

文章编号: 2096-1618(2023)05-0615-06

# 川西雅康高速道路冬季路面结冰预警阈值分析

孟思彤<sup>1</sup>, 白爱娟<sup>1</sup>, 郑自君<sup>2</sup>, 刘皓<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 四川省凉山州气象局, 四川 西昌 615000)

**摘要:**针对雅康高速冬季由道路结冰导致的交通事件频发问题,利用2020年11月–2021年1月雅康高速两个隧道口的气象和路况观测数据,分析高速公路路面结冰的气象环境条件,建立大气温度与路面温度的关系模型,进行道路结冰风险等级的精细化判识。研究表明:在有路况观测的高速路段,路面湿滑系数能够较迅速地反映道路结冰状态,湿滑系数小于0.58是雅康高速路面结冰湿滑的阈值条件。将大气温度低于2.5℃,路面温度低于-2.5℃且有降水出现作为路面结冰的基本环境条件。雅康高速大气温度和路面温度的线性回归模型系数为0.97,优于抛物线模型,可以较好地拟合道路温度,并用于判识道路结冰的风险判识。

**关键词:**雅康高速;道路结冰;路面温度;湿滑系数;预警监测

**中图分类号:**P429

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.018

## 0 引言

近年来,全球气候变化背景下极端天气频繁,由此引发道路交通事故增加,道路结冰是引起高速公路交通事故的重要原因。道路结冰是雨、雪、冻雨或露滴降落到零度以下的地面时,路面出现积雪或结冰的现象。道路结冰后,地面湿滑使地表摩擦系数减小,车辆在行驶过程中难以控制方向,制动距离变长,极易导致交通事故发生。在高速公路上车辆快速行驶,道路湿滑极易引发翻车追尾等事故。道路结冰对高速公路行车安全构成了极大的威胁,中国气象局把道路结冰列为突发气象灾害的预警信号之一。

随着科学技术的发展,中国高速公路建设越来越完善,覆盖了近100%的20万以上人口城市,高速公路安全问题备受关注。雅康高速处于四川盆地向青藏高原过渡段内,海拔快速爬升,沟壑纵横,地形狭窄陡峻。雅康高速全线穿越不同气候垂直分布带,早晚温差大,雨、雪、冰、雾、风等恶劣天气频繁,加上沿线龙门山断裂带地质结构复杂,桥梁隧道众多,行车风险高,对行车影响非常大。目前在雅康高速沿线布设了气象和路况观测设备,但对观测数据的分析欠缺,同时也缺乏完善的道路结冰判识技术。

已有研究表明,低能见度、道路积雪结冰是影响高速公路安全运行的重要因素<sup>[1]</sup>。路面结冰的环境条件受气温、地温和降水量等因子的相互作用。王晨薇等<sup>[2]</sup>分析路面摩擦因数随时间的变化规律,表明随着降水量增加,结冰路面抗滑性能的降低程度会减小;在相同降

水量条件下,当实际温度超过临界温度值时,路面摩擦系数随着时间缓慢上升最后达到稳定。不同降水量路面的临界温度不同,随着降水量增加,路面结冰所需时间也越长,而温度越低,结冰所需的时间则相对减少。吴佳婕<sup>[3]</sup>构建了最低气温、地面最低温度、平均相对湿度和平均风速的模型,并考虑了能量辐射收支对道路结冰的影响;舒斯等<sup>[4]</sup>根据路面结冰起始的拐点分布,建立了湖北省高速公路结冰的预警模型。张宏芳等<sup>[5]</sup>确定气温是影响道路结冰年际变化的重要因子,且判断道路结冰时需要考虑当前降水、前期降水、路面温度和积雪深度。吴凡等<sup>[6]</sup>提出道路结冰是当日最低气温要达到0℃左右,且最低地表气温降到1℃以下。李兰兰等<sup>[7]</sup>在持续降水前提下,按路面温度按 $\geq 2^\circ\text{C}$ 、 $-2^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ 、 $\leq -2^\circ\text{C}$  3个等级来判断路面结冰,将道路湿滑指数和结冰指数均划分成4个等级。

目前雅康高速沿线在易结冰的隧道口布设了气象和路况监测系统,进行多项观测,但是对该类数据分析较少,且未能对该公路沿线道路结冰进行客观定量的判识。因此本文利用雅康高速的观测数据,分析路面结冰的环境条件,建立路面结冰的判识依据。

## 1 路观测资料和研究方法

### 1.1 观测站点和要素说明

雅康高速隧道出入口观测站2020年11月–2021年1月观测数据,资料来自雅康高速管理局。观测站和资料说明如表1所示,包括大气温度、路面温度、当日降雨、路面状态及湿滑系数等16项数据,除降水量为24 h采集外,其余要素为20 s。由于20 s间隔的数据观测不稳定,因此对数据做了小时平均处理。

收稿日期:2022-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2242202);中国气象局创新发展专项资助项目(CXFZ2022J012);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(SCQXKJYJXMS202210)

通信作者:郑自君, E-mail:441727466@qq.com.

表1 观测站点及观测要素

| 观测站位置  | 仪器名称      | 观测要素  |
|--|-----------|---|
| 天河隧道右洞出口、两路口隧道东入口(2个站)   | 非接触式路面检测仪 | 风向、风速、气温、能见度、相对湿度、路温、冰厚、盐度、湿滑系数、路况、雪厚、冰点温度、路面水厚 |
| 两路口、前碛山3号左洞、前碛山3号右洞、天河隧道右洞出口(4个站)                                | 智能微型自动气象站 | 能见度、大气温度、路面温度、风速、日降水量、水膜厚度、冰厚度、雪厚度、摩擦系数         |
| 喇叭河隧道康雅向出口、紫石隧道康雅向出口、天全隧道雅康向出口、天河联系雅康向、无名字、喇叭河隧道康雅向入口、喇叭河康雅向(7站) | 智能微型自动气象站 | 风速、气温、雨、雪天气检测                                   |

以上观测中除大气温度、湿度和风等常规气象要素外,还有路面特征参数,如路面温度、水膜高度、冰厚度、雪厚度、湿滑系数、路面状态。路况观测信息仅有湿滑系数完整可用,该系数是利用红外线光谱法,基于路面不同区域对于光吸收的不同,计算出代表路面湿滑程度的指标,衡量路面抗滑性能。通常情况下湿滑系数越小,摩擦系数就越小,路面行驶越不安全。

1.2 回归模型的建立

线性回归模型是利用数理统计的回归分析,确定两个或多个变量之间的关系的分析方法,用表达形式 $\hat{y}=\hat{b}x+\hat{a}$ 表示。其中

$$\hat{b}=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}=\frac{\sum_{i=1}^nx_iy_i-n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^nx_i^2-n\bar{x}^2}$$
$$\hat{a}=\bar{y}-\hat{b}\bar{x}$$

抛物线模型也是常用的回归模型,利用最小二乘法建立要素之间的二次关系方程,用表达式 $y=Ax^2+Bx+C$ 表示,其中 $A,B,C$ 为

$$\begin{aligned} &(\sum_{k=1}^Nx_k^4)A+(\sum_{k=1}^Nx_k^3)B+(\sum_{k=1}^Nx_k^2)C=\sum_{k=1}^Ny_kx_k^2 \\ &(\sum_{k=1}^Nx_k^3)A+(\sum_{k=1}^Nx_k^2)B+(\sum_{k=1}^Nx_k)C=\sum_{k=1}^Ny_kx_k \\ &(\sum_{k=1}^Nx_k^2)A+(\sum_{k=1}^Nx_k)B+NC=\sum_{k=1}^Ny_k \end{aligned}$$

1.3 模型效果的检验方法

通过相关系数、均方根误差、 $R^2$ 和绝对误差来检验模型的拟合效果。其中 $R^2$ 表明拟合值对于真值的描述程度。 $R^2$ 越接近1,方程的拟合效果越好。

$$R^2=\frac{\sum_i(\hat{y}^{(i)}-y^{(i)})^2}{\sum_i(\bar{y}-y^{(i)})^2}$$

2 雅康高速道路结冰的气象条件分析

根据高速公路管理部门的记录,2021年1月4日22:00和7日19:24,雅康高速降大雪,出现道路结冰,康定至雅安方向关闭收费站15个小时。直到8日10:20主线恢复通行,为近几年来雅康高速最严重的

道路结冰事件。因此,选用这两次个例作为代表进行分析。在此选取2021年1月天河隧道口和前碛山右洞口的观测数据,分析大气温度、路面温度和湿滑系数的时间变化,确定道路结冰前后的湿滑系数和环境温度的变化特征,同时通过建立大气温度和路面温度关系模型,确定道路结冰的环境条件。以上工作可以为没有路况观测的地区进行结冰风险的客观判识,为后期发布道路结冰预警奠定基础。

2.1 雅康高速路面湿滑系数的变化特征

雅康高速前碛山右洞口和天河隧道口逐小时湿滑系数如图1所示,道路未结冰时路面湿滑系数维持在0.8左右。在1月4日22时和7日06:00-10:00湿滑系数陡降到0.15,达到湿滑系数的最低值。两次湿滑

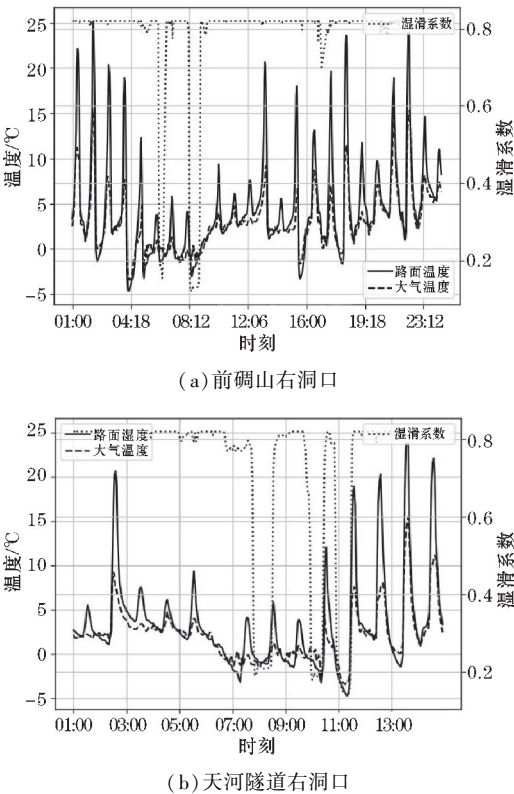


图1 2021年1月雅康高速前碛山右洞口和天河隧道右洞口的大气温度、路面温度和湿滑系数的变化曲线

系数的低值时段对应雅康高速降雪后道路结冰的两次关闭。湿滑系数的突然下降是道路结冰的重要反映,

可作为衡量高速公路安全运行的重要依据。两次道路结冰事件中湿滑系数陡降至0.5以下,因此可将湿滑系数达到0.5以下作为雅康高速道路结冰的重要判据。

2.2 雅康高速大气温度、路面温度的变化特征

已有很多学者对道路结冰发生时气温以及路面温度的特征进行了研究,舒斯等<sup>[4]</sup>分析得出湖北省高速公路路面温度达到 0℃时的临界气温,发现不同路段结冰时对应环境气温有差异。对 1 月 1-24 日前碛山和天河隧道口观测站的大气温度和路面温度的变化曲线(图 2)进行分析,得到路面结冰时气温和路面温度的变化特征。大气温度和路面温度关系密切,具有同步变化趋势。在前碛山右洞口站两次湿滑系数陡降路面结冰时,路面温度分别为-1.0℃和-2.0℃左右,天河隧道口站首次结冰时路面温度在4℃~10℃,气温在4℃左右。即当湿滑系数值降低到0.5以下大气温度与路面温度较低时,尤其当大气温度在-2.5℃~2.5℃时,而当时的路面温度处于-1℃~2.5℃,路面开始结冰。

2.3 大气温度和路面温度差的变化特征

大气温度和路面温度是道路结冰的重要环境条件,但两者之间有差异。根据大气温度和路面温度差的折线图(图 2),分析大气温度和路面温度间的关系。通常情况下高速与其他路面气温变化相似,沿线大气

温度低于路面温度,气温与路面温度的差值通常低于 0℃,温度差为负值。1 月高速公路沿线大气温度与路面温度通常都在 0℃度以上,当大气温度大于 5℃时,大气温度与路面温度相差较大,路面通常不易发生结冰。白天,地表受太阳辐射的影响迅速升温,而气温受地表长波辐射的影响随后升温,气温与路温的温差较大。夜晚地表长波辐射降温,与气温的差值缩小。路面温度始终高于大气温度,地气温差大于 0℃。在 1 月 7 日雅康高速公路发生道路结冰事件时,大气温度与路面温度的温度差减小,稳定维持在 1℃~2℃左右。因此,当大气温度在 0℃左右,而地面温度小于 0℃时,路表更容易产生结冰现象,这与以往的研究结果相似。因此,路面温度降低是直接导致结冰的根本原因,通过白天和夜间路面温度与气温之间的关系,可以通过大气温度来估算路面温度。当两者皆满足于道路结冰发生时的温度阈值时,就可以发布道路结冰预警。

2.4 大气温度与路面湿滑系数的关系分析

由于路面状况和低能见度对交通安全的影响和作用机理不同,因此,在开发交通气象指数时有必要进行区分,并在路面摩擦系数和路面湿滑现象描述间建立联系,李兰兰等<sup>[7]</sup>提出了湿滑系数的概念,对湿滑系数的研究能够更直观地反映路面状况,对道路结冰的预警提供依据。

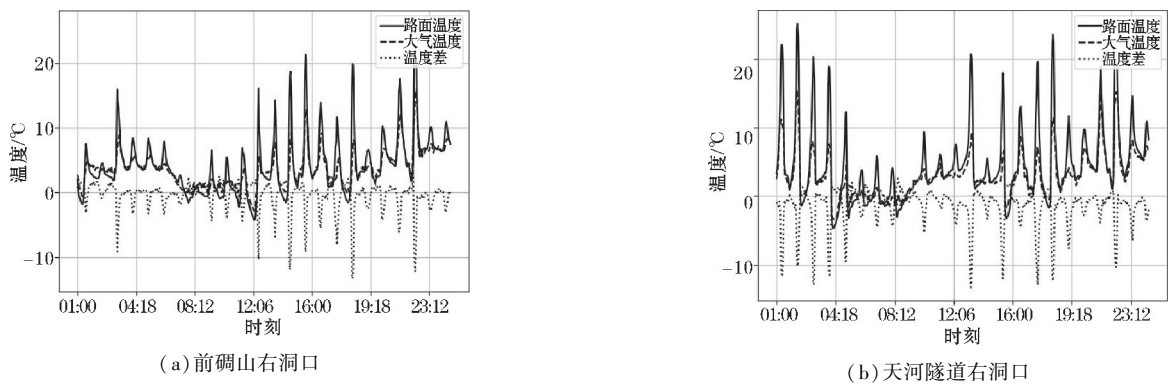


图 2 2021 年 1 月雅康高速前碛山右洞口和天河隧道右洞口观测站气温、地温和温度差的变化曲线

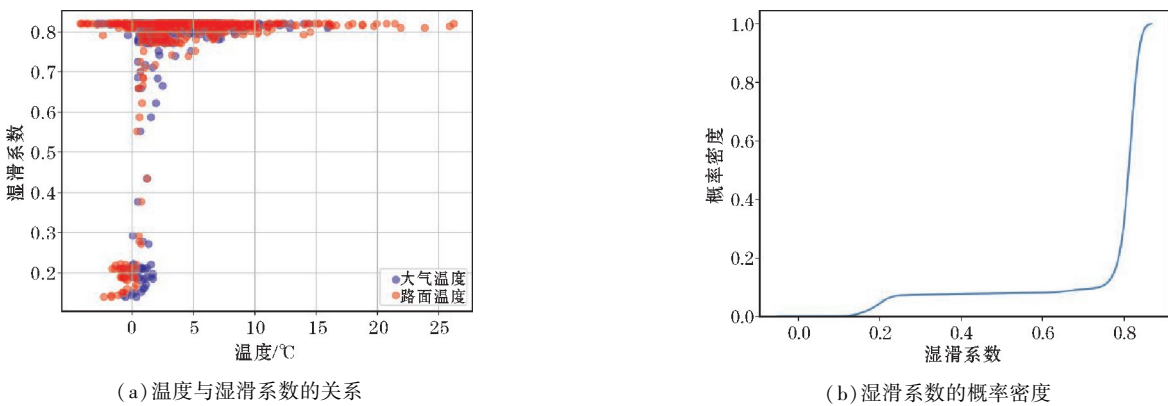


图 3 2021 年 1 月雅康高速天河隧道右洞口大气温度与湿滑系数的关系、湿滑系数的概率密度



对隧道口观测资料数据、大气温度与湿滑系数的散点图(图 3a),以及湿滑系数的概率密度(图 3b)分析可知,湿滑系数的峰值出现在0.8左右,且在路面状态为冰或雪状态时,路面湿滑系数均小于0.58。此时图 3(a)中对应时次的大气温度保持在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,路面温度在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,路面结冰厚度观测为 $0.01\sim 0.62\text{ cm}$ 。因此确定大气温度低于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和路面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为判断路面结冰的基本条件。该气温条件下,高速公路极有可能发生道路结冰,需要及时发布道路结冰预警信息。

3 大气温度和路面温度的关系分析

地面温度和路面状态为判断路面结冰提供信息,但是目前雅康高速沿线较多路段不能提供路面观测资料,如路面结冰厚度、摩擦系数等,不能为判断路面结冰提供准确的有效参数。常规的气象预报产品仅提供大气2 m高度的气温,没有路面温度,因此不能为判识路面结冰提供直接判断依据。在此构建气温和路面之间的关系模型,为随时根据路面温度来判识路面结冰提供基础数据,并为数值预报和公众气象预报产品直接用于路面结冰提供判识依据。

3.1 大气温度与路面温度关系

根据大气温度与路面温度的散点分布(图 4),可以看出地面温度与气温相互作用密切,两者同步变化趋势明显。在大气温度小于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,雅康高速的大气温度和路面温度有较好相关性。为了更好建立气温和路温的客观模型,分别使用线性回归和抛物线两种方法建立回归方程。对比两种方程的拟合效果,选择更好的一种方法应用到雅康高速道路结冰的判识。

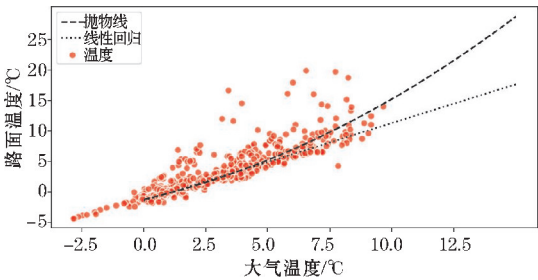


图 4 天河隧道右洞出口站 1 月大气温度和路面温度的散点分布图

3.2 大气温度和路面温度的线性回归模型及抛物线模型

利用天河隧道出口 2021 年 1 月的气温资料及地

温资料,建立逐小时气温和路面温度序列,应用线性回归方法建立路面温度与大气温度的模型。

根据 2021 年 1 月的小时平均气温和小时平均地温回归建立的逐小时大气温度与路面温度的线性回归方程表达式为: $T_1=1.27\times T_2-1.41$ , $T_1$  为地温, $T_2$  为气温。回归方程的斜率为1.27,为正值,说明路面温度和大气温度呈正相关关系。计算得到两者的相关系数为0.97,均方根误差  $RMSE=1.82$ , $R^2=0.94$ ,说明一元线性方程能够较好地用于构建路面温度。

利用 2021 年 1 月的小时平均气温和小时平均地温的数据,建立的逐小时大气温度与路面温度的抛物线回归方程为  $T_1=0.07T_2^2+0.94T_2-1.19$ 。与线性回归结果类似,路面温度和大气温度呈正相关关系。计算得到相关系数  $R=0.93$ , $R^2=0.86$ ,均方根误差  $RMSE=2.01$ 。与线性回归模型相比较,最小二乘法建立的抛物线回归方程的拟合效果较差。

3.3 路面温度与大气温度关系模型的检验

3.3.1 一元线性回归模型的检验

应用 2021 年 1 月两路口隧道左洞入口的数据,对两种方法建立的模型进行检验,计算实际值与模拟值的绝对误差和相对误差,结果见表 2。

表 2 大气温度和路面温度的线性模型及抛物线模型结果检验

| 单位: $^{\circ}\text{C}$ |        |                      |                  |                  |                   |
|------------------------|--------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 大气温度                   | 观测路面温度 | 一元线性回归<br>性回归<br>估测值 | 抛物线<br>回归估<br>测值 | 线性回<br>归绝对<br>误差 | 抛物线<br>回归绝对<br>误差 |
| 0.5                    | 0.4    | -0.8                 | -0.7             | 1.3              | 1.2               |
| 1.0                    | 0.8    | -0.1                 | -0.2             | 0.9              | 1.2               |
| 2.0                    | 2.0    | 1.1                  | 1.0              | 0.9              | 1.0               |
| 2.5                    | 2.6    | 1.8                  | 1.6              | 0.8              | 1.0               |
| 3.0                    | 2.9    | 2.3                  | 2.3              | 0.6              | 0.6               |
| 3.5                    | 3.8    | 3.0                  | 3.0              | 0.8              | 0.8               |
| 4.0                    | 4.8    | 3.7                  | 3.7              | 1.1              | 1.1               |
| 4.5                    | 5.4    | 4.3                  | 4.5              | 1.1              | 0.9               |
| 5.0                    | 6.1    | 4.9                  | 5.3              | 1.2              | 0.8               |
| 5.5                    | 6.5    | 5.6                  | 6.1              | 0.9              | 0.4               |
| 6.0                    | 6.9    | 6.2                  | 7.0              | 0.7              | 0.1               |
| 6.5                    | 7.4    | 6.9                  | 7.9              | 0.5              | 0.5               |
| 7.0                    | 7.8    | 7.5                  | 8.8              | 0.3              | 1.0               |
| 8.0                    | 9.0    | 8.8                  | 10.8             | 0.2              | 1.8               |
| -0.5                   | -0.7   | -2.1                 | -1.6             | 1.4              | 0.8               |
| -1.5                   | -1.6   | -3.3                 | -2.4             | 1.7              | 0.8               |

表 2 表明:根据线性回归方程估算的路面温度与实际路面温度测量值的最大绝对误差为 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均

误差为0.7℃,由此可见,通过一元线性回归方法建立的方程有较好地拟合效果。

对表 2 中最小二乘法建立的抛物线回归方程的检测结果进行分析,模拟值与路面温度观测值的最大绝对误差为1.8℃,平均误差为0.9℃,两种误差均大于一元线性模型的误差。由此可见,使用最小二乘法建立的抛物线模型相比于线性回归方程的拟合效果较差。在对道路结冰的预测中,可以采用抛物线模型来估计路面温度,从而发布相关的预警信息,有助于相关部门及时采取应对措施,减少高速公路上交通事故的发生。

3.3.2 隧道口路面结冰的气象要素阈值检验

根据 2021 年 1 月 7 日至 1 月 11 日天河隧道右洞口路面温度、大气温度及湿滑系数的折线(图 5),可以发现当路面温度低于0℃时,路面湿滑系数维持在0.2 以下,此时路面状态为结冰状态。湿滑系数与大气温度和路面温度呈显著正相关关系,当大气温度及路面温度同时低于0℃时,湿滑系数随着大气温度的减小快速减小。结合数据中高速公路的路面状态及结冰厚度可以发现,路面湿滑系数小于0.58时,路面的状态为结冰或者积雪,路面湿滑难行,此时应该及时发布道路结冰预警。

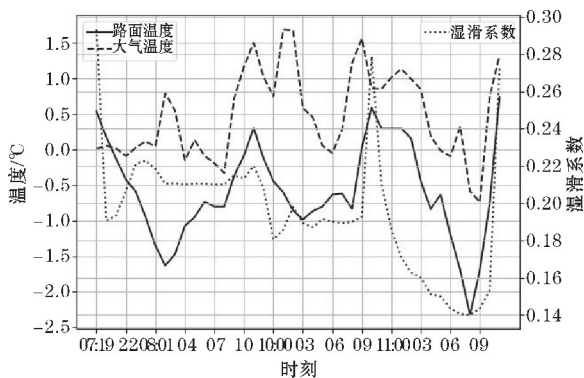


图 5 2021 年 1 月天河隧道右洞口道路结冰个例

4 结论

以雅康高速隧道口观测数据为基础,对于高速公路道路结冰预警模型的建立进行探讨,利用雅康高速交通站提供的大气温度、路面温度、湿滑系数及路面状态等资料,使用过回归分析方法,对于大气温度及路面温度之间的关系进行研究,建立了相应的预警模型。得出如下结论:

(1)大气温度和路面温度在白天时温差较大,夜晚相差较小,当有道路结冰现象出现时,不论白天还是

黑夜,两者的温差较小,稳定在1℃~2℃。

(2)根据湿滑系数和对应时次的路面状态,以及结冰时大气温度和地面温度状态,确定当路面的湿滑系数低于0.58,易发生道路结冰。在没有湿滑系数观测的地区,当大气温度处于0℃,路面温度处于-2.5℃时,容易发生道路结冰现象,需要发布道路结冰预警。

(3)大气温度和路面温度呈正相关关系,利用回归拟合分析,建立地面温度和大气温度的关系模型。比较直线方程与抛物线模型的拟合效果后发现,直线方程的拟合效果比抛物线模型好,相关系数更高,均方根误差更小,因此可以用气温的阈值来判识路面结冰。

致谢:感谢成都信息工程大学教师科技创新能力提升计划重大项目(KYTD202201)对本文的资助

参考文献:

[1] 康延臻,王式功,杨旭,等. 高速公路交通气象监测预报服务研究进展[J]. 干旱气象,2016,34(4):591-603.

[2] 王晨薇,叶轩宇,王宁,等. SMA 路面结冰规律与预警阈值研究[J]. 上海公路,2017(1):12-15.

[3] 吴佳婕. 关于雨雪天气对城市高架路面结冰影响的分析[J]. 科学与信息化,2020(30):149-150.

[4] 舒斯,熊守权,陈英英,等. 湖北省高速公路道路结冰预警模型[J]. 气象,2019,45(11):1589-1599.

[5] 张宏芳,卢珊,沈姣姣,等. 陕西道路结冰时空变化特征及其风险预警模型[J]. 干旱气象,2020,38(5):878-885.

[6] 吴凡,阙志萍. 江西泰井高速公路道路结冰特征及其预报模型研究[J]. 江西科学,2018,36(6):995-999.

[7] 李兰兰,宋永鹏. 泰安高速道路湿滑指数与道路结冰指数分级研究[J]. 黑龙江交通科技,2018,41(1):14-16.

[8] 朱承瑛. 高速公路路面温度模型及其预报系统的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.

[9] Norrman J. Slipperiness on roads—an expert system classification[J]. Meteorological Applications, 2000, 7(1):27-36.

[10] 李薇,叶林,张杰,等. 光纤式结冰传感器的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(8):16-18.

[11] Shao J, Lister P J. An Automated Now casting

Model of RoadSurface Temperature and State for Winter Road Maintenance. [ J ]. Journal of Applied Meteorology,1996,35(8):1352-1361.

[ 12 ] Jones K F. Ice accretion in freezing rain [ R ]. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Material,1996.

[ 13 ] 欧彦,蒲翔,等. 路面结冰监测技术研究进展 [ J ]. 公路,2013(4):191-195.

[ 14 ] 姜会飞,廖树华,叶尔克江,等. 地面温度与气温关系的统计分析 [ J ]. 中国农业气象,2004(3):1-4.

## Analysis of Winter Pavement Ice Warning Threshold of Yakang Expressway in Western Sichuan

MENG Sitong<sup>1</sup>, BAI Aijuan<sup>1</sup>, ZHENG Zijun<sup>2</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Liangshan Meteorological Office, Xichang 615000, China)

**Abstract:** Aiming at the frequent traffic incidents caused by road icing in winter, the meteorological and road condition observation data of the two tunnel entrances of Yakang Expressway from November 2020 to January 2021 were used to analyze the meteorological environmental conditions of highway pavement icing, establish a relationship model between atmospheric temperature and pavement temperature, and make a refined identification of road icing risk level. The results show that in the highway section with road condition observation, the slippery coefficient of the road surface can reflect the road icing state more quickly, and the slip coefficient is less than 0.58, which is the threshold condition for icy and slippery pavement of Yakang Expressway. The atmospheric temperature is below 2.5 ℃, the road surface temperature is below -2.5 ℃ and the precipitation is used as the basic environmental conditions for road surface icing. The coefficient of linear regression model of Yakang high-speed atmospheric temperature and road surface temperature is 0.97, which is better than the parabolic model, which can better fit the road temperature and be used to identify the risk of road ice.

**Keywords:** Yakang expressway; icy roads; pavement temperature; slip coefficient; early warning monitoring