

能见度激光雷达在天津港海事交通服务中的应用研究

王雪娇^{1,2}, 蔡子颖³, 孙玫玲^{1,2*}, 郭玲^{1,2}, 任丽媛^{1,2}, 张希帆^{1,2}

(1.天津市海洋气象重点实验室,天津 300074;2.天津市气象服务中心,天津 300074;3.天津市环境气象中心,天津 300074)

摘 要: 利用能见度激光雷达在天津港开展低能见度监测预警技术研究实验,发挥高精度雷达空间监测的优势,分析天津港港口航道能见度的时空分布特征,对比海陆低能见度的差异,探索激光雷达在海事交通气象服务中的作用。结果表明:天津港低能见度时空分布呈现明显的季节变化和日变化,冬季低能见度的出现频率高于其他季节,低能见度的高发时段集中在05—09时。受海陆不同下垫面的影响,近海低能见度的出现频率高于沿岸,高发时段晚于沿岸3~4 h。个例显示海事部门限制通航时间与雷达观测有较好的一致性,雷达能较为准确地捕捉到多次低能见度时段。

关键词: 激光雷达;低能见度;海事交通;概率密度匹配法;时空特征

中图分类号: P732.1 TN958.98 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2023)02-0110-10

0 引言

低能见度是影响海上交通、港区作业安全的重要因素,其引起的恶性交通事故、撞船事件等会给生命财产和生产作业造成严重损失。大气低能见度的形成原因复杂,且存在明显的地域性和季节性特征。低能见度对应的天气现象包括雾、霾、沙尘和降水等,其中大雾是影响港口航道能见度的最主要的天气现象。天津港地处渤海湾西海岸,位于京津冀城市群和环渤海经济圈的交汇点上,是中国北方最大的综合性港区。由于特殊的地理环境和气候条件,天津港低能见度天气多发,因此造成的船舶偏航、搁浅、触礁或碰撞时有发生,严重影响船舶的通航安全和进出港效率。据统计,2020年天津港因为低能见度天气实行的海事交通限制通航达43次,累计时间为590 h,给港口经济发展带来严重影响。

由于航道能见度观测资料不足,海事部门限制通航主要根据沿岸值班人员的人工观测,结合航道上代表点附近的船舶观测,来获取航道能见度的实

况。由于海陆热力差异造成的海陆低能见度分布相差较大,沿岸的能见度实况观测很难准确描述近海航道中的能见度状况,因此易造成低能见度天气的漏识别监测,难以满足海事交通管理指挥调度的需求。目前能见度观测主要使用前向散射型能见度仪和大气透射仪,由于地理条件和设备性能等方面的限制,无法在海面上大范围布设仪器。同时,由于能见度仪和透射仪观测的点数据仅代表一定范围内的面数据,因此在分布范围广、空间差异大、生消速度快的能见度天气观测方面会存在较大误差^[1]。天津港共有7个能见度观测站(6个陆地站和1个海上灯塔站),各站均使用前向散射型能见度仪,近海航道的能见度观测较为稀缺。图1统计了2018—2020年天津港沿岸自动站观测到的3 km以下能见度的累计时间以及天津海事局船舶交通管理中心限制通航的累计时间。对比结果显示用沿岸观测结果代替航道能见度实况的误差较大,而且这种方式耗费人力且效率较低,得到的气象信息不及时,经常出现当低能见度已经发生时值班人员

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-07-23。

基金项目: 安全天津与城市可持续发展科技重大专项(18ZXASQF00130)。

作者简介: 王雪娇(1990-),女,工程师,硕士,主要从事海洋气象服务技术研究工作。E-mail:919457005@qq.com

*通信作者: 孙玫玲(1970-),女,正研级高工,本科,主要从事专业气象服务技术研究工作。E-mail:308366124@qq.com

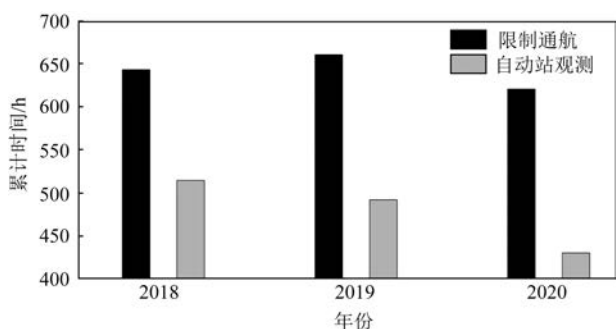


图1 2018—2020年沿岸能见度低于3 km和限制通航的累计时间

Fig. 1 Cumulative duration of visibility less than 3 km obtained from observations of coastal automatic stations and cumulative duration of restricted navigation during 2018—2020

才去观测和核实,因此采取航道管制措施会比实况有所延迟。

为了提高低能见度的观测能力,有学者利用毫米波雷达开展港口航道低能见度天气的观测研究^[2-3],但是在大雨情况下,电磁波衰减严重,因此毫米波雷达不适合探测强降水情况。另有学者利用激光雷达测量范围广、时空分辨率高、抗干扰能力强等特点,开展云^[4-6]、沙尘^[7-9]、霾^[10-12]等气溶胶的研究。康晓华等^[13]利用深圳大舜激光DSL系列能见度激光雷达开展了6个月的连续观测试验,结果表明激光雷达的能见度观测结果与人工观测结果的相关系数均高于0.85,不同范围内的能见度误差不高于14%。但由于激光雷达成本较高,体积相对较大,用于港口低能见度的观测较少。洗锦洪^[14]利用激光雷达在上海横沙岛、舟山群岛进行对比试验,验证了能见度激光雷达在海雾监测预警方面具有良好的性能;通过进一步优化算法^[15]和参数^[16],实现能见度激光雷达在不同天气条件下工作并实时监测海雾演变。陈燕等^[17]将能见度激光雷达应用于琼州海峡一次大雾过程,雷达观测数据与前向散射能见度仪观测数据的变化趋势一致,能见度激光雷达可为琼州海峡大雾监测和预报预警提供科学依据。

综上,由于海上观测资料的匮乏,难以满足海事交通管理指挥调度的需求,而激光雷达可实现观测范围内不同位置的水平能见度监测,弥补能见度仪和透射仪单点观测的缺陷。虽然学者验证了能见度激光雷达的准确性及其在海雾监测方面的可行性,但是仍存在3点不足:一是上述激光雷达研究

都是针对海雾个例,缺少对能见度长时间变化特征的研究;二是激光雷达受制于光源影响,随着使用时间的增加会出现光源衰减,导致系统性误差产生,上述研究没有对雷达数据进行订正,得到本地化的低能见度观测资料;三是没有针对海陆不同下垫面的时空变化特征进行研究,对比海陆低能见度的差异,分析低能见度的易发时段和区域,并最终应用于海事交通低能见度天气的监测预警服务。

本文借助激光雷达数据开展天津港港口航道低能见度监测预警技术研究。根据天津港船舶航行规则,利用自动站观测数据对2020年雷达数据进行订正并检验,得到本地化低能见度雷达观测数据。充分发挥高精度雷达空间监测的优势,探索激光雷达在海事交通气象服务中的作用,分析天津港港口航道能见度的时空分布特征,对比海陆低能见度的差异性,统计低能见度天气的易发区域和时段,给出相应的低能见度服务关键期和关键区域。本文以期为天津港开展分航道、分时段、分级别的重点监测和风险预警提供科学支撑,提升海事交通气象服务的针对性。

1 观测实验和数据处理

1.1 能见度激光雷达原理

本实验采用深圳大舜激光DSL-V031-3D水平扫描式能见度激光雷达,通过对大气颗粒物与激光之间相互作用所产生的后向光散射过程的检测分析,实现对大气能见度的测量。当能见度激光雷达向大气发射激光时,激光受到传输路径上气溶胶和空气分子的作用发生衰减,同时激光与大气中的气溶胶粒子和空气分子发生弹性散射(米散射或瑞利散射)。经过弹性散射后的信号沿原路返回,同时再次受到传输路径上气溶胶和空气分子的作用发生衰减,通过探测并反演后向散射信号,得到探测距离内的能见度分布信息。

激光雷达方程可表示为^[18]:

$$P(X) = \frac{C\beta(X)\exp[-2\int_0^X \alpha(X) dX]}{2X^2} \quad (1)$$

式中: $P(X)$ 代表距离 X 处的大气后向散射信号; C 是激光雷达常数; $\beta(X)$ 是大气的总后向体积散射系

数; $\alpha(X)$ 为总消光系数。通过求解此方程,可以得到大气分布的消光系数,从而得到能见度。与前向散射能见度仪和大气透射仪相比,激光雷达探测距离更远,可以得到消光系数和能见度的时空分布,测量结果不易受环境影响,时间和空间分辨率较高。表1为激光雷达的主要参数。雷达空间分辨率为15 m,时间分辨率为5 s~10 min,可对半径15 km范围内的大气以任意角度发射水平激光束,用以检测分析扫描区域内大气颗粒物的后向散射数据,实现对不均匀大气能见度的准确测量。

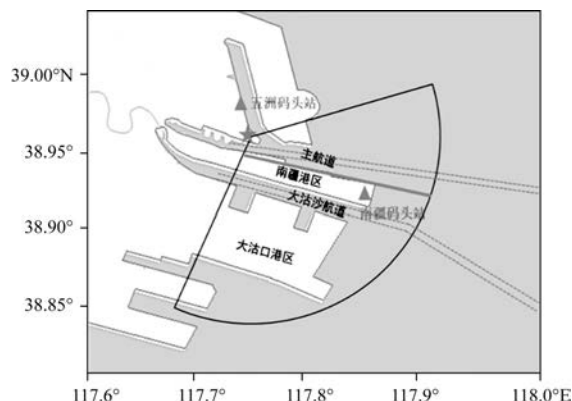
表1 DSL-V031-3D型能见度激光雷达主要参数

Tab.1 Main parameters of DSL-V031-3D visibility lidar

名称	参数
激光源	1 064 nm
单脉冲能量	100 μ J
频率	1~10 kHz
脉宽	<10 ns
偏振度	>1:100
探测范围	0.12~10 km
扫描角度	0~360°
空间分辨率	15 m
时间分辨率	5 s~10 min

1.2 观测实验

图2为激光雷达观测覆盖区域和能见度仪观测站的分布。雷达布设在天津海事局船舶交通管理中心交管塔上(见图2中★位置:38.96°N、117.77°E),高度约为70 m。该位置为主航道、北支航道和闸东航道三线交汇处,雷达安装在此位置可以获取以天津港东突堤为中心15 km扇形范围内近海一沿岸(见图2扇形区域)的雷达能见度观测数据,主要覆盖2条航线沿岸海域(天津港主航道、大沽沙航道)和2个港区(南疆港区、大沽口港区),其中天津港主航道警戒区是海事交通重点关注海域。雷达观测范围覆盖或邻近两个能见度仪观测站(见图2▲),分别是南疆码头站(站号:A3176,坐标:38.93°N、117.88°E)和五洲码头站(站号:A3171,坐标:38.98°N、117.79°E)。本文选取2020年激光雷达能见度观测数据,利用南疆码头站逐小时的能见度观测数据,采用概率密度匹配法对雷达数据进行订正并检验。



注:★为能见度激光雷达位置,扇形为雷达观测覆盖区域,▲为能见度仪观测站位置

图2 能见度激光雷达观测覆盖区域与能见度仪观测站的分布

Fig.2 Coverage area of the visibility lidar observation and the distribution of visibility meter observation stations

1.3 概率密度匹配法

由于受灵敏度和响应特征变化的影响,激光雷达观测数据存在明显的系统性偏差,需要通过地面观测资料的修正来提高观测精度。激光雷达能见度的系统偏差呈现非独立性的特征,随时间和空间的变化较大,因此线性订正并不适用。但在一定时空范围内能见度的概率密度分布是相对稳定的,可以用概率密度匹配法进行订正。该方法通过调整资料的气象要素数据,使其与实况观测气象要素的概率密度分布一致,从而实现订正。概率密度匹配法计算简单,在系统误差的订正方面具有较好的效果,且不必分析资料产生系统误差的复杂来源,因此近年来被广泛应用于卫星、雷达观测等资料的订正^[19-22]。本文选取南疆码头站(A3176)能见度仪的观测数据和该点的激光雷达能见度数据,采用概率密度匹配法对雷达数据进行点对点订正。根据天津港船舶航行规则,当能见度低于1 km时,天津港禁止船舶进出港或移泊;当能见度低于3 km时,船舶可单向通航。因此,本文将能见度划分为小于1 km和小于3 km两个等级,以南疆码头站能见度为基准,分级调整相同累积概率密度下雷达能见度的量值,使雷达能见度的概率密度分布与该站观测值一致。

1.4 订正效果检验

激光雷达能见度的非独立系统误差随时间和空间的变化较大,会产生不同能见度级别的误判,从而影响海事交通监测预警效果。为了检验概率密度匹配方法对天津港近海和沿岸雷达能见度观测的订正效果,这里定义雷达识别空报率概念,即如果激光雷达和地面观测结果处于同一等级时,则视激光雷达在该等级能见度观测正确;如果激光雷达不在地面观测等级,则视其为空报。利用2020年1—11月南疆码头站(A3176)数据,分级计算该点雷达数据在订正前后的空报率(见图3)。单点雷达数据分辨率为15 min,南疆码头站数据分辨率为1 h,为了匹配南疆码头站数据,将雷达分钟级数据合成小时平均,最终得到南疆码头站观测数据和雷达数据各6 366个样本。从图3可以看出,1 km以下能见度雷达数据订正前的空报率为53%,经过概率密度匹配方法订正后,空报率下降至37.9%,减少了约15%,而准确率保持在63.2%。3 km以下能见度雷达数据订正前的空报率为18.9%,订正后的空报率下降至7.6%,减少了约11%,准确率为67.9%。因此,通过概率密度匹配方法进行订正可以明显降低雷达数据空报率,还能保持较高的准确识别率。

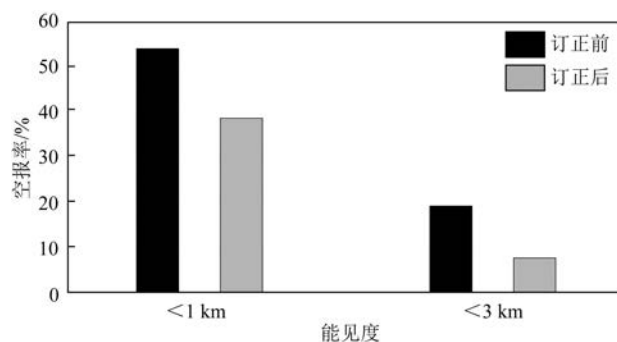


图3 2020年能见度激光雷达订正前后空报率

Fig.3 Empty report rate before and after visibility lidar correction in 2020

2 基于激光雷达的能见度时空分布特征

基于不同的海陆下垫面对雷达观测区域进行海陆分区,利用订正后的雷达数据,采用低能见度

出现频率作为统计量,即观测到的低能见度次数/能见度的观测次数,分析天津港低能见度的时空分布特征。根据海陆空间占比不同,我们将港口能见度激光雷达观测分为近海和沿岸两个区域(见图2),主航道连接近海,划分到近海区域,大沽沙航道位于南疆港区和大沽口港区之间,划分到沿岸区域。通过分析天津港不同分区低能见度的时空分布特征,对比海陆低能见度的差异性,统计港口低能见度天气的易发区域和时段,区分两条航道的低能见度分布特征,探索航道低能见度识别的监测预警方法,提高天津港在低能见度天气下开展海事交通管理的针对性。

2.1 空间分布特征

图4和图5显示,低能见度出现频率在不同季节呈现明显的海陆空间分布差异,即冬季明显高于其他季节,近海区域高于沿岸区域,夏季海陆差异更为显著,在雷达监测区域可以识别出易发生海事交通影响的低能见度区域。冬季1 km以下能见度出现频率的平均值为1.93%(见图4),夏季为0.10%;冬季3 km以下能见度出现频率的平均值高出其他季节8.7%~12.3%(见图5)。这与通过卫星遥感分析得到的渤海海雾在冬季存在高发期的结论一致^[23]。由于冬季气温日较差大,边界层多逆温,所以也是低能见度(例如雾霾)的高发期^[24]。因此,冬季应加强海事交通气象服务,增加实况监测频率,增强和海事部门的应急联动,及时处置辖区水上突发事件。

低能见度的海陆差异明显,近海区域高于沿岸区域,夏季海陆差异更为明显。近海区域1 km以下能见度出现的平均频率高出沿岸区域0.03%(见图4);近海区域3 km以下能见度出现的平均频率高出沿岸区域0.16%(见图5),其中夏季高出0.44%,冬季次之,高出0.32%。夏季在开展海事交通气象服务时,应重点关注海陆低能见度差异分析,减少由于利用沿岸陆地观测代替航道观测造成的低能见度天气漏识别监测问题。

从雷达监测区域中可以识别出天津港海事交通易受影响的低能见度区域。在大沽沙航道上游段有一处能见度低于3 km的高发区(见图5黑框区域),全年平均发生概率为5.8%。在开展海事交通

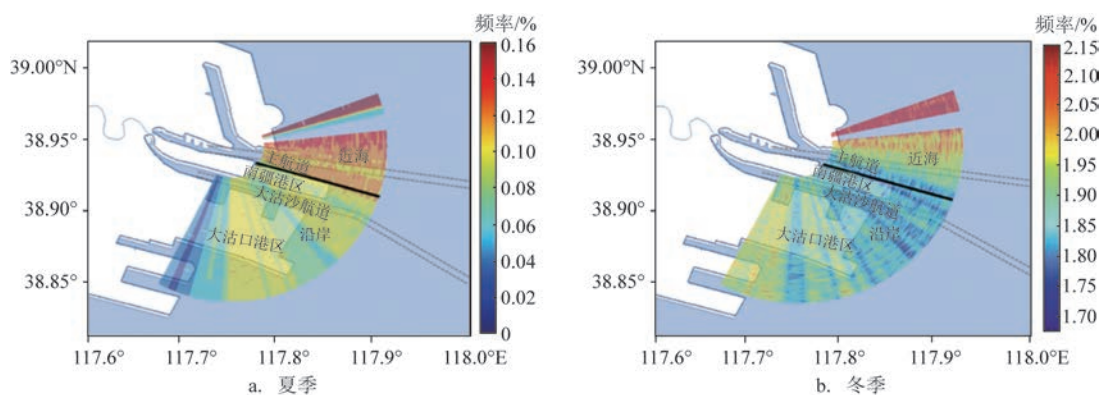


图4 不同季节激光雷达观测的能见度低于1 km出现频率的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of occurrence frequency of visibility below 1 km observed by lidar in different seasons

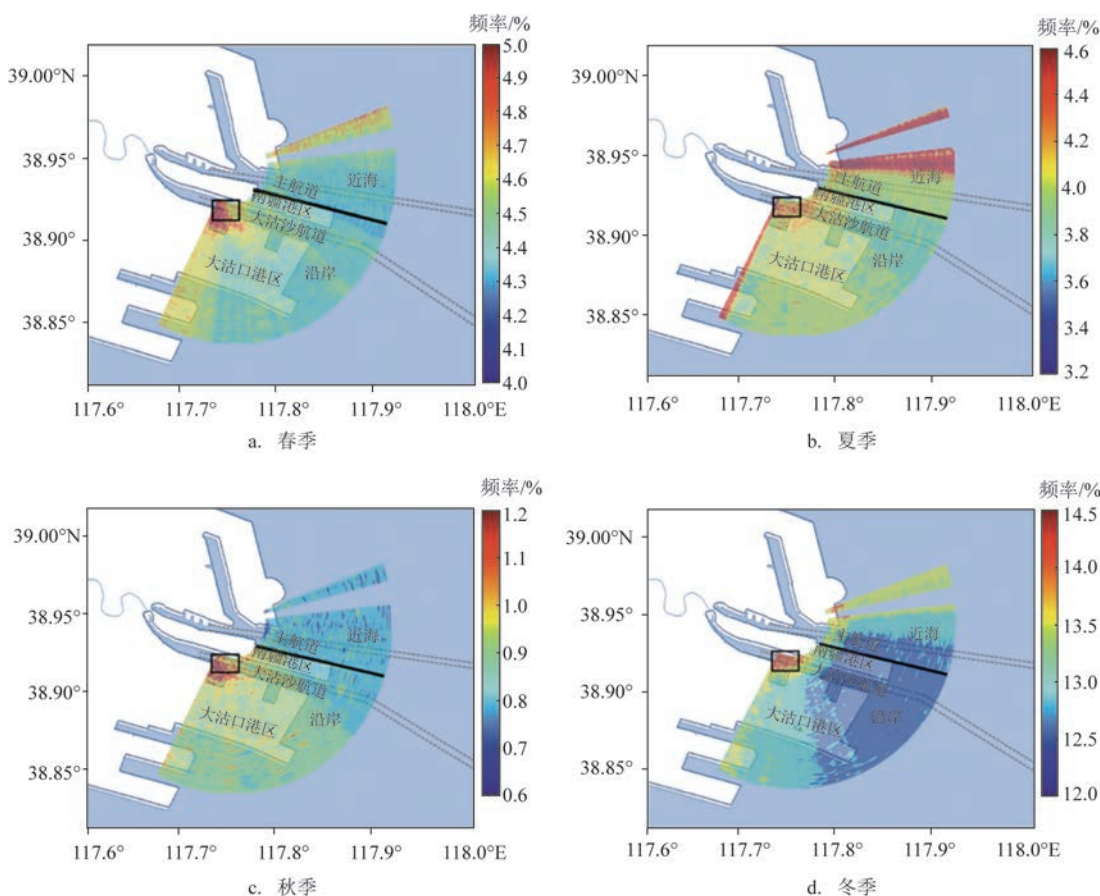


图5 不同季节激光雷达观测的能见度低于3 km出现频率的空间分布

Fig.5 The spatial distribution of occurrence frequency of visibility below 3 km observed by lidar in different seasons

气象服务时,可将上述低能见度易发区域设为重点服务区域,加密进行能见度观测,其观测数据可作为大沽沙航道能见度的最低阈值,用来提高设防标准。

造成海陆低能见度差异的原因主要是海洋和

陆地的下垫面不同,导致雾的形成机制、水汽来源和海盐气溶胶占比存在差异。渤海湾多为平流蒸发雾,当气温低于水温时,海水向上蒸发,空气的水汽量增加,在凝结的作用下形成蒸发雾^[25]。与海雾

形成机制不同,沿岸陆地多为平流辐射雾。它是由湿空气平流至陆地形成的,受太阳辐射影响,白天不断吸收热量,夜晚通过长波辐射冷却,使空气中水汽达到饱和从而凝结成雾^[26-28]。除了海雾和陆地雾的形成机制不同,海上更多的水汽补充也会导致近海雾的发生频率高于沿岸。此外,海盐气溶胶具有很强的吸湿性,导致成雾时海上能见度比陆地低。分析显示,当海上和沿岸出雾时,前者相对湿度在80%~95%之间的比例占93%,而后者相对湿度多集中在90%~100%,占97%^[29]。

2.2 时间变化特征

根据近海和沿岸的分区(见图2),分级统计沿岸和近海不同区域低能见度出现频率的日变化分布。从图6可以看出,低能见度的出现频率呈现明显的日变化和海陆差异。图6a显示,近海区域日变

化特征呈现单峰型,1 km以下低能见度的高发时段为08—09时(北京时,下同),该时段低能见度的出现频率明显高于其他时段,最高出现频率为3.4%。沿岸区域1 km以下低能见度的日变化特征为双峰型,最高峰值出现在05—06时,早于近海区域约3~4 h,最高出现频率为2.3%;次峰值出现在08—09时,最高出现频率为2.1%。近海和沿岸区域1 km以下低能见度的出现频率都从10时开始降低,到20时降到最低,之后又呈上升趋势。图6b显示,近海和沿岸区域3 km以下能见度的出现频率随时间变化趋势较为一致,日变化特征都为单峰型,高发时段都在06—07时,这一时段近海区域低能见度的出现频率为12.3%,沿岸区域为11.7%,之后出现频率却开始降低,17时达到最低。各个时段近海区域低能见度出现频率均高于沿岸区域以及包含近海和沿海全部区域的平均频率。但是由于激光雷达

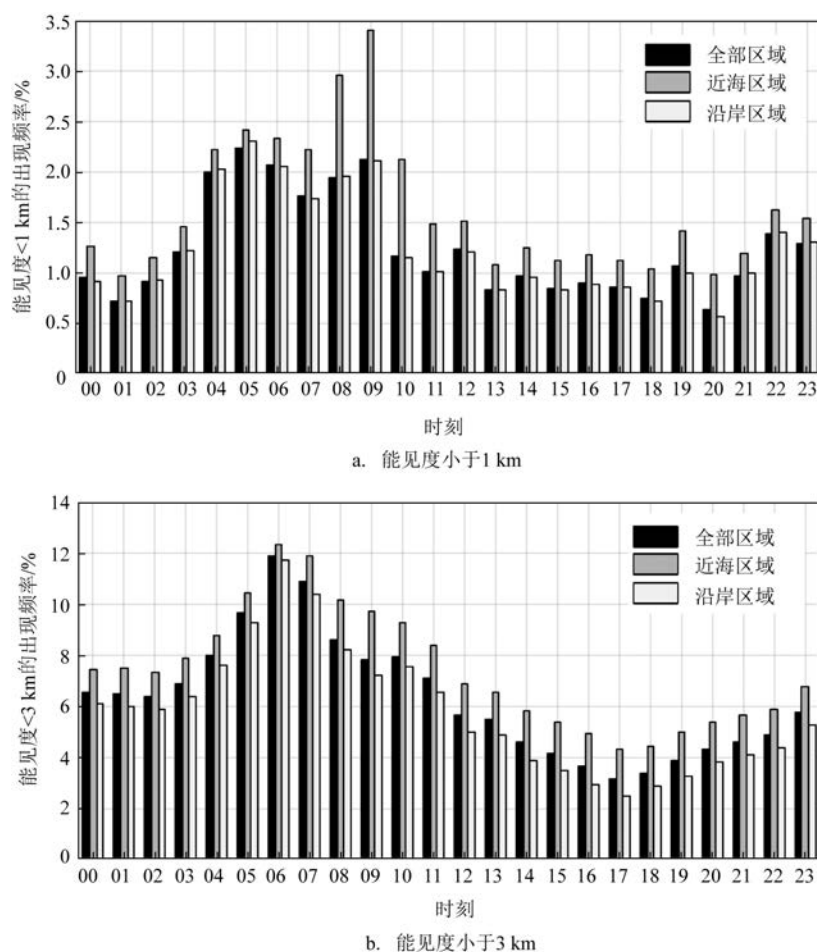


图6 激光雷达观测的各分区能见度出现频率日变化分布

Fig.6 Diurnal variation distribution of the occurrence frequency of visibility in each zone observed by lidar

观测区域的限制,沿岸区域面积明显大于近海区域,所以沿岸区域与全部区域的结果相近。综上,低能见度的高发时段集中在05—09时,从10时开始降低,17—20时为低能见度出现频率最低的时段,各个时段近海区域低能见度出现频率均明显高于沿岸区域,两个区域低能见度的高发时段也有差异。因此,在清晨陆地能见度好转的情况下,要密切关注海上低能见度天气,防范由于海陆低能见度差异造成的漏识别监测。

造成海陆低能见度日变化的原因主要为:夜间海水降温较慢,气温下降较快,当空气贴近偏暖的海面后易达到饱和,形成海雾^[30-31];陆地通过一夜的长波辐射降温,到日出前温度降到一天中最低,相对低的气温易使地面空气达到饱和而形成辐射雾^[32]。海雾和陆地雾低能见度高发时段主要都在清晨,白天则由于辐射增温作用加上湍流交换加剧,不利于雾的生成,因此,无论是海雾还是陆地雾都不易在傍晚生成。综上,造成海陆低能见度日变化差异的原因可能与海洋和陆地升温 and 降温速度不同有关。

3 个案例分析

为验证激光雷达数据在实际海事业务调度中的作用,本文选取低能见度易发区域的雷达单点观测和自动站观测数据,并与天津海事局船舶交通管理中心限制通航数据进行对比分析。自动站选用的是五洲码头站(见图2▲,站号:A3171),海事部门采用该点的人工观测结合航行船舶航道观测结果获取航道能见度实况;雷达选用大沽沙航道上游低

能见度高发区(见图5黑框区域)范围内一点的雷达数据。根据天津港船舶航行规则,当能见度低于1 km时,天津港禁止船舶进出港、移泊,将此能见度等级设置为1级;当能见度低于3 km时,船舶可单向通航,将此能见度等级设置为2级;当能见度高于3 km时,船舶可正常通行,将此能见度等级设置为3级。

图7显示,2020年1月16—27日,能见度激光雷达观测结果与海事部门限制通航的级别和时间有较好的一致性,但限制通航时间略延后于由能见度激光雷达观测确定的指标;而基于沿岸五洲码头能见度站的观测结果却表明,限制通航时间与实际能见度指标存在较大差距。在1月16—18日期间,海事部门分别在16日08—19时、17日07—18时、18日15时—19日07时实行单向通航,能见度等级为2级,在18日05—15时禁止船舶进出港和移泊,能见度等级为1级;雷达观测能见度分别在16日00—11时、17日00—13时、17日22时—18日02时、18日10时—19日01时低于3 km,能见度等级为2级,在18日02—10时低于1 km,能见度等级为1级。由此可见,雷达较为准确地捕捉到多次低能见度时段,尤其是对海事交通影响较大的能见度小于1 km的时段;雷达结果与限制通航时间差别很小,观测到的低能见度开始时间仅晚于开始限制通航时间3 h。而五洲码头站的观测能见度等级仅在18日03—08时为2级,其余时段都为3级,出现多次低能见度时段的漏识别监测,仅能识别出能见度最低的时段,并且与限制通航级别也无法对应。在1月22—24日期间,海事部门在22日08时—23日15时实行单向通航,能见度等级为2级;雷达观测能见度等级在

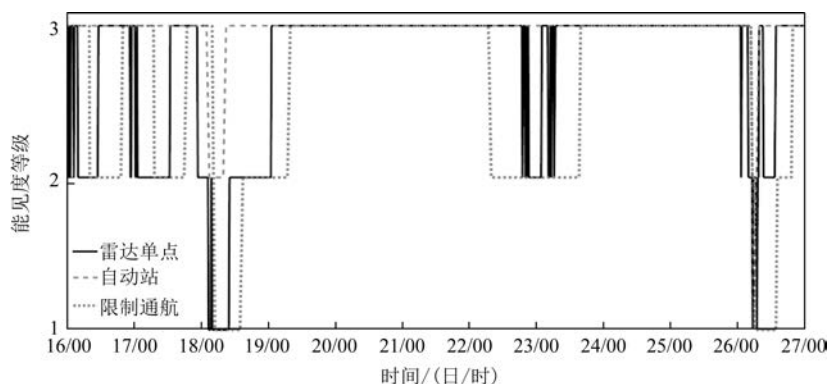


图7 雷达单点观测和自动站观测数据与天津港限制通航数据对比

Fig.7 Comparison of single point observation data of lidar and automatic station observation data with restricted navigation data in Tianjin Port

22日19时—23日06时为2级,相较而言海事部门限制通航时间有一定延迟;而五洲码头站的观测能见度等级为3级,没有识别出该低能见度时段。在1月26—27日期间,海事部门分别在26日05—06时、26日14—19时实行单向通航,能见度等级为2级,在26日06—14时禁止船舶进出港和移泊,能见度等级为1级;雷达观测能见度等级分别在26日04—13时为2级,在26日03时39分、07时12分为1级,雷达虽然捕捉到低能见度时段,但是与海事部门设置的能见度等级并未对应;而五洲码头站观测能见度等级仅在26日06时为1级,26日07时为2级,其余时段都为3级,虽然五洲码头站观测到的低能见度过程的开始时间与海事部门限制通航时间相符,但是两者持续时间差别较大,观测数据出现了较长时段的漏测。

综上所述,能见度激光雷达观测与海事部门限制通航的级别和时间有较好的一致性,可以较为准确地捕捉到多次低能见度时段。但是限制通航时间会略延后于激光能见度雷达观测结果,这是由于海事部门限制通航主要根据沿岸值班人员人工观测结合航行船舶航道观测结果,在低能见度已经发生或结束后,值班人员再去观测和核实,因此采取航道管制措施会比实况有所延迟。利用能见度激光雷达指挥港口海事交通调度,与实际航道管制措施具有一致性,而五洲码头站的观测判断结果在级别和时间上都与实际航道管制措施存在较大差异,多次出现低能见度时段的漏识别监测。因此,用沿岸观测代替航道能见度观测易造成海事交通指挥调度不准确、不及时,而利用激光雷达可以有效获取航道能见度分布情况,更为准确地识别低能见度天气,并观测其产生和演变过程,在港口海事交通监测预警中有较好的实际意义。

4 结论

本文充分发挥能见度激光雷达的空间观测优势开展天津港航道精细化监测,弥补现有能见度单点观测的不足,减少由于观测资料的匮乏导致的低能见度天气的漏识别监测;同时根据海事交通气象服务需求,统计低能见度天气的易发区域和时段,给出相应的低能见度服务对策,实现分航道、分时

段、分级别的海事交通重点监测和风险预警。结论如下:

①激光雷达具备较好的能见度空间观测能力,适合港口复杂下垫面观测。激光雷达能见度的系统偏差呈现非独立性的特征,适合常用于卫星、雷达订正的密度匹配方法。通过该方法对雷达数据进行订正,可以在明显降低雷达数据空报率的同时,保持较好的准确识别率。订正后的雷达数据空报率减少了11%~15%,准确率保持在60%以上。

②天津港低能见度时空分布呈现明显的季节变化和日变化特征。冬季低能见度的出现频率明显高于其他季节,3 km以下能见度的出现频率平均高出其他季节8.7%~12.3%。天津港在全天各个时段都有出现低能见度的可能,高发时段集中在05—09时,该时段影响海事交通的3 km以下低能见度的出现频率超过7%。

③由于港口海陆下垫面不同,雾的形成机理不同,因此低能见度的海陆分布也不均。近海区域出现低能见度的频率明显高于沿岸区域,夏季海陆差异更为明显,近海区域低能见度的高发时段晚于沿岸区域3~4 h。在雷达监测区域可以识别出天津港易发生海事交通影响的低能见度区域,即在大沽沙航道上游段有一处能见度低于3 km的高发区。

④由于海陆低能见度的时空分布差异,用沿岸观测代替航道能见度观测易造成海事交通低能见度的漏识别监测,而能见度激光雷达可以更为准确地识别低能见度天气,在港口海事交通监测预警中有较好的实际意义。个例显示激光雷达观测结果与海事部门限制通航的级别和时间有较好的一致性,雷达较为准确地捕捉到多次低能见度时段,而五洲码头站的观测判断结果则与实际航道管制措施存在较大差异。

参考文献:

- [1] 刘光普, 黄思源, 梁莺, 等. 毫米波雷达在港口海雾观测和能见度反演中的应用[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 993-1004.
LIU G P, HUANG S Y, LIANG Y, et al. Application of millimeter wave radar in harbor marine fog observation and visibility inversion[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 993-1004.
- [2] 胡利军, 杨豪, 高爱臻, 等. 宁波北仑港区一次航道海雾地基多源

- 信息观测特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(2): 192-199.
- HU L J, YANG H, GAO A Z, et al. Characteristic analysis of ground-based multi-source information observation of a sea fog process in waterway of Beilun Port, Ningbo[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(2): 192-199.
- [3] TESHIBA M, HASHIGUCHI H, UEMATSU A, et al. Fog observations with a millimeter-wave scanning radar at Miyoshi Basin, Japan[J]. Earth, Planets and Space, 2004, 56(2): 259-268.
- [4] CHEN J, LI Z Q, LV M, et al. Aerosol hygroscopic growth, contributing factors, and impact on haze events in a severely polluted region in northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(2): 1327-1342.
- [5] KOO Y S, YUN H Y, CHOI D R, et al. An analysis of chemical and meteorological characteristics of haze events in the Seoul metropolitan area during January 12-18, 2013[J]. Atmospheric Environment, 2018, 178: 87-100.
- [6] LIU J J, CHEN B, HUANG J P. Discrimination and validation of clouds and dust aerosol layers over the Sahara desert with combined CALIOP and IIR measurements[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(2): 185-198.
- [7] 黄悦, 陈斌, 董莉, 等. 利用星载和地基激光雷达分析 2019 年 5 月东亚沙尘天气过程[J]. 大气科学, 2021, 45(3): 524-538.
- HUANG Y, CHEN B, DONG L, et al. Analysis of a dust weather process over East Asia in May 2019 based on satellite and ground-based Lidar[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(3): 524-538.
- [8] NISHIZAWA T, SUGIMOTO N, MATSUI I, et al. Ground-based network observation using Mie - Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 79-93.
- [9] SHIMIZU A, SUGIMOTO N, MATSUI I, et al. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D19): D19S17.
- [10] PAHLOW M, KLEISSL J, PARLANGE M B, et al. Atmospheric boundary-layer structure observed during a haze event due to forest-fire smoke[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 114(1): 53-70.
- [11] 宋焱, 邓涛, 吴兑, 等. 广州地区典型灰霾过程及不同天气类型下边界层高度研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1381-1391.
- SONG L, DENG T, WU D, et al. Study on planetary boundary layer height in a typical haze Period and different weather types over Guangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1381-1391.
- [12] 徐栋夫, 曹萍萍, 王源程. 成都一次重污染过程的气溶胶光学特性垂直分布[J]. 气象, 2020, 46(7): 948-958.
- XU D F, CAO P P, WANG Y C. Study of the vertical distribution of aerosol optical properties during a heavy pollution event in Chengdu[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(7): 948-958.
- [13] 康晓华, 卜晓鸿, 徐文静, 等. 能见度激光雷达研制及其在民航机场的观测研究[J]. 量子电子学报, 2017, 34(6): 727-734.
- KANG X H, BU X H, XU W J, et al. Development of visibility lidar and its observation in civil aviation airport[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(6): 727-734.
- [14] 沈锦洪. 应用于海雾监测的激光雷达的研制和能见度反演算法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- XIAN J H. Development of Lidar for sea fog monitoring and inversion algorithm for visibility[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [15] XIAN J H, HAN Y L, HUANG S Y, et al. Novel Lidar algorithm for horizontal visibility measurement and sea fog monitoring[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34853-34863.
- [16] XIAN J H, SUN D S, AMORUSO S, et al. Parameter optimization of a visibility LiDAR for sea-fog early warnings[J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23829-23845.
- [17] 陈燕, 蔡亲波, 徐文静, 等. 能见度激光雷达在一次琼州海峡大雾中的应用[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 128-132.
- CHEN Y, CAI Q B, XU W J, et al. Application of visibility laser radar in a heavy fog of Qiongzhou Strait[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(4): 128-132.
- [18] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [19] 潘旸, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 755-766.
- PAN Y, GU J X, YU J J, et al. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(5): 755-766.
- [20] SHEN Y, ZHAO P, PAN Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [21] XIE P P, XIONG A Y. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D21): D21106.
- [22] 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 544-553.
- YU J J, SHEN Y, PAN Y, et al. Improvement of satellite-based precipitation estimates over China based on probability density function matching method[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(5): 544-553.
- [23] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于 20 年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 63-72.
- WU X J, LI S M, LIAO M, et al. Analyses of seasonal feature of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea based on the recent 20 years of satellite remote sensing data[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 63-72.
- [24] 蔡子颖, 刘爱霞, 韩素芹, 等. 天津低能见度特征初探[J]. 气象,

- 2014, 40(1): 114-118.
- CAI Z Y, LIU A X, HAN S Q, et al. Research of characteristics on low visibility in Tianjin[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(1): 114-118.
- [25] 曲平, 解以扬, 刘丽丽, 等. 1988—2010年渤海湾海雾特征分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 285-293.
- QU P, XIE Y Y, LIU L L, et al. Character analysis of sea fog in Bohai Bay from 1988 to 2010[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 285-293.
- [26] 李子华. 中国近40年来雾的研究[J]. *气象学报*, 2001, 59(5): 616-624.
- LI Z H. Studies of fog in China over the past 40 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(5): 616-624.
- [27] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 220-230.
- LIU X N, ZHANG H Z, LI Q X, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(2): 220-230.
- [28] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J]. *大气科学*, 2010, 34(4): 681-690.
- LU C S, NIU S J, YANG J, et al. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(4): 681-690.
- [29] 郑怡, 李冉, 史得道, 等. 渤海中西部近海与沿岸海雾的特征分析[J]. *海洋预报*, 2016, 33(6): 74-80.
- ZHENG Y, LI R, SHI D D, et al. Characteristics of offshore and coastal sea fog in the mid-west Bohai Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2016, 33(6): 74-80.
- [30] 汤鹏宇, 何宏让, 阳向荣. 大连海雾特征及形成机理初步分析[J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 62-69.
- TANG P Y, HE H R, YANG X R. Characteristics and generating mechanism of sea fog in Dalian of Liaoning Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 62-69.
- [31] 周福, 钱燕珍, 金靓, 等. 宁波海雾特征和预报着眼点[J]. *气象*, 2015, 41(4): 438-446.
- ZHOU F, QIAN Y Z, JIN J, et al. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(4): 438-446.
- [32] 郭俊建, 韩永清, 赵勇. 山东区域性辐射雾时空分布及地面气象要素特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(2): 96-102.
- GUO J J, HAN Y Q, ZHAO Y. Analysis of spatio-temporal distribution of regional radiation fog and characteristics of key meteorological elements in Shandong[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2020, 40(2): 96-102.

Application of visibility lidar on maritime traffic service in Tianjin port

WANG Xuejiao^{1,2}, CAI Ziyang³, SUN Meiling^{1,2*}, GUO Ling^{1,2}, REN Liyuan^{1,2}, ZHANG Xifan^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Meteorological Service Center, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: We carried out a research experiment on monitoring and early warning technology for low visibility using visibility lidar in Tianjin Port. To better exploit the advantages of high precision radar space monitoring, the temporal and spatial characteristics in visibility was analyzed, comparisons of the difference in low visibility between land and sea were carried out, and the role of lidar in the meteorological service of maritime traffic were explored. The results indicated that the temporal and spatial distribution of low visibility in Tianjin Port showed obvious seasonal and diurnal variation characteristics: low visibility occurred more frequently in winter than in other seasons, and the peak period of low visibility was concentrated between 05am and 09am. Affected by different underlying surfaces on sea and land, low visibility occurred more frequently in offshore areas than in coastal areas, and the peak period of low visibility (≤ 3 km) in the offshore area was 3~4 hours later than that in the coastal area. In addition, case studies showed that the limited navigation time of maritime traffic was in accord with the lidar observations, and lidar could relatively accurately capture multiple periods of low visibility.

Key words: lidar; low visibility; maritime traffic; probability density function matching method; time-space characteristics