

西北太平洋上一个爆发性气旋的云系特征分析

凡 曦¹, 吴丹尧¹, 赵雅楠¹, 邓云馨¹, 傅 刚^{1,2*}

¹中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系, 山东 青岛

²中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2023年10月2日; 录用日期: 2023年11月1日; 发布日期: 2023年11月9日

摘 要

本文利用CloudSat卫星数据处理中心(CloudSat Data Processing Center, CloudSat DPC)提供的CloudSat卫星资料、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5再分析资料、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的Aqua卫星可见光云图, 对2019年2月28日至3月5日发生在西北太平洋上一个爆发性气旋(EC)四个阶段云系的宏观形态和微物理学特征进行了分析。结果表明, 自EC的发生至消亡阶段, 云的宏观形态先从不规则形状发展成紧凑的螺旋状, 随后云系面积逐渐扩大直至消散。EC在不同阶段云的微物理学特性的水平分布特征较为一致, 但其他方面却存在较大差异。在气旋成熟阶段, 在其中心北部云的冰水路径和雪水路径有一个大值中心, 与“暖核”位置相对应, 但液态水路径无大值中心, 云的雨水路径的大值则主要分布于气旋南部和东部。EC在不同阶段, 云的微物理学特性垂直分布有如下特征: 云的冰水含量分布呈“三层模型”分布, 但云的其他微物理量随高度增加逐渐减小。总体而言, EC在不同阶段的云系呈现“零散”至“规则”再到“零散”的分布特征。

关键词

西北太平洋, 爆发性气旋, 生命阶段, 云的形态, 云的微物理特性

Characteristics of Clouds Associated with an Explosive Cyclone over the Northwestern Pacific Ocean

Xi Fan¹, Danyao Wu¹, Ya'nán Zhao¹, Yunxin Deng¹, Gang Fu^{1,2*}

¹Department of Marine Meteorology, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Physics and Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong

*通讯作者。

文章引用: 凡曦, 吴丹尧, 赵雅楠, 邓云馨, 傅刚. 西北太平洋上一个爆发性气旋的云系特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(6): 1089-1106. DOI: 10.12677/ccrl.2023.126113

Abstract

This paper investigates the characteristics of clouds associated with an explosive cyclone (EC) which occurred over the Northwestern Pacific from 28 February to 5 March 2019, by using the CloudSat satellite data obtained from the CloudSat Data Processing Center (CloudSat DPC), ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and Aqua satellite visible imagery provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). The macro-features and microphysical characteristics of the clouds associated with this EC were documented. It was shown that the outer macro-shapes of the clouds developed from irregular shape to compacted spiral-shape, and the cloud area expanded gradually until the EC dissipated. The horizontal distribution of microphysical characteristics of clouds associated with the EC at different stages was consistent, but there existed significant differences in other aspects. At the mature stage of EC, there were large value centers for cloud ice water path and snow water path in the north of EC, respectively, corresponding to the “warm core” position, but there was no large value center for cloud liquid water path. The large cloud rain water path was mainly located in the south and east of the EC. At different stages of EC, the vertical distribution of microphysical characteristics of cloud presented the following characteristics: the distribution of cloud ice water content displayed a “three-layer-model” pattern. But, the other cloud microphysical properties gradually decreased with the height increasing. In general, the cloud patterns associated with EC at various stages exhibited different distributions from “scattered-shape” to “regular-shape”, and then to “scattered-shape”.

Keywords

Northwestern Pacific, Explosive Cyclone, Life Stage, Cloud Pattern, Microphysical Properties of Clouds

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 Sanders and Gyakum [1]提出“爆发性气旋”(Explosive Cyclone)概念以来,很多学者对爆发性气旋开展了诊断分析和数值模拟研究,或对爆发性气旋的发生源地、移动路径、强度、生命周期等特征进行统计分析,但针对爆发性气旋云系特征的研究相对较少。云是爆发性气旋的重要外观表现,研究爆发性气旋云系特征对于探究其快速发展的物理机制具有重要意义。目前可查询到的最早研究爆发性气旋云系特征的学者是 Weldon [2],他在 20 世纪 70 年代指出,卫星云图上斜压叶状云系是气旋快速加深的征兆。常美桂和王衍明[3]在 Weldon [2]研究的基础上,把爆发性气旋快速发展过程中的云系分成四类:南北逗点云系迭加类、气旋锢囚发展类、斜压叶状云系类和东西云系迭加类。但由于受当时条件的限制,学者们对爆发性气旋云系的认识大多来自于较粗分辨率的卫星云图。

随着卫星观测技术的进步,越来越多先进的气象卫星投入使用,学者们不仅能够对爆发性气旋云系的宏观特征有更加清晰的认识,还可利用卫星提供的高时空分辨率观测数据对云系内部结构进行深入研究,如 CloudSat 卫星上搭载的云廓线雷达(Cloud Profile Radar)可提供全球范围内各种天气系统的云系的

垂直结构,为研究云系内部结构提供了崭新的视角。鄢坤等[4]利用 CloudSat 卫星产品对北大西洋上春、夏、秋、冬四个不同季节的爆发性气旋个例的云微物理属性的垂直结构进行了分析。彭永茂等[5]也利用了 CloudSat 卫星产品等资料,对冬季和夏季发生在大西洋上两个爆发性气旋个例的云微物理学参量的垂直分布特征进行了分析。需要指出的是,上述研究的爆发性气旋都发生在大西洋上,针对太平洋上爆发性气旋的相关研究仍然较少。Lim and Simmonds [6]指出,西北太平洋是全球爆发性气旋最频发的海域之一,也是我国的紧邻海域,研究该海域上空爆发性气旋云系特征具有重要的科学和实践意义。

本文针对 2019 年 2 月 28 日至 3 月 5 日发生在西北太平洋上一个爆发性气旋个例(以下简称 EC)不同生命阶段的云系特征进行分析。在 Sanders and Gyakum [1]、Fu *et al.* [7]给出的爆发性气旋定义中,海平面中心气压加深率是判别爆发性气旋的重要依据。先根据 EC 海平面中心气压加深率随时间变化特征,把该气旋的生命周期分成四个阶段,即:初始加深率上升至 1 Bergeron (1 Bergeron = 1 hPa/h, 以下统一用 Bergeron 作为气压加深率的单位)定义为爆发性气旋的初始阶段;加深率在 1 Bergeron 以上的阶段定义为爆发性发展阶段;将加深率由 1 Bergeron 降到零的阶段定义为成熟阶段;最后将中心气压加深率降至零以下(即中心气压上升)的阶段定义为消亡阶段。划分好四个阶段后,利用 Aqua 卫星云图对该个例不同阶段的云系的宏观特征进行分析,随后利用高时空分辨率的 ERA5 再分析数据(第五代 ECMWF 大气再分析全球气候数据)以及 CloudSat 卫星数据对该气旋在不同生命阶段所伴随的云系微观特征进行研究。分析的物理量有:云的冰水路径(单位: kg/m²)、云的液态水路径(单位: kg/m²)、云的雨水路径(单位: kg/m²)、云的雪水路径(单位: kg/m²)、云的冰水含量(单位: mg/m³)、云的冰粒子数浓度(单位: number/L)、云的冰粒子有效半径(单位: μm)、云的液态水含量(单位: mg/m³)。其中各物理量的路径是指各物理量自海平面至 100 hPa 进行垂直质量积分后的结果(如,云的冰水路径是指对云的冰水含量从海平面至 100 hPa 进行垂直质量积分后的结果)。

本文中爆发性气旋海平面中心气压加深率的计算公式如下:

$$R = \left(\frac{P_{t-6} - P_{t+6}}{12} \right) \left[\frac{\sin 45^\circ}{\sin \frac{\varphi_{t-6} - \varphi_{t+6}}{2}} \right] \quad (1)$$

公式(1)采用了 Yoshida and Asuma [8]使用的 6 小时时间间隔,以及 Gyakum *et al.* [9]使用的 45°N 为地转调整纬度。

2. 数据和资料

2.1. ERA5 客观再分析数据

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称 ECMWF)提供的 ERA5 客观再分析数据(空间分辨率为 0.25° × 0.25°, 时间间隔为 1 小时),本文使用的物理量有海平面气压、气温、相对湿度、云的冰水含量、云的液态水含量、云的雨水含量和云的雪水含量等物理量。

2.2. MODIS 可见光卫星云图

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA)提供的搭载于 Aqua 卫星上的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)可见光卫星云图,空间分辨率为 0.25 km × 0.25 km。

2.3. CloudSat 卫星处理数据

本文还使用了 CloudSat 卫星数据处理中心提供的 2B-CLDCLASS、2B-GEOPROF、2B-CWC-RO、

ECMWF-AUX 等产品, 其中包含云的类型、云的雷达反射率、云的冰水含量、云的冰粒子数浓度、云的冰粒子有效半径、云的液态水含量、温度和比湿等物理量, 这些是本文主要分析的云的微物理学参量。

3. EC 个例分析

为深入分析西北太平洋上爆发性气旋的云系特征, 我们选取了 2019 年 2 月 28 日生成于(35°N, 131°E)附近的爆发性气旋个例 EC, 该气旋的四个生命阶段数据均被 CloudSat 卫星扫描到了。

3.1. 天气学背景分析

如图 1 所示, EC 于 2019 年 2 月 28 日 00 UTC 在日本四国岛南部海域(134.25°E, 32°N)附近生成, 此处为日本暖流南支流经地区, 海水温度较高, 有利于气旋的生成。此后 EC 向东北方向移动, 于 2 月 28 日 17 UTC 进入爆发性发展阶段, 其海平面中心气压加深率大于 1 Bergeron (图 2)。3 月 1 日 04 UTC, EC 的海平面中心气压加深率达到最大值 1.85 Bergeron, 此时 EC 已移动至寒流流经地区, 此后 EC 继续向东北方向移动。EC 持续北移, 所经洋面海水温度较低, 虽然 EC 中心气压加深率有所减小, 但中心气压依旧为下降趋势, 并于 3 月 2 日 18 UTC 达到最低值 956.6 hPa。随后气旋中心气压加深率逐渐转向负值, 表明 EC 中心气压开始上升, 气旋进入消亡阶段。在消亡阶段, EC 移动方向逐渐由东北方向转为北向, 并在(172°E, 56.25°N)附近转为向西北方向移动, 最后于 3 月 5 日 03 UTC 在勘察加半岛东北部(169°E, 62.5°N)附近消亡。通过分析 EC 的海平面中心气压加深率曲线可知, EC 在 3 月 1 日 04 UTC 其中心气压加深率达到最大值 1.85 Bergeron。在 Zhang *et al.* [10]给出的爆发性气旋分类中, 该气旋个例属于“超强气旋”(1.70~2.29 Bergeron)种类。

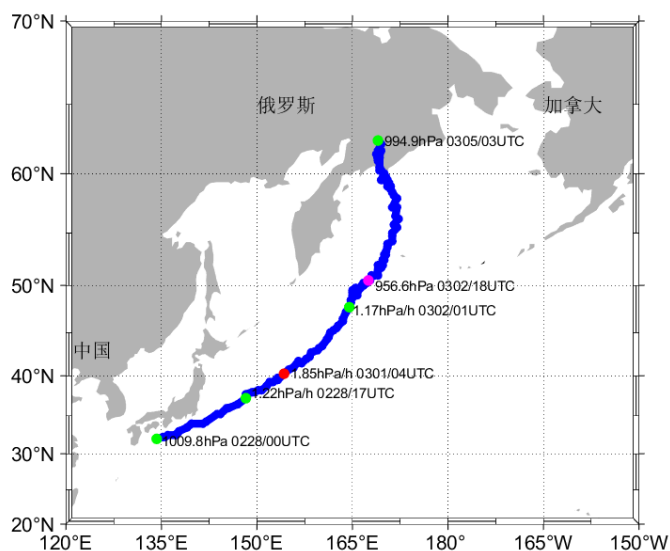


Figure 1. The moving track of explosive cyclone EC from 00 UTC 28 February to 03 UTC 05 March 2019 (determined by ERA5 mean sea level pressure data)

图 1. 2019 年 2 月 28 日 00 UTC 至 3 月 5 日 03 UTC 爆发性气旋 EC 的移动路径(由 ERA5 平均海平面气压场确定)

结合 2019 年 2 月 28 日至 3 月 5 日的 Aqua 卫星云图(图 3), 气旋 EC 在四个阶段的云系特征如下:

- I. 初始阶段(2019 年 2 月 28 日 00 UTC 至 2 月 28 日 16 UTC)。日本以南沿海区域有大片云团, 结构不规则, 轮廓模糊, 尚未出现“螺旋”状结构, 此时气旋中心偏西方向, 云团呈西南 - 东北向(图 3(a))。
- II. 发展阶段(2019 年 2 月 28 日 17 UTC 至 3 月 2 日 00 UTC)。该阶段云团进一步向东北方向移动,

随着气旋的发展，云团结构更加紧密，轮廓逐渐清晰，演变成“逗点”状结构，气旋的“眼”状结构逐渐明显(图 3(b))。

III. 成熟阶段(2019 年 3 月 2 日 01 UTC 至 3 月 2 日 22 UTC)。随着气旋快速发展，气旋继续向东北方向移动，云团由“逗点”状逐渐演变为“螺旋”状，云系发展旺盛，“眼”状结构有所扩大，有云区与无云区边界清晰(图 3(c))。

IV. 消亡阶段(2019 年 3 月 2 日 23 UTC 至 3 月 5 日 03 UTC)。与气旋伴随的云团继续向东北方向移动，云团面积继续扩大，且“眼”状结构也继续扩大，眼区云团逐渐稀疏，旋转强度逐渐减弱，尾部逐渐呈南北走向的长条型、松散状云带掠过太平洋中部，气旋趋于衰亡(图 3(d))。

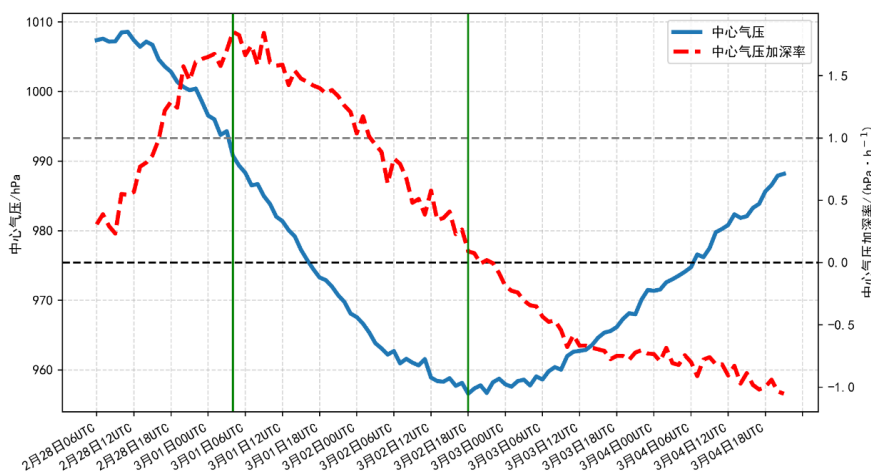
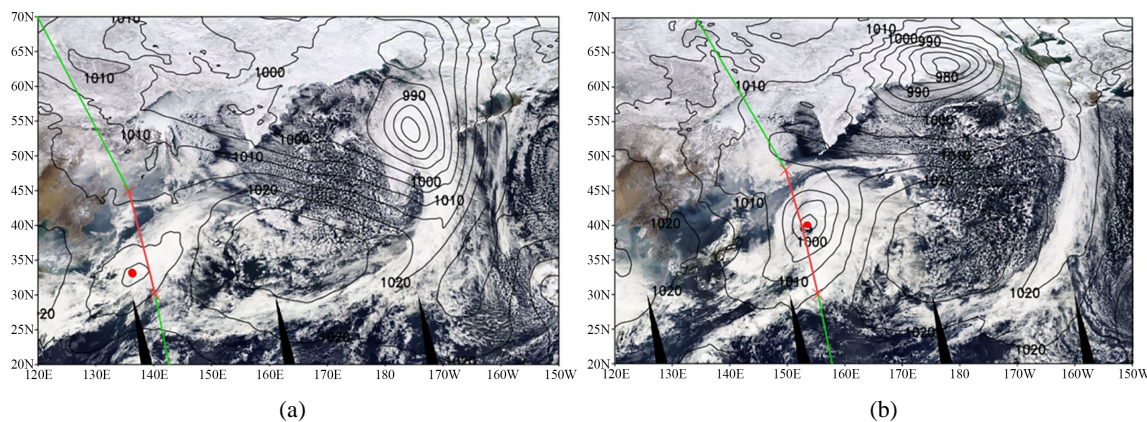


Figure 2. Time series of central sea level pressure (solid blue line, unit: hPa) and its deepening rate (dashed red line, unit: hPa/h) of explosive cyclone EC (the solid green lines denote the time of the maximum deepening rate and the minimum central sea level pressure)

图 2. 爆发性气旋 EC 的中心气压(蓝色实线, 单位: hPa)及中心气压加深率(红色虚线, 单位: hPa/h)随时间变化曲线(绿色实线分别为海平面中心气压加深率达到最大值和中心气压达到最小值的时刻)

查看卫星云图发现 CloudSat 卫星有四个时刻经过 EC 气旋中心附近约 700 km 范围内：2019 年 2 月 28 日 04 UTC、2019 年 3 月 1 日 03 UTC、2019 年 3 月 2 日 02 UTC 和 2019 年 3 月 4 日 01 UTC。结合 EC 的海平面中心气压加深率变化曲线可以判断，这四个时刻又正好分别对应 EC 生命期的初始、爆发性发展、成熟以及消亡阶段。利用 CloudSat 卫星记录的资料以及相关的 ERA5 再分析数据，我们可以对对比分析 EC 四个阶段的云微物理量的分布特征。



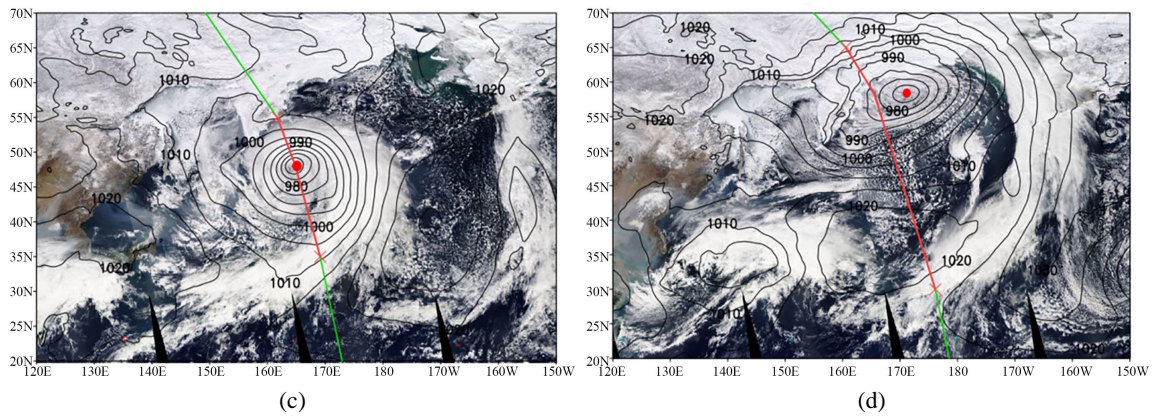


Figure 3. Sea level pressure (black solid contours, interval: 10 hPa) when CloudSat passed over EC and the moving track of satellite CloudSat (red and green lines). The red dot represents the EC center while two red “x” marks represent the start and the end positions of the selected analysis path. (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 3. CloudSat 卫星经过 EC 时的海平面气压场(黑色实线, 间隔 10 hPa)以及 CloudSat 卫星轨道(红、绿色实线), 红色实心原点为气旋中心, 红色 “x” 分别表示拟分析轨道的起点和终点。(a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

根据 Simmonds *et al.* [11] 的研究, 锋面是温带气旋产生的关键性因素, 与其云系的产生和发展更是联系紧密。因此分析爆发性气旋的锋面有助于分析云的微物理量分布状况。

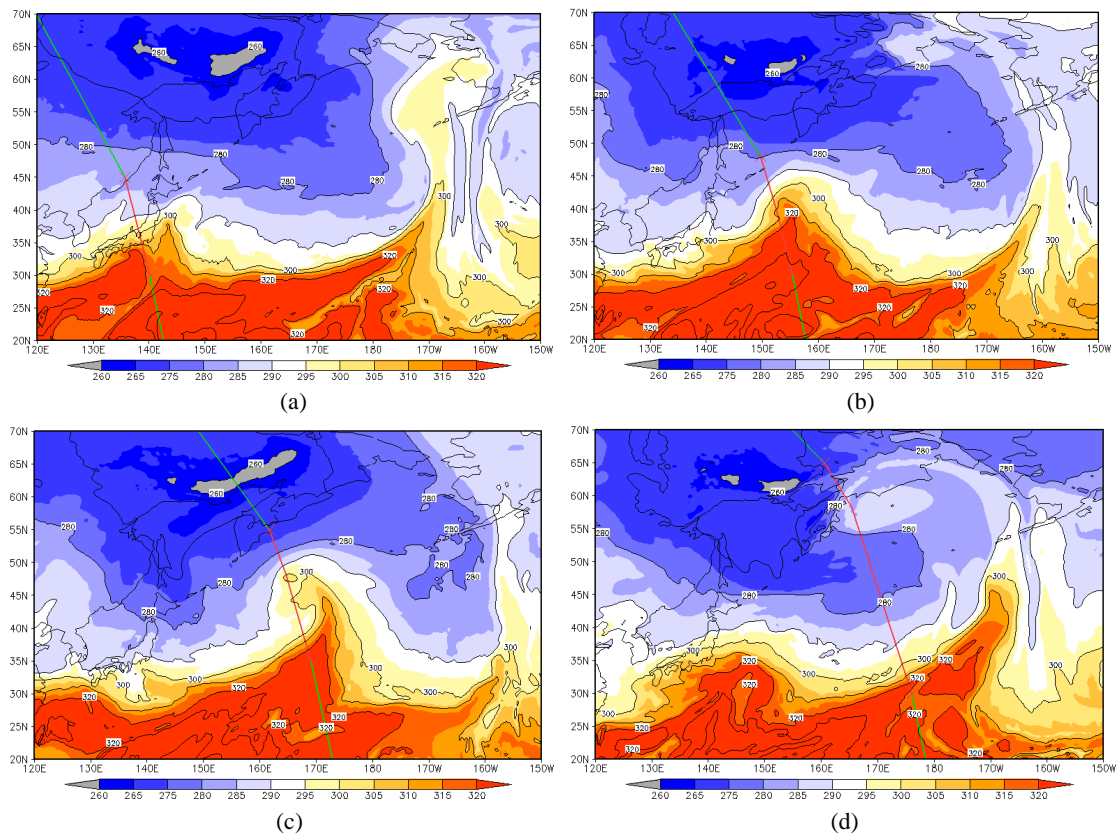


Figure 4. Pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa (shaded, 5 K interval) when CloudSat passed over EC and the moving track of satellite CloudSat. (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 4. CloudSat 卫星经过 EC 时的轨道及 850 hPa 等压面上假相当位温水平分布(填色, 间隔 5 K)。(a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

图 4 为 CloudSat 卫星经过 EC 时(图 4(a)~图 4(d)分别对应 EC 生命期的四个阶段,下同) 850 hPa 等压面上的假相当位温分布情况,由此可知 EC 四个阶段锋面发展的大致情况。EC 的锋区在初始阶段时没有明显特征(图 4(a));在爆发性发展阶段(图 4(b)),卫星轨道西侧的冷锋锋区逐渐向东侧的暖锋锋区移近,且两锋区近乎垂直;而在成熟阶段(图 4(c)),暖锋锋区明显向气旋中心的后方弯曲,形成了 Shapiro and Keyser [12]提出的“T”型锋面结构。熊秋芬等[13]指出,这种弯曲导致冷、暖空气同时向气旋中心卷入,使气旋中心形成暖核和狭窄的干冷缝。在消亡阶段(图 4(d)),锋区范围明显缩小,气旋中心附近已无明显锋区。

3.2. 云的微物理学特征分析

3.2.1. 水平分布特征

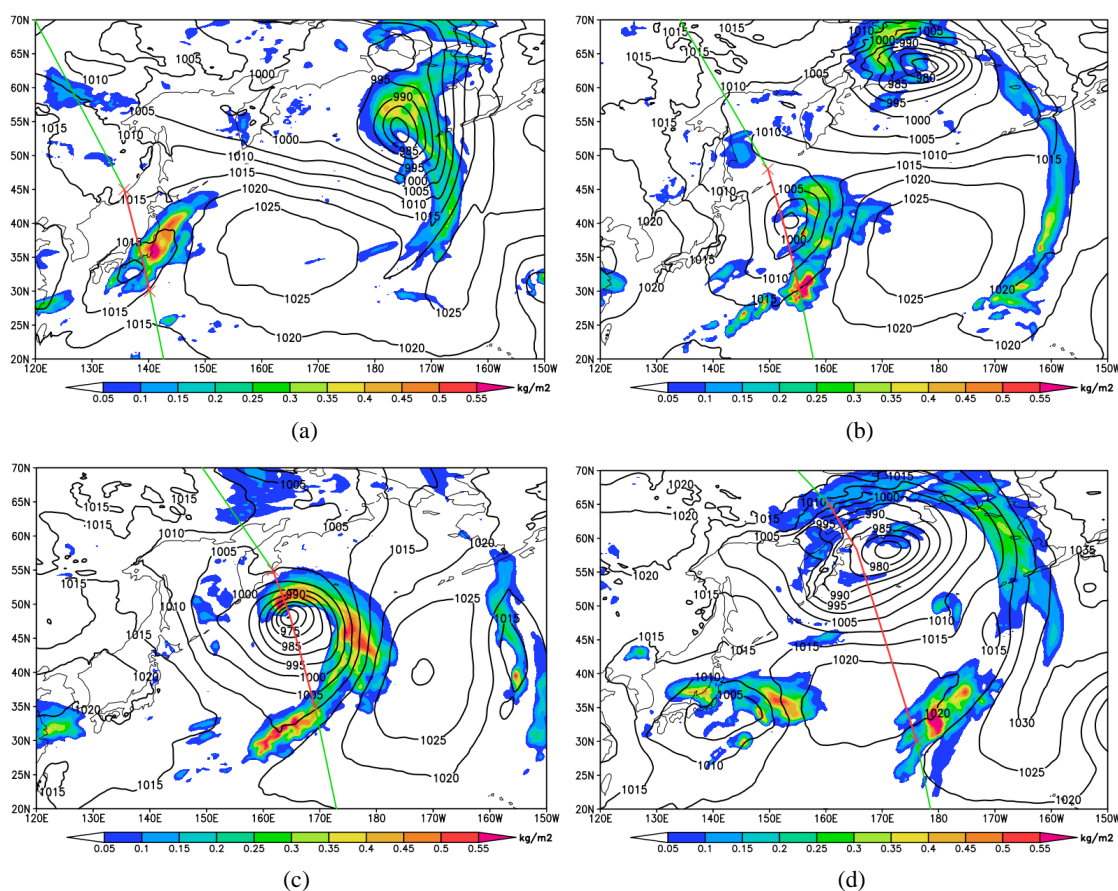


Figure 5. Cloud ice water path (shaded, 0.05 kg/m^2 interval). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019
图 5. 云的冰水路径水平分布(填色, 间隔 0.05 kg/m^2)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

EC 四个阶段云的冰水路径如图 5 所示,其中空白区域为云的冰水路径低值区($0\sim 0.05 \text{ kg/m}^2$)。由图可以看到,EC 在初始阶段时(图 5(a)),已有了较大的云的冰水路径,且其水平分布形态也与相应阶段云系的形态特征相符。由此可见,云的冰水路径变化与气旋云系的发展较为同步,有密切联系。

在 EC 初始阶段,卫星轨道东北侧有大范围云的冰水路径大值区,猜测可能与其下垫面为黑潮暖流有关,黑潮较高的温度会使洋面产生大量水蒸气,再加上气旋内锋面的发展,空气有较强的上升运动,在诸多因素的配合下,EC 显示出较大的云的冰水路径分布。

随着 EC 不断发展,在爆发性发展阶段(图 5(b)),在冷锋锋区一侧云的冰水路径出现了大值区,而在气旋的暖锋锋区一侧,则表现出分布范围较大的特点,但其云的冰水路径总体没有冷锋锋区一侧高。

在 EC 成熟阶段(图 5(c)),云的冰水路径的分布形态与此时的气旋的云团均为螺旋状。自螺旋尾部起至螺旋中心,云的冰水路径的分布呈现出“大值区 - 小值区 - 大值区 - 小值区 - 大值区”的情形,这种分布与三层双夹心饼干的形态相似。

在 EC 消亡阶段(图 5(d)),可以看到螺旋尾部的云的冰水路径与主体发生整块断裂(记为“断裂区”,下同),原来的螺旋带呈现形似字母“T”型分布,与 Shapiro-Keyser 的气旋模型[12]中的“T”型结构对应。故我们认为云的冰水路径可能为判断气旋锋面结构提供新思路。断裂区相对于螺旋带其他区域仍保持着较大的云的冰水路径,而螺旋中心附近的云的冰水路径则开始破碎。除了断裂区外,气旋内其他区域的云的冰水路径的数值都有不同幅度的降低。

云的雪水路径分布情况如图 6(a)~图 6(d)所示,与云的冰水路径分布相似,不再赘述。

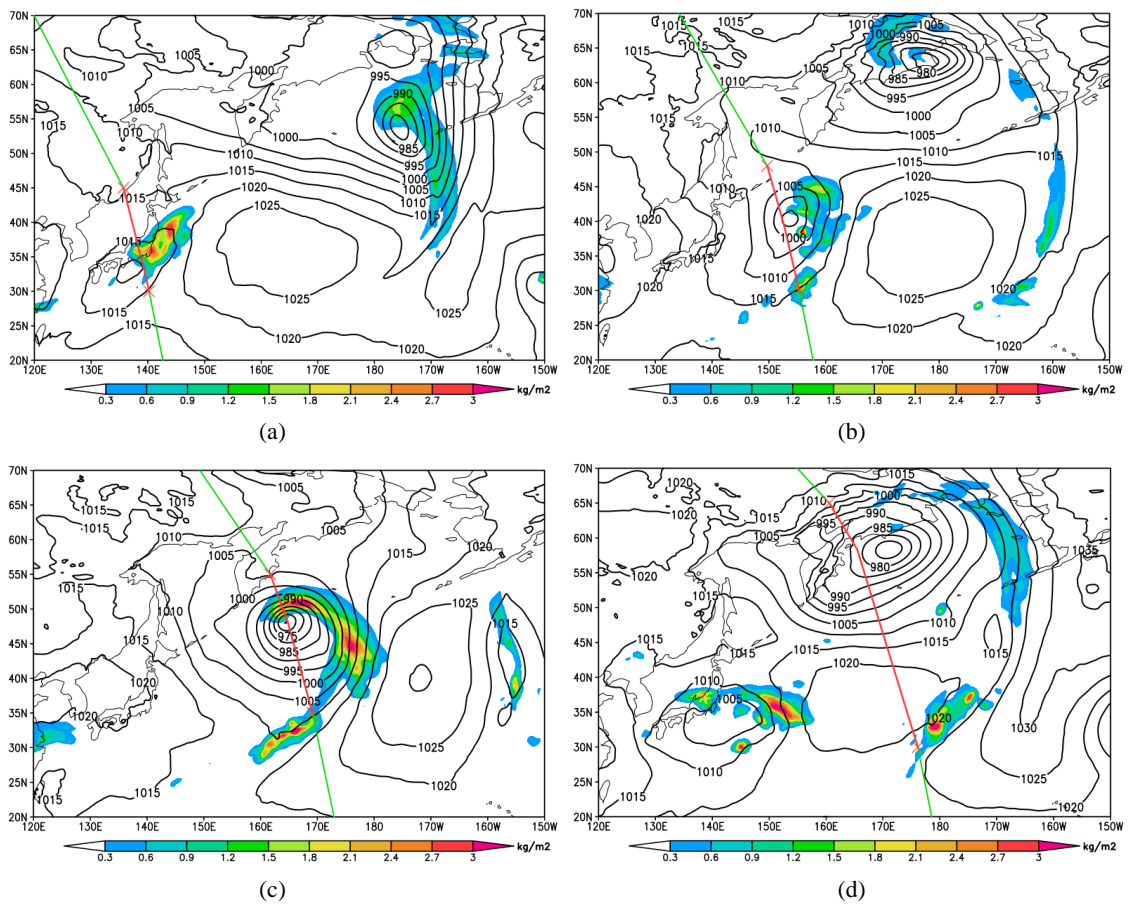


Figure 6. Cloud snow water path (shaded, 0.3 kg/m^2 interval). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019
图 6. 云的雪水路径水平分布(填色, 间隔 0.3 kg/m^2)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

云的液态水路径如图 7 所示。自气旋初始阶段至消亡阶段(图 7(a)~图 7(d))其分布也与云的冰水路径类似,但不同的是,云的液态水路径大值区范围很小,且不显著(在其他阶段也如此)。同时,云的液态水路径在消亡阶段(图 7(d))没有明显的断裂区,螺旋带上部至气旋中心周围,云的液态水路径呈破碎状态且数值极小,而在残留的尾带中部,则仍有较大值区(约为 $0.6\sim 0.8 \text{ kg/m}^2$)。

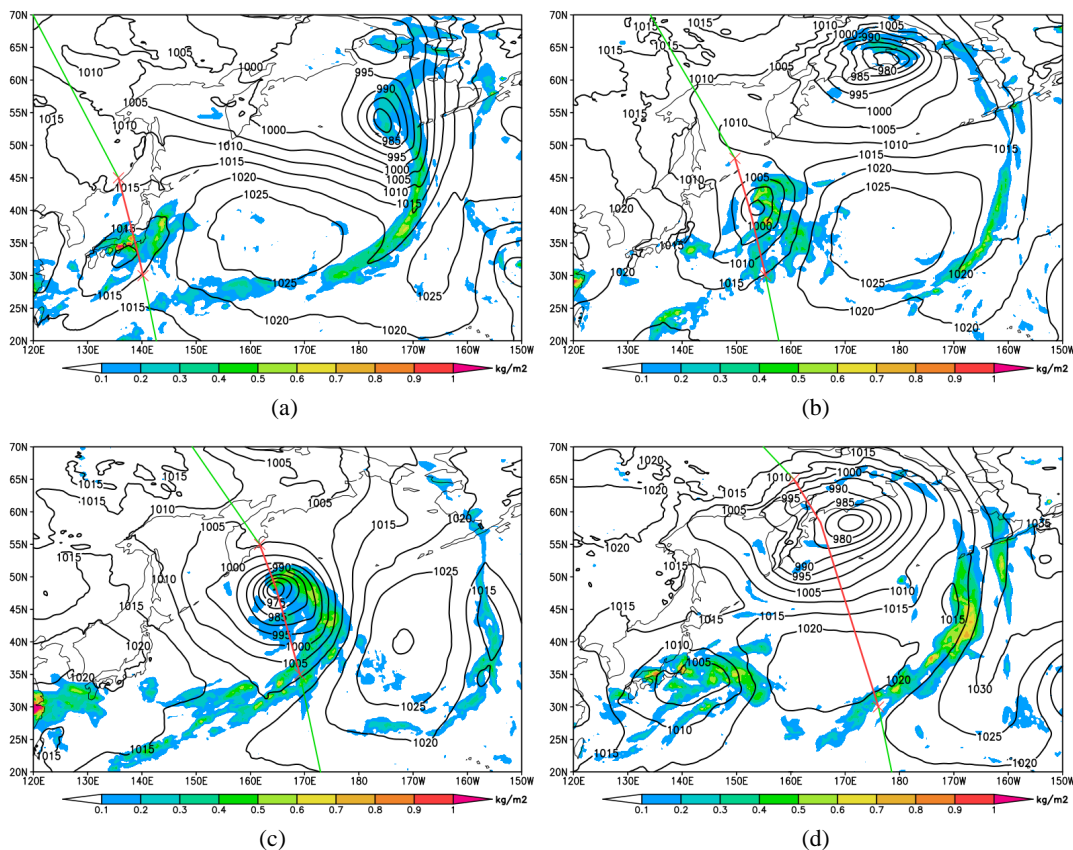
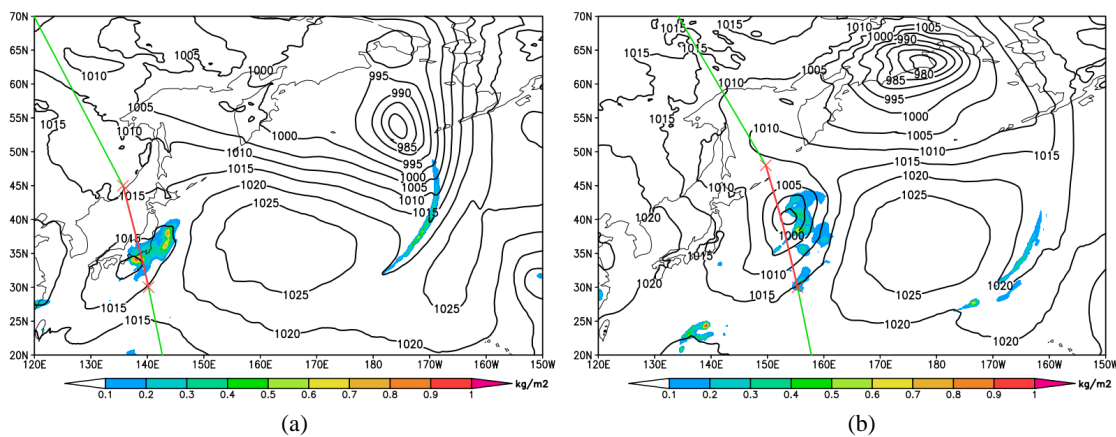


Figure 7. Cloud liquid water path (shaded, 0.1 kg/m² interval). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019
图 7. 云的液态水路径水平分布(填色, 间隔 0.1 kg/m²)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

云的雨水路径如图 8 所示。与前述两个路径不同的是, 云的雨水路径的分布与相应阶段的云状不完全吻合, 只呈现出云状中部以及尾部的形态特征。云的雨水路径从初始阶段至成熟阶段(图 8(a)~图 8(c))分布范围逐渐增大, 成熟阶段云的雨水路径存在大值区, 此时其分布形态也断裂成两个部分。而在消亡阶段(图 8(d)), 只剩尾部断裂区存在大的云的雨水路径, 其最大值相比于成熟阶段有所降低, 其他区域则几乎没有云的雨水路径分布。云的雨水路径在这四个阶段的分布范围均较小, 在成熟阶段和消亡阶段集中分布在螺旋带的中尾部以及断裂区。



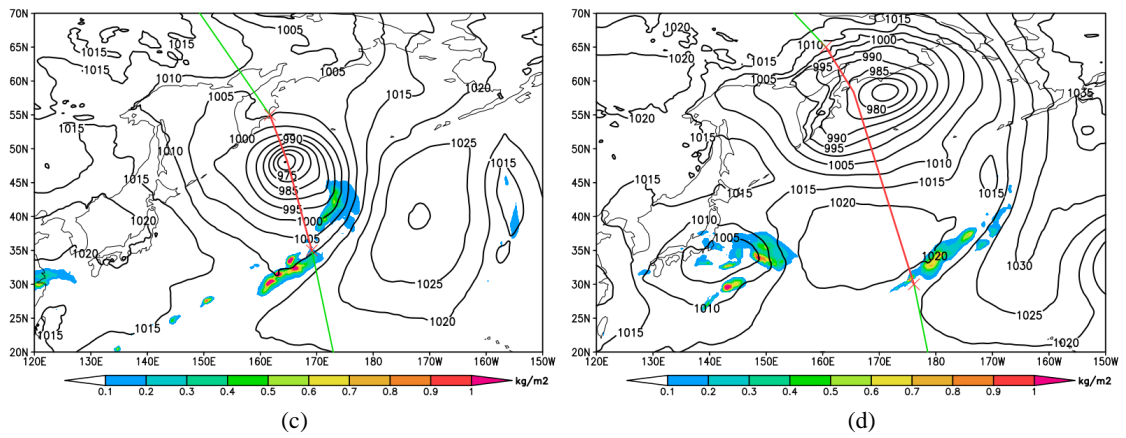


Figure 8. Cloud rain water path (shaded, 0.1 kg/m^2 interval). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019
图 8. 云的雨水路径水平分布(填色, 间隔 0.1 kg/m^2)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

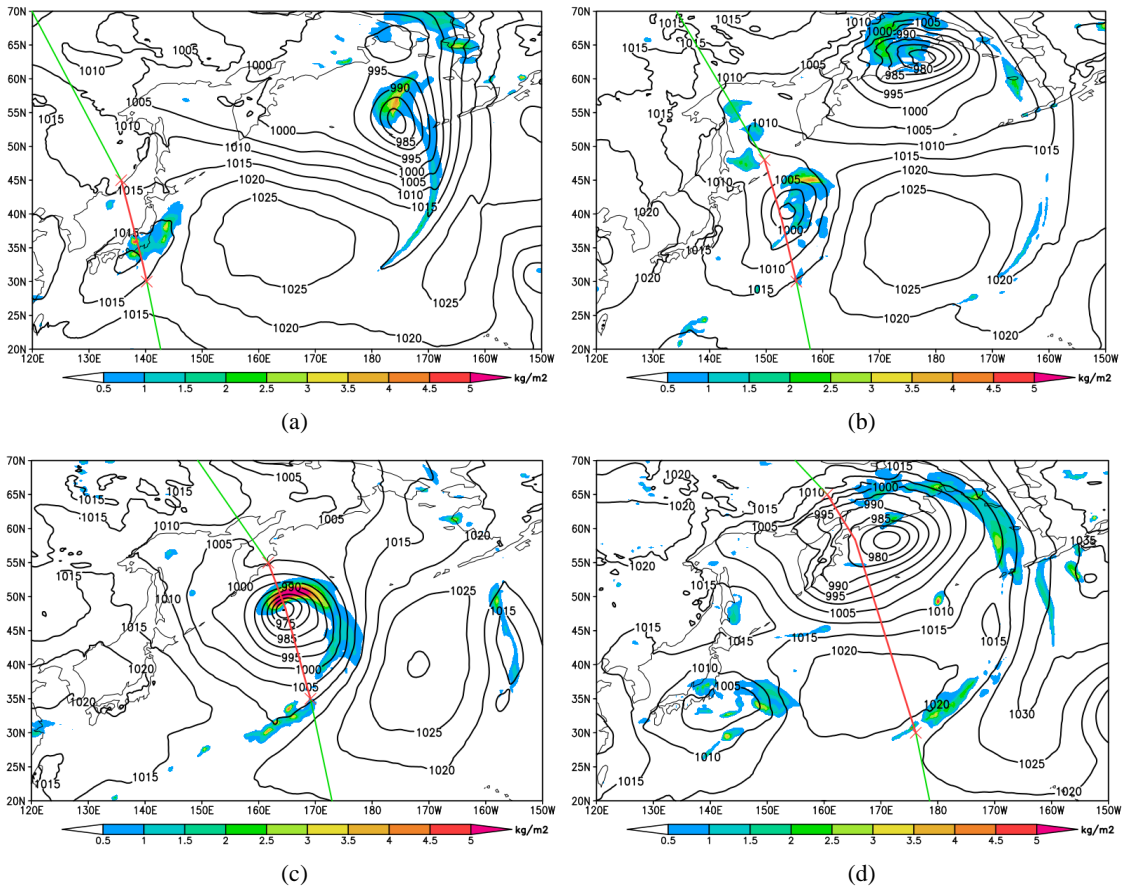


Figure 9. Path of all cloud water related variables (shaded, 0.5 kg/m^2 interval). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019
图 9. 云水总路径的水平分布(填色, 间隔 0.5 kg/m^2)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

为了更直观地分析云水相关物理量的分布, 我们将云的冰水含量、云的液态水含量、云的雨水含量和云的雪水含量相加后进行垂直质量积分, 获得云水相关参量路径(以下称为云水总路径)的水平分布图

(图 9(a)~图 9(d))。可以看到, 云水总路径在 EC 的初始阶段至发展阶段(图 9(a)~图 9(b))分布范围逐渐增大, 且气旋中心后部逐渐有一个大值区。成熟阶段(图 9(c))有明显的大值区, 且位于暖锋锋区向气旋后方弯曲的区域, 与前述的气旋中心暖核位置较为一致, 说明该地区上空有较丰富的水汽。在消亡阶段(图 9(d)), 云水总路径尾部与中部断裂, 在尾部的断裂区仍有云水总路径的大值区, 而中部数值较低, 同时螺旋带上部至气旋中心附近几乎无云水总路径分布。

3.2.2. 垂直分布特征

以上分析了云的微物理学参量的水平分布特征, 下面将分析其垂直分布特征。正如 Houze *et al.* [14] 指出的那样, 台风内部相关微物理学特征对台风强度变化有重要影响, 爆发性气旋云系内部微物理量垂直分布特征对于爆发性气旋的强度变化研究也有十分重要的意义。CloudSat 卫星恰可提供相当精确的云微物理量的垂直分布信息。

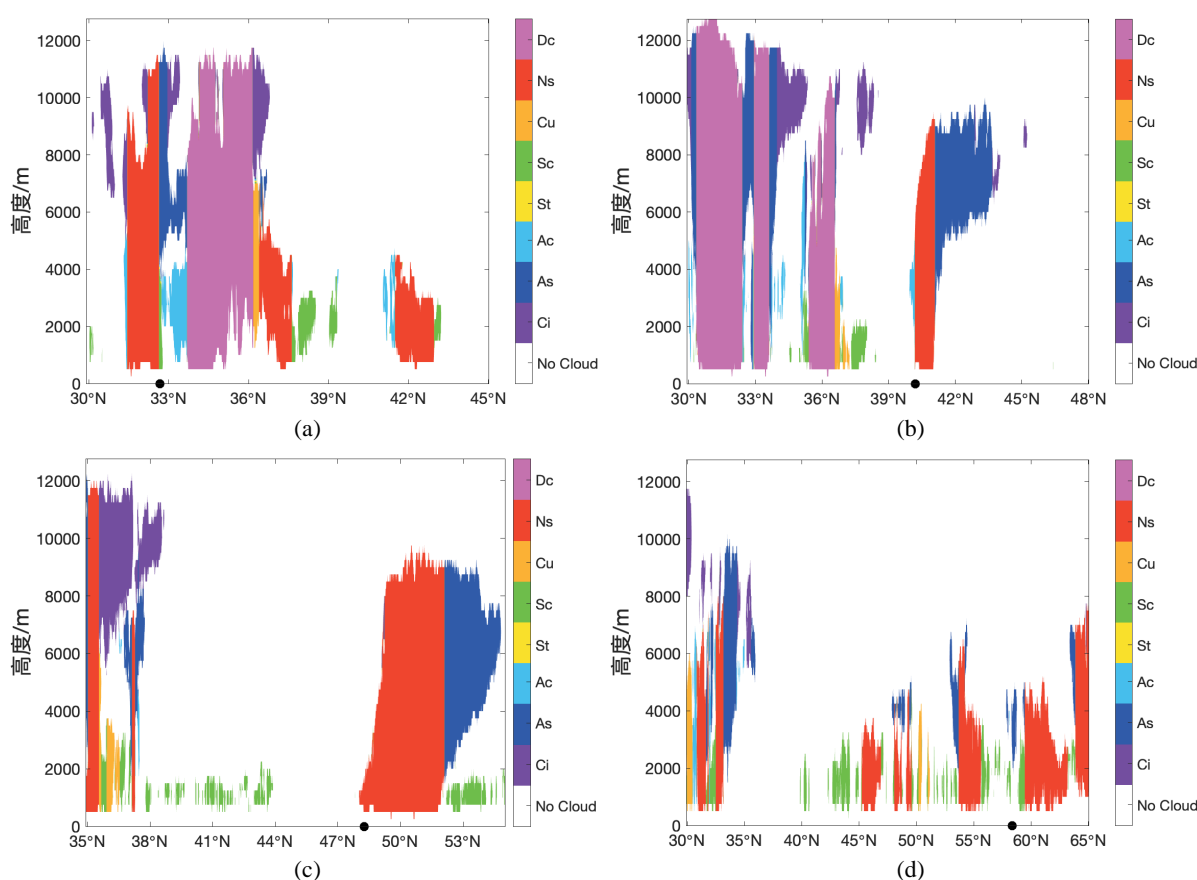


Figure 10. Cloud classification at different heights. (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019. The black dot represents the center of EC (the same below)

图 10. 不同高度上云的类型分布。(a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日。横坐标的黑色实心点为气旋中心的位置(下同)

图 10 为 CloudSat 卫星扫描 EC 的不同高度上云的类型垂直分布图, 图 10(a)~图 10(b)是气旋初始阶段和爆发性发展阶段的云类型垂直分布图, 可以看到气旋中心附近云由零散分布逐渐变为集中有序分布。图 10(c)为气旋成熟阶段时的云类型分布, 该时刻卫星恰好经过气旋中心眼区(离气旋中心的最近距离约为 7.55 km), 是四个阶段中卫星距离气旋中心最近的时刻, 此时的云类型分布极具代表性。可以看到, 气旋在初始阶段以及爆发性发展时(图 10(a)~图 10(b)), 云类型分布情况自南向北几乎看不出什么规律,

总体上随着气旋的发展,云的高度可达到 12 km。在成熟阶段(图 10(c)),云类型分布特征较为明显:气旋中心以北(即暖锋锋区一侧),主要为深厚的雨层云(Ns)以及高层云(As),其中雨层云厚度可达 9 km 左右,高层云厚度可达 5 km 左右,此时二者底部的分布廓线出现明显弯曲且随高度向北倾斜,再次印证气旋北侧为暖锋云系。而气旋中心以南,先有一段跨度约为 10°的无云区以及层积云区(Sc),后又逐渐出现高层云(As)、积云(Cu)以及雨层云(Ns)等,其中层积云区主要出现在 2 km 高度以下。无云区应是由于此时卫星恰在气旋中心南侧附近,此处为冷气团控制区域,盛行下沉气流。下沉气流致使该范围区域无云或存在少量的层积云。而逐渐出现的深厚的积云和层云应是由于此处位于冷锋线附近受冷锋锋面前进的挤压影响,冷锋前的空气产生强烈的上升运动所致。由图 10(d)可以看到,消亡阶段气旋云系分布几乎无规律,云高也呈现出不同程度的下降。值得注意的是,图 10(d)所呈现时段,CloudSat 轨道离气旋中心相对较远,最近时也有 680 km 左右,尚不清楚云系分布无规律性是否与距离较远有关。

图 11 为 EC 在四个阶段的云的冰水含量分布图。在气旋初始以及爆发性发展阶段(图 11(a)~图 11(b)),气旋中心附近云的冰水含量主要出现在 3 km 以上,大值区主要出现在 4 km~8 km 以及 6 km~12 km 附近。同时,气旋中心附近,云的冰水含量均显示出自低至高的“小值-大值-小值”的分布形态,与顾震潮[15]提出的“三层模型”类似。在气旋的成熟阶段(图 11(c)),云的冰水含量主要集中在气旋中心以北且其高度较前两个阶段有所降低,大值区出现在 1 km~8 km,对应于雨层云的中下部。在消亡阶段(图 11(d))云的冰水含量没有明显的大值区,均小于 300 mg/m³。

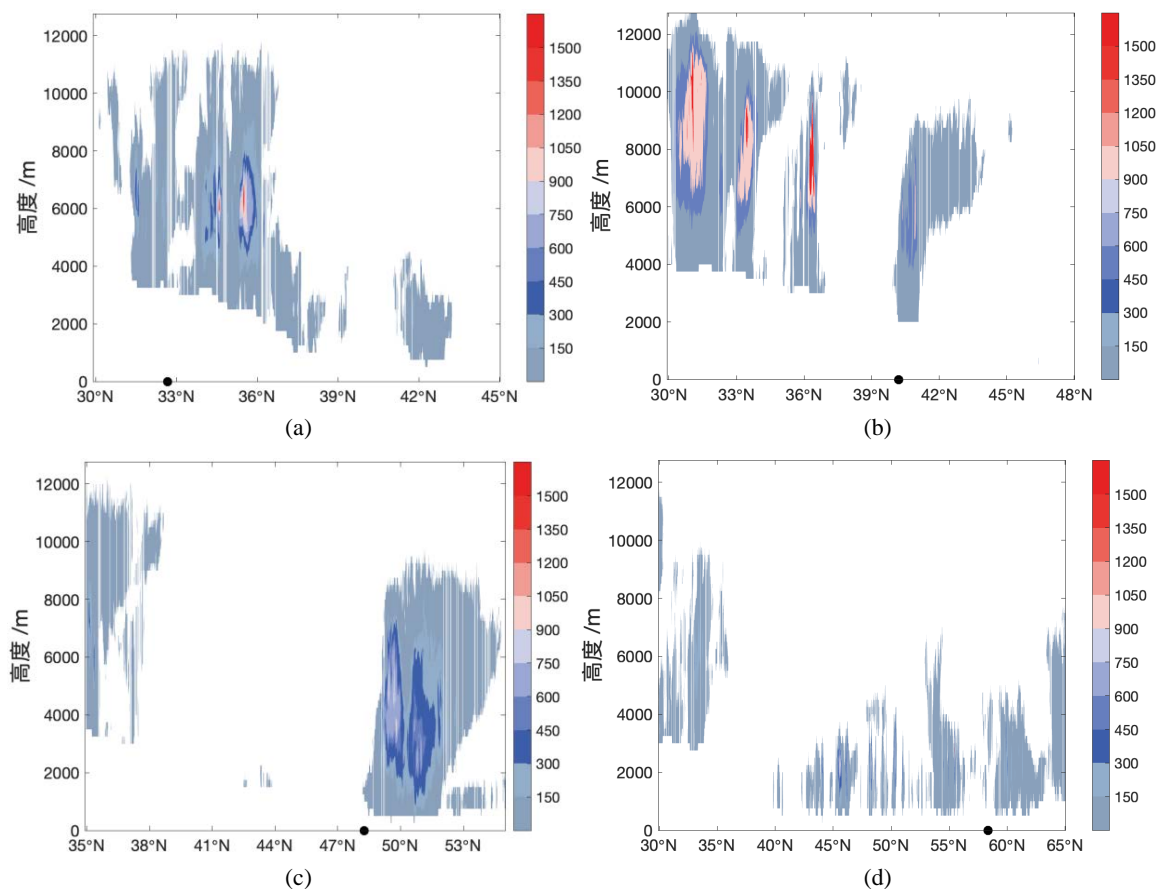


Figure 11. Ice water content at different heights (unit: mg/m³). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 11. 云的冰水含量的垂直分布(单位: mg/m³)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

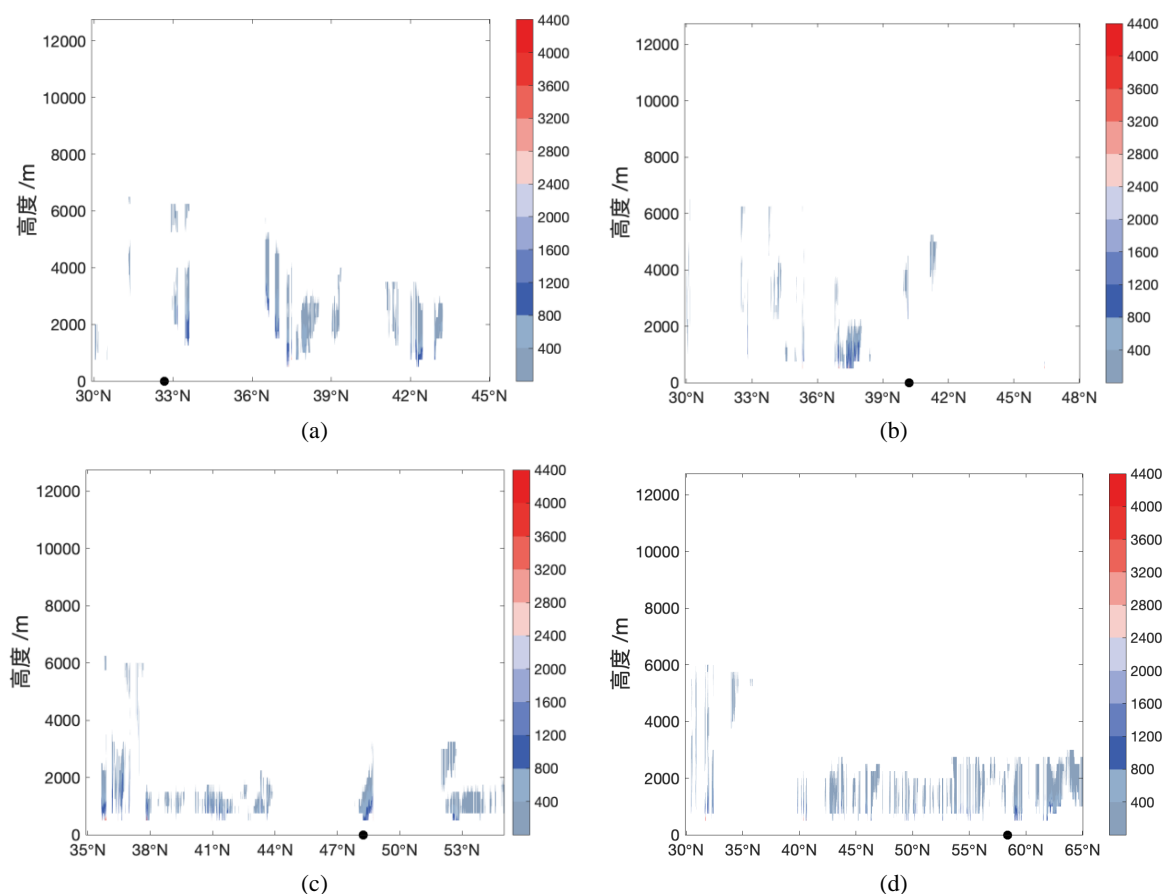
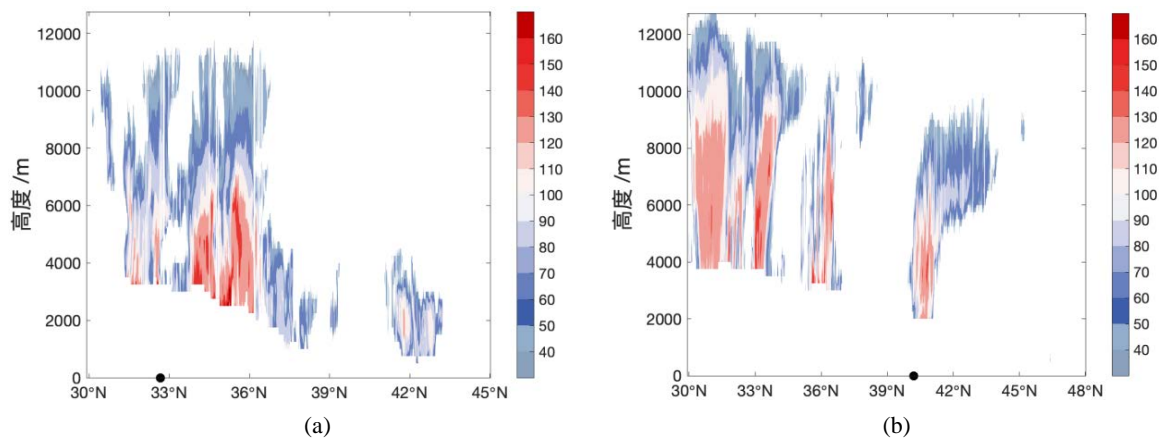


Figure 12. Liquid water content at different heights (unit: mg/m^3). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 12. 云的液态水含量的垂直分布(单位: mg/m^3)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

图 12 为 EC 在四个阶段云的液态水含量分布图。随着气旋发展(图 12(a)~图 12(b)), 云的液态水含量逐渐集中分布于 3 km 以下; 在气旋成熟阶段(图 12(c))时, 气旋中心北侧为云的液态水含量大值区, 其南侧则在跨度约为 4° 的无数值区; 在气旋消亡阶段(图 12(d)), 在 2 km 以下出现零散的云的液态水含量排布。



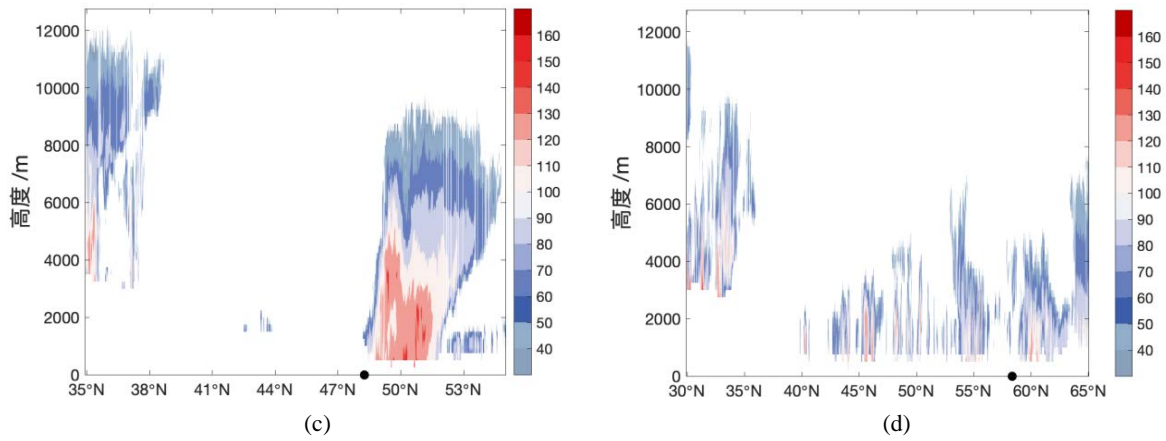


Figure 13. Ice particle effective radius at different heights (unit: μm). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 13. 云的冰粒子有效半径的垂直分布(单位: μm)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

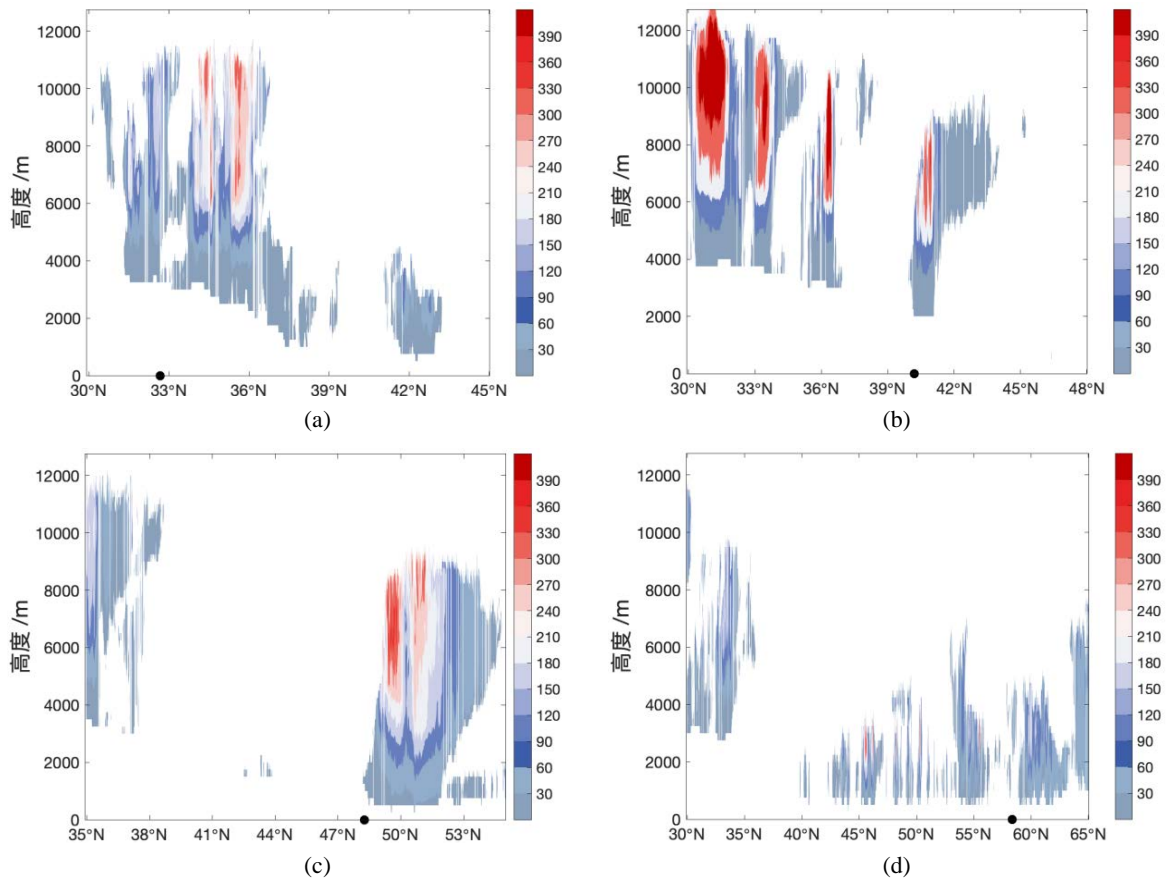


Figure 14. Ice particle effective radius at different heights (unit: μm). (a) 28 February; (b) 1 March; (c) 2 March; (d) 4 March 2019

图 14. 云的冰粒子数浓度的垂直分布(单位: number/L)。 (a) 2019 年 2 月 28 日; (b) 3 月 1 日; (c) 3 月 2 日; (d) 3 月 4 日

图 13 为 EC 在四个阶段云的冰粒子有效半径分布图, 呈现出自低空至高空数值逐渐减小的态势。初始阶段(图 13(a))和爆发性发展阶段(图 13(b)), 云的冰粒子有效半径总体在 3 km 以上, 而在成熟阶段(图

13(c)), 高度降至 1 km 以下, 主要集中在气旋中心北侧。在气旋消亡阶段(图 13(d)), 分布态势呈散乱分布, 其最大值较前阶段有所减小。

图 14 为云的粒子数浓度垂直方向分布图, 与前述云的冰粒子有效半径分布情况几乎相反: 低空处云的冰粒子数浓度数值小而高空数值大。与图 11 进行对比可以发现, 云的冰粒子数浓度和冰水含量的大值区位置对应较好。同时在气旋的初始阶段(图 14(a))和爆发性发展阶段(图 14(b)), 出现多个大值中心且均集中于 6 km 以上。当气旋发展至成熟阶段(图 14(c))时, 大值区主要集中在气旋中心北侧且大值区下降至 4 km 左右。值得注意的是, 成熟阶段, 气旋中心附近云的冰粒子初次出现的高度由 2 km~4 km 下降至 1 km 以下。而消亡阶段(图 14(d)), 云的冰粒子数浓度的分布也由成熟阶段的集中规则分布状态变成消亡阶段的破碎零散分布状态。

4. 总结与展望

4.1. 云的宏观特征

我们对爆发性气旋 EC 云系的宏观特征总结如下:

(1) 在 EC 初始阶段, 云团面积小且结构松散。
 (2) 在 EC 发展阶段, 云团面积明显变大, 云团结构更加紧密, 且呈现明显的“逗点”状结构。气旋的“眼”状结构开始显现。

(3) 在 EC 成熟阶段, 随着气旋的快速发展, 云团覆盖面积逐渐扩大, 云团轮廓清晰, 由“逗点”状逐渐演变为“螺旋”状, 东部云系发展旺盛, 旋转强度大, “眼”状结构扩大, 东部有云区与无云区边界清晰。

(4) 在 EC 消亡阶段, “螺旋”状云系逐渐变得松散, 此时云系所占面积是四个阶段中最大的。

另外, 由于 CloudSat 卫星经过 EC 成熟阶段且距离气旋中心较近, 数据资料较为详尽, 为给出爆发性气旋云系垂直分布的一个清晰图像, 也为了使读者更容易理解, 我们依照 CloudSat 卫星数据, 绘制了 EC 成熟阶段沿 CloudSat 卫星轨道云系垂直分布示意图(图 15)。

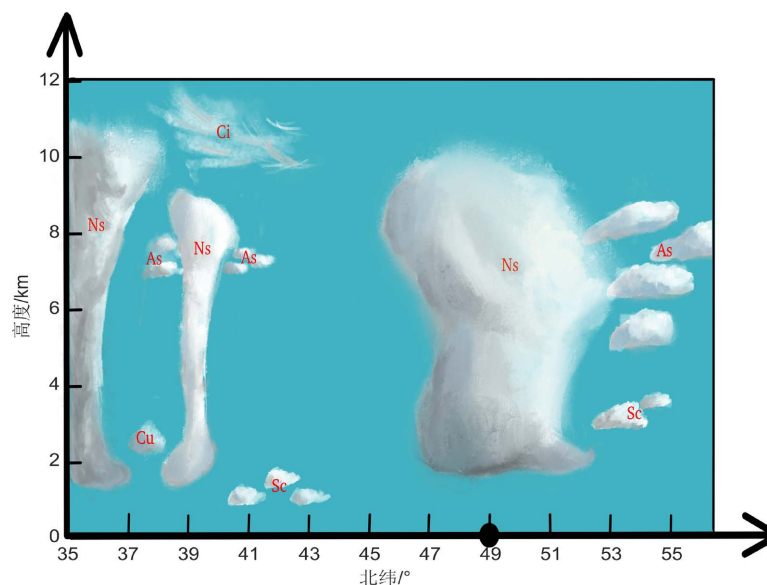


Figure 15. Vertical schematic diagram of clouds associated with EC during its mature stage at 02 UTC 2 March 2019 along the moving track of satellite CloudSat

图 15. 在 EC 成熟时 2019 年 3 月 2 日 02 UTC 沿 CloudSat 卫星轨道的云系垂直分布示意图

4.2. 云的微观特征

根据 ERA5 再分析数据和 CloudSat 卫星数据的分析结果, 我们对爆发性气旋各阶段的微观云系特征总结如下(详情见附录表 1):

1) 在水平分布方面, 除云的雨水路径外, 其他云水相关路径的分布形态都与相应阶段云的形状有一定关联, 云的雨水路径只呈现出气旋云系尾部相似的形态特征, 而其他的云水相关路径分布形态与相应阶段的云状变化大致相同。

2) 在垂直分布方面, 云的微物理参量在南北方向上的分布随着气旋的发展呈现出从“不规则分布”至“规则集中分布”最后至“不规则零散分布”的态势。另外, 在气旋中心附近, 随着气旋的发展, 各微物理量在垂直方向上的高度由气旋的中高部下移至气旋的中低部。

本文关于西北太平洋爆发性气旋云系特征的分析只是初步成果, 将来会进一步搜集更多的爆发性气旋个例, 对其宏观和微观特征进行统计分析, 以期获得更具有代表性的研究成果。

致 谢

本文得到中国海洋大学国家级大学生创新创业训练项目(项目号: 202210423055)的经费支持, 傅刚得到国家重点研发计划“全球海洋气象灾害监测预报预警技术及示范应用”(2022YFC3004200)和国家自然科学基金面上项目(42275001)的资助。

参考文献

- [1] Sanders, F. and Gyakum, J.R. (1980) Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”. *Monthly Weather Review*, **108**, 1589-1606. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1589:SDCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1589:SDCOT>2.0.CO;2)
- [2] Weldon, R.B. (1977) An Oceanic Cyclogenesis—Its Cloud Pattern Interpretation. NWW/NESS Satellite Applications Information Note 77/7, 11 p.
- [3] 常美桂, 王衍明. 西北太平洋爆发性气旋的气候特征和卫星云图分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(4): 36-41.
- [4] 鄢坤, 傅刚, 陈莅佳. 不同季节北大西洋上爆发性气旋云微物理特性的分析与比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(12): 10-22.
- [5] 彭永茂, 傅刚, 鄢坤, 陈莅佳. 大西洋上四个爆发性气旋的云微物理参量垂直分布特征分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(3): 24-29.
- [6] Lim, E.P and Simmonds, I. (2002) Explosive Cyclone Development in the Southern Hemisphere and a Comparison with Northern Hemisphere Events. *Monthly Weather Review*, **130**, 2188-2209. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2188:ECDITS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2188:ECDITS>2.0.CO;2)
- [7] Fu, G., Sun, Y.W., Sun, J.L. and Li, P. (2020) A 38-Year Climatology of Explosive Cyclones over the Northern Hemisphere. *Advances in Atmospheric Sciences*, **37**, 143-159. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-9106-x>
- [8] Yoshida, A. and Asuma, Y. (2004) Structures and Environment of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region. *Monthly Weather Review*, **132**, 1121-1142. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1121:SAEOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1121:SAEOED>2.0.CO;2)
- [9] Gyakum, J.R., Anderson, J.R., Grumm, R.H. and Grunner, E.L. (1989) North Pacific Cold Season Surface Cyclone Activity: 1975-1983. *Monthly Weather Review*, **117**, 1141-1155. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1141:NPSSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1141:NPSSC>2.0.CO;2)
- [10] Zhang, S.Q., Fu, G., Lu, C.G. and Liu, J.W. (2017) Characteristics of Explosive Cyclones over the Northern Pacific. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **56**, 3187-3210. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0330.1>
- [11] Simmonds, I., Keay, K. and Bye, J.A.T. (2012) Identification and Climatology of Southern Hemisphere Mobile Fronts in a Modern Reanalysis. *Journal of Climate*, **25**, 1945-1962. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00100.1>
- [12] Shapiro, M.A. and Keyser, D. (1990) Fronts, Jet Streams and the Tropopause. In: Newton, C.W. and Holopainen, E.O., Eds., *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*, American Meteorological Society, Boston, 167-191. https://doi.org/10.1007/978-1-944970-33-8_10
- [13] 熊秋芬, 牛宁, 章丽娜. 陆地上爆发性温带气旋的暖锋后弯结构分析[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 239-249.

-
- [14] Houze Jr., R.A., Chen, S.S., Lee, W.-C., *et al.* (2006) The Hurricane Rainband and Intensity Change Experiment: Observations and Modeling of Hurricanes Katrina, Ophelia and Rita. *Bulletin of American Meteorological Society*, **87**, 1503-1521. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-11-1503>
- [15] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 173-176.

附录

Table 1. Comparisons of characteristics of clouds associated with explosive cyclones over the Northwestern Pacific Ocean
表 1. 西北太平洋上爆发性气旋各阶段云系特征的比较

	初始阶段	爆发性发展阶段	成熟阶段	消亡阶段
宏观特征				
云团所占面积	小	较大	大	极大至消散
云团形状及结构	不规则；结构松散	逗点状；结构紧密；开始出现眼区	螺旋状轮廓清晰；眼状结构扩大	螺旋状云系变松散
微物理学特征				
云的冰水路径 云雪水水路径	形态不规则；存在大值区，范围较小	范围逐渐变大	大值小值区相间分布，呈“三层双夹心饼干”型；分布两头窄中间宽	范围更大；尾部出现断裂，且大值区集中在尾部
云液态水水路径	形态不规则；范围小	形态不规则；范围逐渐变大	呈螺旋状；范围大	尾部无明显断裂
云的雨水路径	范围小；不规则	范围小；不规则	范围小；集中分布于螺旋尾部断裂区；存在明显断裂	仅剩尾部断裂区
云水总路径	不规则；范围小	不规则；范围变大	螺旋状；范围大；气旋中心后部存在明显大值区	分布松散，零碎，不规则；无明显大值区
云的冰水含量	大值区范围小；分布高度较高；满足顾震潮三层模型；总体分布较为零散、不规则	大值区分布范围变大；中心附近分布高度有所降低；满足顾震潮三层模型；总体分布有所集中	大值区分布范围仍然较大，但数值上有所减小；中心附近分布高度有所降低；总体分布集中在中心附近，形状规则	无明显大值区；分布高度仍然较低；总体分布变得零散
云的液态水含量	分布零散；分布高低不均	分布有所集中；分布高度逐渐集中于低空	气旋中心附近有明显富集区	分布零散；分布高度有所上升
冰粒子有效半径 冰粒子数浓度	整体分布较为零散；大值区主要分布在中高空	分布逐渐集中；最大值增加；分布高度有所下降	分布集中；分布高度显著降低	分布零散；无明显大值区
总结	分布形态上：从“零散”至“规则”再到“零散”；与相应阶段云系云状以及能量分布联系紧密。			