

基于 Himawari-8 的东中国海日间海雾检测阈值分析及其能见度反演的研究

卢博^{1,2}, 王彬^{1,2}, 于博^{1,2}, 孙静宜^{1,2}, 王志勇^{1,2}, 冀承振^{1,2}, 董琳^{1,2}

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于星载激光雷达 CALIOP 获取到的云层和气溶胶的垂直剖面信息, 分析了 2015 年 7 月—2021 年 6 月期间过境东中国海的数据, 得到大量的海雾、低云、中高云和海表样本点, 将这些样本点应用于 Himawari-8 日间海雾检测的通道选择和阈值设定中, 提出了基于通道 1、2、4 和 13 的日间海雾静态阈值检测方法。结果表明: 使用现有的黄海中部的浮标能见度仪数据, 结合 Himawari-8 海雾检测通道选取的反照率数据, 可以重新拟合校正目前常用的海雾能见度反演经验公式中的参数常量, 改进此公式在东中国海域雾区特别是厚云区的适用性。

关键词: CALIOP; Himawari-8; 海雾检测; 能见度

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)06-0062-12

1 引言

雾是指由于微小的水滴(或冰晶)悬浮在接近地面的大气中, 使大气水平能见度小于 1 km 的一种天气现象^[1]。海雾则是指在海洋影响下出现在海上(包括岸滨和岛屿)的雾^[2]。雾和云都是水汽凝结的产物, 雾升高离开地面或海面后就成了云, 而云降低到地面或海面后就成了雾。因此, 本文中把海雾定义为与海面相接的云。

目前用于海雾检测的卫星众多, 其中一种是利用正交偏振云-气溶胶激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP)进行的。2015 年, WU 等^[3]根据 CALIOP 二级垂直特征标识(Vertical Feature Mask, VFM)产品中的海表误判现象, 建立了 CALIOP 的海雾检测算法, 并将此方法应用到了其他卫星数据海雾样本点的提取工作中。2019 年, XIAO 等^[4]使用 CALIOP 和中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiome-

ter, MODIS)数据提取了格陵兰海域大量的海雾、低云、中高云、海表、冰和雪样本点, 然后分析了 MODIS 所有通道所有样本点的反射率、辐射率和纹理特征, 进而提出了一种新的海雾检测算法。虽然 CALIOP 的海雾检测效果精准, 但限于其极轨卫星轨道周期为 16 d, 因此无法在特定海域实现长时间序列的连续数据采集。葵花 8 号(Himawari-8)是日本新一代静止气象卫星, 搭载的葵花成像仪(The Advanced Himawari Imager, AHI)包含可见光—红外共 16 个通道, 可用于海洋水色、陆表植被、大气环境以及云参数等多个领域^[5]。2019 年, 张培等^[6]提出使用动态阈值法和纹理法对 Himawari-8 的非海雾区域进行分步剔除的方法, 并建立了一套 Himawari-8 的日间海雾检测算法。2020 年, RYU 等^[7]结合 Himawari-8 的归一化积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI)和绿光通道的反射率, 提出了一种基于回归分析的海雾检测方法。除了使用卫星遥感中的反射率或亮温数据进行海雾

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-14。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405300); 北海局海洋科技项目(202006); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(201604)。

作者简介: 卢博(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋信息探测与处理研究。E-mail: lubo89@126.com

通信作者: 王彬(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋气象预报研究。E-mail: sgwangbin@126.com

判别,能见度也是海雾检测的一项重要指标。2011年,傅刚等^[8]根据3个典型海雾个例数值模拟得到的能见度与卫星反照率对比分析结果,线性拟合得到了新的大气能见度反演公式,通过海雾发生次数的时间分布特征统计,验证了该公式适用于不同月份和季节,此公式为后来的卫星数据反演海雾能见度工作提供了重要的参考和借鉴。2019年,田云菲等^[9]利用黄渤海多个沿岸和岛屿观测站的地面观测数据,构建了基于湿度信息的A-F能见度算法,提出了海雾能见度反演的新思路。

目前使用Himawari-8对海雾、低云、中高云和晴空海表进行区分识别的算法众多,其中静态阈值法具有参量稳定、算法简单和适用广泛等优点,目前仍是研究大气特性的基础算法。本文在CALIOP准确判别大气目标物的基础上,使用统计对比方法对16个通道数据进行分类和筛选,以提升静态阈值法识别海雾的检测效率为目的,尝试性地提取对海雾识别最为敏感的几个通道来确定海雾识别的阈值。在目前的海雾能见度计算工作中,不论是基于数值模式还是观测资料的反演算法,普遍缺乏连续时间序列的远海观测资料的参考和验证。因此,本文在黄海中部现有浮标能见度仪实测数据的基础上,结合Himawari-8的反照率数据,对目前广泛应用

的傅刚等^[8]提出的经验公式重新拟合,以求找到适用于东中国海海雾能见度反演的经验公式的新常量。

2 Himawari-8 海雾检测研究

2.1 Himawari-8 海雾检测阈值算法

在CALIOP的二级VFM数据反演过程中,识别各类大气成分需要计算其层顶和层底高度,由于无法得到与海表相接的低云或气溶胶的层底高度,因此CALIOP会将此类大气成分误判为海表。按照WU等^[3]的研究方法,首先提取VFM数据中层底高度不超过60 m的云,再根据一级数据产品中1 064 nm和532 nm衰减后向散射系数的两个阈值 $0.025/(\text{km}\cdot\text{sr})$ 和 $0.03/(\text{km}\cdot\text{sr})$,分离出海表误判区中的云,然后取并集得到海雾。基于此方法,对2015年7月—2021年6月 $25^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $118^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$ 东中国海海域匹配到的65个海雾案例进行数据预处理,将CALIOP得到的各大气目标物样本点经纬度信息与Himawari-8的经纬度数据进行匹配后,得到3 109个海雾样本点、15 900个低云样本点、19 997个中高云样本点和2 235个海表样本点。对上述样本点进行统计分析,其中通道1、2、4和13的统计分布曲线见图1。

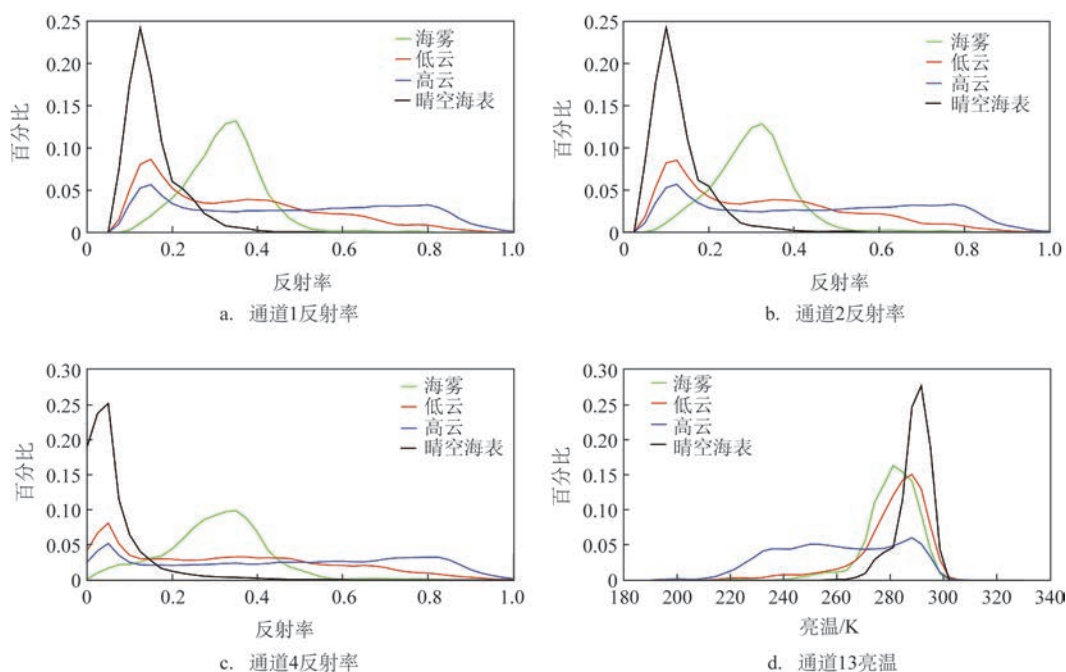


图1 Himawari-8 的4个通道的反射率或亮温分布统计曲线

Fig.1 Distribution statistical curves of reflectivity or brightness temperature of four channels of Himawari-8

根据 16 个通道的分布统计曲线特点,在通道 1—6 中计算海雾与低云的曲线交点,在通道 7—16 中计算海雾与中高云的曲线交点,作为通道阈值的上下限,计算结果见表 1。

阈值法的目标是使得阈值范围内需要提取的目标物相对数量更多,其他的目标物相对数量更少。此处定义变量 E_{fog} :

$$E_{\text{fog}} = P_{\text{fog}} \times \frac{P_{\text{fog}}}{P_{\text{fog}} + P_{\text{low-cloud}} + P_{\text{high-cloud}} + P_{\text{surface}}} \quad (1)$$

式中: P_{fog} 、 $P_{\text{low-cloud}}$ 、 $P_{\text{high-cloud}}$ 和 P_{surface} 依次为一个或多个阈值范围内的海雾、低云、中高云和海表样本点占各自所用通道所有样本点总和的百分比。 E_{fog} 越

大,表示阈值范围内的海雾相对越多,同时可以保证阈值范围不会太小,导致过度追求判断精度造成阈值的实用性降低。这里采用穷举的方式搜索最优通道组合,即不分通道组合数量对全部通道进行多阈值融合计算,共计算 $\sum_{i=1}^{16} A_{16}^i$ 得到 5.6874×10^{13} 个 E_{fog} 值。在计算过程中发现,列举到 4 个通道组合后,再增加通道阈值已无法提升 E_{fog} 值。只选择 1 个通道时,通道 1 为最优解;选择 2 个通道时,通道 3 和 13 为最优解;选择 3 个通道时,通道 2、4 和 13 为最优解;选择 4 个通道时,通道 1、2、4 和 13 可使 E_{fog} 达到最大值。结果见表 2 和表 3。

表 1 全部 16 个通道阈值设定

Tab.1 Threshold setting for all 16 channels

阈值设定	通道							
	1	2	3	4	5	6	7	8
阈值上限	0.440 0	0.420 1	0.404 5	0.443 9	0.418 1	0.307 3	315.871 6	252.960 1
阈值下限	0.213 2	0.189 0	0.161 3	0.143 8	0.178 4	0.107 2	292.347 7	233.680 2
阈值设定	通道							
	9	10	11	12	13	14	15	16
阈值上限	263.458 5	270.474 8	296.700 2	267.758 6	297.996 1	300.245 8	297.730 0	284.435 9
阈值下限	242.395 4	250.727 3	267.267 5	246.094 4	268.913 2	268.951 6	268.138 2	257.482 0

表 2 通道组合对应的各类大气目标物占比

Tab.2 Proportion of various atmospheric targets corresponding to channel combination

目标物占比	通道			
	1	3、13	2、4、13	1、2、4、13
海雾占比/%	0.836 0	0.744 3	0.746 2	0.744 3
低云占比/%	0.340 5	0.266 2	0.259 9	0.256 7
中高云占比/%	0.233 3	0.091 4	0.087 3	0.085 6
晴空占比/%	0.143 2	0.096 2	0.077 4	0.076 5
E_{fog}	0.450 0	0.462 4	0.475 6	0.476 3

表 3 最终通道选择及阈值设定

Tab.3 Final channel selection and threshold setting

阈值设定	通道			
	1	2	4	13
阈值上限	0.440 0	0.420 1	0.443 9	297.996 1
阈值下限	0.213 2	0.189 0	0.143 8	268.913 2

使用表3的阈值组合,可以在保证海雾漏判率小于30%的基础上,达到阈值范围内海雾样本点最多且低云、中高云和海表样本点最少的效果。最终的计算结果为在此阈值组合范围内海雾样本点约占全部海雾样本点的75%,漏判率约为25%;在此范围内,低云样本点占全部低云样本点的26%,中高云样本点约占全部中高云样本点的9%,海表样本点占全部海表样本点的8%, E_{fog} 为0.4763。结合阈值检测结果和对应通道统计分布曲线,Himawari-8漏判的海雾主要分布在晴空的海表反射率分布范围内,因此可以推断漏判的主要是厚度很小的海雾。对于这种浅薄雾,由于传感器可以直接透过雾层接收地面的反射信息,所以目前卫星遥感无法判断出这种浅薄雾。

2.2 海雾检测验证

2.2.1 浮标能见度仪数据验证

使用上述4个通道静态阈值组合对2021年3月28日09—15时(北京时,下同)和2021年6月8日10—17时发生在黄海中部的两个海雾个例进行海雾检测,并与此海域的浮标能见度仪数据进行连续时间序列的对比,通过海雾的移动过程来检查此阈值组合的海雾检测效果。

图2为2021年3月28日09—15时Himawari-8海雾检测结果与3个浮标站位能见度数据的对比图。绿线为全球海岸线数据库(A Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline Data-

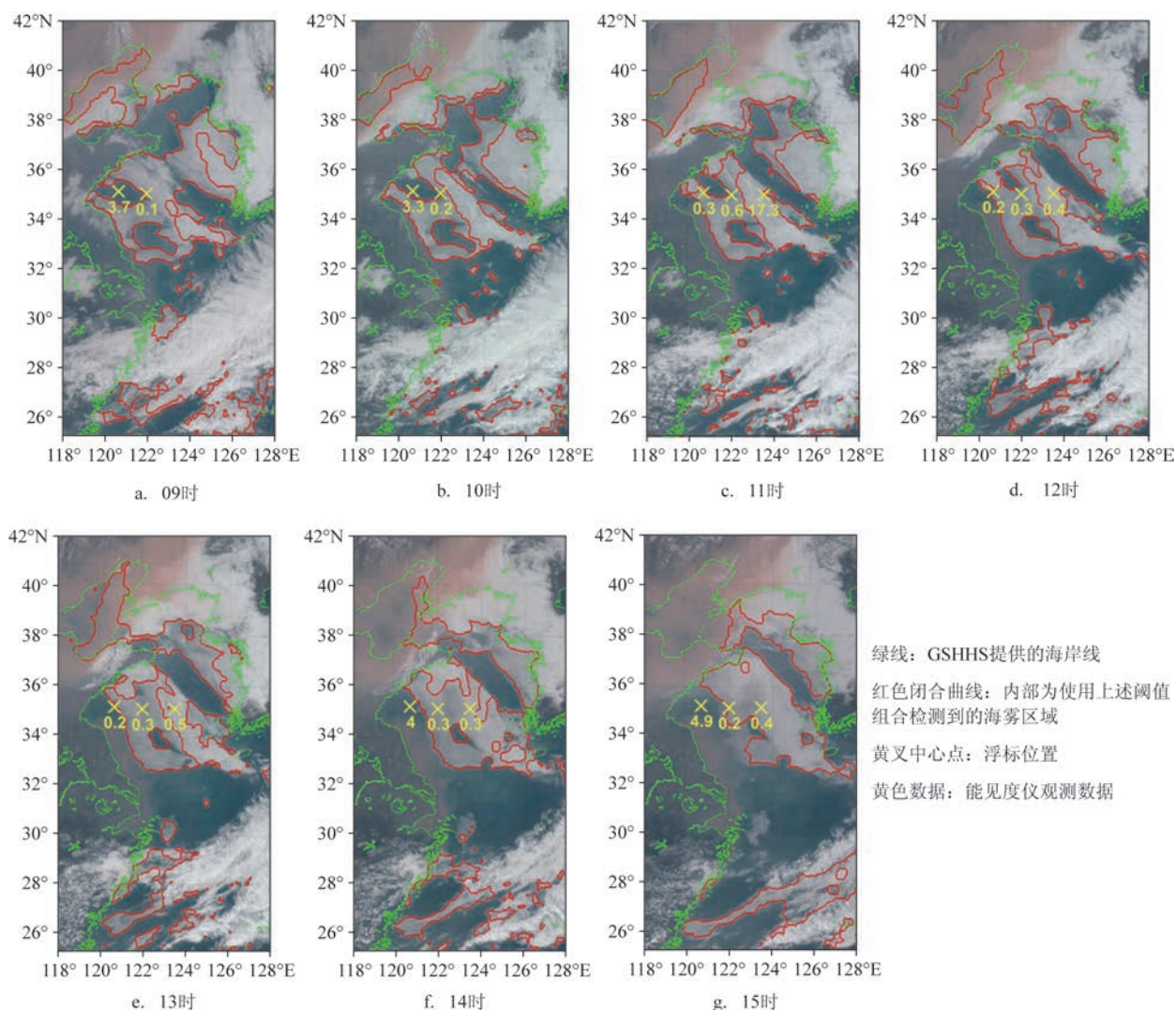


图2 2021年3月28日09—15时海雾检测结果与浮标能见度数据对比

Fig.2 Comparison between sea fog detection results and buoy visibility data from 9:00 to 15:00 on March 28, 2021

base, GSHHS) 提供的海岸线, 红色闭合曲线内部为使用上述阈值组合检测到的海雾区域, 黄叉中心点为浮标位置(敏感数据, 详细经纬度略), 黄叉下方为能见度仪观测数据, 单位为 km。黄海中部共有 3 个安装了能见度仪的浮标, 但存在部分浮标能见度数据缺失的情况(见图 2a 和 2b)。根据海雾的定义, 当能见度小于 1 km 时即可判定为海雾, 图 2 中 19 个能见度观测数据中, 有 17 个与 Himawari-8 的海雾检测结果一致。12 时和 13 时最东侧的浮标数据和 Himawari-8 的海雾检测结果不一致, 结合 11 时此站位 17.3 km 的能见度和云图中雾区的移动方

向, 我们判断 12 时和 13 时站位附近的海雾上方存在低云, 导致了阈值的漏判。

图 3 为 2021 年 6 月 8 日 10—17 时 Himawari-8 海雾检测结果与 3 个浮标站位能见度数据的对比图。此海雾个例不论是分布区域还是变化过程都较 3 月 28 日的海雾个例复杂得多。在图 3 的 13 个能见度观测数据中, 有 10 个与 Himawari-8 的海雾检测结果一致。13 时和 14 时南侧的浮标数据和 Himawari-8 的海雾检测结果不一致, 结合浮标方位角可发现, 这两个时次的浮标方位角差异很小, 我们判断可能是由于能见度检测方向上海雾浓度较低造成的; 11

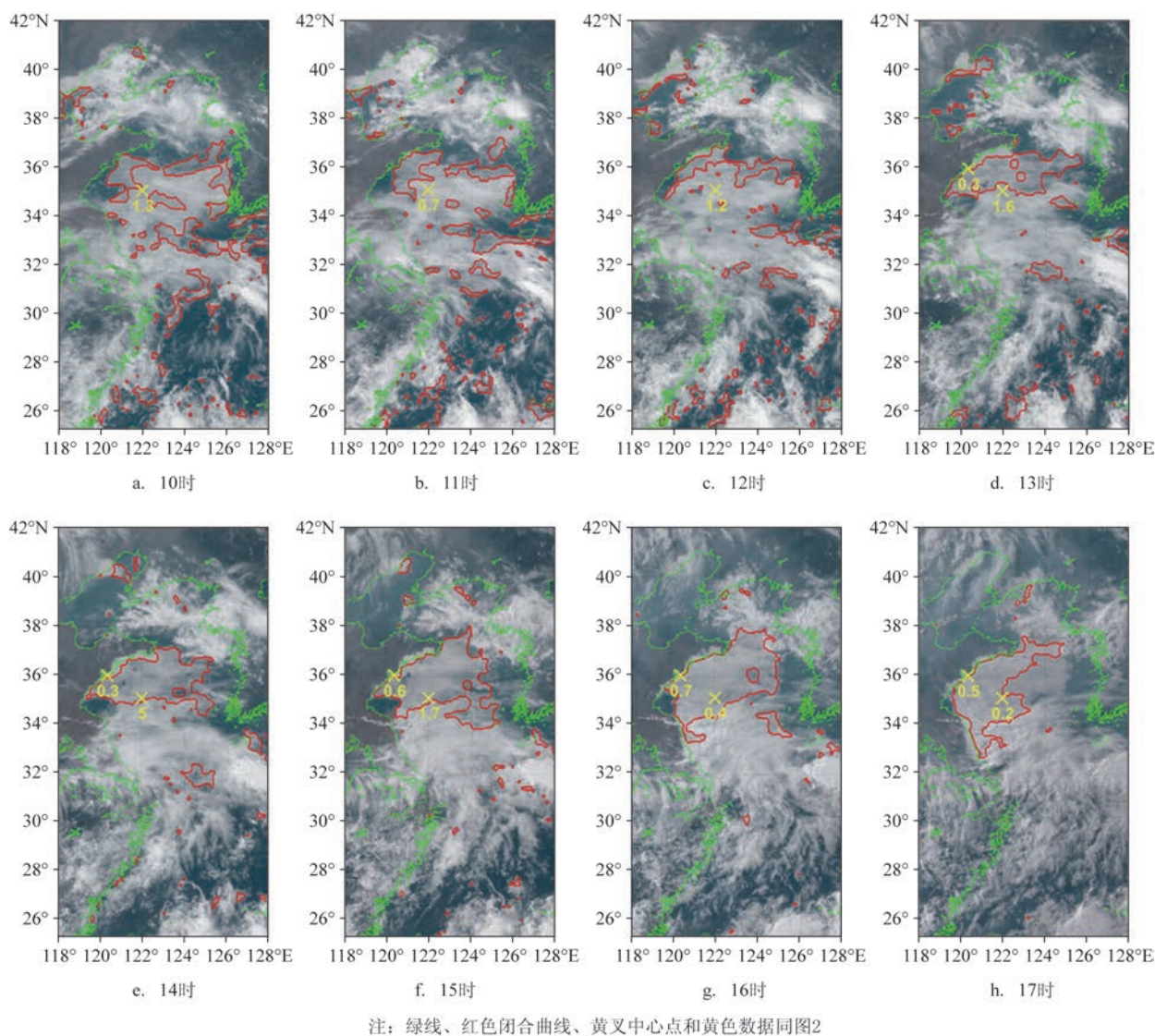


图 3 2021 年 6 月 8 日 10—17 时海雾检测结果与浮标能见度数据对比

Fig.3 Comparison between sea fog detection results and buoy visibility data from 10:00 to 17:00 on June 8, 2021

时的误判则可能是低云与海雾阈值在高反射率部分重合导致的。

2.2.2 CALIOP数据验证

我们分别对比了2018年3月29日12时和2018年5月16日12时两个海雾个例的Himawari-8和CALIOP的海雾检测结果,并进行海雾检测效果验证。

在3月29日的海雾个例中(见图4a和4b),Himawari-8在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 和 37°N 附近检测到了海雾,与CALIOP二级VFM产品的判别结果基本一

致, $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 区间内为海表误判, 37°N 附近为层底高度很低的低云。根据图4b所示, 34°N 附近雾区红色曲线拐点处为气溶胶和晴空海表, $35^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 区间内低云高低起伏,也基本不在Himawari-8的红色海雾区域内。在5月16日的海雾个例中(见图4c和4d),Himawari-8在 $31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 、 $34^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 39°N 附近检测到海雾,与CALIOP二级VFM产品的判别结果基本一致, $31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 区间内为海表误判, $34^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 39°N 附近为低云。

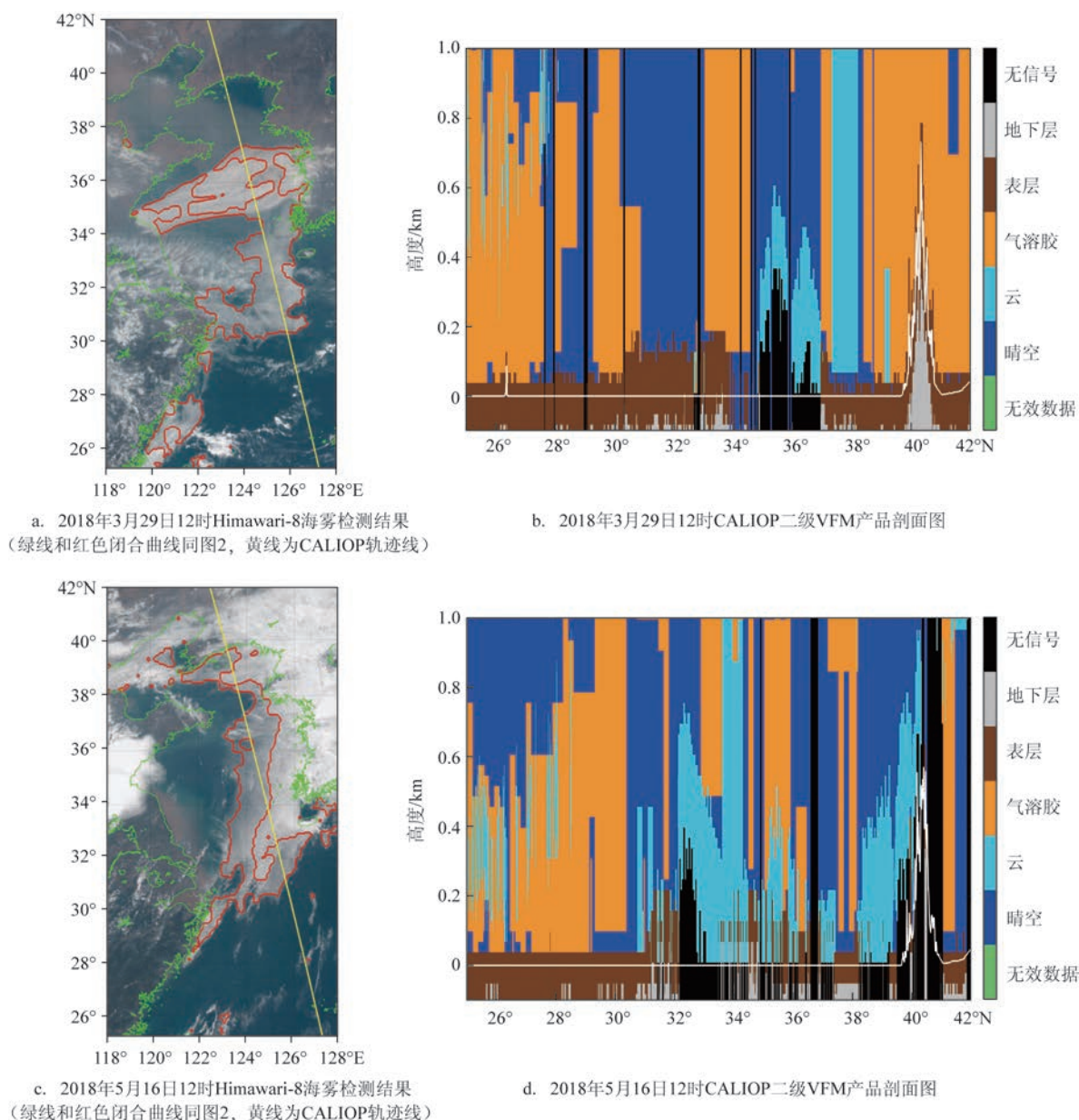


图4 2018年3月29日和2018年5月16日Himawari-8海雾检测结果与CALIOP数据对比

Fig.4 Comparison of sea fog detection results of Himawari-8 and CALIOP data on March 29, 2018 and May 16, 2018

3 海雾能见度反演

3.1 经验公式参数计算

目前普遍采用消光系数来计算大气水平能见度^[10],而消光系数可以通过光学厚度和计算厚度得到^[11-14],利用多个公式反演得到大气水平能见度的经验公式:

$$X_{\text{vis}} = 45 \times \left[\frac{(1 - \rho_c) \beta_{\mu_0}}{\rho_c \mu_0} \right]^{\frac{1}{3}} \times \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: X_{vis} 为水平能见度; ρ_c 为反照率; β_{μ_0} 为后向散射系统, 估值为 0.068 5; μ_0 为太阳天顶角余弦, 取平均值 0.652 9; ε 为常数, 取 0.02。令 $F(\rho_c) = \frac{\rho_c}{1 - \rho_c}$, $F(\rho_c)$ 为假定的一个数学变量, 无实际物理意义和物理单位, 可用作线性拟合过程中的过渡变量。将 $F(\rho_c) = \frac{\rho_c}{1 - \rho_c}$ 代入式(2)得到:

$$F(\rho_c) = \left[\frac{1}{X_{\text{vis}}} \times \ln \frac{1}{\varepsilon} \times 45 \right]^3 \times \frac{\beta_{\mu_0}}{\mu_0} \quad (3)$$

2011年, 傅刚等^[8]根据海雾个例的模式计算结果, 得到了多个大气能见度与反照率的对应关系。将能见度数据代入式(3), 计算与反照率对应的 $F(\rho_c)$ 值, 再进行线性拟合, 得到 $F(\rho_c) = e^{58.688\rho_c - 15.504}$, 进而得出计算海雾能见度的新的经验公式:

$$X_{\text{vis2}} = 45 \times \left[e^{-58.688\rho_c + 15.504} \times \frac{\beta_{\mu_0}}{\mu_0} \right]^{\frac{1}{3}} \times \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: X_{vis2} 为对应新参数的水平能见度。海雾的能见度普遍小于 1 km, 根据此条件, 筛选黄海中 4 个浮标的能见度数据, 共得到 272 对有效能见度数据和与其对应的 Himawari-8 反照率数据。这里的反照率数据并未根据阈值组合进行筛选, 原因是使用式(4)时, 无法根据类似于卫星遥感多个波段的光学特性进行大气成分的剔除, 因此, 不使用阈值干预的原始数据更适用于式(4)。将对应数据代入式(4), 得到的拟合结果见图 5。

根据浮标数据拟合得到 $F(\rho_c) = e^{46.2614\rho_c - 13.8544}$, 进而得到了新的基于能见度仪反演的经验公式:

$$X_{\text{vis2}} = 45 \times \left[e^{-46.2614\rho_c + 13.8544} \times \frac{\beta_{\mu_0}}{\mu_0} \right]^{\frac{1}{3}} \times \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (5)$$

从图 5 可以看出, 当反照率较小时, 两个拟合曲线的差异较小, 随着反照率增大, 即当海雾厚度较大时, 计算得到的能见度数值和观测数据的差异越来越大。图 6 为浮标实测能见度数据与使用式(4)和式(5)反演得到的能见度计算结果的散点对比图。这里的浮标数据是根据上文得到的阈值组合, 从 272 个能见度小于 1 km 的日间浮标数据中筛选得到的 87 个有效数据。之所以进一步筛选浮标数据, 是因为图 6 为能见度的直接对比, 如果不使用阈值进行干预, 则可能出现雾区上层因为有其他干扰物造成反照率过大, 导致反演结果与浮标实测能见度差异值过大。由于浮标能见度的分辨率为 0.1 km, 为了不让散点集中在垂直线上, 我们同时对浮标实测能见度数据进行小范围的最小二乘法插值。从图 6 可以看出, 使用经验公式反演能见度普

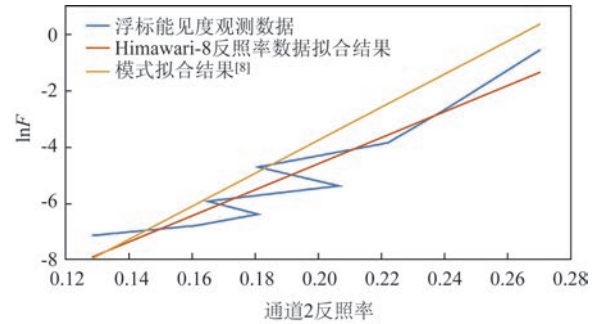


图5 经验公式反演数据与浮标实测数据的拟合对比

Fig.5 Fitting comparison between empirical formula inversion data and buoy observation data

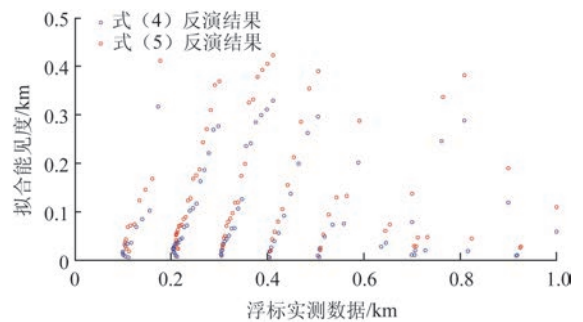


图6 经验公式反演得到的能见度与浮标实测数据对比散点图

Fig.6 Scatter diagram of comparison between empirical formula and buoy observation data

遍存在计算结果偏低的问题,即在大雾或浓雾时,经验公式效果相对良好,在浅薄雾或晴空时,计算得到的能见度往往会出现雾区范围变大的误判情况。从图 6 还可以发现,由式(5)反演得到的海雾能见度数据普遍高于式(4),更接近于浮标实测数据。

我们将式(4)和式(5)计算得到的能见度数据与浮标数据进行统计变量对比(见表 4),参数包括

均方根误差和平均绝对误差。从表中可以看出,两个公式均表现出能见度越低,即海雾越浓厚,能见度的反演效果就越好,且式(5)的偏差更小,更适用于东中国海海域能见度的反演工作。

3.2 能见度反演雾区云图验证

图 7a 中红线内部分是 2021 年 3 月 25 日使用

表 4 经验公式计算结果与浮标数据的统计变量对比

Tab.4 Comparison of statistical variables between the calculation results of empirical formula and buoy data

观测能见度区间/km	均方根误差/km		平均绝对误差/km		样本点数量
	式(4)	式(5)	式(4)	式(5)	
[0,0.15)	0.007 3	0.007 6	0.082 1	0.063 8	12
[0.15,0.25)	0.024 6	0.016 8	0.147 7	0.118 6	24
[0.25,0.35)	0.053 0	0.038 9	0.214 9	0.165 9	19
[0.35,0.45)	0.114 0	0.089 4	0.330 9	0.283 0	11
[0.45,0.55)	0.220 4	0.188 6	0.468 2	0.430 3	7
[0.55,0.65)	0.375 2	0.330 6	0.612 5	0.574 9	3
[0.65,0.75)	0.409 7	0.364 6	0.634 6	0.592 3	6
[0.75,0.85)	0.622 2	0.554 7	0.788 7	0.744 0	2
[0.85,0.95)	0.843 1	0.800 8	0.918 1	0.894 9	3
全区间参数	0.368 9	0.342 9	0.293 2	0.256 8	87

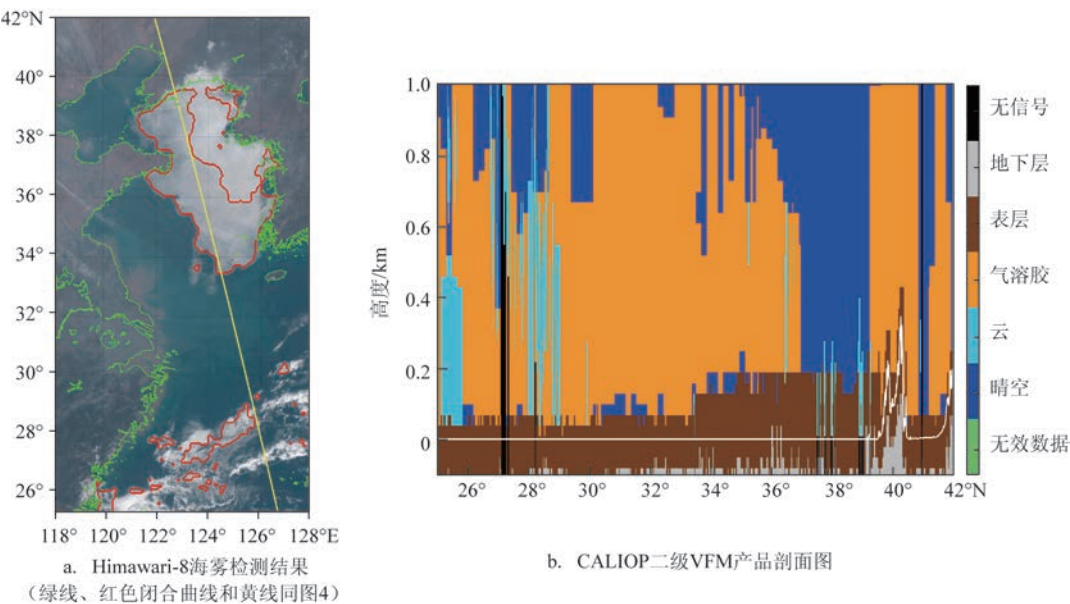


图7 2021年3月25日13时海雾检测结果与CALIOP数据对比

Fig.7 Comparison of sea fog detection results and CALIOP data at 13:00 on March 25, 2021

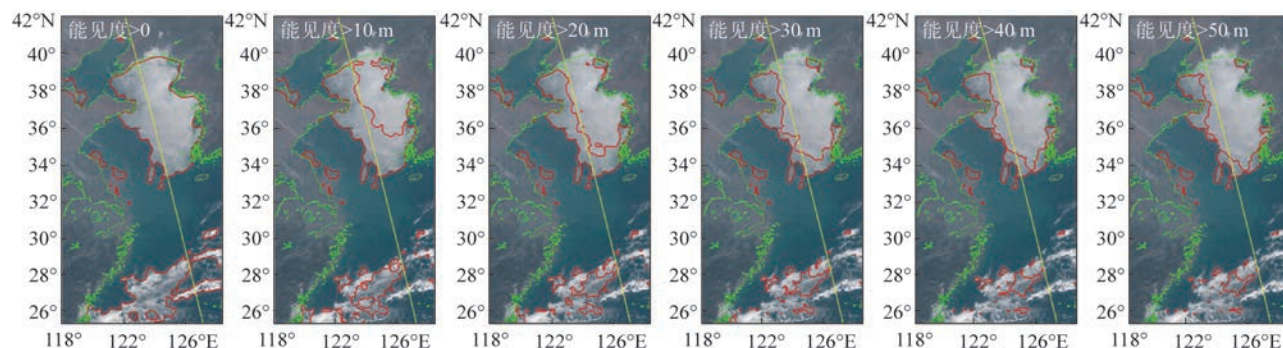
Himawari-8 阈值检测到的海雾区域,从 VFM 垂直剖面图可以看出 38°N 海域附近是低云(见图 7b),结合此区域为 Himawari-8 红色曲线弯点以及东侧云灰度更高的现象,我们认为东侧为低云。

图 8a 和 8b 分别是使用式(4)和式(5)计算得到的能见度反演出来的红色曲线内部的海雾区域。在绘制区域时,使用的能见度上限均为 1 000 m,下限按照 10 m 的间隔从 0 m 增至 50 m。从图中可以看出,在高反射率的海域中,由式(4)计算得到的能见度数值普遍偏小,大部分小于 10 m,而式(5)的计算结果随能见度下限增加的变化幅度相对稳定,不存在能见度数值大量集中在小区间范围内的问题。式(4)相对于式(2)克服了在少云区也会反演得到较低大气水平能见度的缺陷^[8],而式(5)相对于式(4)则改善了在厚云区反演得到的大气水平能见度较低的问题。图 7 中 38°N 红色曲线弯点东侧为低

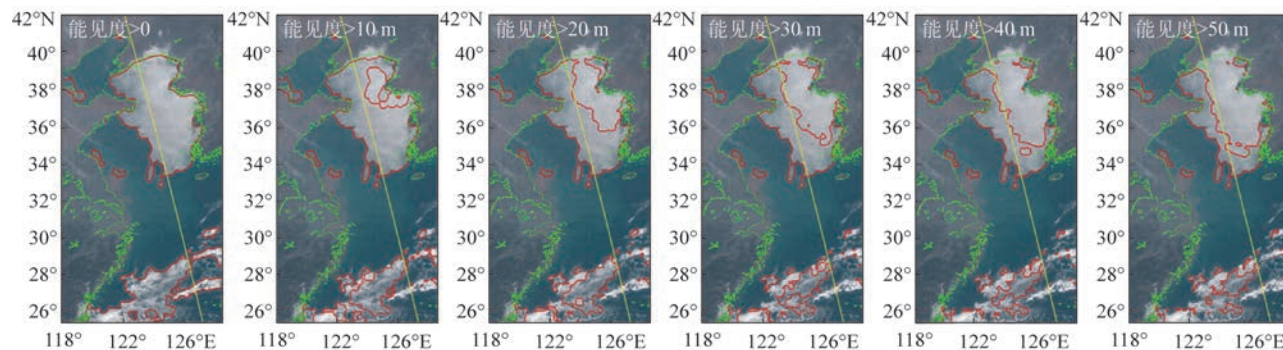
云,当式(4)和式(5)的能见度下限设定为 10 m 时,此区域的检测结果为非雾区,而当式(5)的能见度下限设定为 20 m 时,此区域与图 7 的检测结果一致性较高(见图 8)。因此在使用经验公式进行海雾能见度计算时,建议提高能见度下限设定,可在一定程度上剔除厚度较大的低云的影响。

图 9 中红线内部分是 2015 年 7 月 9 日使用 Himawari-8 阈值检测到的海雾区域,从图中可以看出, $28^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 和 35°N 附近红线区域内为海雾。

图 10a 和 10b 分别是使用式(4)和式(5)计算得到的能见度反演出来的红色曲线内部的海雾区域。从图中可以看出,整体的海雾检测结果在式(5)能见度下限设定为 10 m 时与图 9 的检测结果一致性较高。与图 8 得到的结论一致,即式(5)在厚云区的计算结果更加准确,且能见度下限的设置有助于更有效地识别雾区范围。



a. 式(4)计算结果



b. 式(5)计算结果

注: 绿线、红色闭合曲线和黄线同图4

图 8 2021 年 3 月 25 日两套公式计算出的海雾能见度对比

Fig.8 Comparison of calculation results of two sets of formulas for sea fog visibility on March 25, 2021

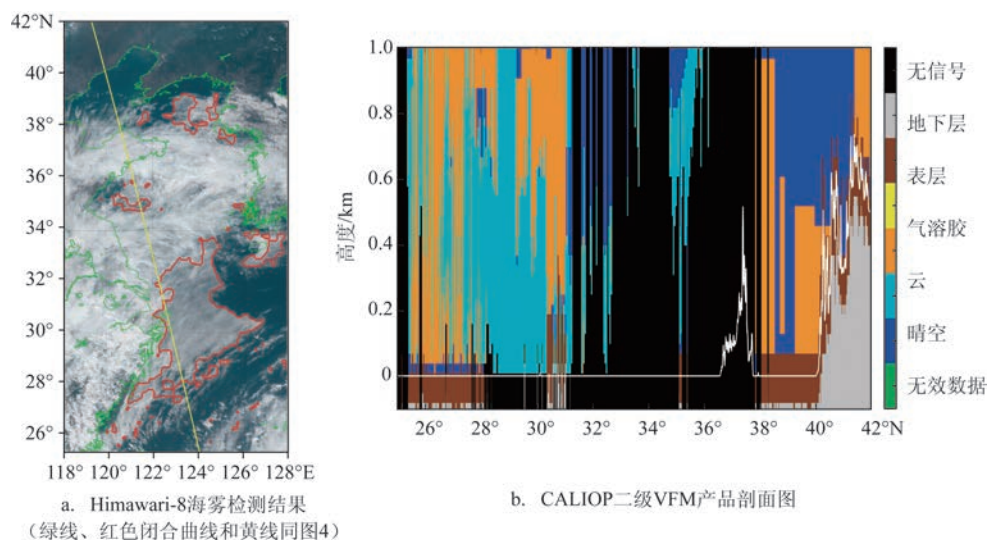


图9 2015年7月9日12时海雾检测结果与CALIOP数据对比

Fig.9 Comparison of sea fog detection results and CALIOP data at 12:00 on July 9, 2015

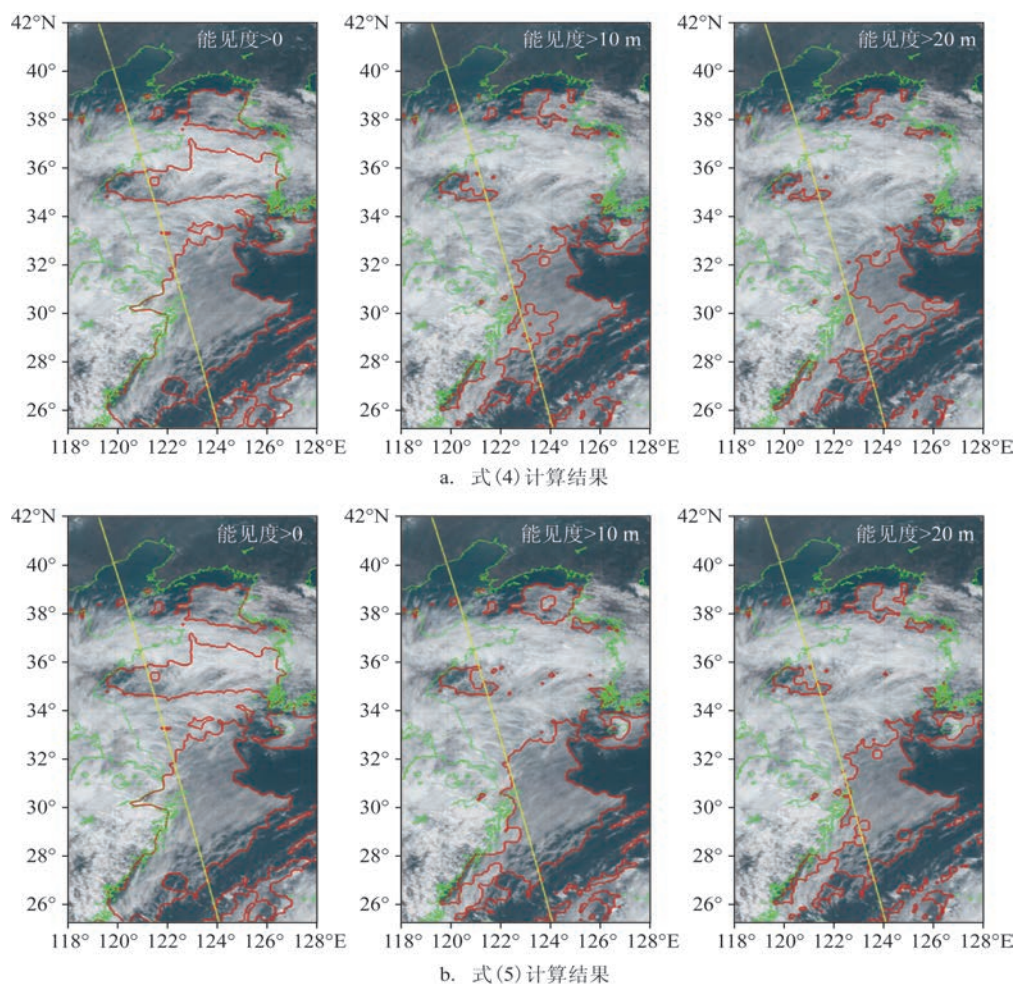


图10 2015年7月9日两套公式计算出的海雾能见度对比

Fig.10 Comparison of calculation results of two sets of formulas for sea fog visibility on July 9, 2015

4 结论

本文使用CALIOP提取大气目标物样本点,统计分析全部样本点在Himawari-8共16个通道上的分布特征,筛选得到海雾检测通道组合及其静态阈值。结合Himawari-8反照率数据和黄海中部的浮标能见度数据,拟合校正目前常用的海雾能见度反演经验公式,并改进公式在东中国海域雾区特别是厚云区的适用性。结论如下:

(1)结合星载激光雷达CALIOP样本点和Himawari-8多通道的反射率和亮温曲线的分布特征,我们确定通道1、2、4和13的阈值组合,可以达到阈值范围内海雾样本点最多且低云、中高云和海表样本点最少的效果,最终结果显示海雾的漏判率约25%。在两个个例的分析验证中,海雾识别率分别达到89.5%和76.9%,与理论算法的结果一致。漏判的海雾多为比较薄的海雾,此种类型的海雾与低云的分离仍需寻找新的方法加以解决。

(2)结合黄海中部浮标能见度数据和Himawari-8反照率数据,通过拟合校正并重新确定了海雾能见度反演经验公式中的两个常量参数。利用新参数反演得到的能见度数据与浮标数据的均方根误差和平均误差均有所降低,验证了新参数的在东中国海域的适用性。个例分析表明,新经验公式有效改善了在厚云区反演得到的大气水平能见度较低的问题,增加能见度下限设定,可剔除厚度较大的低云的影响。

参考文献:

- [1] OLIVER D A, LEWELLEN W S, WILLIAMSON G G. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(2): 301-316.
- [2] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: Ocean Press, 1983.
- [3] WU D, LU B, ZHANG T C, et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 153: 88-94.
- [4] XIAO Y F, ZHANG J, QIN P. An algorithm for daytime sea fog detection over the Greenland sea based on MODIS and CALIOP data[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 90(S1): 95-103.
- [5] 陈洁, 郑伟, 刘诚. Himawari-8静止气象卫星草原火监测分析[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(4): 197-204.
CHEN J, ZHENG W, LIU C. Application of grassland fire monitoring based on Himawari-8 geostationary meteorological satellite data[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(4): 197-204.
- [6] 张培, 吴东. 基于Himawari-8数据的日间海雾检测方法[J]. *大气与环境光学报*, 2019, 14(3): 211-220.
ZHANG P, WU D. Daytime sea fog detection method using Himawari-8 data[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(3): 211-220.
- [7] RYU H S, HONG S. Sea fog detection based on normalized difference snow index using advanced Himawari imager observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1521.
- [8] 傅刚, 徐杰, 张树钦. 数值模拟和卫星反演大气能见度对比分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(4): 1-10.
FU G, XU J, ZHANG S Q. Comparison of modeling atmospheric visibility with visible satellite imagery[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(4): 1-10.
- [9] 田云菲, 杨悦, 高山红. 一个黄渤海海雾大气水平能见度算法[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2): 24-33.
TIAN Y F, YANG Y, GAO S H. An algorithm of atmospheric horizontal visibility associated with sea fog over the Yellow and Bohai Seas[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2019, 39(2): 24-33.
- [10] STOELINGA M T, WARNER T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 385-404.
- [11] HUNT G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1973, 99(420): 346-369.
- [12] STEPHENS G L, PALTRIDGE G W, PLATT C M R. Radiation profiles in extended water clouds. III: observations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(11): 2133-2141.
- [13] KRIEBEL K T. Cloud liquid water path derived from AVHRR data using APOLLO[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(4-5): 723-729.
- [14] HEIDINGER A K, STEPHENS G L. Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part II: application to remote sensing in the O₂ A band[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(10): 1615-1634.

Research on analysis of daytime sea fog detection threshold in the East China Sea and visibility inversion based on Himawari-8

LU Bo^{1,2}, WANG Bin^{1,2}, YU Bo^{1,2}, SUN Jingyi^{1,2}, WANG Zhiyong^{1,2}, JI Chengzhen^{1,2}, DONG Lin^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China; 2. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the vertical profile information of clouds and aerosols acquired by the spaceborne lidar CALIOP (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization), we analyze the data of processes passing over the East China Sea from July 2015 to June 2021, and obtain a large number of sea fog, low cloud, middle and high cloud, sea surface sample points, which are applied to the channel selection and threshold setting of Himawari-8 daytime sea fog detection. We further propose a static threshold detection method of daytime sea fog based on 1, 2, 4 and 13 channels. The results show that the existing buoy visibility data in the middle of Yellow Sea, combined with the albedo data that is selected by the Himawari-8 sea fog detection channel, can be re-fitted to correct the parameter constants in the empirical formula for sea fog visibility inversion, and improve the applicability of this formula in the East China Sea, especially in the thick cloud area.

Key words: CALIOP; Himawari-8; Sea fog detection; visibility