

陈鲜艳,张颖娴,高歌,等,2025. 我国交通气象灾害预警、风险评估与应急处理智能服务发展概述[J]. 气象,51(11):1523-1534. Chen X Y, Zhang Y X, Gao G, et al, 2025. Overview of intelligent service development in the integrated transportation meteorological disaster early warning, risk assessment and emergency response in China[J]. Meteor Mon, 51(11):1523-1534(in Chinese).

我国交通气象灾害预警、风险评估与应急处理 智能服务发展概述^{*}

陈鲜艳¹ 张颖娴¹ 高 歌¹ 梅 梅¹ 张 方² 宋亚芳¹ 孙小婷¹ 丁一汇¹

¹ 国家气候中心, 北京 100081

² 郑州市气象局, 郑州 450003

提 要: 一体化交通气象灾害预警、风险评估与应急处理智能服务系统工程的发展,是指通过整合先进的信息技术和气象、交通、应急管理等领域的数据资源,建立起一套智能化的服务体系,以应对交通中可能发生的各种气象灾害及其他紧急情况。本文围绕我国交通气象灾害预警、风险评估与应急处理智能服务的研究与实践进展展开系统梳理,分析了当前公路、铁路及水上航运等领域在交通气象灾害预警模型、风险评估方法和应急处理智能服务的科学研究和业务应用的发展进程,同时指出目前存在的核心问题,提出相关的对策和建议,旨在为提升我国一体化交通气象系统工程的发展提供支持。

关键词: 一体化交通气象系统工程, 气象灾害预警, 风险评估, 应急处理, 智能服务

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.110101

Overview of Intelligent Service Development in the Integrated Transportation Meteorological Disaster Early Warning, Risk Assessment and Emergency Response in China

CHEN Xianyan¹ ZHANG Yingxian¹ GAO Ge¹ MEI Mei¹ ZHANG Fang²

SONG Yafang¹ SUN Xiaoting¹ DING Yihui¹

¹ National Climate Centre, Beijing 100081

² Zhengzhou Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003

Abstract: The development of the integrated intelligent service system project for transportation meteorological disaster early warning, risk assessment, and emergency response refers to the establishment of an intelligent service system by integrating advanced information technologies and data resources from meteorology, transportation, emergency management and other related fields so as to respond to various potential meteorological disasters and other emergency situations in transportation. This paper systematically integrates the research and practical progress of China's intelligent service systems for transportation meteorological disaster early warning, risk assessment, and emergency response, and analyzes the development process of scientific research and operational applications in the aspects of transportation meteorological disaster early warning models, risk assessment methods, and emergency response intelligent services in

^{*} 国家重点研发计划(2023YFC3206001)、中国工程院咨询项目(2023-XY-22-04)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J071)和国家气候中心创新团队及技术研究项目(NCCCXTD002, SK2025028)共同资助

2025 年 9 月 16 日收稿; 2025 年 10 月 30 日收修定稿

第一作者: 陈鲜艳, 主要从事极端事件监测和气候影响评估研究. E-mail: chenxy@cma.gov.cn

通讯作者: 丁一汇, 主要从事天气、气候和数值天气预报研究. E-mail: dingyh@cma.gov.cn

the current fields of highway, railway, and waterway transportation. At the same time, this paper examines the existing core problems and puts forward relevant countermeasures and suggestions, which could serve as a support for promoting the development of China's integrated transportation meteorological system project.

Key words: integrated transportation meteorological system project, meteorological disaster warning, risk assessment, emergency response, intelligent service

引 言

随着社会经济的快速发展,我国陆、水、空交通运输能力与运行效率显著提升,气象条件及其引发的自然灾害对交通系统的影响也日益凸显。据相关研究统计,我国约有 30% 的交通事故发生在恶劣天气条件下(李长城等,2012;张晓美等,2019)。影响交通的主要气象灾害类型多样,包括暴雨及其引发的洪水与地质灾害、大雾、积雪、大风、路面结冰、高温、沙尘、强对流天气、凌汛以及干旱等。研究表明,在各类气象灾害中,对我国交通构成较高风险的主要类型依次为:强降雨(32.8%)、大雾(21.7%)、路面结冰(16.4%)、公路积雪(11.1%)以及团雾(4.6%)。这些灾害的致灾因子主要可归纳为降雨、能见度(雾或霾)、降雪、气温和风速五大类,共占致灾因子总量的 86.3%(张晓美等,2019)。

我国每年因浓雾、结冰、强降雨等气象灾害及其引发的山洪、泥石流等次生灾害导致的道路交通事故、交通阻断以及重要交通设施损毁事件时有发生,给人民生命财产安全和经济社会发展带来严重影响。据统计,我国高速公路因恶劣天气阻断事件年均达 2 万多起,阻断里程 100 多万千米,整体损失年均约 440 亿元(交通运输部路政局和交通运输部路网监测与应急处置中心,2021)。受全球气候变暖影响,近年来我国极端天气呈多发重发趋势,进一步加重了恶劣天气对交通安全畅通运行的不利影响(马飞等,2024)。天气原因所造成航运每年都有人员伤亡及财产损失,如 2015 年 6 月 1 日的“东方之星”号客轮因强对流天气翻沉事件造成 442 人死亡(郑永光等,2016;王凯等,2020)。

现代交通运输体系所追求的快速、高效和安全,在很大程度上会受到气象因素的影响和制约。我国已初步建成覆盖主要公路干道的交通气象信息服务系统,但感知设备在覆盖密度和区域分布上仍有待

完善。截至 2022 年底,全国平均每 54.3 km 有一套标准交通气象前端感知设备,且东中西部地区分布极不均衡,如东部的安徽平均每 4 km 就有 1 套,而受低温雨雪天气影响较大的地区,如东北地区平均 246 km 1 套,西南地区平均 139 km 1 套,设备密度低,气象感知能力明显不足。由于区域天气气候条件的差异和社会经济条件的差异,虽建立了一些针对性交通气象服务系统,如高速公路路段雾区智能监控与诱导系统等,但在条件受限的地区,对恶劣天气频次高、影响大,或经排查评估存在风险的路段,信息采集感知能力和监测服务平台功能仍相对薄弱。此外,随着公众出行理念的改变,自驾出行已成为跨区域流动的主要选择。2023 年中秋国庆假期全国高速公路累计流量突破 4.83 亿辆次,累计跨省出行人员(含普通公路)超 17 亿人次,占全社会跨区域流动量的 80%,公路疏堵保畅压力很大。一旦出现浓雾、强降雨(雪)等高影响天气,将对交通安全与运行效率造成严重影响。

为提升社会整体防灾减灾能力,运用科技手段发展一体化交通气象灾害预警、风险评估与应急处理智能服务系统工程,已成为保障交通安全、强化应急管理的关键举措。当前,我国在单一气象灾害的风险预警与评估方面已积累一定研究基础并实现业务化应用,例如道路低温结冰风险预警模型、轨道交通大风风险预警平台、公路损毁概率预报等(黄佳威等,2024;狄靖月等,2015)。然而,从整体来看,我国在气象信息与交通路段融合的精准预报预警技术方面仍显不足,对气象条件影响交通的精细化评估能力有待加强,尚未形成完善的、以风险影响为导向的一体化智能交通服务体系。本文重点梳理了我国在公路交通、铁路交通、水上航运交通的气象灾害预警、风险评估及一体化智能服务等方面的科研进展与业务实践,剖析当前存在的关键问题,并据此提出具体对策与建议,以期为推动我国一体化交通气象智能服务系统的发展提供参考与支撑。

1 交通气象灾害预警进展

1.1 面向交通气象灾害预报预警研究进展

1.1.1 公路交通预报预警

开展公路交通气象的监测预报预警和服务工作,提升公路交通气象的实时监测、专业模式、预报预警业务支撑水平,是实现交通运输安全、畅通和高效的重要保障之一。我国自 2005 年起启动国家级公路交通气象业务,中国气象局与交通运输部每日联合发布《全国主要公路气象预报》,为公众出行提供科学指引;并在重大活动、节假日及高影响天气过程中开展专项保障服务。2012 年以来,全国公路交通气象监测站网逐步完善,初步实现公路沿线气象信息共享。

在灾害机理研究方面,杨辰等(2023)基于上海市灾情数据分析指出,暴雨灾害主要出现在暴雨至大暴雨区间,对房屋、道路、车辆及居民区造成影响;大风灾害则集中在 $10.8 \sim 17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6~7 级风) 和 $17.2 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8~9 级风) 区间,主要影响对象为车辆、道路、树木和构筑物。蒋丹阳(2022)构建了高速公路降雨灾害风险评估模型,结合敏感性、暴露度与防灾能力等因素,确定了不同等级降雨过程的危险性阈值和综合风险阈值。此外,预警阈值研究从单一气象要素逐渐向多要素耦合方向深化。例如,针对高速公路,牛苗苗等(2025)通过融合气象监测与交通数据,构建了基于能见度、路面状态和降水强度的多参数预警指标体系。杨辰等(2023)的研究通过构建气象致灾知识图谱,实现了对阈值指标的动态优化和场景适配。

在业务系统建设方面,中国气象局公共气象服务中心在数据融合、空间分析、道路反演和专业预报等方面取得多项进展,研发建立了集气象与路况信息于一体的“智慧交通气象服务系统平台”,为行业管理机构 and 大型企业提供一站式服务。各省级气象部门也积极发展本地化交通气象服务技术,研发符合区域特点的服务产品。

随着公路交通气象服务体系的不断完善,我国气象与交通部门持续推进相关标准研制工作,围绕高影响天气预警与服务等方面,陆续制定并发布多

项国家标准,为行业规范发展提供了重要支撑。

1.1.2 铁路交通预报预警

为保障交通安全运行,铁路部门制定了《铁路技术管理规程》规定灾害天气行车条件和措施,作为铁路气象灾害预警、应急响应的依据,如高铁主要采用瞬时风速进行大风报警,具有时空精细化程度高的特点,能很好地反映沿线大风对高铁运行的可能影响及危害,可选择不同等级大风报警次数、持续时间作为大风危险性指标。

中国气象局(2016)发布《高速铁路运行高影响天气条件等级》标准,明确了影响高铁运行的雷电、大风、降雨、降雪(积雪)、低能见度、低温、冻雨、冰雹等天气条件的等级划分与应用规范。除现有标准外,铁路与气象部门还通过数值模拟、仿真试验等手段,持续推进致灾气象条件的精细化研究,推动相关标准的制定与完善,以提升监测预警与风险评估能力。例如,铁路系统已开展风向对高速动车组运行安全影响的研究,并推动大风报警综合评判方法的优化,进一步增强了对复杂气象风险的识别与应对能力。

1.1.3 航运交通预报预警

航运气象系统建设对航运安全至关重要,为提升航行安全保障能力,我国持续开展高影响天气预警阈值指标的研制工作。以长江航道为例,其天气通航等级标准中的“一定风险”等级依据《长江干线水上交通安全管理特别规定》中的最低标准设定,其余等级则结合气象预警发布机制与长江封航相关规定进行对应设定。

在实际的航运调度与船舶航行中,可根据不同类型船舶的稳性、抗风等级等特性,结合航道具体天气、水情条件以及货物种类、航行方向(上行/下行)等因素进行针对性调整(表 1)(田刚等,2020),从而形成更为精细化和适应性的航运气象安全管控体系。

1.2 气象数值预报和人工智能技术在交通气象灾害预报预警中的应用

1.2.1 公路交通应用

在公路智能化应用领域,路侧感知体系的完善与跨部门协同联动机制的建立,以及省级视频人工智能团雾识别,为应对恶劣气象条件下的行车安全

表 1 长江航道天气通航等级划分规则(田刚等,2020)

Table 1 Classification rules for weather-related navigation grades of the Yangtze River waterway (cited from Tian et al, 2020)

	适宜	有一定风险	风险较高	风险高	风险很高
能见度/km	>2.0	1.5~2.0	1.0~1.5	0.5~1.0	<0.5
极大风速/(m·s ⁻¹)	<8.0	8.0~10.7	10.8~13.8	13.9~17.1	>17.2
降雨量/mm	<50.0/12 h*	>50.0/12 h*	>50.0/6 h*	>50.0/3 h*	>100.0/3 h*
降雪量/mm	<4.0/12 h*	4.0/12 h*~6.0/12 h*	>6.0/12 h*	10.0/6 h*~15.0/6 h*	>15.0/6 h*
小时降雨量/mm			10.0~20.0	20.0~50.0	>50.0
冰雹直径/mm			<10.0	10.0~20.0	>20.0
最高温度/℃	<28.0	28.0~30.0	30.0~35.0	>35.0	

注: * 表示在某一时间段,如<50.0/12 h 表示在 12 h 中降雨量小于 50.0 mm。

奠定了坚实基础。我国已建立起国家级的公路交通气象精细化监测预报业务体系。该体系综合运用物理机理分析、机器学习及多源数据耦合释用等技术,融合了全国主要公路沿线的气象站网观测、智能化实况网格、FY-4 卫星遥感等实况资料,以及多模式数值预报产品,实现了对公路沿线气温、降水、风速、能见度、天气现象、相对湿度、路面温度、路面状态等关键要素的逐小时实况监测与预报,并可动态评估道路通行气象条件。中国气象局公共气象服务中心基于专业站网实时观测、智能网格实况、FY-4 卫星数据及智能格点预报产品,利用统计分析、物理机理建模与机器学习算法,构建了覆盖全国街道级路段的客观预报模型。该模型可提供降水、大风、低能见度、路面湿滑、团雾、公路地质灾害及通行气象条件等多项预报服务,时效涵盖 3 小时、24 小时、旬、月、季等多个尺度,平均预报准确率达到 80%。各省级气象部门在此基础上,持续推进相关预报产品的本地化解释应用与订正工作。此外,气象预报在公路交通领域的应用不断深化,已拓展至路面温度精准预报、公路漫水阻断事件风险预报模型等关键场景(杜建华等,2020a;2020b)。

人工智能与机器学习技术在交通气象的应用,当前以能见度监测识别和预警为主要方向。部分研究构建了基于双向长短期记忆网络(BiLSTM)和一维卷积神经网络-门控循环单元(1-D CNN-GRU)的能见度预测模型。在业务应用层面,江苏省气象局与江苏交通控股有限公司联合开展大雾图像识别技术与试点,搭建高速公路团雾预警系统,依托全省高速公路 7000 余路监控视频资源,运用卷积神经网络与深度学习技术,构建了适用于昼夜不同场景的雾识别模型。该模型通过对不同类型、不同拍摄角度及不同能见度等级的 568 万张道路场景图像进行训练与分析,实现对团雾现象的全天候、无死角自

动识别,以及对能见度等级的精准判别,系统在检测到团雾后,能够实时自动推送预警信息,提升道路交通气象服务的智能化水平和应急响应效率。江苏“智慧交通气象 2.0”积极推进大数据、人工智能等技术在精细化预报、雾情冰情预警等方面的研究应用,探索实践团雾监测、结冰预警等关键技术,支撑江苏高速恶劣天气管制及道路应急安全管理。交通运输部 2023 年试点项目“杭绍甬智慧高速”成果,通过 5G+北斗高精度定位,将 500 m 分辨率气象风险网格实时映射到车端自动驾驶决策单元,实现 L4 级卡车车队在团雾区 80 km·h⁻¹匀速通行。

1.2.2 铁路交通应用

气象数值预报技术目前在铁路交通防洪领域已实现有效应用。中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司开发的铁路精准防洪系统可有效改善传统 24 小时天气预报在铁路防洪预警中存在的时效滞后与精度不足等问题,实现对铁路沿线雨情、水情的精准识别与灾害风险预警,从而提升铁路防洪的技术水平与管理效率。该系统基于雷达回波高精度短时临近外推算法及回波-降水映射模型,构建精细化短时临近预报分析能力,为铁路线路及设施提供高精度、针对性的气象短时临近预报服务,包括区域短时临近降水预报、自定义线路位置预报、累计降雨量预报及风力强度预报等。在 2021 年 8 月 16 日新疆某线路区间的水害预警中,系统提前发出短时临近降雨预警。该次强降雨过程最大小时雨量达 17.0 mm,导致铁路一侧砂质山体发生冲刷溜塌,因汇水面积较大进而形成泥石流侵入线路。由于系统及时预警,相关部门提前安排巡查并实施封锁措施,有效避免了险情发生,保障了铁路运行安全。

1.2.3 航运交通应用

优质的气象导航服务可以保证远洋航行船舶的

安全和经济效益。通过科学运用气象导航,船舶能够充分利用航区内的有利水文气象条件(如季风与洋流),规划出最优航线,在保障安全的同时实现经济性目标。航行安全作为船舶航行的根本前提,在采用气象导航后,船舶可有效规避顶风顶浪等不利条件,降低重大海上事故风险,提升整体航行安全水平。除了确保航行安全外,气象导航的经济效益主要体现在以下几个方面:减少航行时间,节省燃料消耗,缩短航行距离,按时到达,减少船体浪损和货损率。2022年,中国气象局统筹发展远洋气象导航业务。2023年中国气象局气象导航中心成立,组建“航海+气象”的气象导航服务团队,有效提升海上气象防灾减灾能力,为船舶航行筑起坚实安全防线。2023年针对极地气候打造的中远海运“天恩号”货轮避开极地爆发性气旋,实测节油8.6%。2024年7月,国信中船(青岛)海洋科技有限公司的养殖船“国信1号”黄海航运线上可能遭遇台风“格美”带来的猛烈风雨,远洋气象导航提供绕航路线建议,船舶成功避开了风雨影响较强的区域,航程风浪高度始终控制在安全范围内,安全且准时抵达目标港口。

除远洋导航外,气象预报在内河航道保障中也发挥着重要作用。由中国气象局、长江流域气象中心、沿江各省气象部门,以及长江海事局、长江航务管理局等共同合作建设的长江黄金水道气象保障服务系统,以长江航道天气监测预报预警产品共享平台为载体提供服务,不仅提供实况监测,还基于全国智能网格预报产品,通过格点筛选与双线性距离反比插值方法,将气象要素精准匹配至航道点,并结合阈值判断生成通航等级产品,融合多种风险信息,实现全时段、全航段覆盖的通航等级服务,支持船舶调度与特定航程的气象风险研判。为适应不同船舶的抗灾能力差异,系统还具备气象要素阈值交互调整功能,使用户能够根据实际需求设定气象避灾的启动阈值,动态调整天气通航等级,提升内河航运的气象保障精细化水平。

2 交通气象灾害风险评估进展

2.1 公路交通气象灾害风险评估

为有效减轻气象灾害对公路交通的影响,我国

自2005年起由中国气象局与交通运输部联合推动公路交通气象预报预警服务体系建设,在高影响天气监测、风险评估、预警预报、观测技术、信息共享标准及应急减灾等领域取得显著进展。

在规划阶段,通过开展高速公路工程气候可行性论证,系统分析影响工程建设与运营安全的关键气象要素,包括气温与降水条件、低能见度、路面湿滑、大风、路表温度变化等致灾因子,以及高温下车辙发展、风雨对沿线设施的影响等,为工程防灾设计、气象风险规避及全周期运营管理提供科学依据。

在风险普查与区划方面,2013—2015年中国气象局组织全国31个省(自治区、直辖市)(不含港澳台)开展公路交通气象灾害风险普查,绘制全国主要气象灾害风险区划图,为公路交通气象观测站选址设计和公路交通气象影响预报、风险预警研发都起到了很好的基础性作用。2019年以来开展的全国自然灾害风险普查工作也为公路交通气象灾害风险评估和区划奠定了基础。

近年来,针对强降雨、低能见度(大雾)、冰冻雨雪、大风等主要公路气象灾害,风险评估研究方法研究不断深入。潘进军等(2019)系统梳理了灾害风险指标体系、评估方法与区划成果,并介绍了相关业务系统。柳艳香等(2017)总结了高速公路气象灾害风险评估的常用方法,其基本思路基于灾害系统理论,综合致灾因子危险性、承灾体暴露性、脆弱性及防灾减灾能力,构建综合风险评估模型。李嵩恂等(2018)的研究揭示了我国公路低能见度灾害风险呈现东部及新疆部分区域高、中西部大部较低的空间分布特征。另外,针对不同区域路段的风险评估区划也取得了较大进展(杜建华等,2020a;2020b;杨忠恩等,2017;武万里等,2021;王春玲等,2018)。

2.2 铁路交通气象灾害风险评估

在铁路灾害风险研究领域,自20世纪90年代末有学者系统提出了涵盖风险识别、风险管理及灾害损失评估的理论方法,初步构建了以承灾体、易损性与风险度为核心的铁路灾害研究框架。中国气象局公共气象服务中心系统开展了全国铁路交通风、雨、冰雪等气象灾害风险区划工作,并在华北、东北及南方等重点区域推进了针对性区划研究。例如,华北地区聚焦于暴雨、大风、大雾、降雪与雷电灾害,

东北地区则重点评估降雨、降雪及大雾的影响。

随着高速铁路的快速发展,相关风险评估研究不断深入。王志等(2012)基于极大风速数据,结合地市级人口与经济指标,运用 GIS 技术与自然灾害风险指数方法,构建了以地市为单元的高铁大风风险区划图。马淑红和马韞娟(2013)采用三级区划指标体系,依据等概率分区原则,将我国高铁沿线风灾危险划分为五个大区。崔新强等(2018)则综合运用层次分析法、专家打分法与加权综合评价法,构建了包含危险性、敏感性、易损性与防灾减灾能力四类因子的暴雨灾害风险指数模型,对沪汉蓉高铁线路进行风险评估。

在区域性研究中,刘艳等(2016)建立了涵盖大风、沙尘、积雪与暴雨型洪水的新疆铁路气象灾害风险评估模型;代娟等(2016)则从灾害影响机理出发,构建了多灾种铁路风险区划方案。任丽媛等(2024)分析了天津高铁沿线风致轻漂浮物入侵灾害气象风险。近年来,研究进一步向标准化与精细化方向发展。李莹等(2021)基于行业标准中降雨影响运行指标,分析了中国高铁暴雨危险性特征;Sun et al (2022)则依据行业标准与铁路规程,构建了风、雨、雪致灾危险性指标体系,采用矩阵法完成全国高铁

沿线多灾种危险性等级划分与空间制图(图 1)。朱可欣等(2025)分析了川藏铁路不同站点的闪电活动差异及长期变化趋势。舒斯等(2019)利用多年的气温和路面温度资料建立了湖北省高速公路道路结冰预警模型。

2.3 航运交通气象灾害风险评估

目前,各大水运通道普遍存在气象灾害风险隐患“底数”不清,迫切需要掌握内河航运高影响天气风险隐患点、高风险航段以及相应的气象灾害分布特征,开展航运气象灾害风险评估,可有效助力水上交通安全防控、应急处理和救援保障。

在气象要素与航运安全关系方面,程宏林等(1996)对江苏内河航运事故与气象条件的研究表明,大风和降水是导致事故发生的主要天气类型,其中大风的影响频次和危害程度尤为突出。廖春花等(2018)在分析湖南省水上交通事故特征时指出,强风、低能见度和强降雨对航运安全影响显著,在 1000~4000 m 的轻雾天气更容易出事故,在 6~7 级风时事故发生概率最高,且风险随降雨强度增大而上升。

在海上航运方面,孙贞和徐晓亮(2019)结合青

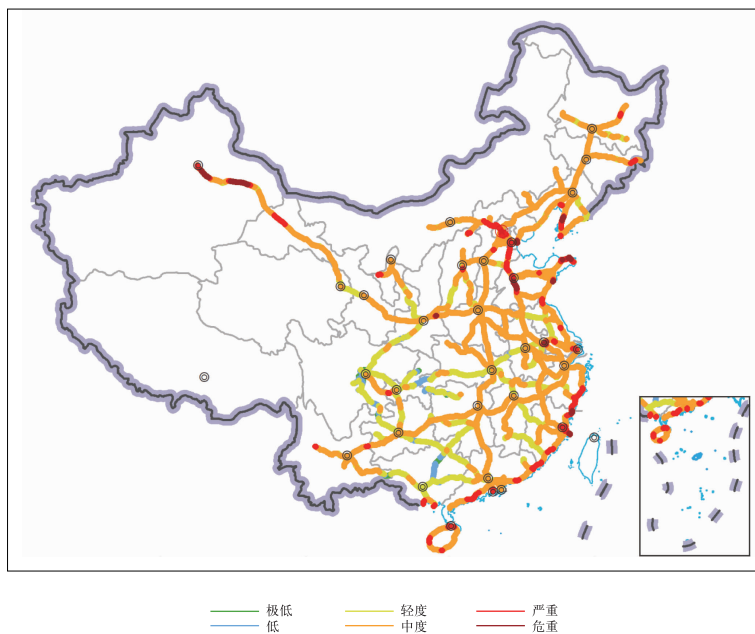


图 1 中国主要高铁沿线大风灾害风险评估示意图

Fig. 1 Sketch map of wind disaster risk assessment along major high-speed railway lines in China

岛港航区交通管制记录与近海气象数据,分析了能见度、风等关键因子的影响,并依据海事安全管理规范构建了航区交通气象风险等级指标。黄燕波等(2022)针对广西北部湾港口,制定了基于能见度、风力与雷电活动的高影响天气等级划分标准,为风险评估提供依据。2022年,宁波研发的航运气象指数体系,综合大风、能见度、降水强度等因子,构建阶梯式评价模型,实现了对未来7天主要航线气象安全影响的综合预测,为船舶航行提供了系统性气象风险参考。

尽管航运气象灾害风险评估研究尚处于起步阶段,但已逐步受到相关部门重视。熊红梅等(2021)提出应针对山区、平原、丘陵等特征航段,确立不同灾种的预警等级指标,并开展基于GIS的水运通道气象灾害风险区划,为航道规划、观测站点优化提供科学依据。目前,由于气象观测资料以陆地为主,难以准确反映水面实际状况,对团雾、大风及强对流天气的时空特征把握仍存在局限,相关天气形成机理也需进一步深化研究。

3 交通气象应急处理智能服务进展

3.1 公路恶劣天气交通应急处理智能技术

对突发性恶劣天气的及时识别与有效防范,一直是道路交通安全管理的难点和痛点,也是全球范围内普遍面临的技术难题。我国气象部门依托公安、交通运输部门共享的交通管理和公路基础设施信息,分析研判路段浓雾和道路结冰灾害风险等级,绘制交通气象灾害风险地图,提出重点风险点位交通气象观测站布局优化建议。国家级气象业务单位面向新增优化提升路段,研发了未来3天、水平分辨率达5 km的能见度、道路结冰等五类恶劣天气风险预警指导产品。各地气象部门结合道路视频图像、热谱地图等信息,研发了更为精细化气象灾害监测预警产品。以江苏省气象局为例,自主研发了视频图像识别技术,对多种恶劣天气的识别准确率提升至92.6%,完成了全省高速公路结冰隐患点排查,绘制出分辨率达20 m的高清热谱地图,实现了对低温冰情的精细化连续预报预警。

在机制建设方面,各地围绕“统一标准、统一预

案、统一措施”原则,逐步构建起涵盖监测预警、会商研判、应急响应、现场处置、响应终止与总结评估的闭环工作流程。河南、甘肃、青海、浙江金华等地还建立了“一路多方”的恶劣天气联防联控机制,推动交通预警与应急处理的协同管控走向制度化与规范化,气象预警的“发令枪”作用得到进一步强化。

3.2 高速铁路综合防灾预警系统

我国高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统包含风监测子系统、雨量监测子系统、雪深监测子系统、地震监测子系统及异物侵限监测子系统,系统由现场监测设备、监控单元、监控数据处理设备和监控终端组成,与调度指挥、信号系统等系统互联并构成运输安全保障体系(图2)。系统采用铁路局中心系统与现场监测设备两级架构,实时采集高速铁路沿线风、雨、雪、地震以及上跨道路桥梁的异物侵限数据,同时接入既有灾害监测系统、相邻铁路局中心系统以及地震、气象等外部部门信息,进行综合分析处理,为运营管理提供准确、可靠的监测、预警与报警信息。在发生异物侵限报警或地震预警时,系统能够联动触发信号系统与牵引变电系统执行紧急处置。列车调度员可依据风雨天气、地震灾害及异物侵限等安全环境的实时监测与预警信息,指挥列车运行;维护部门则根据系统提供的灾害信息,及时开展线路及设施的巡检、抢险与维修养护工作,从而为高速铁路动车组的安全运行提供全方位技术保障。

为有效预警高速铁路沿线的大风灾害,保障列车运行安全,我国在高铁沿线布设了专业化的风监测系统。该系统具备大风实时监测、报警及预警功能,能够持续采集风速与风向数据,并对管辖范围内的风况信息进行汇总、分析与处理,为列车运行管制提供辅助决策。报警时限和解除报警时限在实际运用中可结合大风特征进行合理调整,风速达到预设阈值后10 s内触发报警,风速回落至阈值以下并持续10 min后解除报警。风监测点主要设置在沿线极大风速超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区段,每个监测点按双套配置风速风向仪,以提升数据可靠性。京津、京沪、武广、哈大等70多条高速铁路沿线部署4000处以上大风监测点,实现对影响行车安全的大风有效监测与预警。在监测技术研发方面,针对兰新高速铁路穿越风灾恶劣大风区的特点,程龙(2021)的研

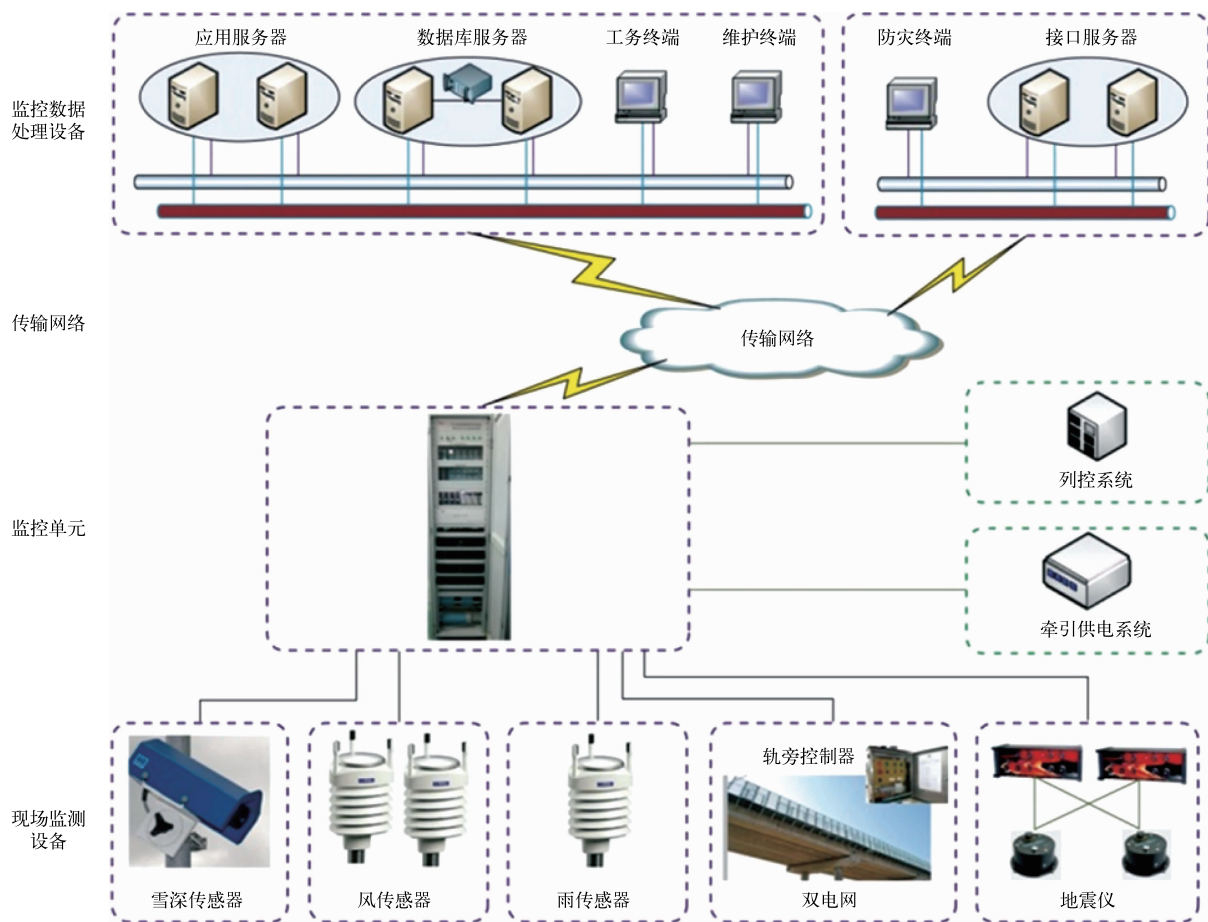


图 2 高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the monitoring system for natural disasters and foreign object intrusions on high-speed railways

究提出了基于 ZigBee 无线传感器网络 (WSN) 的大风监测系统。

同时,我国高铁沿线还建立了雨量监测报警系统,在年降雨量大于 200 mm 的地区设置监测点,并在高路堤、高路堑、隧道口等关键区段加密布设。根据降雨强度设置出巡、限速和封锁等多级报警机制,具体报警阈值与限速分档由运营单位结合沿线地质条件、基础设施状况及运营环境综合确定。在雨量报警触发后,列车调度员通过设置临时限速,使列车自动限速运行。

3.3 极端天气协同应急演练和一体化应急协同机制

极端天气事件的频发高发对交通气象等的应急处置能力提出了严峻考验,而现有体系中各环节相对独立、联动不畅。我国多地围绕台风暴雨、雨雪冰

冻、多灾种叠加等场景,开展形式多样的极端天气协同应急演练。2023 年 8 月,广东中山市开展防御极端台风暴雨天气应急抢险救援演练,检验各级各部门应急响应能力、应急救援能力、实战水平和协同处置能力。2023 年 4 月长三角地区聚焦超强台风防御、流域性超标准洪水应对、山洪地质灾害防范、城市严重内涝处置,开展“极端天气多方式协同应急演练”,沪苏浙皖联合运用“交通气象数字孪生沙盘”,在台风红色预警下同步模拟高速封闭、高铁降速、虹桥机场航班调时、洋山港封航及地铁接驳大客流等六类场景,实现 15 分钟内生成综合调度方案,通过实战导向、问题导向,形成指挥扁平化、防控立体化和处置协同化,通过应急演练强化实效,检验区域应急联动和应急处理联合智能协调,演练成效显著,通过智能调度将使旅客综合延误下降 22%,并降低社会成本约 1.3 亿元,通过多方式协同应急演练的实

践,磨合应急机制,优化响应流程,有效验证了一体化协同机制在提升跨区域、多方式应急协同与决策效率方面的实际价值。

4 存在的问题及对策建议

4.1 存在的问题

全球气候变化背景下,极端天气气候事件频发、强度增强(丁一汇等,2025;王倩等,2025;肖子牛和潘宝祥,2025),对交通运输系统的安全与效率构成了严峻的潜在威胁,亟需对气象灾害的预警预报、风险评估及应急响应等关键环节进行深入研究并强化综合应对能力;与此同时,伴随我国高速公路、高速铁路、内河与海洋航运以及航空运输等现代化交通体系的迅猛发展,交通基础设施网络日益密集、运行速度不断提升,对精细化、专业化、智能化的气象灾害防御保障提出了更高要求。

当前交通气象灾害风险评估在时空分辨率方面仍存在明显不足。在致灾因子分析中,主要依赖常规地基观测数据,尚未有效融合交通行业专项监测信息以及雷达、卫星等空基与天基遥感资料,导致对公路团雾等突发性灾害的监测识别能力不足;同时,航运气象风险评估受限于以陆基观测为主的数据来源,难以准确表征实际水面气象条件,制约了系统性风险评估能力。

在风险预警环节,致灾因子的危险性虽可基于实时动态预报获取,但承灾体的暴露度、脆弱性指标没有动态数据支撑,增大风险预警效果的不确定性。缺少对灾害影响下路网运行状态的快速评估与预警方法,难以准确把握路网运行态势,进而影响应急处理策略的科学制定。传统的“致灾因子-暴露度-脆弱性-防灾能力”以静态模型风险评估模型存在较大局限性,将导致预警准确性和应急响应有效性显著降低,如在 2024 年春节琼州海峡大雾事件中,大雾致灾因子与春节返程高峰这一动态暴露度叠加,引发了从航运中断到陆路网级联拥堵的复杂链式反应,造成了 G15 高速海口段及周边路网的严重瘫痪。

在承灾体评估方面,全国范围内交通系统的暴露度与脆弱性指标缺乏系统化、量化的数据支持,

加之交通网络结构复杂、相互作用机制尚未明晰,现有风险评估技术的准确性与适用性仍有待进一步提高。此外,目前对交通气象灾害事件尚缺乏科学统一的界定标准与分级体系,导致应急预案的针对性与实操性不足。当前交通气象灾害应急处理的智能化、一体化与数字化水平仍亟待提升。

4.2 对策建议

(1)积极推进监测信息的共享和深化部门间合作,构建权责清晰的数据共享与部门协同机制。随着全球气候变化加剧,各类极端天气事件呈活跃态势,交通气象灾害防御任务日益艰巨。整合交通运输部与气象局等行业的气象、交通等监测数据,联合公安部、自然资源部、民航局、铁路集团等单位建立监测信息的共享平台和监测信息共享机制,形成部门和行业之间互联互通、实时充分共享的信息交换机制,提高交通气象灾害的预警能力基础条件。深化部门间合作机制,逐步形成多部门协同规划、协同部署、协同实施、协同保障的综合交通气象服务格局,为一体化智能服务系统工程建设提供基础。建立预报预警联合会商机制,完善预判、预报、预警、预案、预防、处置等各环节的衔接机制。气象服务为恶劣天气交通预警处置提供制度化、规范化、自动化和智能化的交通安全运行保障,建议部门合作从规划设计、施工建设到运营保障以及应对全链条开展。

(2)开展人工智能预测和无缝隙智能网格等技术应用,发展融合动态承灾体信息的“风险影响型”预报预警技术。推动和发展利用人工智能等技术在精细化天气观测、预报和服务领域的深度融合应用,提升预报能力。研发无缝隙智能网格气候预测技术,利用累积概率密度分布函数方法等建立针对提高风险预估准确性及识别精度的气候预测产品的订正模型,提升气象灾害风险决策服务能力。面向不同交通行业关注的气象灾害,针对目前在监测支撑不足,机理不清的灾害需要加大研究,提升团雾、道路结冰等灾害监测预报预警服务能力。推进基于影响的重点行业气象灾害风险预估技术研究,实时接入交通部门的路面状态传感器数据、视频监控 AI 识别的车流量与能见度信息,从而构建“气象条件-路面状况-交通流”一体化的动态风险识别模型。

(3)加强交通气象灾害形成机理的基础研究,提

升精细化复合型极端灾害对交通气象的风险评估能力。加强交通气象灾害形成机理的基础研究。针对团雾、道路结冰、强横风、沙尘暴和暴雪等高影响天气现象,深入研究其形成机理和演变规律。开展不同下垫面结冰(高速公路、铁路及桥面结冰)的差异化形成机理研究,建立融合路面材料特性、温度分布、湿度变化等多因素耦合的结冰预测模型。加强风雨复合、冰雪复合等复合型极端天气事件的致灾机理研究,完善灾害链理论模型和风险评估方法。加强在极端气候条件下公路铁路等交通基础设施的服役性能演变过程研究,提出经济、科学的抵御气象灾害能力的方法与措施,形成系统的防灾减灾技术体系。高度重视极端事件和气候变化风险的早期预警,提升精细化的复合型极端灾害对交通气象的风险评估能力;提升跨行业的交通气象极端事件综合应对的科技支撑能力,加强极端天气气候事件监测预警和交通气象灾害风险管理。

参考文献

- 程宏林,王才宝,洪贞铨,等,1996. 江苏内河航运交通事故气象条件分析[J]. 气象,22(12):51-53. Cheng H L, Wang C B, Hong Z Q, et al, 1996. Analysis of meteorological conditions for inland waterway shipping accidents in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 22(12):51-53(in Chinese).
- 程龙,2021. 基于 WSN 的兰新高铁沿线风速监测与列车风致安全预警研究[D]. 兰州:兰州交通大学. Cheng L, 2021. Research on WSN based wind speed monitoring and train wind induced safety warning along Lanzhou-Wulumuqi High-Speed Railway[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University(in Chinese).
- 崔新强,付佳,代娟,等,2018. 基于 GIS 的沪汉蓉高铁线路暴雨灾害风险区划[J]. 气象科学,38(1):113-120. Cui X Q, Fu J, Dai J, et al, 2018. GIS-based rainstorm disaster risk zoning over Shanghai-Wuhan-Chengdu High-Speed Railway[J]. J Meteor Sci,38(1):113-120(in Chinese).
- 代娟,崔新强,刘文清,等,2016. 高速铁路气象灾害风险分析与区划方法探讨[J]. 灾害学,31(4):33-36. Dai J, Cui X Q, Liu W Q, et al, 2016. Research on meteorological disaster risk analysis and regionalization in high speed railway[J]. J Catastrophol,31(4):33-36(in Chinese).
- 狄靖月,王志,田华,等,2015. 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法[J]. 应用气象学报,26(3):268-279. Di J Y, Wang Z, Tian H, et al, 2015. A risk forecast method for southwest road damages based on precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 26(3):268-279(in Chinese).
- 丁一汇,柳艳菊,梅梅,等,2025. 气候变化和空气污染双赢应对战略的简要评述[J]. 气象学报,83(3):637-651. Ding Y H, Liu Y J, Mei M, et al, 2025. A concise review of co-benefit strategies for addressing both climate change and air pollution[J]. Acta Meteor Sin, 83(3):637-651(in Chinese).
- 杜建华,郑虹晖,莫云音,等,2020a. 海南省公路漫水阻断事件风险预报方法[J]. 干旱气象,38(6):1031-1036. Du J H, Zheng H H, Mo Y Y, et al, 2020a. Risk prediction method of road flooding and blocking events in Hainan Province[J]. J Arid Meteor, 38(6):1031-1036(in Chinese).
- 杜建华,郑虹晖,赵蕾,等,2020b. 海南环岛高速强降雨灾害风险分析[J]. 干旱气象,38(4):683-688. Du J H, Zheng H H, Zhao L, et al, 2020b. Analysis on meteorological disaster risk of highway around Hainan Island caused by heavy rainfall[J]. J Arid Meteor, 38(4):683-688(in Chinese).
- 黄佳威,王永前,吴小娟,2024. 顾及地形差异的高速公路结冰预报模型研究[J]. 大气科学,48(4):1499-1510. Huang J W, Wang Y Q, Wu X J, 2024. Research on expressway icing-prediction model considering terrain differences[J]. Chin J Atmos Sci, 48(4):1499-1510(in Chinese).
- 黄燕波,曾鹏,史彩霞,等,2022. 广西北部湾港口行业高影响天气等级划分研究[J]. 气象研究与应用,43(4):85-90. Huang Y B, Zeng P, Shi C X, et al, 2022. Research on classification of huge-impact weather in Guangxi Gulf port industry[J]. J Meteor Res Appl, 43(4):85-90(in Chinese).
- 蒋丹阳,2022. 无锡地区高速公路降雨灾害监测预警与风险评估系统的设计与实现[D]. 南京:南京信息工程大学. Jiang D Y, 2022. Design and implementation of rainfall disaster monitoring, early warning and risk assessment system for expressways in Wuxi Area[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 交通运输部路网公路局,交通运输部路网监测与应急处置中心,2021. 中国公路网运行蓝皮书(2019)[M]. 北京:人民交通出版社. Highway Bureau of the Ministry of Transport of the People's Republic of China, Highway Monitoring & Response Center, Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2021. Blue Book of China Highway Network Performance(2019)[M]. Beijing:China Communications Press(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).
- 李长城,汤筠筠,葛涛,等,2012. 恶劣气象条件下公路运行安全管理与保障技术[M]. 北京:人民交通出版社. Li C C, Tang J J, Ge T, et al, 2012. Road Safety Management and Guarantee Technology under Adverse Weather Condition[M]. Beijing: China Communications Press(in Chinese).
- 李莹,高歌,程驰,2021. 影响中国高速铁路运行的暴雨危险性特征研究[J]. 地理科学,41(10):1843-1851. Li Y, Gao G, Cheng C,

2021. Hazard intensity of rainstorm affecting high-speed railway operation in China[J]. *Sci Geogr Sin*, 41(10):1843-1851(in Chinese).
- 廖春花, 郭海峰, 孙建美, 等, 2018. 湖南省水上交通事故特征和天气影响因子分析[J]. *湖南交通科技*, 44(4):182-185. Liao C H, Guo H F, Sun J M, et al, 2018. Analysis of characteristics and weather influence factors of water traffic accidents in Hunan Province[J]. *Hunan Commun Sci Technol*, 44(4):182-185(in Chinese).
- 刘艳, 何清, 戴晓爱, 等, 2016. 新疆铁路沿线主要气象灾害风险区划及减灾对策探讨[J]. *自然灾害学报*, 25(3):48-57. Liu Y, He Q, Dai X A, et al, 2016. Risk mapping of main meteorological disasters and disaster mitigation strategies for Xinjiang railway lines[J]. *J Nat Disasters*, 25(3):48-57(in Chinese).
- 柳艳香, 潘进军, 田华, 等, 2017. 高速公路交通气象灾害风险评估方法简介[J]. *气象科技进展*, 7(6):18-21. Liu Y X, Pan J J, Tian H, et al, 2017. An introduction to a risk assessment method of traffic meteorological disaster on highway in China[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 7(6):18-21(in Chinese).
- 马飞, 孙启鹏, 尚震, 等, 2024. 极端天气下城市公共交通多层复杂网络脆弱性研究[M]. 北京: 科学出版社. Ma F, Sun Q P, Shang Z, et al, 2024. Study on Vulnerability of Multi-Layer Complex Network of Urban Public Transport under Extreme Weather[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 马淑红, 马焜娟, 2013. 我国高铁强风灾风险评估与区划方法研究[J]. *交通标准化*, 41(6):94-96. Ma S H, Ma W J, 2013. Strong hurricane risk assessment and zoning methods of high-speed rail[J]. *Commun Standardization*, 41(6):94-96(in Chinese).
- 牛苗苗, 张宏芳, 王莹, 2025. 高影响天气下的公路交通气象研究进展[J]. *陕西气象*, (1):34-41. Niu M M, Zhang H F, Wang Y, 2025. Research progress of highway traffic meteorology under highly impacted weather conditions[J]. *J Shaanxi Meteor*, (1):34-41(in Chinese).
- 潘进军, 柳艳香, 田华, 等, 2019. 高速公路交通气象灾害风险评估、区划与预警[M]. 北京: 科学出版社. Pan J J, Liu Y X, Tian H, et al, 2019. Risk Assessment, Zoning and Early Warning of Highway Traffic Meteorological Disasters[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 任丽媛, 张希帆, 孙玫玲, 等, 2024. 天津高铁沿线风致轻漂浮物入侵灾害气象风险分析及应用[J]. *气象*, 50(6):756-769. Ren L Y, Zhang X F, Sun M L, et al, 2024. Meteorological risk analysis and application of wind-induced light floating objects invasion disaster along the Tianjin High-Speed Railway[J]. *Meteor Mon*, 50(6):756-769(in Chinese).
- 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).
- 孙贞, 徐晓亮, 2019. 青岛港口航区气象风险指标服务产品研发及业务应用[J]. *气象水文海洋仪器*, 36(3):45-48. Sun Z, Xu X L, 2019. Research and development of meteorological risk index service products and its business application in Qingdao port channel[J]. *Meteor Hydrol Mar Instrum*, 36(3):45-48(in Chinese).
- 田刚, 王继竹, 张华林, 等, 2020. 长江航运气象预报预警服务系统设计与应用[J]. *气象科技*, 48(4):503-510. Tian G, Wang J Z, Zhang H L, et al, 2020. Design and application of a weather forecasting and early warning service system for Yangtze River shipping[J]. *Meteor Sci Technol*, 48(4):503-510(in Chinese).
- 王春玲, 郭文利, 李迅, 等, 2018. 京津冀地区高速公路冰冻灾害风险区划[J]. *气象与环境学报*, 34(1):45-51. Wang C L, Guo W L, Li X, et al, 2018. Risk zoning of freezing disaster at motorway in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *J Meteor Environ*, 34(1):45-51(in Chinese).
- 王凯, 梁益同, 刘敏, 2020. “东方之星”翻沉事件风灾现场调查分析与致灾风速估算[J]. *气象*, 46(1):98-107. Wang K, Liang Y T, Liu M, 2020. Field investigation and analysis of wind disaster and estimation of disaster wind speed of the capsizing accident of Cruise Ship “Oriental Star”[J]. *Meteor Mon*, 46(1):98-107(in Chinese).
- 王倩, 翟盘茂, 张强, 2025. 1961 年以来中国区域性气候与极端事件变化格局[J]. *气象学报*, 83(4):980-989. Wang Q, Zhai P M, Zhang Q, 2025. Regional patterns of climate change and extreme events in China since 1961[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(4):980-989(in Chinese).
- 王志, 田华, 冯蕾, 等, 2012. 基于 GIS 的高速铁路大风风险区划研究[C]//第十四届中国科协年会第 14 分会场: 极端天气事件与公共气象服务发展论坛论文集. 石家庄: 中国科学技术协会, 河北省人民政府: 272-278. Wang Z, Tian H, Feng L, et al, 2012. The study of risk zoning of big wind based on GIS for high-speed railway[C]//Proceedings of the 14th Branch Venue of the China Association for Science and Technology Annual Conference: Forum on Extreme Weather Events and Public Meteorological Service Development. Shijiazhuang: China Association for Science and Technology, The People's of Hebei Province: 272-278(in Chinese).
- 武万里, 缙晓辉, 刘垚, 2021. 基于 GIS 的路面积雪灾害风险分析与区划研究[J]. *防灾科技学院学报*, 23(1):87-93. Wu W L, Gou X H, Liu Y, 2021. Snow cover risk analysis and zoning of expressway in Ningxia based on GIS[J]. *J Inst Disaster Prev*, 23(1):87-93(in Chinese).
- 肖子牛, 潘宝祥, 2025. 极端天气事件和天气气候一体化预报技术的现状及展望[J]. *气象*, 51(11):1383-1394. Xiao Z N, Pan B X, 2025. Extreme weather events and integrated forecasting techniques for weather and climate: current status and prospect[J]. *Meteor Mon*, 51(11):1383-1394(in Chinese).
- 熊红梅, 田刚, 张勤, 等, 2021. 交通强国背景下内河航运气象保障发

- 展思考[J]. 中国水运, 21(8): 22-24. Xiong H M, Tian G, Zhang Q, et al, 2021. Thoughts on the development of meteorological support for inland waterway shipping under the background of a transportation powerhouse[J]. China Water Transp, 21(8): 22-24(in Chinese).
- 杨辰, 王强, 李海宏, 等, 2023. 基于频繁模式挖掘的上海市气象灾害致灾因子识别[J]. 灾害学, 38(2): 141-149. Yang C, Wang Q, Li H H, et al, 2023. Identification of meteorological disaster factors in Shanghai based on frequent pattern mining[J]. J Catastrophol, 38(2): 141-149(in Chinese).
- 杨忠恩, 顾婷婷, 潘娅英, 2017. 基于 GIS 的浙江省高速公路大雾灾害风险区划[J]. 气象科技, 45(4): 756-760. Yang Z E, Gu T T, Pan Y Y, 2017. GIS-based risk regionalization of fog disaster on highway in Zhejiang Province[J]. Meteor Sci Technol, 45(4): 756-760(in Chinese).
- 张晓美, 吕明辉, 王毅, 等, 2019. 我国公路交通气象灾害风险隐患特征分析[J]. 灾害学, 34(4): 19-24. Zhang X M, Lyu M H, Wang Y, et al, 2019. Analysis of the risk characteristics of highway traffic meteorological disasters in China[J]. J Catastrophology, 34(4): 19-24(in Chinese).
- 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等, 2016. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016. Survey and multi scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of Cruise Ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13(in Chinese).
- 中国气象局, 2016. 高速铁路运行高影响天气条件等级: QX/T 334—2016[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2016. Grade of high impact weather conditions for high-speed railway operation: QX/T 334—2016[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 朱可欣, 张鸿波, 郗秀书, 等, 2025. 川藏铁路不同站点的闪电活动差异及长期变化趋势[J]. 大气科学, 49(1): 173-184. Zhu K X, Zhang H B, Qie X S, et al, 2025. The variations and trends of lightning activity among different stations along the Sichuan-Xizang Railway[J]. Chin J Atmos Sci, 49(1): 173-184(in Chinese).
- Sun S, Gao G, Li Y, et al, 2022. A comprehensive risk assessment of Chinese high-speed railways affected by multiple meteorological hazards[J]. Wea Climate Extremes, 38: 100519.

(本文责编: 俞卫平)