文章编号:1000-5854(2026)04-0376-07

石家庄市道路结冰特征及气象风险预报模型

魏　军[1,2,3]，景　华[1,2,3]，彭相瑜[1,2,3]

(1.河北省气象与生态环境重点实验室,河北 石家庄　050021;2.中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,河北 雄安新区　071800;3.河北省气象灾害防御和环境气象中心,河北 石家庄　050021)

摘　要:基于石家庄市 1956—2022 年逐日气温、地温、雨雪及积雪现象观测数据,分析了石家庄市道路结冰的气候特征.基于 Logistic 回归构建道路结冰概率预报模型及气象风险等级预报模型,并以 2019—2022 年结冰季道路结冰数据对模型进行检验.结果表明:1) 石家庄市道路结冰呈现开始日期推迟、结束日期提前的趋势,结冰日数总体减少,平均每 10 a 减少 2.6 d;2) 当日最低气温下降至 5.1～2.0 ℃时,道路结冰概率进入快速增长期,其中 3.6 ℃为结冰概率的敏感峰值;3) 当日最低气温在 5.4 ℃以上时,道路结冰可能性很低;气温处于 3.8～5.4 ℃时,可能出现道路结冰;气温在 2.1～3.8 ℃时,结冰可能性较大;气温低于 2.1 ℃时,结冰可能性很大.

关键词:道路结冰;概率模型;Logistic 回归;风险预报

中图分类号:P 49　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202505009

Characteristics of road icing and forecast model of meteorological risk in Shijiazhuang city

Wei Jun[1,2,3]，Jing Hua[1,2,3]，Peng Xiangyu[1,2,3]

(1.Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province,Shijiazhuang Hebei　050021,China;2.China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory,Xiong'an New Area Hebei　071800;3.Hebei Meteorological Disaster Prevention and Environment Meteorology Center,Shijiazhuang Hebei　050021)

Abstract:On the basis of road icing data and related traffic flow information in Shijiazhuang city from 1956 to 2022,based on Logistic regression,the climatic characteristics of road icing were analyzed,and the icing probability prediction model and the icing risk ranking prediction model were established.The models were tested using road icing data in the 2019—2022 icing seasons.The results show that:1) Icing in Shijiazhuang has a tendency to delay the start date and advance the end date, the number of icing days decreases,with an average decrease of 2.6 d per 10 a; the icing occurs mostly in December-February.2) When the minimum temperature on the day drops to 5.1～2.0 ℃,the probability of road icing enters the fast-increasing period,3.6 ℃ is the sensitive peak base point of road icing probability.3) When the minimum temperature is above 5.4 ℃,there will be no road icing;at 3.8～5.4 ℃,icing may occur;at 2.1～3.8 ℃,it is more likely;when it is below 2.1 ℃,the probability of icing may be very large.

Key words:road icing; probability model; Logistic regression; risk prediction

冬季降雪、降雨等天气及积雪、结冰等路面状况,易造成车辆打滑、行人通行不便.路面结冰对轮胎摩擦

收稿日期:2024-12-24;**修回日期**:2025-01-21

基金项目:河北省科技厅重点研发计划项目(21375410D);河北省气象局科研项目(18KY07)

作者简介:魏　军(1987-),男,江苏泗阳人,高级工程师,硕士,研究方向为气象灾害防御与风险评估.

通信作者:景　华(1968-),女,高级工程师,研究方向为灾害防御与灾害评估.E-mail:996189732@qq.com

系数有显著影响，极易引发车辆打滑或空转，给公路交通安全带来极大隐患[1-3]．调查显示，在影响交通安全运行的恶劣天气中，由道路结冰引发的交通事故数量排名第一位[4-5]．因此，客观认识道路结冰发生规律，科学开展道路结冰风险预报，是气象防灾减灾的关键环节．

国外尤其是欧美等国家对道路结冰的研究起步较早．从 20 世纪 60 年代起，学者们基于数值分析方法逐步完善、构建了路面状态预报模型[6-9]，并开展了路面温度及结冰预报技术服务．受观测条件等客观因素限制，国内相关研究起步较晚．近年来，针对道路结冰预报的研究主要可归纳为 2 类：1）基于统计模型因素建模[10-13]，主要依托实测资料，通过回归分析构建路面温度及道路结冰与气温、降水量、相对湿度、风速等气象要素间的定量关系，进而利用路面温度间接开展道路结冰预报；2）采用 C4.5 决策树算法、支持向量机等数据挖掘方法建模[14-16]，针对大样本数据进行处理，在属性参数设置合理的条件下，模型预测精度较高．上述道路结冰预报方法理论依据充分，在气象业务服务中应用广泛，具有较好的实际应用价值．

道路结冰是指雪、雨、冻雨或雾滴降落在温度低于 0 ℃的地面而出现的积雪或结冰现象[12]．将日最低地面温度≤0 ℃，且出现降雨、降雪、冻雨等任一天气或积雪状况时，可界定为发生道路结冰．道路结冰受纬度、地形影响较大，空间分布具有较强的局地性特征．本文中，笔者基于石家庄市 1956—2022 年逐日气温、地温、雨雪及积雪观测资料，在分析当地道路结冰气候特征的基础上，构建道路结冰概率预报模型与风险等级预报模型，并开展城市道路结冰风险等级预警技术研究，以期为城市道路结冰灾害风险预警、评估及防御工作提供技术支撑．

1 资料与方法

1.1 资料来源

研究资料来源于河北省气象信息中心提供的 1956—2022 年石家庄市 17 个地面气象观测站逐日观测资料，包括日最低气温、日降水量、日积雪深度、日雨雪天气情况、日最低地温数据．其中，选用 1956—2018 年全年及 2019 年 1～6 月观测资料开展统计分析，2019 年 11 月～2022 年 12 月道路结冰季数据用于模型检验．

1.2 研究方法

1.2.1 Logistic 回归模型

Logistic 回归对二分类变量具有较好的预测效果[17]，其取值区间为(0,1)，气象上常用于建立概率预报模型[18-20]．Logistic 函数 $y=f(x)$ 的一般表达式为

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

式中：a，b 为模型参数，可由 SPSS 软件拟合得到；e 为自然常数．Logistic 曲线具有 S 型分布特征，可通过对 Logistic 曲线一阶及二阶导数分别求解，得到 Logistic 增长曲线的 3 个关键点：令 $y'=0$，得 $x=-a/b$，表征曲线变化速度最快的高峰点(随 x 变化，y 反应最敏感)；令 $y''=0$，得 $x=(-a\pm1.317)/b$，表征曲线变化过程的 2 个拐点(曲线变化起始点和饱和点)．这 3 个点可将 Logistic 曲线发展过程划分为渐增期、快增期与缓增期．

1.2.2 Fisher 最优分割

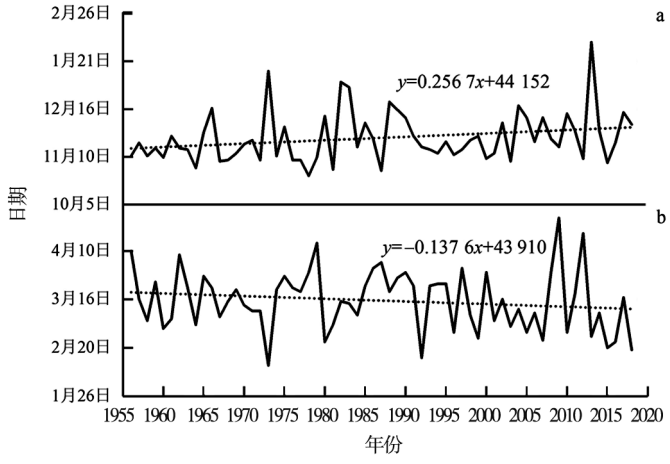
Fisher 最优分割法以分组后组内离差平方和最小、组间离差平方和最大为原则，对有序样本或可变为有序的样本进行最优分段，且能够较少受到主观因素影响的一种聚类分级方法，具体计算原理及步骤详见文献[21]．

2 结果与分析

2.1 道路结冰气候变化特征

2.1.1 道路结冰起止时间分析

根据道路结冰界定标准，统计了 1956—2018 年石家庄市逐年道路结冰开始及结束日期．由图 1a 可知，石家庄市道路结冰开始日期年际波动较大，开始日期最早出现在 1978 年 10 月 27 日，最晚为 2013 年 2 月 5 日，结冰开始日期多在 11 月 20 日前，半数以上年份出现在 11 月上旬至中旬．从 63 a 变化趋势来看，石家庄市结冰开始日期呈推后趋势，平均每 10 a 推迟 2.6 d．由图 1b 可知，石家庄市冬季道路结冰结束日期在 2 月中旬～4 月下旬，其中结束日期最早为 1973 年 2 月 11 日，最晚为 2009 年 4 月 27 日；87%的年份结冰结束于 3 月底之前，半数年份结束于 3 月 15 日之前．整体来看，石家庄市结冰结束日期呈提前趋势，平均每10 a 提前 1.4 d．



a.开始日期；b.结束日期.

图 1　1956—2018 年石家庄市道路结冰开始日期及结束日期

Fig.1　Start dates and end dates of road icing in Shijiazhuang city from 1956 to 2018

2.1.2　道路结冰日数分析

根据道路结冰界定标准，统计了 1956—2018 年石家庄市逐年道路结冰日数(见图 2).结果表明，石家庄市道路结冰日数年际变化显著，结冰日数最长 62 d、最短 4 d，平均为 21.7 d，研究期内每年均出现结冰.从变化趋势来看，1956—2018 年道路结冰日数整体呈减少趋势，平均每 10 a 减少 3.3 d.1980 年之前道路结冰日数相对较多，年均 29 d；1980 年之后结冰日数明显减少，年均 17 d；1996 年之后呈显著减少态势.Mann-Kendall(MK)突变检验显示，研究区结冰日数在 1992 年发生突变.

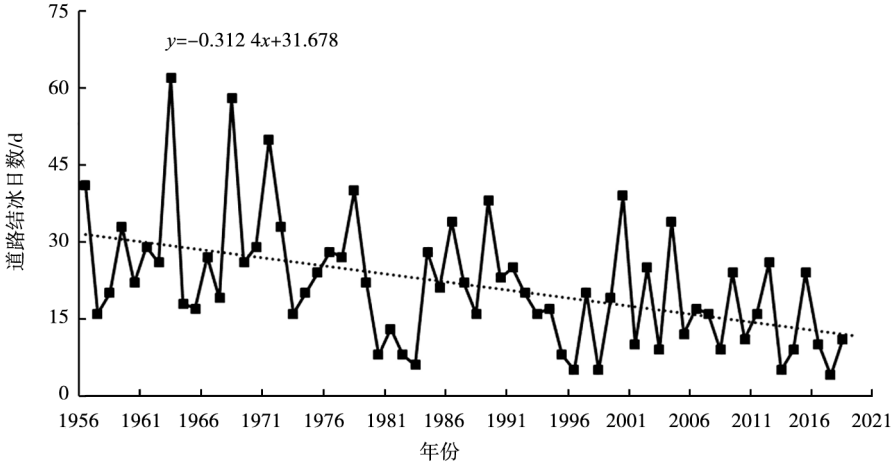


图 2　1956—2018 年石家庄市结冰日数年际变化

Fig.2　The interannual variation of the number of icing days in Shijiazhuang city from 1956 to 2018

由图 3 可以看出，石家庄市结冰主要集中于 11 月～次年 3 月，该时段结冰日数占比达到 99.0%，因此将 11 月～次年 3 月确定为石家庄市道路结冰季.结冰季内，1 月平均结冰日数最多，为 5.9 d；2 月和 12 月次之；11 月和 3 月明显较少，其中 11 月最少，仅 2.3 d.

2.2　道路结冰的影响因子及原因分析

为分析道路结冰的影响气象因子，进而实现道路结冰风险预报，综合选取日平均气温、日最低气温、日降水量、日平均相对湿度、2 min 平均风速、雨雪及积雪日数作为影响因子，分别统计 1956—2018 年结冰季逐年逐旬的平均气温、日平均最低气温、雨雪及积雪日数、平均相对湿度、2 min 平均风速，并与对应时段地温≤0 ℃的概率进行相关性分析，分析结果见表 1.

由表 1 可知，最低气温、雨雪及积雪日数与道路结冰呈极显著相关，表明上述因子的变化能够较好地反映道路结冰日数的变化.当温度条件适宜时，若路面积水或积雪条件满足，即可发生道路结冰.对 1956—2018

年结冰季(11 月 1 日～次年 3 月 31 日)日平均最低气温、雨雪及积雪日数(见图 4)进行统计分析,结果表明,研究期内结冰季平均最低气温呈上升趋势,20 世纪 90 年代以后平均最低气温普遍高于多年平均值(−2.0 ℃),平均每 10 a 增加 0.6 ℃.同时,结冰季雨、雪、积雪、冻雨日数呈减少趋势,20 世纪 80 年代以后,其平均值普遍低于多年平均值(44.6 d),平均每 10 a 减少 4.2 d.由此可见,道路结冰日数的减少既与结冰季平均最低气温上升有关,也与雨、雪、积雪日数减少密切相关,是两类因子共同作用的结果.

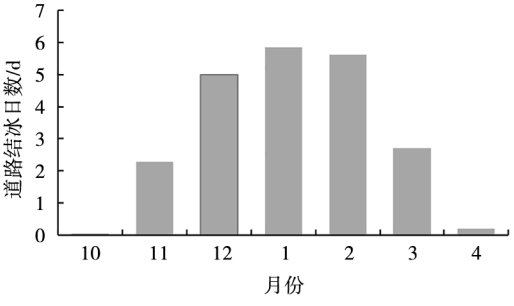


图 3　1956—2018 年石家庄市结冰日数月变化

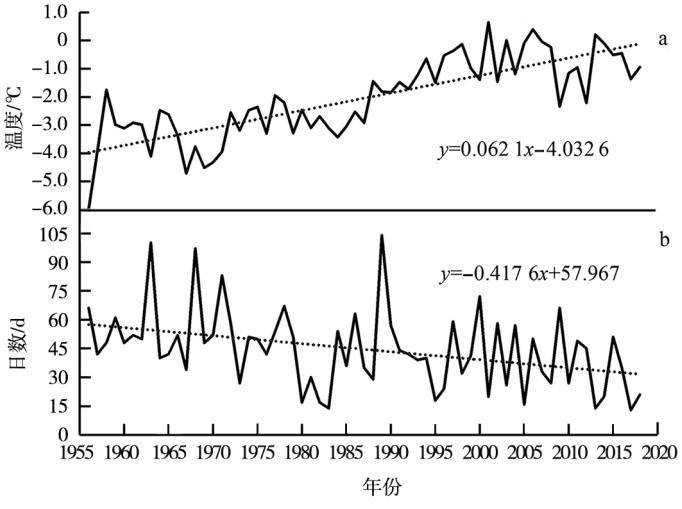
Fig.3　Monthly variation of icing days in Shijiazhuang city from 1956 to 2018

表 1　气象因子指标与地温≤0 ℃的概率相关性分析

Tab.1　Correlation analysis of meteorological factor indices and probability of land temperature ≤ 0 ℃

气象因子指标	地温≤0 ℃的概率
旬平均气温	−0.50*
旬平均最低气温	−0.74**
旬雨雪及积雪日数	0.92**
旬平均相对湿度	−0.06
旬 2 min 平均风速	−0.10

注:*.在 $P=0.05$ 处显著;**.在 $P=0.01$ 处显著.



a.平均最低气温;b.雨雪及积雪日数.

图 4　1956—2018 年石家庄市结冰季平均最低气温与雨雪及积雪日数分布

Fig.4　Distribution of average minimum air temperature and the number of days with snow and rain in the icing season of Shijiazhuang city from 1956 to 2018

2.3　基于最低气温的道路结冰概率预报模型

道路结冰需满足 2 个条件:地温≤0 ℃;出现雨雪天气及积雪.日最低气温与道路结冰呈极显著负相关,因此通过建立日最低气温与地温≤0 ℃概率的对应关系,将地温≤0 ℃概率的预报转化为日最低气温概率的预报,进而构建道路结冰概率预报模型.统计 1956—2018 年石家庄市结冰季不同日最低气温的出现频次及其对应日最低地温≤0 ℃的发生频率(见图 5),结果显示,地温≤0 ℃的概率随日最低气温变化呈反 S 型曲线分布.因此,可采用 Logistic 函数进行回归模拟.通过方程线性转化及参数估计,建立基于日最低气温的道路结冰概率(P)预报模型,即

$$P=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{(-3.02+0.85x)}}. \tag{2}$$

对 Logistic 函数进行一阶和二阶求导，分别得到道路结冰温度条件的起始拐点(5.1 ℃)、敏感峰值点(3.6 ℃)和饱和拐点(2.0 ℃).其物理意义解析：当雨雪、积雪条件满足时，道路结冰概率随日最低气温降低而升高，当日最低气温高于 10 ℃时，几乎不会结冰；当日最低气温降至 10～5.1 ℃时，结冰概率开始缓慢升高(渐增期)；当日最低气温降至 5.1～2.0 ℃时，结冰概率快速增加(快增期)；当日最低气温降至 2.0 ℃以下时，结冰概率增加缓慢(缓增期)，并趋于饱和.当日最低气温降至 3.6 ℃时，结冰概率变化最快，小幅度的气温变化会造成明显的概率波动，需重点警惕与防范.

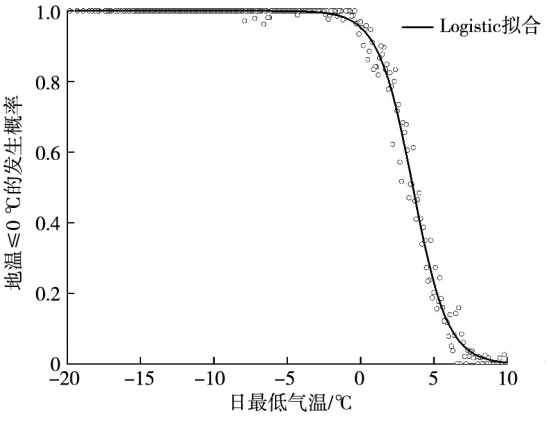


图 5　石家庄市道路结冰温度条件概率分布

Fig.5　Probability distribution of road icing temperature conditions in Shijiazhuang city

2.4　道路结冰风险等级预报模型

利用 Fisher 最优分割法将地温≤0 ℃的概率分为 4 个等级，分割点分别为 17.8%、46.2%、77.8%，分别得到日最低气温阈值为 5.4、3.8、2.1 ℃.结合满足道路结冰的降雪降雨条件，构建道路结冰风险等级模型，风险等级越高说明道路结冰的风险越高，结果见表 2.

当日最低气温≥5.4 ℃时，道路结冰的概率低于 17.8%，几乎不会出现道路结冰现象，风险很低；日最低气温在 3.8～5.4 ℃且路面湿度条件符合时，道路结冰概率为 17.8%～46.2%，可能出现道路结冰现象；日最低气温在 2.1～3.8 ℃且路面湿度条件符合时，道路结冰概率为 46.2%～77.8%，结冰可能性较大，风险等级较高；日最低气温低于 2.1 ℃且路面潮湿、出现雨雪天气及积雪时，道路结冰概率高于 77.8%，结冰可能性很大.

表 2　道路结冰风险等级预报模型

Tab.2　Prediction model of road icing risk grade

等级	标准	描述
1	t_{min}≥5.4 ℃或路面干燥	道路结冰风险很低
2	3.8 ℃≤t_{min}<5.4 ℃且路面潮湿、出现雨雪天气及积雪	中等风险，可能出现结冰
3	2.1 ℃≤t_{min}<3.8 ℃且路面潮湿、出现雨雪天气及积雪	风险较高，结冰可能性较大
4	t_{min}<2.1 ℃且路面潮湿、出现雨雪天气及积雪	风险极高，结冰可能性很大

2.5　道路结冰风险等级预报模型检验

为检验道路结冰风险模型的预报效果，选取 2019 年 11 月 1 日～2022 年 12 月 31 日共计 515 个样本进行预报模型检验，结果见表 3.由检验结果可知，地温≤0 ℃的实际概率均在预报概率范围之内，说明所构建的气温概率预报模型可信度高.2019—2022 年结冰季共出现 41 次道路结冰事件，其中 37 次发生在极高风险的 4 级，说明在温度条件满足的情况下，若出现雨雪天气及积雪，易出现道路结冰现象.

表 3　道路结冰风险等级预报模型检验

Tab.3　Test of road icing risk grade prediction model

道路结冰等级	日最低气温	样本数/个	地温≤0 ℃概率预报	地温≤0 ℃实际样本数/个	地温≤0 ℃实际概率/%	实际道路结冰样本数/个
1	$t_{min}\geqslant 5.4$ ℃	111	<17.8%	5	4.5	0
2	3.8 ℃≤t_{min}<5.4 ℃	34	17.8%～46.2%	13	38.2	2
3	2.1 ℃≤t_{min}<3.8 ℃	46	46.2%～77.8%	29	63.0	2
4	$t_{min}<2.1$ ℃	324	>77.8%	318	98.1	37

3　结论与讨论

1）通过分析石家庄市近 64 a 道路结冰的特征发现，石家庄市道路结冰开始日期呈推迟趋势，平均每 10 a 推迟 1.1 d；结束日期呈提前趋势，平均每 10 a 提前 1.8 d；结冰日数呈减少趋势，平均每 10 a 减少 2.6 d；结冰多发生在 12 月～次年 2 月.

2）通过对日最低气温及结冰概率进行 Logistic 曲线拟合发现，当雨雪、积雪条件满足时，道路结冰概率随日最低气温的降低而升高.当日最低气温降至 10～5.1 ℃时，结冰概率开始缓慢升高（渐增期）；当日最低气温降至 5.1～2.0 ℃时，结冰概率快速增加（快增期）；当日最低气温降至 2.0 ℃以下时，结冰概率增加缓慢（缓增期），并趋于饱和；3.6 ℃是结冰概率波动的敏感时期，需重点关注.

3）基于风险概率将道路结冰风险划分为 4 个等级，日最低气温在 5.4 ℃以上时，道路结冰可能性很低；3.8～5.4 ℃且伴有雨雪时，可能出现结冰；2.1～3.8 ℃且伴有雨雪时，结冰可能性较大；2.1 ℃以下时，结冰可能性很大.

道路结冰现象的发生需满足 2 个条件，即地温≤0 ℃和出现雨雪及积雪.地温≤0 ℃是道路结冰的必要条件，受观测资料条件的限制，本文在对石家庄市 17 个地面气象观测站的地面温度数据进行分析时，未考虑不同下垫面间地面温度的差异，且在道路结冰过程识别及温度指标选取等方面存在一定简化，致使研究结果存在一定局限性.今后可采用更具针对性的观测数据开展研究，以进一步提高模型的预报精度.

参考文献：

[1] 刘聪，卞光辉，黎健，等.交通气象灾害[M].北京：气象出版社，2009.

[2] 翟雅静，李兴华.灾害性天气影响下的交通气象服务进展研究[J].灾害学，2015，30(2)：144-147.DOI：10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.028.
Zhai Yajing，Li Xinghua.Advances in traffic meteorological service under the influence of disastrous weather[J].Journal of Catastrophology，2015，30(2)：144-147.

[3] 胡继超，林子静，成添.道路结冰的温度预报方法研究进展[J].科学技术与工程，2020，20(1)：1-6.DOI：10.3969/j.issn.1671-1815.2020.01.001.
Hu Jichao，Lin Zijing，Cheng Tian.Research progress on temperature prediction method for road icing[J].Science Technology and Engineering，2020，20(1)：1-6.

[4] 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.DOI：10.11755/j.issn.1006-7639(2020)-05-0878.
Zhang Hongfang，Lu Shan，Shen Jiaojiao，et al.Temporal and spatial distribution characteristics of road icing in Shaanxi and its risk warning model[J].Journal of Arid Meteorology，2020，38(5)：878-885.

[5] 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.DOI：10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.009.
Shu Si，Xiong Shouquan，Chen Yingying，et al.Warning model of road surface icing of expressway in Hubei province[J].Meteorological Monthly，2019，45(11)：1589-1599.

[6] 欧彦，蒲翔，周旭驰，等.路面结冰监测技术研究进展[J].公路，2013(4)：191-196.DOI：10.3969/j.issn.0451-0712.2013.04.045.
Ou Yan，Pu Xiang，Zhou Xuchi，et al.Review on icing detection techniques of pavement[J].Highway，2013(4)：191-196.

[7] Thornes J E.The prediction of ice formation on motorways in Britain[D].London：University College London，1984.

[8] Sass B H.A numerical model for prediction of road temperature and ice[J].Journal of Applied Meteorology，1992，31(12)：1499-1506.

[9] Shao J, Lister P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(8): 1352-1361.

[10] 张思涵，张建成，高万泉，等.保定地区道路结冰气象条件分析及预报预警研究[J].农业灾害研究，2022，12(5)：133-135. DOI：10.3969/j.issn.2095-3305.2022.05.044.
Zhang Sihan, Zhang Jiancheng, Gao Wanquan, et al. Study on meteorological condition analysis and prediction and early warning of road icing in Baoding area[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2022, 12(5): 133-135.

[11] 张曦，浩宇，梁佳，等.陕西省高速公路路面温度特征及预报模型[J].干旱气象，2019，37(6)：1028-1034. DOI：10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-06-1028.
Zhang Xi, Hao Yu, Liang Jia, et al. Characteristics of road surface temperature of Shaanxi expressway and its prediction model[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 1028-1034.

[12] 孙翠梅，马俊峰，孔启亮，等.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，2013，29(4)：84-88. DOI：10.3969/j.issn.1673-503X.2013.04.013.
Sun Cuimei, Ma Junfeng, Kong Qiliang, et al. A forecast method of road icing effect index classification in Zhenjiang, Jiangsu province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(4): 84-88.

[13] 白永清，陈城，何明琼.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，2016，44(2)：336-340. DOI：10.19517/j.1671-6345.2016.02.026.
Bai Yongqing, Chen Cheng, He Mingqiong. Warning model of risk degree for bridge/road surface icing of expressway based on Logistic regression[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(2): 336-340.

[14] 陈凯，徐国庆，熊焘，等.基于 C4.5 决策树算法的道路结冰预报模型构建与应用[J].交通运输研究，2018，4(1)：57-62. DOI：10.16503/j.cnki.2095-9931.2018.01.009.
Chen Kai, Xu Guoqing, Xiong Tao, et al. Construction and application of road icing forecast model based on C4.5 decision tree algorithm[J]. Transport Research, 2018, 4(1): 57-62.

[15] 史达伟，耿焕同，吉辰，等.基于 C4.5 决策树算法的道路结冰预报模型构建及应用[J].气象科学，2015，35(2)：204-209. DOI：10.3969/2014jms.0076.
Shi Dawei, Geng Huantong, Ji Chen, et al. Construction and application of road icing forecast model based on C4.5 decision tree algorithm[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2015, 35(2): 204-209.

[16] 杨鹏飞，孙先波.基于支持向量机算法的道路结冰预测模型研究[J].湖北民族大学学报(自然科学版)，2020，38(3)：355-360. DOI：10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.09.021.
Yang Pengfei, Sun Xianbo. Research on road icing prediction model based on support vector machine algorithm[J]. Journal of Hubei Minzu University(Natural Science), 2020, 38(3): 355-360.

[17] 崔党群.Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J].数理统计与管理，2005，24(1)：112-115. DOI：10.13860/j.cnki.sltj.2005.01.020.
Cui Dangqun. Analysis and making good fitting degree test for Logistic curve regression equation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2005, 24(1): 112-115.

[18] 胡园春，郜庆国，崔辰，等.基于 Logistic 回归方法的石榴裂果气象预测模型[J].中国农学通报，2020，36(1)：117-121. DOI：10.11924/j.issn.1000-6850.casb190320.
Hu Yuanchun, Tai Qingguo, Cui Chen, et al. Weather forecasting model of pomegranate fruit cracking: based on Logistic regression method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(1): 117-121.

[19] 徐晶，张国平，张芳华，等.基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J].气象，2007，33(12)：3-8. DOI：10.3969/j.issn.1000-0526.2007.12.001.
Xu Jing, Zhang Guoping, Zhang Fanghua, et al. Regional integrated meteorological forecasting and warning model for geological hazards based on Logistic regression[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(12): 3-8.

[20] 纪玲玲，王昌雨，张志华.Logistic 回归及其在概率降水预报中的应用[J].解放军理工大学学报(自然科学版)，2003，4(5)：92-94. DOI：10.3969/j.issn.1009-3443.2003.05.023.
Ji Lingling, Wang Changyu, Zhang Zhihua. Logistic regression and its application for probability forecast of precipitation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science), 2003, 4(5): 92-94.

[21] 虞慧，刘星根，吴晓彬，等.指标权重算法对 Fisher 最优分割在水库汛期分期中的影响研究[J].中国农村水利水电，2021(1)：105-110. DOI：10.3969/j.issn.1007-2284.2021.01.020.
Yu Hui, Liu Xinggen, Wu Xiaobin, et al. The influence of the weight of index algorithm on the fisher's optimal segmentation in the reservoir's flood season[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(1): 105-110.

(责任编辑　柴　键)