

李顺,衣立,徐娜,等.基于FY-4A大气温度廓线数据的西北太平洋低云云顶高度反演研究[J].海洋气象学报,2022,42(4):85-94.

LI Shun, YI Li, XU Na, et al. Retrieval of cloud top height of low clouds over western North Pacific based on FY-4A atmospheric temperature profile data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(4): 85-94. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.009. (in Chinese)

## 基于FY-4A大气温度廓线数据的西北太平洋 低云云顶高度反演研究

李顺<sup>1,2</sup>, 衣立<sup>1,2</sup>, 徐娜<sup>3</sup>, 时晓蒙<sup>4</sup>, 张苏平<sup>2</sup>, 刘敬武<sup>2</sup>

(1.中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心, 山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 3.国家卫星气象中心, 北京 100081; 4.青岛市气象台, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 西北太平洋的低云云顶高度 (cloud top height, CTH) 是气候研究和气象灾害监测中的重要参数。研究中常用卫星数据获得大范围、连续变化的低云云顶高度, 但其与实际的低云云顶高度存在较大的偏差。因此, 基于低云云顶一般在低层逆温层底这一观测现象, 提出一种利用FY-4A卫星大气垂直廓线数据反演低云云顶高度的方法 (称为“逆温法”), 并尝试用于西北太平洋低云云顶高度反演研究。利用星载激光雷达 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 探测的低云云顶高度, 检验FY-4A卫星的云顶高度产品 (CTH<sub>AGRI</sub>) 和“逆温法”反演的低云云顶高度结果 (CTH<sub>GIRS</sub>), 表明两者均显著偏低, 与CALIPSO探测的云顶高度差分别为-0.49 km和-0.27 km, 相较而言, “逆温法”反演的低云云顶高度更接近CALIPSO的探测结果, 优于FY-4A卫星的云顶高度产品。

**关键词:** 低云; 风云四号A星; 云顶高度; 逆温层

**中图分类号:** P423 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)04-0085-10

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.009

## Retrieval of cloud top height of low clouds over western North Pacific based on FY-4A atmospheric temperature profile data

LI Shun<sup>1,2</sup>, YI Li<sup>1,2</sup>, XU Na<sup>3</sup>, SHI Xiaomeng<sup>4</sup>, ZHANG Suping<sup>2</sup>, LIU Jingwu<sup>2</sup>

(1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 3. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*; 4. *Qingdao Meteorological Observatory, Qingdao 266003, China*)

**Abstract** The cloud top height (CTH) of low clouds over western North Pacific is an important parameter in climate research and meteorological disaster monitoring. Satellite data are commonly used to obtain the low cloud CTH with a wide range and continuous changes, but its products have large deviations from the actual low cloud CTH. Therefore, based on the observation phenomenon that the cloud top of low clouds is generally located at the bottom of the low-level temperature inversion layer, a method

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1510102); 国家自然科学基金项目 (41975024); 风云卫星应用先行计划 (2021) 项目 (FY-APP-2021.0406); 青岛市气象局重点课题 (2019qdqxz02)

第一作者: 李顺, 男, 硕士研究生, 主要从事海雾和低云检测的相关工作, 1214162146@qq.com。

通信作者: 衣立, 男, 副教授, 主要从事海雾和低云卫星检测的相关研究工作, yili@ouc.edu.cn。

of retrieving the low cloud CTH from the atmospheric vertical profile data of FY-4A satellite (called "temperature inversion method") is proposed, and it is applied in the retrieval study of low cloud CTH over western North Pacific. Using the low cloud CTH detected by the spaceborne lidar CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation), the CTH product ( $CTH_{AGRI}$ ) of FY-4A satellite and the low cloud CTH results ( $CTH_{GIRS}$ ) obtained by the temperature inversion method in this paper are verified over western North Pacific. The results show that both results of  $CTH_{AGRI}$  and  $CTH_{GIRS}$  are significantly lower than those of CALIPSO, with a difference of  $-0.49$  km and  $-0.27$  km, respectively. It is also found that the low cloud CTH retrieved in this paper is closer to the detection result of CALIPSO and is superior to the CTH product of FY-4A satellite.

**Key words** low cloud; FY-4A; cloud top height; temperature inversion layer

## 引言

云的特性,包括云量、云高度、垂直剖面、光学厚度、液体和冰水含量以及颗粒大小,其影响地球的辐射收支,与云-气候反馈之间存在潜在联系,并且云通过调节地球的辐射收支、水循环来影响气候变化,不同高度云的特性会产生不同的气候影响<sup>[1-3]</sup>。其中低云的特性变化对气候的影响显著,当低云云量增量达到5%时,就可以抵消CO<sub>2</sub>翻倍造成的辐射强迫<sup>[4]</sup>;但是,低云在气候模拟中的不确定性导致模拟结果的差异很大<sup>[5]</sup>。西北太平洋是低云和海雾的频发区<sup>[6-8]</sup>,也包含了强烈的海洋锋区,海洋锋区通过海表面温度、风、涡动等影响西北太平洋的海气边界层,从而影响低云<sup>[9-11]</sup>。因此,作为区分低云与中高云的宏观属性,准确的云顶高度在研究中十分重要。另外,中国重要港口和沿岸机场均在西北太平洋沿岸,当低云云底接地形成大雾时<sup>[12-14]</sup>,会产生航班延误、港口停运等不利影响。可利用云顶高度与云层厚度之差来区分低云和雾,因此云顶高度也是区分低云与雾的重要参数<sup>[15]</sup>。

目前,海上站点观测不足以支撑大范围连续监测的需要,卫星遥感是获取海上云顶高度信息的重要手段。卫星遥感反演云顶高度的技术分为被动遥感技术和主被动结合遥感技术。主被动结合遥感技术可以利用激光雷达或毫米波雷达,得到相对准确的云顶高度,然而无论是星载雷达还是地基雷达,观测范围受时空条件的限制。地基雷达可观测局地云高的连续变化;相比地基雷达,星载雷达虽然可以获取更大范围的云顶高度,但是无法对局地云高进行连续观测<sup>[16-19]</sup>。被动遥感可以利用可见光成像仪,运用云体、卫星的相对位置等空间信息和视角差异、云阴影方法等几何方法,直接估计云顶高度,也可以利用卫星传感器被动接收的各个光

谱通道信息,通过不同的反演算法,获取云顶高度<sup>[20-21]</sup>。MODIS的云顶高度产品采用CO<sub>2</sub>切片法和红外窗区法计算获取云顶高度<sup>[22]</sup>,CHENG et al.<sup>[23]</sup>利用云阴影法估计北极低云的云顶高度。然而,静止卫星反演的低云顶高度无论是在统计结果还是个例表现上均与主动遥感探测结果有显著的差距<sup>[18-19]</sup>。MARCHAND et al.<sup>[24]</sup>比较低云云顶高度的反演结果时,发现不同卫星的海上低云(尤其是层积云)云顶高度产品之间出现很大的差异,是因为反演算法中使用天气模式预报的大气温度廓线无法准确地模拟层积云顶部的盖顶逆温,从而降低低云云顶高度的反演准确性。虽然使用固定的温度递减率来代替大气温度廓线可极大地改进局地平均的层积云顶高度,但改变观测区域后,原有固定的温度递减率不再适用<sup>[25-27]</sup>。

此前研究和现场观测表明,海上低层层状云基本位于一个盖顶逆温层之下。NICHOLLS and LEIGHTON<sup>[28]</sup>在6次层积云的飞机观测中,得到层积云平均垂直特征,发现单个云层位于一个强烈而浅薄的逆温层下,稳定的层结隔断云层与下垫面或者埃克曼(Ekman)层之间的联系,由观测结果看,逆温层底的位置与云顶高度位置基本一致。BREHERTON et al.<sup>[29]</sup>也发现逆温层底所在高度与附近层积云的云顶高度密切相关。出现这一现象的原因是云顶受到长波辐射以及环境条件的影响。海上低层层状云的云顶会发生强烈的长波辐射冷却,它可以维持并增强云顶逆温层,使其在垂直方向几十米内温度变化 $10\sim 20$  K<sup>[8]</sup>;同时,在一些强烈下沉区域上,空气由于下沉至近地层形成逆温层结,逆温层结可以抑制水汽的向上输送,因此这些低层层状云常在逆温层下出现<sup>[28,30-31]</sup>。基于低层层状云的云顶经常出现强烈逆温层这一现象,YI et al.<sup>[32]</sup>利用逆温层所在高度表征黄海低云和雾的云

顶高度,其方法是使用卫星反演逆温层顶强度和厚度,结合黄海沿岸几个测站的平均探空廓线,来确定低云的云顶高度。为提高低云云顶高度的反演准确性,基于层积云顶部强烈逆温层的持续存在以及其底部和层积云云顶高度的密切相关性(图1),利用在西北太平洋的大气温度廓线,提取到温度廓线上逆温层底高度,并将其作为低云的云顶高度,这种反演低云云顶高度的方法可称为“逆温法”。

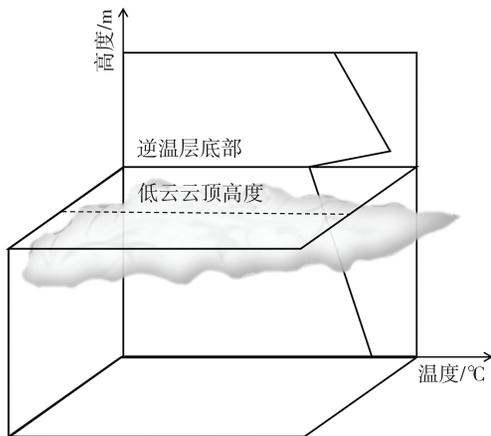


图1 逆温层底反演低云云顶高度示意图

Fig.1 Schematic diagram of retrieval of low cloud CTH (cloud top height) by temperature inversion layer base

相较于气球无线电探空,高光谱红外探测仪反演的温度廓线可以得到范围大、时间间隔规律的大气温度廓线,以往这类仪器多搭载于 NOAA-19、FY-3C、MetOp-A 等极轨卫星上,然而对同一地区的回访周期较长<sup>[33]</sup>。FY-4A/GIIRS (Geostationary Interferometric Infrared Sounder) 是第一个搭载在静止卫星的高光谱红外探测仪,利用 GIIRS 观测的高光谱数据,得到西北太平洋区域时空分辨率较高的大气温度廓线产品<sup>[34-35]</sup>,与欧洲极轨卫星 MetOp-A/IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) 的大气温度廓线比较可见, FY-4A/GIIRS 的温度反演精度明显优于 IASI<sup>[36]</sup>,因此基于 FY-4A/GIIRS 观测资料反演的大气温度廓线具有重要的应用价值。

选取 2019 年 1 月 18 日—12 月 31 日的星载激光雷达 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 低云云顶高度 (cloud top height, CTH) 和相应时刻 FY-4A/GIIRS/AVP (Atmosphere Vertical Profiles) 数据,利用“逆温法”计算得到低云的云顶高度(命名为  $CTH_{GIIRS}$ ),并与 CALIPSO 观测的云顶高度、FY-4A/AGRI (Advanced

Geosynchronous Radiation Imager)/CTH 云顶高度产品进行比较,评估本方法在反演低云云顶高度上的效果。同时参考 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 确定的低云云顶气压应高于 680 hPa (约 3 200 m),并考虑到 CALIPSO 对多层云下的低云云高探测可能存在偏差,低云个例均选取单层低云,即在低云上无其他云或者气溶胶的遮挡<sup>[37]</sup>。

## 1 数据与方法

### 1.1 卫星数据

本文主要使用 FY-4A 数据和 CALIPSO 数据,其中 FY-4A 卫星搭载多种先进的遥感仪器,包括多通道扫描成像辐射计 (AGRI) 和干涉式大气垂直探测仪 (GIIRS)<sup>[35,38-40]</sup>。目前 FY-4A 已有的云顶高度产品为 FY-4A/AGRI/CTH,反演使用的数据是 FY-4A/GIIRS/AVP,检验反演结果和现有云高产品准确性的是 CALIPSO 的 Level 2B 产品大气垂直特征分类标识 (vertical feature mask, VFM)——CALIPSO/VFM。

#### 1.1.1 反演数据——FY-4A/GIIRS/AVP

FY-4A/GIIRS/AVP 是 FY-4A 利用干涉式大气垂直探测仪数据反演得到的大气垂直廓线产品。AVP 的反演过程使用 FYGAT-S (Fengyun Geostationary Algorithm Testbed-Sounder) 算法,集成 4 种大气辐射模型,应用统计回归检索算法和非线性物理检索算法,得到大气垂直廓线 AVP 产品<sup>[35]</sup>。AVP 产品时间分辨率为 55 min,空间分辨率为 16 km×16 km,同时在 680 hPa 以下,AVP 垂直结构一共 14 层,平均每层之间高度约 230 m。该产品主要反映大气中温、湿度和臭氧等痕量气体的三维分布和变化,同时具有较高的时间分辨率<sup>[41]</sup>,适合对低云的大范围快速探测。选取 AVP 产品中几个用于“逆温法”反演低云云顶高度的数据,其中最主要的数据包括大气温度廓线 (atmosphere temperature profiles, AT\_Prof) 以及每一层对应的气压,同时需要考虑到 AT\_Prof 的数据质量问题,选取了 AT\_Prof 的质量标签 (quality flag of atmosphere temperature profiles, AT\_Prof\_Qflag),对已选取的逆温层进行质量控制,剔除质量不合格的数据<sup>[42-43]</sup> (详见 [http://fy4.nsmc.org.cn/portal/cn/theme/FY4A\\_product.html](http://fy4.nsmc.org.cn/portal/cn/theme/FY4A_product.html))。

#### 1.1.2 对比数据——FY-4A/AGRI/CTH

FY-4A/AGRI/CTH 是 FY-4A 利用多通道扫描成像辐射计数据反演得到的云顶高度产品,简称

$CTH_{AGRI}$ 。 $CTH_{AGRI}$ 的反演使用 FCTHA (Fengyun Cloud Top Height Algorithm) 算法反演得到,该算法是 FYGAT-I (Fengyun Geostationary Algorithm Testbed-Imager) 系统的一部分<sup>[41,44-45]</sup>,主要算法是红外分裂窗区法和  $CO_2$  切片法,得到云顶高度  $CTH_{AGRI}$ ,其时间分辨率为 15 min,空间分辨率为  $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 。

### 1.1.3 检验数据——CALIPSO/VFM

CALIPSO/VFM 用于检验反演结果和现有云高产品准确性。其数据内容是使用 Feature\_Classification\_Flag 来指定某一高度的物体分类,给出 8.2 km 以下垂直分辨率 30 m/层,8.2~20.2 km 垂直分辨率为 60 m/层的云和气溶胶等目标物的分类信息以及目标物对应的海拔高度<sup>[46-47]</sup>。Feature\_Classification\_Flag 可显示某一高度上的目标物分类为云,称之为云标签。利用云标签的垂直分布,可排除受中高云和气溶胶干扰的单层低云。确定未受中高云和气溶胶影响的单层低云后,找到单层低云最高云标签的海拔高度,即可提取到单层低云的云顶高度<sup>[37]</sup>,后文简称为  $CTH_{VFM}$ 。

### 1.2 匹配方法

采用时空邻近点匹配比较它们的云顶高度。为确保选取的反演数据 GIIRS/AVP 和比较数据  $CTH_{AGRI}$  在时间和空间上要尽可能地接近单层低云出现的  $CTH_{VFM}$ ,计算单层低云的  $CTH_{VFM}$  与 GIIRS/AVP 产品、 $CTH_{AGRI}$  之间的空间距离与时间间隔。当满足时间间隔在 1 h 以内、空间距离不超过  $0.5^\circ$  时,取与  $CTH_{VFM}$  时间间隔最小、空间距离最近的  $CTH_{AGRI}$  与相应的  $CTH_{VFM}$  进行比较;取与  $CTH_{VFM}$  时间间隔最小、空间距离最近的 AVP 进行反演得到  $CTH_{GIIRS}$ ,并与相应的  $CTH_{VFM}$  进行比较。

计算  $CTH_{VFM}$  与 GIIRS/AVP 产品、 $CTH_{AGRI}$  之间的时间间隔

$$\Delta t(i) = |t_{VFM} - t_m(i)| < 1\text{ h}; i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

假设当  $i = p$ ,  $\Delta t(p) = \min(\Delta t)$ , 则取  $p$  时刻的产品计算  $CTH_{VFM}$  与 GIIRS/AVP 产品、 $CTH_{AGRI}$  之间的空间距离

$$D(k) = \sqrt{(L_{VFM} - L_m(k))^2 + (L'_{VFM} - L'_m(k))^2} < 0.5^\circ; k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

假设  $k = q$ ,  $D(q) = \min(D)$ , 则提取  $q$  位置上的垂直廓线数据或者云顶高度数据进行后续工作,其中下标  $m$  为 AVP 或  $CTH_{AGRI}$ 。使用的具体时空匹配原则如公式(1)和公式(2)所示,其中,  $L$  和  $L'$  分别表示数据的经度和纬度,  $D$  是  $CTH_{VFM}$  与其余两组

数据之间的空间距离,  $\Delta t$  是指  $CTH_{VFM}$  与其余两组数据之间的时间间隔。

## 2 低云云顶高度反演

### 2.1 反演方法

本文的“逆温法”参考 YI et al.<sup>[32]</sup> 的方法,获取大气廓线上逆温层底的位置作为低云云顶高度。尝试使用 FY-4A 卫星反演的大气温度廓线,直接从反演的温度廓线上确定逆温层底的位置,从而估计云顶高度。需要注意的是逆温层存在季节性变化的特点<sup>[48-50]</sup>,一般在 4 月逆温层强度强,7 月逆温层强度弱<sup>[6]</sup>,这可能导致“逆温法”的反演效果存在季节性差异,详细内容在 2.3 节讨论。

利用“逆温法”反演海上单层低云云顶高度的具体方法是,当得到满足 1.2 节匹配方法的 GIIRS 大气温度廓线后,依据以下公式提取最低逆温层底对应的高度当作低层层状云的云顶高度,即  $CTH_{GIIRS}$ :

$$T(k) < T(k \mp 1), k = 2, 3, \dots, i - 1, \quad (3)$$

$$Q(k) \neq 3, 4, \quad (4)$$

其中,  $T$  为温度,  $i$  为大气温度廓线的层数,即逆温层底的温度小于相邻层的温度,  $Q$  为温度廓线的质量标签。需要注意的是, FY-4A 卫星反演的 AVP 需要进行质量控制,其中 AVP 质量控制标签 0 为“perfect”,质量控制标签 1 为“good”,质量控制标签 2 为“bad”,质量控制标签 3 和 4 为“do not use”。反演出  $CTH_{GIIRS}$  前,需要剔除廓线质量标签为 3 和 4 的点<sup>[42-43]</sup>。

选取单层低云个例的时间范围是 2019 年 1 月 18 日—12 月 31 日,在挑选单层低云完成时空邻近点匹配以及对温度廓线的质量控制后,在 750 个 GIIRS/AVP 上利用“逆温法”反演单层低云的云顶高度。

### 2.2 统计分析

利用 2.1 节中所述的云高反演方法,得到  $CTH_{GIIRS}$ 。统计结果显示,在“逆温法”得出的云顶高度和 VFM 探测的云顶高度之间,平均高度差为  $-0.27\text{ km}$ ,均方根误差为  $1.03\text{ km}$ ,相关系数通过 5% 的显著性水平检验。如表 1 所示,  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  之间的云顶高度差 (cloud top height difference, CTHD) ( $CTHD_{GIIRS-VFM}$ ) 的平均值、均方根误差明显优于  $CTH_{AGRI}$  与  $CTH_{VFM}$  的云顶高度差 ( $CTHD_{AGRI-VFM}$ ),表明对低云的反演上,  $CTH_{GIIRS}$  比  $CTH_{AGRI}$  表现出色。

图2显示,在 $|V_{CTHD}| < 500$  m的区间内,两组CTHD概率分布分别是 $P_{GHIRS-VFM}$ 为37.7%, $P_{AGRI-VFM}$ 为29.1%, $CTH_{AGRI}$ 、 $CTH_{GHIRS}$ 与 $CTH_{VFM}$ 仍有显著差

距,而且在 $V_{CTHD} = 0$ 线周围, $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 概率分布明显更多,证明在统计结果上,相比 $CTH_{AGRI}$ , $CTH_{GHIRS}$ 更吻合CALIPSO的观测结果。

表1 低云云顶高度差(CTHD)统计结果

Table 1 Statistics of low cloud CTHD

云顶高度差	数目/个	平均高度差/km	均方根误差/km	中位数/km	相关系数
$CTHD_{AGRI-VFM}$	750	-0.49	1.21	-0.55	未通过显著性检验
$CTHD_{GHIRS-VFM}$	750	-0.27	1.03	-0.32	0.09

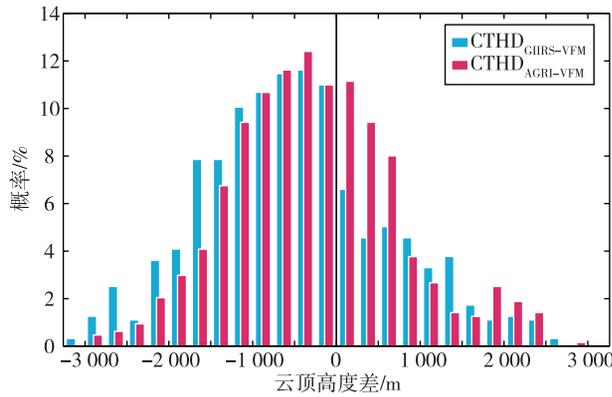


图2 低云云顶高度差概率分布  
Fig.2 Probability density function of low cloud CTHD

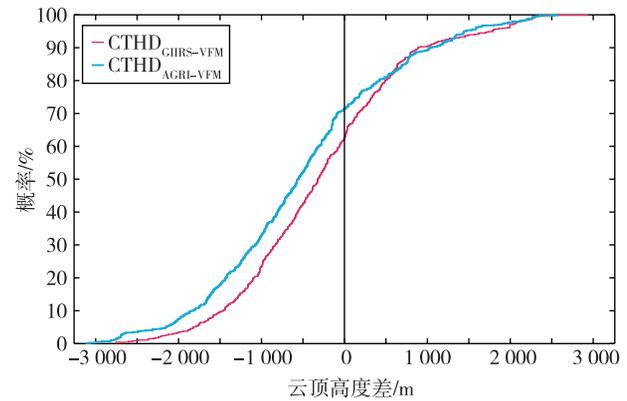


图3 低云云顶高度差累积分布函数  
Fig.3 Cumulative distribution function of low cloud CTHD

两者整体概率分布(图2)和累计分布(图3)显示, $CTHD_{AGRI-VFM}$ 和 $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 总体分布均倾向于负值,两者的CTH反演结果均偏小,最大峰值均位于 $[-500, -250]$  m之内,其中, $P_{AGRI-VFM}$ 分布在 $V_{CTHD} < 0$ 的区域内高达71.6%。 $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 分布为偏左单峰结构,与 $CTHD_{AGRI-VFM}$ 的分布结构较为一致,在 $V_{CTHD} \in (-1250, 0]$  m时,两者的概率非常接近( $P_{GHIRS-VFM} = 47.6%$ , $P_{AGRI-VFM} = 47.2%$ ),同时两者分布函数斜率也基本一致。在最大峰值两侧的翼区, $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 与 $CTHD_{AGRI-VFM}$ 的差异十分显著。在 $V_{CTHD} \in (0, 750]$  m时,概率分布上, $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 概率24.4%远高于 $CTHD_{AGRI-VFM}$ 概率13.8%,分布函数上, $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 的涨幅明显大于 $CTHD_{AGRI-VFM}$ 的涨幅;而 $V_{CTHD} \in (-2250, -1250]$  m,情况则恰好相反。这样的概率分布和累计分布正是 $CTHD_{GHIRS-VFM}$ 的平均值、均方根误差明显优于 $CTHD_{AGRI-VFM}$ 的原因。

进一步分析VFM与AGRI、GHIRS之间的对应关系。如图4所示,发现 $CTH_{AGRI}$ 的频率 $f_{AGRI}$ 主要在对角线上半区集中分布, $CTH_{AGRI}$ 主要集中在250~1000 m之间,与 $CTH_{VFM}$ 相比, $CTH_{AGRI}$ 显著偏小;其

频率分布显示 $CTH_{AGRI}$ 没有和 $CTH_{VFM}$ 一同变化的趋势,证明 $CTH_{AGRI}$ 与 $CTH_{VFM}$ 之间无明显的对应关系; $CTH_{GHIRS}$ 的频率 $f_{GHIRS}$ 主要在对角线上半区有集中分布,表明整体 $CTH_{GHIRS}$ 同样偏小;同时, $f_{GHIRS}$ 沿对角线离散分布,可见 $CTH_{GHIRS}$ 与 $CTH_{VFM}$ 之间存在一定的对应关系。频率图的分析结果与表1中统计结果一致。

### 2.3 结果讨论

相比FY-4A云顶高度产品 $CTH_{AGRI}$ 在低云上的效果,“逆温法”反演的低云云顶高度 $CTH_{GHIRS}$ 有一定提升,但距离 $CTH_{VFM}$ 仍存在差异,其原因可能与GHIRS/AVP时空分辨率等因素相关。

(1) GHIRS/AVP产品分辨率。AVP与 $CTH_{VFM}$ 采取最邻点匹配的方法,寻找与 $CTH_{VFM}$ 时间间隔最小、空间距离最近的AVP进行反演,但由于AVP本身的时空分辨率原因,存在一些不可避免的客观误差。此外,相较无线电探空数据10 m/层,AVP垂直分辨率相对粗糙,得到的逆温层结构可能不精准,这也对反演结果造成影响。

(2) 海上逆温层存在季节差异。图5显示了不同季节下两种方法反演的云顶高度与 $CTH_{VFM}$ 之间

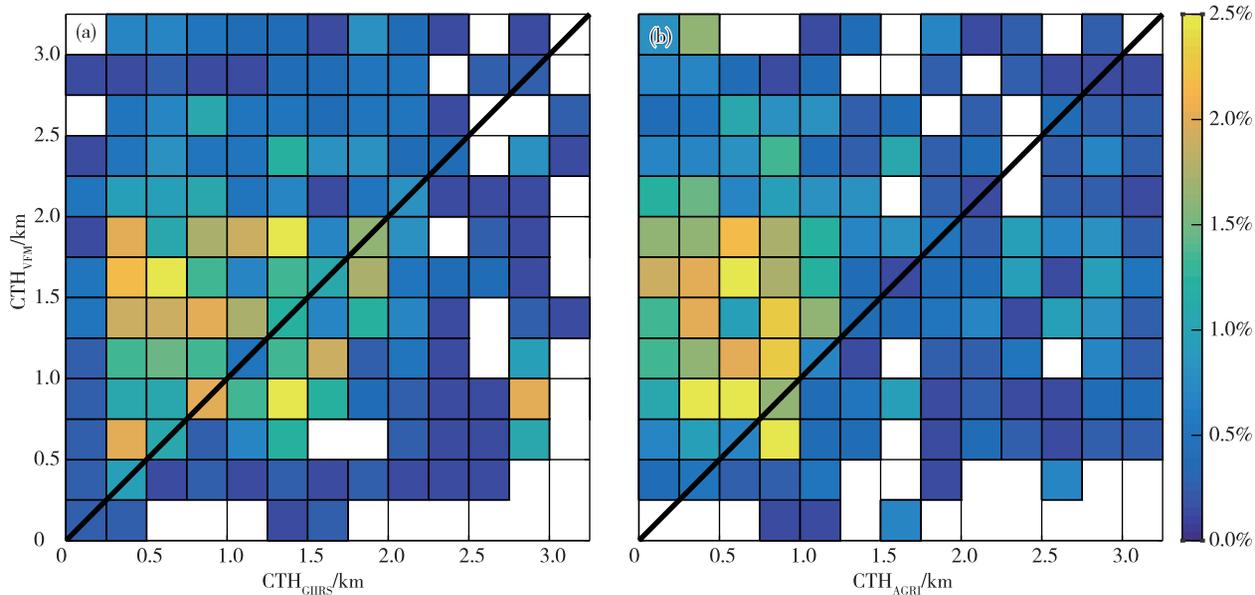


图4 CALIPSO/VFM的低云顶高度( $CTH_{VFM}$ )与两种云顶高度产品(a.  $CTH_{GIRS}$ , b.  $CTH_{AGRI}$ )之间对应关系的二维联合直方图(网格分辨率:  $0.25\text{ km}\times 0.25\text{ km}$ ; 色阶: 占比, 白色表示不存在)

Fig.4 Two-dimensional joint histogram of the correspondence between  $CTH_{VFM}$  and two CTH products (a.  $CTH_{GIRS}$ , b.  $CTH_{AGRI}$ ) (grid resolution:  $0.25\text{ km}\times 0.25\text{ km}$ ; color scale: percentage, white grid indicates no values)

云顶高度差的平均差(mean deviation, MD)和标准差(standard deviation, STD)。春、冬季,  $MD_{GIRS-VFM}$  分别为 $-0.13\text{ km}$ 和 $-0.29\text{ km}$ , 低于其在夏、秋季节的数值, 说明“逆温法”在春季和冬季的反演效果要好于夏季和秋季。同时, 夏季的逆温层相对较弱, 大气温度廓线难以捕捉逆温层位置信息, 导致夏季低云采样比例非常小。但是, 在其他季节,  $MD_{GIRS-VFM}$  仍明显优于  $MD_{AGRI-VFM}$ , 如图5所示。

(3)不同云类的云顶逆温结构存在差异。如表2所示, 逆温层底高度与低层层状云的云顶有十分明显的对应关系。根据 ISCCP 的分类, 在气压大于  $680\text{ hPa}$  的低云中, 不仅有层云、层积云, 还有积云存在。积云的云顶与逆温层之间并没有发现明显的对应关系, 而这类低云的云顶高度同样难以测准<sup>[15]</sup>。利用 VFM 的云类型分类(其中“low overcast, opaque”是指层云或者雾<sup>[51]</sup>), 表2显示了不同云类型中两种方法反演的云顶高度与  $CTH_{VFM}$  之间云顶高度差的平均差(MD)和标准差(STD)。正在转变的层积云和层云或者雾的  $CTH_{GIRS}$  平均高度差分别为 $-0.61\text{ km}$ 和 $-0.40\text{ km}$ , 比  $CTH_{AGRI}$  有更出色的表现, 证明该方法在低层层状云的云顶高度上有良好的效果; 而因为积云不符合“云顶高度在逆温层底”这一假设, 所以在积云个例上出现  $CTH_{AGRI}$  优于  $CTH_{GIRS}$  的现象。

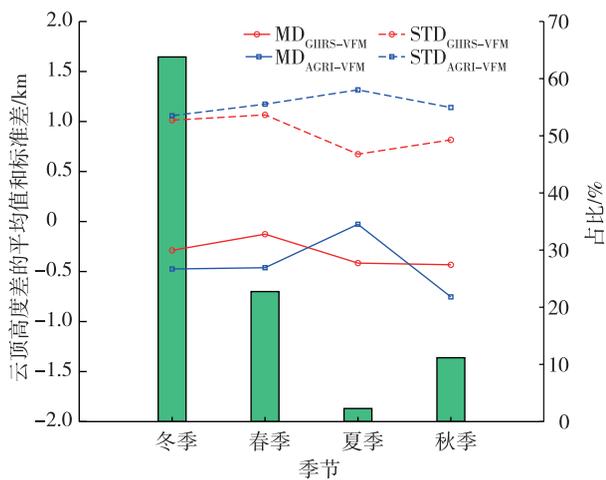


图5 不同季节下 FY-4A 和 VFM 之间差异的平均值(实线)和标准差(虚线)(红色表示 GIRS-VFM, 蓝色表示 AGRI-VFM, 绿色柱为采样占比)

Fig.5 Mean (solid line) and standard deviation (dotted line) of differences between FY-4A and VFM in different seasons (red line indicates GIRS-VFM, blue line indicates AGRI-VFM, and green bar represents the sampling proportion)

### 3 低云云顶高度个例分析

因为考虑有质量控制,  $CTH_{GIRS}$  的数目锐减, 选取 2 个  $CTH_{GIRS}$  可比较数相对多的个例用于分析。

低云个例结果(图6)显示, 本文方法暴露一些

明显缺陷。图 6a 显示,  $CTH_{GIIRS}$  零散地分布于  $CTH_{VFM}$  和  $CTH_{AGRI}$  之间周围, 还有部分  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{AGRI}$  重合; 除了极少数  $CTH_{GIIRS}$  略高于  $CTH_{VFM}$ ,  $CTH_{GIIRS}$  大多均小于  $CTH_{VFM}$ 。图 6b 中  $CTH_{GIIRS}$  的表现略优于图 6a,  $CTH_{GIIRS}$  数目较多, 并且在  $22^\circ N$  以北的低云区,  $CTH_{GIIRS}$  更接近  $CTH_{VFM}$ , 但总体来看, 大部分  $CTH_{GIIRS}$  仍低估低云的云顶高度。显而易见地, 虽然相较于  $CTH_{AGRI}$ ,  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  之间的差距更小, 但是  $CTH_{GIIRS}$  的分布相对稀疏, 无法完整反映低云云顶高度的连续变化。由于对温度廓线进行了质量控制, 2 个西北太平洋低云个例上可提供的  $CTH_{GIIRS}$  数目也不一致。而  $CTH_{AGRI}$  也存在明显问题,  $CTH_{AGRI}$  数值与  $CTH_{VFM}$  相比总体偏小, 同时其刻画的云顶变化趋势, 也与  $CTH_{VFM}$  相距甚远。以

上结果显示: 就云顶高度的数值而言,  $CTH_{GIIRS}$  和  $CTH_{AGRI}$  的效果与之前的统计分析结果显示一致; 就单点的云顶高度而言, 两者对  $CTH$  估计均总体偏低,  $CTH_{GIIRS}$  优于  $CTH_{AGRI}$ 。

表 2 不同云类的低云云顶高度差 (CTHD) 统计

Table 2 Statistics of low cloud CTHD among different cloud types

云类型	CTHD <sub>AGRI-VFM</sub>		CTHD <sub>GIIRS-VFM</sub>	
	平均差/km	标准差/km	平均差/km	标准差/km
层云或者雾	-0.78	0.98	-0.61	0.82
正在转变的层积云	-0.56	1.05	-0.40	0.93
碎积云	-0.13	1.10	-0.25	1.08

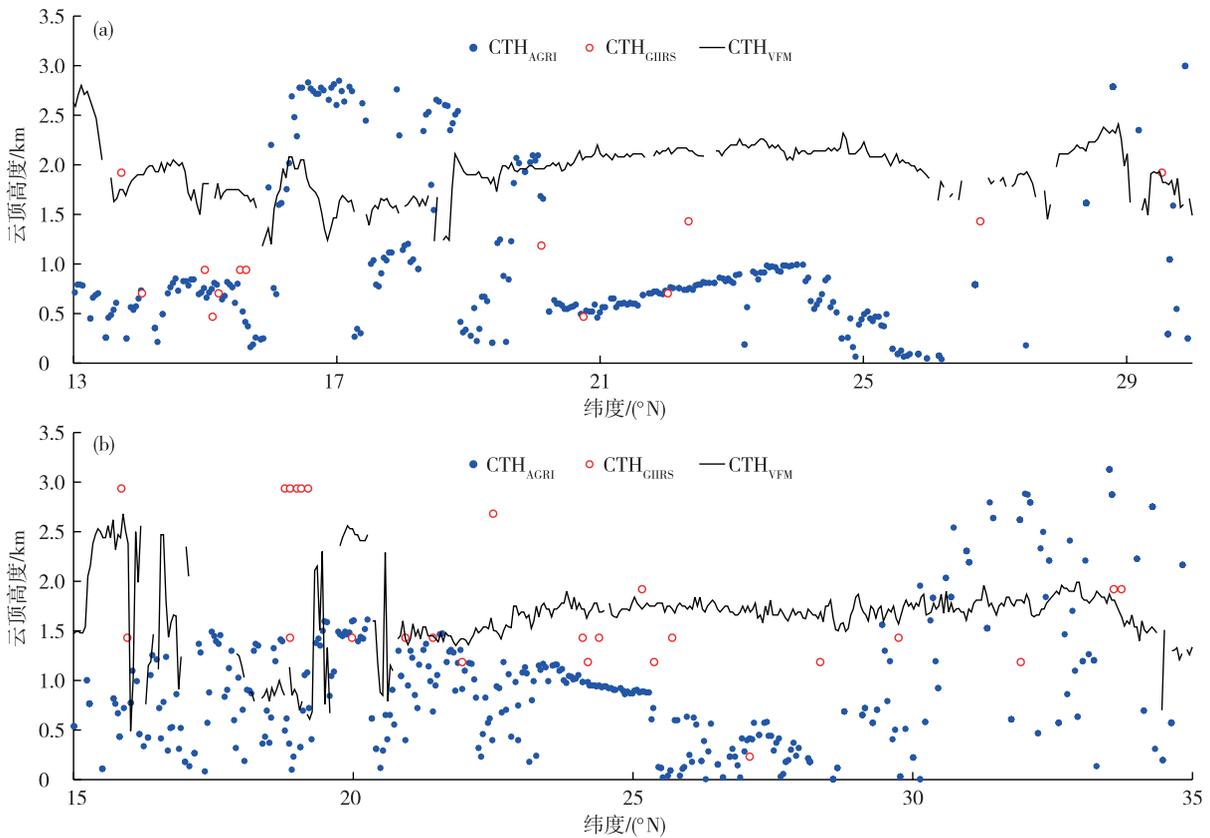


图 6 两种云顶高度产品 ( $CTH_{AGRI}$  和  $CTH_{GIIRS}$ ) 与 CALIPSO/VFM 的低云云顶高度 ( $CTH_{VFM}$ ) 对比 (a. 2019 年 1 月 28 日, b. 2019 年 2 月 1 日)

Fig.6 Comparison between two CTH products ( $CTH_{AGRI}$  and  $CTH_{GIIRS}$ ) and  $CTH_{VFM}$  in two low cloud cases on 28 January (a) and 1 February (b) 2019

#### 4 结论与讨论

(1) 基于逆温层与低层层状云之间的关系, 尝试利用 FY-4A/GIIRS/AVP, 提出一种在西北太平洋区域内反演低云云顶高度的方法。对比 2019 年

CALIPSO 探测的西北太平洋单层低云云顶高度和 FY-4A/AGRI/CTH、“逆温法”反演的 CTH 之间的差距, 结果显示,  $CTH_{AGRI}$  减去  $CTH_{VFM}$  的平均云顶高度差  $CTHD_{AGRI-VFM}$  为  $-0.49$  km,  $CTH_{GIIRS}$  减去  $CTH_{VFM}$  的平均云顶高度差  $CTHD_{GIIRS-VFM}$  为  $-0.27$  km,  $CTH_{GIIRS}$

和  $CTH_{AGRI}$  普遍低估低云的云顶高度。同时,  $CTH_{AGRI}$  与  $CTH_{VFM}$  的相关性不显著,  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  存在一定相关关系, 可见在统计结果上,  $CTH_{GIIRS}$  比  $CTH_{AGRI}$  更加接近  $CTH_{VFM}$ 。但即便“逆温法”反演的云顶高度  $CTH_{GIIRS}$  对比已有的  $CTH_{AGRI}$ , 对低云云顶高度的反演上取得更理想的统计结果, 在具体的西北太平洋低云个例上,  $CTH_{GIIRS}$  和  $CTH_{AGRI}$  均不能准确描述低云云顶高度的变化, 因此目前卫星对低云的云顶高度反演还有很大的提升空间。

(2) 对  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  之间产生误差的原因, 主要从 GIIRS/AVP 时空分辨率、低云出现的季节和低云种类 3 个方面进行研究。GIIRS/AVP 的时空分辨率对反演的  $CTH_{GIIRS}$  产生一定影响。使用就近原则比较云顶高度,  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  在客观上存在一定差距; 而 AVP 垂直分辨率为 230 m/层, 使用相对粗糙的垂直分辨率可能对逆温层底高度判断不准确, 导致  $CTH_{GIIRS}$  与  $CTH_{VFM}$  的差异; 同时, 逆温层有季节变化的特征, 在不同季节,  $CTH_{GIIRS}$  也会受到影响; 并且发现  $CTH_{GIIRS}$  对低层层状云的反演更为准确。

(3) 利用 FY-4A/GIIRS/AVP 和“逆温法”反演的低云云顶高度优于现有的 FY-4A/AGRI/CTH, 为西北太平洋低云云顶高度的反演提供了新思路。该方法反演的云顶高度在低云个例的表现上仍不理想, 其准确性受到 AVP 产品的时空分辨率、季节和低云云种的影响。同时, 云顶高度产品的时间连续性也十分重要, 然而本文用于检验的 CALIPSO 的云顶高度数据对同一区域一天仅能扫描 2 次, 难以满足时间连续的条件。下一步将从西北太平洋的各种气象要素等方面入手探究提高准确性的方法, 因为该方法的反演结果也有可能受到海雾或者低云发生时的天气形势影响。期待在未来可以应用到时空分辨率更高、质量更优的 FY-4A/GIIRS/AVP 产品和 FY-4A 成像仪数据。

**致谢:** 感谢国家卫星气象中心 (National Satellite Meteorological Center, NSMC) 提供的 GIIRS AVP 反演数据和 AGRI CTH 数据, 以及美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 兰利研究中心的大气科学数据中心 (Atmospheric Science Data Center, ASDC) 提供的 CALIPSO 数据。

## 参考文献:

- [1] STEPHENS G L. Cloud feedbacks in the climate system: a critical review[J]. *J Climate*, 2005, 18(2): 237-273.
- [2] XIE S C, LIU X H, ZHAO C F, et al. Sensitivity of CAM5-simulated arctic clouds and radiation to ice nucleation parameterization [J]. *J Climate*, 2013, 26(16): 5981-5999.
- [3] MA Z S, LIU Q J, ZHAO C F, et al. Application and evaluation of an explicit prognostic cloud-cover scheme in GRAPES global forecast system [J]. *J Adv Model Earth Systems*, 2018, 10(3): 652-667.
- [4] SLINGO A. Sensitivity of the earth's radiation budget to changes in low clouds [J]. *Nature*, 1990, 343: 49-51.
- [5] KARLSSON J, SVENSSON G, RODHE H. Cloud radiative forcing of subtropical low level clouds in global models [J]. *Climate Dyn*, 2008, 30(7/8): 779-788.
- [6] KORAČIN D, DORMAN C E. Marine fog: challenges and advancements in observations, modeling, and forecasting [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [7] ZHANG S P, CHEN Y, LONG J C, et al. Interannual variability of sea fog frequency in the Northwestern Pacific in July [J]. *Atmos Res*, 2015, 151: 189-199.
- [8] WOOD R. Stratocumulus clouds [J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(8): 2373-2423.
- [9] SMALL R J, DE SZOEKE S P, XIE S P, et al. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies [J]. *Dyn Atmos Oceans*, 2008, 45(3/4): 274-319.
- [10] WOOLLINGS T, HOSKINS B, BLACKBURN M, et al. Storm track sensitivity to sea surface temperature resolution in a regional atmosphere model [J]. *Climate Dyn*, 2010, 35(2): 341-353.
- [11] BAI H K, HU H B, YANG X Q, et al. Modeled MABL responses to the winter Kuroshio SST front in the East China Sea and Yellow Sea [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2019, 124(12): 6069-6092.
- [12] 文俊鹏, 蓝静, 刘峰. 广州白云机场低能见度客观预报方法试验 [J]. *气象科技进展*, 2021, 11(2): 176-180.
- [13] 陈玉雪. 日照机场大雾气候特征及气象条件分析 [J]. *农业技术与装备*, 2021(8): 142-143.
- [14] 卜清军, 徐灵芝, 侯敏. 天津港大雾天气气候特征分析 [J]. *天津科技*, 2019, 46(7): 91-96.
- [15] CERMAK J, BENDIX J. Detecting ground fog from space: a microphysics-based approach [J]. *Int J Remote Sens*, 2011, 32(12): 3345-3371.
- [16] SPINHIRNE J D, HANSEN M Z, CAUDILL L O. Cloud top remote sensing by airborne lidar [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(9): 1564-1571.

- [17] HOLLARS S, FU Q, COMSTOCK J, et al. Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP Manus site[J]. *Atmos Res*, 2004, 72(1/2/3/4): 169-186.
- [18] WEISZ E, LI J, MENZEL W P, et al. Comparison of AIRS, MODIS, CloudSat and CALIPSO cloud top height retrievals[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(17): L17811.
- [19] LIU B, HUO J, LYU D R, et al. Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing [J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(8): 1334-1350.
- [20] 原育凯, 张永合, 尹增山. 云顶高度的天基光学遥感及反演方法综述[J]. *红外*, 2010, 31(11): 1-5.
- [21] 陈建楠, 白洁, 周著华, 等. 卫星资料遥感云顶高度反演方法综述 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2017, 34(1): 116-120.
- [22] MENZEL W P, FREY R A, ZHANG H, et al. MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: algorithm description and results [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(4): 1175-1198.
- [23] CHENG X Y, YI L, BENDIX J. Cloud top height retrieval over the Arctic Ocean using a cloud-shadow method based on MODIS [J]. *Atmos Res*, 2021, 253(8): 105468.
- [24] MARCHAND R, ACKERMAN T, SMYTH M, et al. A review of cloud top height and optical depth histograms from MISR, ISCCP, and MODIS [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2010, 115(D16): D16206.
- [25] GARAY M J, DE SZOEKE S P, MORONEY C M. Comparison of marine stratocumulus cloud top heights in the southeastern Pacific retrieved from satellites with coincident ship-based observations [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2008, 113(D18): D18204.
- [26] HARSHVARDHAN, ZHAO G Y, GIROLAMO L D, et al. Satellite-observed location of stratocumulus cloud-top heights in the presence of strong inversions [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47(5): 1421-1428.
- [27] ZUIDEMA P, PAINEMAL D, DE SZOEKE S, et al. Stratocumulus cloud-top height estimates and their climatic implications [J]. *J Climate*, 2009, 22(17): 4652-4666.
- [28] NICHOLLS S, LEIGHTON J. An observational study of the structure of stratiform cloud sheets: part I. Structure [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, 112(472): 461-480.
- [29] BRETHERTON C S, WOOD R, GEORGE R C, et al. Southeast Pacific stratocumulus clouds, precipitation and boundary layer structure sampled along 20°S during VOCALS-REx [J]. *Atmos Chem Physics*, 2010, 10(21): 10639-10654.
- [30] 杨悦, 高山红. 黄海海雾天气特征与逆温层成因分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(6): 19-30.
- [31] KLEIN S A, HARTMANN D L. The seasonal cycle of low stratiform clouds [J]. *J Climate*, 1993, 6(8): 1587-1606.
- [32] YI L, ZHANG S P, THIES B, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top heights over the Yellow Sea with geostationary satellite data as a precondition for ground fog detection: a feasibility study [J]. *Atmos Res*, 2015, 151: 212-223.
- [33] 殷梦涛, 邹晓蕾. 极轨气象卫星高光谱红外探测仪简介 [J]. *气象科技进展*, 2015, 5(1): 29-39.
- [34] YANG J, ZHANG Z Q, WEI C Y, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, FengYun-4 [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(8): 1637-1658.
- [35] 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 世界各国静止气象卫星发展综述 [J]. *气象科技进展*, 2020, 10(1): 22-29, 41.
- [36] 鲍艳松, 汪自军, 陈强, 等. FY-4A 星 GIIRS 大气温度廓线反演模拟试验研究 [J]. *上海航天*, 2017, 34(4): 28-37.
- [37] YI L, LI K F, CHEN X Y, et al. Arctic fog detection using infrared spectral measurements [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2019, 36(8): 1643-1656.
- [38] XIAN D, ZHANG P, GAO L, et al. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications [J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(8): 1267-1284.
- [39] ZHANG P, LU Q F, HU X Q, et al. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies [J]. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9): 1027-1045.
- [40] 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景 [J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(2): 1-12.
- [41] MIN M, WU C Q, LI C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. *J Meteor Res*, 2017, 31(4): 708-719.
- [42] 黄艺伟, 陈淑仪, 何敏, 等. 我国台风高发期东海和南海海区 GIIRS/FY-4A 温度反演廓线精度研究 [J]. *热带气象学报*, 2021, 37(2): 277-288.
- [43] 黄艺伟, 刘琼, 何敏, 等. 基于探空资料的上海台风季 GIIRS/FY-4A 卫星温度廓线反演精度研究 [J]. *红外*, 2019, 40(9): 28-38.
- [44] 王富, 赵宇. 风云四号静止气象卫星的云顶高度反演算法 [J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2021,

- 44(3):412-418.
- [45] TAN Z H, MA S, ZHAO X B, et al. Evaluation of cloud top height retrievals from China's next-generation geostationary meteorological satellite FY-4A[J]. *J Meteor Res*, 2019, 33(3):553-562.
- [46] 赵耀天, 吴东. CALIOP、CPR 数据在探测海雾中的应用[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(10):125-133.
- [47] 赵经聪, 吴东, 赵耀天. 基于 CALIOP 数据的海雾检测方法研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(12):9-15.
- [48] 任兆鹏, 李昊倩, 鞠霞, 等. 青岛地区海雾分布及大气边界层条件分析[J]. *海洋科学*, 2020, 44(5):96-106.
- [49] 王凯悦, 张苏平, 薛允传, 等. 夏季低压控制下黄海西北部海域海雾发生气象条件合成分析[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(3):47-56.
- [50] 侯淑梅, 杨成芳, 王建林, 等. 上合组织青岛峰会期间海雾维持和消散阶段的环境场特征[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(1):86-94.
- [51] LIU Z Y, OMAR A H, HU Y X, et al. CALIOP algorithm theoretical basis document part 3: scene classification algorithms [EB/OL]. Hampton: NASA Langley Research Center. (2005-10-18) [2021-11-29]. [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202\\_Part3\\_v1.0.pdf](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202_Part3_v1.0.pdf).