

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.02.004

发光目标物团雾视频数值分析

卢振礼¹, 杨成芳², 郑宗杰³, 崔广暑¹, 安源¹

(1 日照市气象局, 山东 日照 276826;

2 山东省气象台, 山东 济南 250031;

3 交通运输部路网中心, 北京 100736)

摘要: 高速公路水平能见度视频图像监测技术正取得快速发展, 已成为团雾天气监测、预警的重要手段之一。为有效预防公路团雾交通事故发生, 参照高速公路团雾定义和预警等级的规定, 基于公路团雾多发路段视频和能见度资料, 统计分析了路面固定距离的发光目标物在团雾和非团雾不同能见度环境下的图像光亮度参数, 探究了团雾路段不同距离处发光体亮度数值与水平能见度数值相关变化关系。进而基于团雾路段视频特征图像区域的亮度参数变化与水平能见度的相关性分析, 给出利用数值分析结果测算水平能见度的可行方法, 为建立高速公路团雾预警模型提供思路和实现途径。研究表明: (1) 通过视频图像的不同区域亮度变化进行能见度监测具有科学性、创新性、可行性, 可实现 24 h 不间断监测预警。(2) 引入发光目标物光亮度和环境光亮度的对比分析, 可以解决一天中不同时间段图像光亮度变化较大的问题。(3) 通过对固定距离发光目标物的监测来实现公路团雾的监测, 可解决团雾水平尺度难以直接仪器监测的难题。(4) 发光目标物视频团雾监测方法的监测结果可与互联网、地理信息系统、导航信息系统结合, 从而实现快速、准确发布预警, 减少交通事故的目的。

关键词: 发光目标物; 团雾路段; 视频图像; 数值分析

中图分类号: TP391; U495

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)02-119-014

Numerical analysis of local dense fog by video image monitoring of luminous objects

LU Zhenli¹, YANG Chengfang², ZHENG Zongjie³, CUI Guangshu¹, AN Yuan¹

(1 Rizhao Meteorological Administration, Rizhao 276826, China;

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China;

3 Road Network Center, Ministry of Transport of the P.R.C., Beijing 100736, China)

Abstract: The video image monitoring technology of highway horizontal visibility is developing rapidly, and has become one of the important means of local dense fog weather monitoring and early warning. In order to prevent road fog traffic accidents effectively, referring to the definition of local dense fog and the regulation of early warning level, this paper statistically analyzes the luminance parameters of luminous objects at fixed road distance in different visibility environments of dense fog and non-dense fog based on the video and visibility data of road fog-prone sections, and explores the correlation between the

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC150790X), 国家自然科学基金 (41975055), 山东标准 2018 建设项目计划 (DB372018939)

作者简介: 卢振礼 (1968-), 山东日照人, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象环境学、交通气象研究。Email: lz103121@163.com

收稿日期: 2021-09-16; 修改日期: 2021-12-08

*通信作者。

luminance value of luminous objects and the horizontal visibility value at different distances in dense fog section. Then, based on the correlation analysis between the luminance parameter changes and the horizontal visibility of the video feature image, a method to estimate the horizontal visibility using the numerical analysis results is presented, which provides a new idea and realization way for the establishment of local dense fog weather early warning. The results show that: (1) It is scientific, innovative and feasible to monitor the visibility through monitoring the luminance change in different areas of the video image, which can realize 24 h continuous monitoring and early warning. (2) By introducing the contrast analysis of the luminance of the luminous object and that of the environment, the problem that the luminance of the image varies greatly at different time of the day can be overcome. (3) The monitoring of local dense fog can be realized by monitoring the luminous objects at a fixed distance, which can solve the problem that the horizontal scale of local dense fog is difficult to be directly monitored by instruments. (4) The monitoring results of the luminous target video monitoring method can be combined with the internet, geographic information system and navigation information system, so as to realize the purpose of issuing early warning quickly and accurately, and reducing traffic accidents.

Key words: luminous objects; local dense fog section; video images; numerical analysis

0 引言

团雾与其他雾相比具有局地性、范围小、流动性等特征^[1],给监测预警的时效性、准确性造成很大影响。高速公路团雾已被公认为是“流动杀手”,常常造成重大交通事故,且事故致死率高于其他交通事故^[2,3]。公路团雾是直接在公路上生成或者从周边区域扩散、移动到公路上的覆盖范围小、能见度非常低的雾。自上世纪中叶,公路低能见度的监测预警已得到国内外专家重视,并开展相关研究工作^[4]。在能见度人工观测和仪器观测基础上,随着图像数字化水平的发展,视频及图像资料在能见度分析中得到广泛的应用,并取得明显进步^[5],相关视频监测设备也成功研制^[6,7]。

国外公路能见度研究起步较早^[8,9],Koschmieder^[10]在 Bouguer-Lambert 定律基础上,提出距离观测点目标物对比度的传输公式和白天能见度计算公式。国内学者在此基础上,基于路面视亮度差平方最优化方法求解消光系数,发展了相应的能见度算法^[11]。Kwon^[12]早年基于视频图像分析方法,利用固定目标物检测能见度,但由于观测条件要求苛刻,难于推广应用,后来学者还利用人工目标物分析目标物的亮度参数与可视距离的关系,并用以测算水平能见度^[13]。Hallowell等^[14]通过与样本库图像对比,并利用标志图像求解能见度的方法,实现了水平能见度的估算。

国内相关研究起步较晚,但发展较快,大致可归为三种类型。第一类需要进行太阳高度角订正,如利用分割区域和暗原色通道计算透射率估算能见度^[15];利用摄像机标定模型、小波变换视频对比度模型及无需人工辅助设施的检测系统^[16-22]。该类方法在白天对太阳高度角订正后,通过区域图片亮度值较准确地估算能见度数值。第二类需要路面有充足的光照条件,如基于雾天大气光学模型和暗原色理论提出的能见度快速检测方法^[23],基于灰度图像结合距离方位信息,自动识别大雾等级的检测方法^[24],提取具有高对比度的道路分割线作为虚拟目标物结合人眼模拟和曲线拟合的能见度检测法^[25]。该类方法在白天光线条件较好时,通

过图片亮度对比也能较准确地计算能见度数值。第三类需要排除环境光干扰,如利用双亮度差方法根据不同距离目标物与天空亮度差的比值监测能见度^[26-28];大气能见度光学模型还可通过能见度和消光系数的关系来建立^[29];夜间能见度数值的计算研究相对较少,有学者基于向量机建立了雾的识别模型^[30];还有学者利用向量机检测监测技术,通过截取边缘线计算边缘线附近的对比度值研究团雾天气^[31];利用图像的亮度、对比度、边缘梯度指标与大气透射率之间的关系计算能见度^[32]。这些研究在不同程度上消除环境光的干扰,或者尝试利用夜间光亮物体(固定和移动的)估算能见度。目前,以上研究尚未形成实际用于公路团雾监测的产品。有些研究已经转化为实验性产品,如基于数字图像监测能见度系统,对在一条直线上的两组距离不等的目标黑体和目标光源单元进行拍摄,根据能见度和消光系数的关系计算能见度,光源条件非常苛刻,且在清晨和傍晚观测值不够稳定,难以全天应用^[33]。

本文将在以上研究的基础上,通过分析团雾路段发光目标物在不同能见度条件下的光亮度参数变化规律,提出发光目标物视频团雾监测方法和分析的思路。按照这一思路进而可以实现对团雾多发路段进行全天候实时监测预警。首先在团雾多发路段间隔一定距离布设发光体目标物,分析发光体特征区域亮度分布和亮度标准差值变化,结合前散式能见度仪,建立能见度统计分析模型,判断团雾的发生、发展、演变趋势。解决夜间团雾无法实现连续监测,以及现有分析技术中普遍存在的视频图像在清晨和傍晚时段易受到环境影响等问题。可实现对公路团雾的水平能见度和水平尺度的同时监测,进而可判断团雾预警级别,发布分级预警信息。由于各地公路照明设备存在差异性等因素,本文结合高速公路团雾预警标准,在分析公路团雾环境下发光目标物视频图像光亮度数值基础上,给出可以测算团雾能见度数值的方法和思路,可为高速公路团雾监测预警系统研制提供理论和技术支持。

1 资料和方法

1.1 资料

目前全国高速公路沿线只有部分路段安装路灯照明设备,由于缺少固定间距的摄像监测设备,在高速公路的现有条件下还无法获得固定间隔的发光体图像信息。经过对比分析,选用城市周边快车道中与高速公路环境条件比较接近,且配有路灯照明设备和摄像监测设备的团雾多发路段,共计筛选了20余个团雾多发路段,最终确定3处灯光、视频、附近能见度设备齐全的路段作为试验路段,提取相关视频图像,对数据进行分析。选择分析的路段为相距30~50 m的间隔等距离布设路灯的区域,利用附近的摄像设施实时监测照明设备,得到灯光的中心位置、边缘位置、灯光外围区域的逐行光照强度平均值资料。本研究最终选择在日照沿海区域多团雾路段的快速路边缘等距离安装的道路照明设备,配合使用路口交通监控摄像头拍摄的不间断图像作为补充资料分析各灯光区域的光亮强度变化情况。

分析模型所需能见度监测资料通过日照气象大站和区域站监测获得,能见度检测设备均为“洛阳凯迈CJY-2C/T”前散式能见度仪。能见度监测设备与数字摄像仪的距离均在1 km以内,设备向主服务器回传一次监测数据信息的时间间隔为1 min。能见度仪的监测数据可用于建立拟合模型和检验对比分析,仪器设备通过国家标准鉴定,并符合国家标准规定的误差要求。

1.2 方法

基于公路上恒定的发光体(路灯照明设备)的光亮特征,选取不同区域兴趣窗,测算各个窗口的光亮度均值,计算光强度、光强梯度(亮度差)及其光亮度标准差,对比分析相应图像区域的能见度监测数值。灯光

强度分析计算能见度的方法可实现 24 h 连续监测, 实时通过网络、GIS 等途径快速发送团雾预警信息。

夜间视频图像有效性的必要条件是充分照明, 需要有发光体才能辨别物体; 白天的视频图像虽然无需发光体也能辨别物体, 但是图像质量受到阴、晴、雨、雪等天气变化的影响, 即使同一天中不同时间段的图像质量也有很大差别, 特别是清晨和傍晚时段的图像质量较白天时段图像质量明显下降, 甚至图像无法用于计算分析。因而, 在高速公路等距离安装 24 h 不间断发光的恒定光源作为目标物, 监测团雾的生成、发展情况十分必要。因为夜间是团雾多发时间段, 加之白天时段道路两侧路灯基本处于关闭状态, 因此在现有条件下, 本研究将重点分析测算夜间水平能见度。雾天条件下不同灯光穿透效果对行车安全会有不同影响^[34], 按照夜间能见度的定义, 要选择中等强度的光源。从安全角度考虑, 灯光既要起到雾天的警示作用, 又要起到安全照明作用, 本研究选择道路照明路灯为发光体。

团雾具有局地性、范围小、突发性等特点, 对高速公路团雾监测的内容主要包括小范围内水平能见度大小 (通常在 200 m 内) 和团雾覆盖道路水平尺度。高速公路团雾发生的时段主要集中在当日 22:00 至次日的 08:00, 在年发生 10 次以上团雾路段中, 统计路段数量排在前 10 名的省份, 发现该时间段的团雾平均发生率为 78.3%。因而有必要对团雾的监测重点集中在每日 22:00 至次日的 08:00 团雾多发时段。按照高速公路团雾定义和高速公路团雾预警等级^[35], 实现对高速公路团雾及时预警, 不仅要监测公路某一处的水平能见度, 还要对团雾多发路段 200、100、50 m 范围内的相应水平能见度是否小于 200、100、50 m 做出测算。

2 能见度视频监控理论

能见度在公路交通领域通常是指水平能见度, 分为白天能见度和夜间能见度。能见度的气象学定义为, 视力正常的人能够从白天的天空背景中看到和辨认目标物 (黑色、大小适度) 或夜间识别中等强度发光体的最大水平距离。国际照明委员会把能见度定义为: 在不借助仪器的情况下, 所能识别物体的最远距离^[36]。

在团雾天气环境下, 由微细水滴、污染颗粒物或冰晶组成的气溶胶悬浮于近地层大气中, 光线从发光体目标物传输到人眼或摄像机的路径中发生散射和吸收等现象。通过对比图片发现, 能见度下降的初始阶段相较晴朗的天气条件, 发光体中心区域的光亮度会有所下降, 而在发光体周围原本较暗的区域由于散射作用光亮度会增强, 这两块区域的光亮度的平均值变化梯度变小, 发光体周围边界变得模糊, 这种变化效果在夜间的视频图像表现得较为明显。然而, 随着能见度不断下降, 光源边界区域的亮度会明显下降, 直至光亮区域消失, 如果能见度继续下降, 整个光源区域包括中心区域也会减弱直至在图像上消失。

从发光体目标物传输到人眼或摄像机的光亮度由两部分构成: 一是发光体的光亮度在经过大气消光后剩余量, 二是大气环境光亮度。在夜间, 大气环境光亮度通常较弱, 因而容易受到其他光源的反射、衍射等影响。因而, 人眼或摄像机感应到的光亮度 l 可表示为

$$l = l_0 e^{-\sigma d} + l_r (1 - e^{-\sigma d}), \quad (1)$$

式中 l_0 为发光体的原有光强度, σ 为大气消光系数, d 为观测位置到发光体之间的距离, l_r 为环境光强度。

在式 (1) 基础上, Duntley 推导出的大气衰减定律为

$$C = C_0 e^{-\sigma d}, \quad (2)$$

式中 C 是物体的视亮度对比度, C_0 是物体的实际固有亮度对比度。当 C 值降低到能从背景中看到和辨认出的目标物的最低数值时, 其与 C_0 的比值称为视觉对比阈值 ($\varepsilon = C/C_0$)。按照国际照明委员会和国际民航组织

的推荐标准,把视觉对比阈值定为0.05,则可得到水平能见度 V_0 和大气消光系数的关系式,即

$$V_0 = -\frac{\ln 0.05}{\sigma} = \frac{2.996}{\sigma}. \quad (3)$$

式(3)表明,水平能见度 V_0 与大气消光系数 σ 成反比,消光系数越大,能见度越低,因为大气中的气溶胶颗粒物浓度越大,此时大气环境对光线的散射能力越强。如果在高速公路团雾多发区域预设恒定光源发光体,在团雾天气条件下,摄像仪器获得的发光体图像边缘会不清晰,当水平能见度降低到某一数值后,发光体的整体光域可能会逐渐消失。

3 发光目标物团雾视频数值分析及应用思路

3.1 团雾的监测设施

团雾通常生成于中小尺度环流系统下^[1,37],高速公路团雾的覆盖路面范围比较小(小于5 km),成团簇状分布,团雾内水平能见度很低(小于200 m)^[35]。丁秋冀等^[1]认为持续时间在4 h以内的占到团雾总数的91%,大多发生在夜间。针对团雾这些特点,对团雾准确监测要做到:重点实现夜间监测,测算团雾的覆盖(影响)范围,实现对高速公路团雾预报预警。为有效预防高速公路团雾,在团雾多发路段在一定间隔安装常亮恒定发光体,距离高清摄像头50~200 m的距离布设,以获取不同水平能见度的视频图像信息。常亮恒定发光体安装在路面边缘距离地面高度3~5 m,摄像机高度要略高于发光体,使图像中的发光体位于暗色背景下,减少大气环境光对发光体的干扰(如图1)。

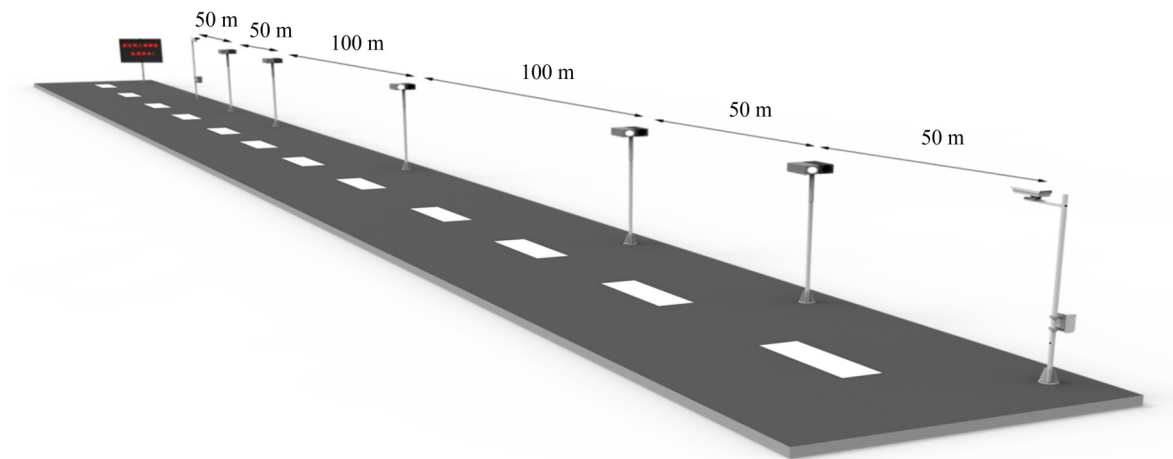


图1 公路一侧固定距离间隔的发光体目标物

Fig. 1 Luminous objects with fixed distance intervals on one side of highway

3.2 团雾能见度图像亮度数值分析及应用思路

3.2.1 图像光亮度变化规律

从团雾路段视频截取带有恒定发光体图像,分析每行像素的平均亮度及其各像素光亮度标准差值,可得到不同天气背景下的图像光亮强度变化规律。从截取的图像资料中,首先选择一张对交通产生影响的能见度 V 约为150 m、覆盖道路长度超过200 m的天气时的图像资料,与能见度约为其2倍、4倍的低能见度天气条件下的图像资料对比分析,比较它们之间的逐行光亮度和亮度标准差特征。在同一张图片中,因截取不同

发光体图像的范围大小和位置的不同,分析时会有不同的光亮度变化规律。在图片中50、100、200 m处的发光体相距较近,截取时应尽可能多保留环境光部分,又不能跨越相邻距离处的灯光区域范围。按照以上要求,在图片上距离视点50、100、200 m处的发光体分别截取 26×31 、 16×19 、 6×7 行像素,宽度与长度比在0.84~0.85之间的矩形框,可以较好地保留各部分灯光区域又不跨越相邻灯光区域。随着光源和摄像机的位置、高度和光源范围不同,截取的图片大小会有所不同,本研究按上述比例分别截取距离视点50、100、200 m处的发光体的图片进行光亮度分析。

图2展示了在公路边缘距离摄像机50 m处恒定光源在不同能见度下的亮度变化。根据光亮区域对比发现:1)随着水平能见度降低,发光体的光域面积明显减小,且四周开始变得暗淡。2)能见度较大和较小时,发光体光源边界较模糊,光亮度分布均匀;能见度 $V=321$ m时,发光体光源边界较清晰,光亮度分布不均匀,与第2节的分析结果一致。

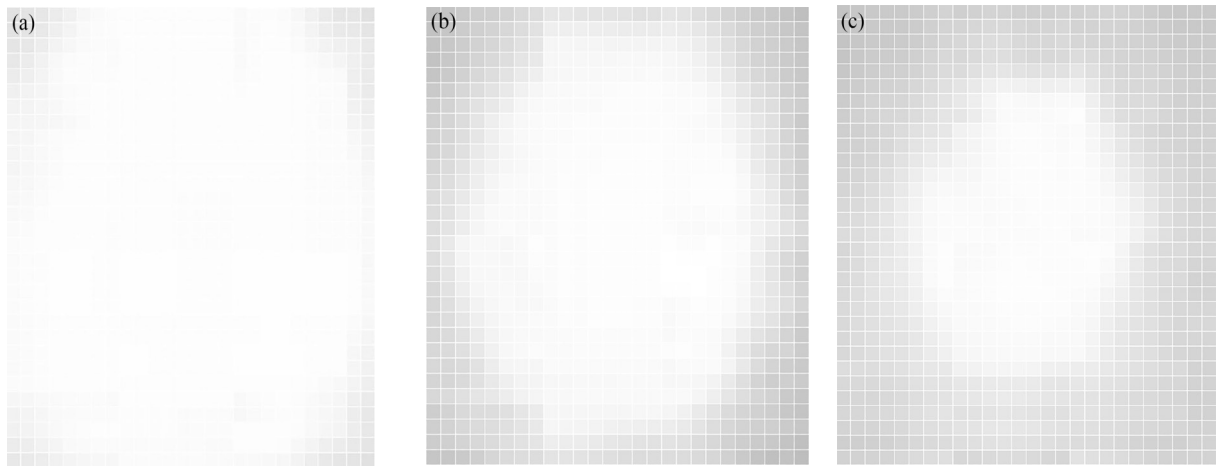


图2 距离50 m的发光体目标物不同能见度亮度变化。(a)能见度590 m;(b)能见度321 m;(c)能见度156 m

Fig. 2 Luminance change of luminous object at distance of 50 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

图3为在公路边缘距离摄像机50 m处恒定光源在不同能见度下的纵轴逐行像素的亮度变化曲线。根据曲线对比发现:1)随着水平能见度降低,发光体的光亮度曲线由平缓变得弯曲,光亮度峰值边缘值明显下降,峰值从253.2下降至239.5,边缘值从243.3下降至205.8。2)在曲线图上,能见度较大时,光亮度标准差较小,最小值为1.7,标准差最低值出现在光域的中间几行;随着能见度变小,光亮度标准差明显增大,最小值为10.9,标准差最低值仍旧在光域的中间几行;随着能见度继续降低,光亮度标准差开始减小,最小值为6.7,标准差最低值出现在光域的边缘几行。

图4展示了在公路边缘距离摄像机100 m处恒定光源在不同能见度下的亮度变化。由于受到距离的影响,相较50 m处的光域面积普遍减小,亮度减弱。根据光亮区域对比发现:1)随着水平能见度降低,发光体的光域面积减小更加明显,且四周开始变得更加暗淡。2)能见度较大和较小时,发光体光源边界均较清晰,三张图片光亮度分布都不够均匀。

图5为在公路边缘距离摄像机100 m处恒定光源在不同能见度下的纵轴逐行像素的亮度变化曲线。从曲线图发现:1)发光体的光亮度曲线均变得比较弯曲,随着水平能见度降低,光亮度峰值、边缘值均明显下

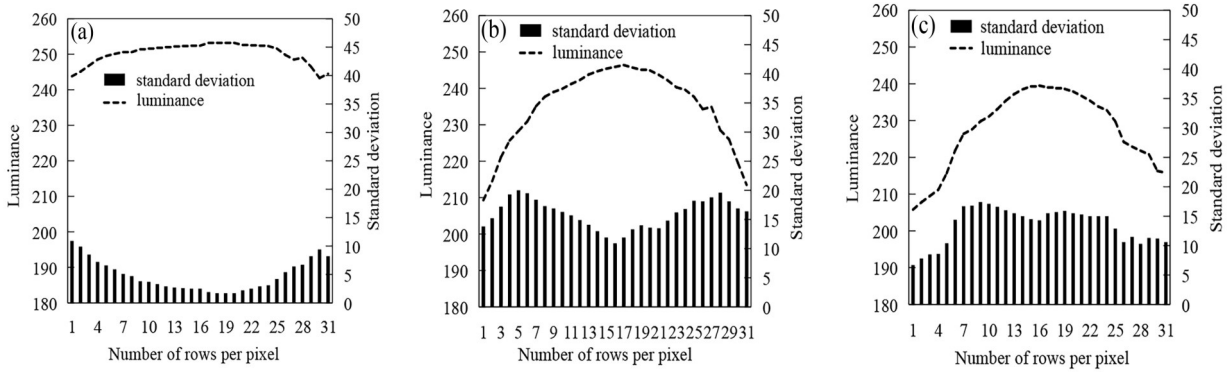


图 3 距离 50 m 的发光体目标物在不同能见度下亮度和标准差。(a) 能见度 590 m; (b) 能见度 321 m; (c) 能见度 156 m

Fig. 3 Luminance and standard deviation of luminous object at distance of 50 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

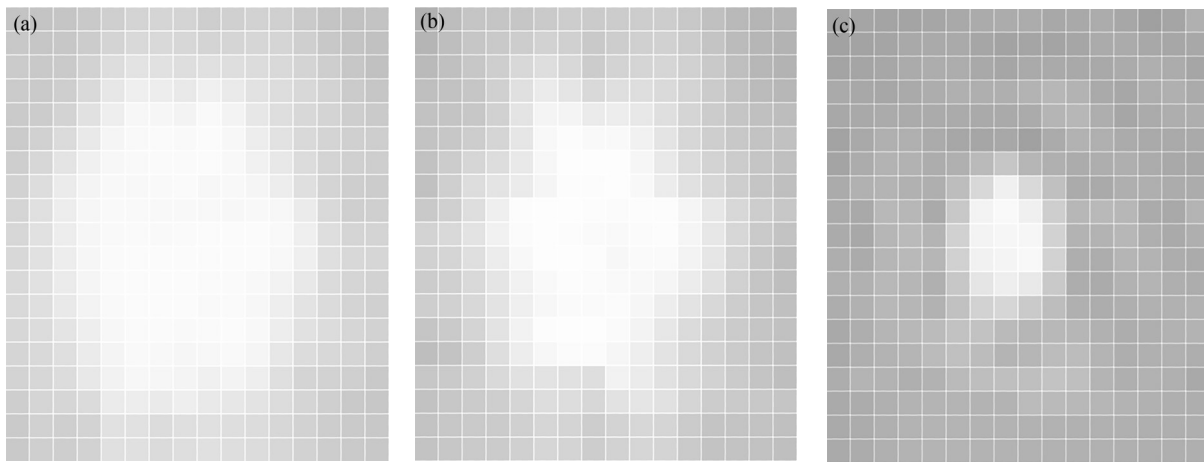


图 4 距离 100 m 的发光体目标物在不同能见度下亮度变化。(a) 能见度 590 m; (b) 能见度 321 m; (c) 能见度 156 m

Fig. 4 Luminance change of luminous object at distance of 100 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

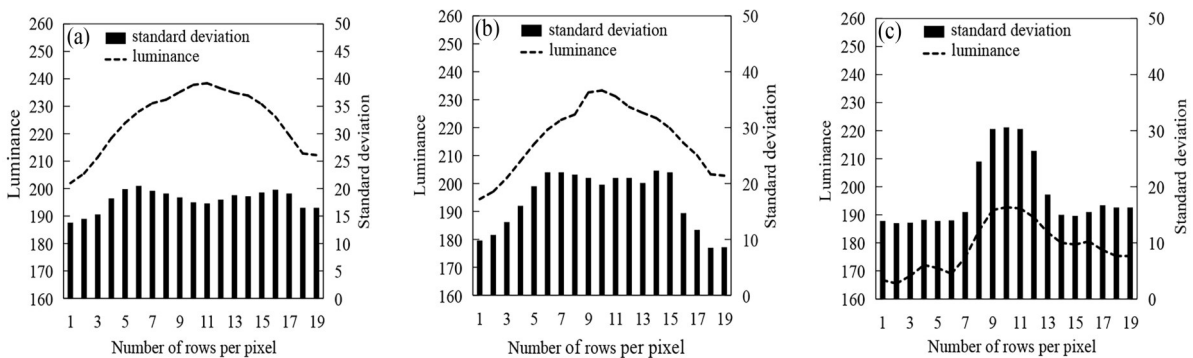


图 5 距离 100 m 的发光体目标物在不同能见度下亮度和标准差。(a) 能见度 590 m; (b) 能见度 321 m; (c) 能见度 156 m

Fig. 5 Luminance and standard deviation of luminous object at distance of 100 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

降,当 $V = 156\text{ m}$ 时,边缘值开始变得平缓。峰值从238.4下降至192.7,边缘值从202.0下降至165.5。2)在曲线图上,光亮度标准差均较大。能见度较大时,光亮度标准差相对均匀,数值在18.0附近变动。其他两图光亮度标准差峰值都出现在光域的中间几行, $V = 156\text{ m}$ 时,光亮度标准差峰值变得更加凸起。

图6为在公路边缘距离摄像机200 m处恒定光源在不同能见度下的亮度变化规律。由于进一步受到距离的影响,相较100 m处的光域面积继续减小,亮度进一步减弱。根据光亮区域对比发现:1)前两张图片上发光体的光域面积减小十分明显,且四周比较暗淡; $V = 156\text{ m}$ 时,只有中心小范围区域有微弱的光亮,四周很暗淡。2)能见度较大时,发光体光源边界均较清晰,而能见度为156 m时,已很难辨别光源边界。

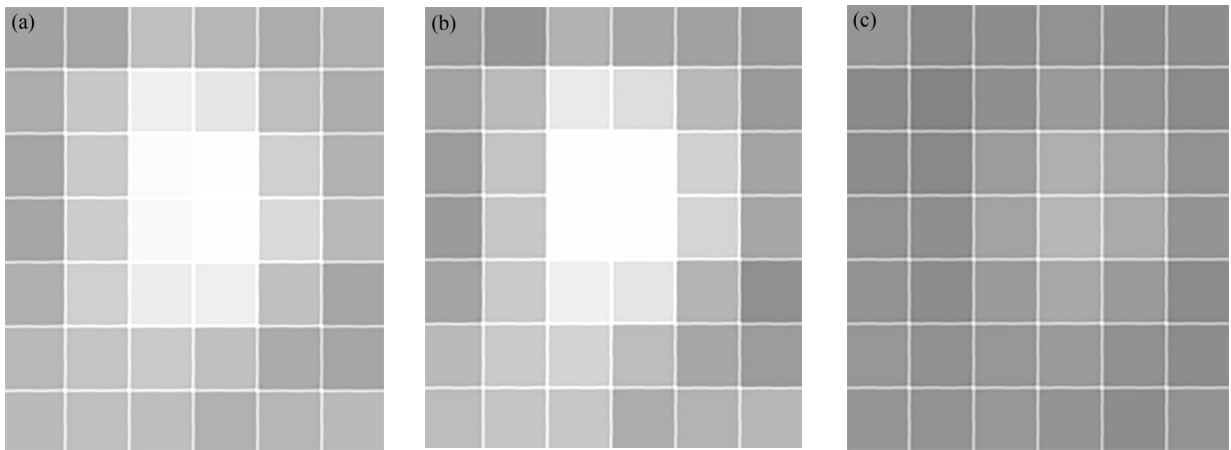


图6 距离200 m的发光体目标物在不同能见度下亮度变化。(a)能见度590 m; (b)能见度321 m; (c)能见度156 m

Fig. 6 Luminance change of luminous object at distance of 200 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

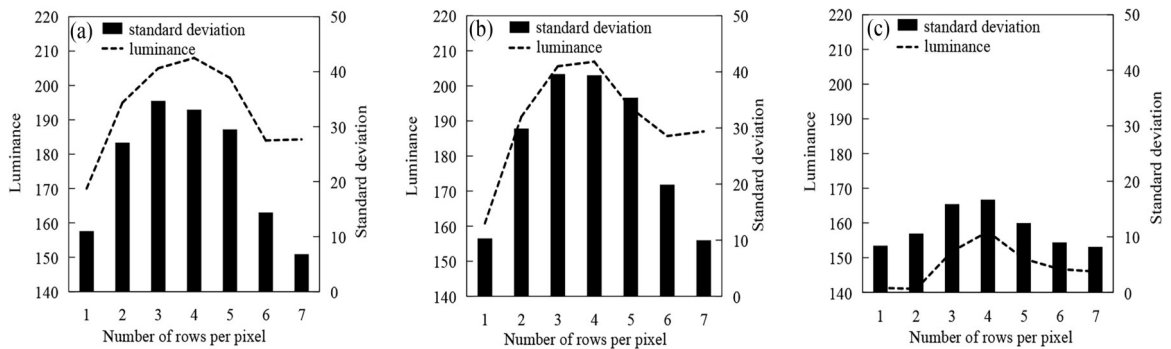


图7 距离200 m的发光体目标物在不同能见度下亮度和标准差。(a)能见度590 m; (b)能见度321 m; (c)能见度156 m

Fig. 7 Luminance and standard deviation of luminous object at distance of 200 m in different visibility.

(a) Visibility 590 m; (b) visibility 321 m; (c) visibility 156 m

图7为在公路边缘距离摄像机200 m处恒定光源在不同能见度下的纵轴逐行像素的亮度变换曲线。从曲线图发现:1)图7(a)、图7(b)中发光体的光亮度曲线仍旧弯曲比较明显,当 $V = 156\text{ m}$ 时,光亮度曲线弯曲幅度明显减弱,边缘值均明显下降且变得平缓。光亮度边缘最小值分别为:173.8、160.8和141.0,中心区域峰值分别为:211.9、206.9和157.5,也明显下降。2)在图7(a)、图7(b)上,光亮度标准差均较大,光亮度标准差峰

值分别为: 34.7和39.6;但当能见度降至156 m时[图7(c)], 光亮度标准差变得进一步平缓, 光亮度标准差峰值和最小值分别为: 16.7和8.2。

3.2.2 图像不同光亮度区域的选取

在不同能见度的团雾天气发生时, 发光体的光亮强度、发光区域范围及亮度标准差会有不同的变化, 其原因是在不同能见度背景下, 光线的大气散射系数和消光系数会有不同(参见3.2.1)。想了解其内在联系, 就需要重点分析在不同团雾天气条件下受环境影响较为敏感的光域边缘区域, 同时对图像的其他不同光域的光参数进行分析。由于现行国内标准对公路照明灯具的外形没有统一规定, 每种路灯的光亮区域外形不尽相同, 为计算方便, 选用“矩形框”限定发光体的不同光区域范围, 分别截取不同区域的图片进行分析。

选取的矩形框是依据团雾的最大能见度数值规定200 m的图片为基准依据^[35], 先找出四条边缘线, 然后构建矩形, 最后圈画出各个光亮区域: 1) 分别选取距离摄像机200、100、50 m的图片, 首先在发光体的四周找边缘点, 把光亮度标准差异常变动区域定为边缘点, 在4个边缘点处分别做4条切线, 两两相交后得到发光体的矩形; 2) 再由边缘线取1~4个行或列的像素, 该划定区域即为光亮区域的边缘区域; 3) 对比分析发现取2个行或列的像素的矩形环可以较好地反映能见度的变化规律; 4) 选择两个发光体中间区域的2列像素为边, 按内环长宽比例划分出外环矩形环, 为环境光区域; 5) 所得到3个代表性矩形区域(I)、(II)、(III), 分别为环境光区域、光域边缘区域和光域中心区域, 如图8所示。以下对3个区域的光特性进行分析。

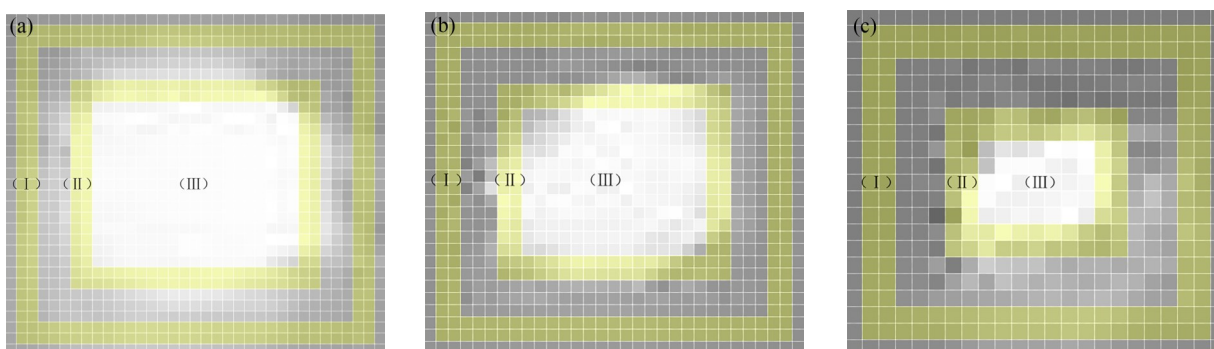


图8 能见度200 m时不同距离发光体目标物亮度区域划分。(a) 距离50 m; (b) 距离100 m; (c) 距离200 m

Fig. 8 Luminance area division of luminous object at distance at different distances with visibility of 200 m.

(a) Distance of 50 m; (b) distance of 100 m; (c) distance of 200 m

3.2.3 图像特征区域光亮度和标准差分析

利用3 min视频中的等间隔截取图像统计3个特征区域光亮度均值, 图像按间隔3~5 s截取1张, 在获得的整体图像中再裁剪不同距离处的发光体光区域图片, 进而可获得光源周围环境光区域、光域边缘区域和中心光域内像素的平均光亮度, 用均值法求得矩形环内光亮度评估值。光亮度均值 I 的数学表达式为

$$I = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(x, y), \quad (4)$$

式中 N 是分析图像的数量, $I_k(x, y)$ 为第 k 张图像 (x, y) 点处的亮度数值。为了保证一定时段内能见度数值的稳定性, 一般选取30张图像资料进行统计分析。

进而可分别计算距离摄像机200、100、50 m的环境光区域、光域边缘区域和光域中心区域 N 张图像、 M 个像素点的光亮强度二次平均值, 光亮强度二次平均值 \bar{I} 数学表达式为

$$\bar{I} = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M I_e(x, y), \quad (5)$$

式中 M 表示图像特征区域内的像素点总数, $I_e(x, y)$ 表示 N 张图像不同光亮区域 (x, y) 点处的平均亮度值。

式 (5) 计算出的环境光区域、光域边缘区域和中心光域的平均亮度值可分别用 $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$ 表示, 用该数值能够评估发光体在不同能见度条件下, 3 个特征区域的光亮度变化差值对比, 用 \bar{I}_d 表示区域间的变化梯度大小, 数学表达式为

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{I}_c - \bar{I}_a}{\bar{I}_b - \bar{I}_a}. \quad (6)$$

分析资料选自日照沿海 3 条快速路上设有固定距离灯光且团雾多发路段的图像, 利用附近的水平能见度仪并辅助人工观测对图像数据进行分析标校。选取了 2020 年 1 月至 9 月期间能见度小于 500 m、小于 200 m、小于 100 m 及能见度小于 50 m 的图像数据共计 425 个样本, 对比分析不同能见度条件下的 3 个特征区域的光亮度梯度变化。按照高速公路团雾定义, 高速公路团雾要满足水平能见度 V 小于 200 m 条件。将水平能见度 V 小于或者大于 200 m 的天气分别归为团雾或非团雾进行数值分析。

经统计分析发现, 发光目标物边缘区域光亮度与环境光区域光亮度的差值, 以及发光目标物边缘区域亮度标准差与中心区域亮度标准差的差值在不同能见度下呈现有规律性变化。图 9 分别是不同能见度条件下, 50~200 m 处发光体各区域的光亮度差值和光亮度标准差值图像信息, 从图中可看出能见度为 0~500 m 时, 发光体周围边缘区域的光亮度与环境光区域的光亮度差值变化趋势, 其差值与能见度数值存在正向相关性, 远处发光体亮度差值相较于近处发光体亮度差值增加速度相对缓慢, 50 m 处亮度差值增加速度较为明显。同时, 光亮度标准差值 (发光体边缘区域的亮度标准差与中心区域的亮度标准差的差值) 的整体变化呈现明显的波动, 总体表现为上升趋势, 随着区域光亮度差值的增大, 相应的光亮度标准差值也增大。

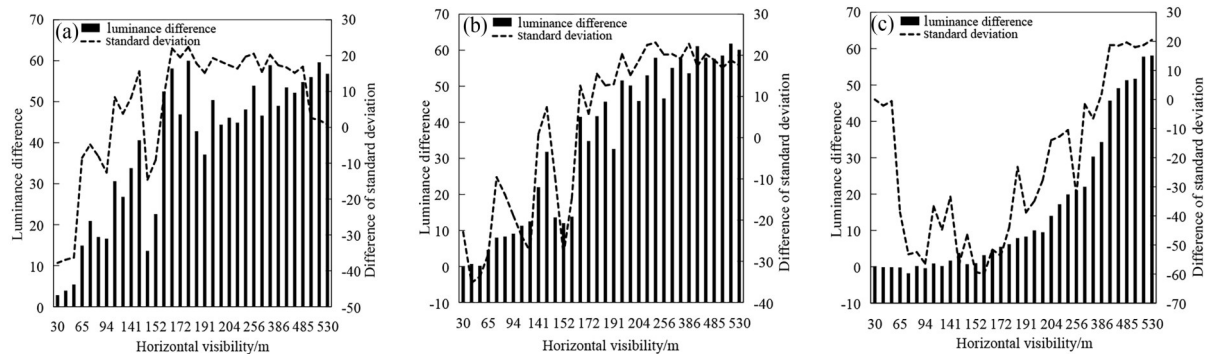


图 9 不同距离发光体目标物在不同能见度下的亮度和标准差。(a) 距离 50 m; (b) 距离 100 m; (c) 距离 200 m

Fig. 9 Luminance and standard deviation of luminous object with different distance and visibility.

(a) Distance of 50 m; (b) distance of 100 m; (c) distance of 200 m

光亮度标准差值与区域光亮度差值局部也出现变化不一致的现象, 在 200 m 处, 能见度小于 50 m 时, 发光体的亮度标准差值明显升高, 其原因可能是灯光中心光亮度非常弱, 灯光边缘被环境光照亮, 而导致中心光域的亮度标准差明显小于边缘区域的标准差; 50 m 处灯光的灯光亮度标准差值在能见度 500 m 附近时明显下降, 其中的原因需要进一步探究; 本文重点研究能见度小于 200 m 的发光体光亮度特征, 得到高速公路

团雾预警思路,绘制200~500 m的图像是为便于对比分析光亮度标准差与光亮度区域差值随着能见度的总体变化趋势,形成团雾和非团雾的亮度数值差异的直观对比性。从分析发现,团雾发生时(水平能见度小于200 m),在200 m处发光体的区域光亮度差值基本都小于或等于10,而光亮度标准差的差值基本都为负值;能见度大于200 m、非团雾发生时,位于200 m处灯光的光亮度区域差值都大于10,光亮度标准差的差值多数都大于0。

图9是对能见度与光亮度特征进行的初步分析,分析光亮度参数值的变化与团雾发生路段水平能见度数值关系,可为团雾预报预警模型研究提供理论支撑。下一步研究需要在不断积累丰富公路团雾监测数据基础上,促进预警模型完善和管理平台建设,实现高速公路自动化团雾分级预警。

3.2.4 数值分析在能见度测算、团雾预警模型中的应用思路

本研究的出发点和落脚点不仅仅是研究发光体光亮度参数和水平能见度的简单对应关系,而是力图通过对团雾多发路段的数值分析找到规律性数据支撑,为利用光亮度参数相关性变化测算能见度数值提供一种思路或方法(可进一步建立两者的回归模型,测算水平能见度),测算结果可用于判断高速公路低能见度区域是否达到发布高速公路团雾预警标准。本文的光亮度数值分析是围绕高速公路团雾定义的水平能见度和水平尺度标准开展的。按照高速公路团雾定义,首先高速公路团雾要满足水平能见度 V 小于200 m的条件,其次按照高速公路团雾预警发布标准,把水平能见度 V 是否小于200、100、50 m分别作为发布团雾黄色、橙色、红色预警的判断标准,同时要求 D (D 是团雾覆盖公路的长度,可用观察点到光源的距离代替)大于 V 。依据团雾相关标准的要求,重点分析了距离摄像机200、100、50 m处,水平能见度分别小于200、100、50 m(高速公路团雾)以及 V 大于200 m时(非高速公路团雾)的光亮度数据变化规律。进而,可以根据光亮度数据变化,与对应的水平能见度实测值进行相关性分析,就可得到距离摄像机200、100、50 m处光亮度参数和水平能见度 V 的回归模型,从而测算出相应的水平能见度数值,按照团雾预警相关标准发布不同等级的团雾预警。由于本研究重点在于团雾路段的不同水平能见度条件下的光亮度数值分析,故不再进行回归模型分析,仅给出视频数值分析结果,及进一步在能见度测算和团雾预警方面应用的思路和实现途径。

需要说明的是,目前国家对用于公路上安装的照明及监测设备没有制定统一的标准,不同地域路段的灯光设备、摄录像设备,采集的光亮度参数和能见度实况数据会存在差距,通过数值分析、相关性分析得到的回归模型都会各不相同。采用团雾路段视频数值分析得到回归模型后,应结合能见度仪或者辅以人工观测的方法对模型进行优化。

4 结 论

从有效预防公路团雾交通事故出发,针对团雾天气有别于其他雾的特点,参照高速公路团雾定义和预警等级的规定,分析了团雾路段不同能见度条件下的光亮度参数,发现了团雾区域光亮度参数与水平能见度变化的相关性。基于团雾路段视频图像特征区域的亮度参数变化与水平能见度的相关性,可为光亮度参数数值分析测算能见度提供可行方法,为建立高速公路团雾预警模型提供思路和途径。本研究主要有以下优势:

- 1) 利用发光体视频图像可以对高速公路团雾天气实现24 h全天候连续监测。
- 2) 可同时监测公路团雾的水平能见度和团雾覆盖公路的长度,克服了能见度监测仪器不能实现尺度监测的问题。
- 3) 监测使用的设施成本低,准确率高,可实现在高速公路团雾多发路段全网覆盖,具有推广空间。

监测高速公路团雾需要清晰高质量的视频图像做支撑, 获得高质量的图像需要有长期稳定的发光体, 路面稳定的电源供应, 也需要稳定的摄像系统运行, 严苛的运营维护十分必要。发光体和摄像系统会因型号硬件参数不同, 一定程度影响回归模型的准确性, 在实际应用中应根据硬件参数指标给予必要订正。未来团雾视频监测技术可以结合地理信息系统及公路交通导航技术, 可在团雾多发路段实现实时监测、分级预警, 发光目标物视频图像监测预警手段将会成为高速公路团雾监测预警的主要手段之一。

参考文献:

- [1] Ding Q J, Bao Y X, Yuan C S, *et al.* Occurrence pattern and local characteristics of dumpling fog events on Shanghai = Nanjing expressway [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2013, 33(6): 634-642.
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 [J]. *气象科学*, 2013, 33(6): 634-642.
- [2] Li X L, Tang B M, Zeng C. Transient analysis of the driving behavior in the dumpling fog sections of expressway based on catastrophe theory [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 78-87.
李晓雷, 唐伯明, 曾超. 基于突变论的高速公路团雾驾驶行为瞬态分析 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 78-87.
- [3] Wang J L, Liu X L, Liu J C, *et al.* A study on visibility observation at nighttime using digital photography visiometer system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(6): 1306-1311.
王京丽, 刘旭林, 刘金城, 等. 数字摄像能见度仪夜间观测技术研究 [J]. *电子学报*, 2018, 46(6): 1306-1311.
- [4] Miao M. Survey on video-based visibility detection method [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(15): 72-75.
苗苗. 视频能见度检测算法综述 [J]. *现代电子技术*, 2012, 35(15): 72-75.
- [5] Gao J J, Tian H, Wu H, *et al.* A visibility detection method using daytime road images based on brightness contrast and dark channel prior principle [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(3): 386-396.
郜婧婧, 田华, 吴昊, 等. 基于亮度对比度和暗原色先验原理的白天道路图像能见度检测方法 [J]. *气象科技*, 2019, 47(3): 386-396.
- [6] Wang J L, Liu X L, Lei M, *et al.* Digital photography visiometer system and comparative experiment [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(11): 2298-2302.
王京丽, 刘旭林, 雷鸣, 等. 数字摄像能见度系统及其比对实验 [J]. *电子学报*, 2014, 42(11): 2298-2302.
- [7] Wang J L, Liu X L, Lei M, *et al.* Research on new automatic visibility observation system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(7): 596-603.
王京丽, 刘旭林, 雷鸣, 等. 新型能见度自动观测系统研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7): 596-603.
- [8] Kwon T M. Final report on signal and image processing for road condition classification [R]. Stockholm: Swedish National Road Agency, 2002.
- [9] Duynkerke P G. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations [J]. *Monthly Weather Review*, 1991, 119(2): 324-341.
- [10] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 1924, 12: 171-181.
- [11] Wu W, Li B, Yang X, *et al.* Visibility detection algorithm based on optimization of squared differences upon apparent luminance of roads [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2412-2418.
吴炜, 李勃, 杨娴, 等. 基于路面视亮度差平方最优化的视频能见度检测算法 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2412-2418.

- [12] Kwon T. Atmospheric visibility measurements using video cameras: Relative visibility [R]. America: University of Minnesota Duluth, 2004.
- [13] Wu H. *Temporal and Spatial Simulation of Low Visibility Video Surveillance on Freeway* [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
吴浩. 高速公路低能见度视频监控时空模拟 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [14] Hallowell R G, Matthews M, Pisano P A. Automated extraction of weather variables from camera imagery [C]. *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, IA*, 2005: 1-13.
- [15] Chen X T, Lu C H, Zhang Y J, et, al. Design of daytime visibility algorithm for digital camera visibility instrument [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(4): 353-358.
陈晓婷, 鲁昌华, 张玉均, 等. 数字摄像能见度仪的白天能见度算法设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 353-358.
- [16] Chen Z Z, Zhou Q K, Chen Q M. Video visibility detection algorithm based on wavelet transformation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(1): 92-98.
陈钊正, 周庆逵, 陈启美. 基于小波变换的视频能见度检测算法研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 92-98.
- [17] Chen Z Z, Chen Q M. Video contrast visibility detection algorithm and its implementation based on camera self-calibration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2907-2912.
陈钊正, 陈启美. 基于摄像机自标定的视频对比度能见度检测算法与实现 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2907-2912.
- [18] Zhang X, Li B, Chen Q M. PTZ visibility detection algorithm based on luminance characteristic and its implementation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 381-387.
张潇, 李勃, 陈启美. 基于亮度特征的PTZ视频能见度检测算法及实现 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 381-387.
- [19] Liu Y, Jiang T, Li J M. Study on highway video surveillance image algorithm based on Markov algorithm [J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(9): 60-63.
刘宇, 蒋涛, 李建明. 基于马尔算法的高速公路视频监控图像能见度研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(9): 60-63.
- [20] An M W, Chen Q M, Guo Z L. Visibility detection method and system design based on traffic video [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1148-1153.
安明伟, 陈启美, 郭宗良. 基于路况视频的气象能见度检测方法与系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1148-1153.
- [21] Guan K, Qi S M, Liang J. Visibility measurement of highway based on digital image processing technology [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2010, 30(5): 89-92.
关可, 亓淑敏, 梁佳. 基于数字图像处理技术的高速公路能见度检测 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2010, 30(5): 89-92.
- [22] Li Y R. *Design of Highway Fog Early Warning System Based on Video Analysis Technology* [D]. Xi'an: Changan University, 2018.
李易润. 基于视频分析技术的高速公路团雾预警系统设计 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [23] Hu P, Yang X D. An algorithm for fast detecting expressway visibility [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(4): 115-122.
胡平, 杨旭东. 高速公路能见度快速检测算法 [J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 115-122.
- [24] Tong C. *Research and System Implementation of Fog Visibility Detection Technology Based on DSP* [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
童辰. 基于DSP的雾天能见度检测技术研究及系统实现 [D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [25] Li J, Ge J Q, Chen Q M. Visibility detection algorithm for road video [J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(16): 175-177.
李佳, 葛嘉琦, 陈启美. 路况视频能见度检测算法 [J]. 计算机工程, 2009, 35(16): 175-177.

- [26] Lu W T, Yang S C, Liu Y F, *et al.* Measuring meteorological visibility based on digital photography-dual differential luminance method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28 (4): 559-568.
吕伟涛, 阳善昌, 刘亦风, 等. 基于数字摄影技术测量气象-双亮度差方法和实验研究 [J]. 大气科学, 2004, 28(4): 559-568.
- [27] Wang J L, Cheng C L, Xu X F. Comparison experiment of instrument system for measuring visibility by digital camera method [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2002, 30(6): 353-357.
王京丽, 程丛兰, 徐晓峰. 数字摄像法测量能见度仪器系统比对实验 [J]. 气象科技, 2002, 30(6): 353-357.
- [28] Wang J L, Liu X L, Gao W F, *et al.* Control circuit design of digital photography visiometer system [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(5): 633-637.
王京丽, 刘旭林, 高五峰, 等. 数字摄像能见度仪器系统控制电路的设计 [J]. 气象科技, 2006, 34(5): 633-637.
- [29] Xiang W S. *Visibility Estimation Using Traffic Surveillance Video* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
项文书. 基于交通视频的能见度估计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [30] Zhou J P, Miao K C, Jiang C, *et al.* Image characteristics of dense fogs on expressway at night and its recognition [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(1): 29-34.
周建平, 苗开超, 江春, 等. 高速公路夜间大雾图像特征及其识别 [J]. 气象科技, 2019, 47(1): 29-34.
- [31] Liu J L, Liu X L. Fog detection algorithm based on contrast model of video image [J]. *Optoelectronic Technology*, 2015, 35 (2): 91-95.
刘建磊, 刘晓亮. 基于视频图像对比度的团雾检测算法 [J]. 光电子技术, 2015, 35(2): 91-95.
- [32] Wang J M. *Research on Surveillance Video Analysis-Based Visibility Detection and Early Warning System for China Highway* [D]. Xi'an: Changan University, 2016.
王金冕. 基于监控视频分析的高速公路能见度检测与预警系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [33] Nie K, Wang J L, Lei M, *et al.* Comparison of visibility in rainfall and haze-fog weather in Beijing using digital photographic visibility system [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, 36(1): 28-35.
聂凯, 王京丽, 雷鸣, 等. 基于数字摄像能见度仪的北京地区降雨和雾霾天气能见度对比分析 [J]. 气象与环境学报, 2020, 36(1): 28-35.
- [34] Wang C, Shang J Y. Experimental study of different lighting penetration effects on driving safety in rain and fog [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(28): 313-319.
王畅, 尚俊雅. 雨雾天气下不同灯光穿透效果对行车安全的试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 313-319.
- [35] Lu Z L, Yang C F, Zheng Z J, *et al.* Study on warning level of expressway dense fog [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2022, 45(1): 103-111.
卢振礼, 杨成芳, 郑宗杰, 等. 高速公路团雾分级预警研究 [J]. 气象与环境科学, 2022, 45(1): 103-111.
- [36] Xu X, Yin X C, Li Y, *et al.* Visibility measurement with image understanding [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2013, 26(6): 543-551.
许茜, 殷绪成, 李岩, 等. 基于图像理解的能见度测量方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(6): 543-551.
- [37] Cui C X, Bao Y X, Yuan C S, *et al.* Study on temporal and spatial occurrence pattern of fog on the coastal expressway of Jiangsu Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(12): 6-20.
崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等. 江苏省沿海高速公路雾的时空变化特征研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(12): 6-20.