

河北省高速公路路面结冰风险区划研究

张中杰¹ 张娣² 曲晓黎² 王洁²

(1 河北省气象科学研究所, 石家庄 050021; 2 河北省气象服务中心, 石家庄 050021)

摘要: 基于河北省2011—2015年10月至第二年4月国家气象站数据、交通气象站数据、路面结冰风险普查数据、因路面结冰造成的交通管制和交通事故数据、车流量数据以及地理信息等数据, 从致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性和承载体敏感性构建了高速公路路面结冰风险区划评价指标, 利用层次分析法和GIS技术制定了河北省高速公路路面结冰风险区划。结果表明: 河北省北部及邯郸西部山区高速公路为路面结冰高风险路段; 张家口东部、承德南部、保定西部和石家庄西部山区和河北省东南部地区部分高速公路为路面结冰较高风险路段; 京秦高速迁西支线、京昆、津汕、黄石、邢衡等高速部分路段为路面结冰低风险路段。

关键词: 高速公路, 路面结冰, 风险区划, 层次分析法, GIS

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.010

Risk Zoning Technology of Road Icing Disasters on Expressway in Hebei Province

Zhang Zhongjie¹, Zhang Di², Qu Xiaoli², Wang Jie²

(1 Meteorological Science Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050021 2 Public Meteorological Service Centre of Hebei Province, Shijiazhuang 050021)

Abstract: Based on the data of national meteorological station, traffic meteorological station, road icing risk survey, traffic control, traffic accident, traffic flowing and geography information from October to April of the following year during 2011–2015 in Hebei Province, the evaluation index system of road icing risk zoning was constructed from three aspects including hazard factors, hazard-pregnant environment vulnerability and bearing body sensitivity, then the road icing risk zoning of expressway in Hebei Province correct to toll station was completed by using analytic hierarchy process and GIS technology. The results show: The expressways in northern Hebei and western mountainous area of Handan are high risk of road icing. The expressways in eastern Zhangjiakou, southern Chengde, western mountainous area of Baoding, western mountainous area of Shijiazhuang and southeastern Hebei are sub-high risk of road icing. The expressways of Qianxi Branch of Beijing to Qinhuangdao, Beijing to Kunming, Tianjin to Shantou, Huanghua to Shijiazhuang and Xingtai to Hengshui are low risk of road icing.

Keywords: expressway, road icing, risk zoning, analytic hierarchy process, GIS

0 引言

公路交通作为我国国民经济的重要组成部分, 也是受气象条件影响的高敏感行业^[1]。河北省环绕京津, 车流量密集, 交通高影响天气频发。据统计, 38.3% 的高速公路封闭事件是由气象因素造成的^[2], 其中以雾居首, 道路结冰次之。驾驶员认为冬季低温雨雪造成的高速公路路面结冰是影响交通安全高影响天气的首位^[3-4], 路面结冰发生时, 轮胎与路面摩擦系数减小, 车辆容易打滑、空转或溜车^[5-6], 容易引发重大交通事故。因此开展高速公路路面结冰风险区划研究, 对于交通运输安全保障至关重要^[7]。欧洲学者对于路

面温度和路面结冰预报研究较多, 建立了多种预报模式^[8-11], 国内对于路面温度预报和路面温度特征及气象条件研究较多^[12-15], 对雾、低温、雨雪等风险区划等也有一定的研究^[2, 16-18], 顾婷婷等^[19]对浙江省低温雨雪冰冻灾害进行了评估与风险区划研究, 汪超等^[20]分析了贵州省道路结冰灾害风险区划, 王春玲等^[21]基于京津冀气象站数据对高速公路冰冻灾害进行了风险区划, 多是依靠气象数据或者地理信息数据, 而结合交通气象灾害风险普查数据和基于路段的高速公路路况信息等行业信息的研究较少, 因此尝试开展基于路段的高速公路路面结冰风险区划研究, 对冬季高速公路交通运输安全具有重要意义。

1 数据资料与处理

气象资料来源于河北省内国家气象站和高速公路沿线交通气象站的气温、降水、地温等数据, 因路

收稿日期: 2020年12月31日; 修回日期: 2021年2月7日
第一作者: 张中杰(1968—), Email: 13315996720@189.cn
资助信息: 河北省重点研发计划项目(19275413D)

面结冰、积雪等造成的交通管制和交通事故资料来自河北省高速公路出行信息网。由于河北省南北纬度跨度较大，入冬时间北部早南部晚，北部地区冬季时间最长可从10月至第二年4月，因此数据时间长度选用2011—2015年的此阶段数据。高速公路车流量数据由河北省高速交警总队提供，利用GIS软件计算得到河北省高速公路路网密度。高速公路路面结冰隐患路段资料来源于2013—2015年交通气象灾害风险普查数据。

为了消除不同指标因子由量纲不同造成的差异，对各指标进行归一化处理，公式为：

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (1)$$

其中， \bar{X} 为无量纲化处理后的均一化值， X_{\max} 、 X_{\min} 分别为各指标的最大值、最小值。

2 研究方法

基于风险区划研究原理^[20-22]，选取致灾因子危险性(H)、承载体脆弱性(V)和孕灾环境敏感性(S)3个指标综合分析，建立高速公路路面结冰风险区划模型：

$$R_{\text{icc}} = \alpha \cdot H + \beta \cdot V + \gamma \cdot S, \quad (2)$$

其中， R_{icc} 为路面结冰风险指数， α 、 β 、 γ 分别为3个指标的权重系数。

2.1 构建判断矩阵

设有 n 个指标 a_1, a_2, \dots, a_n 对上一层目标 Z 有影响，要确定各指标对 Z 的影响比例，采用两两比较法，每次取两个指标 a_i 和 a_j ，用 a_{ij} 表示 a_i 和 a_j 对 Z 影响大小的比值，将比较的结果用矩阵 A 表示，

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}.$$

其中， $a_{ii} = 1$ ， $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$)，因此 A 为 n 阶正反矩阵。

2.2 确定权重系数

根据9分位标度量法确定矩阵中 a_{ij} 的值：定义1, 3, 5, 7, 9分别表示两两指标的比较结果，2, 4, 6, 8分别为介于每两个标度之间的中值，其倒数1/3, 1/5, 1/7, 1/9和1/2, 1/4, 1/6, 1/8为 a_{ji} 的取值，见表1。如矩阵 A 中 a_{12} 的值为7，则表示对目标 Z 的重要程度来说，指标1比指标2强烈重要。

2.3 一致性检验

对 n 阶判断矩阵的一致性检验需先计算矩阵的最大特征值 λ_{\max} ，再计算一致性指标 CI 。若 $CI=0$ ，则判断矩阵满足完全一致性检验；若 $CI \neq 0$ ，则需利用随机

表1 9分位标度量法及含义对照表

Table 1 Comparison table of quantization and meaning of 9-scaling-value definition

标度	含义
1	两个指标相比，具有相同的重要性
3	两个指标相比，一个指标比另一个指标稍微重要
5	两个指标相比，一个指标比另一个指标明显重要
7	两个指标相比，一个指标比另一个指标强烈重要
9	两个指标相比，一个指标比另一个指标极端重要
1/9	两个指标相比，一个指标比另一个指标极端次要
1/7	两个指标相比，一个指标比另一个指标强烈次要
1/5	两个指标相比，一个指标比另一个指标明显次要
1/3	两个指标相比，一个指标比另一个指标稍微次要

一致性比 CR 对判断矩阵进行一致性检验，其中 RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标，其值与判断矩阵的阶数有关。若 $CR < 0.1$ ，则该判断矩阵满足一致性检验的要求^[23]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{R}. \quad (4)$$

3 路面结冰风险指标

根据气象灾害风险区划理论和高速公路路面结冰灾害形成的机制，综合考虑各指标的独立性，建立河北省高速公路路面结冰风险评价指标(表2)。

表2 河北省高速公路路面结冰灾害风险指标

Table 2 Risk index of road icing disasters of expressway in Hebei

致灾因子危险性	孕灾环境敏感性	承载体脆弱性
低温日数	是否路面结冰易发路段	封路次数
结冰日数	高速公路路网密度	累计封路时长
降雪总量	日均车流量(上行或下行)	交通事故量
雪/雨夹雪日数	/	/

3.1 致灾因子危险性

高速公路路面结冰灾害的致灾因子危险性反映了气象灾害的强度和发生频次，气象灾害强度越大，发生频次越高，造成的灾害风险越大。高速公路路面结冰与降水和气温关系密切，参考低温、雨雪、冰冻的气候特征及评估指标^[17, 24-25]，定义致灾因子危险性指标为：低温日数：日平均气温 < 1.0 °C的日数；结冰日数：日平均气温 < 1 °C或地温 < 0 °C且降水量 > 0 mm的日数；雪/雨夹雪日数：出现雪或雨夹雪的日数；降雪总量：当年10月至第二年4月累计量。

$$H = \sum_{i=1}^4 a_i \times A_i, \quad (5)$$

其中： A_i 分别代表低温日数、结冰日数、雪/雨夹雪的日数、降雪总量。

根据表1的定义的量化标度，将致灾因子危险性

中4个分指标两两比较, 得到矩阵 A_1 :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/9 & 1/3 & 1/5 \\ 9 & 1 & 5 & 4 \\ 3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 5 & 1/4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重系数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别为0.0493、0.6178、0.1226、0.2103, 最大特征值为4.0727, $CR < 0.1$, 通过一致性检验, 根据(5)式计算路面结冰的致灾因子危险性指标。

3.2 孕灾环境敏感性

孕灾环境敏感性反映了高速公路路面结冰灾害在同等气候条件下受周围环境因素影响的敏感程度, 其对高速公路路面结冰的影响是潜在且间接的。结合高速公路风险普查的结果, 路面结冰危害程度或发生频次与某高速路段是否为路面结冰易发路段密切相关, 其受地形、海拔、水体等多方面综合影响, 路面结冰危害程度还与周围路网密度及车流量有关, 路网密度越大, 车流量越多, 引发的危害越大。

$$S = \sum_{i=1}^3 b_i \times B_i, \quad (6)$$

其中: B_i 分别代表高速公路某收费站是否为路面结冰易发路段、路网密度、日均车流量(上行/下行)。

考虑路面结冰对3个分指标的敏感程度强弱, 将孕灾环境敏感性3个分指标两两比较, 得到矩阵 A_2 :

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1 & 1/2 \\ 1/7 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

求得权重系数 b_1 、 b_2 、 b_3 分别为0.7636、0.1091、0.1273, 最大特征值为3.0217, $CR < 0.1$, 通过一致性检验, 根据(6)式计算路面结冰的孕灾环境敏感性指标。

3.3 载体脆弱性

载体脆弱性指在不同高速公路路段对路面结冰灾害的暴露程度, 其综合反映了高速公路路面结冰灾害发生时的损失程度。高速公路封路次数越多、封路时间越长, 造成的损失越多, 交通事故发生次数越多、事故越严重, 造成的损失和危害越大, 因此利用高速公路封路次数、封路时长、交通事故量为载体脆弱性指标。

$$V = \sum_{i=1}^3 C_i \times C_i, \quad (7)$$

其中: C_i 分别代表高速公路某收费站因路面结冰造成的年平均封路次数、封路时长和交通事故起数。

考虑路面结冰对3个指标的脆弱程度强弱, 将载体脆弱性3个分指标两两比较, 得到矩阵 A_3 :

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/7 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算求得权重系数 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为0.1220、0.2297、0.6483, 最大特征值为3.0037, $CR < 0.1$, 通过一致性检验, 根据(7)式计算路面结冰的载体脆弱性指标。

4 高速公路路面结冰风险区划

根据高速公路路面结冰灾害形成机制, 综合分析致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、载体脆弱性指标的基础上, 利用层次分析法将3个指标两两比较得到判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 2 \\ 1/9 & 1 & 1/6 \\ 1/2 & 6 & 1 \end{bmatrix}$$

通过加权算法计算权重系数分别为0.6176、0.1241、0.2583, 最大特征值为3.0092, $CR < 0.1$, 通过一致性检验。根据上文高速公路路面结冰风险区划模型, 计算高速公路不同路段的路面结冰风险指数, 最后利用自然断点法划分为低风险、中风险、较高风险和高风险4个等级, 并利用GIS软件绘制了河北省高速公路路面结冰风险区划图(图1)。

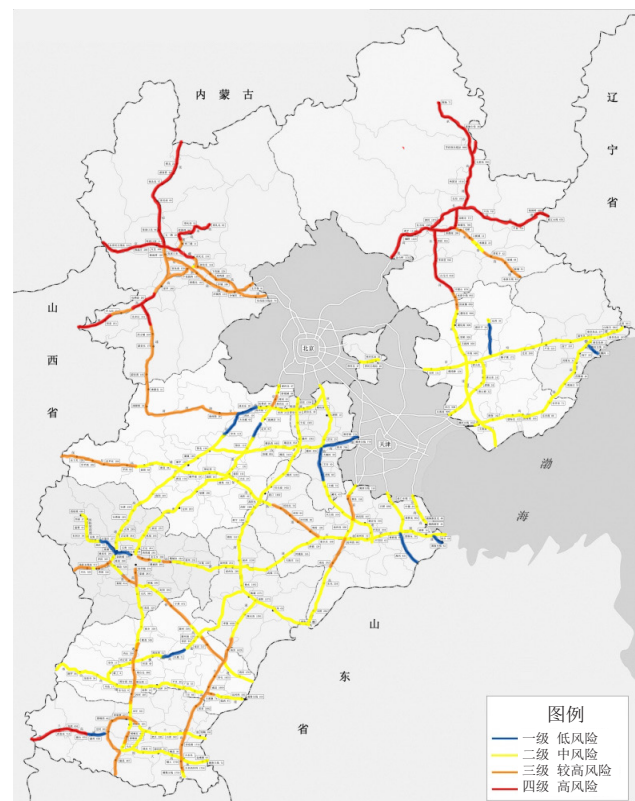


图1 河北省高速公路路面结冰风险区划

Fig. 1 Risk zoning map of road icing of expressway in Hebei

图1为河北省高速公路路面结冰风险区划,可以直观显示不同级别高速公路路面结冰风险路段。河北省高速公路路面结冰高风险区位于张家口中北部和西部、承德、邯郸西部地区高速公路路段,包括张石高速张家口南一察北段、京藏高速张家口东一东洋河主线站路段、张承高速纬三路一崇礼北路段、宣大高速化销营和阳泉路段、大广高速承德段、长深高速承德段、青兰高速磁山一涉县东路段;路面结冰较高风险区路段位于张家口东部和南部、承德南部、保定西部、沧州西部、石家庄西部、邢台东部、邯郸东部东北部和中部地区高速公路路段,包括京新高速张家口段、京藏高速东花园主线站一宣化北段、宣大高速部分路段、张石高速涞源南一北辛庄段、清西陵支线、承秦高速承德段、保阜高速平阳一东下关路段、石太高速井陘一天长段、青银高速邢台段、大广高速南宫一大名段、京港澳高速内丘一沙河段和邯郸东一磁县段、黄石高速西北通一北五女段和藁城段等;路面结冰低风险路段位于京秦高速迁西支线、京昆高速涞水东一辛木段、津汕高速廊坊段、黄石高速石家庄一西古城段、邢衡高速巨鹿段等;其他大部分高速为高速公路路面结冰中风险路段。

5 结论与讨论

本文运用层次分析法,基于风险区划理论,通过致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承载体脆弱性三个方面研究了河北省高速公路路面结冰风险区划,主要结论如下:

1)河北省北部及邯郸西部山区(张石、京藏、张承、宣大、大广承德段、长深承德段、青兰等高速公路)为路面结冰高风险路段;张家口东部、承德南部、保定西部和石家庄西部山区和河北省东南部地区(京新、承秦、保阜、石太、青银、大广南、石安等)高速路段为路面结冰较高风险路段;河北省中南部地区大部分高速公路路段为路面结冰中风险路段,其中京秦高速迁西支线、京昆、津汕、黄石高速、邢衡等高速部分路段为路面结冰低风险路段。

2)路面结冰作为影响河北省高速公路安全的第二大气象灾害,开展高速公路路面结冰风险区划能够为

交通管理部门提供一定的决策依据。

参考文献

- [1] 白永清,何明琼,刘静,等.高速公路交通事故与气象条件的关系研究.气象与环境科学,2015,38(2):66-71.
- [2] 曲晓黎,张婉,郭蕊,等.高速公路雾灾风险区划模型.气象科技,2018,46(1):189-193.
- [3] 赵琳娜,毛冬艳,马清云,等.2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析.气候与环境研究,2008,13(4):556-566.
- [4] 魏璐.河南省2011年高速公路气象服务效益评估.气象与环境科学,2013,36(2):47-51.
- [5] 罗慧,李良序,胡胜,等.公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型.应用气象学报,2007,18(3):350-357.
- [6] 刘聪.交通气象灾害.北京:气象出版社,2009:26-31.
- [7] 戴至修,柳艳香,王志,等.高速公路降雨致灾风险预警技术应用进展.气象科技进展,2017,7(2):39-45.
- [8] Shao J, Lister P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(8): 1352-1361.
- [9] Chapman L, Thornes J E. A geomatics-based road surface temperature prediction model. Science of the Total Environment, 2006, 360(1): 68-80.
- [10] Ryerson C C, Ramsay A C. Quantitative ice accretion information from the automated surface observing system. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(9): 1423-1437.
- [11] Sass B H. A Numerical model for prediction of road temperature and ice. Journal of Applied Meteorology, 2010, 31(12): 1499-1506.
- [12] 吕晶晶,牛生杰,周悦,等.冬季高速公路路桥温度变化规律及能量平衡分析.大气科学学报,2013,36(5):546-553.
- [13] 李迅,尹志聪,丁德平,等.北京地区高速公路路面结冰特征及气象条件.应用气象学报,2012,23(5):578-584.
- [14] 刘梅,尹东屏,王清楼,等.南京地区冬季路面结冰天气标准及其预测.气象科学,2007,27(6):685-690.
- [15] 田华,吴昊,赵琳娜,等.沪宁高速公路路面温度变化特征及统计模型.应用气象学报,2009,20(6):737-744.
- [16] 李嵩恂,吴昊,柳艳香,等.我国公路低能见度灾害风险评估与区划研究.气象,2018,44(5):676-683.
- [17] 贺芳芳,邵步粉.上海地区低温、雨雪、冰冻灾害的风险区划.气象科学,2011,31(1):33-39.
- [18] 王颖,王晓云,江志红,等.中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划.气象,2013,39(5):585-591.
- [19] 顾婷婷,潘娅英,骆月珍.浙江省高速公路低温雨雪冰冻灾害风险评估与区划.气象与环境学报,2016,32(3):102-106.
- [20] 汪超,罗喜平.基于GIS的贵州省道路结冰灾害风险区划分析.高原山地气象研究,2017,37(3):71-77.
- [21] 王春玲,郭文利,李迅,等.京津冀地区高速公路冰冻灾害风险区划.气象与环境学报,2018,34(1):45-51.
- [22] 马进.基于GIS的洛阳市高温灾害风险区划.气象与环境科学,2012,35(4):62-68.
- [23] 闫敏慧,姚秀萍,王蕾,等.用层次分析法确定气象服务评价指标权重.应用气象学报,2014,25(4):470-475.
- [24] 万素琴,周月华,李兰,等.低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术.气象,2008,34(11):40-46.
- [25] 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.