

基于 FY-3D/MERSI-II 红外波段 夏季北极云检测模型研究

王曦, 刘健*, 杨冰韵

(国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

摘要: 基于我国风云极轨气象卫星 FY-3D/MERSI-II (FengYun-3D/ Medium Resolution Spectral Imager-II) 红外通道数据, 结合星载激光雷达主动探测数据, 开展北极地区夏季云检测模型研究。采用概率密度函数分析方法, 并引入损失率, 对相关阈值进行优化, 提出适用于北极夏季的红外云检测方案, 构建了基于置信度结果的云检测模型。精度检验结果表明, 所构建的云检测模型的检测结果与时空匹配的星载主动探测结果具有较高的一致性, 个例统计结果显示置信度高于 0.8, 云像元检测一致性 100%。当置信度低于 0.2 时, 存在 10.15% 云像元误判为晴空像元, 误判云像元多为云顶高度在 4~6 km 之间的单层云, 可能是卷云引起的误判。

关键词: 大气科学; 北极; 云检测; FY-3D/MERSI-II; 夏季

中图分类号: P412.3; **文献标识码:** A

Research on summer Arctic cloud detection model based on FY-3D/MERSI-II infrared data

WANG Xi, LIU Jian*, YANG Bing-Yun

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, FengYun Meteorological Satellite Innovation Center (FY-MSIC), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Combined with the spaceborne lidar active observations, an Arctic summer cloud detection model is studied here based on the data from the FY-3D/MERSI-II (FengYun-3D/Medium Resolution Spectral Imager-II). By using probability density function analysis method and introducing loss rate to optimize the correlating thresholds, an infrared cloud detection model for the Arctic summer is developed based on the confidence levels. The validation results reveal that the cloud detection results are highly consistent with the matched spaceborne lidar observations. The high confidence levels basically represent the cloudy pixels, while the low values correspond to the clear ones. The case study shows that the cloudy pixels is 100% consistent with the pixels of the confidence level higher than 0.8. When the confidence level is lower than 0.2, 10.15% of the cloudy pixels are still misjudged as clear pixels, which are primarily single-layer clouds with the cloud top heights between 4 and 6km. This may be caused probably by the cirrus clouds, which needs further study.

Key words: atmospheric sciences, Arctic, cloud detection, FY-3D/MERSI-II, summer

PACS: P412.3

引言

北极地区, 通常指北极圈(66°33'N)以北地区, 包括北冰洋、边缘陆地海岸带及岛屿, 是一片被大陆包围的冰雪海洋, 不仅是气候系统的重要组成

部分, 更是全球气候与环境变化的敏感区和关键区。极区云量变化对于区域及全球气候具有重要影响。在极区气候研究过程中, 云的辐射特性是重要的研究课题, 而极区云检测则是解决这一重要问

收稿日期: 2021-06-21, 修回日期: 2021-08-09

Received date: 2021-06-21, Revised date: 2021-08-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407200, 2018YFC1407204), 国家自然科学基金(61531019)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC1407200, 2018YFC1407204), and National Natural Science Foundation of China (61531019)

作者简介(Biography): 王曦(1985-), 女, 山西大同人, 高级工程师, 博士学位, 主要研究领域为云检测算法、云量分析等。E-mail: wangxi@cma.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: liujian@cma.cn

题的关键核心技术问题。极区位于高纬地区,具有低的太阳高度角,且地表常年被大量冰雪覆盖,是一直以来云检测领域的难点所在。在过去几十年中,由于极区地面观测站点的缺少,卫星遥感成为北极云观测的主要且重要的手段之一,利用遥感数据探测极区云一直是研究领域的难点和热点。

早期的国际卫星云气候项目(International Satellite Cloud Climatology Project, 简称 ISCCP)在极地使用 $3.7 \mu\text{m}$ 辐射提高对冰雪、低层云探测的灵敏度^[1],并以此为基础发展了极地单通道和双通道云检测阈值算法^[2-9]。但受到载荷观测能力、辅助数据精度和算法的限制,极区云检测出现较大误差^[10]。在 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) Polar Pathfinder(简称 APP)基础气候数据的基础上,Meier 等人^[11]、Wang and Key^[12]和 Key 等人^[13]发展了针对两极的专题数据(Extended AVHRR Polar Pathfinder,简称 APP-x),2019年5月发布 APP-x 第二版数据,APP-x 云检测以阈值判识方法为主,白天利用可见光、中波红外和红外分裂窗通道亮温差,夜间基于中波红外和红外分裂窗通道。Wang and Key^[14]比较了1982-1991年月平均尺度上极区地面观测云量与 APP-x 反演云量,两者在4-9月有较好的一致性,10月到次年3月由于云雪识别误差使得 APP-x 估计云量明显大于地面观测云量。欧洲气象卫星应用组织(The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites,简称 EUMETSAT)在2017年发布第二版数据(The CM SAF Cloud, Albedo And Surface Radiation dataset from AVHRR data - second edition,简称 CLARA-A2),CLARA-A2全球平均云检测偏差为13.2%,云检测精度达到79.7%,但在极地冬季仍有50%左右的云被漏检^[15]。同样采用 AVHRR 数据,欧洲航天局(European Space Agency,简称 ESA)基于 Cloud_cci(Climate Change Initiative Cloud project)项目,生成长时间序列云属性数据集^[16]。对最新发布的第三版数据集中云检测精度评估分析显示,采用基于神经网络的云检测算法后,全球云检测精度提高了2%左右,但极区的云检测精度依旧因受到冰雪下垫面、夜间无可见光通道等多种因素的影响而有所降低^[16-17]。MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)是搭载在美国 NASA Terra 和 Aqua 卫星上的扫描辐射计,拥有36个探测通道。相比 AVHRR 5 通道云检测算法,MODIS 云

检测算法采用22个探测通道数据,探测云的能力有所增强。Liu 等人^[18]利用 $7.2 \mu\text{m}$ 水汽吸收通道和 $14.2 \mu\text{m}$ CO_2 吸收通道,对 MODIS 极区夜间云检测算法进行改进,并利用北极地面观测数据进行了检测算法改进验证。验证结果显示在非海冰表面,改进算法使云的漏检率从44.2%降低到16.3%。尽管如此,Karlsson and Dybbroe^[19]对北极地区的 MODIS 云检测评估研究表明,在12月份,MODIS 云检测精度为63.92%。Chan and Comiso^[20]选取2007年和2010年 MODIS 和 CALIOP(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)云量数据进行对比分析,结果表明,MODIS 和 CALIOP 在整个北极区域平均差异白天为13.1%,夜间为26.7%。在海冰表面 MODIS 和 CALIOP 云量存在较大差异,差异值达到了30.9%,说明 MODIS 云检测算法在海冰表面存在较大偏差。

受到北极复杂大气和下垫面特征的影响,无论是可见光通道的反射辐射还是热红外通道的发射辐射,云和冰雪下垫面的辐射差异较小,使得光学传感器在云和冰雪区分上易产生误差^[21-22]。随着被动光学卫星遥感技术的发展,在改进北极地区云探测方面已经付出了很大的努力,取得了很大的进展,但仍面临极大的挑战。基于国产风云卫星对于极区云检测的研究较为薄弱,多借鉴国际上较为成熟的阈值检测方案结合图像特征辅助及统计分类方法来进行极地云区的检测工作。本研究旨在通过结合星载激光雷达数据,针对 FY3D/MERSI-II 光谱特征,对目前云检测算法中所涉及的主流极区云检测方案进行分析评估,设计优化组合方案,构建适用于高纬地区的 FY-3D/MERSI-II 云检测算法。

1 研究资料

风云三号(FengYun-3,简称 FY-3)气象卫星是我国第二代极轨气象卫星,其中风云三号 D 星(FY-3D)于2017年11月发射,搭载于其上的中分辨率光谱成像仪 II 型(Medium Resolution Spectral Imager-II,简称 MERSI-II)是 FY-3D 的主要载荷之一。MERSI-II 共设置25个通道,包括16个可见光-近红外通道,3个短波红外通道及6个中长波红外通道。本研究中主要采用 MERSI-II 红外通道亮温数据进行云检测模型相关研究,空间分辨率统一采用1km。研究所涉及 MERSI-II 通道(后文通道简称 CH)及性能参数如表1所示,其中 CH20 和 21 位于中波红外,白天不仅有发射辐射,还有反射辐射信息。CH22

位于水汽吸收区,CH24 是大气窗区通道,CH25 是大气分裂窗通道,有少量水汽吸收。

表 1 研究所涉及 FY3D/MERSI-II 相关通道及其性能参数
Table 1 Characteristics of channels of FY-3D/ MERSI-II applied in this study

通道号	中心波长 / μm	光谱带宽 /nm	空间 分辨率 /m	动态范围 /K
20	3.8	180	1 000	200~350
21	4.050	155	1 000	200~380
22	7.2	500	1 000	180~280
23	8.550	300	1 000	180~300
24	10.8	1000	250	180~330
25	12.0	1000	250	180~330

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星于 2006 年 4 月 28 日发射,正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOP)是 CALIPSO 卫星的主要有效载荷之一。CALIOP 已成为被动遥感云探测的重要检验数据。研究中使用的数据为 CALIPSO 的 L2 级 1 km 分辨率云层产品(CAL_LID_L2_01kmCLay-Standard-V4-20),该产品可提供垂直方向云分布层数、分层云顶云底高度及其他相关参数。具体数据说明请参阅 <https://www-calipso.larc.nasa.gov>。当 CALIPSO 卫星 L2 级云层产品中云层计数值大于 0 时(云顶高度非填充值),将该扫描像元定义为云像元,如云层产品中云层计数值等于 0(云顶高度为填充值),则将该像元定义为晴空像元且将其云顶高度标记为 0。

选取 65°N 以北高纬度地区为研究区域,选取 2019 年 7 月 1 日-10 日 FY3D/MERSI-II 成像仪数据及 CALIPSO 卫星 L2 级云层产品数据开展云检测模型研究。两类数据观测像元之间的匹配原则是两种数据观测时间差小于 5 min,空间上考虑最邻近点进行匹配。

此外,采用美国冰雪中心基于 SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) 全球海冰密集度及积雪覆盖度日数据(NISE_SSMISF18_YYYYMMDD_HDFEOS)作为地表类型辅助数据。该数据以 HDF-EOS 格式存储,包含 Extent 及 Age 两类数据集,其中 Extent 数据集记录观测范围内每一像素点的积雪覆盖情况及海冰密集度情况,并包含海岸及永久冰川覆盖区域标记。研究基于 Extent 数据,将下垫面分为海洋、陆表、海冰、永久冰川、积雪共五类。

2 云检测模型、结果及检验

2.1 云检测方案

根据 FY3D/MERSI-II 红外波段通道设置,选用窗区通道亮温及不同红外通道亮温差构建云检测方案,用于北极地区的云检测模型的构建和评估。下文中 BT (Brightness Temperature) 代表该通道亮温, BTD (Brightness Temperature Difference) 代表两通道亮温差,数字代表通道中心波长(表 1)。云检测方案包含 CH22、24 的亮温(BT7.2、BT10.8)、CH20 与 25 的亮温差(BTD3.8-12), CH24 与 20 的亮温差(BTD10.8-3.8)、CH23 与 24 的亮温差(BTD8.55-10.8)以及 CH20 与 21 的亮温差(BTD3.8-4.05)。

云与晴空下垫面在红外波长上具有不同的发射辐射特性,且这种不同的发射辐射特性随波长的变化而变化。已有研究^[5,23]揭示不同波长的红外通道亮温差不仅可用于云分类,而且可用于区分云和下垫面的冰雪。北极区域下垫面温度一般较低,海冰和积雪是下垫面的代表类型。Curry 等人^[24]指出,北极云以薄云、低层云为主,由于云和冰雪的温度差异小,使得云和冰雪下垫面的辐射差异小,云检测的难度很大。图 1 是利用 Streamer 模式^[25]计算得到的白天海冰表面晴空和不同云顶高度条件下 FY-3D/MERSI-II 研究所选红外通道的接收辐射亮温。计算中大气廓线采用极区夏季标准廓线,云为单一层次的水云,云量为 100%,云光学厚度设置为 10。图 1(a) 显示,对于中波红外通道(CH20, CH21),白天海冰表面晴空辐射亮温低于有云情况下的辐射亮温,且不同高度云的辐射亮温差异不明显。除中波红外通道,其他通道接收辐射亮温随云顶高度的抬升而降低,且不同高度云的辐射亮温存在较为明显的差异。CH22—CH25 各通道晴空条件下亮温低于低层云覆盖情况下的亮温,反映出在海冰下垫面条件下,仅利用红外通道亮温难以准确区分海冰和云,尤其是海冰和低云。图 1b 是晴空条件及不同云顶高度条件下的所选通道亮温差。从图中可知,尽管 BTD3.8-4.05 及 BTD8.55-10.8 随云顶高度的变化不如 BTD3.8-12.0 和 BTD10.8-12.0 显著,但有云与否在通道间亮温差上仍呈现出差异。

基于 2019 年 7 月 1 日—10 日 CALIPSO 及 MERSI-II 匹配数据(匹配晴空像元数 40463;匹配云像元数 94050),分海洋、无冰雪覆盖的陆表、海冰、永久

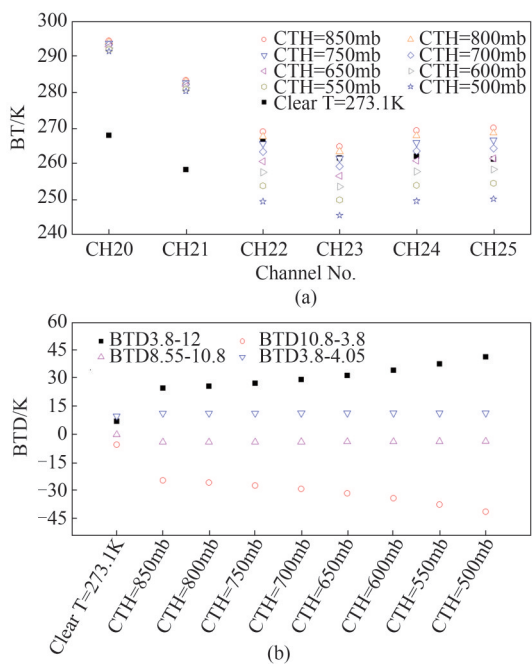


图1 利用 Streamer 模拟计算的极区夏季海冰表面晴空和不同云顶高度条件下 FY3D 研究所选通道接收的(a)辐射亮温及(b)不同通道间亮温差

Fig. 1 Simulated results of Arctic summer clear and cloudy conditions over sea ice cover by Streamer model (a) brightness temperature and (b) brightness temperature difference of selected channels from FY3D in this study

冰川、积雪五类下垫面类型,对每一种检测方案采

用概率密度函数(Probability Density Function,简称 PDF)进行统计分析,分别形成晴空及云像元亮温、亮温差的 PDF 分布。

晴空与云像元亮温、亮温差的 PDF 分布图中,黑色线条代表晴空像元分布,蓝色线条代表云像元分布。对于无冰雪覆盖的陆表(图 2),BT10.8、BTD3.8-12、BTD10.8-3.8、BTD3.8-4.05 晴空区与云区存在部分交叠。云像元亮温(BT10.8)PDF 峰值集中在 270K 附近。晴空像元亮温 PDF 出现双峰值,分别位于 277 K 及 296 K 附近。对于 BTD3.8-12、BTD10.8-3.8、BTD3.8-4.05 三种亮温差检测方案,晴空像元亮温差峰值分布在 0 附近,而云区亮温差 BTD3.8-12 及 BTD3.8-4.05 多为正值的同时 BTD10.8-3.8 多为负值。从 PDF 分布形状来看,晴空峰值区分布较窄,而云的翼区分布较广。尽管晴空像元与云像元之间同样存在部分交叠,但亦可有效将大部分云与晴空分离。对于 BT7.2 及 BTD8.55-10.8 检测方案来说,云区和晴空区分布虽然也有区别,但是二者交叠区域范围较大。

图 3 为海洋下垫面晴空与云像元不同云检测方案 PDF 分布情况。其基本分布与陆表较为相似,海表上空云像元的窗区亮温(BT10.8)整体较陆表上空云像元亮温高,云像元亮温峰值移至 272 K 附近。晴空像元 PDF 出现多峰值分布特点,主体位

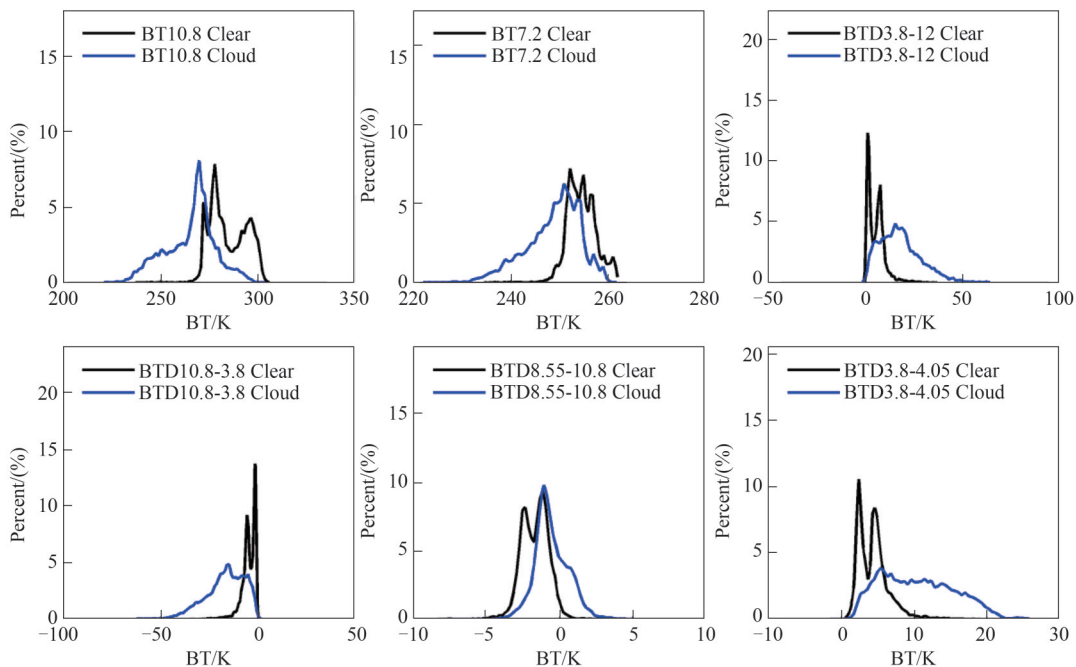


图 2 FY3D/MERSI-II 陆表下垫面晴空与云像元的不同云检测方案 PDF 分布情况(黑色线条:晴空;蓝色线条:云)

Fig. 2 Probability Distribution Functions for clear and cloudy pixels of different cloud detecting tests over land regions based on the data from FY3D/MERSI-II (black lines: clear; blue lines: cloudy)

于 271~278 K 之间。海洋晴空像元在 BT D3.8-12、BT D10.8-3.8、BT D3.8-4.05 三种亮温差检测方案中分布更为集中,且与云区交叠部分较陆表更小,说明三种亮温差云检测在海洋下垫面条件下较为有效。对于 BT 7.2 及 BT D8.55-10.8 检测方案来说,与陆表相似,云与晴空二者交叠区域范围较大,检测有效性降低。

由于海冰、永久冰川、积雪三种下垫面 PDF 分布相似,在此以海冰下垫面为例进行分析。图 4 为海冰下垫面晴空与云像元的不同云检测方案 PDF 分布情况。可以看出,对于 BT D3.8-12、BT D10.8-3.8、BT D3.8-4.05 方案来说,海冰 PDF 分布基本与陆表及海洋下垫面相似,即晴空像元亮温差集中在 0 附近且呈现窄带分布,而云区分布较广。对于 BT 10.8 检测方案来说,海冰下垫面晴空像元窗区亮温分布更为集中,峰值较窄,集中在 271 K 附近。对于 BT 7.2 及 BT D8.55-10.8 检测方案来说,海冰下垫面情况下云区和晴空分布区别更为明显,二者峰值未出现明显交叠,检测有效性较陆表及海洋更为有利。

2.2 阈值分析及确定

对于阈值检测技术而言,阈值的设定直接影响云检测结果的准确程度。CALIPSO 能够较为精确地观测云的垂直分布情况,相对于其他许多云检测算法利用辐射传输模式的模拟结果来定义云检测

方案的阈值,利用 CALIPSO 实际观测的云信息确定云检测方案阈值,可以弥补数值模拟可能无法捕捉实际大气中的一些真实情况的缺陷。

从图 2~4 可知,北极地区晴空和云像元在不同通道亮温及通道亮温差 PDF 分布均存在一定程度的交叠,为确定最优阈值,引入损失率 f :

$$f = \frac{A_b}{A} + \frac{B_a}{B} \quad (1)$$

其中 A 及 B 分别代表待区分不同类型像元的总数目, A_b 代表实际为 A 经阈值 T 检测后误判为 B 的像元数目, B_a 则代表实际为 B 但经阈值 T 检测后误判为 A 的像元数目。随着 T 值在交叠区域范围内的不断变化,损失率 f 也随之变化。当损失率 f 达到最小时,所对应的阈值即为最终的阈值 T 。损失率 f 数值一般在 0~1 之间,当损失率 f 越靠近 0 时,代表该检测方案能较好的区分云及晴空,而当损失率 f 越接近于 1 时,代表该检测方案检测有效性有所降低。

针对不同下垫面类型,获得的不同云检测方案所对应的阈值及损失率如表 2 所示。图 5 为陆表、海洋及海冰下垫面所对应的阈值分布情况。图中灰色水平线条代表晴空,蓝色水平线条代表云,水平线条起始点代表分布的极大值及极小值,线条中心标记为分布中值,垂直线条代表阈值情况。一般情况下,阈值位于晴空及云分布两者中值之间时,检测方案可较为有效地识别晴空与云。若阈值并

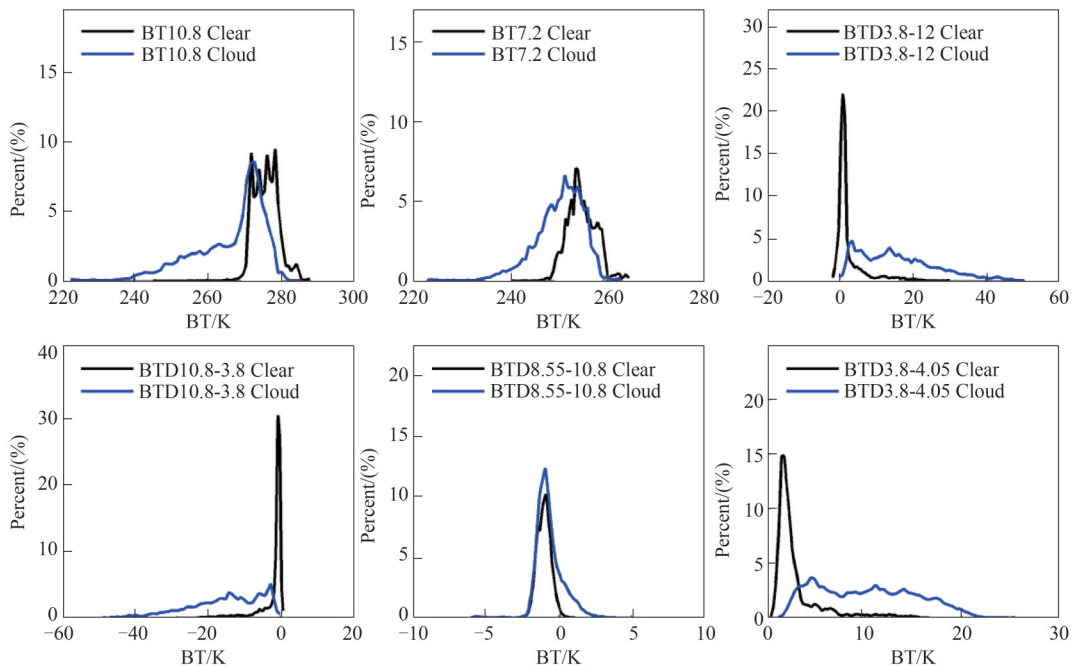


图 3 同图 2,下垫面类型为海洋

Fig. 3 Same as Fig. 2 for ocean regions

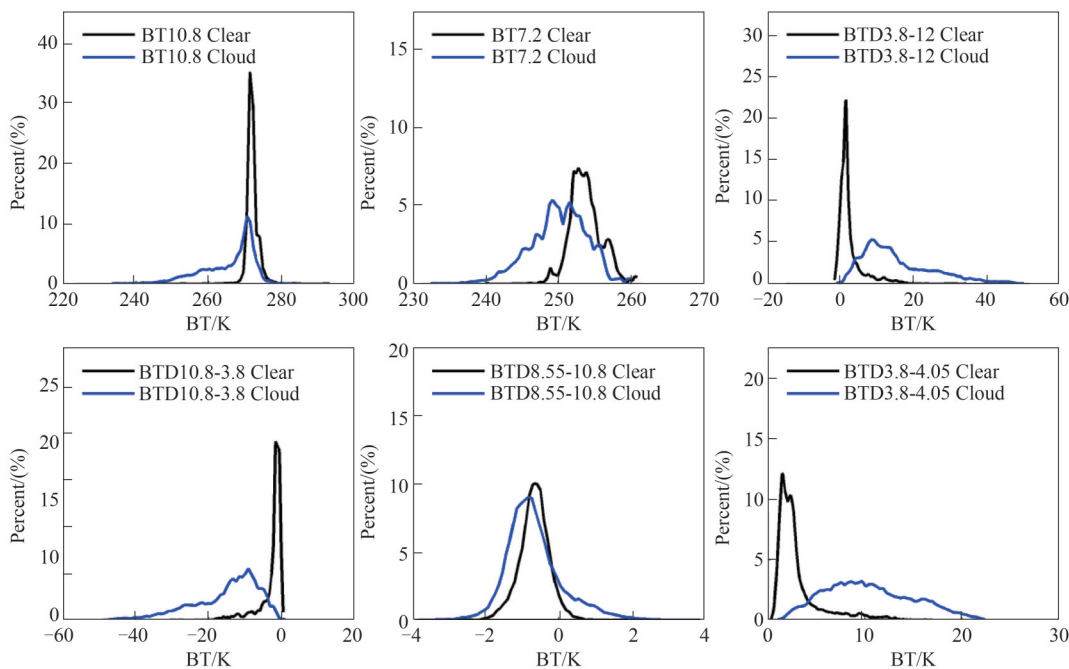


图4 同图2,下垫面类型为海冰
Fig. 4 Same as Fig. 2 for sea ice regions

非位于晴空与云分布中值之间,如图5中BTD8.55-10.8检测方案,晴空/云检测方案有效性有所降低,表2同样显示BTD8.55-10.8检测方案对不同下垫面类型整体上损失率均偏高。

2.3 云检测模型构建与精度评估

采用云检测产品判识准确率(HR)作为评估参数,对2020年6月1日、10日和20日三天的FY3D/MERSI-II数据进行北极地区云检测方案的有效性评估,同期CALIPSO L2级1 km分辨率云层产品作为真值(匹配晴空像元数10521;匹配云像元数25583)。HR参量是对云检测算法准确度的整体性评估,数值越高代表云检测结果越准确。HR定义如下:

$$HR = \frac{a + d}{a + b + c + d}, 0 \leq HR \leq 1 \quad (2)$$

式中 a 代表FY3D及CALIPSO云检测产品均为云的像元; d 代表FY3D及CALIPSO云检测产品均为晴空的像元; b 代表FY3D判识为云而CALIPSO云检测产品判识为晴空的像元; c 代表FY3D判识为晴空而CALIPSO云检测产品判识为云的像元。

从上述分析可知,六种检测对于云及晴空的区分有效性存在一定差异,不同云检测方案在不同下垫面上对云的检测敏感性有所不同。依据得到的云检测方案评估结果,采用加权方法,即予以检测评估效果较好的方案较高权重,检测评估结果略差的方案权重较低,组合各检测方案构建云检测模型,得到最终的云检测结果置信度,依据置信度给出最终的云检测结果。表3列出每个云检测方案的HR评估结果及权重分配情况。从表3可知,对于无冰雪覆盖的海表和陆表,除BT7.2海洋检测外,所有

表2 不同下垫面不同检测方案的阈值及相应损失率

Table 2 Thresholds and loss functions of different cloud detecting tests for different surface types

	海洋		陆表		海冰		永久冰川		积雪	
	阈值	损失率	阈值	损失率	阈值	损失率	阈值	损失率	阈值	损失率
BT10.8	271.11	0.457	271.90	0.342	270.49	0.371	263.37	0.535	270.99	0.311
BT7.2	252.19	0.574	251.30	0.467	251.48	0.489	250.00	0.424	251.05	0.400
BTD3.8-12	2.34	0.277	9.81	0.353	4.71	0.232	8.00	0.261	8.37	0.341
BTD10.8-3.8	-2.07	0.263	-8.41	0.346	-4.27	0.230	-7.91	0.266	-7.75	0.342
BTD8.55-10.8	-0.34	0.795	-1.29	0.623	-1.95	0.831	0.31	0.891	-1.54	0.786
BTD3.8-4.05	3.33	0.290	6.32	0.405	4.34	0.231	6.72	0.302	6.59	0.407

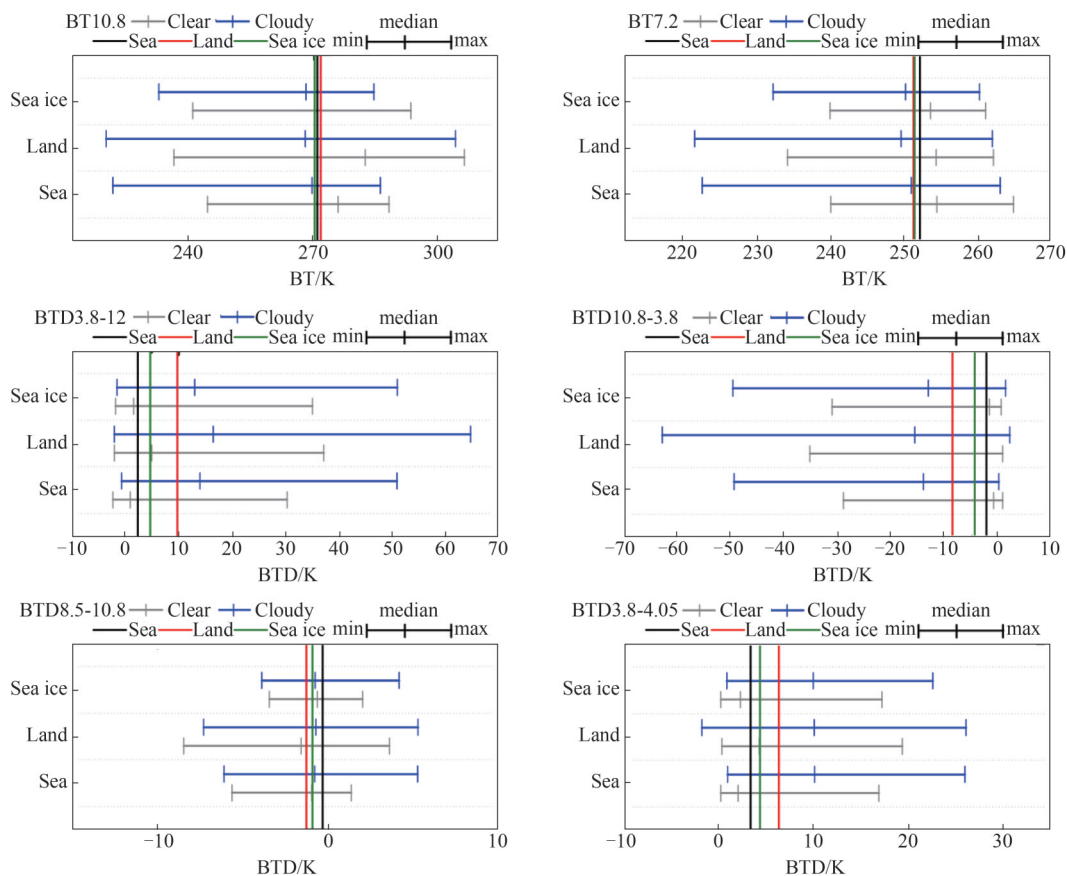


图5 海洋、陆表、海冰三种下垫面情况下不同检测方案阈值分布情况,其中灰色水平线条代表晴空,蓝色水平线条代表云,水平线条起始点代表分布的极大值及极小值,线条中心标记为分布中值,垂直线条代表阈值情况,黑色为海洋,红色为陆表,绿色为海冰

Fig. 5 Thresholds of different cloud detecting tests for ocean, land, and sea ice regions. The gray horizontal line represents the clear condition; the blue horizontal line represents the cloudy condition. The starting point of the horizontal line represents the maximum and minimum value of the distribution; the center of the line represents the median of the distribution; the vertical line represents the threshold (black: ocean; red: land; green: sea ice)

云检测方案的 HR 评估均大于 0.6。对于冰雪下垫面, BTD3.8-12 和 BTD10.8-3.8 检测方案 HR 较高(大部分高于 0.8), BTD3.8-12、BTD10.8-3.8 及 BTD3.8-4.05 在海洋、海冰下垫面云检测方案中具有大于 0.9 的 HR 高值,反映出 CH20 在海洋、海冰下垫面云检测中的作用较为显著。

图6为2020年6月10日0625UTC给出经权重函数计算后得到的云检测最终置信度分布与红外窗区 10.8 μm 通道亮温图像。从图中可见,二者间有较好的一致性,置信度高值区(颜色偏白色调)基本上与红外窗区中所显示的云区相对应,而置信度低值区(色调偏黑色调)则对应于红外窗区中偏向

表3 FY3D/MERSI-II 北极夏季云检测方案 HR 评估结果及权重分配情况

Table 3 HR results and weighting functions of cloud detecting tests by FY-3D/MERSI-II for Arctic summer

检测方案	海洋		陆表		海冰		永久冰川		积雪	
	HR	权重	HR	权重	HR	权重	HR	权重	HR	权重
BT10.8	0.748	0.160	0.687	0.158	0.217	0.051	0.495	0.121	0.763	0.171
BT7.2	0.341	0.073	0.673	0.155	0.688	0.163	0.547	0.134	0.710	0.159
BTD3.8-12	0.954	0.204	0.813	0.187	0.927	0.220	0.829	0.203	0.870	0.195
BTD10.8-3.8	0.945	0.202	0.810	0.187	0.912	0.216	0.847	0.208	0.853	0.191
BT8.5-10.8	0.730	0.156	0.613	0.141	0.553	0.131	0.600	0.147	0.641	0.144
BT3.8-4.05	0.951	0.204	0.742	0.171	0.923	0.219	0.760	0.186	0.629	0.141

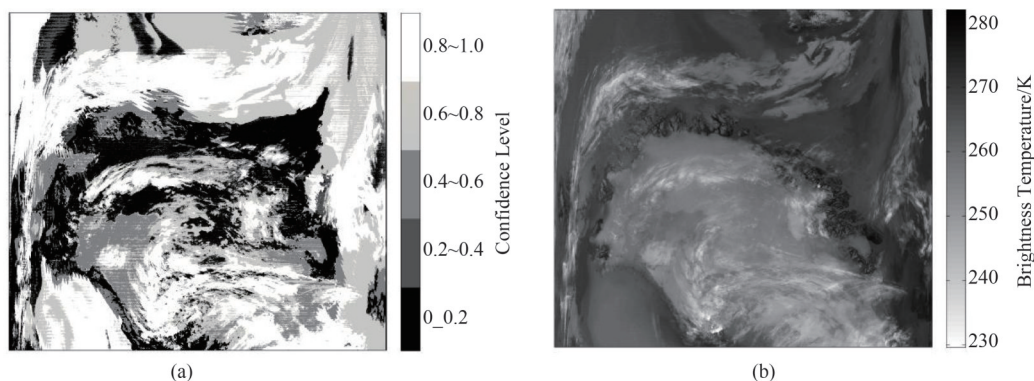


图6 (a)云检测最终置信度分布与(b)红外窗区 $10.8\ \mu\text{m}$ 通道亮温对比情况(2020年6月10日0625UTC)

Fig. 6 A case of (a) final confidence level of cloud detection and (b) brightness temperature of infrared window channel $10.8\ \mu\text{m}$ at 0625UTC on June 10, 2020

于晴空区域。

为了更好地验证构建的云检测方案的有效性,利用CALIPSO数据对FY3D云检测结果进行比对分析。图7是2020年6月10日0625UTC FY3D个例与所对应的匹配CALIPSO轨道合成图,图中黄色线条为CALIPSO轨道。图8(a)为云检测方案置信度与CALIPSO云顶高度对比结果,相应置信度区间范围内云及晴空像素点所占比例如图8(b)所示。对比结果显示,置信度越高对应于云的识别准确性越高,少部分高置信度值出现了误判,如在 71°N 附近,置信度位于0.6附近,但CALIPSO数据显示云顶高度为0。此外,当云顶高度为0时,置信度值并不是完全降为0,而是处于一个低值,如 $75^\circ\text{N}\sim 76^\circ\text{N}$ 之间,CALIPSO云顶高度降为0,而置信度多位于0.2附近。从统计结果来看,当置信度高于0.8时,对应的像元均为CALIPSO云顶高度不为0的像元,也就是之前所定义的云像元。当置信度区间位于0.6~0.8之间时,对应的云像元占86.54%,晴空像元占比13.46%。当置信度低于0.2时,晴空像元占89.85%的同时,仍存在10.15%的云像元。进一步研究发现,对于低置信度区间时云误判为晴空的情况,多为高度4~6 km之间的单层薄卷云。

3 结论与讨论

北极高纬地区,地表常年被大量冰雪覆盖,且太阳高度角较低,是一直以来云检测领域的难点所在。本研究基于FY3D/MERSI-II红外通道数据,结合星载激光雷达主动探测数据,通过PDF分析优化北极地区夏季云检测方案,采用损失率的方法获取较为合理的云检测方案阈值,构建基于置信度的云检测模型。云检测结果经检验具有较高的可信

度。主要结论如下:

(1) 基于Streamer模式模拟结果进行北极夏季红外云检测方案选择,优化后云检测方案主要包含红外窗区亮温(BT10.8)、水汽通道亮温(BT7.2)以及多种通道亮温差组合(BTD3.8-12、BTD10.8-3.8、BTD8.55-10.8、BTD3.8-4.05)。

(2) 针对不同下垫面类型,通过损失率计算及HR评估确定云检测方案阈值及各检测方案所占权重,构建云检测模型,云检测结果通过置信度值进行表达。置信度值越高,云像元的可能性越大。

(3) 采用星载激光雷达观测数据对所构建的云检测模型结果进行精度检验。个例分析检验结果表明,置信度高于0.8时对应可信度较高的云,置信度低于0.2时约10%的云像元误判为晴空,误判像元多为高度集中在4~6 km的单层薄卷云。

本研究提出的北极地区夏季云检测模型为基于FY-3数据改进极地高纬地区云检测算法提供了重要参考,目前该模型的置信度高值区间对应的云判识结果的可信度较高,高层薄卷云具有较低的置信度,有一定的误判为晴空的概率。

本研究主要基于FY-3D/MERSI-II红外通道,参考已有研究中的云检测通道及通道组合设置,针对北极冰雪下垫面特征,开展北极地区云检测研究,探讨FY-3D/MERSI-II数据在北极区域的应用能力。北极区域特有的冰雪下垫面和大气逆温条件使得现有被动光学遥感载荷的观测数据都不足以准确区分云与冰雪下垫面,FY-3D/MERSI-II也是如此。此外,通常的云检测算法提供是否是云或晴空的判识结果,考虑到北极区域云检测本身的复杂性,及不同数据应用场景对云检测精度需求的多样性,本研究中的云检测模型提供的是像素级云检测

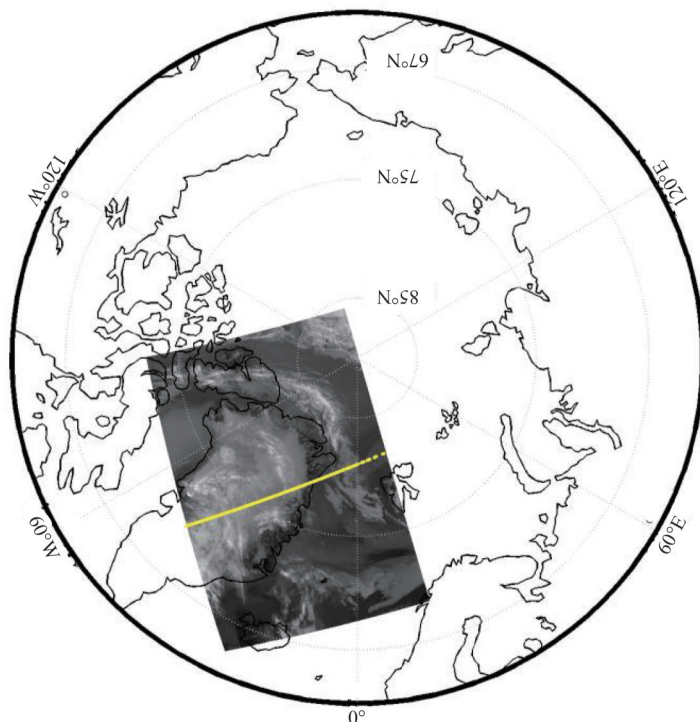


图7 2020年6月10日0625UTC 红外窗区 10.8 μm 通道亮温及与之匹配的 CALIPSO 扫描轨道(黄色线条)

Fig. 7 Same case as Fig. 6 for brightness temperature of infrared window channel 10.8 μm and its matching CALIPSO scanning track (yellow line)

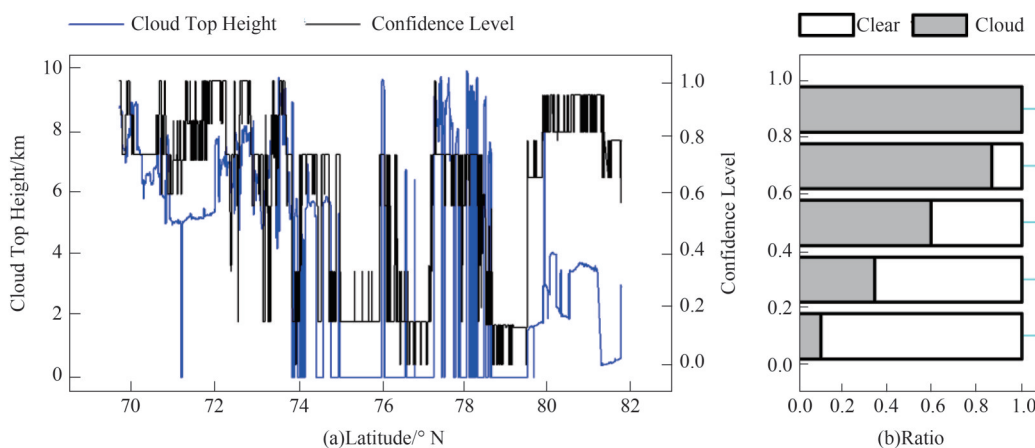


图8 (a)2020年6月10日0625UTC 云检测置信度(黑色线条)及与之匹配的 CALIPSO 云顶高度(蓝色线条), (b)对应置信度区间晴空及云像元所占比例,其中置信度区间设置为:0~0.2,0.2~0.4,0.4~0.6,0.6~0.8,0.8~1.0

Fig. 8 Same case as Fig. 6. (a) final confidence level of cloud detection (black lines) vs. CALIPSO cloud top height (blue lines); (b) ratios of clear and cloudy pixels in the corresponding interval of confidence level, where the interval is set as: 0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8, 0.8~1.0

置信度结果,并未给出具体是否为云或晴空的检测结果,目的是便于用户根据具体需求来设置适用性更强的划分规则。而如何基于置信度结果得出更为可靠且较为普适的云或晴空划分标准,需要结合典型个例分析进行大量的数据统计,这是后期研究需要继续完善的工作。

References

[1] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, **80**(11):2261-2288.

[2] Ackerman S A. Global satellite observations of negative brightness temperature differences between 11 and 6.7 μm [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, **53**(19):2803-2812.

- [3] Gao B-C, Han W, Tsay S C, *et al.* Cloud detection over the Arctic region using airborne imaging spectrometer data during the daytime [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**(11):1421-1429.
- [4] Inoue T. A cloud type classification with NOAA 7 split-window measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1987, **92**(D4):3991-4000.
- [5] Inoue T. On the temperature and effective emissivity determination of semi-transparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 μ m window region [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1985, **63**(1):88-99.
- [6] Spangenberg D, Chakrapani V, Doelling D, *et al.* Development of an automated Arctic cloud mask using clear-sky satellite observations taken over the SHEBA and ARM NSA sites [C]. Proc 6th Conf on Polar Meteor and Oceanography, 2001.
- [7] Yamanouchi T, Suzuki K, Kawaguchi S. Detection of clouds in Antarctica from infrared multispectral data of AVHRR [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1987, **65**(6):949-962.
- [8] Minnis P, Bedka K, and the NOAA CDR Program. NOAA Climate Data Record (CDR) of Cloud and Clear-Sky Radiation Properties, Version 1.0[DB]. *NOAA National Centers for Environmental Information*: 2015.
- [9] Spangenberg D, Doelling D, Chakrapani V, *et al.* Nighttime cloud detection over the Arctic using AVHRR data [C]. Proc. 12th ARM Science Team Meeting, 2002: 1-13.
- [10] Rossow W B, Garder L C. Validation of ISCCP cloud detections [J]. *Journal of Climate*, 1993, **6**(12):2370-2393.
- [11] Meier W N, Maslanik J A, Fowler C W, *et al.* Multiparameter AVHRR-derived products for Arctic climate studies [J]. *Earth Interactions*, 1997, **1**(5):1-29.
- [12] Wang X, Key J R. Recent Trends in Arctic surface, cloud, and radiation properties from space [J]. *Science*, 2003, **299**(5613):1725.
- [13] Key J. The AVHRR polar pathfinder climate data records [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**:167.
- [14] Wang X, Key J. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR polar pathfinder dataset. Part I: Spatial and temporal characteristics [J]. *Journal of Climate - J CLIMATE*, 2005, **18**:2558-2574.
- [15] Karlsson K G, Anttila K, Trentmann J, *et al.* CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data [J]. *Atmos Chem Phys*, 2017, **17**(9):5809-5828.
- [16] Stengel M, Stapelberg S, Sus O, *et al.* Cloud property datasets retrieved from AVHRR, MODIS, AATSR and MERIS in the framework of the Cloud_cci project [J]. *Earth Syst Sci Data*, 2017, **9**(2):881-904.
- [17] Stengel M, Stapelberg S, Sus O, *et al.* Cloud_cci advanced very high resolution radiometer post meridiem (AVHRR-PM) dataset version 3: 35-year climatology of global cloud and radiation properties [J]. *Earth Syst Sci Data*, 2020, **12**(1):41-60.
- [18] Liu Y, Key J R, Frey R A, *et al.* Nighttime polar cloud detection with MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **92**(2):181-194.
- [19] Karlsson K G, Dybbroe A. Evaluation of Arctic cloud products from the EUMETSAT Climate Monitoring Satellite Application Facility based on CALIPSO-CALIOP observations [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, **10**(4):1789-1807.
- [20] Chan M A, Comiso J C. Arctic cloud characteristics as derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat [J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**(10):3285-3306.
- [21] Frey R A, Ackerman S A, Liu Y, *et al.* Cloud detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS cloud mask for collection 5 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**(7):1057-1072.
- [22] Lubin D, Morrow E. Evaluation of an AVHRR cloud detection and classification method over the central Arctic ocean [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**(2):166-183.
- [23] LIU Jian, XU Jian-Min, FANG Zong-Yi. Analysis of the cloud properties using NOAA AVHRR data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (刘健, 许健民, 方宗义。利用 NOAA 卫星 AVHRR 资料分析云的性质。应用气象学报), 1998, **9**(4):449.
- [24] Curry J A, Schramm J L, Rossow W B, *et al.* Overview of Arctic cloud and radiation characteristics [J]. *Journal of Climate*, 1996, **9**(8):1731-1764.
- [25] Key J R, Schweiger A J. Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet [J]. *Computers & Geosciences*, 1998, **24**(5):443-451.