区高速公路

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)08-2107-08

Risk evaluation for hazardous chemicals transportation at mountainous freeway with tunnels groups

HUANG Helai¹, LUO Qizhang¹, PENG Yunying¹, WANG Jie¹, LI Xiang², ZHANG Chi²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Traffic Management Bureau of Public Security Department of Hunan Province, Changsha 410003, China)

Abstract: The Xuefeng Mountain tunnel of Hunan Province was taken as the researched object, the serious problem on safety management of hazardous chemicals transportation was dealt with. An intensive investigation on basic information of road, hazardous chemicals and accidents was firstly conducted. Then, the evaluation model of traffic safety was developed. Based on this model and correction factors of variables, the risk identification model and the risk value evaluation model of hazardous chemicals transportation were developed. Finally, the risk evaluation system of hazardous chemicals transportation was developed. The results show that the predicted accident rate agrees well with the actual accident rate, and thus the proposed risk evaluation system can guide the safety management of hazardous chemicals transportation on similar freeways.

Key words: traffic engineering; traffic safety management; risk identification; hazardous chemicals transportation; mountainous highway

目前, 我国危化品大部分经公路运输, 在运输过程中伴随着泄漏事故的潜在风险, 一旦发生事故, 泄露的危化品将对环境和人的健康造成很大危害。经由国家性交通运输主要干道、特大桥梁、特长隧道的危化品运输是整个运输过程的关键环节。截止 2015 年

底, 全国高速公路车道里程为 54.84 万 km, 公路隧道为 14 006 处、1 268.39 万 m^[1]。其中, 特长隧道 744 处、329.98 万 m, 长隧道 3 138 处、537.68 万 m, 承担着大量危化品运输的重任。沪昆(上海—昆明)高速公路邵怀段(湖南邵阳—怀化, K1274—K1428)包含 14

收稿日期: 2017-08-17; 修回日期: 2017-10-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金委员会(NSFC)与香港研究资助局(RGC)联合基金资助项目(71561167001)(Project(71561167001) supported by Jointed Funds of National Natural Science Foundation of China and Research Grants Council of Hong Kong)

通信作者: 黄合来, 博士, 教授, 从事交通安全研究; E-mail: huanghelai@csu.edu.cn

座隧道, 尤其在主线 K1348+660 至 K1367+901 处 19 km 的路段集中了 10 座隧道, 单洞长度 10.491 km, 属于典型的隧道群路段。其中最长的雪峰山隧道为双洞双车道隧道, 全长 6 956 m, 是目前全国高速公路第三长隧道。该路段地势险要, 隧道密布, 桥隧相连, 密闭性强, 通风性差, 抗爆抗热能力弱。旺盛的危化品运输通行需求给该隧道群路段带来了极大的安全隐患和事故风险。因此, 需建立危化品运输风险评价体系, 以便为营造该路段危化品运输良性、有序和科学的安全管理环境提供重要保障。相关研究证明, 道路交通事故是引发危险化学品运输事故的主要原因之一^[2-3], 为此, 本文作者在调研交通事故数据、道路设计参数及危化品运输现状的基础上, 运用交通安全分析、风险研判等理论和技术, 建立基于交通事故预测的危化品运输风险识别模型, 以便为构建危化品运输风险评价体系提供参考。

1 危化品及交通事故数据分析

1.1 危化品运输数据分析

2008—2014 年, 原雪峰山交警中队共查处危化品运输车辆违法案例 293 起, 经统计分析发现: 研究路段危化品运输种类繁多, 包括烟花爆竹、液碱、双氧水、精酚、液化气等在内的爆炸物、易燃物、剧毒品、腐蚀物、氧化物等多种危险化学品, 其中查处烟花爆竹类违法运输次数最多; 危化品来源分布广泛, 危化品车辆来自于湖南、江西、安徽、湖北、河南、江苏、山东、陕西、贵州、四川、云南等 18 个省份。

1.2 交通事故统计分析

研究路段在 2011-10-2016-04 共发生 1 613 起简易事故和 78 起一般事故, 按照交通事故的严重程度分为财产损失事故(即无人员伤亡事故, 1 577 起)、伤人事故(82 起)和死亡事故(32 起)。对事故发生的时间特征、天气条件、车辆类型及事故形态等主要特征进行统计分析, 结果显示:

1) 事故频次最高的月份依次为 2 月、4 月和 10 月份。事故高发月份包含春节、清明节及国庆节等国家法定节假日, 交通流量较大, 对事故数增多可能有一定影响。图 1 所示为交通事故按月份分布图。

2) 10:00—12:00 与 16:00—18:00 是事故高发时间段, 可能与该时间段交通流量增大相关。然而, 夜间事故严重程度(尤其是凌晨)比白天发生事故的严重程度高, 与驾驶员疲劳驾驶等因素相关^[4-5]。图 2 所示为交通事故 24 h 分布图。

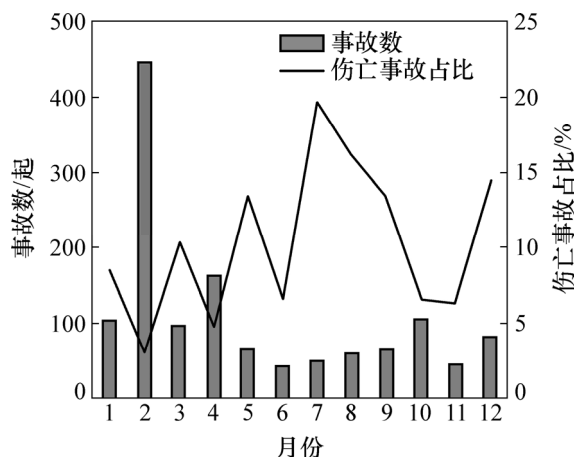


图 1 交通事故按月份分布图

Fig. 1 Distribution of monthly accidents

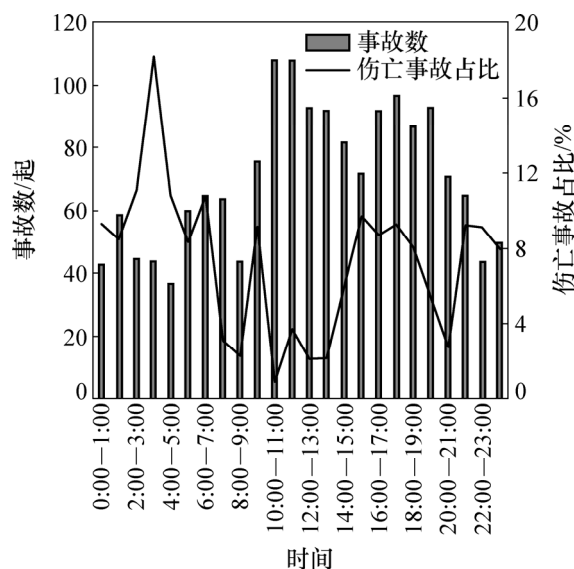


图 2 交通事故 24 h 分布

Fig. 2 Distribution of 24 h accidents

3) 驾驶小型客车发生事故数最多, 驾驶重型货车和大型客车发生交通事故时严重程度较高。而之前的研究也证明, 事故风险与车辆类型组成存在关联^[6-7]。表 1 所示为责任者交通组成分布, 其中, 其他类型包括驾驶微型汽车、驾驶中型货车、驾驶中型客车、驾驶低速货车、驾驶其他机动车、驾驶微型货车、驾驶普通摩托车及步行。

4) 平直与急弯陡坡的道路线形条件下发生的一般交通事故较多, 急弯陡坡较容易发生死亡事故。其中, 由于简易事故无“道路线性”属性列, 故只统计分析一般事故的道路线形特征。表 2 所示为不同道路线形下一般事故分布。

表 1 责任者交通组成分布

Table 1 Traffic composition of accidents

车辆类型	财产损失事故/起	伤人事故/起	死亡事故/起	合计/起	伤亡事故比例/%
驾驶小型客车	1 116	40	11	1 167	4.37
驾驶重型货车	167	19	8	194	13.92
驾驶大型客车	96	7	4	107	10.28
驾驶轻型货车	76	3	2	81	6.17
驾驶汽车列车	54	1	2	57	5.26
其他类型	68	12	5	85	20.00
合计	1 577	82	32	1 691	6.74

表 2 不同道路线型下一般事故分布

Table 2 Normal accidents distribution in various road geometric conditions

道路线型	伤人事故/起	死亡事故/起	合计/起	死亡事故比例/%
急弯陡坡	14	14	28	50.00
连续下坡	0	1	1	100.00
平直	16	14	30	46.67
一般坡	6	3	9	33.33
一般弯	5	0	5	0
一般弯坡	5	0	5	0
合计	46	32	78	41.03

5) 晴天事故数量最多, 但雾天条件下更容易发生严重伤害事故。雪天发生事故时伤亡事故发生的可能性最低, 其主要原因可能是雪天驾驶员行车更谨慎, 车速较低。表 3 所示为不同天气下的事故分布。

表 3 不同天气下事故分布

Table 3 Accidents distribution in various weather conditions

天气	财产损失事故/起	伤人事故/起	死亡事故/起	合计/起	伤亡事故比例/%
晴	631	43	16	690	8.55
雾	6	2	2	10	40.00
雪	64	0	1	65	1.54
阴	393	13	7	413	4.84
雨	483	24	6	513	5.85
合计	1 577	82	32	1 691	6.74

上述分析揭示了雪峰山隧道群路段危化品运输面临的严峻问题和研究路段的交通事故特征。但仅仅描述事故特征并不能全面认识研究路段事故相关风险因素, 尤其是不能挖掘道路特征影响下的事故发生规律,

因此, 需要对此进行进一步分析和研究, 并建立危化品运输风险识别模型。

2 交通事故预测建模

2.1 数据采集与处理

影响事故发生的因素有很多, 包括驾驶行为、道路线形特征、道路环境条件等。同一路段驾驶行为特征具有相似性, 且事故案卷无法详细记录驾驶行为, 故本文基于道路线形、交通设施及交通环境特征预测交通事故风险。数据采集于湖南省高速公路交通警察局和高速公路管理局, 包括东往西、西往东方向洞口至安江互通路段(K1341.0—K1401.0)的道路线形数据和相应路段 2011—10—2016—04 发生的交通事故数据。具体采集变量如下: 道路线形的变量有坡度、坡度方向、弯曲度、曲率半径、路基类型、隧道、平曲线弯曲方向、曲线比、车道数、路段长度、坡长、隧道长度、路肩宽、路缘宽; 交通运行特征变量有货车数占比、年平均日交通量、日均车行驶里程。

亿车公里事故率(次/(10⁸ 辆·km))是通用的道路交通事故率指标之一, 表示 1 亿辆车行驶 1 km 发生的事故数。相比路段长度作为事故机会变量, 将亿车公里事故率作为事故机会变量可排除因车流量差异引起事故率不均的问题^[7-8]。

通过对解释变量进行相关性检验和共线性检验^[9], 筛选出 4 个最能表征事故风险影响因素的变量作为解释变量, 即坡度及坡度方向、曲率半径、曲线比、隧道。

其中, 将坡度与坡度方向通过无序分类变量进行合并。上坡标记为正值, 下坡标记为负值, 将坡度变量划分为 4 个类别, 并对其编码: 坡度 0~2%取 0; 坡度 >2%取 1; 坡度 -2%~0 取 2; 坡度 <-2%取 3。

采用无序分类变量的形式分类曲率半径。将曲率

半径变量划分为 4 个类别, 并对其编码: 直线段取 0; 曲率半径 < 1 km 取 1; 曲率半径 1~2 km 取 2; 曲率半径 > 2 km 取 3。而曲线比的值分布在 0 至 1 之间, 对其他事故风险变量影响较小, 无需标准化处理。

隧道内车辆驾驶行为与隧道外驾驶行为差别较大, 将隧道区段分为隧道进口(100 m 范围内)、隧道内、隧道出口(100 m 范围内)、隧道外 4 个类别, 并对其编码: 隧道外取 0、隧道进口 100 m 范围内取 1、隧道内取 2、隧道出口 100 m 范围内取 3^[10]。图 3 所示为隧道分段示意图。

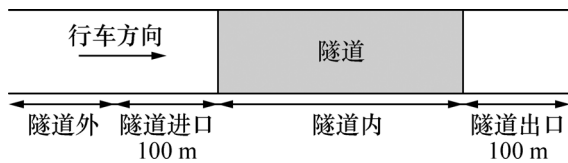


图 3 隧道分段示意图

Fig. 3 Illustration of tunnel segmentation

表 4 所示为最终得到的参与建模变量描述性统计结果。

表 4 参与建模变量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of selected variables

变量	均值	方差	最小值	最大值
事故数/起	5.580	7.210	0	50.00
事故概率/(次·(10 ⁸ 辆·km) ⁻¹)	0.041	0.040	0.001	0.264
坡度	0.909	0.982	0	3.000
曲率半径	1.927	1.533	0	4.000
曲线比	0.661	0.456	0	1.000
隧道区段	0.643	1.044	0	3.000
路段长度/km	0.406	0.416	0.011	2.935

2.2 路段划分

分东往西、西往东方向对洞口至安江互道路段(K1341.0—K1401.0)进行同质性分段, 主要以道路构造、横纵断面特性的一致性为分段依据。为避免出现分段长度过小导致事故机会变量过小、段内事故率过大的统计误差, 分段时将分段长度小于 50 m 的路段与特征属性类似的相邻路段合并^[9]。

同时, 由于研究路段隧道密集, 为探究事故率与隧道位置的关系, 将路段分为隧道进口 100 m、隧道内、隧道出口 100 m、隧道外(与隧道无关) 4 类。最后, 将洞口至安江互通的路段分为 275 段, 其中由西往东方向 141 段, 东往西方向 134 段, 并将事故频次划分到 275 段路段。

2.3 事故频次预测模型

事故发生频次分布过程近似为泊松过程。而经统计分析, 洞口至安江互道路段内各分段事故数均值为 5.580, 事故数方差为 7.210, 事故数方差大于事故数均值, 存在数据过度离散的现象, 标准的泊松模型可能低估了参数的标准误差、高估其显著性水平、保留多余的解释变量, 导致预测结果不合理, 因此, 采用负二项分布模型进行事故频次预测。负二项分布模型即在泊松模型的均值连接函数中引入服从伽马分布的残差项, 以应对交通事故数据中普遍存在的过度离散问题, 能有效提升模型预测精度^[9, 11]。模型形式如下:

$$p_i(X = K) = \frac{\lambda^K}{K!} e^{-\lambda} \quad (1)$$

$$y_i \sim \text{Poisson}(\lambda_i) \quad (2)$$

$$\lg \lambda_i = \lg e_i + \alpha + X_i \beta + \varepsilon_i; i \in (1, 2, \dots, 275) \quad (3)$$

式中: y_i 为在路段 $i(i=1, 2, \dots, 275)$ (西往东 141 段, 东往西 134 段)内发生事故数; λ_i 为泊松分布的均值; e_i 为事故机会; X_i 为事故风险变量; α 和 β 为预测回归参数; ε_i 为残差, 服从伽马分布。同时, 有

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中: R^2 为回归平方和占总离差平方和的比例, 表征预测模型的拟合度, 介于 0~1 之间。拟合度越接近 1, 说明模型越精确, 回归拟合效果越好。

2.4 模型结果

经计算, 得到模型模拟结果如表 5 所示, 表中: α 和 ε_i 分别为式(3)中的截距和残差, P 为模型结果的显著性水平, R^2 为模型的拟合度指标。拟合度指标 R^2 为 0.503。结合历史研究^[9], 该结果表明模型拟合度较高。基于事故预测模型结果, 对模型模拟结果进行分析。

1) 坡度。雪峰山隧道群路段地形特殊, 坡度变化大。模型模拟结果显示, 坡度条件危险度从大到小排列依次为坡度小于 -2%、坡度大于 2%、坡度为 -2%~0、坡度为 0~2%。总体来说, 坡度绝对值越大越易引发交通事故, 且在同一坡度绝对值范围内, 下坡比上坡更易引发交通事故。由于下坡时车辆存在惯性, 且坡度越大, 车速越难控制, 因此, 坡度与事故率存在显著负相关关系。预测结果与文献[12]中结果基本吻合。

2) 曲率半径、曲线比。曲率半径越大, 表明同等条件下驾驶路线越平缓。模型模拟结果显示: 坡度系数危险度从大至小依次为直线、曲率半径小于 1 km、

曲率半径为 1~2 km、曲率半径为 2~3 km、曲率半径大于 3 km。整体而言, 合适曲线设计有利于降低路段事故风险, 大半径曲线最有利。这一结论与文献[11]中结果相吻合。较好的曲线形式有利于提高驾驶员的视觉效应, 避免长直线带来的枯燥感, 从而保证安全。

3) 隧道。相对于普通路段, 隧道事故发生概率相对低。隧道对驾驶员行车安全存在交互效应, 虽然隧道本身对驾驶员视觉造成一定影响, 会增加事故风险, 但在隧道内行驶时驾驶员相对谨慎, 同时降低车辆行驶速度, 从而克服了本身的危险效应, 其事故发生概率反而降低。

基于表 5 所示事故预测模型结果, 得到各路段实际事故率与预测事故率(次/(10⁸ 辆·km))。图 4 和图 5 所示分别为西往东、东往西各路段预测率和实际事故率对比。从图 4 和图 5 可见: 模型的事事故率预测值与实际值整体分布基本一致, 预测值比实际值分布平缓。

2.5 基础事故概率模型

由上述事故频次预测模型及模型结果, 可得到各路段事故基础概率, 计算式如下:

$$Q_y = \exp(5.010 + 0.324s_1 + 0.233s_2 + 0.700s_3 - 0.425r_1 - 0.455r_2 - 0.525r_3 - 0.528r_4 - 0.169T_1 - 0.185T_2 - 0.534T_3 - 0.077R) \quad (5)$$

式中: s_1, s_2 和 s_3 分别表示坡度是否大于 2%、为 -2%~0、小于 -2%的参数, 若是则为 1, 若否则为 0(以坡度 0~2% 为参考对象); r_1, r_2, r_3 和 r_4 分别表示平曲线半径是否小于 1 km、为 1~2 km, 2~3 km 和大于 3 km 的参数, 若是则为 1, 若否则为 0(以直线为参考对象); T_1, T_2 和 T_3 分别表示是否处于隧道进口 100 m 内区段、隧道

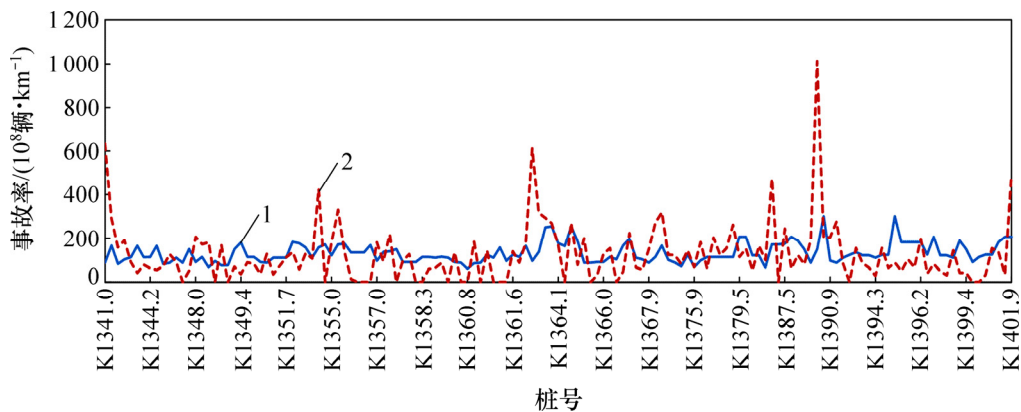
内区段、隧道出口 100 m 内区段的参数, 若是则为 1, 若否则为 0(以隧道外普通路段为参考对象); R 为曲线比, 即路段曲线长度与路段总长度的比值。随着基础数据库(如实时交通流特征)的扩充, 将进一步修正、完善基础概率模型。

表 5 事故预测模型参数估计值

Table 5 Estimated parameters of accident prediction model

条件或参数	参数均值	参数方差	P
坡度 > 2%	0.324	0.079	0
坡度为 -2%~0	0.233	0.075	0
坡度 < -2%	0.700	0.077	0
曲率半径 < 1 km	-0.425	0.191	0.05
曲率半径 1~2 km	-0.455	0.186	0.03
曲率半径 2~3 km	-0.525	0.009	0.09
曲率半径 > 3 km	-0.528	0.065	0
隧道进口	-0.169	0.147	0.22
隧道内	-0.185	0.074	0.02
隧道出口	-0.534	0.172	0.00
曲线比	-0.077	0.120	0.52
α	5.010	0.170	0
ϵ_i	0.821	0.101	0
R^2	0.503	—	—

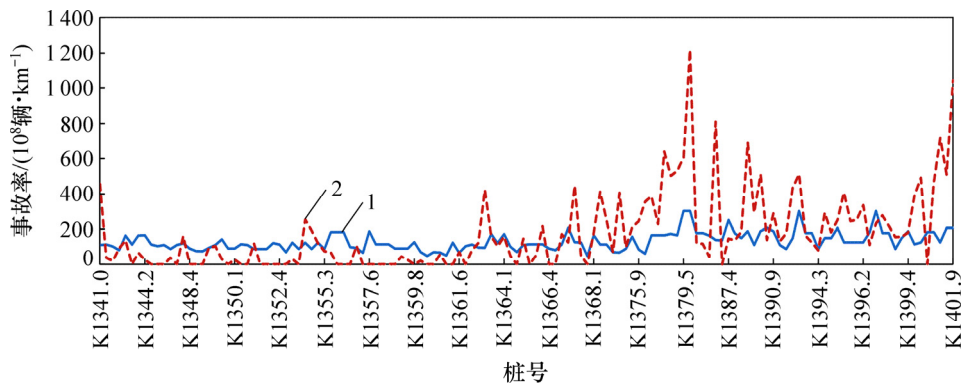
注: 坡度以 0~2% 为参考, 曲率半径以直线为参考, 隧道区段以隧道外普通路段为参考; “—”表示未采用该值; α 为截距; ϵ_i 为残差; R^2 为拟合度; P 为显著性水平。



1—预测事故率; 2—实际事故率。

图 4 西往东方向各路段预测事故率与实际事故率对比

Fig. 4 East bound actual accident rate and predicted accident rate



1—预测事故率；2—实际事故率。

图 5 东往西方向各路段预测事故率与实际事故率对比

Fig. 5 West bound actual accident rate and predicted accident rate

3 危化品运输风险评价

3.1 危化品运输风险识别模型

基础事故预测模型(式(5))只考虑了道路固有特征(道路横纵面几何设计、是否与隧道相关),没有对其他影响因素展开深入研究。在实际使用过程中,若没有对各参数进行深入分析,则不能达到精确计算事故概率的预期目标。因此,需要针对其他重要参数进行进一步研究,计算事故概率修正系数。

考虑事故特征和危化品违法案例,参考经济合作与发展组织(OECD)及相关研究成果^[13-14],修正基础事故概率模型。对包括季节、时间、天气、交通状况和危化品货物类型在内的因素进行修正,得到不同交通风险因素的修正系数,如表 6 所示。

对基础事故概率预测模型进行修正,得到高速公路危化品运输风险识别模型:

$$P(k,i) = Q_y \times K_{季节} \times K_{交通} \times K_{类型} \times K_{天气} \times K_{时间} \times K_{管控} \quad (6)$$

式中: $K_{季节}$, $K_{交通}$, $K_{类型}$, $K_{天气}$, $K_{时间}$ 和 $K_{管控}$ 分别为季节特征、交通流特征、危化品货物类型、气象特征、时间特征、交通管控措施对交通安全效应的修正因子。该模型能够量化危化品运输路段、路径事故风险值,为建立雪峰山隧道群路段危化品运输风险评价体系提供理论支持。

3.2 危化品运输风险值评价模型

风险评估方法对事件发生概率及其造成的后果进行评价。建立如下危化品运输风险值评价模型:

$$R(k,i) = P(k,i) \times M(k) \times (A(k,i) + B(k,i)) \quad (7)$$

式中: $R(k,i)$ 为第 k 类危化品货物在第 i 段道路上的

表 6 不同交通风险因素修正系数

Table 6 Correction factors of various variables related to

traffic safety		
交通风险因素	具体因素或性质	修正系数
季节因素	春	0.58
	夏	1.26
	秋	0.95
	冬	1.20
气象因素	晴天	0.90
	阴天	0.90
	雨	1.00
	雾天	1.40
时间特征	冰雪天气	1.00
	0:00—6:00	1.20
	6:00—12:00	1.15
	12:00—18:00	0.90
交通特征	18:00—24:00	0.95
	低密度<500 辆/h	0.80
	中等密度<1 250 辆/h	1.00
	大密度>1 250 辆/h	1.40
危化品种类	爆炸性	5.00
	气体燃烧性	5.00
	液体燃烧性	4.50
	固体燃烧性	2.50
	自燃性	3.00
	遇水易燃性	1.00
	氧化性	1.50
	毒性	5.00
交通管控	限速	0.90
	押送	0.80

运输风险值; $M(k)$ 为第 k 类危险货物运输事故发生条件下的泄漏条件概率, 可参考美国联邦公路局给定的危化品条件泄露概率计算方法^[15]; $A(k, i)$ 和 $B(k, i)$ 分别表示事故造成的人员和财产损失,

$$A(k, i) = \sum_{i=1}^k (\pi R_k^2 \rho_{1i} + S_{ki} + T_{ki}) \quad (8)$$

$$B(k, i) = \sum_{i=1}^k \pi R_k^2 \rho_{2i} \quad (9)$$

R_k 为第 k 类货物发生事故造成的影响区域半径; ρ_{1i} 为路段 i 段事故影响区域内居住人口密度; S_{ki} 为当事车辆的死亡人数; T_{ki} 为可能引发的二次事故死亡人数; ρ_{2i} 为第 i 段事故影响区域的平均财产密度, 主要考虑对道路固有结构的损害。表 7 所示为危化品道路运输给定事故下的条件泄露概率。

表 7 危化品道路运输给定事故下的条件泄露概率

Table 7 Probability of leakage of hazardous chemicals under conditional accidents

事故类型	事故表现形式	危化品运输泄露概率
单车辆非碰撞事故	冲出路外	0.331
	路上倾翻	0.375
	其他非碰撞事故	0.169
单车辆碰撞事故	与停止车辆碰撞	0.031
	与固定物体碰撞	0.015
多车辆碰撞事故	与乘客车辆碰撞	0.035
	与重型车辆碰撞	0.094
	其他车辆碰撞	0.037

3.3 危化品运输风险评价原则

危化品运输风险评价属于社会风险范畴, 可引入社会风险评价的 ALARP 原则(as low as reasonably practicable, 最低合理可行原则)^[16], 选取系统的风险水平和成本 2 个目标作为参数, 为危化品运输通行决策提供理论支持。由图 5 可见: ALARP 原则建立在 $F-N$ 曲线基础上, 横轴 N 表示事故造成的人员伤亡数, 纵轴 F 表示事故造成人员伤亡数大于或等于 n 的累积频率, 人员伤亡数和累积频率的乘积便是累积风险。其中, 不可容忍线可表示为:

$$F(N) = C/N^2 \quad (10)$$

式中: $F(N)$ 为 $F-N$ 曲线函数; C 为常数; N 为死亡人数。本文采取香港标准, 不可容忍线斜率为 -1, $C=10^{-2}$, 过点 $[N=10, \log(F(N))=10^{-4}]$, 同时, 当死亡人数上限超过 1 000 人时, 风险值落入不可容忍区。当风险值

落入不可容忍区时, 禁止该危险品运输通行; 在 ALARP 区时, 采取相应措施减少风险; 在可接受区时, 忽略该类风险。危化品运输风险识别模型、评价模型以及该评价原则, 共同构建危化品运输风险评价体系, 可为危化品运输安全管控提供定量研判依据。

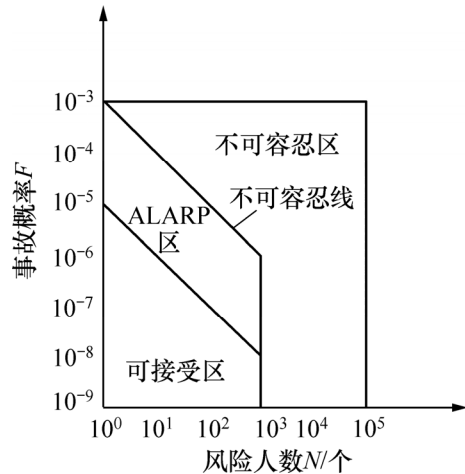


图 6 危化品运输风险 $F-N$ 原则

Fig. 6 $F-N$ principle of hazardous chemicals transportation

4 结论

1) 针对雪峰山隧道群路段危化品运输安全管理症结和交通事故特征, 通过事故预测建模技术, 提出了危化品运输风险识别模型和风险值评价模型, 并以此构建了遵循 ALARP 原则的危化品运输风险评价体系, 对同类高速公路危化品运输安全管理具有一定的借鉴意义。

2) 基础事故预测模型预测结果与实际事故分布情况基本一致, 预测值比实际值平缓, 模型具有较强的预测能力。但由于缺少危化品运输事故数据, 危化品运输风险评价模型未得到验证。

3) 危化品运输有其社会需求, 宜科学分析, 良性管控。建议在加强运输安全管理的同时, 还应加强源头防控, 协调综合执法, 加强联网调控, 加大科技投入, 梳理相关法规和各部门管理职责, 从而建立健全高效的危化品运输安全监管体系。

4) 后期的研究应考虑更多的事故修正因素如隧道桥梁特征、景观特征、驾驶员行为特征等; 并收集危化品运输事故数据(如危化品运输事故的时间特征、交通流特征、危化品货物类型等), 验证和完善危化品运输风险识别模型, 进一步提高模型预测精度。

参考文献:

- [1] 交通运输部综合规划司. 2015 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 交通运输部综合规划司, 2016: 2.
Department of Comprehensive Planning, Ministry of Transport. Transportation development statistics bulletin in 2015[R]. Beijing: Department of Comprehensive Planning, Ministry of Transport, 2016: 2.
- [2] 闫利勇, 陈永光. 危险化学品公路运输事故新特点及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 65-70.
YAN Liyong, CHEN Yonggang. Study on new characteristics and the countermeasures of road transportation accident of hazardous chemicals[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(4): 65-70.
- [3] 吴宗之, 孙猛. 200 起危险化学品公路运输事故的统计分析及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2): 3-8.
WU Zongzhi, SUN Meng. Statistical analysis and countermeasure study on 200 road transportation accidents of dangerous chemicals[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(2): 3-8.
- [4] WANG Chao, QUDDUS M A, ISON S G. The effect of traffic and road characteristics on road safety: a review and future research direction[J]. Safety Science, 2013, 57(8): 264-275.
- [5] ABEGAZ T, BERHANE Y, WORKU A, et al. Effects of excessive speeding and falling asleep while driving on crash injury severity in Ethiopia: a generalized ordered logit model analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 71(10): 15-21.
- [6] LAO Yunteng, ZHANG Guohui, WANG Yin Hai, et al. Generalized nonlinear models for rear-end crash risk analysis[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 62(5): 9-16.
- [7] DONG Chunjiao, DONG Qiao, HUANG Baoshan, et al. Estimating factors contributing to frequency and severity of large truck-involved crashes[J]. Journal of Transportation Engineering. Part A: Systems, 2017, 143(8): 04017032.
- [8] YU Rongjie, XIONG Yingge, ABDEL-ATY M. A correlated random parameter approach to investigate the effects of weather conditions on crash risk for a mountainous freeway[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 50: 68-77.
- [9] AHMED M, HUANG Helai, ABDEL-ATY M, et al. Exploring a Bayesian hierarchical approach for developing safety performance functions for a mountainous freeway[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(4): 1581-1589.
- [10] HUANG Helai, PENG Yunying, WANG Jie, et al. Interactive risk analysis on crash injury severity at a mountainous freeway with tunnel groups in China[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 111: 56-62.
- [11] 孟祥海, 张晓明, 郑来. 基于线形与交通状态的山区高速公路追尾事故预测[J]. 中国公路学报, 2012(4): 113-118.
MENG Xianghai, ZHANG Xiaoming, ZHENG Lai. Prediction of rear-end collision on mountainous expressway based on geometric alignment and traffic condition[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012(4): 113-118.
- [12] AGBELIE B R D K. Random-parameters analysis of highway characteristics on crash frequency and injury severity[J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering, 2016, 3(3): 236-242.
- [13] Organization for Economic Cooperation and Development, World Road Association. Safety in tunnels: transport of dangerous goods through road tunnels[M]. Paris: OECD Publishing, 2001: 33-48.
- [14] 陶健. 基于贝叶斯网络的山区道路危险货物运输风险评价研究[D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2011: 28-30.
TAO Jian. Risk Assessment of hazardous materials transportation by mountains road based on Bayesian network[D]. Xi'an: Chang'an University. School of Automobile, 2011: 28-30.
- [15] HARWOOD D W, VINER J G, RUSSELL E R. Procedure for developing truck accident and release rates for Hazmat routing[J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 2(2): 189-199.
- [16] 黄利群, 杨珏, 王春艳. 基于 ALARP 原则的突发性水污染事件风险评价研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(4): 23-26.
HUANG Liqun, YANG Yu, WANG Chunyan. ALARP principle based study on risk assessment of sudden water pollution incident[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(4): 23-26.

(编辑 陈灿华)