

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.006

基于 Himawari-8 数据的日间海雾检测方法

张培¹, 吴东^{1,2}

(1 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266200)

摘要: 新一代静止轨道气象卫星 Himawari-8 静止气象卫星具有空间分辨率高可持续性观测的特点, 对海雾监测具有重要的意义。星载激光雷达 (Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP) 可以探测大气的垂直剖面信息。利用 CALIOP 数据进行海雾检测, 获得 4 类样本点: 中高云、低云、海雾和海表样本点, 并将这些样本点用于 Himawari-8 日间海雾检测的通道选择和动态阈值设定的研究中, 建立一套 Himawari-8 日间海雾检测算法。利用 CALIOP 和中国气象局国家卫星气象中心的气象卫星雾监测报告数据对海雾检测方法进行验证。对比 CALIOP 数据, 海雾检出率 63.42%, 漏检样本点中晴空海表占比 71.54%; 对比雾监测产品, 海雾检测率 89.7%。结果表明, 提出的海雾检测算法是可行的。

关键词: Himawari-8; CALIOP; 日间海雾检测; 动态阈值

中图分类号: P407; TN958

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)03-0211-012

Daytime Sea Fog Detection Method Using Himawari-8 Data

ZHANG Pei¹, WU Dong^{1,2*}

(1 College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China)

Abstract: A new generation of stationary orbit meteorological satellite Himawari-8 AHI is a multispectral earth observation sensor with high temporal and spatial resolutions, which is of great significance to the monitoring of sea fog. The vertical structure of the atmosphere at high-resolution can be detected by cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization(CALIOP). CALIOP data were used to classify the observed objects into four types: sea-surface, sea fog, stratus and middle/high-cloud. These samples were then used to the spectral analysis of the Himawari-8 channels and the spectral properties were obtained. A daytime sea fog detection algorithm based on Himawari-8 data was proposed through the study of the spectral properties. Both CALIOP data and fog-monitoring product from NSMC were used to validate the detection results. Compared with the CALIOP fog detection, the probability of sea fog detection is 63.42%, and 71.54% of the missing

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41376180)

作者简介: 张培 (1994 -), 女, 汉族, 陕西咸阳人, 研究生, 研究方向是主要从事海洋光学与激光探测方面的研究。

E-mail: zhangpei.eee@foxmail.com

导师简介: 吴东 (1964 -), 男, 汉族, 福建人, 教授, 主要从事海洋光学与激光遥感方面的研究。 **E-mail:** dongwu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-03-23; **修改日期:** 2018-09-12

samples are the misjudgements of sea surfaces. Based on the fog-monitoring product, the probability of sea fog detection is 89.7%. The results show that the proposed algorithm is feasible.

Key words: Himawari-8; CALIOP; daytime sea fog detection; dynamic threshold

1 引 言

海雾是一种常见的使大气能见度低于 1 km 的海上灾害性天气现象^[1], 对人们沿岸或者海上生产生活有严重的影响, 因此对海雾的监测和预测极为重要。卫星遥感技术是一种高效、重要的海雾监测手段。利用遥感数据检测海雾开始于 70 年代, Hunt^[2] 从理论上分析了不透明水云或冰晶在红外和远红外波段的波谱特征, Eyre 等^[3] 根据该理论利用 NOAA/AVHRR 数据建立了夜间大雾监测算法。随后, 又有学者利用不同的遥感数据验证了该算法^[4], 形成了目前业务化的夜间大雾检测算法—双通道差值法。然而双通道差值法只适用于夜间海雾检测, 白天并不适用。Cermak 等^[5] 基于静止卫星 Meteosat 8 SEVIRI 数据分离了低层云雾和中高云, 并根据光谱特性和微物理性质分离了雾和低云, 该算法对低层云雾的分辨准确率为 63.2%~83.4%。刘希等^[6] 基于 MTSAT 卫星资料建立了一种全天候的海雾检测算法。Yuan 等^[7] 基于 GOCI 数据, 提出了三个指数: 海陆分离指数 (Sea-land discrimination index, SLDI)、中高云剔除指数 (Middle/high level cloud deduction index, MCIDI)、波段斜率指数 (Band slope index, BSI), 用来分离海陆, 低云/海雾和中高云, 取得了不错的结果。吴晓京等^[8] 利用动态阈值法改进了风云二号海雾检测技术, 设计了一套自动海雾检测方法。随着美国星载激光雷达的发射, 吴东等^[9-10] 利用星载激光雷达探测的大气垂直剖面信息建立了 CALIOP 海雾检测算法, 并改进了 MODIS 海雾检测阈值。总体来说, 人们基于卫星遥感的海雾检测技术已经有了不错的进展, 目前主要的难点在于海雾和低云的分离。随着日本新一代静止气象卫星 Himawari-8 的发射, 其高观测频次、高分辨率为人们实现对海雾的实时监测和生消变化研究提供了更大的便利。由于 Himawari-8 投入使用的时间尚短, Himawari-8 的应用主要在海温监测、森林火灾监测等方面, 利用 Himawari-8 数据进行海雾监测的较少。Shang 等^[11] 基于 Himawari-8 数据利用植被指数、雪覆盖指数以及中红外通道与长波红外通道亮温差等建立了一套日间地雾检测算法。本文将结合 CALIOP 数据建立一套 Himawari-8 日间海雾检测算法。

2 资料数据

2.1 CALIOP 数据

研究所用的 CALIOP 数据均来源于美国 NASA 的兰利研究中心 (https://eosweb.larc.nasa.gov/HORDERBIN/HTML_Start.cgi)。CALIPSO 是 A-train 系列的一员, 上面搭载一台云和气溶胶激光雷达 (CALIOP), 用于探测大气垂直剖面信息。CALIOP 有 532 nm 和 1064 nm 两个波段, 利用这两个波段的总衰减后向散射系数以及 CALIOP 二级垂直特征分类 (Vertical feature mask, VFM) 产品进行海雾检测, 所用 CALIOP 数据的垂直分辨率为 30 m, 径向分辨率为 333 m。

2.2 Himawari-8 数据

Himawari-8 静止气象卫星于 2014 年 10 月发射, 2015 年 7 月投入使用。Himawari-8 上面搭载了一台具有 16 个通道的先进可视红外成像仪 (Advanced Himawari imager, AHI), 涵盖了可见光、近红外、中红外和远红外波段, 空间分辨率为 0.5~2 km, 每隔 10 min 就有一次全圆盘数据。Himawari-8 静止气象卫星数据可免费在向日葵显示器网站 (http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html) 获得。所用数据为分辨率 2 km 的全圆盘 L1 反照率和亮温数据。Himawari-8 各通道中心波长和分辨率如表 1 所示。

表 1 AHI 通道

Table 1 Channels of AHI

通道	中心波长 (μm)	分辨率 (km)	通道	中心波长 (μm)	分辨率 (km)
1	0.46	1	9	7.0	2
2	0.51	1	10	7.3	2
3	0.64	0.5	11	8.6	2
4	0.86	1	12	9.6	2
5	1.6	2	13	10.4	2
6	2.3	2	14	11.2	2
7	3.9	2	15	12.3	2
8	6.2	2	16	13.3	2

2.3 雾监测产品

中国生态遥感信息服务网 (<http://rsapp.nsmc.org.cn/uus/index.jsp>) 发布了来源于国家气象卫星中心的 FY 气象卫星对天气、环境、气候的监测报告, 其中包括雾监测报告。利用其雾监测产品和 CALIOP 数据对提出的 Himawari-8 海雾检测算法进行了验证。

3 海雾检测方法和原理

3.1 CALIOP 海雾检测方法介绍

CALIOP 数据反演中, 无法识别海雾这种与海表相接的目标物的底高, 所以会将海雾与下层海表 (surface) 归为一类, 即海表误判区, 同样的道理, 海表误判区也包括了气溶胶。吴东等^[9-10]统计了大气低层云雾和气溶胶的衰减后向散射系数, 给出了海表误判剔除气溶胶的阈值, 根据该研究结果, 基于 CALIOP 数据的海雾检测的方法有两种: 1) VFM 数据中云底距海表不超过 2 个测量单元 (bin) 的云此处认为是海雾; 2) 在海表之上有两个及以上的 bin 被判为表层, 对应的 1064 nm 衰减后向散射系数满足 $\beta_{1064\text{ nm}}^i > 0.25\text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 并且 532 nm 总衰减后向散射系数满足 $\beta_{532\text{ nm}}^i > 0.03\text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 时, 我们认为是海雾。

3.2 AHI 海雾检测原理和通道选择

根据 CALIOP 海雾检测结果和 VFM 数据, 获得中高云、低云、海雾和海表样本点, 比较分析这些样本点在 AHI 各通道的波谱特征, 得到了以下主要结论: 1) 晴空海表区域和云雾区在近红外波段第四通道 (0.86 μm) 反照率差异最大; 2) 在远红外波段海雾和低云亮温接近周围晴空海表的亮温, 中高云则明显低于周围晴空海表亮温; 3) 基于阈值法很难将中高云和低云 / 海雾分离; 4) 海雾区域第三通道 (0.64 μm) 反照率大于第五通道 (1.6 μm), 低云区域则正好相反。

基于上述结论, 选择利用第四通道 (0.86 μm) 基于动态阈值法分离云雾与下垫面, 利用第 11 通道 (11.2 μm) 云雾与周围晴空海表的亮温差来分离中高云和低层云雾, 利用第三通道 (0.64 μm) 和第五通道 (1.6 μm) 建立海雾低云分离指数 FSDI, 同时利用第四通道 (0.86 μm) 纹理信息作进一步的筛选。

4 Himawari-8 日间海雾检测算法

4.1 云雾和下垫面分离

云雾和下垫面分离也就是云检测,目前云检测从原理上主要基于阈值和纹理两方面,在这基础上辅以机器学习等手段。因为下垫面和云雾区的反照率会随着季节或时间变化而发生改变,使用动态阈值能更好地实现云雾和下垫面分离。利用晴空海域和云雾区域在可见光和近红外波段的反照率的差异,在动态阈值法(Dynamic threshold cloud-masking, DTCM)的基础上进行晴空海域和云雾区域的分离。DTCM法是2002年Alan等^[12]提出的,该方法认为在研究区域的反照率直方图曲线上,下垫面峰值靠近云一侧二阶差分最大处为区分云和下垫面的最佳阈值。田永杰等^[13]的研究表明,差分数据容易受到异常数据的影响使得求得的阈值出现偏差,所以其对统计直方图进行曲线拟合,但是在拟合过程中使用拟合优度判定拟合结果,对多项式拟合中经常出现的过度拟合现象考虑不多。基于上述阈值法做进一步的改进,即在多项式拟合中利用交叉验证方法计算最佳拟合阶数。基本思路是:假设直方图曲线实际有 N 个观测点,对于某一拟合阶数 M 做 N 次拟合,在每次拟合过程中将第 i 个观测量删掉,然后计算利用拟合函数对第 i 个观测量的预测值,计算在这 N 次拟合中第 i 个变量的残差平方和,最后找到使这个残差平方和最小的阶数 M ,即

$$\min(M) \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{iM}^*)^2 \right\}, (R^2 > 0.9), \quad (1)$$

式中 y_i 是直方图第 i 点实际观测值, y_{iM}^* 是删掉第 i 个点的 M 阶拟合函数在 i 点的预测值。当求得使得残差平方和最小的拟合阶数时,判断其拟合优度,假若拟合优度 $R^2 \geq 0.9$,则该拟合阶数为最佳拟合阶数,否则给该拟合阶数加1继续拟合,直至满足 $R^2 \geq 0.9$ 。这样既能保证拟合函数不被过度拟合,也可以保证拟合的精度。利用交叉验证方法计算拟合阶数的缺点是比较慢,对于有 N 个观测点的直方图来说,至少要做 $N \times N$ 次拟合,当数据比较大时,该方法需要运算的时间很长,但是利用这种方法的优点是总能保证拟合函数不被过度拟合。

统计观察了2016年160组CALIOP和Himawari-8数据对比图,得出当直方图间距取0.01,平滑步长为3时,利用交叉验证方法能得到较好的拟合结果。利用拟合函数求得阈值 T ,假若 T 满足 $0.02 \leq T \leq 0.2$ 时,认为 T 为云雾与下垫面分离最佳阈值,否则最佳阈值设为默认值0.12。算法中 T 的下限值来自160组案例的实验观察统计,海表在第四通道($0.86 \mu\text{m}$)的反照率一般是高于0.02,上限值来自于Himawari-8海温产品云检测在这一通道所用阈值^[14]。

4.2 雾/低云和中高云的分离

根据相关研究,绝大多数的海雾都不会超过 $2000 \text{ m}^{[5]}$ 。假定大气温度垂直变化率为 $0.6 \text{ K}/100 \text{ m}$,即海拔高度每增加 100 m ,大气温度降低 0.6 K ,根据这一假设,基本可以确定亮温差的阈值,也就海表-云雾的亮温差小于 12 K 时,认为是可能含有海雾的低层云雾,当海表-云雾的亮温差大于 12 K 时,则肯定不含海雾。假如所研究区域有海雾/低云,那么在海表-云雾的亮温差直方图上肯定会有一个峰值。在实际情况中,由于海雾和低云常常伴随着逆温现象,所以晴空海域与 2000 m 的低云顶或雾顶的亮温差一般小于 12 K 。基于这样的想法,利用4.1节叙述的动态阈值法求取最佳亮温差阈值,即对海表-云雾的亮温差直方图小于 12 K 的部分作曲线拟合,求取其二阶导数,取靠近中高云一侧曲线斜率变化最快处作为最佳亮温差阈值。

计算云雾与周围晴空海表亮温差的方法是:计算同纬度上云雾与晴空海表的亮温差,假如同纬度上没

有晴空海表,则取所研究区域所有晴空海表的平均亮温值计算亮温差。

4.3 海雾和低云分离研究

4.3.1 海雾低云分离指数

郝增周等^[15]的研究结果表明,雾滴的平均半径只有几微米,且其中常包含大量半径为 $1\mu\text{m}$ 左右的微小水滴,云粒子的半径大多数大于 $5\sim 6\mu\text{m}$,根据米氏散射理论,云滴(粒子半径大于 $5\sim 6\mu\text{m}$)粒子对于在可见光通道($0.64\mu\text{m}$)和近红外通道($1.6\mu\text{m}$)的散射效率相近,其反照率满足 $Stratus_{0.64} > Stratus_{1.6}$ 关系;对于雾滴粒子来说,其半径与近红外通道($1.6\mu\text{m}$)相当,此时的散射效率会变高,甚至趋于最大值,所以对于雾滴满足 $Fog_{0.64} < Fog_{1.6}$ 关系。统计3438个海雾样本点和9770个低云样本点的第三通道和第四通道差值,发现61.72%的海雾样本点满足 $Fog_{0.64} < Fog_{1.6}$,83.15%的低云样本点满足 $Stratus_{0.64} > Stratus_{1.6}$ 。在这个基础上,参考前人的研究成果结合对于海雾在AHI可见光近红外通道波谱特征的研究,构建适合Himawari-8海雾检测算法的海雾低云分离指数(Fog-stratus distinguish index, FSDI),分离低云和海雾, FSDI为

$$FSDI = \left(\frac{Albedo_{0.64} - Albedo_{1.6}}{Albedo_{0.64}} \right). \quad (2)$$

单一像元的值很可能出现误差,尤其是在海雾和中高云或者晴空海域混合的边缘,因此对于待处理的海雾/低云像元,计算其周围 3×3 范围内的FSDI,求其平均值。统计3438个海雾样本点和9770个低云样本点的FSDI,图1是低云和海雾FSDI的分布,浅色代表海雾,深色代表低云,中间的为二者重叠区。

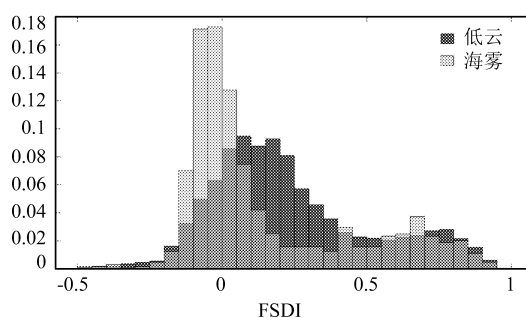


图1 海雾低云样本 FSDI

Fig.1 Distribution fo FSDI between fog and stratus

为了尽可能减少漏判,在尽量剔除低云的情况下选择阈值倾向海雾。根据统计结果, FSDI分离海雾和低云的阈值设为0.15,在上述样本点中, FSDI值大于0.15的低云样本点占比74.19%, FSDI值大于0.15的海雾样本点占比51.23%。很显然,单纯利用FSDI存在一定的误判,下面将尝试利用红外通道对低云和海雾进行进一步的识别。

4.3.2 纹理特征阈值

海雾相较于低云来说顶部较为光滑平整,所以纹理一般较为细腻,反映在纹理特征上就是低云的能量或熵低于海雾,利用纹理特征可以剔除云顶低而又有起伏的云。利用灰度共生矩阵求取纹理特征,经过大量实验计算,选取 0° 、 45° 、 90° 、和 135° 四个方向、距离为1、灰阶为8来计算灰度共生矩阵,选取熵作为分离海雾和低云的特征量,熵反映了图像纹理的均匀程度或复杂程度,熵为

$$f_H = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} \log_2 P_{ij}. \quad (3)$$

根据 CALIOP 海雾检测获得的海雾和低云样本点, 统计了 3438 个海雾样本点和 9770 个低云样本点周围 7×7 的图像四个方向的灰度共生矩阵和熵, 低云和海雾在四个方向上的熵分布百分比如图 2 所示, 其中浅色代表海雾, 深色代表低云, 中间的为二者重叠区。

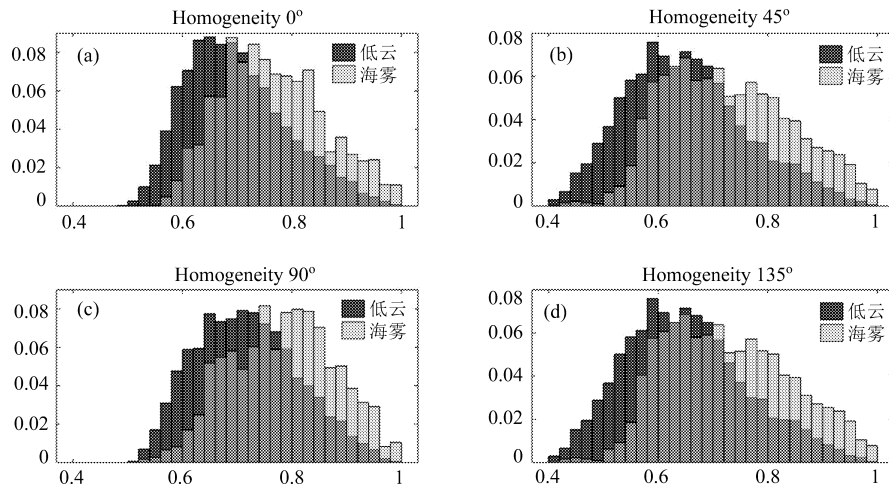


图 2 海雾低云熵分布

Fig.2 Distribution of homogeneity between fog and stratus

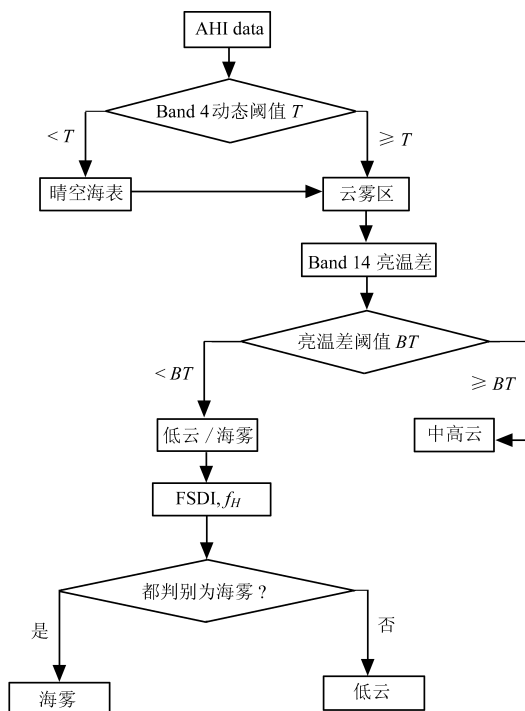


图 3 海雾检测算法结构

Fig.3 Structure of the sea fog detection algorithm

不难看出, 纹理方法可以将高度上有起伏的低云剔除, 如果低云起伏不大, 云顶平缓的话, 使用纹理特征则很难分离低云和海雾, 为了避免过度漏判, 所以选择的阈值尽可能的倾向于海雾。根据统计结果, 设定 0° 和 90° 方向上海雾低云分离阈值为 0.65, 45° 和 135° 方向上海雾低云分离阈值为 0.6, 实际处理中, 分别取 0° 与 90° 方向上和 135° 与 45° 方向上熵的平均值, 假若两个平均值都大于设定的阈值, 则认为是

海雾, 否则认为是低云。这种判别方法作为 *FSDI* 的补充。

基于上述研究, 设计了海雾低云分离算法, 即目标像元的 *FSDI* 和熵值都判定该像元是海雾时, 则认为该像元是海雾, 否则判为低云。

4.4 日间海雾检测算法

利用 AHI 第四通道的反照率计算分离晴空海表和云雾区域的动态阈值, 利用交叉验证方法计算拟合阶数, 避免过度拟合。利用得到的晴空海表区域计算同纬度上云雾区域和周围晴空海表的亮温差, 假如亮温差大于最佳亮温差阈值则判为中高云, 否则判为低云; 对于得到的低层云雾通过海雾低云分离指数和纹理检测分离低云和海雾, 最终得到海雾区域。海雾检测算法如图 3 所示

5 海雾监测算法验证和个例分析

5.1 检测算法验证

5.1.1 CALIOP 和 AHI 海雾检测结果对比

分别利用 2017 年 1~6 月的 CALIOP 数据和与之时间地点相对应的 Himawari-8 数据进行海雾检测。对比二者在同一时间经纬度相匹配的点的判别结果, 判别结果如表 2 所示。

表 2 CALIOP

Table 2 Compare with CALIOP data

吻合率 (%)	晴空 (11132)	海雾 (1152)	低云 (6435)	中高云 (22978)
海表 (%)	93	26.17	18.6	18
海雾 (%)	2	63.42	13.2	2
低云 (%)	3	7.10	46.1	9
中高云 (%)	2	3.31	22.1	71

Himawari-8 和 CALIOP 海雾检测方法对海雾判别吻合率为 63.42%。Himawari-8 海雾检测相比 CALIOP 数据误判样本点中晴空海表占比 71.54%, 认为出现这种情况的原因主要是, CALIOP 传感器是主动传感器, 利用波长 532 nm 的绿光激光进行探测, 探测波长短, 相较于用于云检测的被动 Himawari 数据 (860 nm) 来说更为灵敏, 可以识别薄云, 这也是两种检测方法对于目标物判别出现差异的原因。这一点也从侧面说明本文的 Himawari-8 海雾检测算法是可行的。

5.1.2 基于雾产品验证

利用国家卫星气象中心发布的气象卫星雾监测产品对海雾检测算法进行验证。2016 年国家气象卫星中心共发布了 29 个东中国海海雾监测产品, 根据这 29 个雾监测产品的时间选择对应的 Himawari-8 数据进行匹配, 对比两者的海雾检测结果。对同一个海雾事件, 假若海雾检测算法检测到的海雾 / 低云区域形状大小与雾产品数据大致相当, 且海雾像元占比超过 50% 时, 就认为海雾检测结果与雾产品匹配。对于这 29 次海雾事件, 有 26 次的海雾事件检测的海雾形状大小与雾产品数据大致相当且海雾像元占比超过了 50%, 占海雾事件总数 89.7%。3 次的海雾事件有些许差别, 主要是在海雾低云的分离上 - 检测到的海雾 / 低云区域形状大小与雾产品数据大致相当, 但是海雾像元占比不足 50%。

对比雾产品数据与此处的海雾检测算法可知, 海雾检测算法可以很好地检测到海雾, 但是相比国家气象卫星雾监测产品存在一定的误判, 主要是在低云和海雾的分离中存在一定的差异。此外 Himawari-8 海雾检测算法适用于单层云雾, 假若有多层云雾重叠的话, 该海雾检测算法检测结果是基于最上层目标物。接

下来通过一个具体案例的应用对本文的海雾检测算法作进一步说明。

5.2 个例分析

基于 Himawari-8 海雾检测算法对 2016 年 4 月 8 日 UTC 时间 02:00~05:30(北京时间 10:00~13:30) 之间 30 min 间隔的 8 个卫星图像进行海雾检测, 检测结果如图 4 所示, 图 5 是 2016 年 4 月 8 日 UTC 04:30 CALIOP 垂直特征分类图, 图 6 是雾监测产品和同时间 Himawari-8 海雾检测结果。

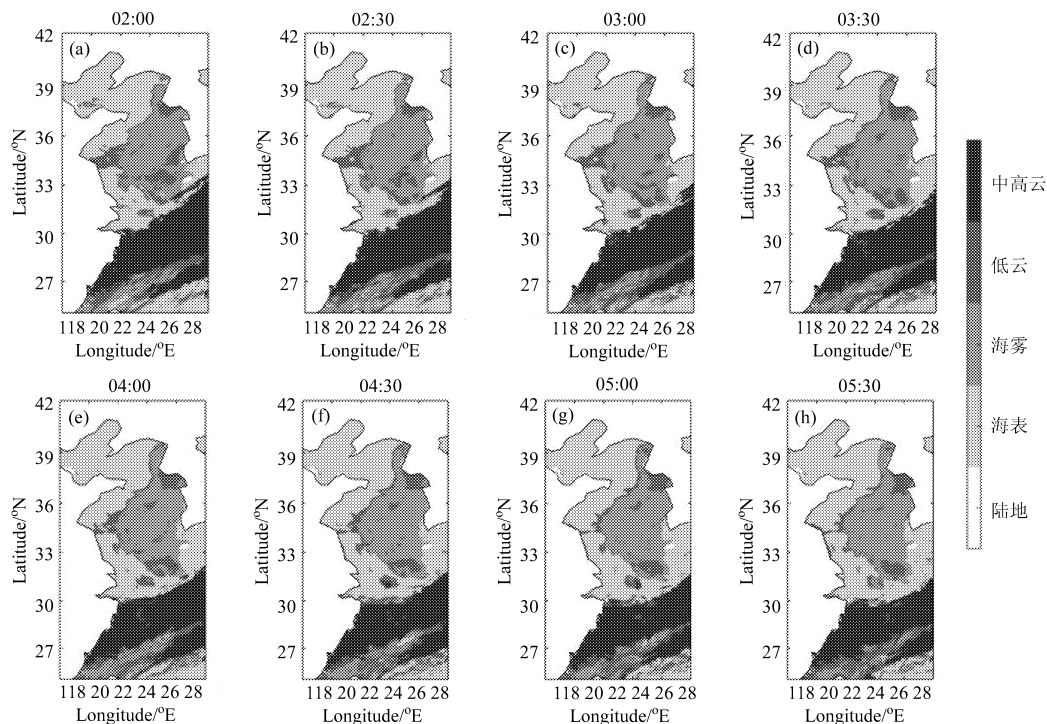


图 4 2016 年 4 月 8 日 Himawari 海雾监测

Fig.4 2016-04-08 results of fog detection based on Himawari

从图 4 可知, 2016 年 4 月 8 日黄海东部出现了大范围的持续性的海雾天气, 且海雾范围在不断地向南增长扩散。对比 UTC04:30 时的 CALIOP 垂直特征分类图 (图 5) 和 Himawari-8 海雾检测结果, CALIOP 海雾检测算法判别的海雾区域都被提出的 Himawari-8 海雾检测算法识别出来, 点对点对比海雾样本点匹配率 68.38%。图 6 是当天雾监测产品和同时间 Himawari-8 海雾检测结果。

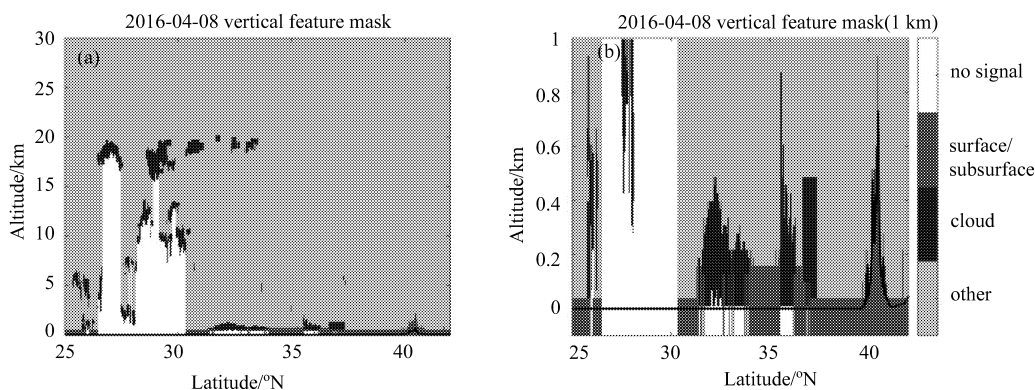


图 5 UTC 04:30 CALIOP 垂直特征分类图

Fig.5 UTC 04:30 VFM of CALIOP

对比 UTC00:00 时的雾监测产品和 Himawari-8 海雾检测结果,海雾检测算法很好地检测到了大雾区域,但是将部分海雾判为低云,也有少许判为高云。在 $26^{\circ}\text{N}, 126^{\circ}\text{E}$ 处出现了误检。由于海雾检测算法只适用于单层云雾,假若多层云雾叠加的话本文的海雾检测算法识别的结果会出现一定的误差,根据 CALIOP 的垂直特征分类产品,在当天 UTC 04:30 时 ($33^{\circ}\text{N}, 126^{\circ}\text{E}$) 处确实有高云存在。

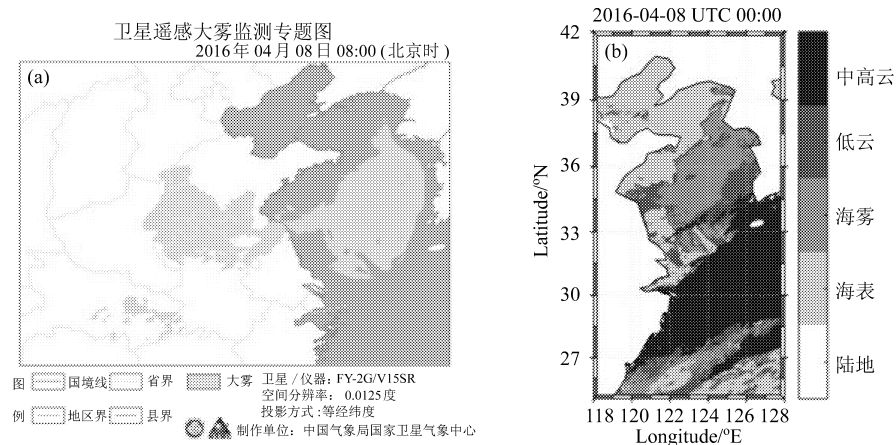


图6 2016年4月8日 UTC 00:00 (a) 雾监测产品, (b)Himawari 海雾检测结果

Fig.6 UTC 00:00 on April 8, 2016 (a) sea fog products from FY, (b) detection result based on Himawari

6 结论

通过以上分析可以得出: 1) 星载激光雷达可以探测大气垂直剖面信息,可以为被动遥感海雾检测提供大量可对比样本,对被动遥感研究海雾有重要意义; 2) 结合主动遥感对 AHI 各通道对不同目标物的波谱特征分析,提出了 Himawari-8 日间海雾检测算法,在分离云雾和下垫面的动态阈值计算中,对反照率统计直方图进行曲线拟合,利用交叉验证方法计算拟合阶数,最大限度避免过度拟合对于统计结果的影响; 3) 通过 CALIOP 数据和雾监测产品,验证了海雾检测算法的可行性。

总体来说, Himawari-8 日间海雾检测算法是可行的,对于特征较为明显的海雾和低云也可以很好地区分,但是还需进一步地完善,尤其是在低云和海雾的分离方面。此外,由于被动遥感无法穿透云雾,所以海雾检测算法只适用于单层云雾,假如垂直层面上有多层云雾叠加,则识别可能会出现误差。

致谢: 感谢兰利研究中心 (ASDC) 提供的 CALIOP 激光雷达数据,感谢日本宇宙航空研究开发机构地球观测研究中心 (JAXA/EORC) 提供的 Himawari-8 数据,感谢中国气象局国家卫星中心提供的雾监测数据。

参考文献:

- [1] Wang Binhua. *Sea Fog*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983: 1-4(in Chinese).
王彬华. 海雾 [M]. 北京: 海洋出版社, 1983:1-4.
- [2] 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.
- [3] Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Imagery [J]. *Meteorological Magazine*, 1984, **113**(1346): 266-271.

- [4] Turner J, Allam R J, Maine D R. A case-study of the detection of fog at night using channels 3 and 4 on the Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) [J]. *Meteorological Magazine*, 1986, **115**(1370): 285-290.
- [5] Cermak J, Bendix J. A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **87**(3-4): 279-292.
- [6] Liu X, Hu X Q. Sea fog automatic detection over the East China Sea using MTSAT data [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2008, **27**(1): 112-117.
刘 希, 胡秀清. 基于 MTSAT 卫星的我国东部沿海雾区的自动识别 [J]. 台湾海峡, 2008, **27**(1): 112-117.
- [7] Yuan Y, Qiu Z, Sun D, et al. Daytime sea fog retrieval based on GOCI data: a case study over the Yellow Sea [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): 787-801.
- [8] Wu Xiaojing, Li Yun, Huang Bin, et al. Application of dynamic threshold method to sea fog detection with FY-2 satellite [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, **37**(2): 31-41(in Chinese).
吴晓京, 李 云, 黄 彬, 等. 利用动态阈值方法改进的风云二号卫星海雾检测技术 [J]. 海洋气象学报, 2017, **37**(2): 31-41.
- [9] Wu D, Lu B, Zhang T, 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.
- [10] Lu Bo. *CALIOP Sea Fog Detection and its Application to the Daytime MODIS Remote Sensing of Sea Fog* [D]. Qingdao: Master's Thesis of Ocean University of China, 2015(in Chinese).
卢 博. CALIOP 海雾检测及其在 MODIS 日间海雾遥感中的应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 2015.
- [11] Shang H, Chen L, Letu H, et al. Development of a daytime cloud and haze detection algorithm for Himawari-8 satellite measurements over central and eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(6): 3528-3543.
- [12] Di Vittorio A V, Emery W J. An automated, dynamic threshold cloud-masking algorithm for daytime AVHRR images over land [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(8): 1682-1694.
- [13] TianYongjie, Deng Yujiao, Chen Wuhe, et al. Algorithm improvement of sea fog detection in the daytime based on FY-2E data [J]. *Journal of Arid Meteorology*. 2016, **34**(4): 738-742(in Chinese).
田永杰, 邓玉娇, 陈武喝, 等. 基于 FY-2E 数据白天海雾检测算法的改进 [J]. 干旱气象, 2016, **34**(4): 738-742.
- [14] Kurihara Y, Murakami H, Kachi M. Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(3): 1234-1240.
- [15] Hao Zengzhou, Pan Delu, Gong Fang, et al. Optical radiance characteristics of sea fog based on remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2420-2426(in Chinese).
郝增周, 潘德炉, 龚 芳, 等. 海雾的遥感光学辐射特性 [J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2420-2426.