

牛苗苗,张宏芳,王莹. 高影响天气下的公路交通气象研究进展[J]. 陕西气象,2025(1):34-41.

文章编号:1006-4354(2025)01-0034-08

# 高影响天气下的公路交通气象研究进展

牛苗苗<sup>1</sup>,张宏芳<sup>1,2</sup>,王莹<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象服务中心,西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710014)

**摘要:**在气候变暖背景下,高影响天气对交通的影响愈发显著,为有效降低高影响天气带来的交通安全风险,公路交通气象研究日益受到学者们的重视。从高影响天气理论研究、预报预警技术研究及系统研发应用等三方面回顾了近30 a公路交通气象的研究成果,指出高影响天气不仅可通过降低能见度、减少轮胎与路面间的摩擦系数、改变驾驶员心理状态与驾驶行为等多种途径间接影响交通安全,还会直接影响地区交通参数及事故率,但在不同车辆类型、所处车道和雨雪天气强度下其影响程度不同,同时列举了部分地区高影响天气的量化阈值。综述了天气学方法、统计方法构建模型、模式模拟、神经网络构建模型四种技术在公路交通气象预报预警方面的应用及各种方法的优缺点。最后选取两类大雾交通气象预报预警系统和三类雨雪天气预报预警系统作为高影响天气交通预报预警系统代表,对其主要功能进行介绍。

**关键词:**公路交通;高影响天气;预报预警技术

**中图分类号:**P467

**文献标识码:**A

社会经济的快速发展使得交通运输能力和效率不断提高,但随之而来的交通安全问题也日益突出。公路作为我国交通运输的基石之一,由于其具有比铁路和航空更高的灵活性和便捷性,成为交通领域最不可或缺的部分。在众多影响因子中,高影响天气与公路交通安全密切相关。高影响天气是指对交通安全和通行能力产生不利影响的各种天气<sup>[1]</sup>,数据显示公路交通事故中有近30%是在高影响天气下发生的,且在全球气候变化的大背景下,由大雾、雨雪、高温等高影响天气所造成的交通事故呈现递增趋势<sup>[2]</sup>。为降低高影响天气对公路交通安全的影响,保障交通运输畅通安全,国内外相继开始公路交通气象领域研究。由于起步较早,美国、加拿大、欧洲等发达国家和地区在公路交通气象监测、预报研究方面已取得丰富成果,不仅建立了较为完善的道路天气信息

系统,实时采集监测环境湿度、路面湿度、路面温度、路面状况、能见度等要素数据<sup>[3-4]</sup>,为交通气象技术研究和预报服务提供数据支撑,而且加强交通气象影响和预报研究,并以研究成果为基础,开展预报预警服务,发布相应的公路交通预报预警产品<sup>[5-6]</sup>。21世纪以来,我国公路交通气象研究和业务水平已取得长足进展,但公路交通要素监测、预报预警服务水平区域性差异明显。以江苏、安徽、广东为代表的省份,在交通气象监测站网建设方面率先布局,省内交通气象监测站数量在全国处于领先水平,同时加大交通气象科研投入和成果转化利用,应用机器学习、构建模型、模式模拟等方法进行浓雾、路面温度、道路结冰等要素预报<sup>[7-11]</sup>,地区交通气象预报服务水平也远超其他省份。陕西地处西北内陆,南北狭长,地形复杂。受多种天气系统交互作用和多种季风热力扰动综

收稿日期:2023-11-16

作者简介:牛苗苗(1996—),女,甘肃天水人,硕士,助理工程师,主要从事气象服务与应用气象研究。

通信作者:张宏芳(1981—),女,陕西平利人,硕士,正高级工程师,主要从事气象服务与应用气象研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-12)

合影响,造成境内团雾、暴雨、大风等高影响天气多发,严重威胁道路交通安全。然而,受交通气象监测站数量稀少等客观因素影响,目前陕西公路交通影响研究成果相对较少,交通气象预报预警技术有限,公路交通气象发展水平整体相对落后。因此从高影响天气影响公路交通安全的途径及其对公路交通的具体影响、交通气象预报预警技术、交通气象预报预警系统的研发与应用等三方面对近 30 a 国内外公路交通气象研究进展进行综述,以期对陕西省公路交通气象服务人员开展后续研究、提升全省公路交通气象预报服务水平提供参考借鉴。

## 1 高影响天气对公路交通的影响

### 1.1 高影响天气影响公路交通安全的途径

高影响天气下的公路交通安全问题一直备受关注,原因在于雾、雨、雪、高低温、大风、冻雨等天气可通过多种途径对交通流畅性和安全性产生负面影响。虽然不同天气影响公路交通的途径有所差异,但也不乏共同点。总体来说,多数高影响天气主要通过下述三种途径影响公路交通安全<sup>[12-14]</sup>:第一,降低能见度。雨雾天中的水滴使光线发生散射的同时也能吸收光线,造成目标物亮度降低而背景亮度增强,目标物与背景之间的相对亮度对比减小,目标物难以识别;飞舞的雪花导致能见度降低,风吹雪现象可能造成视距在数秒间从百米以上变成无视距状态,雪后晴天积雪对阳光的反射会使司机产生眩光;沙尘、大风天气尘土飞扬,空气浑浊。以上情况都会造成能见度降低,影响驾驶员判断,且当能见度缩小到一定范围时驾驶员对车辆控制减弱,易引起交通事故。第二,降低轮胎与路面间的摩擦系数或附着系数。冻雨天气雨滴落在地面后迅速结冰,雾中的水滴与近地面和地面的灰尘混合后附着于轮胎与路面上,雪天路面积雪结冰均会造成轮胎和路面间的摩擦系数减小。雨天路面形成水膜,其润滑作用使得轮胎与路面间的附着系数降低。降低的摩擦系数或附着系数使得汽车的转向制动性能变差,在行驶中容易出现制动延长、打滑、空转、跑偏等现象,增加交通安全风险。第三,改变驾驶员的心理状态与驾驶行为。高影响天气时行车环境复

杂,易造成驾驶员紧张焦虑和恐慌烦躁。同时人体雨天容易困倦,高温天容易中暑,低温天容易反应迟钝等都会对安全驾驶产生威胁。除上述途径外,高影响天气还可通过其他途径影响交通安全。例如强降水引发的次生灾害严重威胁交通安全。高低温不仅可能造成路面变形,而且可能导致车辆故障。大风天车辆行驶阻力及负载明显增加,同时高速行驶的两车之间易形成空气对流干扰,都会降低车辆稳定性<sup>[15]</sup>。冻雨天气使得车辆操控性能受到影响,驾驶员需更加小心缓慢驾驶,导致交通流速变慢而出现交通拥堵,增加交通事故风险。发生冰雹、雷雨等强对流天气时,高速下降的冰雹粒子及伴随的强雷电不仅会击打交通设施,造成设施信号失灵或者机械故障,还会导致汽车玻璃破碎、车体自燃等,引起惨重的人员伤亡和经济损失。

### 1.2 高影响天气下交通参数及交通事故变化

前人已开展了许多关于公路交通安全的研究,在研究内容的选择上,一些学者将研究内容具体化,探索高影响天气下交通参数的变化。如 Wu 等<sup>[16]</sup>研究发现雾期佛罗里达州两个地区的平均 5 min 交通运行速度和平均 5 min 通过路段的车辆总数有减小趋势,同时坡道附近的碰撞风险容易增加。杨中良等<sup>[17]</sup>研究发现上海市雨天的通行能力降幅在 6%~15%之间,雪天的通行能力降幅在 3%~22%之间。交通参数的变化可能增加交通安全风险,因此高影响天气与交通事故率之间可能存在联系。区别于雾、雨、雪等天气造成地区交通参数出现不同程度下降,高影响天气与交通事故的关系较为复杂,不同天气下二者之间呈现不同关系。如王航等<sup>[18]</sup>的研究证明风力大小与交通事故间并非呈现简单线性关系,风力 6~8 级时的交通事故占比为 98%。潘娅英等<sup>[19]</sup>认为低温与交通事故率间呈现负相关。在高温与交通事故关系的研究中,Liang 等<sup>[20]</sup>认为高温与交通事故间呈正相关;但陈梅等<sup>[21]</sup>研究发现由于高温天人们出行减少,交通事故率有所降低。

目前多数研究就高影响天气下的交通参数变化趋势、其与交通事故的关系达成了较为一致的结论。部分研究与他人研究结论存在差异,推测

可能与多种原因有关。首先是所选研究时段不同,有的研究注重短期数据分析,但忽略了长期趋势;有的研究侧重于对长期趋势进行分析。其次是天气定义标准或交通事故分类存在差异。例如不同地区的高温标准不同,这可能导致高温天气下不同地区的事故率存在差异;同时不同研究对事故的严重程度评估可能不同,一些研究可能将轻微事故排除在外,这都会导致结论出现分歧。

### 1.3 高影响天气对不同车辆类型或车道运行的影响

由于高影响天气下不同车辆类型或不同车道的交通参数变化可能存在差异,所以部分研究在前人基础上,对车辆类型和车道进行细分,结果表明高影响天气对交通参数的影响确实因车辆类型和车道而异。如前人在降雪和雾影响交通的研究中分别指出,相比其他车辆,纽约 90 号州际公路雪天每日客车和类似车辆数与降雪呈中度负相关<sup>[22]</sup>;能见度降低时内车道、乘用车的交通参数变化比外车道、卡车的交通参数变化更加显著<sup>[23]</sup>。曾伟良等<sup>[24]</sup>及龚大鹏<sup>[25]</sup>的研究表明,降雨造成部分路段交通行驶速度下降,其中快速路和主干道的速度下降较为明显。雷星蕾<sup>[15]</sup>关于侧风影响不同类型车辆安全驾驶的研究表明,当车辆遭遇侧风时,小型车辆的行驶安全性明显强于大型车辆,原因在于小型车辆侧向面积小和重心低,因此在行驶中稳定性较好。

高影响天气下不同类型车辆或车道运行的研究成果为提高交通气象精细化、智能化预报提供了理论依据。随着交通行业的快速发展,未来交通管理精细化将成为趋势,因此后续研究可以前人研究结论为依据,将车辆类型、车道、时段、路面状况等进行细分,研究高影响天气下不同车辆类型、车道、时段、路面状况对应的交通参数变化。相关成果不仅可为交通信号控制、路网规划提供依据,优化交通流,缓解交通拥堵,而且有助于提高应急救援和处置的效率效果,减少因交通事故造成的损失。

### 1.4 不同强度雨雪天气对交通运行的影响

在影响公路交通安全的众多高影响天气中,雨雪天气出现的次数相对较多。由于不同强度雨

雪天气对交通的影响程度不同,因此在实际工作中相关部门希望将人员投入及经济预算向影响程度较大的雨雪天气倾斜。基于上述考量,不少学者选择对不同强度雨雪天气下的交通运行进行对比。如张宏芳等<sup>[26]</sup>研究发现不同级别降水对西安交通事故的影响不同,日降水量 0~1 mm 时交通事故率达到高峰。翟京等<sup>[27]</sup>通过拟合不同等级道路条件下的车头时距分布发现,随着降雪强度增加,车头时距逐渐增加且离散程度减小。此外,Hablas 等<sup>[28]</sup>在研究中指出,降雪对美国新泽西州高速公路运行速度的影响比降雨大,降雨和降雪分别使得道路运行速度下降 1%~7% 和 19%~21%。

开展不同强度雨雪天气影响交通运行的研究对于提升公路交通安全保障水平具有重要意义。值得注意的是,一些研究的最终结论只是单纯的数值罗列,不同强度雨雪对交通参数的影响是否具有显著性差异未给出明确性评价。虽然这些研究结论众多,但系统性不足,后续研究无法进行有效参考。其次个别研究仅是得到了不同强度雨雪天气下的交通参数变化,但在给出最终结论时,仅用交通参数的高低得出何种降水或降雪等级对交通安全的影响最大,未综合考虑多种因子对交通安全的影响评价。

### 1.5 影响交通运行的高影响天气阈值

上述众多研究成果对于全面了解高影响天气下的交通运行变化具有重要意义,但在实际的气象预报与服务工作中,预报员更希望能有影响交通运行的具体阈值作为参考。因此学者们从交通气象预报与服务需求出发,对交通高影响天气的阈值进行定量化。如张续光等<sup>[29]</sup>研究得出,影响重庆高速公路运行的雾天能见度阈值为 600 m。Lee 等<sup>[30]</sup>和 Park 等<sup>[31]</sup>发现影响韩国交通安全的高低温阈值分别为 30 ℃和 -5.7 ℃;在高低温阈值的基础上,日最高温度每升高 1 ℃或日平均气温每降低 1 ℃,地区交通事故发生率增加约 0.59%或 2.1%。曲晓黎等<sup>[32]</sup>发现河北高速公路交通事故对应的日最低气温、日最高气温、日平均气温的阈值分别为 15 ℃、25 ℃和 20 ℃。当日最低气温、日最高气温、日平均气温低于阈值时,每

上升 1 °C,事故发生的相对危险度分别增加 3.06%、3.05%、3.23%;高于阈值时,每上升 1 °C,相对危险度分别减少 2.56%、3.94%、3.75%。

确定的高影响天气阈值对于提高交通气象预报服务的针对性和准确性具有重要意义。但除高影响天气外,交通事故的发生可能还与车辆类型、道路状况、驾驶员状态等因素有关,因此仅通过统计分析不同强度天气与交通事故发生率或伤亡数量相关关系得到阈值,其准确性有待进一步提高。随着交通气象精细化预报的发展,后续研究中可综合考虑不同强度天气及车辆类型等因素下的交通事故或伤亡率,通过建模等方法技术,得到较为准确的交通高影响天气阈值。

## 2 交通气象预报预警技术

基于高影响天气对公路交通的影响理论研究成果,国内外开始逐步进行交通气象预报预警技术研究。由于天气学方法能够反映气象规律,同时可操作性较高,成为学者们早期进行交通气象预报预警的选择。例如吴洪等<sup>[33]</sup>、吴兑等<sup>[34]</sup>基于气象数据,通过动态统计分别建立了北京、南岭地区雾预报方法。徐虹等<sup>[35]</sup>对陕西省西宝、西渭、西铜三条高速公路大雾天气成因进行研究,形成了概念模型。

统计模型可根据不同数据集和需求及时进行调整优化,以适应不同天气预报场,同时其使用场景多、计算高效,因此通过统计方法构建相关模型在交通气象预报预警方面得到了广泛应用。如张存保等<sup>[36]</sup>采用数理统计方法研究了不同降水强度下的速度、车头时距和车头间距的分布规律并建立了相关模型。Hermansson<sup>[37]</sup>研制开发了夏季高温路面温度计算模型,并采用热传导方程中的有限差分方法求取路面温度分布情况,得到的路面温度结果与实际情况差距较小,模型预报效果较为理想。

天气学方法及统计方法构建模型推动了交通气象预报预警技术的发展,但随着数值模式的应用,预报预警技术研究逐渐向模式模拟转变。由于模式不仅能模拟多种尺度的大气运动,而且可通过复杂的数学和物理模型计算,较为准确地预测天气的发生发展和消散,因此该方法首先在预

报雾方面得到广泛应用。如 Bergot 等<sup>[38]</sup>用 6 个一维模式对两个雾个例进行模拟试验,结果表明,虽然大部分一维模式都能再现雾的生消过程,但各模式准确性存在差异。董剑希等<sup>[39]</sup>利用美国国家大气研究中心研制的第 5 代中尺度模式系统 MM5 对北京及其周边地区出现的一次大雾进行了模式模拟,模拟结果中雾出现和消散时间与实况一致,模拟效果较好。除预报雾外,袁成松等<sup>[40]</sup>应用 WRF 模式对高温过程进行了数值模拟,并通过对输出结果统计分析建立了站点的高温预报模型,为路面高温预报提供了较为科学的参考依据。孟春雷等<sup>[41]</sup>采用改进后的 CoLM 陆面模式与 BJ-RUC 区域预报模式对盛夏北京地区高速公路路面温度进行了有效预报。

传统的统计方法构建模型需手动设计特征和模型参数,同时数据处理能力也有限,而应用神经网络进行模型构建,不仅可以实现自动学习特征参数,而且可对高维和大规模数据进行处理且训练自动化,因此应用神经网络进行模型构建成为后续不少学者进行交通气象预报的选择。如 Bremnes 等<sup>[42]</sup>、Pasni 等<sup>[43]</sup>和 Nugroho<sup>[44]</sup>分别采用人工神经网络建立了低能见度预报概率模型、低能见度预报神经网络模型和 CombNET-II 神经网络模型,并将其应用于雾的预报中。李法然等<sup>[45]</sup>和马学款等<sup>[46]</sup>分别利用大雾预报的相应环流背景和要素垂直分布,建立大雾预报 BP 神经网络客观预报模型和基于人工神经网络的重庆能见度预报的拟合与预报模型,对湖州和重庆地区的大雾进行了有效预报。许立兵等<sup>[47]</sup>结合 WRF 模式预报结果和观测数据,采用反距离加权插值法,将模式网格和观测数据融合后构建训练集,利用随机森林模型、LightGBM 模型、深度神经网络模型 3 种机器学习方法对 WRF 预报的风场结果进行订正,使得风场预报准确率得到提升。

除上述方法外,朱娜<sup>[48]</sup>利用元胞自动机交通流模型模拟仿真雨天环境下的三相交通流;杨璐等<sup>[49]</sup>通过建立关系模型,结合统计分析和偏差订正技术,发展了一种既保留模式物理参数特征和阵风局地气候特征,又发挥格点偏差订正技术的阵风客观预报方法。虽然每种技术的出现和应用

使得交通气象预报预警水平得到了提升,但每种技术也存在一定的局限性。例如天气学方法高度依赖历史数据分析及预报员经验,在高影响天气的演变和影响程度预报方面误差较大;统计方法需手动调参,难以将影响因素综合考虑;数值模式对初始和边界条件敏感,同时模式的选择也很关键;人工神经网络在自学习和自适应能力强的同时,对专业性要求也较高。因此在技术的实际推广应用,应结合地区实际情况,对相关预报技术进行优化改进。

### 3 交通气象预报预警系统的研发与应用

目前国内外交通气象预报预警系统的研发与应用主要集中在雾及雨雪上,因此以下仅介绍雾和雨雪天气预报预警系统。针对雾的预报预警,国内外已研发出相关系统并在业务中应用,但不同地区的预报预警系统侧重点有所不同。一些地区主要利用系统进行低能见度的预报,例如广西气象信息服务中心根据沿海出现大范围大雾时的四种天气形势及大雾出现前 24 h 地面场的有利条件,建立了广西沿海地区大范围大雾预报系统。该系统可在读取欧洲中心、日本和 T213 的数值预报产品后,自动判断是否有符合沿海大范围大雾出现的天气形势特征,当有符合沿海大范围大雾出现的天气形势时,进一步判断是否具备大范围大雾出现的有利条件,根据以上两个判断结果综合判断沿海地区是否会出现大范围大雾天气,并将结果自动输出<sup>[50]</sup>。广东江门的大雾天气分型预报业务系统可利用 MICAPS 实时数据,以有利于春季大雾的天气形势为辅助,实现对江门地区初春大雾天气的客观预报以及预报结果的自动检验<sup>[51]</sup>。而一些地区偏向于利用系统进行监测与预警。例如美国犹他州的雾区预警系统可通过对能见度、车辆类型及速度等数据进行加权计算,识别潜在的危险。当能见度降至 250 m 时,系统显示警告信息;能见度小于 200 m 时,系统根据停车视距,计算并显示安全行驶速度<sup>[52]</sup>。与犹他州系统略有不同,田纳西州的预警系统通过不间断监测气象数据,自动判断易于形成雾的条件。当雾况和交通状况超过预设值,系统会自动声音报警,同时向信息板发送减速信息并告知巡逻人

员当前情况<sup>[52]</sup>。刘伟等人<sup>[53]</sup>提出了一种基于通视距离监测的高速公路团雾预警系统,该系统可实现对高速公路狭长带状空间内的团雾监测,自动并准确地获得当前通视距离并发出相应预警。陈启美等<sup>[54]</sup>提出了一种基于路况监控视频的能见度检测系统。该系统的核心在于选取带有距离信息的目标图像块并进行匹配,提取图像边缘特征后计算视频图像的空间亮度对比,最后通过曲线拟合得到高速公路能见度信息。设计方案已在江苏宁通、宁常高速等雾高发路段试用且效果良好。

各省现有的雨雪气象服务系统主要通过三种方式实现雨雪天气的监测预报预警。以董侨等<sup>[55]</sup>研发的雨雪天气路面抗滑实时监测预警系统为例,该类系统通过实时监测路面抗滑能力实现雨雪天气的预警。系统基于“车一路”综合环境对路面抗滑能力进行监测,可准确、客观、真实地表征行车过程中的车与路间的实际抗滑能力,从而对车辆驾驶人员进行有效警示提醒,并向道路养护人员实时反馈路面抗滑状态,为道路实时行车安全性能评判提供参考依据。而以朱汉辉等<sup>[56]</sup>研发的高速路段雨雪冰冻天气预警系统为代表的系统,侧重于对路段雨雪冰冻天气进行准确预报。此类系统利用历史数据构建各个观测点相应的雨雪冰冻预测模型,通过输入实况数据至预测模型中,最终获得雨雪冰冻天气预测结果。且系统考虑到观测点的海拔、地形不同导致雨雪冰冻天气的相关系数不同,将高速路段中不同观测点进行区域划分,构建不同区域雨雪冰冻预测模型,从而确保雨雪冰冻预测准确度。除上述两类系统外,广东省气象局研发并应用了基于物联网的高速公路恶劣天气交通预警系统<sup>[57]</sup>。该系统集数据采集、天气预报预警信息输出、不同目标用户端交互式应急处理于一体,可实现对高影响天气的应急处置过程可视化及联动,最大程度地减少雨雪等天气对于公路交通安全的影响。

### 4 总结与展望

前人关于高影响天气影响公路交通安全的途径、高影响天气下交通参数或事故变化、不同强度高影响天气对公路交通运行的影响及交通高影响

天气阈值等研究成果为开展公路交通气象预报预警技术研究、优化交通管理、提高应急处置救援等提供了重要的科学参考依据。天气学方法、统计方法构建模型、模式模拟、神经网络构建模型等预报预警技术的应用使得公路交通安全保障水平得到提升。然而,随着交通行业的迅速发展及大数据等新兴技术的广泛应用,现有研究成果将难以满足行业需求,为最大程度地满足公路交通气象预报与服务需求,未来需进一步推进以下工作:(1)加快交通气象观测网建设,增加交通气象站分布密度,为交通气象预报提供优质数据保障。(2)加大对浓雾、暴雨、暴雪、冻雨等高影响天气的研究,提高高影响天气的交通气象预报预警水平。(3)积极开展交通气象新技术的研发与应用,充分发挥大数据、人工智能、机器学习等新兴技术在交通气象预报方面的优势。(4)加快交通气象研究成果转化,推出最大程度贴合不同用户实际需求的交通气象服务产品。

#### 参考文献:

- [1] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. 公路交通高影响天气预警等级: QX/T 414—2018[S].
- [2] 王志,韩焱红,李嵩恂. 我国公路交通气象研究与业务进展[J]. 气象科技进展,2017,7(1):85-89.
- [3] 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.
- [4] KWON T J, FU L. Evaluation of alternative criteria for determining the optimal location of RWIS stations[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(1):17-27.
- [5] KANGAS M, HEIKINHEIMO M, HIPPI M. Roadsurf: A modelling system for predicting road-weather and roadsurface conditions[J]. Meteorological Applications, 2015, 22(3):544-553.
- [6] 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.
- [7] 王恺,赵宏,刘爱霞,等. 基于风险神经网络的大气能见度预测[J]. 中国环境科学,2009,29(10): 1029-1033.
- [8] 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.
- [9] 邹兰军,刘姝,陆勤静. 基于神经网络的路面温度模型与结冰潜势研究[J]. 公路,2022,67(10):409-414.
- [10] 王可心. 宁宿徐高速公路北段冬季路面温度分布特征及预报研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [11] 张利,汪林. 不利气象条件对公路交通安全的影响及对策[J]. 公路交通科技,2011,28(增刊): 120-123.
- [12] 潘逸凡. 降雨天气下高速公路交通安全风险评估及应急管理能力的研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [13] 唐晋娟. 不良天气条件下高速公路交通安全影响分析[D]. 南京:南京林业大学,2011.
- [14] 董珂洋,陆百川. 恶劣天气对车辆安全行驶的影响[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版),2008,8(6):24-26.
- [15] 雷星蕾. 大风条件下车辆侧向滑移与行车安全关系研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [16] WU Y, ABDEL-ATY M, LEE J. Crash risk analysis during fog conditions using real-time traffic data[J]. Accident Analysis and Prevention, 2017,114:4-11.
- [17] 杨中良,林瑜,高霄. 恶劣天气条件下城市快速路通行能力研究[J]. 交通信息与安全,2010,28(1): 75-78.
- [18] 王航,田家,王乙汀. 气象条件对白城市主要公路交通事故的影响分析[J]. 气象灾害防御,2016,23(1):25-27.
- [19] 潘娅英,陈武. 引发公路交通事故的气象条件分析[J]. 气象科技,2006,34(6):778-782.
- [20] LIANG M, MIN M, GUO X, et al. The relationship between ambient temperatures and road traffic injuries: A systematic review and meta-analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,29(33):50647-50660.
- [21] 陈梅,李平,侯明全,等. 浅论天气气候对陕西高等级公路的影响[J]. 陕西气象,2002(1):8-9.
- [22] CALL D A. The effect of snow on traffic counts in western New York State[J]. Weather Climate and Society,2011,3(2):71-75.
- [23] PENG Y C, ABDEL-ATY M, LEE J, et al. A-

- analysis of the impact of fog-related reduced visibility on traffic parameters[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2018, 144(2):04017077.
- [24] 曾伟良, 龚峻峰, 何兆成, 等. 降雨对城市道路交通行驶速度的影响分析[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(增刊 2):201-205.
- [25] 龚大鹏. 雨雪天气对城市道路交通运行的影响研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
- [26] 张宏芳, 梁佳, 沈姣姣, 等. 西安市气象条件对交通事故的影响分析[J]. *陕西气象*, 2021(6):47-54.
- [27] 翟京, 冷军强, 王天逸. 冰雪条件下城市道路路段车头时距[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(5):1131-1134.
- [28] HABLAS E D, ABDEL M. A study of inclement weather impacts on freeway free-flow speed[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [29] 张续光, 高建平, 廖丽, 等. 雾环境下高速公路驾驶人跟驰行为研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(1):275-285.
- [30] LEE W K, LEE H A, HWANG S S, et al. A time series study on the effects of cold temperature on road traffic injuries in Seoul, Korea[J]. *Environmental Research*, 2014, 132:290-296.
- [31] PARK J, CHOI Y, CHAE Y. Heatwave impacts on traffic accidents by time-of-day and age of casualties in five urban areas in South Korea[J]. *Urban Climate*, 2021, 39(2):100917.
- [32] 曲晓黎, 刘华悦, 齐宇超, 等. 河北省高速公路交通事故与气象条件定量关系研究[J]. *干旱气象*, 2020, 38(1):169-175.
- [33] 吴洪, 柳崇健, 邵洁, 等. 北京地区大雾形成的分析和预报[J]. *应用气象学报*, 2000(1):123-127.
- [34] 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):17-23.
- [35] 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[J]. *陕西气象*, 1999(2):17-19.
- [36] 张存保, 万平, 梅朝辉, 等. 雨天环境下高速公路交通流特性及模型研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(3):63-67.
- [37] HERMANSSON A. Simulation model for the calculation of pavement temperatures including the maximum temperature [J]. *Transportation Research Record*, 2000, 25(4):134-141.
- [38] BERGOT T, TERRADELLA E, CUXART J, et al. Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(4):504-521.
- [39] 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(2):175-184.
- [40] 袁成松, 严明良, 王秋云, 等. 沪宁高速公路高温预警指标及预报模型的研究[J]. *气象科学*, 2012, 32(2):210-218.
- [41] 孟春雷, 刘长友. 北京地区高速公路夏季道面高温灾害预报研究[J]. *防灾科技学院学报*, 2009, 11(3):26-29.
- [42] BREMNES J B, MICHAELIDES S C. Probabilistic visibility forecasting using neural networks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(6/7):1365-1381.
- [43] PASINI A, PELINO V, POTESTA S. A neural network model for visibility nowcasting from surface observations: results and sensitivity to physical input variables[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 106(D14):14951-14959.
- [44] NUGROHO A S, KUROYANAGI S, IWATA A. A solution for imbalanced training sets problem by CombNET-II and its application on fog forecasting[J]. *Icice Transactions on Information and Systems*, 2002, 85(7):1165-1174.
- [45] 李法然, 周之栩, 陈卫锋, 等. 湖州市大雾天气的成因分析及预报研究[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(6):794-803.
- [46] 马学款, 蔡芎宁, 杨贵名, 等. 重庆市区雾的天气特征分析及预报方法研究[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(6):796-803.
- [47] 许立兵, 孔扬, 周峥, 等. 基于机器学习的风场预报订正方法研究[J]. *陕西气象*, 2023(1):15-20.
- [48] 朱娜. 基于元胞自动机的城市快速路雨天交通流模型[D]. 南京:东南大学, 2015.
- [49] 杨璐, 王晓丽, 宋林烨, 等. 基于阵风系数模型的百米级阵风客观预报算法研究[J]. *气象学报*, 2023, 81(1):94-109.

- [50] 邓英姿,周能,李勇,等. 广西沿海地区大范围大雾预报系统简介[J]. 广西气象,2005(增刊2):80.
- [51] 梁敏妍,林卓宏,黄晓东,等. 江门地区初春大雾的预报预警业务系统[J]. 广东气象,2009,31(3):13-15.
- [52] 刘洪启. 美国公路雾区预警系统建设与发展对我国的启示[J]. 中外公路,2007,27(4):13-15.
- [53] 刘伟,王奥博,邓敏,等. 基于通视距离监测的高速公路团雾预警系统及预警方法:2013103255703[P]. 2015-09-16.
- [54] 陈启美,李勃,陈钊正,等. 基于路况监控视频的能见度检测方法:2008101565916[P]. 2012-03-07.
- [55] 董侨,赵晓康,陈雪琴,等. 一种用于雨雪天气的路面抗滑实时监测预警系统:2020103003929[P]. 2021-12-03.
- [56] 朱汉辉,李丽,李国毅,等. 一种高速路段雨雪冰冻天气预警方法及系统:202210499273.X[P]. 2022-08-30.
- [57] 汪海恒,廖爱平,黄观荣,等. 一种基于物联网的高速公路恶劣天气交通预警系统及方法:202210514920.X[P]. 2022-09-02.