

强对流云团偏振辐射特性分析

王佳佳^{1,2,3}, 提汝芳^{1,3*}, 刘晓^{1,3,4}, 黄红莲^{1,3,4}, 孙晓兵^{1,3,4}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, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230036;³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;⁴合肥市农业行业首席专家工作室, 安徽 合肥 230031

摘要 强对流云团是气象领域重要的研究对象之一。利用大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)观测数据对强对流云团进行偏振辐射特性研究,为强对流云团识别提供多维信息。以强对流云团、台风云团和非降水云团为例,研究表明:强对流云团反射率高于非降水云团,且其反射率空间分布更均匀;在发展旺盛的强对流云团中大部分是冰晶粒子,只有边缘部分有液态水存在,而其他非降水云团的相态分布差异较大;在相近的照明和观测几何条件下,强对流云团偏振角空间分布的离散性大于非降水云团,且两者偏振角均值差异大;强对流云团的偏振角图像可以很好地表征其轮廓特征。

关键词 大气光学; 偏振探测仪数据; 强对流云团; 偏振角; 偏振辐射; 纹理特征

中图分类号 P407

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0901003

Analysis of Polarization Radiation Characteristics of Strong Convective Cloud Clusters

Wang Jiajia^{1,2,3}, Ti Rufang^{1,3*}, Liu Xiao^{1,3,4}, Huang Honglian^{1,3,4}, Sun Xiaobing^{1,3,4}¹Anhui 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 230036, Anhui, China;³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;⁴Hefei Chief Expert Studio of Agricultural Industry, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract The strong convective cloud cluster is one of the important research objects in the meteorology field. The polarization radiation characteristics of strong convective cloud clusters are studied by using the observation data of the atmospheric aerosol multi-angle directional polarimetric camera (DPC), which provides multi-dimensional information for the identification of strong convective cloud clusters. Taking strong convective cloud clusters, typhoon cloud clusters, and non-precipitation cloud clusters as examples, the research shows that the reflectivity of strong convective cloud clusters is higher than that of non-precipitation cloud clusters, and its spatial distribution is more uniform. Most part of the developing strong convective clusters are ice crystal particles, and only the edge part has liquid water, while the phase distributions in other non-precipitation clouds are quite different. Under similar illumination and observation geometry conditions, the dispersion of the polarization angle spatial distribution of the strong convective cloud clusters is larger than that of non-precipitation cloud clusters, and there is a large difference between the average of polarization angles. The polarization angle image of the strong convective cloud cluster can well characterize its contour characteristics.

Key words atmospheric optics; directional polarimetric camera data; strong convection cloud clusters; polarization

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2022-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0201400)、卫星应用共性关键技术项目(30-Y20A010-9007-17/18)

通信作者: *tirufang@aiofm.ac.cn

angle; polarized radiation; texture feature

1 引言

强对流天气发生频繁,严重影响着人们的出行、生产、生活和财产安全。因此,强对流云团的监测与研究一直是人们关注的重点。强对流云团的识别通常基于地基观测资料、探空资料和星载遥感数据。地基处地面雷达站点可以监控短时间临近的强对流天气,自动站可以自动监测气象数据。天气雷达探测的时空分辨率高,识别结果准确,利用地基站点数据可以很好地识别和预警短时临近的强降水天气。基于天气雷达、探空和自动站等观测资料对一次快速发展移动的强对流天气进行了研究^[1],重点分析了强对流云团的形成和发展过程,有利于对强对流天气进行识别和预警。然而,地基站点的覆盖范围较小,有些县乡没有地基站点,这会影响到对强对流云团的监测。需要利用探空飞机或探空气球等来获取探空资料,但是对气象条件、时间都有要求,并且花费大,故不适合监测发生速度快、气象条件恶劣的强对流云团。

目前,基于极轨卫星探测强对流云团的研究并不多,大多是分析强对流云团的物理特性。基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的多通道特征分析了云的反照率、云顶亮温、云相态、红外亮温比值和温湿场结构等与云降水强度的对应关系^[2],这对强对流云团的识别具有很好的指示作用。Fougnie 等^[3]利用深对流云稳定的月平均反射率来校准 POLDER (POLARization and Directionality of the Earth's Reflectances) 传感器光谱波段的稳定性。van Dienenhoven 等^[4]通过分析 MODIS 和 POLDER 组合反演的云光学厚度、冰晶有效半径、冰晶长宽比、冰晶体畸变参数和冰晶不对称参数等来研究澳大利亚海岸深对流云层顶部冰晶的变化,很好地表征了对流云物理特性的变化。此外,还可以通过云团的形状、大小和纹理结构等来识别强对流云团。Welch 等^[5]通过灰度共生矩阵基于 AVHRR 卫星图像进行了强对流云团的识别。郑益勤等^[6]综合光谱和纹理特征利用深度学习对强对流云团进行了识别。随着研究的深入,不仅要直观认识强对流云团,还要深入研究云团的物理特性。大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)在轨观测可以获得多角度偏振辐射数据,可用于分析强对流云团的相态分布和纹理特性,为强对流云团的监测和识

别提供了一种有效手段。

本文对 DPC 的偏振辐射数据进行了研究,不仅可以通过不同角度的偏振参数变化来分析强对流云团,还可以利用数据的偏振辐射特征来表征强对流云团的纹理和相态分布,对后续发射携带偏振载荷的卫星具有一定的指导意义。

2 DPC 仪器介绍

DPC 搭载在高分五号卫星上,于 2018 年 5 月发射升空,其主要功能和任务是获取大气多角度、多波段偏振辐射信息,开展大气气溶胶的光学和微物理特性,以及云的光学和微物理特性研究,为数值天气预报、全球气候变化监测和大气环境监测提供遥感数据支撑和保障。DPC 中将 14 bit 精度的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 大小的面阵 CCD 作为探测器,实现 100° 大视场成像,可两天覆盖全球范围。DPC 的波段范围为可见光到近红外,有 5 个非偏通道和 3 个偏振通道。偏振测量方法是通过旋转偏振片来获取被测目标的偏振特性的。在探测器光学系统前端,安装不同方向($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)的检偏片,以解析偏振辐射信息^[7]。DPC 具备宽视场观测能力,沿轨方向视场角(FOV)范围为 $-50^\circ \sim 50^\circ$,在卫星单轨运行期间,连续 N 次成像,可以获得同一个地面目标同一探测通道的多角度观测数据。主要技术参数如表 1 所示,其中标注 P 表示偏振测量波段。

表 1 DPC 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of DPC

Parameter	Description
Spectral band / nm	443, 490(P), 565, 670(P), 763, 765, 865(P), 910
Angle of polarization	$0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$
Polarization detection accuracy	Better than 2%
Spatial resolution nadir / (km × km)	3.29×3.29
FOV / ($^\circ$)	$-50 \sim 50$
Number of angles	≥ 9
Quantization accuracy / bit	14

3 研究方法和原理

强对流云团内部的温度比较低,冷气流下降,热气流上升,冷热气流相遇容易产生对流不稳定的现象。可利用不同亮温阈值识别强对流云团^[8-9]。强对流云团与其他云团相比具有云体厚、亮温低和云

边缘纹理光滑的特点。通过 DPC 多角度偏振辐射信息可以获得强对流云团的光谱和偏振特征,有利于对强对流云团进行识别。利用云的多角度偏振辐射特性对云团冰晶和液态水进行了识别,得到了强对流云团的相态分布。利用偏振角的空间分布规律可得到强对流云团的表面和边缘轮廓特征,进而可以对强对流云团进行识别。

3.1 云团的光谱特性

为描述云团对太阳光的反射特性,定义归一化光谱反射率 R 为

$$R = \frac{\pi L}{\mu_s E}, \quad (1)$$

式中: L 表示辐亮度; μ_s 表示太阳天顶角的余弦值; E 表示大气层顶的太阳辐照度。

用标准差 σ 来表征云团光谱反射率空间分布的离散程度,其表达式为

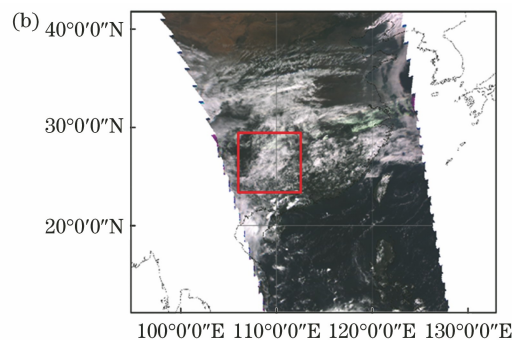
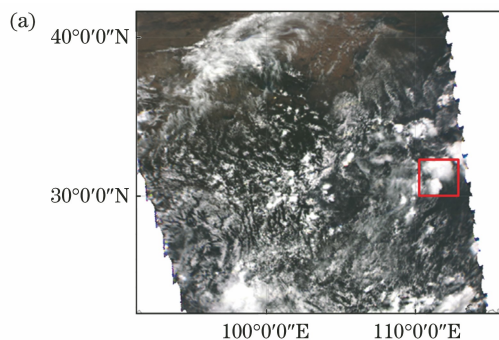


图 1 强对流云团和非降水云团的 RGB 图。(a)强对流云团; (b)非降水云团

Fig. 1 RGB images of strong convective cloud clusters and non-precipitation cloud clusters. (a) Strong convective cloud clusters; (b) non-precipitation cloud clusters

表 2 强对流云团和非降水云团反射率平均值随中心波长的变化

Table 2 Mean reflectances of strong convective cloud clusters and non-precipitation cloud clusters varying with central wavelengths

Central wavelength /nm	443	490	565	670	763	765	865	910
Mean reflectance of strong convective cloud clusters /%	64.11	63.85	60.47	60.78	56.59	63.44	65.22	60.56
Mean reflectance of non-precipitation cloud clusters /%	36.73	35.47	33.26	32.58	27.73	37.92	41.94	29.22

3.2 云团的偏振特性

强对流云团的相态分布对于云团的识别和预报具有重要意义。研究水云和冰云的单次散射特性发现,基于多角度偏振辐射信息可以区分出水云和冰云^[11]。水云具有“虹效应”,随散射角的变化,偏振反射率会出现峰值。冰晶粒子的偏振反射率随散射角的变化呈现递减的趋势。因此,通过分析云团的多角度偏振特性可以得到其相态空间分布。

从偏振遥感角度来说,云团的光学特性可以用斯托克斯参数(I 、 Q 、 U 、 V)来表示,其中 V 分量很小,通常可以忽略。云团的偏振反射率 R_p 可以表

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}, \quad (2)$$

式中: i 为序号; N 为像元个数; \bar{R} 为光谱反射率均值。

图 1 是 2018 年 7 月 26 日中国中部上空的强对流云团和 2018 年 5 月 28 日中国中东部上空的非降水云团,其中图 1(a)、(b)中的矩形框区域分别是强对流云团和非降水云团。表 2 是图 1 对应的强对流云团和非降水云团不同波段的反射率平均值。可以看出,在可见光波段云团反射率差异不大。云的反射率随云光学厚度的增大而增大^[10],而强对流云团的反射率平均值明显大于非降水云团,故强对流云团的厚度较大。从图 1 中可以看出,与非降水云团相比,强对流云团的表面纹理比较光滑。云团的空间分布特征也是后续识别强对流云团的重要特征。

示为

$$R_p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_s E}, \quad (3)$$

式中: Q 表示平行和垂直线偏振分量之差; U 表示 45° 和 135° 线偏振分量之差。

偏振角 χ 可以表征目标和背景的状态特性^[12],其表达式为

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (4)$$

散射几何关系示意图如图 2 所示。其中, θ_0 和 θ 分别是入射天顶角和出射天顶角, ϕ_0 和 ϕ 分别为

入射方位角和出射方位角, Θ 为散射角, $\mu_0 = \cos \theta_0$, $\mu = \cos \theta$, (μ_0, ϕ_0) 点与原点的连线为入射光线, (μ, ϕ) 点与原点的连线为出射光线, i_1 是入射主平面 OP_1Z 与散射平面 OP_1P_2 的夹角, i_2 是出射主平面 OP_2Z 与散射平面 OP_1P_2 的夹角。散射角 Θ 的定义为

$$\cos \Theta = \cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0 \cos(\phi - \phi_0). \quad (5)$$

通过实验发现, 在相近观测和照明条件下, 偏振角参数可以表征强对流云团的表面结构分布特征, 有利于对强对流云团进行识别。

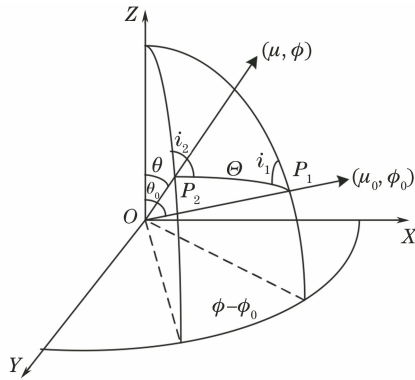


图 2 散射几何关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of scattering geometric relation

3.3 云团的纹理特性

强对流天气容易出现在槽线等天气系统下, 高空槽带来的干冷空气和低空输送的暖湿空气相遇, 容易形成上冷下热的不稳定层结。在这样的暖湿层结中, 暖湿空气遇到干冷空气或者特殊地形很容易形成强对流云团。发展旺盛的强对流云团云顶均匀光滑, 边缘轮廓较为清晰^[13]。基于多角度多通道的 DPC 数据可以获得强对流云团不同的光学特征, 是云团分类识别的重要依据。

4 数据处理与分析

基于 DPC 的多角度偏振辐射数据, 分析不同类型的云。首先, 通过历史数据确定不同天气下的云团类型, 并基于地面站点资料和静止卫星气象数据验证云团的类型。然后, 利用 DPC 数据分析实验区域上空云团的光谱辐射和偏振特性。对比分析发现, 强对流云团具有不同于其他云团的偏振辐射特征。在研究中, 对强对流云团、台风云团和非降水云团进行了逐一分析和横向比较。

根据卫星云顶亮温数据、雷达资料和地面降水资料等识别强对流云团。DPC 和 MODIS 下午星的

成像时间比较接近, 且 MODIS 具有多通道数据, 故可利用 MODIS 的云顶亮温数据辅助判断。通过资料分析可知, 2018 年 7 月 4 日和 26 日中国中东部区域发生了强对流天气。基于这两天 DPC 过境中国中东部区域得到的偏振辐射数据分析强对流云团的物理特性。

4.1 强对流云团的偏振特性

由于 2018 年 7 月 4 日 $30^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 区域内存在强对流云团, 故实验选取了该区域内的 DPC 数据来分析强对流云团的偏振特性。由 443, 565, 670 nm 波段合成的强对流云团 RGB 图如图 3(a) 所示, 云相态分布如图 3(b) 所示, 偏振反射率随散射角的变化如图 3(c) 所示。

由计算可知, 图 3 的强对流云团在 490 nm 处的反射率平均值为 0.82, 标准差值为 0.07, 其光谱反射率空间分布变化较小, 此时强对流云团的厚度较厚。由于强对流云团的亮温较低, 故通过多角度偏振反演的云相态产品可以分析云中的相态分布。从图 3(b) 中可以看出, 强对流云团中大部分为冰晶粒子, 只有云团边缘有少量液态水, 这与静止卫星探测到的亮温低的结果一致, 也说明强对流云团不仅温度低, 在水汽运动碰撞过程中云团中还会碰并生长出冰晶粒子。从图 3(c) 中可以看出, 强对流云团的偏振反射率随散射角的变化呈递减趋势, 和非降水云团的规律完全不同。因此, 可以根据上述特性来识别发展旺盛的强对流云团。

实验选取了 $112^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$, $29^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ 区域内的强对流云团进行分析。图 4(a) 是由 443, 565, 670 nm 波段合成的强对流云团的 RGB 图, 图 4(b) 是云相态分布图, 图 4(c) 是偏振角分布图, 图 4(b)、(c) 中矩形框区域为强对流云团区域。

由计算可知, 图 4 中强对流云团在 490 nm 处的反射率平均值为 0.59, 反射率空间分布的标准差为 0.05。从图 4(b) 中可以看出, 强对流云团中大部分为冰云, 只有云团边缘有少量液态水, 与图 3 中结果一致, 说明强对流云团中大部分是冰云。通过分析强对流云团的偏振特性, 发现强对流云团的偏振角可以清晰地表现强对流云团的轮廓。如图 4(c) 所示, 强对流云团边缘的偏振角在 30° 以上, 而晴空和非降水云团的偏振角在 0° 以下。同时, 可以看出, 强对流云团的边缘平滑, 纹理清晰。

4.2 台风云团的偏振特性

选取位于南北美洲交界, 大西洋上空的 $5^\circ\text{N} \sim 25^\circ\text{N}$, $115^\circ\text{W} \sim 98^\circ\text{W}$ 实验区域中的台风云团。由

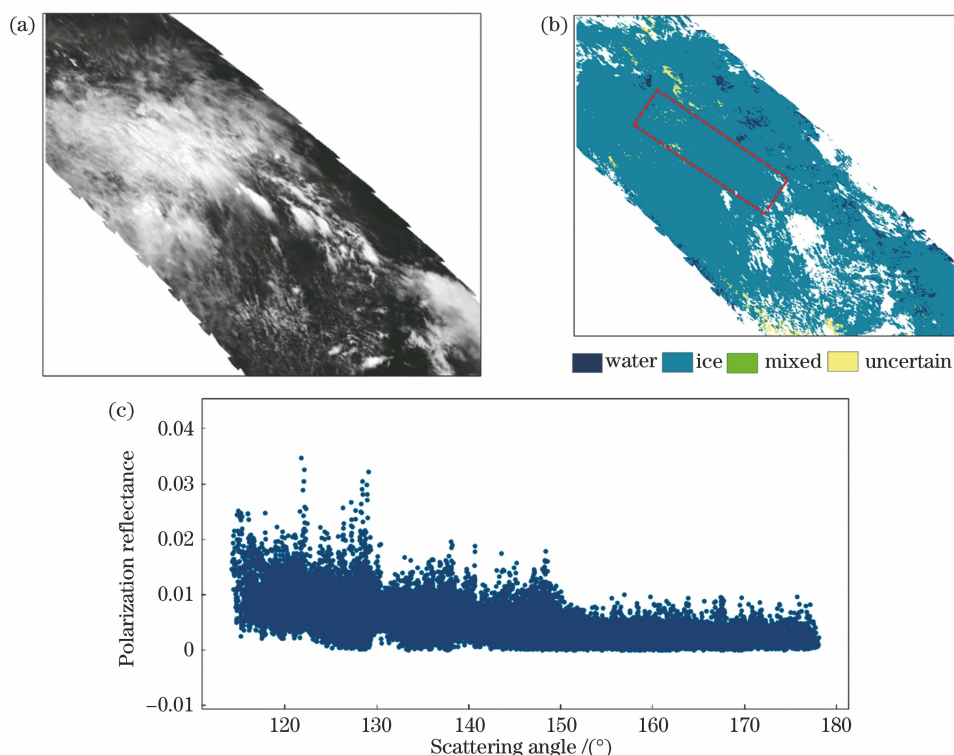


图 3 2018 年 7 月 4 日中国中东部上空的强对流云团。(a) RGB 图; (b) 云相态分布图; (c) 偏振反射率随散射角的变化
 Fig. 3 Strong convective cloud clusters over central and eastern China on July 4, 2018. (a) RGB image; (b) cloud phase distribution image; (c) polarization reflectance varying with scattering angle

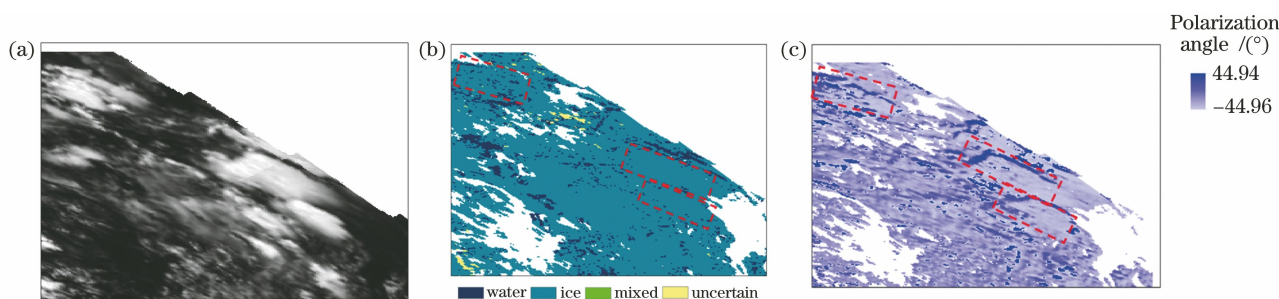


图 4 2018 年 7 月 26 日中国中东部的强对流云团。(a) RGB 图; (b) 云相态分布图; (c) 490 nm 波段的偏振角分布图
 Fig. 4 Strong convective cloud clusters over central and eastern China on July 26, 2018. (a) RGB image; (b) cloud phase distribution image; (c) polarization angle distribution image of 490 nm band

443, 565, 670 nm 波段合成的台风云团的 RGB 图如图 5(a) 所示, 由台风云团的偏振辐射特性得到的相态分布如图 5(b) 所示, 偏振角分布如图 5(c) 所示。

通过台风云团的光谱反射率计算可得到, 台风云团的光谱反射率较大, 平均光谱反射率为 0.79, 且反射率空间变化较小, 标准差为 0.04。从图 5(b) 中可以看出, 台风云团的冰晶占据大部分区域, 只有在边缘部分有少许液态水分布和不确定的混合云团, 说明台风云团不仅温度较低, 云团中还会形成冰晶粒子。从图 5(c) 中可以看出, 偏振角图像表征的台风云团特征明显, 台风眼区域具有区别于云团其

他区域的偏振角差异。通过偏振角参数的空间分布可以清晰地识别台风的纹理特征, 台风云团中气流的运动呈气旋式旋转, 气压升高, 运动剧烈。因此, 从纹理上可以辨别出这种特殊的云团。

4.3 非降水云团的偏振特性

实验选取中国中东部 30°N ~ 40°N, 105°E ~ 120°E 区域的非降水云团为研究对象。由 443, 565, 670 nm 波段合成的非降水云团的 RGB 图如图 6(a) 所示, 其相态分布如图 6(b) 所示, 偏振角分布如图 6(c) 所示。

由式(1)计算得到的非降水云团平均反射率为 0.35, 其反射率空间变化比较大, 标准差为 0.15。

图 6(b)所示的非降水云团云相态分布表明,云团中存在液态水和冰晶混合,其中液态水含量多于冰晶。图 6(c)是对图 6(b)中矩形框部分云团的偏振辐射特性的分析,其中液态水的偏振反射率随散射角的变化先增大后减少,冰晶粒子的偏振反射率随散射

角的变化呈现递减的趋势。从图 6(c)中可以看出,在散射角为 120°和 140°附近各有一个峰值,这是因为非降水云团区域中存在冰晶和液态水混合。此外,从图 6(c)中还可以看出,非降水云团中液态水的含量多于冰晶粒子。

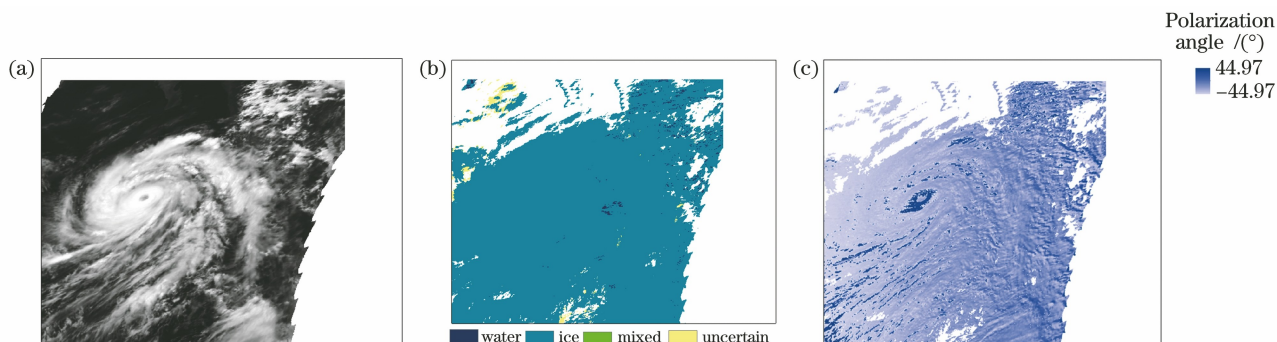


图 5 2018 年 6 月 11 日大西洋上空的台风云团。(a)RGB 图;(b)云相态分布图;(c) 490 nm 的偏振角分布图
Fig. 5 Typhoon cloud clusters over Atlantic on June 11, 2018. (a) RGB image; (b) cloud phase distribution image; (c) polarization angle distribution image of 490 nm band

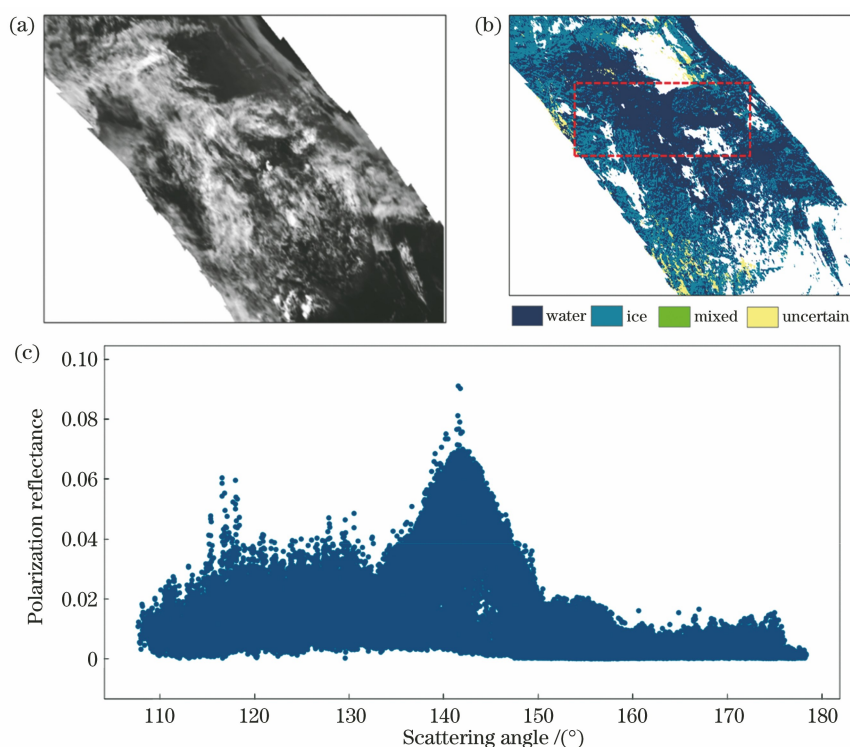


图 6 2018 年 5 月 28 日中国中东部上空的非降水云团。(a) RGB 图;(b)云相态分布图;(c)偏振反射率随散射角的变化
Fig. 6 Non-precipitation cloud clusters over central and eastern China on May 28, 2018. (a) RGB image; (b) cloud phase distribution image; (c) polarization reflectance varying with scattering angle

4.4 不同波段下的偏振特性

分析 4.1~4.3 节中三个云团个例的偏振辐射特性发现,强对流云团、台风云团和非降水云团的偏振辐射特性不同,特别是强对流云团和非降水云团的偏振角差异较大。以中国中东部地区上空 2018 年 5 月 28 日非降水云团和 2018 年 7 月 4 日强对流

云团的 DPC 多波段多角度偏振观测图像数据为例,分析了 490,670,865 nm 三个偏振探测波段的光照、观测条件和物理量随观测角度的变化情况,如图 7 所示。由图 7(a1)~(b3)可以看出,强对流云团和非降水云团在 490 nm 和 670 nm 两个波段的光照和观测条件相近,而 865 nm 波段的光照条件

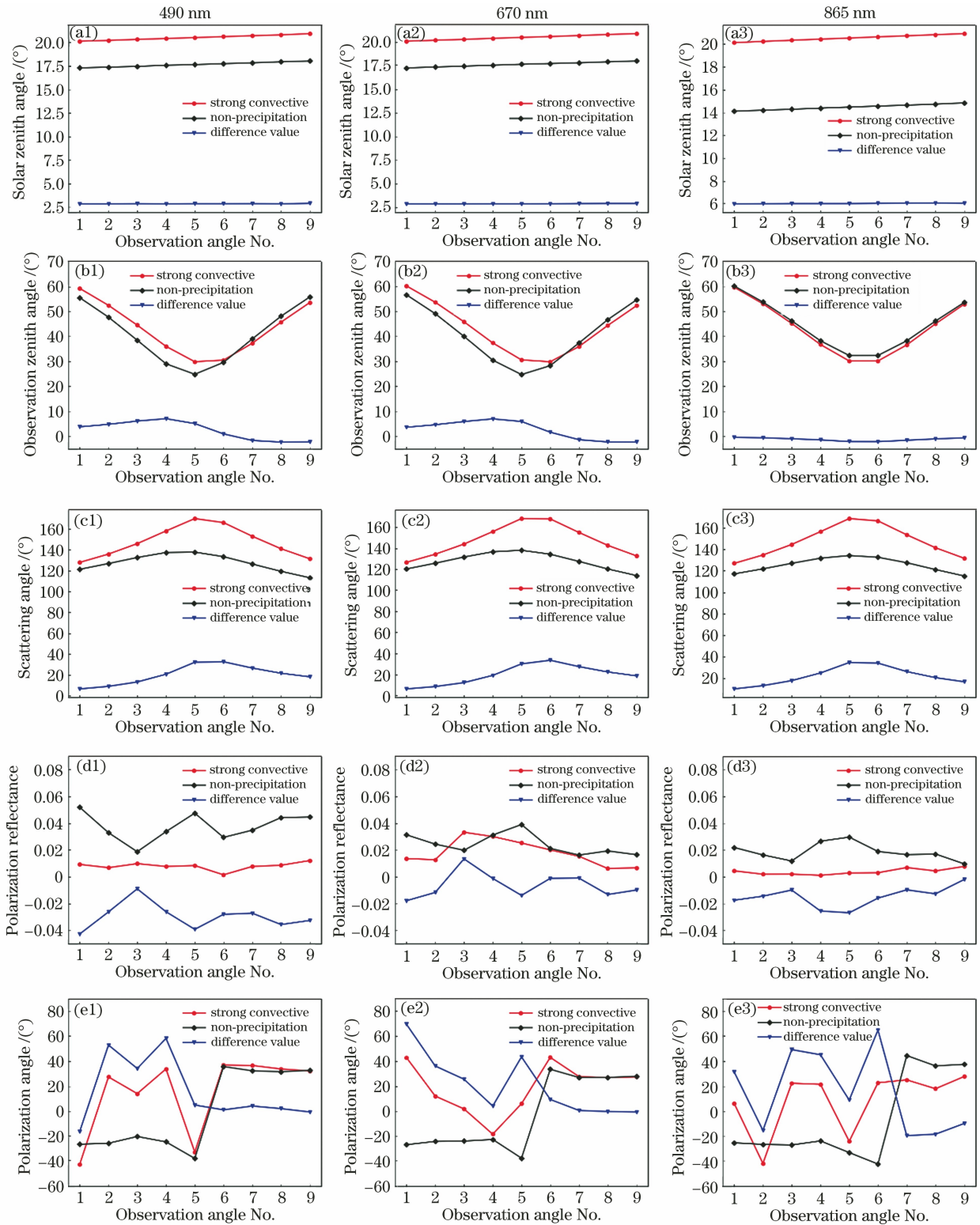


图 7 2018 年 7 月 4 日强对流云团,2018 年 5 月 28 日非降水云团和二者的差值在偏振波段的光照、观测条件和物理量随观测角度序号的变化情况。(a1)~(a3)太阳天顶角;(b1)~(b3)观测天顶角;(c1)~(c3)散射角;(d1)~(d3)偏振反射率;(e1)~(e3)偏振角

Fig. 7 Illumination, observation conditions and physical quantities of strong convective cloud clusters on July 4, 2018, non-precipitation cloud clusters on May 28, 2018 and difference value between them in polarization band varying with order of observation angle. (a1)~(a3) Solar zenith angle; (b1)~(b3) observation zenith angle; (c1)~(c3) scattering angle; (d1)~(d3) polarization reflectance; (e1)~(e3) polarization angle

相差较大。从图 7(c1)~(c3)可以看出散射角在 $100^{\circ}\sim 160^{\circ}$ 之间。从图 7(d1)~(d3)的偏振反射率图像中可以看出,490 nm 和 670 nm 波段的偏振反射率更强。比较图 7(e1)~(e3)可以看出,强对流云团和非降水云团的偏振角差值较大。

图 8(a)、(b)分别选取自 2018 年 5 月 28 日和 2018 年 7 月 4 日中国中东部上空的非降水云团和强对流云团,两者具有相近的观测和光照条件,统计图中矩形框标出区域中云团的偏振角标准差,可分析云团的纹理特征。

比较图 8 中非降水云团和强对流云团的偏振角空间分布特征,可以发现两者明显不同。如图 8(a)所示,统计非降水云团中偏振角的标准差为 7.45° ,

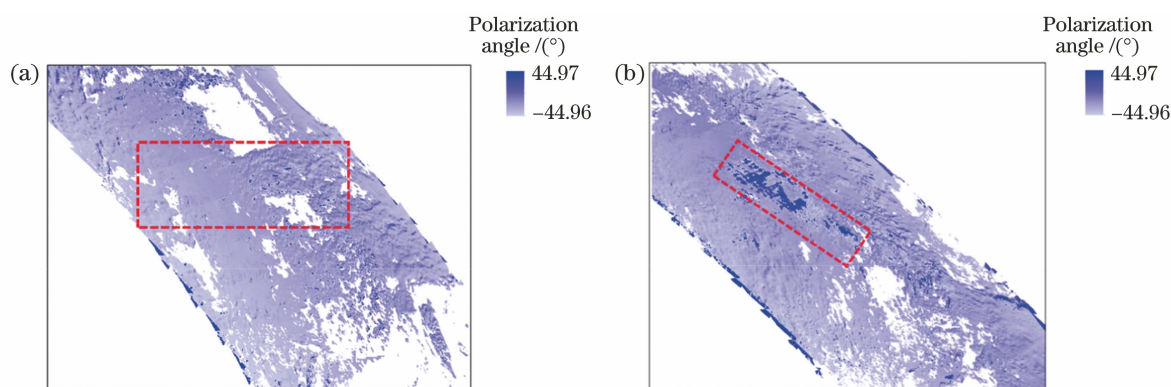


图 8 非降水云团和强对流云团的偏振角图像对比。(a) 2018 年 7 月 4 日非降水云团的偏振角图像;
(b) 2018 年 5 月 28 日强对流云团的偏振角图像

Fig. 8 Comparison of non-precipitation cloud cluster and strong convective cloud cluster images. (a) Polarization angle image of non-precipitation cloud clusters on July 4, 2018; (b) polarization angle image of strong convective cloud clusters on May 28, 2018

5 结 论

基于 DPC 在轨多角度偏振辐射观测数据,通过分析云团的反射率特征、云相态分布和偏振角空间分布信息,得出了强对流云团和台风云团区别于非降水云团的特征:强对流云团和台风云团的光谱反射率大于非降水云团,而反射率空间分布的标准差小于非降水云团,且反射率的空间分布差异比较小;强对流云团和台风云团的大部分区域是冰晶粒子,只有边缘部分有少量液态水,而非降水云团中冰水混合,云相态具有明显差异;偏振角的空间分布可以表征云团的纹理特征,在相近的光照和观测条件下,强对流云团偏振角空间分布的离散性较大,非降水云团偏振角离散性较小,两者相对差值在 10° 以上。

本研究表明,强对流云团的偏振信息与其他云团区别明显,利用偏振信息识别强对流云团有利于

图 8(b)所示的强对流云团的偏振角的标准差为 21.90° ,表明非降水云团偏振角的离散性较小。由图 3(b)所示的强对流云团的相态分布图可知,强对流云团中大部分是非球形的冰晶粒子,其表面微面元取向存在差异,进而会导致偏振角的空间分布离散性大。由图 6(b)可知,非降水云团中球形的液态水含量多,其表面统计特性均匀,故偏振角空间分布一致性较好。比较选定区域的强对流云团和非降水云团偏振角特性发现,两者的偏振角均值的相对差值在 10° 以上。根据上述特性,可以明显地区分强对流云团和非降水云团,为强对流云团的识别提供了有利的依据。

对其进行识别和预警,为星载偏振探测载荷在气象方面的应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 陈小婷, 赵强, 刘瑞芳, 等. 关中一次阵风锋触发的强对流天气分析[J]. 陕西气象, 2019(5): 6-11.
Chen X T, Zhao Q, Liu R F, et al. Synoptic analysis of a severe convection triggered by a gust front in Guanzhong region [J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2019(5): 6-11.
- [2] 何彬方, 黄勇, 冯妍, 等. 基于 MODIS 资料的强对流云团通道特征分析[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(3): 203-211.
He B F, Huang Y, Feng Y, et al. Analysis of channel characteristics of strong convective cloud based on MODIS data [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 203-211.
- [3] Fougnie B, Bach R. Monitoring of radiometric sensitivity changes of space sensors using deep

- convective clouds: operational application to PARASOL [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 851-861.
- [4] van Dierenhoven B, Fridlind A M, Cairns B, et al. Variation of ice crystal size, shape, and asymmetry parameter in tops of tropical deep convective clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(20): 11809-11825.
- [5] Welch R M, Sengupta S K, Goroch A K, et al. Polar cloud and surface classification using AVHRR imagery: an intercomparison of methods [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(5): 405-420.
- [6] 郑益勤, 杨晓峰, 李紫薇. 深度学习模型识别静止卫星图像海上强对流云团 [J]. *遥感学报*, 2020, 24(1): 97-106.
- Zheng Y Q, Yang X F, Li Z W. Detection of severe convective cloud over sea surface from geostationary meteorological satellite images based on deep learning [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(1): 97-106.
- [7] 涂碧海, 姚萍萍, 李树, 等. 基于云偏振的偏振成像仪参量检验方法 [J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 0512003.
- Tu B H, Yao P P, Li S, et al. Polarization parameter validation of directional polarimetric camera based on cloud polarization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0512003.
- [8] Fu R, del Genio A D, Rossow W B. Behavior of deep convective clouds in the tropical Pacific deduced from ISCCP radiances [J]. *Journal of Climate*, 1990, 3(10): 1129-1152.
- [9] Vila D A, Machado L A T, Laurent H, et al. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation [J]. *Weather and Forecasting*, 2008, 23(2): 233-245.
- [10] 李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.
- Li S, Sun X B, Ti R F, et al. Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.
- [11] 程天海, 陈良富, 顾行发, 等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1849-1855.
- Cheng T H, Chen L F, Gu X F, et al. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1849-1855.
- [12] 孙晓兵, 洪津, 乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2): 256-260.
- Sun X B, Hong J, Qiao Y L. The study of method for feature extraction based on angle of polarization parameter image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 256-260.
- [13] 朱莉莉. 基于卫星云图的强对流云团监测及预警研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Zhu L L. Monitoring and forecasting strong convective cloud based on satellite image [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.