

舒斯,熊守权,陈英英,等,2019. 湖北省高速公路道路结冰预警模型[J]. 气象,45(11):1589-1599. Shu S, Xiong S Q, Chen Y Y, et al, 2019. Warning model of road surface icing of expressway in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1589-1599 (in Chinese).

## 湖北省高速公路道路结冰预警模型<sup>\*</sup>

舒 斯<sup>1,2</sup> 熊守权<sup>1</sup> 陈英英<sup>1</sup> 何明琼<sup>1</sup> 袁正腾<sup>1</sup>  
鲁 静<sup>1</sup> 崔 杨<sup>1</sup> 唐 俊<sup>1</sup>

1 湖北省气象服务中心, 武汉 430205

2 湖北省孝昌县气象局, 孝昌 432900

**提 要:** 利用 2013 年以来建立的湖北省高速公路沿线的 87 个交通气象观测站每 10 分钟一次的气温及路面温度等实况资料, 对各个高速路段的路面结冰频率随气温的变化规律进行了分析, 发现均满足 Logistic 回归模型, 但不同高速路段结冰对应的环境气温有差异。通过研究各个高速路段道路结冰的气温条件概率, 计算得到湖北高速各个路段拐点气温, 再结合路段降水情况, 可以对湖北省高速公路结冰进行预警, 从而为高速公路是否开展消冰措施、何时开展消冰措施提供建议。

**关键词:** 路面温度, Logistic 回归模型, 拐点气温分布图, 结冰预警

中图分类号: P49, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.009

## Warning Model of Road Surface Icing of Expressway in Hubei Province

SHU Si<sup>1,2</sup> XIONG Shouquan<sup>1</sup> CHEN Yingying<sup>1</sup> HE Mingqiong<sup>1</sup>  
YUAN Zhengteng<sup>1</sup> LU Jing<sup>1</sup> CUI Yang<sup>1</sup> TANG Jun<sup>1</sup>

1 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205

2 Xiaochang Weather Station of Hubei Province, Xiaochang 432900

**Abstract:** This paper analyzes the variation law of the icing frequency of each highway section with the temperature, using the observed 10 min air temperature and road surface temperature from 87 traffic and weather stations, established since 2013, along the highway in Hubei Province. It is found that the Logistic regression models are satisfied, but the ambient temperatures corresponding to icing in different highway sections are different. By studying the temperature condition probability of the road icing in each highway section, we obtain the temperature turning-point of each section of Hubei highway. Combined with the precipitation (snow) of each highway section, it can be used for the early warning of highway icing in Hubei Province. Thus, suggestions can be made for whether to carry out ice removal measures of highways and when to carry out ice removal measures.

**Key words:** road surface temperature, Logistic regression, turning-point temperature map, early warning of icing

<sup>\*</sup> 湖北省气象局科技发展基金重点项目(2019Z07)、湖北省气象局科技发展基金面上项目(2018Y09)和湖北省气象局青年基金项目(2018Q11)共同资助

2018 年 8 月 17 日收稿; 2019 年 9 月 19 日收修定稿

第一作者: 舒斯, 主要从事专业气象服务相关研究. Email: 395656412@qq.com

通信作者: 熊守权, 主要从事专业气象服务相关研究. Email: 2697789280@qq.com

## 引言

交通运输是国民经济的基础产业和重要的服务行业,而气象条件是影响交通运输安全的关键因素之一,对高速公路的行车安全、正常运行起着举足轻重的作用。尤其是随着经济社会的快速发展,交通需求不断增加,交通基础设施总量迅速扩大,交通运输方式和里程不断延伸,各类不利气象条件对交通运输的影响亦日趋明显。雨、雪、雾等不利气象条件会导致公路设施损毁、交通延误、交通事故、环境污染等,极端强降水事件发生的频率呈增多态势(秦大河等,2012),由此给交通运输造成了严重的影响(田华等,2018)。低能见度是影响公路交通安全的气象灾害之一,会令驾乘人员产生严重的视程障碍(许小峰,2010),浓雾诱发的高速公路交通事故往往是灾难性的,造成较大社会影响和巨大经济损失(黄政等,2016;王博妮等,2016;许爱华等,2016;李蔼恂等,2018;严文莲等,2018;朱承瑛等,2018;Lewis et al, 2004; Gultepe et al, 2007; Niu et al, 2010; Black et al, 2017)。道路结冰是影响交通运输安全的不利气象条件中最恶劣的之一。道路结冰是指雨、雪、冻雨或雾滴降落到温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的地面而出现的积雪或结冰的现象。雪天发生的车辆碰撞、刮擦事故是晴朗天气的14倍(卢涛等,2009),进入冬季降雪、积雪、结冰、冻雨等天气现象常造成车辆打滑、行走困难,尤其是路面结冰对轮胎摩擦系数有显著影响,从而影响到汽车的行驶和制动性能,对交通运输和人民生命财产等造成严重危害,成为冬季影响高速公路正常运行的主要气象灾害(阎琦等,2016;崔锦等,2017;王柳柳等,2017;杨舒楠等,2017;杨成芳和刘畅,2019)。

北欧、美国、加拿大、日本等发达国家和地区对道路交通安全与气象条件的关系研究起步较早,也较深入,已经建立了完善的高速公路气象监测及预报业务系统,并基于能量辐射平衡方法开展了路面积水、结冰等专业气象预报和服务(Jacobs and Raatz, 1996; Shao and Lister, 1996; Crevier and Delage, 2001; Sass, 1992)。另外,还开展了降水等气象灾害对交通事故、交通流量、运行管理等影响研究(田华等,2018)。随着我国交通事业的高速发

展,国内针对道路交通安全与气象条件关系的研究成果丰硕,例如江苏、北京、广东、新疆、西藏等地区开展了公路沿线路面温度的监测,有关路面温度变化和预报技术方法也相继展开。谢静芳和吕得宝(2006)研究表明尤其是冬季的冰雪和低温天气,对路面抗滑性能的不利影响最为显著;吕胜辉等(2004)分析了天津机场地区冻雨天气;刘梅等(2007)讨论了南京地区结冰时间变化和各影响温度的变化规律,探讨了雨雪天气路面结冰的类别、标准和预测预报方法;孙翠梅等(2013)利用多年镇江市水泥和柏油下垫面地面气温数据,研究定义了道路结冰影响指数,但空报率较高;白永清等(2016)利用武英高速凤凰关交通气象站3年冬季桥、路面温度观测数据,基于Logistic回归模型解析了桥、路面结冰温度条件频率随环境气温的变化规律,建立了道路结冰温度条件风险概率模型,并由此构建了武英高速桥、路面结冰风险等级预警模型。

湖北省西部、北部、东部三面环山,中部为向南开口、多湖泊的平原地区,高速公路沿线多桥梁、隧道,且河湖与高速公路交错出现,冬季山区、桥梁等地区道路结冰易发生,造成交通事故,2008年初,湖北省出现了严重的持续低温雨雪冰冻天气气候事件(李兰等,2009),全省交通受到严重影响(陈正洪等,2008;陈正洪,2010),因此分析湖北省不同地区道路结冰时气象条件特征十分必要。近几年,湖北省交通气象服务业务基础发展迅速,目前已建成179个交通站(其中87个开展了路面温度观测),为交通气象服务业务化提供了重要的数据支撑(图1)。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

整理湖北省交通站2013年建站以来路面温度等观测数据,交通站站号是根据建站时间顺序命名,依次为Q0001、Q0002等。其中Q0141以前交通站资料为建站至2016年9月,而Q0141及其以后的交通站由于建站晚、数据较少且存在缺测,为了分析将交通站路面温度等数据资料结束时间由2016年9月补充到2017年4月。但是前面站点没有进行相应的补充,是为了在检验2016年底及2018年结



图 1 湖北省高速公路已建成交通气象站分布

Fig. 1 Distribution map of traffic weather stations in Hubei Province

冰个例时更有说服力。

收集整理交通站附近气象站逐日常规观测资料,利用气象观测站资料,检验交通气象站观测项目,确保交通站资料可靠性,从 87 个含有路面温度观测的交通气象观测站中选取数据可信的 73 个站点进行道路结冰研究。

## 1.2 方法

2004 年中国气象局将道路结冰预警进行了等级划分(中国气象局,2004),规定若路表温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,出现降水,那么未来 12 h 内、6 h 内、2 h 内可能出现或已经出现对交通有影响的道路结冰。道路结冰需同时满足温度和降水两个条件,温度条件必须具备道路下垫面温度  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ,为分析湖北不同地区道路结冰时环境气温的条件,逐个分析站点在不同环境气温(这里以  $0.5^{\circ}\text{C}$  为间隔分析)情况下结冰(路面温度  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ )的频率  $P$ ,发现不同路段结冰条件频率  $P$  和环境气温  $T$  的关系均满足 Logistic 模型(白永清等,2016),其中  $P$  为应变量  $y$ ,环境气温  $T$  为自变量  $x$ 。

Logistic 函数  $y=f(x)$  一般表达式为:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(a+bx)}} \quad y \in (0,1) \quad (1)$$

其本身是非线性的,具有 S 形分布特征。可通过线性转换为:

$$\ln\left(\frac{y}{1-y}\right) = a + bx \quad (2)$$

即可看作因变量为  $\ln\left(\frac{y}{1-y}\right) = a + bx$ ,自变量为  $x$  的线性回归模型。通过一定量样本  $Y_i, X_i$ ,采

用最小二乘拟合  $a, b$  参数,即可获得 Logistic 函数  $y=f(x)$  方程式(白永清等,2016)。Logistic 曲线有 3 个关键点(崔党群,2005),分别求解 Logistic 函数一阶和二阶导数。令  $y'=0$ ,得  $x=-\frac{a}{b}$ ,表征曲线变化速度最快的基点(随  $x$  变化, $y$  反应最敏感);令  $y''=0$ ,得  $x=\frac{-a \pm 1.317}{b}$ ,表征曲线变化过程的两个拐点(曲线变化起始点和饱和点),这里主要选择起始点,即曲线的起始拐点  $T_{\text{拐点}} = \frac{-a-1.317}{b}$ ,因为当环境气温达到  $T_{\text{拐点}}$  时,即非线性 Logistics 函数第一个拐点处,达到此拐点后结冰频率  $P$  迅速增大,能更好地对道路结冰提前做出预警。

## 2 结果与分析

### 2.1 道路结冰临界气温

通过统计分析湖北省 73 个交通站建站以来路面温度达到  $0^{\circ}\text{C}$  时的最高环境气温,得到高速公路结冰温度条件的临界值( $T_{\text{临界}}$ )分布(图 2)。那么当高速路段气温达到  $T_{\text{临界}}$  时,路面温度就有可能到达  $0^{\circ}\text{C}$ ,道路出现结冰风险增大。

### 2.2 道路结冰拐点气温

分析湖北省高速公路各个路段结冰的气温条件概率模型( $P$ )。先分析自西向东贯通湖北省的沪渝高速,通过各路段不同模型计算,得到不同路段结冰温度条件频率变化的起始拐点环境气温  $T_{\text{拐点}}$ (表 1),从而得到结冰起始拐点的分布(图 3a)。由

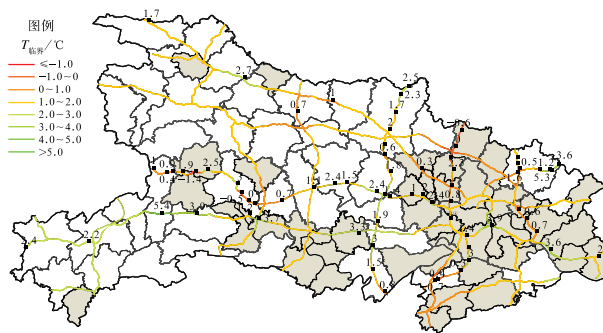


图 2 湖北省高速公路结冰临界气温分布

Fig. 2 Ice critical temperature distribution map of road surface in Hubei Province

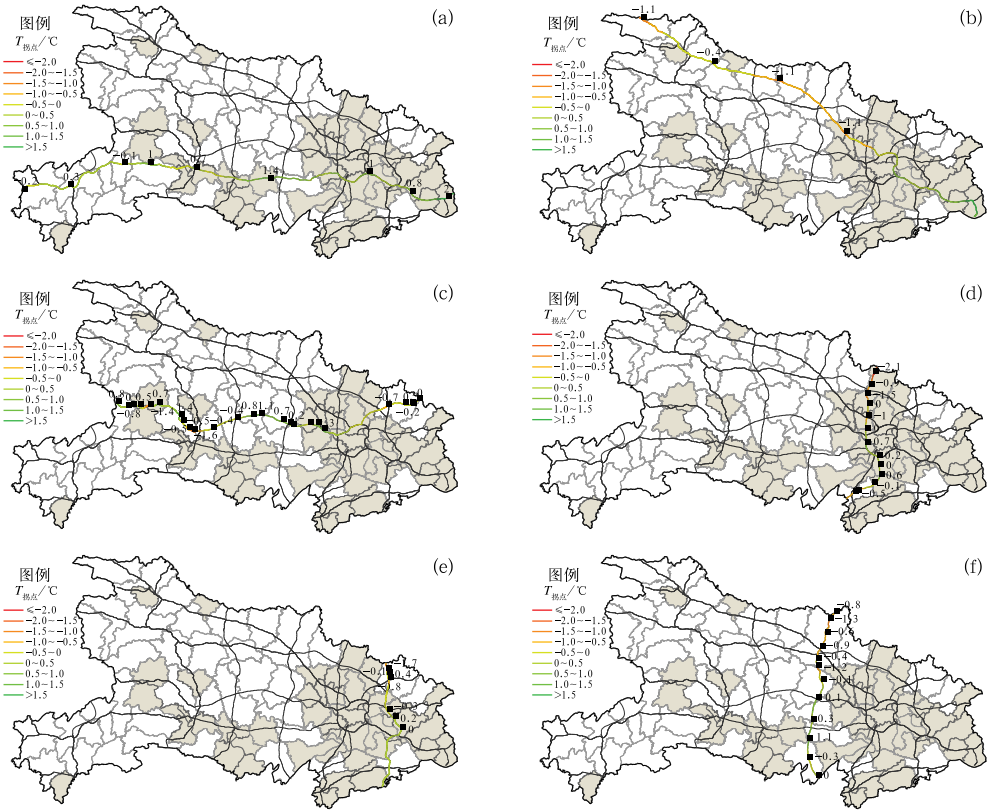


图 3 沪渝高速(a)、福银高速(b)、沪蓉高速(c)、京港澳高速(d)、大广高速(e)、随岳高速(f)湖北段结冰  $T_{\text{拐点}}$  分布

Fig. 3 Freezing start point temperature distribution map of road surface in Huyu Expressway (a), Fuyin Expressway (b), Shanghai-Chengdu Expressway (c), Beijing-Hongkong-Macau Expressway (d), Daguang Expressway (e), Suiyue Expressway (f)

表 1 沪渝高速(湖北段)道路结冰的气温条件概率模型( $P$ )及  $T_{\text{拐点}}$

Table 1 Probability model of temperature conditions and the temperature of the infection points for road freezing in Huyu Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$     | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ |
|-----|-------|--------------------|----------------------------------|
| 利川  | Q0001 | $-1.64, -1.5$      | $-0.2$                           |
| 恩施  | Q0007 | $-0.733, -1.9558$  | $0.3$                            |
| 巴东  | Q0021 | $-1.4064, -1.2009$ | $-0.1$                           |
| 长阳  | Q0027 | $-0.4393, -0.904$  | $1.0$                            |
| 枝江  | Q0031 | $0.2802, -2.2442$  | $0.7$                            |
| 潜江  | Q0038 | $0.7087, -1.4546$  | $1.4$                            |
| 江夏  | Q0042 | $0.3677, -1.7488$  | $1.0$                            |
| 蕲春  | Q0049 | $-0.2117, -1.4242$ | $0.8$                            |
| 黄梅  | Q0055 | $1.2413, -1.3106$  | $2.0$                            |

于频率分布呈反 S 形,随着环境温度降低,结冰频率升高,当高速路段气温达到  $T_{\text{拐点}}$  时,路面温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的可能性变大,道路出现结冰风险概率开始急速增加(白永清等,2016)。

继续分析福银高速(概率模型见表 2)、二广高速(襄荆高速,表 3)、沪蓉高速(表 4)、京港澳高速(表 5)、大广高速(表 6),以及随岳高速(表 7)的湖北段,从而得到结冰起始拐点的分布(图 3)。

由此得到湖北高速路段结冰起始拐点的分布(图 4)。通过分析发现不同路段结冰时对应环境气温有差异,每个路段拥有自己的概率模型,这可能和地形、气候有关系,因此需要根据每个站点的规律建立对应路段预警模型,通过此概率模型可以得到随

表 2 同表 1,但为福银高速(湖北段)

Table 2 Same as Table 1, but in Fuyin Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$     | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ |
|-----|-------|--------------------|----------------------------------|
| 郧西  | Q0077 | $-3.5062, -2.0326$ | $-1.1$                           |
| 谷城  | Q0085 | $-1.8632, -1.3886$ | $-0.4$                           |
| 枣阳  | Q0091 | $-3.0277, -1.5891$ | $-1.1$                           |
| 安陆  | Q0098 | $-3.7567, -2.1268$ | $-1.1$                           |

表 3 同表 1,但为二广高速(湖北段)

Table 3 Same as Table 1, but in Erguang Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$  | $T_{\text{拐点}}/^\circ\text{C}$ |
|-----|-------|-----------------|--------------------------------|
| 襄阳  | Q0101 | -2.1036, -1.761 | -0.4                           |

表 4 同表 1,但为沪蓉高速(湖北段)

Table 4 Same as Table 1, but in Shanghai-Chengdu Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$   | $T_{\text{拐点}}/^\circ\text{C}$ |
|-----|-------|------------------|--------------------------------|
| 宜昌  | Q0110 | -5.0073, -2.293  | -1.6                           |
| 宜昌  | Q0111 | -2.0632, -1.5647 | -0.5                           |
| 宜昌  | Q0112 | -2.4904, -2.2671 | -0.5                           |
| 宜昌  | Q0113 | 1.9331, -2.2681  | 1.4                            |
| 兴山  | Q0114 | 0.0737, -1.8579  | 0.7                            |
| 兴山  | Q0115 | -4.8934, -2.5753 | -1.4                           |
| 兴山  | Q0116 | -0.1933, -2.3043 | 0.5                            |
| 巴东  | Q0117 | -2.7443, -1.8251 | -0.8                           |
| 巴东  | Q0118 | -1.2014, -2.3764 | 0.0                            |
| 巴东  | Q0119 | -0.3586, -1.1841 | 0.8                            |
| 当阳  | Q0121 | -2.0933, -1.842  | -0.4                           |
| 宜昌  | Q0123 | -2.3863, -2.1146 | -0.5                           |
| 麻城  | Q0141 | -3.2896, -2.8233 | -0.7                           |
| 麻城  | Q0142 | -2.4885, -2.4302 | -0.5                           |
| 麻城  | Q0143 | -0.8236, -1.8691 | 0.3                            |
| 麻城  | Q0144 | -1.8137, -2.0515 | -0.2                           |
| 麻城  | Q0145 | -1.3154, -1.5471 | 0.0                            |
| 荆门  | Q0166 | -2.1659, -2.1556 | -0.4                           |
| 钟祥  | Q0167 | 0.083, -1.6663   | 0.8                            |
| 钟祥  | Q0168 | 0.347, -1.5442   | 1.1                            |
| 京山  | Q0170 | 0.4343, -2.4894  | 0.7                            |
| 京山  | Q0171 | 1.0742, -1.7348  | 1.4                            |
| 天门  | Q0172 | -0.9948, -1.9992 | 0.2                            |
| 应城  | Q0173 | -1.8461, -1.8087 | -0.3                           |
| 应城  | Q0174 | -0.3345, -1.6914 | 0.6                            |
| 汉川  | Q0175 | 0.0074, -1.0204  | 1.3                            |

表 5 同表 1,但为京港澳高速(湖北段)

Table 5 Same as Table 1, but in Beijing-Hongkong-Macau Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$   | $T_{\text{拐点}}/^\circ\text{C}$ |
|-----|-------|------------------|--------------------------------|
| 大悟  | Q0125 | -5.8647, -2.211  | -2.1                           |
| 大悟  | Q0126 | -2.748, -1.5955  | -0.9                           |
| 大悟  | Q0127 | -4.7058, -2.2205 | -1.5                           |
| 孝昌  | Q0128 | -1.3667, -1.4594 | 0.0                            |
| 孝昌  | Q0129 | -3.785, -2.4358  | -1.0                           |
| 孝昌  | Q0130 | -1.4014, -1.7833 | 0.0                            |
| 蔡甸  | Q0131 | 0.3419, -2.2181  | 0.7                            |
| 江夏  | Q0132 | -0.9071, -1.8955 | 0.2                            |
| 江夏  | Q0133 | -1.2694, -2.1415 | 0.0                            |
| 咸宁  | Q0134 | 0.1732, -2.3334  | 0.6                            |
| 咸宁  | Q0135 | -1.627, -2.1912  | -0.1                           |
| 赤壁  | Q0137 | -4.2924, -2.369  | -1.3                           |
| 赤壁  | Q0138 | -2.2213, -1.6991 | -0.5                           |

表 6 同表 1,但为大广高速(湖北段)

Table 6 Same as Table 1, but in Daguang Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$   | $T_{\text{拐点}}/^\circ\text{C}$ |
|-----|-------|------------------|--------------------------------|
| 麻城  | Q0146 | -4.0055, -1.5945 | -1.7                           |
| 麻城  | Q0147 | -0.4512, -1.9486 | 0.4                            |
| 麻城  | Q0148 | -2.585, -1.6392  | -0.8                           |
| 麻城  | Q0149 | -1.4622, -2.369  | -0.1                           |
| 团风  | Q0150 | -2.0932, -2.9641 | -0.3                           |
| 团风  | Q0151 | -0.0698, -5.3321 | 0.2                            |
| 浠水  | Q0152 | -1.2336, -2.4582 | 0.0                            |

表 7 同表 1,但为随岳高速(湖北段)

Table 7 Same as Table 1, but in Suiyue Expressway in Hubei Province

| 县、市 | 区站号   | $P$ 中参数 $a, b$   | $T_{\text{拐点}}/^\circ\text{C}$ |
|-----|-------|------------------|--------------------------------|
| 随州  | Q0153 | -2.3859, -1.262  | -0.8                           |
| 随州  | Q0154 | -2.7269, -1.0902 | -1.3                           |
| 随州  | Q0155 | -2.4021, -1.6737 | -0.6                           |
| 随州  | Q0156 | -2.8692, -1.6683 | -0.9                           |
| 随州  | Q0157 | -2.0537, -2.0134 | -0.4                           |
| 随州  | Q0158 | -3.3656, -1.7597 | -1.2                           |
| 京山  | Q0159 | -1.5821, -2.131  | -0.1                           |
| 京山  | Q0160 | -1.1394, -1.7189 | 0.1                            |
| 天门  | Q0161 | -0.6877, -2.0516 | 0.3                            |
| 仙桃  | Q0162 | 0.5168, -1.7023  | 1.1                            |
| 监利  | Q0163 | -2.136, -2.6927  | -0.3                           |
| 监利  | Q0164 | -1.2801, -2.3496 | 0.0                            |

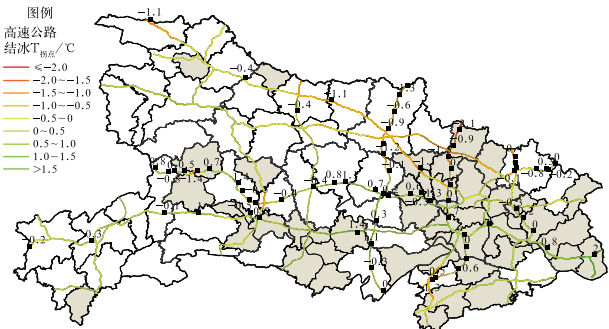


图 4 湖北省高速公路道路结冰  $T_{\text{拐点}}$  分布

Fig. 4 Freezing start point temperature distribution map of road surface in Hubei Province

着气温改变,结冰频率变化规律,为高速公路结冰情况提前做好准备工作,再结合路面降水情况,建立整个湖北省高速公路道路结冰风险等级预警模型。

2.3 道路结冰预警模型

根据上文分析的道路结冰气温条件和交通站模式预报产品(基于华中区域数值预报产品),建立道路结冰预警模型,站点气温( $T$ )和降水量( $m$ )可由交

通站模式预报产品提供:

当  $T > T_{\text{临界}}$  时, 结冰风险为 1 级, 无风险;

当  $T_{\text{拐点}} \leq T \leq T_{\text{临界}}$  且  $m \neq 0$  mm, 结冰风险为 2 级, 有一定风险, 需对过往车辆进行提醒减速慢行;

当  $T < T_{\text{拐点}}$  且  $m \neq 0$  mm, 结冰风险为 3 级, 风险大, 需提供一系列消冰措施, 适当放行车辆。

通过模型计算可得到每个交通站点道路结冰风险等级, 从而为高速公路是否开展、何时开展消冰措施提供建议。

### 3 典型个例分析

根据湖北省高速公路应急处置服务中心统计, 选取 2016 和 2018 年 3 次典型的道路结冰个例进行

分析。

#### 3.1 个例 1

2016 年 11 月 23 日, 因路面结冰, 临时关闭各收费站入口的有: 沪蓉高速东西湖至天门北段、红安至麻城东段、福银高速汉口北至十堰东段等。根据交通站实际建站情况, 分别对沪渝高速麻城段(Q0141、Q0142、Q0143、Q0144、Q0145)、天门段(Q0172), 福银高速安陆段(Q0098)、枣阳段(Q0091)、谷城段(Q0085)进行检验, 发现模式预报 23 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ , 并且预报 23 日有降水发生(表 8), 对应结冰风险等级为 3 级, 风险大, 能较好地对 23 日高速结冰提前做出预警。

表 8 2016 年 11 月 23 日湖北省高速路段结冰风险预警

| 高速   | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 沪蓉高速 | Q0141(麻城) | -0.1                             | -0.70                            | -1.188 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
|      | Q0142(麻城) | 0.6                              | -0.48                            | -1.188 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
|      | Q0143(麻城) | 5.3                              | 0.26                             | -1.188 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
|      | Q0144(麻城) | 1.2                              | -0.24                            | -1.188 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
|      | Q0145(麻城) | 3.6                              | 0.00                             | -1.188 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
|      | Q0172(天门) | 1.4                              | 0.16                             | -0.866 *                         | $\neq 0$ *                | 3  |
| 福银高速 | Q0098(安陆) | 0.3                              | -1.15                            | -1.735                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0091(枣阳) | 1.0                              | -1.08                            | -1.595                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.39                            | -1.925                           | $\neq 0$                  | 3  |

注: \* 表示由于交通站没有预报值, 所以使用邻近气象站预报值做检验, 下同。

Note: \* Since the traffic station has no forecast value, the forecast value of the near by weather station is used, the same below.

11 月 24 日, 因道路结冰, 沪蓉高速武麻段、鄂东出口、二广高速襄阳段、福银高速汉十段, 以及京港澳高速孝感东至大新段等限制通行。分别对沪蓉高速麻城段(Q0141、Q0142、Q0143、Q0144、Q0145), 二广高速襄阳段(Q0101), 福银高速郧西段(Q0077)、谷城段(Q0085)、枣阳段(Q0091)、安陆段(Q0098), 京港澳高速大悟段(Q0126)进行检验, 发现模式预报 24 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ , 并且预报 24 日有降水发生(或者前一日有降水发生,  $m_{\text{前}} \neq 0$  mm)(表 9), 对应结冰风险等级为 3 级, 风险大。对京港澳高速大悟段(Q0125、Q0127)进行了检验, 发现模式预报 24 日气温低于  $T_{\text{临界}}$ , 并且前一日有降水发生(表 9), 对应结冰风险等级为 2 级, 有一定风险, 能较好地对高速结冰提前做出预警。

#### 3.2 个例 2

2018 年 1 月 3 日, 因道路结冰, 临时关闭各收

费站入口的有: 福银高速汉口北至十堰东段等。对福银高速谷城段(Q0085)和郧西段(Q0077)进行检验, 发现模式预报 3 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ , 并且预报 3 日有降水发生, 对应结冰风险等级为 3 级, 风险大, 对枣阳段(Q0091)进行检验, 发现模式预报 3 日气温低于  $T_{\text{临界}}$ , 并且预报 3 日有降水发生, 对应结冰风险等级为 2 级, 有一定风险, 能较好地对高速结冰做出预警; 而对安陆段(Q0098), 模式预报 3 日气温高于  $T_{\text{临界}}$ , 虽然预报有降水, 但没能对高速结冰做出预警(表 10)。

1 月 4 日, 因道路结冰, 临时关闭各收费站入口的有: 京港澳高速武汉北至大新段, G42 沪蓉高速京山南至石碑段、荆门南至鸦鹊岭段; 宜昌北至高岚段、高岚至巴东北段、木子店站, 沪渝高速枝江至宜昌段、宜昌桥北站; 二广高速全线, 福银高速机场北至漫川关段、老河口至十堰东段等。分别对京港澳

表 9 同表 8, 但为 2016 年 11 月 24 日

Table 9 Same as Table 8, but on 24 November 2016

| 高速    | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|-------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 沪蓉高速  | Q0141(麻城) | -0.1                             | -0.70                            | -0.474 *                         | $\neq 0^*$                | 2  |
|       | Q0142(麻城) | 0.6                              | -0.48                            | -0.474 *                         | $\neq 0^*$                | 2  |
|       | Q0143(麻城) | 5.3                              | 0.26                             | -0.474 *                         | $\neq 0^*$                | 3  |
|       | Q0144(麻城) | 1.2                              | -0.24                            | -0.474 *                         | $\neq 0^*$                | 3  |
|       | Q0145(麻城) | 3.6                              | 0.00                             | -0.474 *                         | $\neq 0^*$                | 3  |
| 二广高速  | Q0101(襄阳) | 0.7                              | -0.45                            | -2.411                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0077(郧西) | 1.7                              | -1.08                            | -6.151                           | $m_{\text{前}} \neq 0$     | 3  |
| 福银高速  | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.39                            | -3.351                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0091(枣阳) | 2.7                              | -0.39                            | -3.517                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0098(安陆) | 0.3                              | -1.15                            | -1.275                           | $m_{\text{前}} \neq 0$     | 3  |
|       | Q0125(大悟) | -0.6                             | -2.06                            | -1.204 *                         | $m_{\text{前}} \neq 0^*$   | 2  |
| 京港澳高速 | Q0126(大悟) | 0.0                              | -0.90                            | -1.204 *                         | $m_{\text{前}} \neq 0^*$   | 3  |
|       | Q0127(大悟) | -0.8                             | -1.53                            | -1.204 *                         | $m_{\text{前}} \neq 0^*$   | 2  |

注:  $m_{\text{前}}$  表示预报的前一日有降水。  
Note:  $m_{\text{前}}$  represents the forecast of the previous day's precipitation.

表 10 同表 8, 但为 2018 年 1 月 3 日

Table 10 Same as Table 8, but on 3 January 2018

| 高速   | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 福银高速 | Q0098(安陆) | 0.3                              | -1.15                            | 1.570                            | $\neq 0$                  | 1  |
|      | Q0091(枣阳) | 1.0                              | -1.08                            | -0.718                           | $\neq 0$                  | 2  |
|      | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.40                            | -2.833                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0077(郧西) | 1.7                              | -1.08                            | -4.863                           | $\neq 0$                  | 3  |

高速大悟段(Q0126)、孝昌段(Q0128),沪蓉高速兴山段(Q0111、Q0112、Q0113、Q0114、Q0115、Q0116)、当阳段(Q0121)、宜昌段(Q0123)、荆门段(Q0166)、钟祥段(Q0167、Q0168)、京山段(Q0170、Q0171)、应城段(Q0174)、汉川段(Q0175),沪渝高速长阳段(Q0027),二广高速襄阳段(Q0101),福银高速郧西段(Q0077)、谷城段(Q0085)、枣阳段(Q0091)、安陆段(Q0098)进行检验,发现模式预报 4 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ ,并且预报 4 日有降水发生,对应结冰风险等级为 3 级,风险大。对京港澳高速大悟段(Q0125)、蔡甸段(Q0131),沪蓉高速兴山段(Q0110)、应城段(Q0173)进行检验,发现模式预报 4 日气温低于  $T_{\text{临界}}$ ,并且预报 4 日有降水发生,对应结冰风险等级为 2 级,有一定风险,能较好地对高速结冰做出预警。而对京港澳高速大悟段(Q0127)、孝昌段(Q0129、Q0130)、江夏段(Q0132)进行检验,模式预报 4 日气温高于  $T_{\text{临界}}$ ,虽然预报有降水,但没能对高速结冰做出预警(表 11)。由于 1 月 3 日模式预报缺报,用 2 日资料预报 4 日,因而有一定偏差,实际情况会通过人工订正,更好地对高速结冰做

出警示。

3.3 个例 3

2018 年 1 月 24 日,因路面结冰,全省高速公路网 86 个站所采取了间断放行、分车型管制等措施,主要集中在荆门、随州、襄阳、十堰等地区。对福银高十堰段(Q0077)、谷城段(Q0085)、枣阳段(Q0091),二广高速襄阳段(Q0101),沪蓉高速荆门段(Q0166)、钟祥段(Q0167、Q0168)、京山段(Q0170),随岳高速随州段(Q0153、Q0154、Q0155、Q0156)、京山段(Q159)进行检验,发现模式预报 24 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ ,并且预报 24 日有降水发生,对应结冰风险等级为 3 级,风险大。对沪蓉高速荆门段(Q0166)、京山段(Q0171),随岳高速随州段(Q0157、Q0158)、京山段(Q160)进行检验,发现模式预报 24 日气温低于  $T_{\text{临界}}$ ,并且预报 24 日有降水发生,对应结冰风险等级为 2 级,有一定风险,能较好地对高速结冰做出预警(表 12)。

1 月 25 日,因路面结冰,省内武汉、荆门、孝感、随州、襄阳、十堰等地区部分高速入口采取了间断放

表 11 同表 8, 但为 2018 年 1 月 4 日

Table 11 Same as Table 8, but on 4 January 2018

| 高速    | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|-------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 京港澳高速 | Q0125(大悟) | -0.6                             | -2.06                            | -1.562                           | $\neq 0$                  | 2  |
|       | Q0126(大悟) | 0.0                              | -0.90                            | -2.465                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0127(大悟) | -0.8                             | -1.53                            | -0.551                           | $\neq 0$                  | 1  |
|       | Q0128(孝昌) | 2.3                              | -0.03                            | -0.078                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0129(孝昌) | 0.0                              | -1.01                            | 0.897                            | $\neq 0$                  | 1  |
|       | Q0130(孝昌) | 0.8                              | -0.05                            | 1.613                            | $\neq 0$                  | 1  |
|       | Q0131(蔡甸) | 2.1                              | 0.75                             | 1.803                            | $\neq 0$                  | 2  |
|       | Q0132(江夏) | 1.4                              | 0.22                             | 2.636                            | $\neq 0$                  | 1  |
|       | Q0110(兴山) | 0.4                              | -1.61                            | -1.56                            | $\neq 0$                  | 2  |
|       | Q0111(兴山) | 0.0                              | -0.48                            | -1.831                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0112(兴山) | -0.5                             | -0.52                            | -3.717                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0113(兴山) | 3.0                              | 1.43                             | -5.228                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0114(兴山) | 2.5                              | 0.75                             | -7.034                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0115(兴山) | -1.4                             | -1.39                            | -6.008                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 沪蓉高速  | Q0116(兴山) | 1.9                              | 0.49                             | -8.136                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0121(当阳) | 0.7                              | -0.42                            | -2.240                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0123(宜昌) | 1.2                              | -0.51                            | -2.558                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0166(荆门) | 1.1                              | -0.39                            | -2.695                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0167(钟祥) | 2.4                              | 0.84                             | -2.277                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0168(钟祥) | 1.5                              | 1.08                             | -2.05                            | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0170(京山) | 2.4                              | 0.70                             | -1.304                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0171(京山) | 3.2                              | 1.38                             | -0.845                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0173(应城) | 1.0                              | -0.29                            | 0.069                            | $\neq 0$                  | 2  |
|       | Q0174(应城) | 2.0                              | 0.58                             | 0.398                            | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0175(汉川) | 2.4                              | 1.30                             | 0.651                            | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0101(襄阳) | 0.7                              | -0.45                            | -3.362                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0077(郧西) | 1.7                              | -1.08                            | -9.791                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.40                            | -4.519                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 福银高速  | Q0091(枣阳) | 2.7                              | -0.39                            | -3.326                           | $\neq 0$                  | 3  |
|       | Q0098(安陆) | 0.3                              | -1.15                            | -0.318                           | $\neq 0$                  | 3  |

表 12 同表 8, 但为 2018 年 1 月 24 日

Table 12 Same as Table 8, but on 24 January 2018

| 高速   | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 福银高速 | Q0077(郧西) | 1.7                              | -1.08                            | -5.356                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.39                            | -2.763                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0091(枣阳) | 2.7                              | -0.39                            | -0.786                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 二广高速 | Q0101(襄阳) | 0.7                              | -0.45                            | -0.726                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0166(荆门) | 1.1                              | -0.39                            | 0.409                            | $\neq 0$                  | 2  |
|      | Q0167(钟祥) | 2.4                              | 0.84                             | 0.731                            | $\neq 0$                  | 3  |
| 沪蓉高速 | Q0168(钟祥) | 1.5                              | 1.078                            | 0.806                            | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0170(京山) | 2.4                              | 0.70                             | 0.548                            | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0171(京山) | 3.2                              | 1.38                             | 1.460                            | $\neq 0$                  | 2  |
|      | Q0153(随州) | 2.5                              | -0.85                            | -2.756                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 随岳高速 | Q0154(随州) | 2.3                              | -1.29                            | -2.892                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0155(随州) | 1.7                              | -0.65                            | -1.234                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0156(随州) | 2.0                              | -0.93                            | -0.068                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0157(随州) | 1.9                              | -0.37                            | -0.37                            | $\neq 0$                  | 2  |
|      | Q0158(随州) | 0.6                              | -1.16                            | -0.628                           | $\neq 0$                  | 2  |
|      | Q0159(京山) | 1.8                              | -0.12                            | -0.425                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0160(京山) | 2.9                              | 0.10                             | 1.442                            | $\neq 0$                  | 2  |

表 13 同表 8,但为 2018 年 1 月 25 日  
Table 13 Same as Table 8, but on 25 January 2018

| 高速   | 交通站       | $T_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{拐点}}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\text{预报}}/^{\circ}\text{C}$ | $m_{\text{预报}}/\text{mm}$ | 风险 |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----|
| 福银高速 | Q0077(鄖西) | 1.7                              | -1.08                            | -8.855                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0085(谷城) | 2.7                              | -0.39                            | -5.497                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0091(枣阳) | 2.7                              | -0.39                            | -3.951                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 二广高速 | Q0098(安陆) | 0.3                              | -1.15                            | -2.648                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0101(襄阳) | 0.7                              | -0.45                            | -4.089                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0166(荆门) | 1.1                              | -0.39                            | -3.819                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 沪蓉高速 | Q0167(钟祥) | 2.4                              | 0.84                             | -2.786                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0168(钟祥) | 1.5                              | 1.08                             | -2.728                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0170(京山) | 2.4                              | 0.70                             | -3.126                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0171(京山) | 3.2                              | 1.38                             | -2.997                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0172(天门) | 1.4                              | 0.16                             | -2.849                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0173(应城) | 1.0                              | -0.29                            | -2.490                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0174(应城) | 2.0                              | 0.58                             | -2.498                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0175(汉川) | 2.4                              | 1.30                             | -2.339                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0125(大悟) | -0.6                             | -2.06                            | -4.198                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0126(大悟) | 0.0                              | -0.90                            | -5.284                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 京珠高速 | Q0127(大悟) | -0.8                             | -1.53                            | -3.436                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0128(孝昌) | 2.3                              | -0.03                            | -3.378                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0129(孝昌) | 0.0                              | -1.01                            | -2.291                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0130(孝昌) | 0.8                              | -0.05                            | -1.986                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0131(蔡甸) | 2.1                              | 0.75                             | -1.650                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0153(随州) | 2.5                              | -0.85                            | -5.948                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0154(随州) | 2.3                              | -1.29                            | -5.172                           | $\neq 0$                  | 3  |
| 随岳高速 | Q0155(随州) | 1.7                              | -0.65                            | -3.48                            | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0156(随州) | 2.0                              | -0.93                            | -3.086                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0157(随州) | 1.9                              | -0.37                            | -4.057                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0158(随州) | 0.6                              | -1.16                            | -4.365                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0159(京山) | 1.8                              | -0.12                            | -3.782                           | $\neq 0$                  | 3  |
|      | Q0160(京山) | 2.9                              | 0.10                             | -2.997                           | $\neq 0$                  | 3  |

行、分车型管制等措施。对福银高速鄖西段(Q0077)、谷城段(Q0085)、枣阳段(Q0091)、安陆段(Q0098),二广高速襄阳段(Q0101),沪蓉高速荆门段(Q0166)、钟祥段(Q0167、Q0168)、京山段(Q0170、Q0171)、天门段(Q0172)、应城段(Q0173、Q0174)、汉川段(Q0175),京港澳高速大悟段(Q0125、Q0126、Q0127)、孝昌段(Q0128、Q0129、Q0130)、蔡甸段(Q0131),随岳高速随州段(Q0153、Q0154、Q0155、Q0156、Q0157、Q0158)、京山段(Q0159、Q0160)检验,发现模式预报 25 日气温低于  $T_{\text{拐点}}$ ,并且预报 25 日有降水发生,对应结冰风险等级为 3 级,风险大(表 13)。

通过对 2016 和 2018 年三次湖北省高速公路道路结冰过程进行检验,发现高速公路道路结冰预警模型能较好地指导高速公路开展消冰措施,并且能至少提前一日给出相应的预报结果,为消冰措施及时提供建议,为高速公路安全出行提供保障。

4 结论与讨论

本文对 73 个含有路面温度观测的交通站进行道路结冰研究,分析得出路面温度达到  $0^{\circ}\text{C}$  时的临界气温,得到整个湖北高速路段临界气温分布图;分析不同路段结冰的气温条件概率模型( $P$ ),发现不同路段结冰时对应环境气温有差异,每个路段拥有自己的概率模型;然后,根据每个站点的规律建立对应路段模型,通过此概率模型可以得到随着气温改变,结冰频率变化规律,计算得到整个湖北高速路段结冰起始拐点的分布;最后,建立整个湖北省高速公路道路结冰预警模型,并通过对 2016 和 2018 年三次典型的道路结冰个例检验,发现高速公路道路结冰风险等级能较好地指导高速公路开展消冰措施,并且能至少提前一日给出相应的预报结果,能提前及时地为消冰措施提供建议。可以将其建立模型,

每日给出结冰风险预报,为湖北省高速公路结冰提前预警。但本文目前仅对出现结冰的高速路段进行了检验,待进一步积累交通站数据后,可完善模型,检验模型的空报率。

**致谢:**感谢湖北省气象服务中心陈正洪教授的指导。

## 参考文献

- 白永清,陈城,何明琼,2016. 利用 Logistic 回归方法的高速桥(路)面结冰风险等级预警模型[J]. 气象科技,44(2):336-340. Bai Y Q, Chen C, He M Q, 2016. Warning model of risk degree for bridge/road surface icing of expressway based on Logistic regression[J]. Meteor Sci Technol, 44(2):336-340(in Chinese).
- 陈正洪,2010. 社会对极端冰雪灾害响应程度的定量评估研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), (3):119-122. Chen Z H, 2010. A special method and grading index on the quantitative assessment about the social emergent response to extreme low temperature, raining and snowing, icing disasters[J]. J Huazhong Agric Univ (Soc Sci Ed), (3):119-122(in Chinese).
- 陈正洪,史瑞琴,李兰,2008. 湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻灾害特点及影响分析[J]. 长江流域资源与环境,17(4):639-644. Chen Z H, Shi R Q, Li L, 2008. Analysis on the main properties of the low temperature, raining and snowing, icing disaster and its effect in Hubei in early 2008[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 17(4):639-644(in Chinese).
- 崔党群,2005. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理,24(1):112-115. Cui D Q, 2005. Analysis and making good fitting degree test for Logistic curve regression equation [J]. J Appl Stat Manag, 24(1):112-115(in Chinese).
- 崔锦,周晓珊,阎琦,等,2017. 降雪含水比研究进展[J]. 气象,43(6):735-744. Cui J, Zhou X S, Yan Q, et al, 2017. Advances in snow-to-liquid ratio[J]. Meteor Mon, 43(6):735-744(in Chinese).
- 黄政,袁成松,包云轩,等,2016. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验[J]. 气象,42(8):944-953. Huang Z, Yuan C S, Bao Y X, et al, 2016. Numerical simulations of heavy fog processes on expressways based on different parameterization schemes[J]. Meteor Mon, 42(8):944-953(in Chinese).
- 李嵩恂,吴昊,柳艳香,等,2018. 我国公路低能见度灾害风险评估与区划研究[J]. 气象,44(5):676-683. Li A X, Wu H, Liu Y X, et al, 2018. Risk assessment and region partition of low visibility disasters on highway in China[J]. Meteor Mon, 44(5):676-683(in Chinese).
- 李兰,陈正洪,周月华,等,2009. 湖北省 2008 年初低温雨雪冰冻过程气候特征分析[J]. 长江流域资源与环境,18(3):291-295. Li L, Chen Z H, Zhou Y H, et al, 2009. Climatic features of low temperature and freezing of 2008 in Hubei Province[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 18(3):291-295(in Chinese).
- 刘梅,尹东屏,王清楼,等,2007. 南京地区冬季路面结冰天气标准及其预测[J]. 气象科学,27(6):685-690. Liu M, Yin D P, Wang Q L, et al, 2007. Weather standard and forecast study on winter icing on the road in Nanjing[J]. Sci Meteor Sin, 27(6):685-690(in Chinese).
- 卢涛,张义,高建平,2009. 冰雪天气下高速公路运营安全管理系统研究[J]. 科技创新导报, (1):87. Lu T, Zhang Y, Gao J P, 2009. Research on highway operation safety management system under ice and snow weather[J]. Sci Technol Innov Her, (1):87(in Chinese).
- 吕胜辉,王积国,邱菊,2004. 天津机场地区冻雨天气分析[J]. 气象科技,32(6):456-460. Lü S H, Wang J G, Qiu J, 2004. Analysis of freezing rains at Tianjin Airport[J]. Meteor Sci Technol, 32(6):456-460(in Chinese).
- 秦大河,董文杰,罗勇,2012. 中国气候与环境演变[M]. 北京:气象出版社:432. Qin D H, Dong W J, Luo Y, 2012. Climate and Environmental Evolution of China[M]. Beijing:China Meteorological Press:432(in Chinese).
- 孙翠梅,马俊峰,孔启亮,等,2013. 镇江市道路结冰影响指数分级预报方法[J]. 气象与环境学报,29(4):84-88. Sun C M, Ma J F, Kong Q L, et al, 2013. A forecast method of road icing effect index classification in Zhenjiang, Jiangsu Province[J]. J Meteor Environ, 29(4):84-88(in Chinese).
- 田华,王志,戴至修,等,2018. 公路积水阻断与降雨关系的探讨[J]. 气象,44(5):684-691. Tian H, Wang Z, Dai Z X, et al, 2018. Research on relationship between highway traffic blocking induced by waterlogging and precipitation[J]. Meteor Mon, 44(5):684-691(in Chinese).
- 王博妮,濮梅娟,田力,等,2016. 江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J]. 气象,42(2):192-202. Wang B N, Pu M J, Tian L, et al, 2016. Climate characteristics and impact factors of low visibility heavy fog on Jiangsu coast expressway[J]. Meteor Mon, 42(2):192-202(in Chinese).
- 王柳柳,刘黎平,余继周,等,2017. 毫米波云雷达冻雨降雪微物理和动力特征分析[J]. 气象,43(12):1473-1486. Wang L L, Liu L P, Yu J Z, et al, 2017. Microphysics and dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter wave radar[J]. Meteor Mon, 43(12):1473-1486(in Chinese).
- 谢静芳,吕得宝,2006. 气象条件对高速公路路面抗滑性能影响的试验[J]. 气象科技,34(6):788-791. Xie J F, Lü D B, 2006. Influence of weather conditions on highway antiskid performance[J]. Meteor Sci Technol, 34(6):788-791(in Chinese).
- 许爱华,陈翔翔,肖安,等,2016. 江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J]. 气象,42(3):372-381. Xu A H, Chen X X, Xiao A, et al, 2016. Analysis on the characteristics of meteorological factors and forecast ideas for regional advection fog in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 42(3):372-381(in Chinese).
- 许小峰,2010. 现代气象服务[M]. 北京:气象出版社:116-117. Xu X F, 2010. Modern Weather Service[M]. Beijing:China Meteorological Press:116-117(in Chinese).
- 阎琦,温敏,陆井龙,等,2016. 两次引发辽宁暴雪过程低涡的动力发

- 展机制[J]. 气象, 42(4): 406-414. Yan Q, Wen M, Lu J L, et al, 2016. Dynamic diagnosis on formation and developing mechanism of two vortices causing snowstorms in Liaoning[J]. Meteor Mon, 42(4): 406-414(in Chinese).
- 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等, 2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 44(7): 892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 44(7): 892-901(in Chinese).
- 杨成芳, 刘畅, 2019. 一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J]. 气象, 45(2): 191-202. Yang C F, Liu C, 2019. Study on snow cover and its meteorological influence factors of Jianghuai cyclone snowstorm[J]. Meteor Mon, 45(2): 191-202(in Chinese).
- 杨舒楠, 徐珺, 何立富, 等, 2017. 低层温度平流对华北雨雪天气过程的降水相态影响分析[J]. 气象, 43(6): 665-674. Yang S N, Xu J, He L F, et al, 2017. Impacts of low level temperature advection on the precipitation type of heavy rain snow process in North China[J]. Meteor Mon, 43(6): 665-674(in Chinese).
- 中国气象局, (2004-08-16). 突发气象灾害预警信号发布试行办法[EB/OL]. <http://www.china.com.cn/chinese/PI-c/644826.htm>. China Meteorological Administration, (2004-08-16). Trial measures for issuing warning signals for sudden meteorological disasters[EB/OL]. <http://www.china.com.cn/chinese/PI-c/644826.htm>(in Chinese).
- 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等, 2018. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 44(9): 1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al, 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1208-1219(in Chinese).
- Black A W, Villarini G, Mote T L, 2017. Effects of rainfall on vehicle crashes in six U. S. States[J]. Wea Climate Soc, 9(1): 53-70.
- Crevier L P, Delage Y, 2001. METRo: a new model for road-condition forecasting in Canada[J]. J Appl Meteor, 40(11): 2026-2037.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al, 2007. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure Appl Geophys, 164(6/7): 1121-1159.
- Jacobs W, Raatz W E, 1996. Forecasting road-surface temperatures for different site characteristics[J]. Meteor Appl, 3(3): 243-256.
- Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T, 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States: a historical essay including outlook[J]. Bull Amer Meteor Soc, 85(3): 395-408.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al, 2010. Fog research in China: an overview[J]. Adv Atmos Sci, 27(3): 639-662.
- Sass B H, 1992. A numerical model for prediction of road temperature and ice[J]. J Appl Meteor, 31(12): 1499-1506.
- Shao J, Lister P J, 1996. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. J Appl Meteor, 35(8): 1352-1361.