

基于高分五号 02 星偏振载荷的冰雪上空云检测算法

方颖^{1,2}, 孙晓兵^{1,3*}, 提汝芳¹, 黄红莲^{1,3}, 刘晓^{1,3}, 王宇瑶^{1,2}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³合肥市农业行业首席专家工作室, 安徽 合肥 230012

摘要 卫星对地遥感观测中,云和冰雪地表是两个重要的观测对象,由于它们辐射特性的相似性,使得冰雪区域上空云检测存在困难。针对高光谱观测卫星(高分五号 02 星)偏振载荷的数据特征,本文设计了一套冰雪上空云检测算法。该算法利用高分五号偏振载荷大气气溶胶多角度偏振探测仪和高精度偏振扫描仪的在轨探测多角度多光谱偏振辐射数据,协同进行云检测。首先,通过氧 A 带吸收通道的表观压强检测进行云和冰雪的初步区分,在此基础上利用多角度偏振散射特性进行冰雪上空的水云检测,利用卷云波段检测提高了冰雪上空的卷云检测效果,最后通过对常用的 NDSI 归一化雪指数进行改进,提高了冰雪上空的冰云检测精度。以格陵兰岛和南极区域为例,进行了冰雪上空云检测实验,并与成像时间相近的 MODIS 产品云掩膜产品 MOD35 进行对比,一致性分别为 83.3% 和 94.4%。结果表明,本文提出的算法能够有效检测冰雪上空的云像元。

关键词 云检测;冰雪;遥感;多角度;偏振探测

中图分类号 P407 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230494

1 引言

卫星遥感表征了精细地表信息,广泛应用于农业、人类活动研究和土地规划等领域。云覆盖地球上大约 60% 的天空^[1],云层会阻断光学卫星的成像通道,降低图像中可用像素的数量和质量。冰雪在冬季北半球的面积超过 40%^[2],是一种特殊的地表形态。云和冰雪两个因素都将极大地影响遥感影像的处理和分析。云和冰雪的光谱特征在可见光波段相似,会导致冰雪上空的云检测效果不理想,容易产生云和冰雪的误判。

云检测是遥感数据处理的重要环节,是获取高质量遥感数据的前提。对于云检测技术,目前常用的主要是阈值法,如国际卫星云气候学计划 (ISCCP) 云检测算法^[3],它是利用可见光 600 nm 以及红外通道 1100 nm 的观测和晴空辐射值来检测云像元,该算法对于薄云和沙漠、冰雪等高亮的地表容易产生误判。亮温差法^[4]利用云顶温度在热红外通道上比地表温度低的原理,通过亮温差将云像元提取出来。对于较冷的云层,该算法的检测效果好,但无法较好地检测出较冷的云层。近年来,偏振探测技术在国际上得到快速

发展,其结合多角度偏振信息能够增加信息的维度,为云检测提供了新的识别手段。利用偏振探测的云检测是通过多角度偏振信息对每个像元进行约束性检测,最后进行分类。该算法最早是由 Bréon 等^[5]和 Buriez 等^[6]提出并应用于 POLDER 数据。该算法对于多数季节和地表类型都适用,但未考虑到不同的下垫面和时间空间变化的问题。经过大量学者的持续研究,近年来,陈震霆等^[7]利用偏振信息建立了多角度空间融合的海洋上空云检测,该算法能有效地检测出海洋上空的云像元,并且提高了时效性。李超^[8]综合不同的下垫面和时空变化的情况,利用辐射传输模型和设置新的动态阈值来提高云检测精度。伟乐斯等^[9]在前人的基础上,利用偏振信息和非偏振信息获取云检测结果后,使用随机森林的方法来进行云检测。虽然上述利用偏振信息能有效地识别出云像元,但是在高亮地表上空如冰雪区域,仍然存在部分冰雪像元被误判成云像元或薄卷云无法完全识别的现象。

由中国科学院合肥物质科学研究院研制的两台偏振载荷大气气溶胶多角度偏振探测仪 (DPC) 和高精度偏振扫描仪 (POSP) 搭载在高光谱观测卫星 (高分

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-03-12; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 航天科技创新应用研究项目 (E23Y0H555S1)、中国资源卫星应用中心资助项目 (E03Y0J13601)

通信作者: *xbsun@aiofm.ac.cn

五号 02 星)上,于 2021 年 9 月 7 日 11 时 01 分在太原卫星发射中心成功发射。相比 POLDER, DPC 在分辨率和观测角度上有了提高。两台偏振载荷的“偏振交火”方案,具备了多角度、多光谱、偏振高精度、宽幅成像等方面的观测能力^[10],为云的观测提供了更多信息。极地地区纬度高,地面常年被冰雪覆盖,云和冰雪的反射率在可见光波段都很高,导致该区域难以进行云检测^[11]。因此,本文针对高分五号 02 星数据,以典型地区如极地地区为例进行云检测的研究具有一定的意义。

本文基于 DPC 和 POSP 数据,通过氧 A 吸收通道的表观压强检测,进行多角度偏振云检测和卷云检测,利用改进后的 NDSI 归一化雪指数检测对冰雪上空的云像元和晴空像元进行区分。通过多个区域采样分析确定了每种检测判据的最佳阈值,提出了一种适用于冰雪上空的云检测方案。最后,将该方案应用于 DPC 和 POSP 数据并与 MODIS 的 MOD35 云产品进行了对比,验证了算法的有效性。

2 数据与算法

本节基于 DPC 和 POSP 数据进行冰雪上空云检测研究,并与 MODIS 的 MOD35 的云掩膜产品进行对比。其中 2.1 节和 2.2 节分别介绍 DPC、POSP 数据特征,2.3 节设计冰雪上空的云检测算法,并通过对不同区域采样分析,确定每种检测判据的最佳阈值。

2.1 DPC 和 POSP 数据

DPC 能够获取多角度、多波段偏振辐射数据,采用的是超广角镜头和滤光片-偏振片组合的方式,星下点空间分辨率为 3.5 km^[12],高分五号 02 星搭载的 DPC-2 在高分五号 01 星搭载的 DPC 的基础上,从 9 个观测角度增加为 17 个观测角度, DPC-2 拥有更多的多角度观测视角,可提供更多遥感信息^[13]。

POSP 传感器与 DPC-2 有一致的幅宽,采用的成像方式是穿轨扫描,并通过极化交叉火力(PCF)的方式与 DPC 进行协同观测^[14]。POSP 设计了星上定标器,可以得到更高精度的偏振和辐射探测数据,覆盖紫外波段至短波红外波段。因此,在轨测量数据的精度以及稳定性有了保证^[15]。二者波段设置如表 1 所示。

本文在研究 DPC 和 POSP 数据时空匹配上,采用如下方案:根据 DPC 的空间分辨率信息建立全球网格,经过二维线性插值的方法将 POSP 数据投影到 DPC 全球网格中,建立一个虚拟载荷(PSS),使得两个数据在空间匹配上都达到 3.5 km,实现 POSP 和 DPC 的等空间分辨率匹配,在此基础上进行云判别,两个仪器独立判别,最终结果进行结合得到云检测产品。

2.2 MODIS 数据

MODIS 分别搭载在 1999 年发射的 Terra 和 2002 年发射的 Aqua 卫星的对地遥感探测器上,由美国宇航局研制^[16]。包含 36 个光谱波段,扫描幅宽达到 2330 km,实现了 400~14400 nm 的全光谱覆盖。其云检测的特征波段及主要应用领域如表 2 所示。

表 1 DPC 与 POSP 波段参数
Table 1 Band parameters of DPC and POSP

Band	DPC		POSP		Main application	Article application
	Central wavelength / nm	Polarization I/Q/U	Central band / nm	Polarization I/Q/U		
Ultraviolet band	—	—	380	Y	Absorbent aerosol	
	—	—	410	Y	Absorbent aerosol	
	443	N	443	Y	Aerosol optical depth	
	490	Y	490	Y	Aerosol, surface albedo, and cloud reflectance	
Visible and near-infrared band	565	N	—	—	Surface albedo	
	670	Y	670	Y	Aerosol properties	NDSI and cloud
	763	N	—	—	Cloud and aerosol layer height	Cloud and apparent pressure
	765	N	—	—		
	865	Y	865	Y	Aerosol and cloud	Water cloud
910	N	—	—	Water vapor		
Shortwave infrared band	—	—	1380	Y	Cirrus cloud	Cirrus cloud
	—	—	1610	Y	Dust aerosol	NDSI and cloud
	—	—	2250	Y	Surface-atmosphere decoupling	Cloud

Terra 卫星降交点时间是上午 10:30,与 GF-5B 卫星降交点时间相近,因此可作为 DPC/POSP 云检测结

果的验证数据。本文对 MOD35 产品中的 Cloud Mask 产品数据进行采样和重投影,使 MOD35 产品和 DPC

表 2 MODIS 云检测的特征波段及其主要应用领域

Table 2 Characteristic bands and main application fields of MODIS cloud detection

Band number	Spectral range /nm	Signal-to-noise ratio	Central wavelength /nm	Resolution /m	Main application
1	620-670	128	645	250	Land/Cloud boundary
2	841-876	201	858.5	250	
4	545-565	228	555	500	
6	1628-1652	275	1640	500	Cloud/Snow and vegetation cover
20	3660-3840	0.05	3750	1000	Surface/Cloud temperature
21	3929-3989	2.00	3959	1000	
22	3929-3989	0.07	3959	1000	
23	4020-4080	0.07	4060	1000	
26	1360-1390	150	1375	1000	Cirrus cloud and water vapor
31	10780-11280	0.05	110300	1000	Surface/Cloud temperature
32	11770-12270	0.05	120200	1000	
33	13185-13485	0.25	133350	1000	Cloud top height
35	13785-14085	0.25	139350	1000	
36	14085-14385	0.35	142350	1000	

云检测产品投影方式和分辨率一致。通过 DPC 网格提取经纬度,进行两个产品的对比验证。

2.3 冰雪上空云检测算法

2.3.1 氧 A 带吸收通道表观压强检测

氧 A 带的吸收波段范围在 758~778 nm 之间,在这一波长范围内,除了氧气之外,很少有其他气体的吸

收,大气中氧气含量的比例是比较稳定的^[17-18]。DPC 存在 763 nm 和 765 nm 两个通道,经过对 DPC 多角度数据在不同波段下的反射特性研究,图 1 显示出有云像元在 763 nm 和 765 nm 光谱通道的反射率有明显的变化,其中 763 nm 波段的反射率较小,其相比其他波段氧气吸收较大。

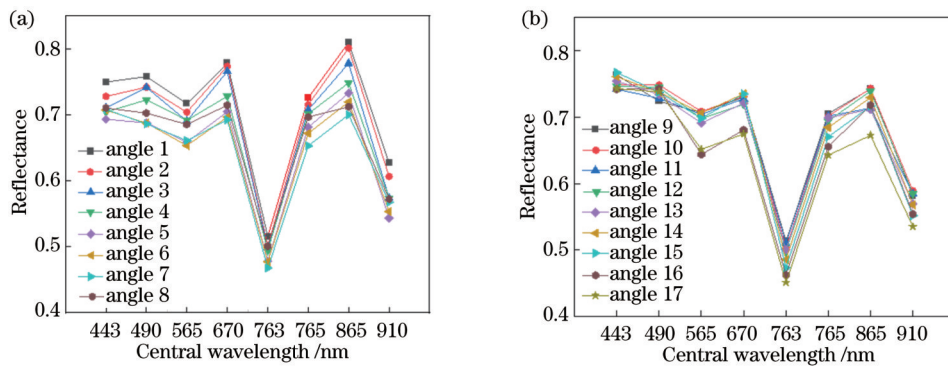


图 1 DPC 对于有云像元在不同波段下的反射特性。(a)1~8 个角度;(b)9~17 个角度

Fig. 1 Reflection characteristics of DPC for cloudy pixels in different wavelengths. (a) 1-8 angles; (b) 9-17 angles

大气中存在云时,大气层顶的表观反射率主要由瑞利散射、气溶胶散射和云顶反射和地表的反射组成。假定其他的贡献忽略不计,763 nm 和 765 nm 波段处的反射率在云层处一样,此时用比例系数 X 来表达 763 nm 和 765 nm 处的表观反射率,如下式所示:

$$X = \frac{R_{763} - R_{763}^{mol}}{R_{765} - R_{765}^{mol}}, \quad (1)$$

式中, R_{763} 、 R_{765} 和 R_{763}^{mol} 、 R_{765}^{mol} 分别为 763 nm、765 nm 处的大气层顶的表观反射率和大气分子散射反射率。

在特定的大气条件中,云顶压强 P 决定系数 X ,但

进行 6S 辐射传输模拟的时候,要考虑角度不同时入射和反射光路的区别,因此需要定义考虑光程对模拟的影响,如下式所示:

$$m = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v}, \quad (2)$$

式中: m 为大气光学质量因子; μ_s 和 μ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦。

在不考虑其他因素对压强的影响下,为了研究 P 、 m 和 X 之间的相关性,利用 6S 辐射传输对比例系数 X 进行全方位模拟,模拟结果如图 2 所示。

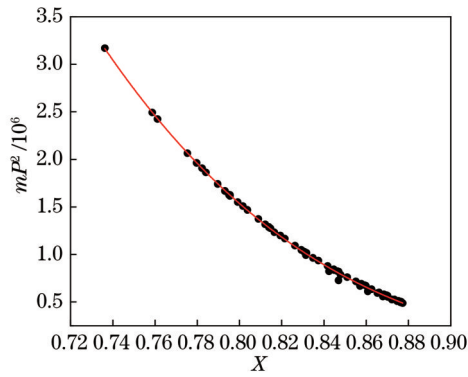


图 2 6S 辐射传输拟合的比例系数 X 与 mP^2 的关系

Fig. 2 Relationship between proportional coefficient X and mP^2 of 6S radiative transfer fitting

如图 2 所示, 6S 辐射传输拟合的比例系数 X 与 mP^2 有明显的关系, 为了减少拟合的误差, 提高拟合精度, 选择 3 次多项式拟合, 拟合公式分别为

$$P_{app} = P_0 \sqrt{\frac{f(x)}{m}}, \quad (3)$$

$$f(x) = A + BX + CX^2 + DX^3. \quad (4)$$

相关参数如表 3 所示, 将拟合公式的参数代入式 (3)、式 (4) 计算表观压强, 图 3 是 DPC 多角度观测数据计算的表观压强结果。从图中可以看出, 表观压强值小于 900 hPa 时, 能较容易地检测出冰雪上空的云, 而表观压强大于 900 hPa 的低云由于和地表表观压强接近, 则无法进行有效区分。

因此, 本文采用对表观压强结果加入校正因子 Δ_p 。

表 3 拟合式 (3) 和式 (4) 的相关参数

Table 3 Fitting related parameters of Eqs. (3) and (4)

Parameter	Value
P_0	1013.25
A	151.44038
B	-456.49618
C	461.90846
D	-156.97163

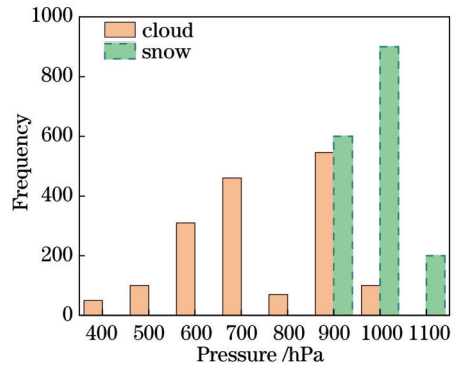


图 3 表观压强统计结果

Fig. 3 Statistical results of apparent pressure

的方法进行云检测, 构建公式^[8]分别如下所示:

$$P_{surf} - M_{p, app} > \Delta_p, \quad (5)$$

$$P_{surf} = 1012.44 - 118.945H + 5.43875H^2 - 0.109778H^3 + 0.000780614H^4, \quad (6)$$

$$\Delta_p = 50 + 210N_{DVI}, \quad (7)$$

$$N_{DVI} = \frac{R_{865} - R_{670}}{R_{865} + R_{670}}, \quad (8)$$

式中: P_{surf} 是地表压强; $M_{p, app}$ 为有效观测角度的表观压强平均值; H 是海拔高度; 归一化的植被指数 (N_{DVI}) 确定校正因子; R_{670} 、 R_{865} 分别为 670、865 nm 处的表观反射率; Δ_p 为进行氧 A 带吸收通道表观压强检验的阈值。当像元满足式 (5) 时, 像元检测为云像元。

2.3.2 多角度偏振信号检测

DPC 能够获取 490、670、865 nm 等 3 个偏振波段、17 个观测角度的在轨观测数据。本文利用受大气散射辐射影响比较小的 865 nm 波段, 对云和冰雪的偏振特性进行分析。根据和 DPC 时间相近的 MOD06 云相态产品作为先验, 将 MOD06 产品投影到 DPC 网格对进行空间匹配, 选取水云、冰云样本数据, 同时根据 MODIS 积雪产品选取冰雪样本数据, 对水云、冰云、冰雪数据进行统计分析。偏振反射率随散射角的变换如图 4 所示, 水云偏振反射率在 140° 散射角时出现峰值, 这是水云的“虹特征”^[19]。

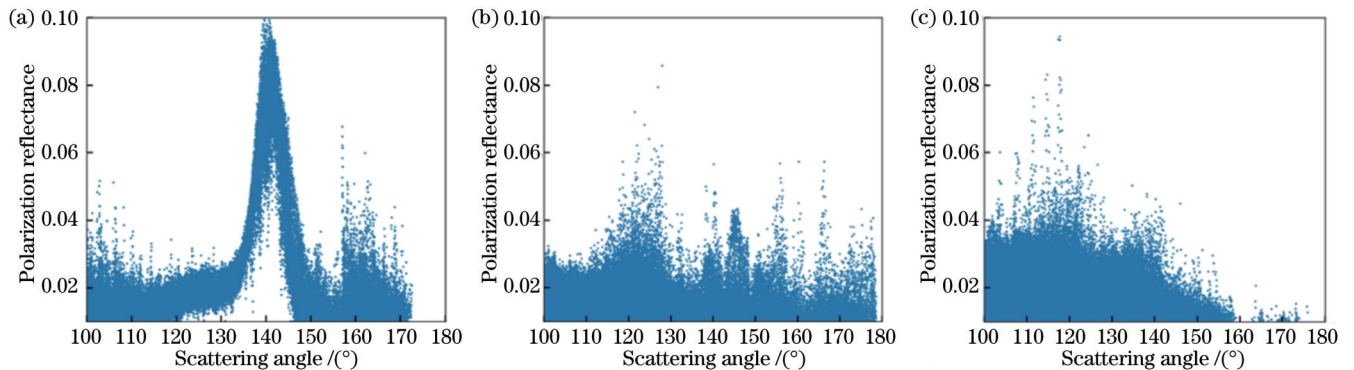


图 4 865 nm 偏振反射率随散射角的变化。(a) 水云; (b) 冰雪; (c) 冰云

Fig. 4 Variation of 865 nm polarization reflectance with scattering angle. (a) Water cloud; (b) ice-snow; (c) ice cloud

云的偏振观测容易受到观测几何的影响,因此需要校正受角度影响的偏振反射率^[8],校正如下式所示:

$$R_p^{cor} = (\mu_s + \mu_v) \cdot R_p, \quad (9)$$

$$R_p^{cor} > \Delta_p, \quad (10)$$

式中: μ_s 和 μ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦; R_p 为DPC数据在865 nm处的偏振反射率; R_p^{cor} 为校正后的偏振反射率; Δ_p 为进行多角度偏振云检测的阈值。当像元满足式(10)时,像元判定为云像元。

本文为了获得式(10)的阈值,根据MOD06产品的先验确定所选区域为水云,统计了在有效观测角度下满足 $130^\circ \sim 150^\circ$ 的大量DPC实测数据,通过式(9)归一化计算得到水云的平均偏振反射率,统计结果图5所示。

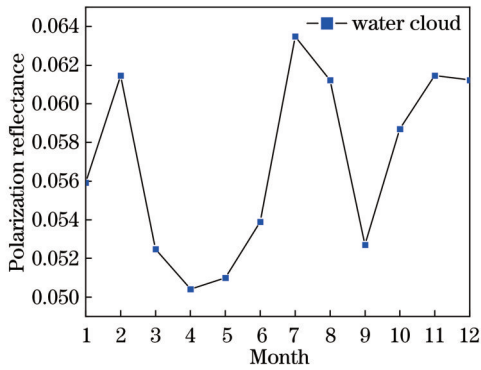


图5 基于DPC数据的865 nm偏振反射率统计图
Fig. 5 Statistics of 865 nm polarized reflectance based on DPC data

由图5可知,不同月份下的水云样本在观测的散射角为 140° 附近范围内,在865 nm处水云的偏振反射率都在0.05以上,因此,本文判定冰雪上空在有效观测角度下像元的偏振反射率大于0.05时,结果检测为水云。

2.3.3 卷云检测

为了获得卷云和冰雪的样本,采用MODIS相近时间的MOD06云相态产品作为先验,选取了卷云样本数据,同时根据MODIS积雪产品选取冰雪样本数据。冰雪和卷云在不同POSP观测波段下的反射率如图6所示,冰雪的反射率与卷云的反射率在可见光和近红外波段的反射率并无明显区别,因此,如果利用可见近红外波段的反射率进行判识时,大量冰雪像元可能被误检测为云像元。特别当有冰雪地表覆盖时,对云层较薄的卷云产生影响较大。从图6中明显看出,在1380 nm波段处,冰雪的反射率和云的反射率有了明显的区别,冰雪地表的反射率几乎为0,卷云的反射率接近0.2。

由于大气中的水汽对太阳辐射有很强的吸收作用,使得中低层大气和地面的辐射无法到达探测器。卷云存在于对流层的上层,而它的下方存在很多的水汽^[20-21]。POSP数据具备1380 nm探测波段,当冰雪上

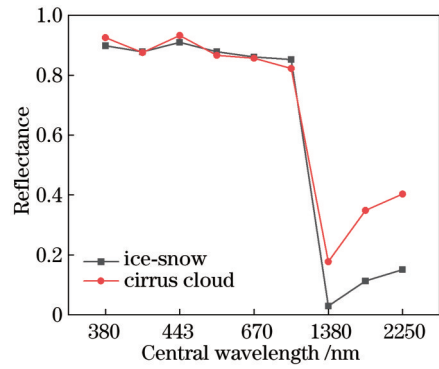


图6 基于POSP数据的卷云和冰雪的反射率随波长的变化
Fig. 6 Variation of reflectivities of cirrus cloud and ice-snow with wavelength based on POSP data

空有卷云存在时,此时POSP载荷将在1380 nm波段处观测到较强的来自卷云的反射辐射。

通过1380 nm波段反射率能有效地识别出卷云,构建判别式如下所示:

$$R_{1380} > \Delta_p, \quad (11)$$

式中: R_{1380} 为1380 nm处的表观反射率; Δ_p 为进行卷云检测的阈值。当像元满足式(11)时,判定该像元为卷云像元。具体的阈值设定将在2.3.5节中统计给出。

2.3.4 改进的归一化雪指数检测

针对不同的下垫面,MODIS全球积雪产品提供了不同的算法,它的依据是雪在1620 nm处对太阳辐射吸收强,云相对于雪吸收太阳辐射少,导致在1620 nm波段云的反射率比雪的反射率大,利用二者反射率差别较大的原理检测冰雪和云。MODIS采用659 nm波段和1620 nm波段数据计算NDSI来区分云与冰雪^[22]。

在POSP的波段中,含有与MODIS采用的NDSI所使用波段相接近的670 nm和1610 nm波段,本文在研究冰雪上空的云时,为了能够更加准确地识别云像元,在前面的研究基础上,选取POSP数据的冰云、水云和冰雪样本。

由图7给出POSP数据的冰云、水云和冰雪的反射率平均值随波段的变化可以看出,在可见和近红外波段,冰云、水云和冰雪的反射率值都比较高。在1610 nm波段处,水云和冰云相对于冰雪反射率较大,在1610 nm波段能有效地区分云和冰雪的像元。在2250 nm波段处,冰云和水云的反射率相似,但对于冰雪也有明显的区别,因此在2250 nm处也能有效地区分云和冰雪的像元。在前文中,已经能够通过DPC多角度偏振信息有效地区别出水云和冰雪,又因为相比1610 nm波段而言,2250 nm波段与670 nm的归一化差值更容易区分冰云和冰雪。因此,对常用的NDSI指数所用波段选取670 nm和2250 nm来区分冰云和冰雪像元。

利用POSP中的670 nm和2250 nm波段信息检测冰云,构建判别式如下所示:

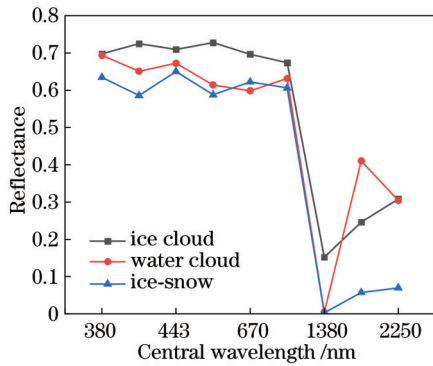


图 7 基于 POSP 数据的冰云、水云和冰雪的反射率随波长的变化

Fig. 7 Variation of reflectivities of ice cloud, water cloud, and ice-snow with wavelength based on POSP data

$$N_{DSI} = (R_{670} - R_{2250}) / (R_{670} + R_{2250}), \quad (12)$$

$$N_{DSI} < \Delta_p, \quad (13)$$

式中： R_{670} 、 R_{2250} 分别代表 670、2250 nm 波段处的反射率； Δ_p 为进行改进的归一化雪指数检测的阈值。当像元满足式(13)时,本文判定该像元为云像元,具体的阈值设定将在 2.3.5 节中统计给出。

2.3.5 算法阈值的确定

MODIS 全球积雪面积产品中 NDSI 阈值为 0.4^[22]。为了验证本文使用数据设置阈值的有效性,本文统计了近 10 个月格陵兰岛区域(选取范围为 60.3°N~70.5°N, 40°W~47°W)和位于南极区域(选取范围为 -90°N~-80°N, 105°W~107°W)下垫面为冰雪的数据。

由于 3 月 21 日到 9 月 23 日南极点出现极夜,9 月 23 日到次年 3 月 21 日南极点出现极昼,因此选取南极区域的时间范围为:2021 年 11 月—2022 年 3 月。如表 4 所示,统计的是格陵兰岛区域 10 个月近 90 天和南极区域 4 个月 36 天的 1380 nm 波段的反射率月平均值,以及改进后的 NDSI 指数的月平均值。

表 4 研究区域参数的月平均统计结果

Table 4 Monthly average statistical results of parameters in study area

Month	Greenland		Antarctic	
	R_{1380}	NDSI	R_{1380}	NDSI
11	0.02944	0.49304	0.11060	0.54372
12	0.09366	0.57571	0.08932	0.59624
01	0.03887	0.73313	0.07490	0.49718
02	0.08560	0.53212	0.09882	0.51374
03	0.06825	0.46872	—	—
04	0.01138	0.46165	—	—
05	0.01147	0.48687	—	—
06	0.09810	0.42454	—	—
07	0.04122	0.55549	—	—
08	0.09939	0.42723	—	—

本文基于 1380 nm 波段反射率、改进的 NDSI 指数在不同时间下的阈值结果,从已有的 POSP 在轨观测数据选择格陵兰岛区域,采用 MODIS 相近时间的云掩膜产品作为先验样本,分别筛选出冰雪上空的 10000 个云像元和 10000 个晴空像元进行统计,数据统计结果如表 5 所示。对比不同时间下的云判识理论阈值,可获取最终的云判识阈值。

表 5 格陵兰岛云和雪反射率参数对比

Table 5 Comparison of reflectivity parameters of cloud and snow in Greenland

	Category	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation
R_{1380}	Snow	0.05009	0.12897	0.08333	0.02362
	Cloud	0.33228	0.36951	0.33228	0.01363
NDSI	Snow	0.53700	0.62265	0.57469	0.02351
	Cloud	0.33972	0.35694	0.34795	0.00501

结合冰雪和云的特性分析以及统计的大量统计结果和样本分析,本文云判识的准则为:1)在卷云 1380 nm 波段处的反射率大于 0.1 时,判识为云像元;2)改进的 NDSI 雪指数小于 0.45 时,判识为云像元。

2.3.6 云检测算法流程

首先,对于冰雪上空,利用 DPC 在轨探测的 763、765 nm 波段的多角度观测数据计算氧 A 带表观压强,初步区分云和冰雪地表;接下来,利用 DPC 的 865 nm 波段观测数据,基于水云偏振的“虹特征”,检测冰雪上空的水云像元;然后,利用 POSP 的 1380 nm 波段观测数据进行卷云检测;最后,利用本文改进后的 NDSI 检测冰云像元,最终输出冰雪上空的云检测结果。本文设计的云检测算法流程如图 8 所示。

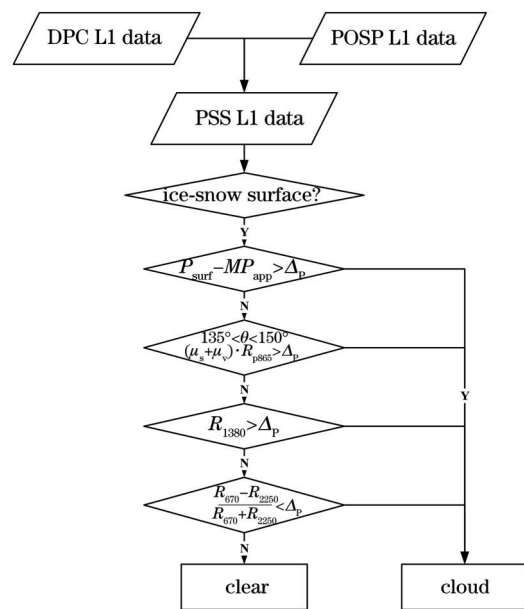


图 8 冰雪上空云检测算法流程图

Fig. 8 Flow chart of cloud detection algorithm over ice-snow

3 结果与讨论

为了验证算法的有效性,将云检测算法应用于冰雪上空,共选择了两个样本区域,分别为常年冰雪覆盖的格陵兰岛区域和南极区域。选取区域数据获取时间最接近的 MOD35 云产品与 DPC/POSP 云检测结果进行对比。由于不同的载荷对于云检测的方法和参数,以及云产品的投影方式不同,会导致比较有差异,因此,本文在对比两者产品一致性的同时,定义选择一致性如下式所示:

$$C = \frac{S_1 S_2}{S_{1, \text{null}} S_2 + S_1 S_{2, \text{null}} + S_1 S_2} \times 100\%, \quad (14)$$

式中: S_1 表示 DPC/POSP 载荷; S_2 表示 MODIS 载荷; $S_{1, \text{null}} S_2$ 表示 DPC/POSP 检测结果是晴空, MODIS 检测结果是云; $S_1 S_{2, \text{null}}$ 表示 DPC/POSP 检测结果是云, MODIS 检测结果是晴空,利用上述公式能确定 DPC/POSP 和 MODIS 云检测的结果。

选取两个数据集均能覆盖的区域, DPC 真彩图如图 9(a) 所示, 针对 2022 年 2 月 19 日的数据, 目标选取范围为格陵兰岛区域 ($65^\circ\text{N} \sim 85^\circ\text{N}, 15^\circ\text{W} \sim 70^\circ\text{W}$), 该区域的像元个数为 175896。

对算法中每一步的云检测结果进行比对分析。经

过氧 A 带表观压强的检测、增加 DPC 多角度偏振信号检验、增加卷云波段检测、增加改进的 NDSI 检测后与 MODIS 产品进行逐像元比对, 一致性分别为 72.8%、77.6%、80.5%、83.3%。说明算法在增加 DPC 多角度偏振信号检验、卷云波段检测、改进的 NDSI 归一化雪指数后, 提高了冰雪上空中云的检测精度。

如图 9(b) 和 9(c) 所示, DPC/POSP 云检测结果与 MOD35 产品的云像元空间分布较为一致。通过逐像元对比发现, 两个产品一致性约为 83.3%, 其中 DPC/POSP 判识结果中, 有云结果占 26.6%, 晴空结果为 73.3%。MODIS 有云结果占 29.7%, 晴空结果占 70.2%。说明本文使用的 DPC/POSP 数据在作用于冰雪上空进行云检测时, 和 MODIS 的云识别结果一致。另外 DPC 的空间分辨率为 3.5 km, MODIS 的分辨率为 1 km, 从图中 9(c) 能够看出, MODIS 的云掩膜产品在目视效果中更加精细, 有小部分的孤立云, 有可能是因为分辨率的差异导致 DPC/POSP 的云检测产品的目视效果比较粗略。选取格陵兰岛区域 DPC/POSP 影像的过境时间为 UTC 14:43:03, MODIS 影像的过境时间为 UTC 15:30:00, 受大气环流以及该时间内风向的影响, 在 DPC/POSP 和 MODIS 过境时间差内, 云发生了移动, 导致两者的云检测结果有差异。

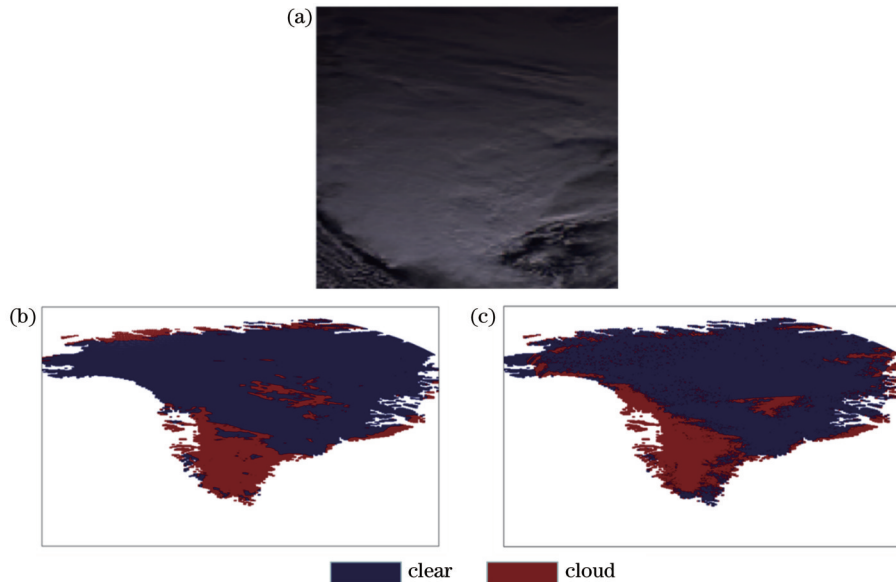


图 9 2022 年 2 月 19 日格陵兰岛区域云检测算法的可靠性验证。(a) DPC 真彩图; (b) DPC/POSP 检测结果; (c) MODIS 检测结果
Fig. 9 Reliability verification of cloud detection algorithm in Greenland region on February 19, 2022. (a) True color picture of DPC; (b) DPC/POSP detection results; (c) MODIS detection results

在两个数据集均能覆盖的南极区域, DPC 真彩图如图 10(a) 所示, 针对 2021 年 11 月 15 日的数据, 检测目标为 $70^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{S}, 20^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{E}$, 该区域的像元个数为 395991。

对算法中每一步的云检测结果进行比对分析。经过氧 A 带表观压强的检测、增加 DPC 多角度偏振信号检验、增加卷云波段检测、增加改进的 NDSI 检测后与

MODIS 产品进行逐像元比对, 一致性分别为 90.2%、91.7%、93.1%、94.4%。说明算法在增加 DPC 多角度偏振信号检验、卷云波段检测、改进的 NDSI 归一化雪指数后, 提高了冰雪上空中云的检测精度。

如图 10(b) 和 10(c) 所示, DPC/POSP 云检测结果与 MOD35 产品的云像元空间分布较为一致。该区域 DPC/POSP 影像的过境时间为 UTC 03:16:38,

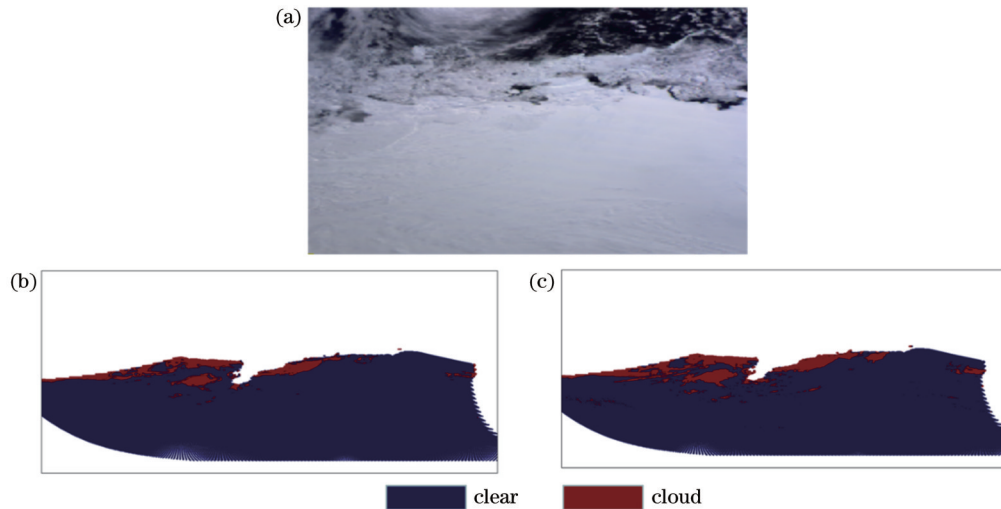


图 10 2021 年 11 月 15 日南极区域云检测算法可靠性验证。(a)DPC 真彩图;(b)DPC/POSP 检测结果;(c)MODIS 检测结果
Fig. 10 Reliability verification of cloud detection algorithm in Antarctic region on November 15, 2021. (a) True color picture of DPC;
(b) DPC/POSP detection results; (c) MODIS detection results

MODIS 影像的过境时间为 UTC 03:10:00, 成像时间相近, 云的位置和形状在短时间差内发生改变的可能性较小。同样, 从图 10(c) 中看出, MODIS 的云掩膜产品在目视效果中更加精细, 有小部分的孤立云, 有可能是因为分辨率的差异导致 DPC/POSP 的云检测产品的目视效果比较粗略。通过逐像元对比发现, 两个产品一致性约为 94.4%。其中 DPC/POSP 判识结果中, 有云结果占 9.0%, 晴空结果占 90.9%。MODIS 有云结果占 13%, 晴空结果占 86.9%, 验证了算法的可靠性。

4 结 论

本文针对高分五号 02 星偏振载荷 DPC 和 POSP 的数据特征, 提出了冰雪上空的云检测算法。该算法主要包括基于氧 A 带表观压强的云检测、DPC 多角度偏振信号检验、卷云波段检测、改进的 NDSI 检测。在氧 A 带表观压强的检测基础上, 增加多角度偏振信号云检验冰雪上空的水云, 提高了水云检测精度; 利用卷云波段检测提高了冰雪上空的卷云检测效果; 最后通过分析水云、冰云和冰雪在不同波段的反射特性, 对常用的 NDSI 归一化雪指数所用波段进行改进, 提高了冰雪上空中冰云的检测精度。

通过在不同月份多个区域采样进行大量统计分析, 确定了本文每种检测判据的最佳阈值。选取常年冰雪覆盖的格陵兰岛和南极区域对算法进行了验证。本文设计算法的云检测结果与 MODIS 的 MOD35 云产品的一致性分别为 83.3% 和 94.4%, 表明设计的算法能够较好地检测冰雪上空的云像元, 验证了本算法的有效性, 为高分五号 02 星冰雪地表区域的有效观测提供了可靠的云检测算法。

参 考 文 献

- [1] Rossow W B, Delo C, Cairns B. Implications of the observed mesoscale variations of clouds for the earth's radiation budget[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(6): 557-585.
- [2] Jones H G, Pomeroy J W, Walker D A, et al. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Rossow W B, Garder L C. Validation of ISCCP cloud detections [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(12): 2370-2393.
- [4] Frey R A, Ackerman S A, Liu Y H, 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.
- [5] Bréon F M, Colzy S. Cloud detection from the spaceborne POLDER instrument and validation against surface synoptic observations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(6): 777-785.
- [6] Buriez J C, Vanbaue C, Parol F, et al. Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2785-2813.
- [7] 陈震霆, 孙晓兵, 乔延利. PARASOL/POLDER3 卫星数据的海洋上空云检测[J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 996-1004.
Chen Z T, Sun X B, Qiao Y L. Cloud detection over ocean from PARASOL/POLDER3 satellite data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(6): 996-1004.
- [8] 李超. 基于 GF-5 DPC 数据的云参量反演研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2019.
Li C. Research on cloud parameter inversion based on GF-5 DPC data[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019.
- [9] 伟乐斯. 基于高分五号-DPC 数据的云识别算法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
Wei L S. Research on cloud identification algorithm based on high score No.5-DPC data[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020.
- [10] 杨洪春. 大气颗粒物监测仪在轨定标研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
Yang H C. On-orbit calibration of atmospheric particulate matter monitor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [11] 陈颖, 邱倩, 屈猛, 等. 基于 FY-3D MERSI-II 的北极冰雪环境下云检测方法研究[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(10): 10-

- 14, 4.
Chen Y, Qiu Q, Qu M, et al. Research on cloud detection method under Arctic ice environment based on FY-3D MERSI-II [J]. *Geospatial Information*, 2020, 18(10): 10-14, 4.
- [12] 陈良富, 尚华哲, 范萌, 等. 高分五号卫星大气参数探测综述 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(9): 1917-1931.
Chen L F, Shang H Z, Fan M, et al. Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1917-1931.
- [13] 王宇瑶, 麻金继, 李晴皓, 等. 云偏振遥感综述 [J]. *遥感学报*, 2022, 26(5): 852-872.
Wang Y Y, Ma J J, Li J H, et al. Review of cloud polarimetric remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(5): 852-872.
- [14] 李正强, 谢一淞, 石玉胜, 等. 大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述 [J]. *遥感学报*, 2022, 26(5): 795-816.
Li Z Q, Xie Y S, Shi Y S, et al. A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(5): 795-816.
- [15] 李朕阳, 刘振海, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验 [J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0312002.
Li Z Y, Liu Z H, Zou P, et al. Pre-launch calibration and ground verification test of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0312002.
- [16] 伟乐斯, 尚华哲, 胡斯勒图, 等. GF-5 DPC 数据的云检测方法研究 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2053-2066.
Wei L S, Shang H Z, Hu S, et al. Cloud detection algorithm based on GF-5 DPC data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(10): 2053-2066.
- [17] Piters A J M, Bramstedt K, Lambert J C, et al. Overview of SCIAMACHY validation: 2002-2004 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(1): 127-148.
- [18] 乔瑞, 伽丽丽, 许华, 等. 基于高分五号 DPC 氧气 A 吸收波段的云顶压强反演 [J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 256-268.
Qiao R, Qie L L, Xu H, et al. Inversion of cloud top pressure based on oxygen A absorption band of DPC with high score No.5 [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 256-268.
- [19] 王佳佳, 提汝芳, 刘晓, 等. 强对流云团偏振辐射特性分析 [J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0901003.
Wang J J, Ti R F, Liu X, et al. Analysis of polarization radiation characteristics of strong convective cloud clusters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0901003.
- [20] 李微, 方圣辉, 佃袁勇, 等. 基于光谱分析的 MODIS 云检测算法研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(5): 435-438, 443.
Li W, Fang S H, Dian Y Y, et al. Cloud detection in MODIS data based on spectrum analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 435-438, 443.
- [21] Gao B C, Goetz A F H, Wiscombe W J. Cirrus cloud detection from Airborne Imaging Spectrometer data using the 1.38 μm water vapor band [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(4): 301-304.
- [22] 郝晓华, 王建, 李弘毅. MODIS 雪盖制图中 NDSI 阈值的检验: 以祁连山中部山区为例 [J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 132-138.
Hao X H, Wang J, Li H Y. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS: a case study of snow in the middle Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 132-138.

Cloud detection algorithm over Ice-Snow Based on Polarization Sensor of Gaofen-5(02) Satellite

Fang Ying^{1,2}, Sun Xiaobing^{1,3*}, Ti Rufang¹, Huang Honglian^{1,3}, Liu Xiao^{1,3}, Wang Yuyao^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Hefei Chief Expert Studio of Agricultural Industry, Hefei 230012, Anhui, China

Abstract

Objective Satellite remote sensing characterizes fine surface information and is widely employed in military surveys, agriculture, human activity research, and other fields. Clouds cover about 60% of the sky on Earth and can block the imaging channels of optical satellites and reduce the number and quality of available pixels in images. As a special surface landform, ice-snow covers more than 40% of the northern hemisphere in winter. Both cloud and ice-snow will greatly affect the processing and analysis of remote sensing images. The spectral characteristics of clouds and ice-snow are similar in the visible light bands, which will result in unsatisfactory cloud detection over ice-snow, and misjudgment of clouds and ice-snow. In recent years, polarization detection technology has become a rapidly developing research field globally. Two polarization-loaded atmospheric aerosols directional polarized camera (DPC) and particulate observing scanning polarimeter (POSP) are carried on the hyperspectral observation satellite [Gaofen-5(02) satellite]. The "polarization crossfire" scheme of the two polarization loads has multi-angle and multi-spectrum observation capabilities with high-precision polarization and wide-swath imaging. Polar regions are covered by ice-snow all year round, and the reflectivity of clouds and ice-snow is high in the visible light bands, which makes it difficult to detect clouds in these regions. Therefore, it is of significance to conduct cloud detection research in typical regions such as polar regions based on the Gaofen-5(02) satellite data.

Methods We employ both DPC and POSP data to perform cloud detection. First, DPC multi-angle polarimetric observations are adopted for the apparent pressure detection in the oxygen A-band. Next, multi-angle polarimetric signal clouds are added to examine water clouds over ice-snow, improving the accuracy of water cloud detection. Then, the cirrus cloud detection over ice-snow is improved by the detection of cirrus cloud bands. Finally, by analyzing the reflection properties of water clouds, ice clouds, and ice-snow in different wavebands, the waveband for the commonly utilized NDSI normalized snow index is increased to improve the detection accuracy of ice clouds over ice-snow. The optimal threshold values for each detection criterion are determined through a large number of statistical analyses of multiple regions sampled in different months.

Result and Discussions To verify the effectiveness of the algorithm, we apply it to cloud detection over ice-snow. A total of two sample regions including the Greenland region and the Antarctic region are selected, and they are covered with ice-snow all year round. The DPC/POSP cloud detection results are in good agreement with the spatial distribution of cloud pixels from the MOD35 product [Figs. 9(b) and 9(c)]. The number of pixels is 17589. The pixel-by-pixel comparison shows that the consistency of the two products is approximately 83.3%. Among the DPC/POSP discrimination results, 26.6% are cloudy and 73.3% are clear sky, while 29.7% are MODIS cloudy and 70.2% are clear sky. This indicates that the employed DPC/POSP data are consistent with the MODIS cloud identification results when applied to cloud detection over ice-snow. In the Antarctic region [Figs. 10(b) and 10(c)] which is covered by both datasets, the DPC/POSP cloud detection results are more consistent with the spatial distribution of cloud pixels from the MOD35 product. The number of pixels is 395991. The pixel-by-pixel comparison shows that the consistency of the two products is about 94.4%. The DPC/POSP cloud detection results include 9% cloudy and 90.9% clear sky, while the MODIS cloud results contain 13% cloudy and 86.9% clear sky. 86% of the MOD35 cloud mask results are above clear sky to verify the algorithm reliability.

Conclusions We propose the algorithm of cloud detection over ice-snow based on the data characteristics of polarization loads DPC and POSP in the Gaofen-5(02) satellite. The algorithm mainly includes cloud-based cloud detection, DPC multi-angle polarization signal test, cirrus cloud band detection, and improved NDSI detection. Based on the strong detection of oxygen A-band, the multi-angle polarization signal cloud is increased to test the water cloud over ice-snow, with improved accuracy of water cloud detection. Cirrus cloud bands are employed to improve the cirrus cloud detection over ice-snow. Finally, by analyzing the reflection characteristics of water cloud, ice cloud, and ice-snow in different bands, the bands leveraged by the commonly leveraged NDSI normalized snow index are improved to increase the detection accuracy of ice clouds over ice-snow. A large number of statistical analysis of multiple samples in different months helps determine the best threshold for each test judgment of each test. Greenland and Antarctic regions covered with all year round of ice-snow are selected for the algorithm verification. The consistency between cloud detection results of the proposed design algorithm and MOD35 cloud products is 83.3% and 94.4%. This indicates that this algorithm can better detect the cloud pixel over ice-snow, verifying its effectiveness.

Key words cloud detection; ice-snow; remote sensing; multi angle; polarization detection