

# 高速公路交通气象灾害风险评估方法简介

柳艳香<sup>1</sup> 潘进军<sup>1</sup> 田华<sup>1</sup> 吴昊<sup>1</sup> 李嵩恂<sup>1</sup> 戴至修<sup>1</sup> 杨静<sup>1</sup> 宋建洋<sup>1</sup> 王志<sup>1</sup> 李巧媛<sup>2</sup>

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 湖南省气象台, 长沙 410007)

**摘要:** 简要介绍了我国高速公路交通气象灾害风险评估方法。选取了对高速公路交通运行影响最大的气象因子: 低能见度、降雨、冰冻雨雪和大风, 通过模糊数学法和灰色关联度等方法的客观计算, 以及AHP的主观打分等方法对高速公路交通运行致灾的气象因子危险性进行了研究, 结合孕灾环境的敏感性、承灾体的暴露性和脆弱性及防灾减灾能力等要素, 基于GIS技术将各指标栅格成10 km×10 km的基本单元进行拓扑处理, 将高速公路交通气象灾害风险从高到低划分为5个等级, 用不同颜色表示, 最终得到了全国高速公路交通气象灾害风险的评估结果。

**关键词:** 高速公路, 交通气象灾害, 风险评估, GIS

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.003

## An Introduction to a Risk Assessment Method of Traffic Meteorological Disaster on Highway in China

Liu Yanxiang<sup>1</sup>, Pan Jinjun<sup>1</sup>, Tian Hua<sup>1</sup>, Wu Hao<sup>1</sup>, Li Aixun<sup>1</sup>, Dai Zhixiu<sup>1</sup>, Yan Jing<sup>1</sup>, Song Jianyang<sup>1</sup>, Wang Zhi<sup>1</sup>, Li Qiaoyuan<sup>2</sup>

(1 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Center, Beijing 100081

2 Hunan Province Meteorological Observatory, Changsha 410007)

**Abstract:** A risk assessment method of traffic meteorological disasters on Highway was introduced in this paper. The hazard of meteorological factors, such as low visibility, heavy rainfall, gale and frozen rain and snow, were analyzed by applying Fuzzy mathematical and Grey correlation, and were compared with subjective method of AHP. Simultaneously, the risk of traffic meteorological disaster on highway was assessed by using the sensitivities, exposure, vulnerability and capacity of disaster prevention and reduction. Based on GIS technology, the area was divided into the basic grid units of 10 km×10 km over China. The each index was processed on the grids, such as normalization, calculation, overlaying and classification. Ultimately, the risk assessment of traffic meteorological disasters on Highway in China was presented as in, 5 grades from high to low classified with red, orange, yellow, blue, green, respectively.

**Keywords:** highway, traffic meteorology disaster, risk assessment, Fuzzy mathematical, Grey correlation, GIS

### 0 引言

随着全球气候变暖, 极端天气气候事件频发, 导致气象灾害风险越来越严重<sup>[1]</sup>, 在我国社会经济中承担着重要作用的高速公路交通运输也面临着巨大的风险。2005年, 世界经济合作与发展组织(OECD)国际未来计划(IFP)就明确将交通运输作为21世纪必须关注的重大风险之一<sup>[2]</sup>。近年来, 我国的公路建设飞速发展, 截至2015年, 我国公路总里程457.73万km, 高速公路里程已达12.35万km, 高居世界第一<sup>[3]</sup>, 高速公路的物理暴露性和脆弱性相应增大, 高速公路交通气象的灾害风险也随之加大<sup>[4-5]</sup>。我国的交通事故有近30%是发生在恶劣的天气条件中<sup>[6]</sup>, 如2008年我国南方19个省(区)出现了历史罕见的持续低温

雨雪冰冻天气, 导致道路交通运输主要枢纽大面积瘫痪<sup>[7]</sup>。2013年新疆维吾尔自治区路网运行因天气及其衍生灾害造成的阻断占路网阻断总量的45%<sup>[8]</sup>。

目前高速公路交通气象预报只是针对道路上天气要素的预报, 并没有做到对道路交通运行影响的预报, 本文基于承灾体的暴露性和脆弱性, 开展了极端气象因子对高速公路交通运行致灾的风险研究, 评估了全国高速公路交通气象灾害风险, 旨在能够有效地为相关部门的防灾减灾决策提供科学依据。

### 1 高速公路交通气象风险灾害风险评估

根据WMO的定义, 自然灾害风险是指在某个特定时期由于危害性自然事件造成某个社区或社会的正常运行出现剧烈改变的可能性, 这些事件与各种脆弱的社会条件相互作用, 最终导致大范围不利的人员、物质、经济或环境影响, 需要立即做出应急响应, 以满足危急中的人员需要, 而且可能需要外部援助方可

收稿日期: 2016年8月30日; 修回日期: 2017年4月10日  
第一作者: 柳艳香(1966—), Email: liuyx@cma.gov.cn

恢复。IPCC第五次评估报告中进一步强调自然灾害风险源于天气或气候事件与载体（暴露度和脆弱性）的相互作用，前者属于灾害风险的物理贡献因子，而后者属于风险中人类方面的贡献因子<sup>[1]</sup>。自然灾害风险评估就是对灾害风险区不同强度灾害的可能性及其可能造成的后果进行定量和评估<sup>[9-10]</sup>。目前国际上通用的评估自然灾害风险程度的计算公式<sup>[11-13]</sup>为：自然灾害风险程度 = 危险性 × 暴露性 × 脆弱性 × 防灾减灾能力。

高速公路是暴露在自然环境中的人工构造物，而高速公路交通气象灾害风险（图1）是指由气象致灾因子的危险性及其对承灾体的暴露性和脆弱性造成的影响和损失，以及与风险区域的防灾减灾能力相互作用所决定的<sup>[14-15]</sup>。

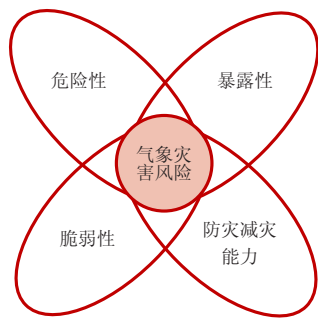


图1 高速公路交通气象灾害风险评估

Fig.1 Risk assessment of traffic meteorological disasters on highway

### 1.1 致灾因子的危险性

对高速公路交通造成影响的致灾气象因子主要有低能见度、冰冻雨雪、降雨和大风。低能见度包括由于沙尘、雾和霾、降雨、降雪、风吹雪等要素造成的能见度降低，导致行车可视距离降低。低于500 m的能见度就会对高速公路交通造成一定的影响，雨强大于10 mm/h的降雨对高速公路交通会产生比较明显的影响，而平均风大于5级（8 m/s）或阵风大于7级（13.9 m/s）时会对高速公路交通车辆带来一定的风险<sup>[16]</sup>。冬季北方的降雪、南方低温降雨、雨夹雪及冻雨等对高速公路交通都会产生不同程度的影响，为了描述各影响因子对高速公路交通带来的危险，可将其参数化为一个综合的冰冻雨雪影响因子。致灾因子的危险性主要考虑指标为各要素的强度、持续时间及出现频率。

由于高速公路途径地形的起伏度、坡度和土壤/岩石类型受到降雨侵蚀易造成道路塌陷、边坡塌方及地质灾害等风险的影响，而河网分布和植被覆盖率等因子也会因降雨造成路面积水、道路受损等，这些对交通运输存在潜在的风险。对于冰冻雨雪，不同的坡度或向阳、背阴等地形作用，路面积雪、结冰和消融等

作用对道路运输的安全性会产生不可忽视的影响。所以孕灾环境的敏感性在高速公路交通气象灾害风险评估中是不可或缺的一个重要指标。敏感性越高，孕灾环境就越脆弱，气象灾害造成的损失越严重，气象灾害的风险也越大。

### 1.2 暴露性

受到致灾因子威胁的高速公路交通的暴露性主要包括影响区域的路网密度、高速公路里程密度及车流量，同时还包括影响区域内的人口密度及人均车辆保有量。影响区域人口密度越大、人均车辆保有量越多，遭受影响的潜在损失就越大，灾害风险就越大。同样，路网密度和高速公路里程密度越大、车流量越大，其潜在的风险也会越大。

### 1.3 脆弱性

在危险区域内存在的如交通事故、人员伤亡、经济损失或交通阻断，以及高速公路存在的交通隐患点等，其综合反应了自然灾害的损失程度及潜在的风险。脆弱性越大，灾害损失就越大。

### 1.4 防灾减灾能力

防灾减灾能力主要取决于影响区域的社会经济水平，如地均国内生产总值（GDP）和人均收入水平（人均GDP）以及当地政府的投入预算。地均GDP，是每平方千米土地创造的GDP，反应土地的使用效率（可以部分反应此地的工业与商业密集程度），它是一个反映产值密度及经济发达水平的极好指标。人均GDP是一个国家或地区在核算期内（通常为一年）实现的生产总值与所属范围内的常住人口的比值。地均GDP和人均GDP都能较好地反映区域的社会经济水平。减灾投入资源（包括财力和人力）储备越多，可能遭受的潜在损失就越小，能够从灾害中恢复的程度就越高。防灾减灾能力越高，灾害风险越小。

### 1.5 风险等级划分

在高速公路交通气象灾害风险评估中，通过研究分析给出各致灾因子对高速公路交通带来的风险程度，确定风险阈值，根据不同的阈值范围将灾害风险划分为五级，数字表示分别为I、II、III、IV、V级，对应颜色分别为红、橙、黄、蓝、绿，对应的风险程度分别为极高、高、中、低、极低。

## 2 灾害风险评估方法

在高速公路交通气象灾害风险评估中，为了客观评价致灾因子的危险性对综合风险的贡献，采用了层次分析法、客观计算法和混合评估法等方法进行综合评估。

### 2.1 层次分析法

层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）

是将半定性、半定量问题转化为定量问题的有效途径, 通过将各种因素层次化, 并逐步比较多种关联因素, 确定综合评价的权重系数<sup>[17-19]</sup>。表1给出了高速公路交通气象灾害风险评估中的目标层、准则层和指标层(详细的指标层设计详见文献<sup>[20]</sup>)。

表1 AHP指标层设计  
Table 1 Design of the AHP index levels

目标层	准则层	指标层
高速公路 交通气象 灾害风险	危险性 (低能见度、冰冻雨雪、降雨、大风)	强度、持续时间、出现频率
	敏感性 (降雨、冰冻雨雪)	土壤/岩石类型、坡度/起伏度、河网分布、植被覆盖率
	暴露性	人口密度、车流量、里程密度、路网密度、车辆保有量
	脆弱性	交通灾情、人员伤亡、经济损失、交通阻断、交通隐患点
	防灾减灾能力	地均GDP、人均GDP、投入预算

按照Saaty标度方法<sup>[18]</sup>(表2), 通过对目标层下的准则层和指标层的所有要素进行两两比较后进行赋值。如两个横向因素相比, 相同重要, 则打分为1; 若绝对重要则打分9, 即数字越大, 表明前者就越重要, 反之则为1/9。数字2、4、6、8的重要性分别介于1、3、5、7、9之间。

表2 AHP法打分规则  
Table 2 Rule of the AHP score

标度	含义
1	表示两个要素相比, 具有同样重要性
3	表示两个要素相比, 前者比后者稍微重要
5	表示两个要素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个要素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个要素相比, 前者比后者绝对重要
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值
上列各数的倒数	另一因素对原因素的反比

根据AHP打分法则, 多名交通行业和气象行业专家对表1的各要素进行对比研判并量化, 采用排序向量的特征值法计算权重, 当随机一致性比率小于0.1时, 认为比较矩阵具有满意的一致性; 反之则不满足一致性原则, 打分无效<sup>[19, 21-23]</sup>。这种方法直观实用但主观性较强。

## 2.2 客观计算法

为了避免各指标间权重估算中的主观性, 在致灾因子的危险性计算中采用了客观的数学物理统计方法, 如熵权法和灰色关联度方法。

### 2.2.1 熵权法<sup>[24]</sup>

在低能见度、风和降雨的危险性计算中采用了熵权法。

如, 在有 $m$ 个评价指标,  $n$ 个评价对象的评估中, 定义第 $i$ 个指标的熵为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad i=1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

式中,  $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$ , 当 $f_{ij}=0$ 时, 令 $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。其中 $r_{ij}$ 为第 $j$ 个评价对象在第 $i$ 个评价指标上的标准值,  $r_{ij} \in [0, 1]$ 。

第 $i$ 个指标的熵权为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, \quad (2)$$

式中,  $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

### 2.2.2 灰色关联度方法<sup>[25]</sup>

在降雨的危险性计算中, 除了熵权法, 还结合了灰色关联度方法进行计算。冰冻雨雪是一个参数化指标, 它是降水、气温和地表温度等要素的一个综合指标, 可用灰色关联度方法来判别各要素的贡献大小。

关联系数:

$$\rho_k(j) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{jk} + \rho \Delta_{\max}}, \quad (3)$$

式中,  $\Delta_{jk} = \max_j(o_{jk}) - o_{jk}$ ,  $\Delta_{\max} = \max(\Delta_{jk})$ ,  $\Delta_{\min} = \min(\Delta_{jk})$ , 分辨系数 $\rho=0.5$ 。

级指标与拟最大危险性序列关联度可视作级别权重:

$$q_k = \frac{\sum_{j=1}^3 \rho_k(j)}{3}, \quad (4)$$

设计隶属矩阵方案的重点在于选择合适的分配函数, 降半梯形法是一种简单实用的近似方案, 以此计算隶属判断矩阵, 其中中间级别元素 $r_{jki}$  ( $k \neq 0, 4$ ) 和第0和第4级元素 $r_{j0i}$ 、 $r_{j4i}$ 计算方案如下:

$$r_{jki} = \begin{cases} 0, & a_{ij} < R_{jk} \\ \frac{a_{ij} - R_{jk}}{R_{j(k+1)} - R_{jk}}, & R_{jk} \leq a_{ij} \leq R_{j(k+1)}, \\ 0, & a_{ij} > R_{j(k+1)} \end{cases}$$

$$r_{j0i} = \begin{cases} \frac{a_{ij}}{R_{j1}}, & 0 \leq a_{ij} \leq R_{j1}, \\ 0, & a_{ij} > R_{j1} \end{cases}$$

$$r_{j4i} = \begin{cases} 0, & a_{ij} < R_{j3} \\ \frac{a_{ij} - R_{j3}}{R_{j4} - R_{j3}}, & R_{j3} \leq a_{ij} < R_{j4}, \\ 1, & a_{ij} \geq R_{j4} \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 混合评估法

在文献[20]中,详细分析了不同行业专家对各准则层和各指标层的打分结果。结果表明致灾因子的危险性占综合风险的40~50%,如低能见度占49.7%、降雨占42.6%、冰冻雨雪占42.7%、风占47.8%<sup>[20]</sup>。所以,如果致灾因子的危险性采用客观计算,则在一定程度上会降低由于主观因素造成的综合风险度评估的偏差,同时也会避免不同行业专家对交叉学科领域某些认知的偏差<sup>[20]</sup>,而对于孕灾环境的敏感性、承灾体的暴露性、脆弱性以及防灾减灾能力及其各指标层之间的权重则采用专家打分结果,这样,采用客观和主观混合评估的方法,可以使高速公路交通气象灾害风险评估结果更客观更合理。

### 3 GIS技术的应用

高速公路交通气象灾害风险的评估,需要应用大量的气象灾害、交通事故灾情和社会性数据,这些数据均具有地理属性,即具有空间属性。为了细化各种指标的灾情和自然属性在高速公路交通的影响,用GIS技术将各指标的行政单元(地、县级)转化成10 km×10 km栅格的基本单元,在每个单元格内对每个准则层(危险性、暴露性、脆弱性及防灾减灾能力)都单独进行归一化处理,并进行图形的叠加、划分和合并等拓扑操作<sup>[26-28]</sup>,然后再根据准则层的权重计算得到全国高速公路交通气象灾害的综合风险评估结果。不同的致灾因子,其综合风险度的计算方法不同,有的要素准则层之间采用加和关系,有的采用乘法关系,具体方法需要取决于极端天气的类型<sup>[29]</sup>而定。

### 4 结论与讨论

本文简单介绍了一种高速公路交通气象灾害风险评估方法,对高速公路交通气象致灾因子低能见度、降雨、冰冻雨雪和风的危险性,分别采用客观计算和主观打分方法进行了对比研究,对灾害风险贡献占比达到40%~50%的致灾因子危险性的客观分析有效地提高了灾害风险评估的可信度。但对不同行业专家认知度比较一致的孕灾环境的敏感性、承灾体的暴露性和脆弱性在灾害风险中的贡献则采用了主观方法。这种客观和主观相结合的混合评估方法,有效降低了不同领域专家对非本专业认知的不确定性而造成的偏差,使评估结果更趋客观化、合理化。

近年来,我国高速公路处在一个高速发展阶段,在高速公路交通气象灾害风险的评估中,能够得到的高速公路暴露性和脆弱性相关指标的数据长度明显不足,可能会对评估结果产生一定的影响。另外,高影响天气因子预警信息的发布,对提高防灾减灾能力具

有重要的作用,如及时封闭道路或采取相应的防控措施,会有效降低高速公路交通气象灾害风险。所以,如果要得到更精细化的高速公路交通气象灾害风险评估,就需要不断地延长和更新相关数据,增加其可信度,同时还需要充分考虑预警指标发布产生的效用。

#### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Davidson R A, Lamber K B. Comparing the hurricane disaster risk of U.S. coastal counties. *Nature Hazards Review*, 2001, 2(3): 132-142.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 2015年交通运输行业发展统计公报. 中华人民共和国交通运输部, 2016.
- [4] 刘燕华,葛全胜,方修琦,等. 全球环境变化与中国国家安全. 2005年年会暨全球环境变化与区域安全学术研讨会. 2005年12月10-11日,北京. 国际全球变化人文因素计划中国国家委员会(CNC-IHDP).
- [5] 张清,黄朝迎. 我国交通运输气候灾害的初步研究. *灾害学*, 1998, (3): 43-46.
- [6] 李长城,汤筠筠,葛涛,等. 恶劣气象条件下公路运行安全管理与保障技术. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [7] 王遵娅,张强,陈峪,等. 2008年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征. *气候变化研究进展*, 2008, 4(2): 63-67.
- [8] 新疆维吾尔自治区交通运输厅. 2013年度新疆维吾尔自治区公路网运行分析报告. 新疆维吾尔自治区交通运输厅, 2014.
- [9] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法. 北京:气象出版社, 2014.
- [10] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践. 北京:科学出版社, 2005.
- [11] 张继权,李宇. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用. 北京:北京师范大学出版社, 2007: 73-78.
- [12] 张继全,冈田宪夫,多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理——全面整合的模式与中国的战略选择. *自然灾害学报*, 2006, 15(10): 29-37.
- [13] Gary S. An assessment of disaster risk and its management in Thailand. *Disaster*, 1997, 2(11): 77-88.
- [14] 张继全,吕军. 实用气象学. 长春:吉林科学技术出版社, 2005.
- [15] 陆亚龙,肖功建. 气象灾害及其防御. 北京:气象出版社, 2001.
- [16] 高庆华. 中国自然灾害的分布与分区减灾对策. *地学前缘*, 2003, 10(s1): 258-264.
- [17] 中国气象局. 高速公路交通气象条件等级: QX/T 111-2010. 北京:气象出版社, 2010.
- [18] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48(11): 9-26.
- [19] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [20] 柳艳香,郇婧婧,李嵩恂,等. AHP法不同行业专家咨询结果差异的对比分析. *公路*, 2017(6): 186-192.
- [21] 姜启源. 数学模型. 北京:高等教育出版社, 1993: 305-335.
- [22] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论. 北京:中国人民大学出版社, 1990: 103-108, 350-384.
- [23] 陈义华. 数学建模的层次分析法. *甘肃工业大学学报*, 1997, 23(3): 92-97.
- [24] 曾蓉,陈洪凯,李俊业. 熵权模糊综合评价法在公路洪灾危险性评价中的应用. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(4): 587-591.
- [25] 张绍良,张国良. 灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析. *系统工程*, 1996(3): 45-49.
- [26] Chen Y, Yu J, Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling Software*, 2010, 25(12): 1582-1591.
- [27] Feizizadeh B, Jankowski P, Blaschke T. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers Geosciences*, 2014, 64: 81-95.
- [28] 王平. 基于GIS的自然灾害区划方法研究. *地学前缘*, 2001, 8(4): 321-322.
- [29] Jeanne L, Elizabeth C C, Aizhan T, et al. Vulnerability assessment for loss of access to drinking water due to extreme weather events. *Climatic Change*, 2015, 133(11): 665-679.