

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, [KANG Yanzhen, WANG Shigong, YANG Xu, et al. Progress of Traffic Meteorological Researches About Monitoring and Forecasting Services on Express Highways[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4):591-603], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0591

高速公路交通气象监测预报服务研究进展

康延臻¹,王式功^{1,2},杨旭¹,李景鑫³,徐文君⁴,尚可政¹

- (1. 兰州大学大气科学学院,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730000;
2. 成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,四川 成都 610225;
3. 中国气象科学研究院,北京 100081;4. 中国人寿财产保险兰州分公司,甘肃 兰州 730000)

摘要:高速公路交通运输是国民经济建设和民众出行的大动脉,它对气象条件具有高敏感性。不利的天气条件易导致交通事故频发,造成财产损失和人员伤亡,已成为社会各界广泛关注的热点问题。本文系统梳理了国内外高速公路交通气象监测预报服务研究进展,重点介绍高速公路交通气象监测预报研究发展历程,分析几类恶劣天气对交通运输安全的影响与机理,最后探讨了中国特色高速公路交通气象监测预报预警服务系统建设的内容、特点及趋势。结果表明,以雾为主的低能见度、道路积雪和结冰、强降水等是影响高速公路安全运行的主要气象因素。本研究旨在促进我国交通气象学科的发展,提升现代化高速公路交通气象监测预报预警服务水平,并为科学决策道路建设、防范和应对交通事故、保障财产和生命安全提供参考依据。

关键词:高速公路;交通气象;交通安全;监测预报;恶劣天气;预警服务

文章编号:1006-7639(2016)-04-0591-13 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0591

中图分类号:P49

文献标识码:A

引言

交通运输作为国民经济和社会发展的重要基础,在切实保障人民基本生产生活、有力支撑社会经济发展方面意义重大。高速公路具有较一般公路快捷、高效的特点,是国家交通运输的大动脉,其发达程度是一个国家经济实力的重要标志。现代高速公路运输体系所追求的目标是“高速、高效、安全和舒适”,但随着运输量的增加和极端天气事件的频繁出现,高速公路的安全运营受到严重影响。大雾、降水、大风、沙尘暴、极端温度、雷电、积雪和道路结冰、以及由暴雨天气诱发的泥石流、塌方等地质灾害是影响安全行车的主要气象因素。

据统计,美国高速公路平均每年发生的600万起交通事故中约有170万是由恶劣天气引发的,造成约80万人受伤和7000人死亡^[1]。2001—2007年我国高速公路因不良天气条件引发的事故数和死亡人数呈逐年上升趋势,每年约有30%的高速公路

交通事故与不良天气条件直接有关,不良天气条件下高速公路交通事故伤亡人数约占交通事故总伤亡人数的20%^[2-3]。近年来,全国平均每年高速公路交通事故死亡人数近12万人,其中约70%与气象原因有关。如2013年1月31日,北京市冻雨和降雪天气形成的“地穿甲”现象,造成道路行人摔伤和车辆刮蹭、追尾等事故,半天内达2000余起,造成至少4人死亡;2015年12月8日,在山西太长高速公路太原方向王村桥路段,因大雾能见度极低,发生多起多车相撞道路交通事故,共涉及车辆33辆,造成6人死亡、4人受伤;交通运输部安全委员会发布的《交通运输安全生产事故报告(2013年)》显示,由于恶劣天气事故多发,2013年全国道路、水路运输以及交通运输工程建设领域共发生一次死亡3人及以上的安全事故280起(件),死亡失踪1336人。另外,不良气象条件引起的机动车辆交通事故保险理赔案件也呈逐年增多趋势。如2005年,北京地区的雹灾、福建地区“龙王”台风形成的大面

收稿日期:2016-01-14;改回日期:2016-03-31

基金项目:国家基础科技条件平台建设“交通安全与健康出行气象保障服务专题”(rkpt-2015)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306047)和兰州大学中央高校基本科研业务费(lzujbky-2013-m03)共同资助

作者简介:康延臻(1992-),男,山东鄄城人,硕士研究生,主要从事现代天气预报技术研究。E-mail:kangyz10@lzu.edu.cn

通讯作者:王式功(1955-),男,山东安丘人,教授,主要从事现代天气预报技术研究。E-mail:wangsg@lzu.edu.cn

积水灾,直接造成当地机动车辆损失几千万元;据山西省保监局不完全统计,2013年4月19日山西大部分地区受罕见暴雪影响,因暴雪灾害引起的路滑车辆碰撞的保险理赔案件2473起,理赔金额高达925.55万元。

高速公路交通安全与气象条件关系非常密切。欧美等发达国家早已建成了四通八达的高速公路网络,因此极其重视道路交通安全对气象条件的需求,并投入大量的人力、物力、财力进行预报方法和服务手段的研究,取得了大量的研究成果^[4]。我国自1988年第一条高速公路沈大线建成通车以来,高速公路通车里程不断增长,截至2015年底,高速公路总通车里程已增至 12.5373×10^4 km,机动车保有量达2.79亿辆,其中汽车1.72亿辆。2016—2020年(十三五时期)是高速公路加快成网的关键时期,提出了高速公路建设的5个任务,从而使高速公路作为综合交通运输体系的重要组成部分发挥支撑和引领作用。此外,根据《国家公路网规划(2013—2030年)》,到2030年将基本建成覆盖全国的高速公路网,其中国家高速公路共36条,达11.8万km。

我国社会经济快速发展,特别是物流等行业异军突起,使道路交通呈现出交通流量高位增长、交通工具日趋多元、群众出行需求日益旺盛新格局的同时,也造成了高速公路交通事故发生率大幅攀升。高速公路交通事故的发生是人员、车辆、道路、天气等因素综合作用的结果,10 mm以上降水(雨、雪)、冻雨(道路结冰)、雾(大雾、团雾)、扬沙、沙尘暴等恶劣天气现象是高速公路交通事故的重要诱因。据湖北省公安厅高速公路警察总队统计^[5],高速公路40%的交通事故发生在阴天,38%的交通事故发生在雨天。以汉宜高速为例,汛期(5—9月)是交通事故高发时期,冬季(12月—翌年2月)其次,春季(3—4月)及秋季(10—11月)事故发生较少,这与汛期不利气象条件的多发密切相关。

我国的高速公路建设发展迅速,在国民经济发展、国防建设和人民生活水平提高等方面都发挥着重要作用。基于高速公路交通事故对气象条件高度敏感性这一事实,迫切需要加强高速公路气象监测预报预警服务系统的建设,而公路气象预报信息系统作为国家交通(公路)信息服务平台的7大系统之一,其重要性正在不断被社会认可和提升^[6]。高速公路气象监测预报预警服务系统首先为驾驶员、道路养护人员、应急救援人员和交通指挥管理部门提供及时准确的路况运行和气象信息,为政府部门科学决策提供依据,进而采取积极有效的措施改善

道路交通条件和使用性能,以延长道路的使用寿命;其次在重大气象灾害发生时,高速公路管理部门可提前根据交通气象预报做出应急安排,以便预防或减轻灾害性天气造成的危害,确保高速公路安全畅通;再者,气象信息有助于在建或拟建高速公路的线路规划、工程建设及灾害防御科学决策,从源头上预防不利天气对高速公路安全运行造成危害。据2011年交通运输部与中国气象局评估证明,交通气象服务对公路交通行业发展的贡献率超过1.09%。实践证明,在危险天气来临前,准确及时的道路交通天气预报预警服务是保障交通安全的重要举措。高速公路交通气象监测预报服务系统具有重要实用价值^[7-8]。

虽然我国高速公路交通气象监测预报预警服务研究与应用得到进一步加强,但在现有高速公路气象监测技术条件下,对路面温度变化规律、不同降水类型(强度)形成的结冰过程、路面积水深度变化等物理变化的认识具有一定局限性,同时大部分地区高速公路气象监测预报预警服务系统的研究与开发尚待完善。为满足我国现代化高速公路建设和发展需求,迫切需要建立一个立体化、网络化、信息化、智能化、高效安全的现代化高速公路交通气象监测预报预警服务系统。本文试图在总结国内外高速公路交通气象监测预报研究进展的同时,重点分析了恶劣天气状况(大雾、低能见度、强降雨、降雪、大风、极端温度、冰雹、雷电等)对高速公路交通运输安全的影响及其机理,并探析高速公路交通气象监测预报预警服务系统建设的内容及特点;在分析我国交通气象监测预报服务发展趋势的基础上,提出有针对性的建议。旨在为保障安全运行和减少人民生命财产损失、提高我国智能化高速公路建设提供科学依据。

1 高速公路交通气象监测预报研究发展历程

现代交通运输体系所追求的安全、快速、高效和经济适用,在很大程度上受到气象因素的影响和制约。面对全球气候变暖引起的极端灾害性天气增多以及世界经济社会快速发展的新常态,有效保障恶劣天气条件下的交通安全,力求获取最大的经济效益和社会效益,提高应对交通气象灾害处理能力,是一项重要而紧迫的任务。交通气象监测预报服务的好坏,直接影响到高速公路运输系统和设施的安全、效率及经济效益,具有增强运输安全和保障经济效

益的双重作用。

高速公路交通气象监测预报服务系统是道路交通气象的重要组成部分,普遍受到各国政府的高度重视。随着道路交通气象科学研究的不断发展及国际合作的加强,1984年第一个国际性交通气象组织即欧洲交通气象委员会(Standing Europe Road Weather Commission, SERWEC)在哥本哈根宣告成立,1992年更名为国际交通气象委员会(Standing International Road Weather Commission, SIRWEC),旨在进一步促进全球范围内公路交通气象领域的知识交流。成员国主要集中在欧洲、北美,每2 a举办一次全球公路气象大会,主要开展道路安全维护管理、气象学、环境保护等道路气象领域间的信息交流,致力于降低和减少气象条件对交通的不利影响。合作研发的 Road Weather Information System (RWIS),已在30多个国家和地区使用,产生了显著的经济社会效益。国外的交通与气象一体化进程及其研究成果,为我国公路交通气象研究提供了宝贵的经验。我国已加入 SIRWEC 组织,并参加了14~17届 SIRWEC 研讨会议。

1.1 国外研究现状

交通气象服务水平高低,主要依靠基于实时公路沿线观测数据和分析预报集成系统。北欧、美国、加拿大、日本等发达国家在公路交通气象服务方面的工作起步较早,并根据自身需求开展了大量卓有成效的工作,积累了丰富的经验。一些国家建立了道路气象信息系统(RWIS),其数据采集系统利用传感器收集和监控影响安全运行的道路小气候数据,包括温度、风速、风向、降水和湿度等变化状况,每隔一定时间自动将数据传输到道路管理信息系统中。管理人员通过对数据分析来评价未来气象条件对道路运行可能带来的影响,制定应对措施,从而保障公路的正常、安全运行,同时还可以为道路养护人员提供实时的道路信息,有助于对道路进行合理维护管理。

1.1.1 欧洲

在1980年代,德国、挪威、瑞典、芬兰等国家先后建立了道路气象实时监测预报系统,并将许多开创性的应用成果逐渐推广到世界各地。挪威主要通过雷达和卫星对极端天气条件下道路的天气状况进行监测,为道路管理部门提供地面监控资料,以文本形式发布一般天气预报产品及恶劣驾驶条件下山地、峡谷等地的特殊天气产品。近期,主要致力于研发能够自动生成预报结果、跟踪监测结果的公路气象条件预报模型。芬兰气象局和道路维护公司合作

成立了道路天气服务中心,2000年开始使用道路交通模式为道路交通提供地面结冰、霜冻、雾凇、变温、地面雨水、冻雨、雾、降雪等天气状况和预报服务,用于指导道路维护活动,保障行车安全,减少人员伤亡和维护成本。气象学家、道路维护公司和汽车驾驶人员,通过手机输入出发时间、目的地等信息就可以查阅道路沿线的天气状况^[9]。德国建立了公路天气信息系统,利用气象部门短期天气预报和在公路上安装的滑溜预警设施及公路天气监测系统,来实时监测常规气象要素以及路面状态。英国开发了3种道面温度预报模型^[10-12],其中 Icebreak model 发展成为可提前6 h 预报路面温度状态的自动预报模式,误差在1℃左右。且公路管理站依托气象局在交通事故易发的陡坡、岔坡道上安装的监测雷达,发布位于风暴路段的交通气象预报,降低了不利天气对旅客、运输货物及交通设施带来的风险,使交通事故明显减少,为政府节约了大量资金。

1.1.2 北美洲

美国和加拿大领土面积广阔,自然气候条件较西欧诸国复杂多样,因此对高速公路预报与监测系统的研究和应用更为重视。1990年代,美国联邦高速公路局与国家气象科研单位合作建立了道路气象预报系统,进行冬季公路的维护^[13]。2001年美国佛罗里达州开发了道路气象信息系统,首要目标是为交通部门道路的使用者、灾害管理部门等提供及时有效的天气预警信息,以便保证交通安全,减少与天气相关的交通事故,提高预警管理能力。2004年,美国交通部联邦高速公路管理局提出建立“国家范围地面交通天气观测和预报系统的建设方案(CLARUS)”计划,由美国交通部门、气象部门及多所大学科研机构联合设计完成,在进行广泛验证后已进入推广使用阶段。另外,美国各州也积极发展适合本地区的道路气象监测与预报系统。如华盛顿州建立了适合当地天气的道路路面预报模式,用于路面温度等气象要素的预报,并利用网站发布道路实时天气预报信息。田纳西州的低能见度预警系统覆盖了30.6 km 道路,设置2个环境监测站和8套能见度监测仪。美国也有很多私人公司参与制作道路气象信息与36~48 h 预报,用户在付费后可以随时了解高速公路路段当前天气情况及未来趋势。多年来,道路气象监测预报服务给美国带来显著的经济效益。美国爱达荷州依据天气预报对第12号高速公路29英里路段进行防冰冻预处理,减少了62%的道路维护时间和83%的研磨剂用量,事故发生率也因此降低了83%^[14]。研究显示,道路气象

预报系统所产生的直接经济效益约为投入成本的 2 倍,而间接经济效益高达 10 倍。Boon 等^[15]通过评估华盛顿全面使用交通气象信息服务系统及相关运输效率,进一步确定研究费用和产出效益之比为 1:5。目前,美国在各州道路天气信息系统的基础上,正在形成国家级的道路天气信息系统,并逐渐成为智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的组成部分,应用范围和功能将进一步扩大。

加拿大已研制了路面状况预报模式(Model of Environment and Temperature of Roads, METRo)^[16],该模式由路面能量平衡模块和路面材料热传导模块及路面水、雪、冰积聚模块组成,可在人工与自动 2 种状态下运行,提供每日 2 次的 24 h 路面温度预报,其独特的误差耦合订正机制使预报误差约在 ± 2 K 左右。近年来, METRo 还在欧洲斯洛伐克、斯洛文尼亚和捷克等国家得到推广应用,取得了良好的效果。

鉴于大部分欧美国家处于中高纬度地区,地理气候区域特征使高速公路运输易受到低温雨雪冰冻灾害的影响。因此,公路交通气象预报系统侧重于路面状态(尤其是道路结冰)预报模式的研究。1957 年,美国学者 Barber^[17]最早利用热传导方程来确定路面最高温度。Christison 等^[18]以一维热传导方程为基础,建立了基于有限差分方法求解沥青路面状况的预估模型,并将其模拟结果作为初始条件和边界条件代入预估模型,最终获得路面温度状况预报。1980 年代后,利用交通气象观测数据和以辐射能量平衡为基础建立的路面模式温度场改进算法,再同化各种有效参量建立的路面状况预报模型得到迅速发展^[19-20]。为提高高速公路上路面温度、降雪、结冰及积水深度的预报水平,在传统的路面模式改进过程中,基于 GIS 和物理模型的地形^[21]、车流量^[22-23]、环境风^[24]、气温^[25]、云量^[26]和工业盐播撒^[27]等影响道路表面辐射能量平衡的相关因子,已被广泛应用。其中在道路结冰预报时,充分考虑了路面辐射能量平衡方程、路面特性以及人为影响(诸如车流量、工业盐播撒),为有效、定量地确定撒盐的时间和数量节省资金,以及提高应急防御效率提供重要科学依据。

1.2 国内研究现状

交通气象信息是智能交通系统(ITS)的基础,高速公路交通基本信息可划分为静态信息和动态信息。静态交通信息,包括道路条件信息、沿线交通设施信息和环境信息等;动态交通信息,包括实时交通状态、公路施工、特殊管理情况和气象环境信息等。

高速公路交通气象监测预报预警服务系统,主要包括高速公路自动气象监测、信息传输、数据库、交通气象分析预报系统和预警服务系统(手机短信、高速公路显示屏、电视网络等等)。其中,网络式交通气象综合监测站(Transportation Meteorological Station Base Network, NTMS)是 ITS 系统的基本组成单元,其综合信息采集、信息处理、网络通讯和基站的自身安全监控能力以及对危险环境信息自识别能力等,直接影响 ITS 基础信息的准确性。华云等公司针对我国高速公路沿线气象环境监测预警需求,开发的高速公路气象监测及预警系统(Highway Meteorological Monitoring and Warning System, HMWS),主要由高速公路气象与环境监测系统(Highway Meteorological Monitoring System, HMS)、高速公路气象灾害预警发布系统(Highway Meteorological Disaster Issuing System, HMI)和高速公路气象环境灾害预警中心站(Highway Meteorological Warning Center, HMC)构成,已在山东、河北和贵州等城市推广应用。

我国交通气象信息监测系统研究虽然起步较晚,但近几年发展速度较快,主要得益于气象观测技术的进步和我国公路交通建设的快速发展。1990 年代,我国公路基础设施实现了跨越式发展。全国公路通车里程净增 37×10^4 km,是 1980 年代净增里程的 2.6 倍。特别是高速公路通车里程由 1990 年代初的几百公里增长到 1.6×10^4 km,高等级公路的比重提高了 9%,公路密度已达每百平方公里 14.6 km。2004 年我国公路通车总里程达 187.1×10^4 km,其中高速公路里程达 3.4×10^4 km,位居世界第二位。1988—2015 年,我国从“2 纵 2 横和 3 个重要路段”,发展到“5 纵 7 横”,再到“7918”纵横华夏大地的高速公路网,高速公路里程已达 12.5373×10^4 km,超过美国居于世界第一。

我国自然气候状况与欧美等发达国家有明显差异,道路气象条件局地性十分显著。尤其是雾对道路交通安全的威胁较发达国家严重得多,因此雾对于交通安全影响的相关研究开展较早。1996 年,江苏省气象局和沪宁高速公路运营管理部门紧密合作,开展了高速公路气象条件监测、预报预警服务等试验。因冬、春季京珠高速公路粤境北段南岭大瑶山浓雾频发,交通部与中国气象局热带海洋研究所合作,于 1998 年首次在高速公路设计施工阶段有针对性地对危害行车安全的浓雾进行专项研究。1999 年,上海沪杭高速松江荣乐路段第一座交通气象站的建立,标志着我国正式开展道路交通实时气象信

息监测工作。20世纪末,江苏、安徽、上海等省份率先在高速公路沿线建成带有能见度传感器等气象要素观测仪器的高速公路气象监测站。2005年5月29日,交通运输部和气象局首次联合发布“全国主要干线公路交通气象预报”,标志着我国公路交通气象信息服务工作步入常态化;7月27日,交通部和气象局“关于开展公路交通气象预报备忘录”的签署,揭开了我国交通气象预报的历史新篇章。

2006年12月,中国气象局和上海区域气象信息中心协作开展华东区域交通气象监测预报研究,分阶段在沪宁高速公路上安装了26套我国自主研发的AMW环境气象监测站。2007年,北京市气象局采用芬兰ROSA仪器建立了18个高速公路气象监测站,并利用自主研发的数字化能见度仪建成了6个能见度观测站。随后,天津、辽宁、河北、陕西和山西等省气象部门积极跟进,在陆续建设公路沿线自动气象观测站(包括能见度、风向、风速、气温、湿度、雨量、路面状况等)的同时,以多种方式告知管理人员和驾驶员等恶劣或极端天气信息,提高安全行车水平。根据交通部和气象局的通知要求,各级气象部门也积极开展公路交通气象信息预报服务的研究工作。

2010年8月31日,交通部与中国气象局联合下发了《关于进一步加强公路交通气象服务工作的通知》,要求共同推进公路交通气象观测站点网络建设,以雾、雨、雪、低温冰冻、沙尘暴等影响公路交通安全的灾害性天气监测为重点,按职责分工,在高速公路和国、省干线公路及重点旅游公路沿线,积极推动建立专门的交通气象观测站网和视频实景观测系统。同时,还制定了我国交通气象行业标准。从2010年10月起,中国气象局开始为交通运输部、公安部交管局及旅游局等单位提供与交通安全相关的交通高影响天气监测预警产品。但是,到2011年底,我国在高速公路沿线建成的交通气象观测站为1422个,其中能见度和路面状况观测站分别为785个和305个,仅能提供不到10%的高速公路沿线气象监测信息,大大制约了我国交通气象灾害预警能力的提高。

2013年8月15日,华北区域公路交通气象灾害监测预警服务系统建设(一期)通过专家验收,加快了我国高速公路交通气象监测预报预警服务标准化建设的进程。该项目在完善交通气象监测网络建设的基础上,建立了高速公路交通气象灾害预警指标体系以及精细化预报技术方法模型(包括强浓雾

的消预报指标、路面温度或道路结冰模型、爆胎气象指数及行车气象指数等)。同年12月31日,中国天气网正式上线交通气象频道,推出主打交通气象产品“公路天气通”,发布国内52条高速公路及西部主要国道、全国主要机场等天气信息,以及各地交通、路况、洗车指数。根据我国高速公路沿线交通气象观测站建设应用经验,针对“密布式”道路气象监测站浪费资金和能源的缺点,应用热谱地图技术^[28],构建优化合理的“基站式”道路气象站布设方案^[29],进一步提升了高速公路气象观测技术水平,使我国交通气象研究步入了新阶段。另外,随着许多重大道路交通气象研究项目的相继投入应用,取得了显著的经济社会效益。如上海世博会交通气象预报在世博交通安全保障中发挥了积极作用;“冬季路面温度空间分布规律”成果在京哈高速北京至山海关路段的应用,优化了道路气象监测站的布设,并搭建了路段级高速公路气象监测预警系统。

2 气象因素对高速公路交通安全的影响及其机理

高速公路交通气象观测站网是国家公路网运行监测与服务系统的重要组成部分,也是国家气象监测网的重要补充。众所周知,10.0 mm以上降雨(雪)、冻雨、雾、大风、扬沙、沙尘暴、冰雹、雷电等恶劣天气条件,不仅严重影响高速公路的安全运行,而且对道路设施也有较大影响。如2014年2月7日,冀、晋、鲁、豫、陕、京等地出现中到大雪或暴雪天气,受持续降雪影响,部分地区出现道路结冰,先后造成13个省(区、市)90条高速公路113个路段封闭,北京和郑州等20个机场均出现不同程度航班延误。由此可见,准确可靠的恶劣天气监测预报预警信息,无论是对交管人员还是司乘人员,都显得尤为重要。

2.1 大雾与低能见度

在我国大部分地区引起恶性交通事故的天气现象中,大雾、沙尘及沙尘暴等低能见度天气影响最大。特别是造成<50 m的超低能见度的浓雾是引发重大交通事故的重要原因。南京地区日平均气温在2~12℃、最低能见度在200~500 m范围内,与日交通事故量呈显著负相关^[30]。这是因为雾天易造成视程障碍,特别是“团雾”,最容易引发恶性交通事故。大雾天气车窗内侧易发生水汽凝结而影响视线,尤其是在适宜温、湿条件下,路面会形成薄霜,伴随雾滴和道路上积累的油与泥土的混合作用,严重降低轮胎与路面的附着系数,从而导致制动距离

延长、行驶打滑、制动跑偏等现象发生。1975年,在美国加利福尼亚通往纽约的高速公路上,发生了全球最严重的一起由大雾引起的交通事故,造成300多辆汽车相撞、1 000多人死伤^[31]。我国高速公路因浓雾导致的恶性交通事故也时有发生。邓长菊等^[32]指出,2007—2009年北京各条高速公路封闭的原因,其中90%以上都是由雾引起。大雾是造成低能见度危害的主要原因,其中浓雾和“团雾”对交通安全与畅通的危害更大。因此,研究并揭示雾的孕育过程、触发机制、发生发展规律,是开展能见度预报的关键着眼点和有效途径。影响雾生消的因素很多,近地层水汽饱和度、中低层大气层结稳定度、近地面乱流和湍流状况及地面辐射冷却等都是影响大雾低能见度生成和发展的重要因素^[33]。在有利天气形势下,水汽、降温 and 凝结核是大范围浓雾形成的基本要素。由于高速公路昼夜车流量大,汽车尾气中包含的大量碳氢化合物、细小的炭烟和汽车扬起的大量灰尘等都可作为凝结核,有利于浓雾的形成^[34]。

团雾具有突发性、波动性、局地性和滞后性等特点,其形成发展也具有季节性,并与高速公路沿线特殊地形地貌密切相关。在相同天气背景下,山地、丘陵与河湖较多的地方易形成反复跳跃式的团雾。局地微气候环境的影响,或高速公路附近空气中污染物微小颗粒的增加(如秋季秸秆焚烧、工业粉尘污染、汽车尾气排放等),都有利于雾霾和团雾的形成。团雾中数十米到上百米的局部范围内,出现的雾气更“浓”、能见度更低。通常团雾外围视线良好,但内部一片朦胧,预报特别困难。2013年6月4日06:00,在京港澳高速公路河南驻马店833~841 km路段,由于突发团雾,引发东西两侧16起交通事故,造成56辆车相撞,致14人死亡。浓雾滴对可见光有强烈的散射作用,造成严重视程障碍,当能见度

降到30~40 m及以下时,驾驶员容易对车速、车距产生错觉,从而造成交通事故。随着城市空气污染的加重,发生在雾霾天气条件下的低能见度灾害逐渐增多^[35],一方面雾和霾影响能见度的物理机制显著不同,另一方面二者的协同效应对能见度影响的物理机制更为复杂,这需要在加强高速公路天气预报研究的同时,还应加强与之相关联的环境气象预报研究工作。

唐亚平等^[36]利用沈山高速公路沿线10个交通气象站的气象观测资料,采用多元逐步线性回归、最小二乘曲线拟合以及MLP神经网络等方法建立数学模型,对北方公路路面温度、能见度以及冰雪路面等交通气象环境进行判别和预报。得到不同能见度下安全行车速度(表1)和交通安全指数分级标准及路况(表2)。由此可见,能见度的好坏受多种气象条件的影响,且不同能见度条件下安全行车速度差别很大。

2.2 大风、沙尘与雷电

大风、沙尘暴等天气多发生在我国西北、华北甚至华东地区,强风将地面大量沙尘吹起,造成空气浑浊,水平能见度较低,严重危害交通安全。2014年4月23日上午,10级以上大风、沙尘暴在新疆轮台县境内的库库高速公路(巴州轮台县至阿克苏库车县)497 km处发生6车追尾事故,造成1人死亡、2人重伤、28人轻伤。大风、扬沙或沙尘暴天气除对交通设施造成危害,甚至掩埋公路,严重影响高速公路的安全运行外,还会增加车辆行驶阻力,影响行车方向控制和稳定性,侧向风过大时可能会导致车辆侧翻。

雷电也是影响高速公路交通安全的气象因素之一。其危害主要体现在对高速公路沿线通信设备(如交通信号灯、公告牌等)的损害,造成通信中断,影响安全运营。

表1 不同能见度下安全行车速度^[36]

Tab. 1 The safe driving speed under different visibility conditions

| 能见度/m | 安全车速/km·h ⁻¹ | | | 应急措施 |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|------|
| | 冰路面 | 潮湿路面 | 干燥路面 | |
| $V < 50$ | $C < 25.2$ | $C < 38.7$ | $C < 43.4$ | 封路 |
| $50 \leq V < 100$ | $25.2 \leq C < 42.5$ | $38.7 \leq C < 69.2$ | $43.4 \leq C < 80.5$ | 限速 |
| $100 \leq V < 200$ | $42.5 \leq C < 66.5$ | $69.2 \leq C < 112.9$ | $80.5 \leq C < 120$ | 限速 |
| $200 \leq V < 500$ | $66.5 \leq C < 113.7$ | $112.9 \leq C < 120$ | $C < 120$ | 限速 |
| $500 \leq V < 1\ 000$ | $113.7 \leq C < 120$ | $C \leq 120$ | $C < 120$ | 警示 |

表2 交通安全指数分级标准及路况^[36]

Tab.2 The grading standard of traffic safe indexes and pavement condition

| 等级 | 安全指数 | 影响因子 | 路况 |
|----|------|------------------------------------|-------------|
| 1 | 安全 | 晴、多云、阴、 $V > 10$ km | 良好 |
| | | 低温 ≥ 2.0 °C、高温 ≤ 30.0 °C | |
| | | 风力0~2级 | |
| 2 | 较安全 | 烟雾、浮尘、轻雾、 1 km $< V \leq 10$ km | 能见度较好 |
| | | 30.0 °C $<$ 高温 ≤ 37.0 °C | 沥青路面变软、变粘 |
| | | 低温 < 2.0 °C | 路面易结霜 |
| | | 风力3~4级 | 良好 |
| 3 | 基本安全 | 小雨 | 路面潮湿或少量积水 |
| | | 中雨 | 路面明显积水 |
| | | 小雪、阵雪和小雪后一天 | 路面微量积雪 |
| | | 扬沙、雾、 500 m $< V \leq 1.0$ km | 能见度较差 |
| | | 高温 > 37.0 °C | 沥青路面变软、变粘 |
| | | 风力5~6级 | 路面有吹拂物堆积 |
| | | 中雪、大雪 | 路面积雪覆盖 |
| | | 中雪后1~3 d | 路面结冰 |
| 4 | 不太安全 | 大雪后1~3 d | 路面有厚实结冰 |
| | | 雨夹雪 | 冰水混合物、可形成冰面 |
| | | 大雨 | 路面大量积水 |
| | | 大雾、沙尘暴、风力7~8级 | 能见度差 |
| | | 50 m $< V \leq 500$ m | |
| | | 大雪 | |
| 5 | 不安全 | 暴雨 | 路面积水较多 |
| | | 浓雾、强沙尘暴、风力8级以上 | 能见度极差 |
| | | $V \leq 50$ m | |

2.3 强降水与冰雹

路面状况通常指道路表面的清洁状况及潮湿程度。路面状况随气候、地理位置、周围环境、交通量以及各种人为因素的不同而发生变化。路面结冰是造成交通事故频发的恶劣路况之一,可分为降雨结冰、降雪结冰和雨夹雪结冰^[37]。降水(包括雨、雪、冰雹等)天气引发的交通事故是一般天气的2~3倍。Andrey等^[38]指出,降水本身可以影响路面摩擦系数,降低路面附着力,造成路面积水和湿滑,增加制动距离,成为诱发道路交通事故的重要因素,若在此过程中出现雨淞或冻雨会使路面摩擦系数进一步降低,显著增大交通事故的发生率。相关研究表明,交通事故伤亡人数与降水量、相对湿度之间呈显著正相关,而与能见度、气压之间呈显著负相关^[39]。田艳等^[40]指出,在冰雪路面、积水路面与正常干

燥路面3种情况下,其交通事故发生概率之比为4.2:1.6:1,在寒冷地区这种现象更为严重。北方地区冰雪天气对交通影响很大,尤其是东北地区,严寒及冰雪路面对交通影响明显超过雾天气。刘勇洪等^[41]指出,冰雪强度(I_s)一般与降雪量、积雪深度、积雪持续时间、雪后降温程度等诸多因素有关。在结冰道路上,汽车驱动轮很容易打滑或空转,上坡、起步、停车时还会出现溜车现象。桥梁或风口路段由于降温较快,路面更易结冰,极易造成交通事故。另外,降雪伴随着大风天气形成的风吹雪可以造成视程障碍和背风积雪障碍2种危害,在路段背风区可在较短时间内埋没路基及车辆,是冬季风吹雪地区阻断交通的最重要原因^[42],尤其是在我国西北地区的新疆等省份,风吹雪是冬季公路交通阻塞的主要天气因素。研究表明,冰雪环境下,道路交通事故

伤亡率增加 25%,事故发生率上升 100%。如 2008 年初我国遭遇 50 a 一遇大范围的低温、雨雪和冰冻灾害,其影响范围和灾害程度最严重^[43],给贵州、湖北、湖南、安徽、江西和广西等 20 个省(区、市)造成重大灾害。据民政部统计,此次灾害受灾人口达 1 亿多人,直接经济损失达 500 多亿元。其中京珠高速受阻车龙最长达 90 km,滞留人员上万;京广线、京九线以及 17 个受灾省份的高速公路也不同程度地中断或关闭。

强降雨对道路安全的威胁也不容忽视,暴雨及以上量级的降雨过程能毁坏高速公路的基本交通设施,造成山洪泥石流、山体滑坡、道路受阻、路基塌方和桥梁毁坏等危害。当高速公路沿线平均日雨量达到中到大雨时,事故发生率明显增加。暴雨天气容易产生高速水膜滑行现象,此时车轮不是与路面接触,而是托在水膜上滑行,轮胎的摩擦力几乎接近于零,易造成刹车失控、方向盘不灵;当车辆急刹车、急转弯时,容易横向滑移、滑溜甚至翻车;短时强降雨可使能见度急速降低,汽车挡风玻璃被雨水遮盖,模糊不清,严重影响驾驶员视线,极易引发交通事故。此外,强降雨常伴有雷电,在无避雷措施附近的路段行驶时,司乘人员和车辆易遭雷击。

春夏之交、夏秋季节是我国雹灾的多发时段。冰雹天气具有较强的突发性,其危害主要表现在冰雹从高空急速落下的冲击力很大,具有很强的破坏力和造成道路障碍的能力。如 2010 年 5 月 2 日 15:00,一场突如其来的冰雹袭击了甬台温高速公路奉化尚田路段以及甬金高速公路洞桥出口,冰雹突袭造成挡风玻璃破碎、多辆车追尾,受损车辆近 100 辆。

总之,影响道路交通的气象因素是多方面的。李迅等^[44]对 G2 京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究结果表明,平均万辆车流的交通事故与同步综合气象参数呈正抛物线的偏右侧相关、自然指数相关或线性相关,即万辆车流的交通事故随不利气象参数的加大而增多。因此,在进行路面状况预报时,首先应该结合常规的天气预报方法对高速公路沿线区域做出精准的降水预报,确定降水类型;其次,根据高速公路路面动力、热力、水汽条件,沿线自然环境、地形地貌、车流量大小及理化参数和结构特征等,预报重点路面结冰时间、结冰厚度、冰膜与车辆间的摩擦系数等;此外,在进行结冰持续时间和结束时间预报时,也要充分考虑播撒工业盐对结冰融化产生的影响。

2.4 极端温度

交通事故的发生概率随着热应力条件的增加而

增大。气温不仅可以很好地表征区域的气候变化特点,也被公认为是评价道路使用性能最重要的环境影响因素之一。路面温度与气温的日变化规律很相近,凌晨降到最低值,午后达到最高值。然而,路面最高温度出现时间通常比最高气温早 1 h 左右,且数值明显比后者高;而路面最低温度和最低气温出现时间和数值却差异不大。当高速公路沿线平均高温 $> 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,事故率会突发性增加; $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温对事故灾害程度也影响较大。干燥路面,当温度 $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时摩擦系数较大,但随温度的升高变化较小;当温度在 $-5.0\sim 20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,摩擦系数随温度的下降而明显减小,尤其在 $-5.0\sim 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间具有显著的突变特征;当温度 $< -5\text{ }^{\circ}\text{C}$,摩擦系数随温度的下降反而有所增大,这主要与沥青路面的独特物理特性有关。

高速公路上温度过高会造成车辆轮胎内部气压显著升高,从而降低轮胎与路面间的摩擦系数,并增大爆胎几率,甚至还会引起汽车发动机自燃、自爆等严重道路交通事故。最高气温在 $28\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且相对湿度 $\geq 85\%$ 的闷热天气条件下,驾驶员会感觉头脑不清醒、体力不支、甚至中暑,从而明显降低紧急情况下驾驶员的反应速度和控制能力。而强降温或寒潮、低温天气除容易引起道路结冰积雪外,还会使汽车机械性能变差,给车辆操纵带来诸多困难,如低温造成汽车燃油发粘、不易雾化,在汽缸内难以点燃,以及汽车水箱冻坏等;气温一旦 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,汽车挡风玻璃上往往会结霜,在空气湿度大的地方还会在路面形成白霜,从而影响司机视线、降低机动车制动效能。

此外,路面温度过高时,由于沥青路面含有较多石蜡,热稳定性差,尤其是酷夏季节的中午,沥青路面表层温度接近 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,而温度 $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时沥青极易软化,引起路面粘着力增强,造成车辆运行速度和路面承载力大大降低的同时,还会使路面发生大面积损坏形变,影响其使用寿命和行车制动能力;水泥混凝土路面也会因受热膨胀而缝拥起凸。总之,通过对大量路面病害现场观察发现,不论是高温还是低温天气都会引起路面上各种裂缝类病害,缩短路面的使用寿命。

3 我国高速公路交通气象预报研究的特点与趋势

我国幅员辽阔,南北气候、地形差异大,公路交通气象观测站网建设和利用相对滞后,观测站点密

度较低,监测能力不足,监测数据分散,严重制约了公路交通气象服务的及时性和准确性。虽然我国高速公路交通气象研究工作取得了许多成果,但是研究水平与所产生的经济社会效益较发达国家还有一定的差距。

国外高速公路气象预报系统的应用,大多已精细考虑了交通流量、路面测站的天空可视因子对太阳辐射的影响等。国际上主要有3种路面参数预报模型:统计模型^[45]、基于GIS模型^[46-47]和物理模型^[48-49]。其中,物理模型因主要考虑了路面能量平衡、路面特性和人为热的影响等而被广泛应用。国内高速公路交通气象监测预报系统,主要采用气象因子与交通安全的天气学、统计学和数值预报模式等方法,来进行能见度(雾、区域性大风、沙尘及沙尘暴)造成的视程障碍预报和强降水、降雪、路面高温、道路结冰等对路面状况影响等预报以及气象灾害对交通运输影响的评估等。

3.1 高速公路环境对交通气象预报的影响

虽然气象条件对高速公路交通的影响很大,但在道路交通气象预报时,路况信息对局地天气条件的反馈作用也不容忽视。空气与沥青路面的比热有显著差异,一般情况下极端路面最高温度高于极端最高气温;相反,极端路面最低温度低于极端最低气温,表明路面温度的日较差明显大于气温日较差。高速公路及其周围不同的下垫面类型也会显著影响路面附近空气与路面的水热交换平衡;公路路基朝向、海拔高度、形状分布、充填方式和结构组成以及不同地形条件下的独特设计也会影响局地风向与风速。另外,高速公路上车流量的变化会引起汽车尾气排放量的变化,由此对局地环境、空气温度和流动状况也会造成一定的影响。

3.2 中国特色的高速公路交通气象预报预警服务体系

由于高速公路交通气象因素变化具有很强的地域性,其对交通安全高效运行的影响也不相同。如华北等地的大雾等低能见度、道路结冰等天气事件,对交通安全的影响更为频繁和严重;而华南等低纬热带地区,山区低能见度、高温、暴雨和台风等是高速公路主要的气象安全保障问题。多年来,我国高速公路交通气象预报预警服务系统的建设和运行,主要围绕京珠高速公路、沪宁高速公路和华北等地高速公路而开展。

3.2.1 京珠高速公路

1998年,交通部与中国气象局热带海洋研究所合作,在京珠高速公路粤境北段浓雾多发路段进行

了2期大规模的综合野外观测。利用外场观测资料,分析了南岭山地浓雾的气候背景^[50]、大雾天气个例的微物理特征^[51-52]、边界层结构特征^[53]、雾水和雨水的化学组分^[54-55]、浓雾的能见度、宏微观特征、气溶胶的分布特点及其湍流扩散能力^[56-57],探讨了浓雾形成的动力条件,并对其生消机制进行数值模拟研究^[58-59]。研究发现,冬春季南岭山地出现的雾是由复杂的微物理过程、局地地形、水汽输送与天气系统(华南准静止锋)等相互作用的结果,属于平流雾、爬坡雾类型,与辐射雾明显不同,局地山地抬升造成的水汽冷却凝结对雾的形成也起着重要作用。在上述研究的基础上,确定雾区可预测参数,提出雾与能见度的4种预测预报方法,成功开发出准确率较高的南岭山地高速公路雾区能见度集成预报系统,并确定了交通监控系统构成和外场设备布设规则^[60-61]。在高速公路上自动站与能见度仪布设后,利用观测资料对该路段雾区的能见度^[62]、路面温度^[63]与气象因子的相关性和演变特征进行深入分析,进一步丰富对该路段复杂气象条件的认识。

3.2.2 沪宁高速公路

1990年代末,沪宁高速公路股份公司与江苏省气象局合作,并联合一些科研机构、高等院校协同攻关,开展沪宁高速公路无锡段浓雾监测与预报的试验研究,初步揭示了沪宁高速公路浓雾形成的若干特征,设计了制作临近预报的流程,探讨了在高速公路沿线布设自动气象观测站的基础上制作低能见度预测的可行性^[64-65]。2005年7月20日,南京交通气象研究所正式成立,是我国交通气象监测预警预报与服务的专业研究机构。2006年12月16日,中国气象局上海区域气象中心区域交通气象业务中心在南京正式揭牌,主要负责华东区域交通气象业务工作。南京交通气象研究所与交通部门长期合作,在建成交通与气象部门之间信息共享网络系统的基础上,开发出高速公路浓雾等低能见度为主的气象灾害监测预警及临近预报系统^[66],在气象信息资源和业务系统的支持下,进行气象服务信息的发布和服务,共同构成了沪宁高速公路气象决策支援系统^[67]。随着高速公路气象监测资料增多和研究的深入,一些学者将WRF模式应用于雾的模拟研究中,取得了良好的效果^[68-70]。利用自动气象观测站资料,开展了高速公路路面温度极值预报的数值模型^[71]、基于逐步回归的最低路面温度统计模型^[72],在路面温度预报中发挥了积极有效的作用。另外,在强降水对交通的影响研究方面,确定了短时强降雨的预警阈值,制定了中短时强降雨预报预警的临

近预报流程^[73],探明了水平能见度与降水强度之间的负指数关系^[74]。

3.2.3 华北地区

我国华北地区由于地理纬度较高,冬季降水时往往伴随着道路结冰。早期开展的北京地区高速公路气象条件的相关研究,主要依赖于常规气象观测站的资料^[75-76]。但是,高速公路上高速且密集的车流、路面的热力特性和反照率、道路状况(桥梁和坡度等)、周边的绿化带和护栏等都会强烈影响气象要素,导致高速公路上的气象要素与周围环境存在很大的梯度。气象站点与高速公路一般相距较远,且观测数据代表周围环境的平均状况,尽可能避开极值易发区;并且没有道面状态、道面温度的相关观测,因此单纯使用气象站点常规观测资料无法很好地反映高速公路的真实情况。自从芬兰 Vaisala 公司生产的 ROSA 道路气象站在北京周边高速公路上大量布设后,通过质量检查和控制的道面气象监测资料,成为高速公路气象状况研究的首要参考依据,由此开展了高速公路大气能见度演变特征和物理因子分析^[77],以及与大尺度动力场、热力场间的关系^[78]、京津塘公路雾气候特征与环流特征的关系^[79]等一系列研究,并研发出京秦高速公路沿线浓雾和强浓雾天气生消的预报指标^[80],实现了高速公路低能见度雾的分级客观化预报^[33]。另外,以快速更新循环预报系统(BJ-RUC)为基础^[81],基于通用陆面模式(CoLM)发展了精细化路面参数数值预报模型(BJ-ROME)^[82],实现了路面温度、积雪厚度、积冰厚度和积水厚度的业务预报^[83]。还将路表温度资料同化到模式的初始场中,提高了雨天路面温度的预报效果,并增加了路面积水深度、降雪、道面结冰的预报。

另外,辽宁^[84-85]、陕西^[86-87]、甘肃^[88-89]等省份也相继开展了不利气象条件与交通安全气象监测预报研究,均取得了一些有价值的成果。

3.3 高速公路交通气象监测预报服务技术发展趋势

实践证明,雾(大雾、团雾)、降雪、强降雨、大风、极端温度、冰雹、雷电等恶劣天气条件,不仅严重影响高速公路的安全运行,还对道路设施产生较大影响。为有效维护国家交通运输设施,提高公路运输体系效率,未来高速公路交通气象监测预报服务技术将逐渐向精细化、专业化、规范化方向发展,主要有以下发展趋势:

(1)依靠大量的道面气象监测站和四通八达的网络系统,以及飞速发展的计算机和通讯技术,可建立高分辨率的气象数据采集系统,为建设交通气象

资料数据库奠定基础;

(2)在现代智能化交通气象监测预报预警服务系统(平台)和公路交通气象专业预报模式研发过程中,重视卫星云图、雷达、GPS、闪电定位仪等非常规资料的应用,并结合沿线自动气象观测站的实时资料和地理信息系统,针对不同地区,研发当地的路面气象数值预报模型和交通气象中强浓雾的生消预报指标、路面温度和道路结冰模型、爆胎气象指数、行车气象指数等预报方法;

(3)道路气象信息集成分发技术,未来将向着与精细化地理信息相结合的 WEB 自动化方向发展。在评估信息的可靠性和应用风险性的基础上,同时提供满足多种需求的预报或预警信息,并将专业术语转化为用户可以理解和应用的有效信息,通过多种方式(高速公路沿线的可变信息标志、警示标志牌以及广播、电视、短信、网络和现场发布)分发传播,让用户和交通运输系统的决策者得到实时、准确、及时的气象信息。

总之,未来先进的高速公路交通气象监测预报服务技术,将有利于科学防范和应对道路交通事故、保障财产和生命安全、促进我国智能交通运输的建设和发展,提供高水平的气象保障服务水平,从而更好地服务于“一带一路”建设和经济社会可持续发展。

4 结论及建议

(1)10.0 mm 以上降雨(雪)、冻雨(道路结冰)、雾(大雾、团雾等)、大风、沙尘(沙尘暴)、冰雹、雷电等恶劣天气是导致高速公路交通事故、道路阻塞、路产损失的主要原因之一。在 SIWEC 成立之初,主要致力于研制道路天气信息系统(RWIS),用以记录道路天气状况并尽早做出影响交通的恶劣天气预报,减少交通事故,保障运输安全;通过国内外大量卓有成效的工作,完成了 RWIS 规范汇编、通信标准、数据集成与共享指南、路面传感器的标定测试方法以及标准化天气与路况信息系统,为高速公路气象监测预报预警服务系统的建设奠定良好的基础;与此同时,高速公路交通气象预报技术发展的重要性和服务效益,也逐渐引起社会各界的高度重视。

(2)鉴于我国道路气象监测站建设时间较短,其观测资料普遍没有达到气候尺度的时间序列长度。在未来的相关工作中,一方面要加强道路气象信息监测网络的优化布设,建立稳定可靠的高速公路气象信息采集体系和机制;另一方面要开展国家气象观测站与道路气象监测站资料的综合应用研究,结合气象卫星、雷达、GPS、闪电定位仪等非常规

观测资料进行高速公路交通气象要素的反演应用及同化,丰富交通气象监测信息内容,为道路交通数值天气预报模式系统的建立与业务化提供精细化初始场。

(3)以雾(大雾、团雾等)为主要因素的低能见度、道路积雪结冰是影响高速公路安全运行的重要因素。准确及时的高速公路沿线路面状况预报预警模式的开发和完善,有利于科学防范和应对交通事故,进而成为财产和生命安全的重要保障。目前,我国对大范围平流雾的预报已经相当准确,但对于道路安全行驶造成极大危害的小范围能见度骤降的团雾和短历时强降水的预报准确率仍较低。近年来,随着环境污染的加剧,雾霾逐渐成为重要的低能见度天气现象,也是未来交通气象研究中一个值得关注的课题。

(4)加强现代化交通气象监测预报预警服务系统(平台)和公路交通气象专业预报模式的研发。特别是路况预报时,要注意普通高速公路路段和高架桥、山区等特殊路段间的气象环境场的差异,在模式预报中还应考虑人工播撒融雪剂后路况的变化,并对比模式预报结果与观测值的差异来不断改进模式的初始场及算法,发展完善路面气象预报系统与中尺度短期数值预报系统、临近预报系统的双向耦合技术,以便有效提高路面交通气象预报产品的普适性和针对性,进一步提升服务水平。

(5)要强化气象与交通部门之间的交流合作,开展精细化高速公路交通气象预报预警服务研究及应用,特别是短时临近灾害性天气预警服务,努力实现及时高效的分时段、分路段、不同路况的交通气象预报服务。同时要明确气象部门、交通部门预报预警信息制作和应用方面的责任和职责,为广大用户提供高速公路交通气象信息服务及产品相关的教育、培训。采用科学客观的方法开展交通气象服务效益评估,有利于更好地改进和完善服务水平,更好地为我国高速公路交通事业的持续快速发展保驾护航。

参考文献

- [1] 黎健,魏丽,傅敏宁,等. 美国交通气象信息国家需求评估报告[M]. 北京:气象出版社,2008.
- [2] 刘聪,卞光辉,黎健,等. 交通气象灾害[M]. 北京:气象出版社,2009.
- [3] 刘东,马社强,牛学军. 我国高速公路交通事故特点分析[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版),2008(4):65-68.
- [4] Perry A H, Symons L J. Highway meteorology[M]. London: E & Fm Spon, 1991.
- [5] 白永清,何明琼,刘静,等. 高速公路交通事故与气象条件的关系研究[J]. 气象与环境科学,2015,38(2):66-71.
- [6] 胡绍萍. 我国交通气象预报信息系统建设[J]. 中国交通信息化,2012(10):68-70.
- [7] 张朝林,张利娜,程丛兰,等. 高速公路气象预报系统研究现状与未来趋势[J]. 热带气象学报,2007,23(6):652-658.
- [8] 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.
- [9] 崔讲学,何志学,崔新强,等. 北欧交通气象服务考察总结[J]. 气象科技合作动态,2009(3):24-28.
- [10] Shao J, Lister P. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. Journal of applied meteorology, 1996,35(8):1352-1361.
- [11] Rayer P. The meteorological office forecast road surface temperature model[J]. Meteorological Magazine, 1987,116:180-191.
- [12] Thomes J E. The prediction of ice formation on motorways in Britain[D]. London:University of London, 1984.
- [13] Wikelius M J, Fleege E J, Rockvam J L, et al. Integrated state-wide road/weather information system in Minnesota. Preprints [C]//Fourth Int. Symp. On Snow Removal and Ice Control Technology, Reno, NV. Transportation Research Board, 1996:20.
- [14] Breen B D. Anti-icing success fuels expansion of the program in Idaho[Z]. Assistant Maintenance Engineer. Idaho Transportation Department, 2001.
- [15] Boon C B, Cluett C. Road weather information systems; enabling proactive maintenance practices in Washington state[R]. Washington:Washington State Department of Transportation, 2002:126.
- [16] Crevier L P, Delage Y. METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(11):2026-2037.
- [17] Barber E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports [J]. Highway Research Board Bulletin, 1957 (168):1-8.
- [18] Christison J, Anderson K. The response of asphalt pavements to low temperature climatic environments[C]//Presented at the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Grosvenor House, Park Lane, London, England, 1972. 11-15.
- [19] Hermansson A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1699:134-141.
- [20] Solaimanian M, Kennedy T W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation[J]. Transportation Research Record, 1993, 1417:1-11.
- [21] Shao J, Swanson J, Patterson R, et al. Variation of winter road surface temperature due to topography and application of Thermal Mapping[J]. Meteorological Applications, 1997, 4(2):131-137.
- [22] Prusa J M, Segal M, Temeyer B R, et al. Conceptual and Scaling Evaluation of Vehicle Traffic Thermal Effects on Snow/Ice-Covered Roads[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(12):1225-1240.

- [23] Chapman L, Thornes J E. The influence of traffic on road surface temperatures; implications for thermal mapping studies [J]. *Meteorological Applications*, 2005, 12(4): 371 - 380.
- [24] Gustavsson T. Variation in road surface temperature due to topography and wind [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1990, 41(4): 227 - 236.
- [25] Sass B H. A numerical model for prediction of road temperature and ice [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(12): 1499 - 1506.
- [26] Bogren J. Screening effects on road surface temperature and road slipperiness [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, 43(1): 91 - 99.
- [27] Fujimoto A, Tokunaga R, Kiriishi M, et al. A road surface freezing model using heat, water and salt balance and its validation by field experiments [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106: 1 - 10.
- [28] 汤筠筠, 李长城, 马雪峰. 基于热谱地图的京沈高速公路气象监测试验系统 [J]. *公路*, 2010(12): 24.
- [29] 汤筠筠, 包左军, 李长城, 等. 基站式道路气象站布设原理和方法 [J]. *公路*, 2009(8): 186 - 191.
- [30] 夏敏洁, 曹杰, 周文君. 气象条件与南京地区道路交通事故量的分析 [J]. *气象科学*, 2014, 34(3): 305 - 309.
- [31] 潘晓东, 蒋宏, 高昂. 雾天高速公路交通事故成因分析及安全对策 [J]. *交通标准化*, 2006(10): 200 - 203.
- [32] 邓长菊, 甘璐, 尤焕苓, 等. 北京城市浓雾特征及其与交通预报服务的关系 [J]. *暴雨灾害*, 2012, 31(2): 188 - 192.
- [33] 周须文, 时青格, 贾俊妹, 等. 低能见度雾的分级预报方法研究 [J]. *热带气象学报*, 2014, 30(1): 161 - 166.
- [34] 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 [J]. *气象科学*, 2009, 29(3): 414 - 420.
- [35] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾—霾发生的环境气象条件对比分析 [J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2031 - 2044.
- [36] 唐亚平, 张晋广, 张凯, 等. 北方公路交通气象环境识别及安全管理策略研究 [J]. *气象科学*, 2012, 32(4): 466 - 471.
- [37] 刘梅, 尹东屏, 王清楼, 等. 南京地区冬季路面结冰天气标准及其预测 [J]. *气象科学*, 2007, 27(6): 685 - 690.
- [38] Andrey J, Mills B, Leahy M, et al. Weather as a chronic hazard for road transportation in Canadian cities [J]. *Natural Hazards*, 2003, 28(2): 319 - 343.
- [39] 丁德平, 尹志聪, 李迅, 等. 京津塘高速交通事故与气象条件之间的关系 [J]. *公路交通科技*, 2011, 28(增刊): 115 - 119.
- [40] 田艳, 张志强, 张景涵, 等. 高速公路交通气象监测系统的研究与应用 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2011, 28(2): 86 - 89.
- [41] 刘勇洪, 扈海波, 房小怡, 等. 冰雪灾害对北京城市交通影响的预警评估方法 [J]. *应用气象学报*, 2013, 24(3): 373 - 379.
- [42] 陈晓光, 李俊超. 风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨 [J]. *公路*, 2001(6): 113 - 118.
- [43] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, 2008, 66(5): 808 - 825.
- [44] 李迅, 甘璐, 丁德平, 等. G2 京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究 [J]. *气象*, 2014, 40(4): 466 - 472.
- [45] Chapman L, Thornes J E, Bradley A V. Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 1: Statistical [J]. *Meteorological Applications*, 2001, 8(4): 409 - 419.
- [46] Thornes J E, Cavan G, Chapman L. XRWIS; the use of geomatics to predict winter road surface temperatures in Poland [J]. *Meteorological Applications*, 2005, 12(1): 83 - 90.
- [47] Chapman L, Thornes J. A geomatics - based road surface temperature prediction model [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 360(1): 68 - 80.
- [48] Bouilloud L, Martin E. A coupled model to simulate snow behavior on roads [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(3): 500 - 516.
- [49] Bouilloud L, Martin E, Habets F, et al. Road surface condition forecasting in France [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(12): 2513 - 2527.
- [50] 万齐林, 吴兑, 叶燕强. 南岭局地小地形背风坡增雾作用的分析 [J]. *高原气象*, 2004, 23(5): 709 - 713.
- [51] 邓雪娇, 吴兑. 南岭山地浓雾的物理特征 [J]. *热带气象学报*, 2002, 18(3): 227 - 236.
- [52] 唐浩华, 吴兑. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, 41(4): 92 - 96.
- [53] 邓雪娇, 吴兑, 唐浩华, 等. 南岭山地一次锋面浓雾过程的边界层结构分析 [J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 881 - 889.
- [54] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究 [J]. *气象学报*, 2004, 62(4): 476 - 485.
- [55] 吴兑, 邓雪娇, 范绍佳, 等. 南岭大瑶山雾区锋面降水的雨水化学成分研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 44(6): 105 - 109.
- [56] 邓雪娇, 吴兑, 史月琴, 等. 南岭山地浓雾的宏微观物理特征综合分析 [J]. *热带气象学报*, 2007, 23(5): 424 - 434.
- [57] 吴兑, 邓雪娇, 毛节泰, 等. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究 [J]. *气象学报*, 2007, 65(3): 406 - 415.
- [58] 史月琴, 邓雪娇, 胡志晋, 等. 一次山地浓雾的三维数值研究 [J]. *热带气象学报*, 2006, 22(4): 351 - 359.
- [59] Qi F, Anyu W, Shaonia F, et al. Numerical prediction experiment of an advection fog in nanling mountain area [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2003, 17(3): 337 - 349.
- [60] 李卫民, 李爱民, 吴兑. 高速公路雾区预测预报与监控系统 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [61] 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 [J]. *热带气象学报*, 2006, 22(5): 417 - 422.
- [62] 吴兑, 赵博, 邓雪娇, 等. 南岭山地高速公路雾区恶劣能见度研究 [J]. *高原气象*, 2007, 26(3): 649 - 654.
- [63] 吴晟, 吴兑, 邓雪娇, 等. 南岭山地高速公路路面温度变化特征分析 [J]. *气象科技*, 2006, 34(6): 783 - 787.
- [64] 黄建平, 梅清银. 沪宁地区辐射雾的微物理结构及其演变 [J]. *气象*, 1998, 24(5): 3 - 8.
- [65] 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 [J]. *气象科学*, 2003, 23(4): 435 - 445.
- [66] 冯民学, 顾松山, 卞光辉. 高速公路浓雾监测预警系统 [J]. *中国公路学报*, 2004, 17(3): 92 - 97.
- [67] 吴赞平, 王宏伟, 袁成松, 等. 沪宁高速公路气象决策支援系统 [J]. *现代交通技术*, 2006, 3(5): 91 - 94.

- [68] 万小雁,包云轩,严明良,等. 不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟[J]. 气象科学,2010,30(4):487-494.
- [69] 严明良. 沪宁高速公路低能见度浓雾特征及其数值模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
- [70] 包云轩,丁秋冀,袁成松,等. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验[J]. 大气科学,2013,37(1):124-136.
- [71] 朱承瑛,谢志清,严明良,等. 高速公路路面温度极值预报模型研究[J]. 气象科学,2009,29(5):645-650.
- [72] 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[J]. 应用气象学报,2009,20(6):737-744.
- [73] 吴建军,袁成松,周曾奎,等. 短时强降雨对能见度的影响[J]. 气象科学,2010,30(2):274-278.
- [74] 汤继涛,袁成松,包云轩,等. 一次苏南大暴雨过程数值模拟及其对交通能见度的影响[J]. 气象科学,2014,34(3):275-281.
- [75] 孟燕军,赵习方,王淑英,等. 北京地区高速公路能见度气候特征[J]. 气象科技,2001,29(4):27-32.
- [76] 王淑英,孟燕军,赵习方,等. 北京高速公路大气能见度与气象条件的相关分析[J]. 气象科技,2002,30(5):306-310.
- [77] 张利娜,张朝林,王必正,等. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析[J]. 大气科学,2008,32(6):1229-1240.
- [78] 张利娜,张朝林,王必正,等. 北京机场高速公路能见度与大气动力和热力因子的诊断及物理分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(3):260-272.
- [79] 吴彬贵,解以扬,吴丹朱,等. 京津塘高速公路秋冬雾气象要素与环流特征[J]. 气象,2010,36(6):21-28.
- [80] 赵娜,孟宪罗,马翠平,等. 基于高速公路气象监测数据分析的浓雾预报指标[J]. 气象科技,2015,43(1):145-150.
- [81] 范水勇,郭永润,陈敏,等. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用[J]. 高原气象,2008,27(6):1181-1188.
- [82] 孟春雷,张朝林. 路面气象数值预报模型及性能检验[J]. 应用气象学报,2012,23(4):451-458.
- [83] L M C. A Numerical Forecast Model for Road Meteorological Services in Beijing[C]//17-th SIRWEC Conference, Proceedings. - Andorra. 2014.
- [84] 李岚,李洋,邢江月,等. 沈大高速公路雾气候特征与气象要素分析[J]. 气象与环境学报,2009,25(1):49-53.
- [85] 李岚,唐亚平,孙丽,等. 辽宁省高速公路不良气象条件分析及服务探讨[J]. 气象与环境学报,2010,26(1):49-53.
- [86] 贺皓,刘子臣,徐虹,等. 陕西省高等级公路大雾的预报方法研究[J]. 陕西气象,2003(1):7-10.
- [87] 罗慧,李良序,胡胜,等. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型[J]. 应用气象学报,2007,18(3):350-357.
- [88] 钱莉,安颖颖,赵德强. 乌鞘岭高速公路路段多发交通事故的气象条件分析[J]. 干旱气象,2014,32(2):286-291.
- [89] 何金梅,王冬梅,李晓霞. 甘肃省高等级公路沿线大雾天气气候特征及其预报服务[J]. 干旱气象,2006,24(1):48-52.

注:本文共查阅了国内外相关研究论文 180 多篇,以上列出的仅是具有代表性的 89 篇参考文献

Progress of Traffic Meteorological Researches About Monitoring and Forecasting Services on Express Highways

KANG Yanzhen¹, WANG Shigong^{1,2}, YANG Xu¹, LI Jingxin³, XU Wenjun⁴, SHANG Kezheng¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reducing of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Sichuan Key Laboratory for Plateau Atmosphere and Environment, Chengdu 610225, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4. China Life Property Insurance Co., LTD., Lanzhou Branch, Lanzhou 730000, China)

Abstract: As an important department of the country, the expressway transport plays an increasingly significant role in economy development and resident trip. The highway traffic is highly sensitive to weather condition, and the adverse weather is easy to cause traffic interruption and accidents, and lead to property loss and casualties. Therefore, the highway traffic safety has become a new hot spot. In the paper, the research progresses of traffic meteorology on expressways about monitoring and forecast service in China and abroad were systematically combed. Firstly, the developments of traffic meteorology on highways about monitoring and forecast service in China and abroad were mainly introduced in detail. Then, the influences and mechanisms of several adverse weather conditions on traffic transportation safety were summarized. Finally, the content, characteristics and trend of the intelligent traffic meteorological monitoring and warning service system on highways in China were discussed. The results showed that the low visibility (fog mostly), heavy rainfall, road surface icing and snow were the main influential factors for the freeway operation and safety. The paper aims to promote the development of traffic meteorology in China, further improve the service ability of the monitoring, forecast and early warning of traffic meteorology on modern highways, and provide the reference for the scientific layout of road and prevention and response to traffic accidents to ensure the security of property and lives.

Key words: expressway; traffic meteorology; traffic safety; monitoring and forecast; adverse weather; early warning service