

韩晶,焦美玲,王娟,等. 庆阳市道路结冰特征及指数预报研究[J]. 陕西气象, 2025(2): 67-72.

文章编号: 1006-4354(2025)02-0067-06

庆阳市道路结冰特征及指数预报研究

韩晶,焦美玲,王娟,贺涛,徐耕

(庆阳市气象局,甘肃庆阳 745000)

摘要:利用庆阳市 8 个国家气象观测站 2008—2022 年冬季逐时气象观测资料,分析道路结冰时空分布特征;基于回归模型筛选出影响道路结冰的敏感气象因子,并结合道路结冰有效样本库计算影响指数,采用聚类分析法进行归类分级,建立道路结冰影响指数分级预报模型;并利用 2023 年气象观测资料进行检验。结果表明:道路结冰年际变化整体呈现波动下降趋势;月际分布中道路结冰出现日数和出现时间均为 1 月最多,2 月次之,12 月最少,冬季各月发生道路结冰时平均地面温度、平均气温及平均最低气温均 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,出现日数与平均气温的变化趋势呈反位相;道路结冰主要出现在夜间,白天出现概率较低;地域差异呈东南部偏多、西北部偏少的特征;雪或积雪条件下,日最低气温、日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 为道路结冰的主要特征;经检验评估,道路结冰影响指数分级预报模型具有较好的预报能力。

关键词:道路结冰;影响指数;分级预报;气象因子;庆阳市

中图分类号: P456.9

文献标识码: A

交通运输是国民经济的基础产业和重要服务行业^[1-2],而气象条件是影响交通运输安全的关键因素之一^[3],尤其是灾害性天气对道路交通的影响尤为突出^[4-5]。冬季出现雨雪降温天气后形成的道路结冰现象对交通运输会产生非常严重的影响^[6-7]。据统计,在所有的交通安全事故中,路面湿润时发生的事故是干燥路面的 2 倍,降雪时是干燥路面的 5 倍,结冰时是干燥路面的 10 倍^[8]。

庆阳市位于甘肃省东部,地形北高南低,山、川、塬兼有,沟、峁、梁相间^[9-10]。国道 211 线、省道 202 线两条主干线纵贯南北,国道 309 线、省道 303 线横穿东西,构成“两纵两横”公路主骨架^[11]。作为发展中城市,近年来城市化进程加快,交通需求不断增加,路网建设快速发展,车流量成倍增长^[12],各类不利气象条件对交通运输的影响日趋明显,尤其是道路结冰造成的交通事故占比较大^[13]。如何为交通部门提供实时、有效的天气预

报产品,开展更加适应交通需求的气象保障服务,是摆在专业气象服务人员面前的一个课题。加之我国对道路结冰及其灾害影响定量评价的研究较少,制约了道路结冰的科学研究和气象服务^[14-15]。因此,开展境内道路结冰预报技术研究及专业气象服务,建立庆阳市道路结冰影响指数分级预报模型,无论是对于开展道路结冰的科学监测,还是进行定量评估和预评估工作等都具有重要的意义,既可为开展庆阳市交通气象中高影响天气的精细化预报预警研究积累基础资料,也可为道路交通专业气象服务提供技术支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源

目前,庆阳市建有的 2 个交通气象观测站均位于庆阳市南部两个县,数据时效短,且未经过质量控制,不具有代表性。庆阳市 8 个国家气象观测站数据时间序列长,覆盖全市范围。故所选资

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 韩晶(1988—),女,汉族,甘肃宁县人,硕士,工程师,主要从事灾害性天气研究。

基金项目: 庆阳市科技计划项目(QY-STK-2022A-129);甘肃省气象局气象科研项目(ZcMs2022-33);庆阳市气象局气象科研项目(QY2023-3)

料为庆阳市七县一区 8 个国家气象观测站 2008—2023 年冬季(12 月—翌年 2 月)的日平均气温、日最低气温和地面温度,以及天气/降水性质(雨夹雪、雪、积雪)和积雪深度等逐日气象观测资料(20—20 时),资料来源于庆阳市气象局,依据中国气象局地面气象观测规范已进行了严格的质量控制。

1.2 研究方法

道路结冰是指雨、雪、冻雨或雾滴,降落到温度低于 0 °C 的地面而出现的积雪或结冰现象^[16-17]。因此将冬季下垫面观测的地面气温至少一个时次出现 ≤0 °C 的情况界定为出现了道路结冰^[14]。将 1 d 记为一个样本,1 h 记为一个时次^[18],2008—2022 年共筛选 289 个样本,1 226 个时次。本文对引起道路结冰的气象因子进行分析^[19-20],利用统计学中常用的相关性分析方法^[21],讨论降水性质、天气实况、地面温度、最低气温和平均气温与道路结冰的关系,建立庆阳市道路结冰影响指数分级预报模型。为了计算统一,样本数量按各县区综合平均作为庆阳市的代表值进行统计。

2 道路结冰气候特征

2.1 时间分布特征

2.1.1 年际分布特征 统计分析道路结冰日数的年际分布(图 1)。道路结冰日数年际变化整体呈波动下降趋势,特别是 2022 年,明显下降,为 15 a 最少,仅出现 16 d;而 2008 年道路结冰日数最多,出现 23 d。庆阳市道路结冰日数的变化趋势与降雪量或积雪日数变化规律基本一致。

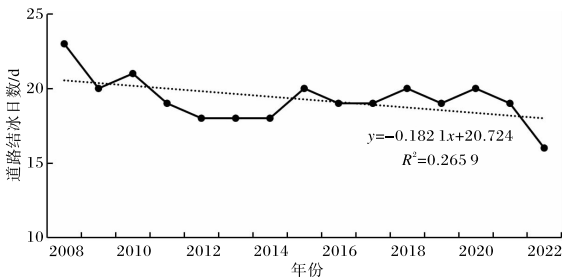


图 1 2008—2022 年庆阳市道路结冰日数年际变化

2.1.2 月际分布特征 基于庆阳市冬季道路结冰日数及对应气温情况,统计分析近 15 a 冬季道

路结冰月分布,1 月道路结冰出现日数最多(131 d,占 45.5%),其次为 2 月(92 d,占 31.8%),12 月最少(66 d,占 22.7%);道路结冰出现时次同样是 1 月最多(522 h,占 42.6%),2 月次之(403 h,占 32.8%),12 月最少(301 h,占 24.6%)。冬季各月发生道路结冰时平均地面温度、平均气温以及平均最低气温均在 0 °C 以下。对比分析冬季道路结冰日数与平均气温(图 2),道路结冰日数与平均气温的变化趋势呈反位相,即 1 月平均气温最低(-4.4 °C),出现道路结冰的日数最多(131 d),12 月、2 月平均气温较高,出现道路结冰的日数较少。

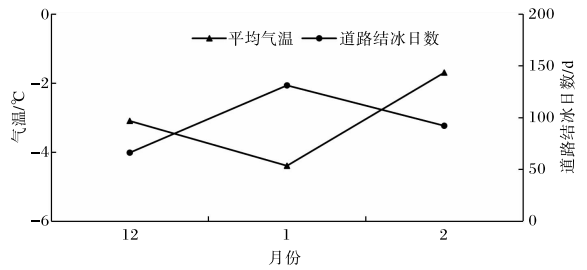


图 2 2008—2022 年庆阳市冬季平均气温与道路结冰日数对比

2.1.3 日分布特征 分析道路结冰的日变化,发现各时次道路结冰概率分布不均。如规定 09—20 时为白天,21—08 时为夜间,则发现道路结冰主要出现在夜间,占 67%,而白天概率较低,仅占 33%。其中,05—07 时道路结冰发生概率最多;之后随着气温的上升,出现概率明显下降,11—16 时概率最低;之后随着气温下降,出现概率随之明显上升。这与冬季日最低气温变化较为一致。当白天发生道路结冰时,当日其他时次也会发生比较严重的道路结冰,对交通的影响会更大。

2.2 空间分布特征

统计庆阳市七县一区多年平均道路结冰日数空间分布(图 3)可知,各县区道路结冰日数分布不均,存在一定地域差异。整体而言,道路结冰日数呈现东南部偏多、西北部偏少的特征,其中,南部的正宁县平均道路结冰日数最多(27 d),北部的环县平均道路结冰日数最少(15 d),两者相差 12 d。

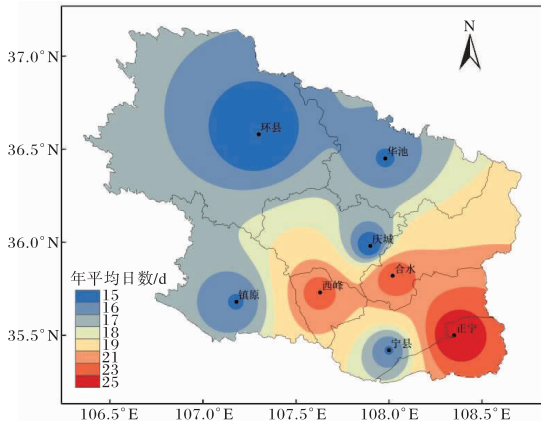


图3 2008—2022年庆阳市各县区道路结冰日数空间分布(审图号为GS(2023)2767号的标准地图制作,边界无修改)

2.3 道路结冰气温日分布特征

统计分析2008—2022年庆阳市冬季降雪或积雪天气条件下日最低气温和平均气温的气候特征,结果表明:日最低气温在 $-21.2\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(平均为 $-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$),日平均气温在 $-15.3\sim 6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(平均为 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$),日最低气温、日平均气温大多 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据降雪或积雪条件下冬季日最低气温在不同气温区间的分布(图4),日最低气温 $(-8, -6]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数最多,为22 d;其次分别是 $(-10, -8]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(-6, -4]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(-12, -10]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(-4, -2]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(-14, -12]\text{ }^{\circ}\text{C}$,日数分别为19、15、10、8、7 d。 $> -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq -14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数较少,分别仅为4、2 d。日最低气温和日平均气温相关系数为0.998 5,通过 $\alpha=0.001$ 显著性检验,表明日最低气温和日平均气温具有显著的相关性。因此,在构建道路结冰影响指数时只考虑日最低气温。

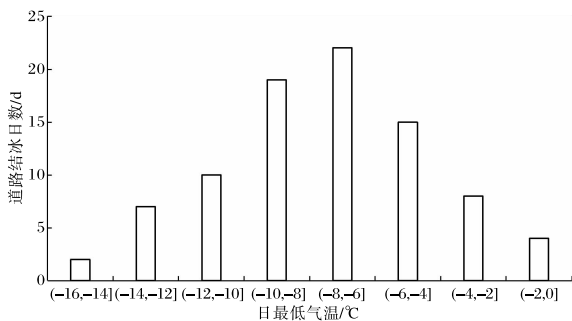


图4 2008—2022年庆阳市降雪或积雪条件下冬季日最低气温在不同区间的日数分布

3 道路结冰影响指数预报

3.1 道路结冰影响指数方程的建立

庆阳市冬季降水可分为雪、雨夹雪和雨三种相态,其中12月上旬和2月中下旬是相态转变较为频繁的时段。经统计,庆阳市15 a冬季289个降水样本中降雨仅8 d(2.8%),冬季发生降雨的占比很少,因此研究中不考虑降雨情况;而雨夹雪23 d(8.0%),发生雨夹雪时,气温随之降低,造成道路结冰现象,故分析道路结冰影响指数时将雨夹雪和雪的样本一并进行统计。

为了比较客观定量地反映降水的性质、积雪和日最低气温等对道路结冰的影响程度,根据道路结冰气候特征,结合降雪和积雪等相关资料来判断当日是否会产生道路结冰以及道路结冰对交通的影响程度^[22-23]。定义道路结冰影响指数为:

$$I=A+B+T_d \quad (1)$$

式中: A 为当日和前一日的降水情况, B 为当日积雪深度, T_d 为当日最低气温。其中,当日和前一日的统计时段为20—20时。道路结冰影响指数各参数赋值见表1。

表1 庆阳市道路结冰影响指数参数赋值

参数	条件	赋值
降水情况(A)	当日或前一日均无降水	$A=0$
	当日出现降雪	$A=2$
积雪深度(B)	无积雪	$B=0$
	$0\text{ cm} < B \leq 2\text{ cm}$	$B=2$
	$2\text{ cm} < B \leq 4\text{ cm}$	$B=4$
	$B > 4\text{ cm}$	$B=6$
日最低气温(T_d)	$T_d \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,	$T_d=0$
	$-5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_d < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_d=1$
	$-10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_d < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_d=2$
	$-15\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_d < -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_d=3$
	$-20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_d < -15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_d=4$
	$T_d < -20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_d=5$

3.2 道路结冰影响指数预报模型的建立

根据道路结冰影响指数方程,计算得出了2008—2022年庆阳市冬季地面温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所有有效样本的道路结冰影响指数值 I (剔除无效数

据)。由图 5 可见,道路结冰影响指数 I 分布不均,呈现明显的单峰分布,主要出现在 5~10 区间,指数值为 0~4、11~13 时出现日数明显较少。

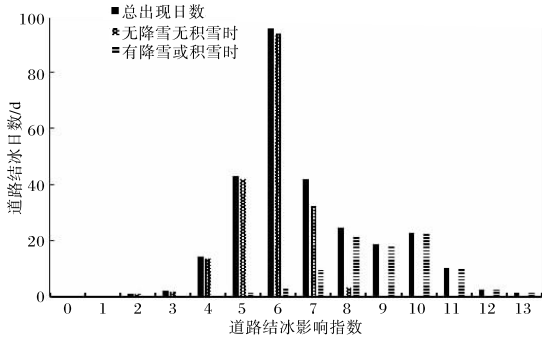


图5 2008—2022年冬季庆阳市道路结冰日数随道路结冰影响指数的分布

为了给道路结冰预报提供有效预警,将有效样本分为无降雪或无积雪、有降雪或积雪两种情况计算道路结冰影响指数 I ,并结合日最低气温统计分析得到以下结果。

(1) 无降雪无积雪

188 个样本的道路结冰影响指数 I 均在 9 以下。① I 为 0~3 共计 3 d,气温相对较高一些,最低气温 $-6.6\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。② I 为 4~7 共计 182 d, I 在 4~7 的样本权重较大,占无降雪无积雪样本总数的 96.8%, I 为 6 的样本最多,有 94 d;最低气温 $-16.3\sim 5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。③ I 为 8 和 9 共计 3 d,气温较低,最低气温均 $\leq -12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中最低为 $-20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

这种情况下,虽然气温很低,地面温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续时间较长,但因没有降水,无法形成大面积的道路结冰,仅仅由于人类活动等其他非自然因素

在部分地区可能形成结冰,对交通基本没有影响,或仅有轻微影响。

(2) 当日或者前一日出现了降雪天气或当日观测有积雪

90 个样本 I 分布在 3~13 之间。① I 为 3~6 共计 4 d,占 3.3%。其中,有 2 d 仅出现了降雪(降雪量 $0.1\sim 0.8\text{ mm}$),2 d 仅出现了少量积雪(积雪深度 $0.1\sim 0.4\text{ cm}$),且气温相对较高,最低气温 $-9.6\sim 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,不会出现对交通有影响的道路结冰或仅有轻微影响,且因下垫面温度相对较高,即使有结冰也易于融化。② I 为 7~11 多达 82 d,占 91.1%。其中,仅有降雪有 13 d,降雪量 $0.1\sim 10.7\text{ mm}$,平均最低气温 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $7\leq I\leq 8$ 。这种情况即使出现一定的道路结冰,但由于气温和下垫面温度不太低,结冰易于融化,对交通的影响不大,或有轻微影响。仅有积雪有 38 d,积雪深度 $0.1\sim 3.8\text{ cm}$,平均最低气温 $-5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度相对较低, $8<I<10$ 。这种情况往往是降雪过后因温度较低导致积雪持续存在,对交通有中度影响。既有降雪又有积雪的情况有 31 d,降雪量 $0.1\sim 8.9\text{ mm}$,积雪深度 $0.1\sim 1.9\text{ cm}$,平均最低气温 $-11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度较低, $10\leq I\leq 11$ 。这种情况下对交通有重度影响。③ I 为 12~13 仅有 4 d。其中,有 3 d 既出现了降雪又出现了积雪,基本全天道路均被结冰所覆盖,降雪量 $0.1\sim 3.3\text{ mm}$,积雪深度 $0.1\sim 4.6\text{ cm}$,平均最低气温 $-12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度低,这种情况下对交通有严重影响。

分析道路结冰影响指数对交通影响,同时参照中国气象局道路结冰警报和预警信号的规定,建立道路结冰影响指数 I 分级预报模型(表 2)。

表 2 庆阳市道路结冰影响指数 (I) 分级标准

级别	I 取值范围	影响程度
1	$I\leq 6$	未来 24 h 无对交通有影响的道路结冰
2	$7\leq I\leq 8$ (仅出现降雪)	未来 12 h 出现对交通有轻度影响的道路结冰
3	$9\leq I\leq 10$ (仅出现积雪)	未来 12 h 出现对交通有中度影响的道路结冰
4	$10\leq I\leq 11$ (出现降雪和积雪)	未来 12 h 出现对交通有重度影响的道路结冰
5	$I\geq 12$	未来 6 h 出现对交通有严重影响的道路结冰

3.3 道路结冰影响指数实况检验

为了检验道路结冰影响指数的预报效果,根据发生道路结冰条件,筛选出了2022年12月—2023年2月、2023年12月—2024年2月41个样本,计算道路结冰影响指数,并基于路结冰影响指数模型进行预报。根据道路结冰分级预报检验结果(表3),对交通有影响(2级及以上)的道路结冰等级预报准确率不低于80%。可见道路结冰影响指数分级预报模型对交通有影响的道路结冰预报效果较好,对交通无影响(1级)的道路结冰预报效果相对差一些,略低于80%。

表3 庆阳市冬季道路结冰影响指数分级预报检验结果

等级	预报天数/d	实况天数/d	准确率/%
1	22	17	77.3
2	5	4	80.0
3	5	4	80.0
4	9	8	88.9

4 结论与讨论

(1)庆阳市道路结冰年际变化整体呈现波动下降趋势;月际分布中出现日数和出现时次均为1月最多、2月次之、12月最少,冬季各月发生道路结冰时平均地面温度、平均气温及平均最低气温均 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,出现日数与平均气温的变化趋势呈反位相;日分布中发生的时次主要出现在夜间,白天概率较低,早晨05—07时发生概率最高,11—16时概率最低;地域差异呈东南部偏多、西北部偏少特征。

(2)结合降雪的性质、是否有积雪、地面温度等气象条件,构建的道路结冰影响指数分级预报模型,利用该分级指数对道路结冰实况进行检验和评估,其对交通有影响的道路结冰具有较好的预报能力。

(3)随着气象预报能力的不断发展,交通气象站的建设和观测数据积累,降雪天气精准预报服务能力亦迅速提升,在后续研究中将持续优化道路结冰影响指数。

参考文献:

- [1] 周正祥,刘海双. 湖南省综合交通运输体系优化策略[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版),2018,33(5):79-87.
- [2] 方留杨,胡澄宇,丁宇超,等. 交通气象融合现状与发展趋势[J]. 中国公路,2022(24):30-35.
- [3] 张静,黄胜,保广裕,等. 青海省东部地区交通气象灾害风险普查分析[J]. 青海环境,2016,26(4):185-189.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 尚媛媛,夏晓玲,廖波. 精细化预报对贵州高速公路运输的影响[J]. 科技创新导报,2017,14(34):197-199.
- [7] 朱保林,彭艳秋,黎成超,等. 云南省高速公路气象灾害风险特征分析与应对[J]. 公路,2021,66(3):231-236.
- [8] 田华,张楠,张楷翊,等. 国外公路交通气象研究进展[J]. 气象与环境学报,2019,35(3):79-86.
- [9] 韩晶,路亚奇,曹彦超,等. 基于空间检验技术的甘肃河东地区短时暴雨预报产品误差分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2023,17(7):83-89.
- [10] 韩晶,焦美玲,曹彦超. 陇东地区气象灾害灾情演变及灾害损失评估[J]. 湖北农业科学,2022,61(13):12-17.
- [11] 张春晖. 甘肃省交通网络演化与区域经济联系的适应性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.
- [12] 于文斌. 城市群公共交通全链可达性与公平性测算方法和评价研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [13] 龚鹏飞. 恶劣天气条件下城市道路交通应急处置[J]. 安全与环境工程,2014,21(1):142-147.
- [14] 朱明辉,廖春花,郭海峰,等. 长沙道路结冰影响指数及分级预报方法[J]. 湖南交通科技,2018,44(3):216-220.
- [15] 许秀红,矫玲玲,王庆余,等. 近10年黑龙江省道路结冰的发展趋势及其与温度的关系[J]. 安徽农业科学,2009,37(5):2123-2125.
- [16] 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.

- [17] 须民健, 习燕, 廖强, 等. 多数据源融合的高速公路气象识别方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(3): 78-82.
- [18] 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.
- [19] 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[J]. 大气科学学报, 2013, 36(5): 546-553.
- [20] 格桑卓玛. 日喀则市道路结冰特征及其天气环流概念模型[J]. 西藏科技, 2023, 45(10): 35-42.
- [21] 王云鹏, 丑伟. 区域气象要素对道路交通安全的影响分析[J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(5): 175-176.
- [22] 刘佳茹, 保广裕, 张静, 等. 基于逻辑回归的京藏高速民和至西宁段冬季路面结冰模型研究[J]. 青海环境, 2023, 33(1): 34-38.
- [23] 刘书慧, 卢德全, 李梦. 浅丘地带主要气象灾害特征及风险分析: 以绵西高速公路为例[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(4): 31-35.