

文章编号:1671-2579(2014)06-0191-07

中国公路隧道运营风险接受准则研究

赵峰^{1,2},夏永旭¹,常海兵³

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064; 2. 中交远洲交通科技集团有限公司; 3. 中交一公局第一工程有限公司)

摘要: 该文通过对中国 2000—2008 年各类主要事故死亡率以及自然灾害死亡率进行统计分析,并结合个人风险接受准则的制定原则,给出了中国建议的公路交通行业个人风险接受准则;通过对欧洲几个主要国家的社会风险接受准则进行分析探讨,结合社会风险接受准则的制定原则以及中国国情,提出了建议的中国公路隧道运营社会风险接受准则 $F-N$ 曲线,进而给出了建议的经济风险接受准则 $F-D$ 曲线以及环境风险接受准则 $F-T$ 曲线。

关键词: 公路隧道;运营风险;个人风险;社会风险;接受准则

隧道作为地下工程具有不可预见性的特点,在建设和运营过程中存在着巨大的风险。自 1999 年勃朗峰隧道发生严重火灾以来,国内外在公路隧道建设和运营过程中发生了多起重大事故,这些事故造成了巨大的人员伤亡和经济损失,产生了严重的社会不良影响,并引发了公众对公路隧道运输的不安全感。如何识别这些风险,并通过适当的手段来减少事故发生的频率或减小事故发生的后果,均属于风险管理的范畴。因此,将风险管理的相关理论引入到隧道工程中已刻不容缓。中国对于隧道建设期风险的研究已经取得了一定的成果,但是对于运营期风险的研究则相对较少,尤其对于风险接受准则研究更是处于起步阶段,这就使得风险评估结果没有合适的标准可以遵循,无法合理判定风险是否可以接受。因此,对于公路隧道运营风险接受准则的研究也迫在眉睫。

1 风险接受准则概述

风险接受准则(Risk Acceptance Criteria)表示在规定的时间内或系统的某一行为阶段内可接受的风险等级,它是风险分析以及制定减小风险措施的基础。因此,在进行风险分析时风险接受准则应是预先给定的。在制定风险接受准则时,除了考虑人员伤亡、经济损失等可量化的指标外,还需考虑难以货币化的因素,如潜在的环境损失、污染、人员健康或社会公众影响等方面的因素。根据国内外研究资料及工程风险后果,国内外基本上将风险接受准则分为 3 大类,见图 1。



图 1 风险接受准则分类

1.1 个人风险接受准则

个人风险 IR (Individual Risk)是最早由荷兰住房规划和环境部 VROM 提出的一种个人安全风险的评估与接受准则,该准则以人员伤亡数及其可能发生的概率为考核指标。个人风险 IR 是指长期生活在某一特定场所的未采取任何防护措施的人员由于遭受某种危害事故而导致死亡的概率,其数学模型的表达式为:

$$IR = P_f \cdot P_{d|f} \quad (1)$$

式中: P_f 为风险事故发生的基础概率; $P_{d|f}$ 为风险事故发生后可能导致人员死亡的条件概率。

目前,国际上制定和建立的个人风险接受准则主要有以下几种:

(1) 荷兰 IR 主要用于确定危害装置、道路运输和机场的个人风险:

$$IR < 1 \times 10^{-6} / \text{年} \quad (2)$$

(2) 荷兰的水务技术咨询协会 TAW 根据个人参与风险活动的自愿程度,为风险接受准则设置了一个范围:

$$IR < \beta \times 10^{-4} / \text{年} \quad (3)$$

式中: β 为意愿系数,该系数依据个人参与某项活动的自愿程度和期望获利的大小而不同,取值随着自愿程度不同和获利程度不同在 $100 \sim 0.01$ 之间变化。

收稿日期:2014-06-28

作者简介:赵峰,男,博士,高级工程师. E-mail:zhaof2000@163.com

(3) 英国健康与安全委员会 HSE 根据参与人员的不同,制定了个人风险接受准则 IR_{HSE} :

$$IR_{HSE} \leq 1 \times 10^{-6} / \text{年} \quad (4)$$

式中: 1×10^{-6} 是一个对于工人和公众来说广泛的可接受风险和可容忍风险之间的边界。

由于使用方法和具体应用情况存在差异,不同国家和组织制定的个体风险准则也存在明显差异。一般认为个人风险低于 1×10^{-6} / 年被认为已经“低至合理水平”,而生活、工作在高于 1×10^{-6} / 年环境中的人或多或少和自己的意愿有关。

1.2 社会风险接受准则

社会风险 SR (Society Risk) 用于表示某种特定危害发生后,特定人群中遭受某个水平伤害的人数和频率之间的相互关系。如果定义某区域 (x, y) 的个人风险水平为 $IR(x, y)$, 当地的人口密度为 $h(x, y)$, 则该地区的社会风险可表示为:

$$SR = E(N) = \iint_A IR(x, y)h(x, y)dx dy \quad (5)$$

式中: A 为考虑地区的面积。

社会风险准则通常用 $F-N$ 曲线图来表示。 $F-N$ 曲线是一条各种风险事故所允许发生的限制曲线, $F-N$ 曲线是一个在二维的区间上表示死亡人数与死亡概率之间的函数关系:

$$1 - F_N(x) = P(x < N) = \int_x^\infty f_N(x)dx \quad (6)$$

式中: $F_N(x)$ 为年平均死亡人数的概率分布函数; $f_N(x)$ 为年平均死亡人数的概率密度函数; $P(x < N)$ 为年均死亡人数小于 N 的可能发生概率; N 为某项工程允许人员伤亡值(人数); x 为某项工程可能人员伤亡值(人数)。

式(7)为 $F-N$ 曲线的一种常见表述形式,每年死亡人数大于 N 的概率:

$$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^n} \quad (7)$$

式中: n 为风险极限曲线的斜率; C 为风险极限曲线位置确定常数。在上述公式中,当 $n=1$ 时,称为中性风险; $n=2$ 时,称为风险厌恶。

1.3 经济风险接受准则

目前,国内外各个行业还没有统一的经济风险(Economic Risk)接受准则,部分领域采取 $F-D$ 曲线(Frequency-Damage Curve)来表示经济风险, $F-D$ 曲线描述了事故造成的经济损失及其超越概率之间的函数关系。 $F-D$ 曲线可以由经济损失的概率密度函

数 $f_D(x)$ 得出:

$$1 - F_D(x) = P(x < D) = \int_x^\infty f_D(x)dx \quad (8)$$

式中: $F_D(x)$ 为经济损失的概率分布函数; $f_D(x)$ 为经济损失的概率密度函数; $P(x < D)$ 为经济损失小于允许损失 D 的可能发生概率; x 为经济损失。

以 $F-D$ 曲线图表现的经济风险接受准则的确定标准为:

$$1 - F_D(x) < \frac{C}{x^n} \quad (9)$$

式中: n 为风险极限曲线的斜率; C 为风险极限曲线位置确定常数。

1.4 环境风险接受准则

挪威海洋部门 NORSOK 建议以 $F-T$ 曲线来表示环境风险, $F-T$ 曲线描述了被破坏环境系统恢复所需时间的超越概率:

$$1 - F_T(x) = P(x < T) = \int_x^\infty f_T(x)dx \quad (10)$$

式中: $F_T(x)$ 为环境系统恢复时间的概率分布函数; $f_T(x)$ 为环境系统恢复时间的概率密度函数; $P(x < T)$ 为环境系统恢复所需年数小于允许年数 T 的可能发生概率; x 为环境系统恢复所需年数。

以 $F-T$ 曲线图表现的环境风险接受准则的确定标准为:

$$1 - F_T(x) < \frac{C}{x^n} \quad (11)$$

式中: C, n 意义同前。

2 中国公路隧道运营风险接受准则研究

截至目前,国内外专门针对公路隧道运营风险接受准则的研究很少。该文确定公路交通行业的个人及社会风险接受准则工作的基本思路是:

(1) 收集其他国家关于个人风险和社会风险可接受准则的相关数据。

(2) 收集中国自然灾害(如地震、水灾、飓风等)和人为灾害(如交通事故、火灾等)造成的各种非正常死亡情况的有关资料,整理统计出相应的死亡率。

(3) 收集中国政府及社会劳动保护组织对某些特定行业(如:煤矿业、建筑业等)历史上发生事故的类别(如:特大事故、重大事故等)划分依据。

(4) 收集发生在历史上和近期的公路交通行业(特别是公路隧道)发生破坏性事故所造成的人员死亡

数和伤亡率。

(5) 分析对比上述资料,提出可接受人员伤亡率的建议。

(6) 通过问卷调查的形式,咨询熟悉公路隧道行业相关专业人员和管理专家的意见。

(7) 在此基础上,制定出较为合理的社会可接受的公路隧道行业人员伤亡准则。

2.1 个人风险接受准则研究

(1) 中国公路交通事故统计及分析

获取充足事故统计资料和数据是进行人群聚集风险计算的前提。该文从《安全与环境学报》历年事故统计资料汇编以及中国国家安全生产监督管理总局网站上获取了部分国内公共场所事故统计资料(时间跨度为 2000—2008 年),图 2 为 2000—2008 年各类事故造成人员死亡占总死亡人数的比例。从统计结果看,道路交通事故是造成人员死亡的主要因素,2000—2008 年共造成约 86.4 万人死亡,占各类事故总死亡人数的比例约为 79%。

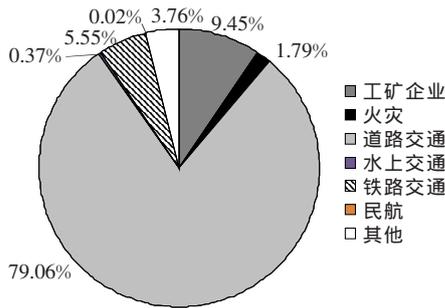


图 2 2000—2008 年我国各类事故死亡人数占总事故数的比例

通过对中国历次全国人口普查公布的人口总数进行公式拟合,可以得出中国 2000—2008 年各年份中国的人口总数,同时结合公布的各类事故死亡人数以及自然灾害死亡人数绘制出道路交通事故死亡率、总事故死亡率以及自然灾害死亡率对比图(图 3)。从统计图中可以看出:从 2000—2008 年交通事故死亡率以及总事故死亡率均呈下降趋势,道路交通事故率从 2000 年的 7.39×10^{-5} /年下降至 2008 年的 5.55×10^{-5} /年,全部事故死亡率从 2000 年的 9.3×10^{-5} /年下降至 2008 年的 6.89×10^{-5} /年。自然灾害由于受每年气候影响,有一定的变化。从已公布的 2000—2007 数据来看,自然灾害造成的平均死亡率约为 2.0×10^{-6} /年,较之各类事故造成死亡率要小得多。

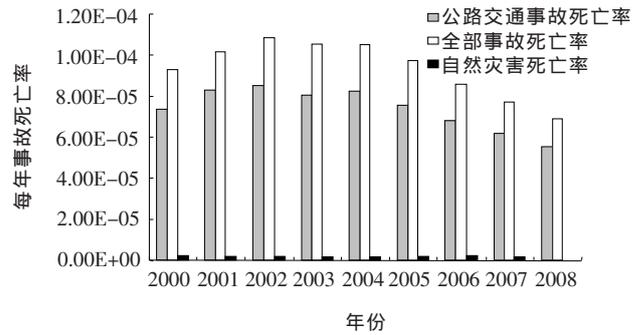


图 3 2000—2008 年中国事故率柱状图

(2) 个人风险接受准则研究

制定个人风险接受准则是一个复杂的过程。在制定个人风险接受准则时,应考虑多个因素。主要有:

1) 与现有标准的协调。从各国已制定的个人风险标准来看,可接受标准大多为 1×10^{-6} /年,可忍受的标准一般从 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$ /年不等。

2) 个人承受风险的自愿性。一般而言,人们对于自愿参加的活动的容忍度要大于非自愿参与的项目。因此,公众驾车或乘车参与道路交通及通过公路隧道属于一种中性偏非自愿的行为,Virlinging 认为驾车行为造成的事故率可作为可接受准则的边界。

3) 技术风险的影响。人们对于由于自然原因造成的个人风险容忍度要大于由于人为原因造成的风险。大型工程由于地质、地形、技术条件比较复杂带来了较大的风险,公众对于大型工程的风险容忍度往往会有所提高。但是,大型工程建设是经过严格评估和授权的,公众认为该工程的风险应该是公众能够承受的。因此,公众对于大型工程由于技术风险高给带来风险提高有一定的容忍度,但是有限的。从近几年的统计资料来看,自然灾害带给中国公众的风险在 2×10^{-6} /年左右,而事故造成的平均死亡率在 $6.9 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-4}$ /年左右,对于特定的人群(如工人)则更高,公路交通事故造成的平均死亡率在 $5.6 \times 10^{-5} \sim 8.5 \times 10^{-5}$ /年之间。

4) 统计风险。由于中国人口众多,幅员辽阔,部分行业事故或自然灾害造成的人员伤亡可能由于种种原因未能计入统计范畴。因此,从中国国情考虑,人口实际总死亡率会适当增加。

5) 可实现性。从前述统计资料看,中国公路交通事故造成的公众死亡是所有事故中的最主要的因素,约占总死亡人数的 79%,且道路事故死亡率在逐年下降。但是随着经济的发展,中国近几年机动车保有量在逐年上升,而且该趋势一直在延续。大量的新车新

手上路,给道路交通安全带来巨大的隐患。因此,未来一段时间内公路交通事故造成的人员死亡仍将是影响所有事故死亡率不稳定的主要因素。如果个人风险可接受准则定得过于严格,政府或者投资者付出成本过高,该准则将会难以实行。

因此,结合上述几条设置原则,确定中国公路交通个人风险的可接受标准与国际上常用的标准应该一致,即为 1×10^{-6} /年。对于可忍受标准,根据目前的现状,建议中国交通行业的标准确定为 5×10^{-5} /年。则公路交通行业个人风险接受准则为:可接受标准: 1×10^{-6} /年;可忍受标准: 5×10^{-5} /年。

2.2 社会风险接受准则研究

确定社会风险接受准则是一个非常复杂的问题,它受政治、经济、公众心理、技术发展水平等因素影响。该文仅以国际上常用的 $F-N$ 曲线作为接受标准来进行研究,首先需要确定风险曲线的起点、终点,曲线斜率 n 以及常数 C 。图4为欧洲几个国家采用或推荐采用的公路隧道社会风险接受准则 $F-N$ 曲线。

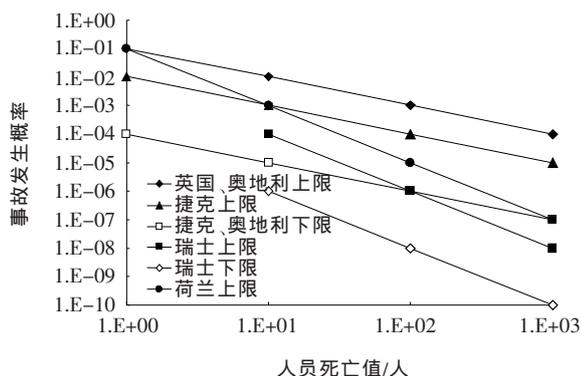


图4 部分国家采用的公路隧道社会风险接受准则 $F-N$ 曲线

Milan Holicky 通过对欧洲常用的几种公路隧道社会风险接受准则 $F-N$ 曲线进行分析,认为英国、奥地利的 $F-N$ 曲线上限属于一种宽松的边界,捷克的上限属于一种比较严格的边界,荷兰的上限则属于一种中性的边界。而捷克、奥地利的下限属于较为严格的边界。他认为采用严格的下限边界将导致ALARP区域过宽,实际操作过程中难以满足下边界要求。按Milan Holicky对边界的分类,瑞士的上、下限设置应属于最为严格的边界,这与瑞士的国情有关。因此,在中国公路隧道运营风险接受准则制定中应充分考虑这些因素。

(1) 风险厌恶水平

对于整个社会而言,1次死亡10人的事故与10次死亡1人的事故,产生的后果从理性上讲是相同的。

但是公众对于一次重大的人员伤亡事故反应往往要大得多。相对于发生概率小但后果严重的事故,人们更容易接受发生概率较大但后果较小的事故。这反映了公众的风险厌恶态度。荷兰和瑞士就是采用了风险厌恶的 $F-N$ 曲线,而英国、捷克和奥地利等国家采用了风险中性的 $F-N$ 曲线,斜率 n 取为1。

风险厌恶是社会的一种非理性现象,但确实普遍存在。重大事故有时会产生巨大的负面社会影响,并可能超出事故本身的范畴,引起的连锁反应和附加损失难以预料,因此对于决策者来说必须加以重视。文献[24]中曾建议中国长大隧道工程建设期社会风险准则 $F-N$ 曲线斜率 n 定为2。参考国外的研究结果并结合中国国情,建议将中国公路隧道运营期 $F-N$ 曲线斜率定为2。

(2) 与现有安全生产法规体系相协调

中国现有的安全生产法规体系为2007年6月1日执行的国务院《安全生产事故报告和调查处理条例》和GB 6441-86《企业职工伤亡事故分类标准》。《公路隧道建设安全风险评估指南》(试用本)参考上述的相关规定,对事故人员伤亡等级标准进行了定义,如表1所示。

表1 人员伤亡等级标准

等级	定义
1	重伤5人以下
2	人员死亡(含失踪)3人以下或重伤5~10人
3	人员死亡(含失踪)3~10人或重伤10~50人
4	人员死亡(含失踪)10~30人或重伤50~100人
5	人员死亡(含失踪)30人以上或重伤100以上

根据公安部公布的交通事故年度统计数据,在有死亡发生的交通事故中,死亡人数大多在1~3人之间,因此建议死亡人数的起点定为1;同时参考相关资料,所有公路隧道运营事故造成的死亡人数都远小于1000人(造成1000多人死亡的萨兰隧道事故是在特殊军事背景下造成的,在此不予考虑),建议中国风险忍受线死亡人员的截止线定为1000人。

(3) 事故概率起点的确定

根据公安部公布的每年交通事故相关统计数据,中国2002—2008年交通事故的年万车死亡率如表2所示。从表2可以看出中国公路交通万车死亡率在逐年下降,至2008年已降至4.3,表明中国的道路安全水平正在逐渐提高。然而同世界其他国家尤其欧美国家

家相比,中国的万车死亡率仍是比较高的。中国与欧洲各国相同年份的万车死亡率对比如表 3 所示。

表 2 中国历年万车死亡率统计

年份	万车死亡率	年份	万车死亡率
2002	13.7	2006	6.2
2003	10.8	2007	5.1
2004	9.9	2008	4.3
2005	7.6	2009	3.6

表 3 中国与部分国家万车死亡率对比

国家	万车死亡率		中国/他国(倍)	
	2002	2008	2002	2008
中国	13.7	4.3		
英国	1.18	0.87	11.6	4.9
法国	2.16	1.3	6.3	3.3
荷兰	1.21	—	11.3	—
丹麦	1.87	—	7.3	—
日本	0.81	0.63	16.9	6.8
美国	1.79	1.63	7.7	2.6

如图 4 所示,英国、奥地利和荷兰均将 $F-N$ 曲线忍受线的概率起点设置为 1×10^{-1} ,捷克和瑞士则将忍受线的概率起点设置为 1×10^{-2} 。而根据表 2、3,2002 年中国的万车死亡率是欧美各国的 6.3~16.9 倍,至 2008 年,仍是英国的 4.9 倍,北欧国家的 7.8~9.1 倍。中国的万车死亡率要远大于欧美等国家。参照开放空间道路上的万车死亡率国内外比例,假定隧道内交通事故死亡率国内外比例与道路上相一致。公路隧道风险接受准则上限(忍受线)确定的一个原则就是隧道内的风险不应该超过开放空间道路上的风险。因此,在拟定中国公路隧道忍受线概率起点时宜适当提高并考虑一定的前瞻性,结合英国、奥地利和荷兰的标准,建议中国 $F-N$ 曲线忍受线的概率起点提高 5 倍为 5×10^{-1} 。

在确定社会风险接受准则下限(接受线)时,一般采用上限(忍受线)起点的 $1/100 \sim 1/1000$ 。接受线的制定一般均较为严格,且应具有一定的前瞻性,捷克、奥地利和瑞士均将隧道内风险下限(接受线)的概率起点设置为 1×10^{-4} 。考虑到建议的 $F-N$ 曲线已经采用了较为严格的风险厌恶的斜率,因此将中国 $F-N$ 曲线忍受下限的概率起点设为 1×10^{-3} 。

根据已经拟定的 $F-N$ 曲线的斜率、死亡人数起

始点以及上下限的起始点,最终建议中国公路隧道运营社会风险接受准则 $F-N$ 曲线如图 5 所示。图 6 是建议的运营风险接受准则 $F-N$ 曲线与欧洲几个国家风险接受准则 $F-N$ 曲线的对比图。

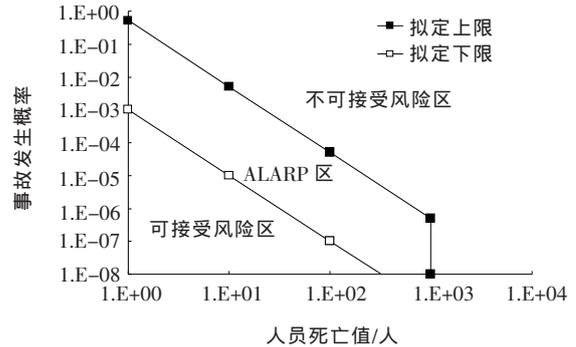


图 5 建议的中国公路隧道运营社会风险接受准则 $F-N$ 曲线

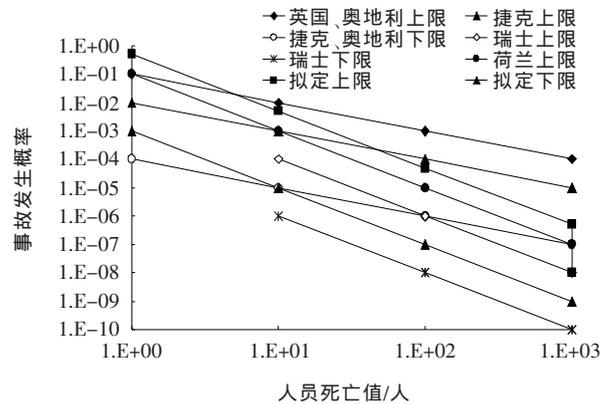


图 6 建议的中国公路隧道运营风险接受准则与部分国家 $F-N$ 曲线对比图

2.3 经济风险接受准则研究

对于风险造成的损失,人们首先关心的是生命损失。欧洲各国及香港对于风险接受准则的研究主要还是集中在与生命安全相关的个人风险接受准则和社会风险接受准则这两方面,对经济风险接受准则的研究则相对较少。

一般交通事故造成的经济损失主要还是集中在车辆以及货物损失方面,只有小概率的火灾事故、危险品事故以及地震等事故会给隧道结构造成较大的损失。国务院 2007 年发布的《安全生产事故报告和调查处理条例》以及《公路隧道建设安全风险评估指南》(试用本)中对经济损失等级进行了定义,如表 4 所示。

参照表 4 中经济损失的定义并做适当修正,将第一个等级的下限定为 50 万元并作为经济损失的起点。50 000 万元作为经济损失的截止线,可以满足中国现

有公路隧道运营造成损失的极限。式(9)中的 $F-D$ 曲线中上限起点概率的取值,参照 $F-N$ 曲线中较为中性的边界,与生命损失不同,不再进行提高, C 取 0.1, n 取 2。最终建议的中国 $F-D$ 曲线如图 7 所示。

表 4 经济损失等级标准

等级	定义
1	损失 500 万元以下
2	财产损失 500~1 000 万元
3	财产损失 1 000~5 000 万元
4	财产损失 5 000~10 000 万元
5	财产损失 10 000 万元以上

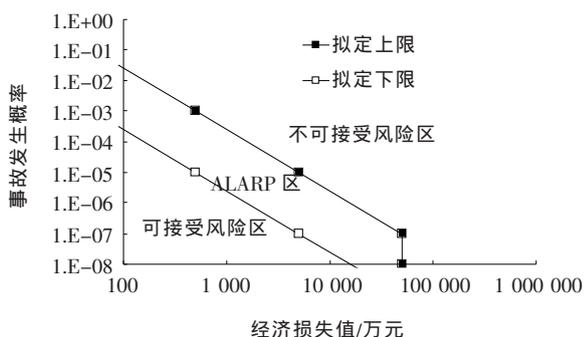


图 7 建议的中国公路隧道运营经济风险接受准则 $F-D$ 曲线

2.4 环境风险接受准则研究

(1) 现行规范标准中对风险损失的分级

目前,国内外对于环境风险还没有较为科学合理和完善的环境风险接受准则。中国《公路隧道建设安全风险评估指南》(试用本)与《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》中对环境等级标准等级定义分别如表 5、6 所示。挪威对环境等级的分级标准:轻微的环境污染指需要 1 个月到 1 年恢复,中等的环境污染指需要

1~3 年恢复,明显的环境污染指需要 3~10 年恢复,严重的环境污染指需要 10 年以上恢复。

表 5 环境等级标准

等级	损失严重程度描述
1	涉及范围很小,无群体性影响,需紧急转移安置小于 50 人
2	涉及范围较小,一般群体性影响,需紧急转移安置 50~100 人
3	涉及范围大,区域正常经济、社会活动受影响,需紧急转移安置 100~500 人
4	涉及范围很大,区域生态功能部分丧失,需紧急转移安置 500~1 000 人
5	涉及范围非常大,区域内周边生态功能严重丧失,紧急转移安置 1 000 人以上,正常的经济、社会活动受到严重影响

表 6 环境影响等级标准

后果定性描述	后果等级	环境影响描述
灾难性的	5	永久的且严重的
很严重的	4	永久的且轻微的
严重的	3	长期的
较大的	2	临时的但严重的
轻微的	1	临时的且轻微的

如上所述,目前国内外对环境风险的定义并不统一,中国《公路隧道建设安全风险评估指南》(试用本)中定义环境风险等级标准考虑了事故对环境的影响范围、影响人数,而挪威和铁路的标准中则仅考虑了时间的因素。因此,考虑与国家标准的衔接,该文建议中国的环境风险等级标准如表 7 所示。

表 7 建议中国的环境风险等级标准

等级	损失严重程度描述	恢复时间
1	涉及范围很小,无群体性影响,需紧急转移安置小于 50 人	6 个月以下
2	涉及范围较小,一般群体性影响,需紧急转移安置 50~100 人	6 个月至 1 年
3	涉及范围大,区域正常经济、社会活动受影响,需紧急转移安置 100~500 人	1~3 年
4	涉及范围很大,区域生态功能部分丧失,需紧急转移安置 500~1 000 人	3~10 年
5	涉及范围非常大,区域内周边生态功能严重丧失,紧急转移安置 1 000 人以上,正常的经济、社会活动受到严重影响	10 年以上

(2) 环境风险接受准则研究

环境风险接受准则在表 7 的基础上,考虑以环境

恢复时间来表示环境损失。在确定横轴风险损失时,参考社会风险的制定原则,考虑以第 2 个级别的环境

损失起始点6个月作为横轴起点,为临时环境损失;以6000个月(500年)作为截至线,为永久性的环境损失。建议的中国公路隧道运营环境风险接受准则 $F-T$ 曲线如图8所示。

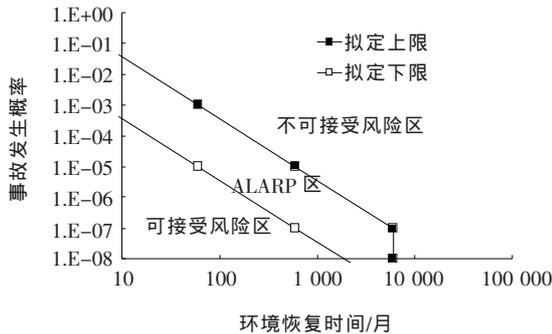


图8 建议的中国公路隧道运营环境风险接受准则 $F-T$ 曲线

3 结论

(1) 通过对中国2000—2008年各类主要事故死亡率以及自然灾害死亡率进行统计分析,并结合个人风险接受准则的制定原则,提出了中国公路交通行业的个人风险接受准则:可接受标准为 1×10^{-6} /年,可忍受标准为 5×10^{-5} /年。

(2) 通过对欧洲几个主要国家的社会风险接受准则进行总结分析,并结合社会风险接受准则的制定原则以及中国国情,给出了建议的中国公路隧道运营社会风险接受准则 $F-N$ 曲线,进而给出了建议的中国公路隧道运营经济风险接受准则 $F-D$ 曲线以及环境风险接受准则 $F-T$ 曲线。

参考文献:

[1] Jonkman, S. N., van Gelder, P. H. A. J. M., et al. An Overview of Quantitative Risk Measures for Loss of Life and Economic Damage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, A99:1-30.

[2] Knoflach H., Pfaffenbichler P. C. A Comparative Risk Analysis for Selected Austrian Tunnels [A]. International Conference Tunnel Safety and Ventilation [C]. Graz, 2004:1-8.

[3] Lukas Rakpsnlk. Quantitative Analysis of Transport of Dangerous Goods through the Road Tunnel Sitina in BRATISLAVA [J]. Tunnel, 2007, 16(3).

[4] Milan Holicky. Risk Criteria for Road Tunnels [A]. Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication [C], Stanford University, 2007.

[5] PIARC Technical Committee C3. 3 Road Tunnel Operation. Risk Analysis for Road Tunnels [R]. France: PIARC, 2008.

[6] Vojtech EKSLER, Marco POPOLIZIO, Richard ALL-SOP. How Far from Zero Benchmark of Road Safety Performance in the Nordic Countries [M]. ETSC, Brussels, 2009.

[7] Vrijling, J. K., P. H. A. J. M. van Gelder, et al. Criteria for Acceptable Risk in the Netherlands. Infrastructure Risk Management Processes: Natural, Accidental and Deliberate Hazards [M]. ASCE Publications, 2005.

[8] 地铁及地下工程建设风险管理指南(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[9] 冯长根, 王亚军. 2005年中国安全生产事故与自然灾害状况 [J]. 安全与环境学报, 2007(5).

[10] 冯长根, 王亚军. 2006年中国安全生产事故与自然灾害状况 [J]. 安全与环境学报, 2007(6).

[11] 冯长根, 王亚军. 2007年中国安全生产事故与自然灾害状况 [J]. 安全与环境学报, 2008(6).

[12] GB 6441-86 企业职工伤亡事故分类标准 [S].

[13] 黄平, 王亚军, 刘强. 2000年国内重特大事故数据 [J]. 安全与环境学报, 2001(1).

[14] 黄平, 王亚军, 李生才. 2003年11月—2004年2月国内安全事故统计分析 [J]. 安全与环境学报, 2003(2).

[15] 李典庆, 唐文勇, 张圣坤. 海洋工程风险接受准则研究进展 [J]. 海洋工程, 2003(2).

[16] 沈斐敏. 道路交通事故预测与预防 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[17] 铁建设[2007]200号. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定 [S].

[18] 王亚军, 黄平. 2001年12月—2002年2月国内安全事故数据 [J]. 安全与环境学报, 2002(2).

[19] 王亚军, 黄平, 李生才. 2002年11月—2003年2月国内安全事故数据 [J]. 安全与环境学报, 2003(2).

[20] 王亚军, 黄平, 李生才. 2004年11—12月国内安全事故统计分析 [J]. 安全与环境学报, 2005(1).

[21] 王亚军, 黄平, 李生才. 2005年11—12月国内安全事故统计分析 [J]. 安全与环境学报, 2006(1).

[22] 王亚军, 黄平, 李生才. 2006年11—12月国内安全事故统计分析 [J]. 安全与环境学报, 2007(1).

[23] 王亚军, 黄平, 李生才. 2007年11—12月国内安全事故统计分析 [J]. 安全与环境学报, 2008(1).

[24] 周杨. 长大隧道工程建设期风险接受准则研究 [D]. 同济大学硕士学位论文, 2007.

[25] 中华人民共和国国务院令(第493号). 安全生产事故报告和调查处理条例 [Z], 2007.

[26] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道建设安全风险评估指南(试用本) [S], 2009.