

我国公路交通气象研究与业务进展

王志 韩焱红 李嵩恂

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 介绍了国内外公路交通气象服务的发展概况以及我国公路交通气象研究现状和业务进展, 列举了低能见度、路面温度等公路交通气象预报的主要技术方法和成果, 重点阐述了我国公路交通气象服务的业务体系, 同时展望了未来公路交通气象服务的发展方向。指出, 我国在能见度、路面温度等公路交通气象监测与预报技术方面已取得一定的研究成果, 但仍需进一步加强交通气象监测系统的建设, 同时, 研发面向不同对象的公路交通气象专业预报模型。此外, 为了满足社会公众对交通气象服务日益增长的需求, 探索智慧交通气象服务在逐渐发展的智慧生活中的应用也愈发重要。

关键词: 公路, 交通气象, 研究与业务, 监测与预报, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.009

Advance in Research and Operation in Traffic Meteorological Service in China

Wang Zhi, Han Yanhong, Li Aixun

(China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: This paper introduces the developments of traffic meteorological service in China and abroad, and focuses on that in China. The achievements on traffic meteorological service in China such as monitoring and forecasting methods of low visibility and road surface temperature are especially summarized, and the future operational system and prospects are also discussed in more detail. It points out that the traffic meteorological observing system is needed to be improved, while the professional forecasting models should be studied. Furthermore, in order to meet the growing demand for traffic meteorological services, exploring the application of smart traffic meteorological services are more and more necessary in the smart social living.

Keywords: highway, traffic meteorology, research and operation, monitor and forecast, advance

0 引言

随着社会经济的快速发展, 公路交通运输能力和效率不断提高, 气象条件对其影响也日益明显。据交通管理部门统计, 交通事故中有近30%是在恶劣天气条件下发生的^[1]。浓雾、降水、大风、高温、结冰等气象灾害, 以及造成的次生灾害(如山谷风、路面积水、强降水时的低能见度等)或伴生的地质灾害(如山体崩塌、滑坡、泥石流等)均会影响到公路交通运输的安全和效率, 造成公路堵塞、封路或直接导致交通运输中断, 引发交通事故, 造成人员伤亡和经济损失^[2-3]。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, 是实现公路交通运输安全、畅通和高效的重要保障之一。本文旨在介绍我国公路交通

气象研究成果和业务进展情况, 分析公路交通气象业务发展中存在的问题, 以及对未来工作的展望。

1 国内外公路交通气象服务概况

在公路交通气象服务方面, 美国、加拿大、日本、北欧等经济发达国家和地区起步较早, 通过建立公路气象监测及预报系统为公众、交通部门、灾害管理部门等提供准确的道路气象监测信息和及时有效的天气预警信息。1985年, 第一个国际性交通气象组织——国际交通气象委员会(Standing International Road Weather Commission, SIRWEC)在哥本哈根成立, 其研发的道路天气信息系统(RWIS)可实现道路天气状况监测和高影响天气预报, 为社会、公众提供冰冻雨雪危险程度等信息^[4]; 1991年, 德国基于道路交通气象服务系统(SWIS)发布了全国各条主要公路的2h预警、3~7d的详细路面气象要素预报以及8~10d的天气趋势预报; 1999年, 美国国家大气研究中心(NCAR)研发了基于数值预报模式的交

收稿日期: 2016年9月5日; 修回日期: 2016年12月26日

第一作者: 王志(1977—), Email: wzhi@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406029)

通气象决策系统 (MDSS) 和路面专业气象预报系统 (RWFS), 为交通部门提供优化的天气预报和路面参数预报及防御建议^[5]。此外, 美国、加拿大等国家在影响交通的气象要素监测与预报研究^[6-11]、公路交通气象标准体系建设^[12-13]等方面也取得了丰富成果并投入实际应用。

我国自2005年起开展国家级公路交通气象监测、预报预警服务。中国气象局和交通运输部每日联合向社会发布全国主要公路气象预报, 引导公众安全出行; 同时, 针对国家重大活动、节假日、重大气象灾害、突发事件等, 及时开展公路交通气象保障服务工作。2012年, 中国气象局全面深入推进了全国公路交通气象监测站网建设, 实现了全国公路沿线监测信息共享。中国气象局公共气象服务中心在公路交通气象监测数据融合、空间分析和道路反演算法研究、专业气象预报技术研究和系统建设等方面也取得了较大进展, 初步建立了面向行业、决策和专业用户的综合交通气象与路况信息的一站式服务系统平台——智慧交通气象服务系统平台, 并在行业管理部门、大型电商企业等推广使用。此外, 多地省级气象部门在公路交通气象关键技术研究 and 区域性、本地化服务产品研发方面也迅猛发展。1998年, 江苏省气象局在全国率先开展了道路交通安全气象保障服务, 并在2005年成立了我国第一家交通气象专业科研与服务机构——南京交通气象研究所, 搭建了交通气象监测预警一体化平台^[14]。北京、河北、辽宁、安徽等省 (直辖市) 气象部门^[15-18]也针对重点地区、重点路段的服务需求, 逐步建立了公路交通气象业务体系, 为交通运输的畅通和安全提供气象保障服务并取得一定成效。

2 我国公路交通气象研究现状

2.1 公路交通高影响气象要素监测与预报研究

低能见度、道路结冰是影响我国交通运输安全的主要气象灾害, 针对公路能见度、路面温度等的监测与预报研究是目前我国公路交通气象研究领域的一个重要方向。

公路能见度的研究主要集中在影响交通的低能见度特征分析、预报方法和监测技术等方面。一些学者通过对影响交通的低能见度观测及其时空分布特征研究, 探讨公路能见度的特征及其与气象条件的关系。雨、雪、雾、霾、沙尘等天气现象都可能导致公路低能见度, 其中, 雾对公路低能见度的影响最大, 同时天气现象对公路能见度的影响也有明显的季节性和地域性特征^[19-23]。还有学者选取影响公路能见度的气象要素作为预报因子并确定预报指标, 在数值预报的基

础上, 基于神经网络等统计学方法建立能见度预报模型, 在华北、华东、广东、重庆等区域或省份高速公路能见度预报中取得了较好的应用效果^[24-28]。另外, 针对高速公路上团雾的发生规律和局地性特征, 江苏、江西等地开展了相关分析和模拟研究^[29-30]。随着卫星监测业务的发展, 开展卫星资料在公路能见度监测技术中的应用研究, 探讨卫星资料与地面观测资料的融合方法, 从而进一步提高公路能见度监测的空间精度也逐渐成为当前研究热点。

路面温度预报研究可归纳为两类: 一是理论模型研究与应用, 如刘熙明等^[31]、贾璐等^[32]、朱承瑛等^[33]以太阳辐射能量守恒原理为基础, 考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射 (辐散) 以及潜热、感热传输等能量之间的平衡, 建立了路面温度数值预报模型, 并在沪宁、江西等地开展试验。结果表明, 路面温度数值模型的预报误差较低, 具有较高的应用价值。二是统计分析模型, 如曲晓黎等^[34]、马筛艳等^[35]、田华等^[36]根据实测资料以及气温、相对湿度、云量等气象因子与路面温度的关系, 建立了多元回归统计模型来预报路面温度, 并在京石高速、沪宁高速等区域开展应用试验, 取得了较好的预报效果。

2.2 公路交通气象灾害影响与风险研究

恶劣天气不仅对交通安全有直接影响, 也会导致公路次生灾害的发生。如连续降水或强降水会引发公路路基沉降、公路沿线滑坡、泥石流及其他公路次生灾害, 是诱发公路损毁的主要因素之一。开展公路交通气象灾害的风险研究是为满足我国防灾减灾需求而拓展的新方向。目前, 我国在公路自然区划、公路损毁预报、公路次生灾害危险性评价和风险评估等方面开展了探索性研究。狄靖月等^[37]针对西南地区公路损毁灾害, 统计分析降水与灾害的关系并确立影响因子, 同时将降水、地质环境与公路损毁风险区划有效结合, 建立了公路损毁概率预报模型, 为降水对公路损毁灾害的影响和预报提供了客观参考; 袁明等^[38]、陈洪凯等^[39]分别结合天山公路、川藏公路沿线的地理环境, 采用层次分析法和GIS技术建立了公路地质灾害危险性评价模型, 为实施公路地质灾害风险防治提供了科学依据。此外, 还有学者通过开展公路交通气象灾害风险研究, 在充分考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体等多因素影响的基础上, 分别针对暴雨^[40]、洪涝^[41]、大雾^[42]等灾害构建了客观、准确的公路交通灾害风险评估模型, 为决策部门更有针对性地制定公路交通防灾措施, 最大程度减轻和避免气象灾害造成的损失提供客观依据。

2.3 公路交通气象标准研究

随着公路交通气象服务的发展,公路交通气象技术标准化体系亟须建立,近年来,我国气象、交通部门也探索性地开展了一系列工作。2007年中国气象局发布了《高速公路能见度监测及浓雾的预警预报》^[43]气象行业标准,规定了高速公路能见度监测站的设置、设备检定、技术指标、数据采集处理以及能见度等级划分和浓雾的预警预报服务流程。2010年发布了《高速公路交通气象条件等级》^[44]气象行业标准,规定了影响高速公路交通运行的气象条件等级,为交通部门的高速公路安全和运营管理工作、气象部门开展高速公路气象监测和预报服务提供依据。2011年国家标准《公路交通气象预报格式》^[45]发布,规定了公路交通气象预报格式的结构和用语。辽宁、贵州、青海等地也针对当地特点研究制定了一系列地方标准^[46-48]。随着公路交通气象标准研究的深入开展,针对公路交通高影响天气的相关预警、服务标准,如《雾天高速公路交通安全控制条件》《冰冻天气公路交通条件预警分级》等也正在研究中。

3 我国公路交通气象业务进展

21世纪以来,我国的公路交通气象业务已经取得长足进展,专业化和精细化水平有很大的提高,已初步形成集监测、预报警报、服务以及交通气象灾害和服务评估于一体的公路交通气象业务体系。

3.1 公路交通气象监测业务

近年来,我国公路交通气象观测站的建设工作逐步进入高速发展阶段。江苏、安徽等省率先在华东区域高速公路沿线建成带有能见度传感器的监测站点,随后,北京、天津、辽宁、河北等其他省(直辖市)也陆续布设交通气象观测站。但我国公路交通气象观测站仍存在分布不均的问题,中西部地区交通气象观测站的密度和覆盖程度都远低于东部地区。

为此,在考虑公路沿线地形条件和气象条件的均一性、相似性等的基础上,气象部门利用全国干线公路周边的高密度地面气象观测数据,基于公路网信息,应用GIS技术对国家气象站、区域自动气象站进行筛选,与公路气象观测站共同组成了全国主要公路交通气象观测站网,在一定程度上弥补了我国公路气象观测站网的不足。该站网覆盖了能够连接我国大部分地级以上城市的55条全国主要公路,其中,中东部地区以国家高速为主,西部地区以国道为主。在业务服务中已实现公路沿线降水、气温、风速、能见度、路面状态(路面高温、积水、积雪、结冰)等共9类28种气象/路面要素的实时监测和信息共享。随着气象

卫星资料的广泛应用,我国公路交通气象监测业务也将逐步发展成地基、空基相结合的综合观测系统。

基于全国主要公路交通气象观测站网观测资料,中国气象局公共气象服务中心利用多源数据融合和道路反演等方法,研发了能见度、小时雨量、风力、气温和相对湿度等气象要素的《全国公路交通气象监测服务产品》,可反映影响公路路段气象/路面要素的实时状况。该系列产品于2013年10月起实现逐时向省级单位下发。

3.2 公路交通气象预报业务

目前,我国公路交通气象预报业务以短期预报为主,辅以短时临近预报和预警。如国家级气象服务业务部门每日制作发布的《全国主要公路气象预报》,是从影响公路运输的气象条件出发,提供未来24h受雾、雨、雪、沙尘暴、雷暴等天气影响的全国主要公路路段气象预报。北京气象局针对京津塘、京沈、京沪高速公路定时发布交通气象短期预报。河北气象局为京津冀区域提供行车气象指数等级、路面结冰等级、路面结冰持续时间、爆胎气象指数等8种短期预报产品。辽宁气象局定时发布未来24h全省高速公路能见度预报和路况预报。此外,针对可能或正在出现的突发性、局地性的公路交通气象灾害,气象部门利用观测站气象监测和雷达监测等手段,及时提供分灾种、分级别的公路交通气象灾害短时临近预报;当预报有雾、台风、暴雪等灾害性天气并对区域公路网影响达到一定程度时,中国气象局与交通运输部也适时开展公路气象预警服务,联合发布《重大公路气象预警》产品,指导交通管理部门提前做好应对。

为满足日益增长的公路交通气象预报精细化、专业化需求,中国气象局自2014年起开展公路交通气象要素精细化预报业务建设,现已实现了全国主要公路气象要素精细化预报产品制作和共享。该产品每日08时和20时发布,内容包括气温、降水量、风速、天气现象(雨、雪、雨夹雪、雾、冰雹、冻雨、沙尘暴等)等气象要素的72h内逐3h预报,产品空间分辨率为3~5km,为区域及省级部门开展公路气象服务提供了前端数据支撑。

3.3 公路交通气象风险业务

针对强降水、低能见度、团雾、大风、高温、路面结冰、积雪等公路交通高影响天气,提供分灾种、分区域、分时段的公路交通气象灾害风险预报预警产品,科学地给出交通气象灾害在何时、何地,以何规模给公路交通带来的影响,可以为交通管理部门制定出更有针对性的防范措施,最大程度减轻和避免气象

灾害造成的损失提供支持^[49]。

2013—2015年,中国气象局在全国31个省(自治区、直辖市)开展了公路交通气象灾害风险普查工作。主要任务包括普查全国公路交通气象灾害风险隐患点,建设全国公路交通气象灾害风险普查数据库,形成全国公路交通主要灾害风险区划图,开展公路交通气象灾害风险管理。从普查结果来看,影响我国公路交通的主要气象灾害是强降雨、大雾、团雾、路面结冰、公路积雪,灾害的致灾因子主要是降雨、能见度(雾/霾)、降雪、气温、风速等^[50]。同时,全国各区域的主要公路气象灾害存在明显差异。该工作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。

3.4 公路交通气象保障服务

针对重要节假日(如春节、国庆等)、重大活动(如北京奥运会、APEC峰会)、重大气象灾害(如台风、冰冻雨雪等)、突发灾害救援(如地震等)提供公路交通气象保障是公路交通气象服务业务的重要工作。

春运是我国全国性交通运输高压时期,也是冰冻雨雪、大雾(团雾)等交通灾害性天气高发时段,由此引发的道路结冰、道路湿滑、低能见度等对春运公路交通安全影响极大。中国气象局公共气象服务中心在春运期间每日制作《春运道路交通气象服务专报》,为政府决策部门、行业管理部门提供受雾、雨、雪、沙尘暴等灾害性天气影响的全国主要公路气象预报,防范不利气象条件对春运交通的影响。

重大活动公路交通气象保障服务要具体针对活动举办地点和时段内的高影响天气特点来开展。如2014年11月在北京召开的APEC峰会,时值秋冬转换季节,大雾天气多发,中国气象局公共气象服务中心从历史同期发生雾霾以及由此引发的公路交通阻断情况分析出发,对峰会召开期间雾霾天气及可能引发的低能见度对公路交通运营带来的不利影响展开预测预报服务,为会议期间北京及周边公路交通及出行安全提供气象保障。

重大灾害如地震及引发的滑坡、崩塌等将严重影响公路通行能力。为确保抢险救灾的生命线畅通无阻,国家级气象部门相继开展了汶川、芦山、玉树、舟曲、鲁甸等灾害救援的交通气象保障服务,面向政府、救援人员、灾民有针对性地提供震区公路沿线天气现象、气温、降水量、风向、风速等气象要素的监测和短期、短临预报,为抗震救灾及时提供气象保障服务和决策支撑。

3.5 公路交通气象业务系统

为满足多元化用户的业务需求,国家级以及上海、江苏、安徽、湖北等省(直辖市)级气象服务业务部门基于GIS技术和交通气象共享数据,各自构建了具有行业特色、满足交通气象服务需求的业务系统。各个系统一般包含公路气象监测、预报预警产品制作和信息发布等部分。其中,公路气象监测部分可以实现公路气象监测信息(路面温度、能见度、路面状况、降水等)采集、故障监控、要素统计查询、自动报警等功能;预报预警部分具有客观专业模型预报、主观分析和预报订正等功能;信息发布部分可以面向不同服务对象,通过传真、电子邮件、手机客户端等方式,实现服务产品的自动分发。此外,还有部分地区在考虑区域气象差异和不同行业用户需求的基础上建立了有针对性的、面向不同用户的交通气象服务系统,如满足决策需求的西汉高速公路气象保障服务系统^[51]、针对高速公路雾区的高速公路浓雾监测预警系统^[52]、面向公众出行的公路交通气象服务系统^[53]等。

4 公路交通气象服务的发展展望

完善的公路交通气象观测体系可以为交通气象服务提供有力的基础支撑。目前,我国交通气象观测项目的针对性还不够,特别是关于能见度、路面状况等交通部门急需的主要观测项目仍有欠缺,制约了交通气象科研与服务工作的发展^[54-55]。气象、交通部门需进一步合作共建,在重要高速公路沿线开展浓雾、强风、强降水、低温、冰冻、雨雪、高温等交通气象灾害的观测,有针对性地增加路面温度、道路综合状况、交通实景等观测。同时,卫星资料在公路交通气象监测中的应用,是建设高时空分辨率的交通气象综合观测系统不可或缺的部分^[56-57]。而随着社会化观测的发展,如何有效地将社会化观测纳入到公路交通气象观测体系也是目前面临的挑战。

随着气象监测、预报精细化程度的提高,如何在数值天气预报的基础上,基于天气学、统计学等理论方法,建立满足不同服务需求的专业化公路气象预报模型^[58-59],特别是开展结合行业数据和面向对象需求的公路交通影响预报及灾害风险预警,提高公路交通气象的预报水平和服务能力,将是交通气象预报服务的一项重要研究工作。我国当前的公路气象服务对象主要为政府决策部门、交通行业部门(交通管理部门、交通运营公司)、物流企业以及公众。因此,进一步提高交通气象服务能力,需从服务对象特点和需求出发,探索面向不同对象的公路交通气象服务模

式。高速公路的迅猛发展为人们出行带来了快捷和方便，与此同时，公众对生活品质和出行效率的提升有了更高的要求。随着云计算、大数据等新兴业态的兴起，将交通气象服务融入智慧生活中，构建智慧交通气象服务也是当前的研究热点之一。

参考文献:

- [1] 许小峰. 现代气象服务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] 矫梅燕, 章国材, 曲晓波. 现代天气业务 (下册). 北京: 气象出版社, 2010.
- [3] 刘聪, 卞光辉, 黎健, 等. 交通气象灾害. 北京: 气象出版社, 2009.
- [4] 秦剑, 闫广松, 向曦, 等. 气象服务业务概论. 北京: 气象出版社, 2016.
- [5] 黎健, 魏丽, 傅敏宁, 等. 美国交通气象信息国家需求评估报告. 北京: 气象出版社, 2008.
- [6] Pretorius P C. Design Considerations for Pavements Containing Soil Cement Bases. University Microfilms, 1972.
- [7] Williamson R H. Effects of environment on pavement temperatures. Intl Conf Structural Design Proc, 1972.
- [8] Jin P J, Walker A, Cebelak M, et al. Strategic Environmental Sensor Station (ESS) location determination method based on weather-related crash data for Road Weather Information System (RWIS). 93rd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D C, January 12-16, 2014.
- [9] Kwon T J, Fu L. Evaluation of alternative criteria for determining the optimal location of RWIS stations. J Modern Transportation, 2013, 21(1):17-27.
- [10] Kangas M, Heikinheimo M, Hippi M. RoadSurf: a modelling system for predicting roadweather and roadsurface conditions. Meteor Appl, 2015, 22(3):544-553.
- [11] Crevier, L P, Delage Y. METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada. J Appl Meteor, 2001, 40(11): 2026-2037.
- [12] 袁晨阳, 陈旭梅, 刘文峰, 等. 国内外公路气象信息系统标准综述. 交通信息与安全, 2011, 29(2): 133-138.
- [13] Abdi A, Lind H, Birgisson B. Use of Road Weather Information System (RWIS) as assistive tool for effective winter road maintenance-technical and contractual interactions. Inter J Engi and Tech, 2012, 2(12): 2002-2012.
- [14] 田小毅, 袁成松, 朱承琪, 等. 江苏交通气象服务及业务化示范. 纪念中央气象台成立60周年系列活动之全国气象服务发展论坛, 北京, 2010年9月1日.
- [15] 丁德平, 李迅. 北京城市交通气象服务. 气象软科学, 2009(3): 71-72.
- [16] 赵娜, 时青格. 京秦高速河北段沿线降水分布特征及气象服务重点. 第28届中国气象学会年会, 厦门, 2011年11月9-11日.
- [17] 赵森. 辽宁交通气象预报方法研究. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [18] 周建平, 吴和红, 刘承晓, 等. 安徽省高速公路低能见度状况及雾对交通影响初步分析//孙健. 第三届气象服务发展论坛文集. 北京: 气象出版社, 2014.
- [19] 杨晓丹, 狄靖月. 天气现象影响公路低能见度的特征. 科技导报, 2013, 31(32):58-63.
- [20] 田小毅, 吴建军, 严明良, 等. 高速公路低能见度浓雾监测预报中的几点新进展. 气象科学, 2009, 29(3): 414-420.
- [21] 徐虹, 朱爱荣, 张宏, 等. 高等级公路秋冬季大雾的气候分析和概念模型. 陕西气象, 1999(2): 17-19.
- [22] 袁成松, 卞光辉, 冯民学, 等. 高速公路上低能见度的监测与预报. 气象, 2003, 29(11): 36-40.
- [23] 冯民学, 袁成松, 卞光辉, 等. 沪宁高速公路无锡段春季浓雾的实时监测和若干特征. 气象科学, 2003, 23(4): 435-445.
- [24] 李沛, 王式功, 尚可政, 等. 基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 52-57.
- [25] 吴兑, 邓雪娇, 游积平, 等. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统. 热带气象学报, 2006, 22(5): 417-422.
- [26] 马学款, 蔡梦宁, 杨贵名, 等. 重庆市区雾的天气特征分析及预报方法研究. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 795-803.
- [27] 王恺, 赵宏, 刘爱霞, 等. 基于风险神经网络的大气能见度预测. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1029-1033.
- [28] 包红军, 陈辉, 田华, 等. 京珠高速公路低能见度(雾)神经网络预测模型. 第28届中国气象学会年会, 厦门, 2011年11月9-11日.
- [29] 丁秋冀, 包云轩, 袁成松, 等. 沪宁高速公路团雾发生规律及局地性分析. 气象科学, 2013, 33(6): 634-642.
- [30] 杨西海, 何斌, 唐菁菁, 等. 山区高速公路局地团雾灾害的交通安全保障. 工业安全与环保, 2014(12): 86-88.
- [31] 刘照明, 喻迎春, 雷桂莲, 等. 应用辐射平衡原理计算夏季水泥路面温度. 应用气象学报, 2004, 15(5): 623-628.
- [32] 贾璐, 孙立军, 黄立葵, 等. 沥青路面温度场数值预估模型. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(8): 1039-1043.
- [33] 朱承琪. 高速公路路面温度模型及其预报系统的研究. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [34] 曲晓黎, 武辉芹, 张彦恒, 等. 京石高速公路路面温度特征及预报模型. 干旱气象, 2010, 28(3): 352-357.
- [35] 马锦艳, 李剑萍, 刘玉兰, 等. 银川城市道路路面温度变化特征及统计模型. 气象研究与应用, 2012, 33(1): 48-51.
- [36] 田华, 吴昊, 赵琳娜, 等. 沪宁高速公路路面温度变化特征及统计模型. 应用气象学报, 2009, 20(6): 737-744.
- [37] 狄靖月, 王志, 田华, 等. 降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法. 应用气象学报, 2015(3): 268-279.
- [38] 袁明, 何政伟, 张俊峰. 基于GIS的天山公路地质灾害危险性评价. 地理空间信息, 2007, 5(6): 70-73.
- [39] 陈洪凯, 唐红梅. 川藏公路地质灾害危险性评价. 公路, 2011(9): 17-23.
- [40] 武永峰, 张勇, 陈鲜艳, 等. 湖南省公路交通暴雨风险评价研究. 自然灾害学报, 2011(5): 148-154.
- [41] 林孝松, 陈洪凯, 王先进, 等. 重庆市涪陵G319公路洪灾风险评估研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 244-250.
- [42] 扈海波, 熊亚军, 张姝丽. 基于城市交通脆弱性核算的大雾灾害风险评估. 应用气象学报, 2010, 21(6): 732-738.
- [43] 中国气象局. 高速公路能见度监测及浓雾的预警预报 (QX/T 76-2007). 北京: 中国气象局, 2007.
- [44] 中国气象局. 高速公路交通气象条件等级(QX/T 111-2010). 北京: 中国气象局, 2010.
- [45] 交通运输部公路科学研究院, 国家气象中心. 公路交通气象预报格式 (GB/T 27967-2011). 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011.
- [46] 辽宁省质量技术监督局. 高速公路交通安全运营气象指标 (DB21/T 1788-2010). 沈阳: 辽宁省质量技术监督局, 2010.
- [47] 贵州省质量技术监督局. 贵州省道路交通气象服务规范 (DB52/T 756-2012). 贵阳: 辽宁省质量技术监督局, 2012.
- [48] 青海省质量技术监督局. 机动车道路交通安全气象指数等级 (DB63/T 1114-2012). 西宁: 青海省质量技术监督局, 2012.
- [49] 徐雨晴, 何吉成. 气候变化对公路交通的影响研究进展. 气象与减灾研究, 2016, 39(1): 1-8.
- [50] 崔丙维, 刘颖杰, 王昕, 等. 公路气象灾害风险隐患点特征分析研究. 第五届气象服务发展论坛——气象服务与信息化, 天津, 2015年10月15日.
- [51] 王景红, 赵世发, 王建鹏, 等. 西汉高速公路气象保障服务系统. 陕西气象, 2004(6): 32-35.
- [52] 冯民学, 顾松山, 卞光辉. 高速公路浓雾监测预警系统. 中国公路学报, 2004, 17(3): 92-97.
- [53] 王慕华, 唐卫, 渠寒花, 等. 面向公众出行的公路交通气象服务系统. 气象科技, 2015, 43(5): 992-997.
- [54] 狄小峰, 阮驰, 李春里, 等. 公路网交通气象环境与路面状况监测设备研究. 中国科技成果, 2015(17): 25-26.
- [55] 尹志聪, 丁德平, 李迅. 我国高速公路气象监测站的适用性分析. 第28届中国气象学会年会, 厦门, 2011年11月9-11日.
- [56] 李效东. 北斗卫星系统在气象综合监测网中的应用. 福建气象, 2005(1): 27-30.
- [57] 李悦. 气象卫星在雾的遥感监测中的应用与存在的问题. 科学中国人, 2015(13), doi: 10.3969/j.issn.1005-3573.2015.13.185.
- [58] 孟春雷, 张朝林, 郑祚芳, 等. 道面气象条件的数值预报模型及性能检验研究. 第七次全国动力气象学术会议, 景德镇, 2009年4月22-26日.
- [59] 黄政, 袁成松, 包云轩, 等. 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. 气象, 2016, 42(8): 944-953.