

温带气旋和梅雨锋的卫星云图特征

许健民

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 介绍温带气旋和梅雨锋的卫星云图特征。温带性气旋是来自不同方向的三支气流(暖输送带、冷输送带、干带)的汇合过程,梅雨锋气旋是气旋簇中的一系列气旋波中所处纬度最低的。在青藏高原东侧的中国东部地区,由于与特定地形、地理条件相伴的动力、热力作用,对流层上部从高原东伸的脊与它北侧的副热带急流夹得很紧,两者之间有多方向的外流;而对流层下部有极其潮湿的东西向切变线。这样的大气三度空间结构,趋向于符合对称不稳定条件,这使得密实、连续的梅雨锋云带得以稳定、持续地维持。也正是由于雨带上空被潜热加热的气流向东南扩散下沉,十天甚至半个月以后,环流形势将发生调整:或出现副热带高压加强,雨带北抬;或形势转变为经向型。经向型云带里不同区段云的密实程度有差异,这与沿云带低层气流的汇合、涡度以及云带与西太平洋热带扰动之间的相互作用有关系。

关键词: 温带气旋, 梅雨锋, 卫星云图

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.003

Satellite Imagery Characteristics for Extratropical Cyclones and Meiyu Fronts

Xu Jianmin

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: This paper introduced satellite imagery appearance for extratropical cyclones and Meiyu fronts. Extratropical cyclone consisted of three conveyor belts: warm conveyor belt, cold conveyor belt and dry slot. Meiyu frontal cyclones are the ones among series cyclones at the lowest latitudes. In Eastern China due to dynamical and thermo-dynamical processes associated with specific topographical and geographical features, in the upper troposphere, there is an anti-cyclonic ridge extending eastward from Tibetan Plateau. Between this ridge and a subtropical jet stream closely to its northern side, the upper tropospheric flows diverse towards multi directions to the eastern and southern sides. Coupled with the upper ridge in the lower troposphere, there is a shear line east-west oriented with extreme wet humidity. Such three dimensional structure of the atmosphere approaches the condition of the symmetric instability. As a result, the Meiyu frontal cloud belts become dense, continuous and long lasting. It is due to the latent heating along the rain belt in the upper troposphere, after a time period about 10-15 days, the pattern is evolved, either the rain belt moves northward, or the pattern turns into longitudinal. With longitudinal pattern, the densities of the clouds vary in different regions of the cloud belt related with the vorticity and convergence in the low level air flow and its interaction with the surrounding tropical disturbances.

Keywords: extratropical cyclone, Meiyu front, satellite imagery

0 引言

本文以2020年的几次天气过程为例,介绍气旋和梅雨锋的卫星云图特征。中纬度气旋(以下简称气旋)是业务天气预报最常遇到的天气系统。Schultz等^[1]总结了过去100年以来国际气象学界对气旋的结构、演变和动力学进行不懈探索的历史和成就,认为中纬度气旋是气象研究工作的中心;该文章指出:气旋不是一件东西,而是一种过程。地面天气图上的低压系统,是通过一系列动力和热力过程形成和发展起来的,其中重要的物理过程有:位涡守恒、斜压不稳

定、锋生以及它们之间的非线性相互作用、非绝热加热等。由于位势涡度守恒,当对流层上部的高空槽移到对流层下部的残留斜压带上面时,就会触发一次新的气旋生过程。Charney^[2]的斜压不稳定理论指出,斜压天气过程诱发气旋生有环境的经向温度梯度和系统的尺度两方面的临界条件。波长为2800 km左右的Rossby波最有利于诱发斜压气旋生,所以在卫星云图上与发展中气旋相伴的叶状云系都是这个大小。经向温度梯度即平均纬向气流中的斜压性,主要来自太阳辐射随纬度变化的不均匀分布。除此以外,气流的汇合锋生也会使某个地方的经向温度梯度显著提升。Hoskins等^[3]假定在沿锋面的方向气流是地转的,而在垂直于锋面的方向存在非地转风;他们得到了一个可

收稿日期: 2020年12月21日; 修回日期: 2021年3月5日
作者: 许健民(1944—), Email: xujm@cma.cn

以用纬向风或者温度梯度求出穿越锋区非地转环流的半地转方程组，方程组中系数的空间变化和交叉导数使次级环流发生扭曲，产生锋生。半地转理论构划出了更加符合实际的气旋发展演变过程概念模型。这些物理过程的概念可以在有关的教科书中查到，详见本文所列举的参考文献。天气预报人员建立诊断、分析和预报思路时，要以与天气系统发生、发展有关的物理过程为线索。

卫星云图出现以后，Carlson^[4]通过分析大量资料，总结出气旋的概念模型。该模型是预报员分析中纬度天气尺度系统的有用工具。Carlson指出：气旋是三支来自不同方向气流（暖输送带、冷输送带、干带）的汇合；气旋中云和降水的分布与大气的三度空间结构和运动密切相关。本文简要介绍Carlson的概念模型和有关物理概念，并以2020年的天气过程为例分析其云图特征，分别讨论气旋、纬向型和经向型梅雨锋雨带，提示分析和诊断要点，以期能够对预报思路要点有所启示。

1 气旋云系发展过程的概念模型以及几个有关的物理过程

气旋云图特征的识别既简单又复杂，其简单之处在于气旋的概念模型已经揭示了气旋的外观表现、三度空间结构、运动和发生发展过程；其复杂之处在于每一个气旋都不一样，这与当时、当地系统周边的环流、水汽、太阳辐射、下垫面、地形等许多因素有关系。为了用云图分析天气系统，不仅要了解有关天气系统结构和行为的基本特征，还需要熟悉有关物理过程和地理条件的基本知识。回顾气旋云系发展过程的概念模型，有助于理解云图上的云如此分布的原因。

1.1 历史上的气旋概念模型

图1是Shaw 于1911年提出的气旋概念模型。当时Shaw已经注意到温带气旋是三支气流的汇合。在低压中心的东北侧有自东向西流动的上升冷空气，其中有降水；在低压中心的东南侧有汇合的暖空气，其中也有降水；在低压中心的西南侧有从西边过来的冷空气取代其前面的暖空气时，才有降水。Shaw的气旋概念模型从现在的角度来看，仍然是对的。

图2是Bjerknes 提出的气旋模型。Schultz等^[1]认为Bjerknes的贡献在于指出了与温度不连续有关的锋面和气旋的三度空间结构、气旋后面的槽对气旋生的作用。

气旋和锋面是伴生发展的，两者发生的先后顺序不是确定的。Hoskins认为：在沿锋线的方向，锋面是天气尺度系统，气流遵循准地转规律；而在与锋线垂直的方向，锋面是中尺度系统，气流的非地转分量非

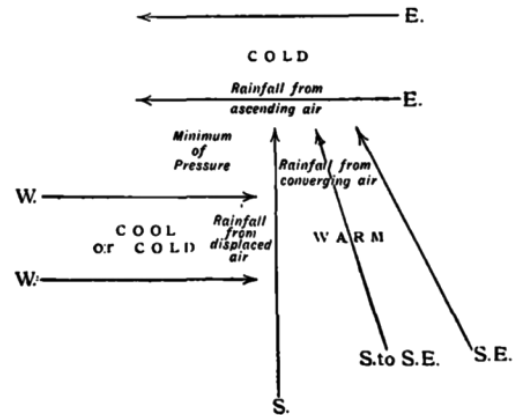


图1 Shaw的气旋模型^[1]
Fig. 1 The cyclone model of Shaw^[1]

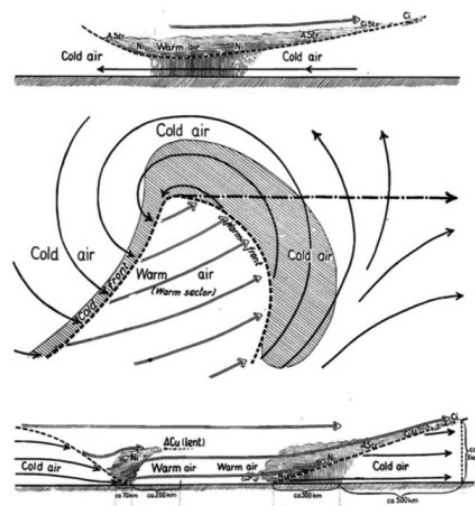


图2 Bjerknes的气旋模型^[1]
Fig. 2 The cyclone model of Bjerknes^[1]

常大，Hoskins把这样的过程称为半地转过程。用半地转过程的概念模拟出的气旋发展概念模型如图3所示^[5]。图3中出现了两个锋生特别强烈的气旋发展区：一个是沿着从气旋中心向南伸展的冷锋，另一个是沿着从气旋北到东北方向发展中的暖锋。锋面云系主要形成在这些狭窄的锋生区中。另外，在暖锋锋生区向低压中心延伸的地方，有一条锋消带。在锋生区里产生并不断呈气旋式向气旋内部平流过来的云，有时会因这条锋消带而蒸发。半地转概念模型是对挪威学派气旋概念模型的重要发展，并对业务天气预报有指导意义。下文所列举的气旋发展实例，就符合这样的概念模型。

1.2 Carlson 的气旋云系发展过程概念模型

图4是气旋云系发展过程的概念模型示意图^[4]。图4a显示了气旋不同发展阶段云系的边界轮廓。其中用实线表示的边界1是气旋初生阶段叶状云的边界轮廓

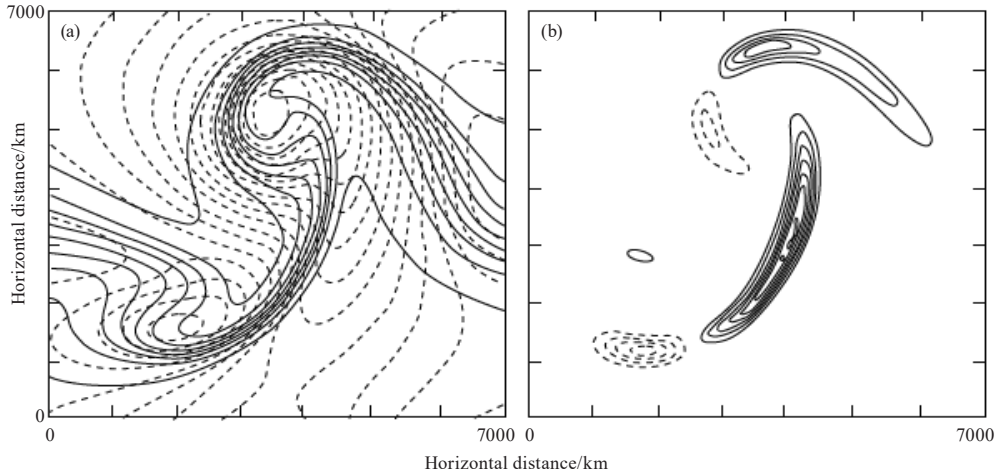


图3 用半地转方案计算出的地转风的空间分布^[5]

(a 是间隔为3.2 hPa (虚线) 的等压线和间隔为2.1 K (实线) 的位温等值线, 顶部空气较冷; b 是锋生函数 $D(\nabla\theta)^2 / D\tau$, 单位为 $10.6(K/1000km)^2 h^{-1}$, 实线表示正值, 虚线表示负值)

Fig. 3 Spatial distribution of geostrophic wind calculated by using semi-geostrophic scheme^[5]

(a is the isobars with an interval of 3.2 hPa (dotted line) and potential temperature isolines with an interval of 2.1 K (solid line), and the air at the top is cold, b is a frontogenesis function $D(\nabla\theta)^2 / D\tau$, The unit is $10.6(K/1000km)^2 h^{-1}$, the solid line is positive and the dashed line is negative)

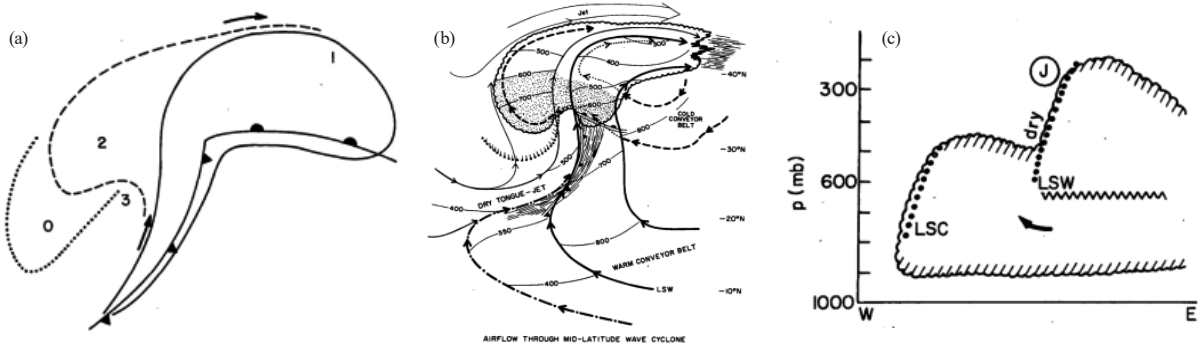


图4 Carlson的气旋云型概念模型^[4]

(a) 中纬度波状扰动的盾状云系示意图; (b) 穿越中纬度气旋的三度空间气流示意图; (c) 气旋中心北侧一个东西向的垂直剖面图

Fig. 4 The cyclone model of Carlson^[4]

(a) Schematic diagram of shield cloud system with wavy perturbations at mid-latitudes, (b) Schematic diagram of three-dimensional air flow through a mid-latitude cyclone, (c) An east-west vertical profile on the north side of the cyclone centre

廓, 此时叶状云的极地一侧边界已经显出两种不同的曲率。在向极地一侧凸起的云带里, 暖湿空气正在它极地一侧的冷空气垫子上爬升; 而在向赤道一侧凹陷的云带的北侧, 干冷空气正在入侵下沉。用虚线表示的边界2是气旋发展阶段逗点状云的边界轮廓, 此时地面低压中心已经形成。低压中心极地一侧的偏东风把云向西边吹, 云系靠近极地的部分向西伸展, 使云系的轮廓演变成为逗点状。用点线表示的边界0是气旋已经发展到了成熟期, 云系围绕气旋中心向西、甚至向西南方向延伸。3是一个晴空区, 它代表与诱发气旋生高空短波槽相伴的干冷空气正在暖输送带和冷输送带交汇的地方切入气旋的逗点状云系。

图4b是气旋成熟阶段的三度空间气流俯视图。图4b指出, 发展阶段的气旋是来自不同方向三支气流的汇合, 这三支气流分别是: 暖输送带、冷输送带和干带。

暖输送带从气旋暖扇区里的对流层下部出发, 先是沿冷锋的前缘上升, 随后在暖锋上继续爬升, 上升到对流层的中上部时, 随那里的环境西风气流向东流出。暖输送带的上游(西)侧边界是光滑、锐利的, 边界两侧图像亮度的反差大; 而它的下游东侧、东南侧有羽毛状的多方向外流卷云, 这种羽毛状外流卷云的细微结构是尖锐的, 而不是模糊的, 流出的高云量逐渐减少直至消失。这样的外观表现说明在暖

输送带的上（下）游边界处，气流有流入（出）云系的分量。

冷输送带起源于暖锋极地一侧的冷空气内部，暖锋降水使这里的空气潮湿，地面低压形成后，气旋中心北侧对流层下部有东风上升气流，带动冷输送带云从暖输送带云的下面向西伸展并露出，云的外观轮廓随即从叶状转变成逗点状。从图4b上可以看到，冷输送带云上升到对流层中上部后，也随那里的环境西风气流转向东流出。

图4b上的第三支气流是干带，它代表对流层上部触发气旋生高空短波槽，在水汽图像上表现为一条南侧伴有急流的干（暗）带。如果水汽图像上的干（暗）带南侧有一条急流与之相伴，并且随时间的延长变得越来越暗，那么它是活跃的，被称为动力干带，代表对流层上部一个发展中的高空短波槽或正位涡异常。当对流层上部的正位涡异常，向东移动到对流层下部残留锋区上空时，气旋生被诱发。水汽图像上暗区很多，其中在南侧没有急流相伴的暗区是不活跃的，不能代表不稳定的高空短波槽，没有重要的天气意义。

图4c是东西向垂直剖面图，剖面位于气旋中心的北侧，视点为由南向北看。这幅图与俯视图（图4b）配合，更能看清楚气旋以及其中三条输送带的三度空间结构。图中用LSW/LSC（Limiting Streamlines for Warm (Cold) Conveyor Belts）标志的圆点线，代表剖面图上暖（冷）输送带流线的西部边缘。暖（冷）输送带流线指向图的里面（西面），它们都有上升分量。锯齿线是冷、暖输送带之间的分界。dry是干带，也指向图的里面。

1.3 对称斜压不稳定

地球上流体垂直位移的不稳定性被称为静力不稳定。在旋转的地球上，流体水平位移的不稳定性被称为惯性不稳定。静力不稳定和惯性不稳定的条件都极其苛刻，难以满足。对称不稳定理论（Holton和Harkim, 2019）认为：如果在经向垂直剖面图上，等 θ 面的坡度比等 M 面更大，那么大气就是对称不稳定的。在讨论对称不稳定时，静力和惯性两种稳定度仍然是稳定的：对于静力稳定度而言， θ 仍然是上高下低的，但等 θ 面向高纬度冷、低纬度暖的方向偏时，才会竖起来；对于惯性稳定度而言，等 M 面仍然是低纬度大、高纬度小，只是等 M 面要向上面大、下面小的方向偏时，才会躺平。这两种情况都需要有斜压性。等 θ 面的坡度如果比等 M 面更大，就能达到对称不稳定的条件。

下文将展示在梅雨锋云带的北侧，对流层上部

有一个非常强的副热带西风急流，梅雨锋云带总是在这支副热带西风急流与其南侧从西藏高原东伸的反气旋脊线之间的。副热带西风急流的南侧，对流层上部 $\frac{\partial \mu_s}{\partial y}$ 非常大，对流层中下部 $\frac{\partial \mu_s}{\partial y}$ 要小得多，所以等 M 面能够躺平；而对流层中下部的静力稳定度条件却接近于中性，即等 θ 面的坡度比等 M 面更大，这是有利于存在对称不稳定的条件。

1.4 非绝热加热对天气形势的反馈

考虑非绝热加热和摩擦力， θ 坐标系里的位势涡度因为受到非绝热加热、摩擦、侧向涡度造成的位势涡度而改变。非绝热加热的垂直变化对位势涡度的影响表现为：在非绝热加热最大层面以上，大气获得负的位势涡度，环流出现反气旋性转变；在非绝热加热最大层面以下，大气获得正的位势涡度，环流出现气旋性转变；在非绝热加热最大层的高度，上升运动最大。

大气受到的非绝热加热有两种。一种是可感热加热：由于边界层内的湍流把地表获得的多余太阳辐射能量输入大气。可感热加热主要发生在行星边界层里，行星边界层的厚度可以从地面到30~3000 m的高度^[6]。西藏高原的地面高度在600 hPa上下，所以来自西藏高原地面的可感热可以直接加热当地的对流层中上部大气。另一种非绝热加热是潜热加热：深对流活动相伴的潜热释放，可以直接加热400 hPa上下的对流层上部大气。在西藏高原及其以东地区，这两种非绝热加热都对大气环流和天气形势有重要的影响。西藏高原可感热加热使中国东部地区季风雨带持续，深对流活动相伴的潜热释放造成时间尺度为两周左右的天气形势低频振荡。

图5^[7]表示西藏高原上空受到加热时，在对流层上部出现一个反气旋，在对流层下部出现一个气旋，在对流层中部有上升运动的情况。从初夏季节（即5月中下旬）开始，西藏高原上空就已建立起一个反气旋

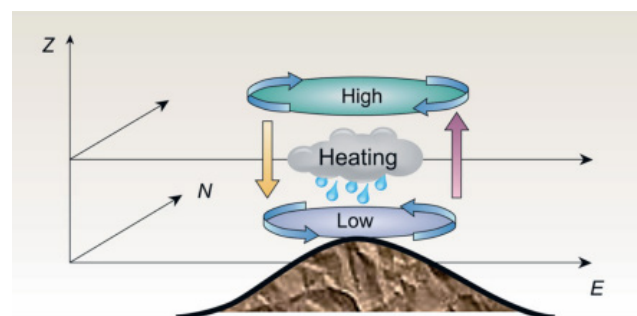


图5 西藏高原上空的加热有利于在对流层上部出现一个反气旋^[7]

Fig.5 Heating over the Tibetan Plateau is conducive to an inversion in the upper troposphere cyclone^[7]

脊。这个反气旋脊一旦建立起来，中国的季风降水马上会变得非常猛烈，而且雨带的位置和走向一直伴随着它，其原因可以从图5中得到解释。

2 气旋的云图特征

图6~图11是2020年8月10—15日的风云四号气象卫星10.8 μm长波红外、7.1 μm中层水汽以及对流层中下部的天气图，这些图展示了一个蒙古气旋的生命史。

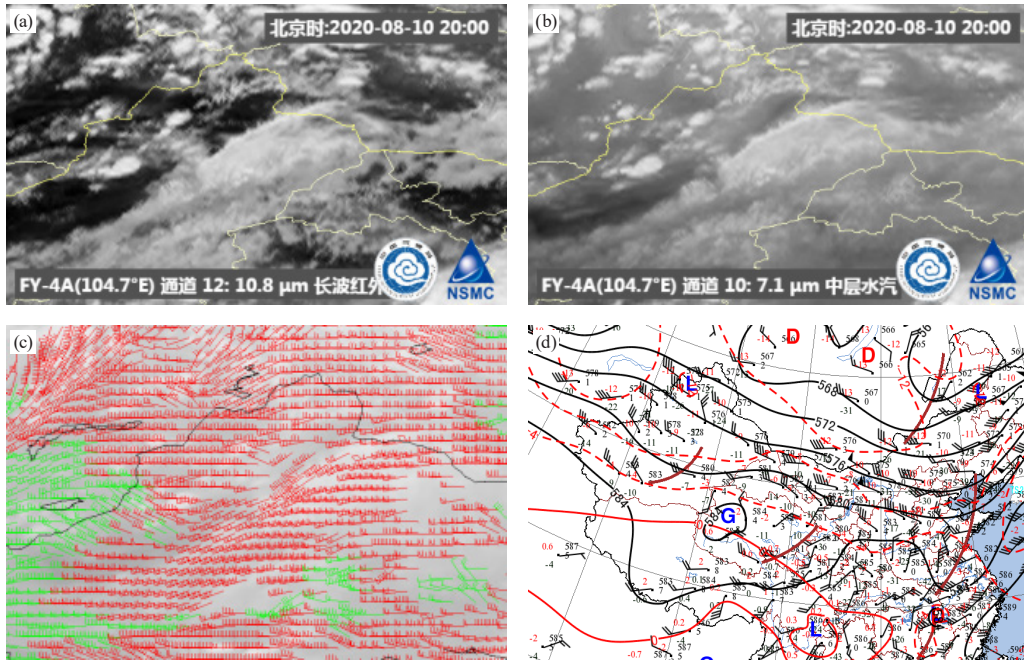


图6 2020年8月10日12时（世界时，下同）的天气图

(a) FY-4A 10.8 μm红外图像；(b) FY-4A 7.1 μm水汽图像；(c) FY-2G 6.9 μm水汽风；(d) 500 hPa

Fig.6 Weather map at 12:00 UTC (same below) 10 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind, (d) 500 hPa

前面，气压场的形势总体呈西低东高，西南风急流从印度向东北一直伸到宁夏。这样的元宝状环流形势说明：在中国中西部地区，存在大范围气流的汇合，在南北两支大范围气流汇合的地方，基本气流的斜压性增大。所以这种元宝状的环流形势是气旋生的先兆形势。当500 hPa图上出现元宝状环流形势时，预报员要非常警觉，未来可能发生气旋生。

触发气旋生的系统往往是对流层上部的一个斜压不稳定的短波槽。这样的触发短波槽，在水汽图像上表现为南侧有急流相伴的干带，即动力干带。图6c水汽图像上，叶状云凹陷部分的北边有一个暗区，其南侧与一支急流相伴。在这个个例中，图6a上位于新疆的叶状云系，其北侧边缘的曲率还比较小，但是可以察觉。叶状云系在新疆中部有一个曲率拐点，从曲率拐点向东北一侧，云系向北突出，说明有暖空气向北

2.1 2020年8月10—14日蒙古气旋发生前的环流形势和云图特征

在8月10日12时（世界时，下同）的500 hPa图（图6d）上，对流层中部中国周边的大范围环流形势呈元宝状：北边从东北伸向华北有一个长波槽，在北支长波槽的后面，气压场的形势总体呈西高东低，西北风急流从威海向东南一直伸到华北；南边从西藏高原中部伸向印度有一个南支长波槽，在南支长波槽的

爬升；向西南一侧，云系向南凹陷，说明有冷空气向南入侵。这样的云系外貌像一片叶子，所以起名为叶状云。叶状云以及以后发展出来的逗点状云系，是中纬度气旋生的重要标志，说明此地有一个高空槽以及与之相伴的槽前上升、槽后下沉的非地转气流，或是此地冷暖空气的汇合已经开始。

2.2 2020年8月10—14日蒙古气旋叶状云振幅加大和地面气旋中心形成

8月11日12时，这个叶状云系移到中蒙边界附近，曲率拐点在甘肃，其东北方向云系的曲率比前一天大大增加，说明系统在迅速发展。在图7上可以看到，叶状云向北突出部分的西北部边缘比东部边缘清晰，边界两侧亮度反差大，边界形状规则；而东侧、东南侧有羽毛状的多方向外流卷云。云系的西边缘清晰、东边缘模糊不清（存在外流）是暖输送带云

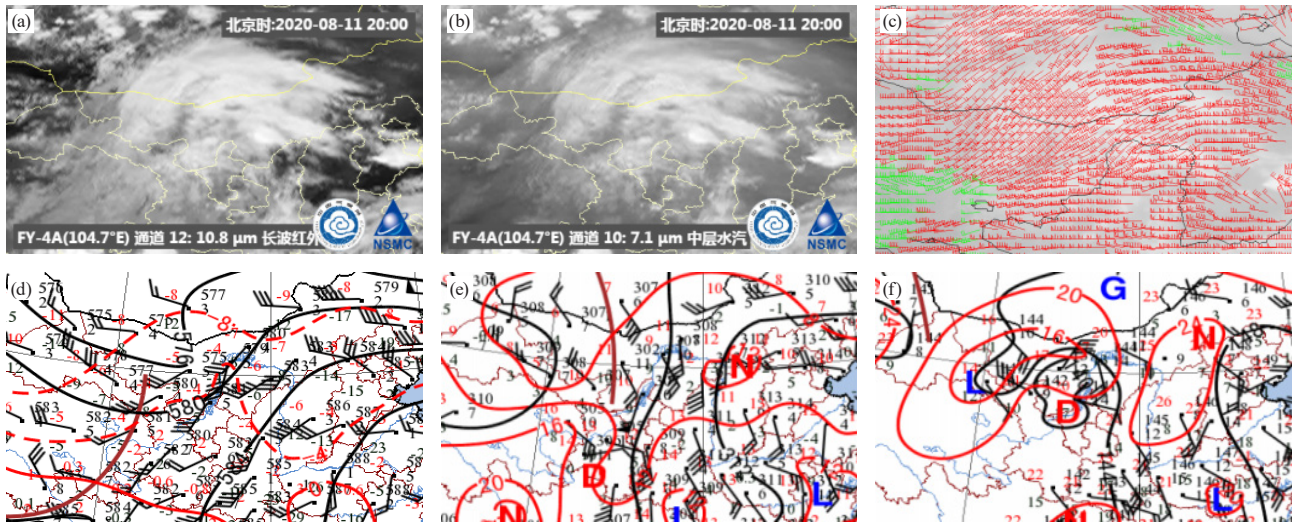


图7 2020年8月11日12时的天气图

(a) FY-4A 10.8 μm 红外图像; (b) FY-4A 7.1 μm 水汽图像; (c) FY-2G 6.9 μm 水汽风; (d) 500 hPa; (e) 700 hPa; (f) 850 hPa

Fig. 7 Weather map at 12:00 UTC 11 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind, (d) 500 hPa, (e) 700 hPa, (f) 850 hPa

系的重要特征。正如Carlson的概念模型所示,暖输送带起源于气旋暖扇区的对流层下部,在上升过程中凝结成云。上升到对流层中上部以后,受环境气流驱动,暖输送带云转向东流出云系。在8月11日12时地面天气图(图略)上,低压中心在甘肃、内蒙古、宁夏交界处形成,此处地面的高度在1000 m上下,此时850 hPa(图7f)上可以看到地面附近的低压中心。

再看此时卫星云图上的暖输送带云系与天气图上高空气流之间的关系。850 hPa图上从陕西南部向东到黄淮流域,在云图上向北突出叶状云系以南,有大片东南风。700 hPa图上,偏南风从淮河流域向北伸展到甘肃、宁夏、内蒙古以东的黄河中游地区。这两个层面的天气图说明,暖输送带起源于气旋暖扇区的对流层下部,但是在这些较低的层面,暖输送带气流尚未凝结成云,所以卫星云图上无法看到。环流形势与云图配合比较好的是500 hPa图,青海、甘肃中东部、内蒙古的风与卫星图像上云系基本符合,这说明在卫星云图上看到了暖输送带云的顶部。而此时700 hPa和850 hPa图则揭示了暖输送带的三度空间结构。

地面低压中心大约在迅速发展的叶状云中形成,在曲率拐点的前面作垂直线,使其与暖输送带云系的东南侧边界相交,交点位于沿暖输送带向东北方向大约2个纬距的地方^[8]。

8月12日00时,地面低压形成以后,其北侧的偏东风伴有上升气流,使冷输送带云系从暖输送带下面露出,云系的外貌随即由叶状转变为逗点状,见图8。云

系的轮廓由叶状转变为逗点状是一个重要的标志,说明此时气旋正在剧烈发展中。逗点状云系向西突出是因为此时冷输送带云系已经从暖输送带云系的下面露出并被看到了。但并不是在每一个具体的案例中都可以如Carlson的概念模型那样,把冷、暖输送带云系清晰地区分开。在图8的三个通道云图上(尤其在图8c可见光通道图上)可以看到,在逗点的头部,云的起伏相对比较平缓,这里是冷输送带云;而在暖输送带内部,因为有更多的对流,云的纹理结构更加清楚。

再看此时卫星云图上的冷输送带云系与天气图上高空气流之间的关系。从云图上看,这个时间的冷输送带在蒙古国,那里探空站非常稀少,但是仍可以看到700 hPa和850 hPa图上乌兰巴托和二连的东南风,这是冷输送带在对流层下部有东风的证据。

在此时的500 hPa图上,与干带相伴的西风从蒙古国中南部切入气旋中心,从宁夏向东到华北地区的西南风与云图上的暖输送带配合。700 hPa和850 hPa图上的偏南风大部分在叶状云以南的暖扇区里。

2.3 2020年8月10—14日蒙古气旋的云型和天气分布

气旋云型的轮廓并不是每个时间都如概念模型那样典型的。8月12日06时,在陕西、山西的北部和内蒙古的中部,暖输送云带在这里较薄(图9a和9b)。在00时的天气图(图8d~8f)上,这里500 hPa的偏西风在700 hPa偏南风的上面,有干冷平流。在06时的水汽风图(图9c)上,也可以看到云顶附近的风有指向

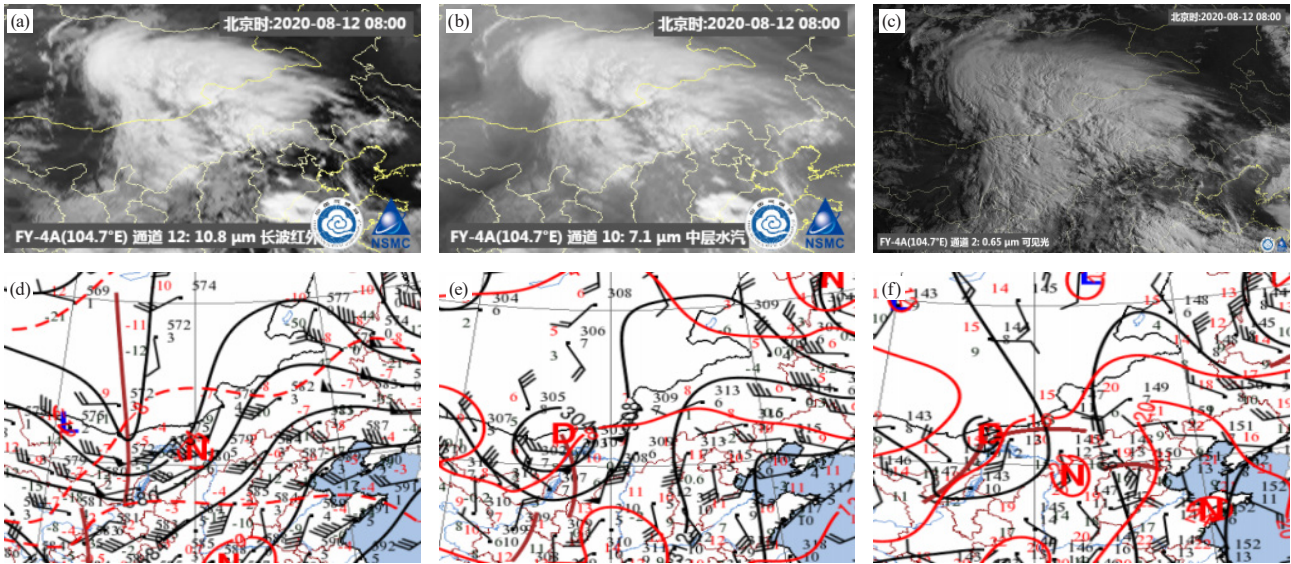


图8 2020年8月12日00时的天气图

(a) FY-4A 10.8 μm 红外图像; (b) FY-4A 7.1 μm 水汽图像; (c) FY-4A 0.65 μm 可见光图像;
(d) 500 hPa; (e) 700 hPa; (f) 850 hPa

Fig. 8 Weather map at 00:00 UTC 12 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm visible image,
(d) 500 hPa, (e) 700 hPa, (f) 850 hPa

暖输送带内部的分量; 如果云带上面的高空风平行于云的走向吹, 那么水汽可以向云带下游方向积累。如果云带上面的高空风垂直于云的走向吹向云带内部, 那么这样的三度空间结构可能有两种相反的效应。在8月12日06时的个例中, 由于云带上部干燥环境空气的卷入以及与之相伴的夹卷, 抑制了对流的发展, 使云系消散; 但是如果这时对流层下部特别暖湿, 那么高空干冷平流与之配合, 达到静力不稳定的程度, 则可以造成剧烈的强对流和恶劣天气。后者虽然很少发生, 却有著名的例子: 2007年3月3日21时造成大连供电中断的渤海湾强对流, 就是上面干冷、下面暖湿而诱发恶劣天气的情况。从这个时间的卫星导风图(图9e)上可以看到, 云顶附近的风有指向暖输送带内部的分量, 似乎与2000年8月12日06时(图9c)相似。但是2007年3月3日21时(图9d)渤海湾出现了强对流, 云图上可以看到对流单体的西部边界逆环境气流向西北方突出, 这是因为此时渤海湾地区对流层下部又暖又湿, 遇到高空冷平流(图9e), 使不稳定性增大, 激发了剧烈的对流天气。所以卫星云图只是天气诊断分析的工具之一, 云图、天气图, 特别是天气图上的要素记录, 要配合在一起仔细分析。

云带上面的高空风垂直于云的走向吹, 使云带变薄消散, 这种云型被称为干涌。干涌出现在气旋中心以南使某一段暖输送带云系变薄, 是经常可以看到的。以2012年7月21日北京大暴雨的气旋云型(图

9f~9h)为例与2000年8月12日06时的气旋云型(图9a~9c)进行比较。这两个气旋云型的轮廓有相似之处。气旋头部的冷输送带以及暖输送带北端段, 前者在贝加尔湖以东的西伯利亚, 后者在蒙古国; 干涌段前者在蒙古国到东北的北部, 后者在内蒙古中部到山西、河北; 暖输送带南侧发展之中的另一个波动, 其高空有从西藏高原东伸的反气旋脊与之相匹配的那一段, 前者从长江上游一直伸展到华北北部, 后者只从四川伸向陕西。显然, 如果只对比这一段云, 2012年的前者比2000年的后者范围更大, 强度更强, 造成的降水也严重得多。

2.4 2020年8月10—14日蒙古气旋的干带切入和气旋成熟

8月12日00时, 干带已经在冷输送带从暖输送带下面露出的地方切入气旋。在图10中, 干带表现为红外云图上的少云区和水汽图像上的暗区, 呈楔状; 在水汽风分布图中, 暗区的南侧伴有一支急流。8月12—13日是这个气旋的成熟期, 气旋头部的冷输送带云向西、向南卷入气旋的后部; 云系表现得非常有组织, 云系轮廓的边缘像几何线那样有规律。在气旋云系的外面, 冷输送带的东北侧、暖输送带的东南侧、干带的西侧, 各有一个可见光、红外通道的晴空区或水汽通道的暗区。它们分别代表气旋外围三个方向的补偿下沉气流: 气旋东北方向的东路冷空气、气旋东南方向的地面高压、气旋西侧高空槽后面的下沉气

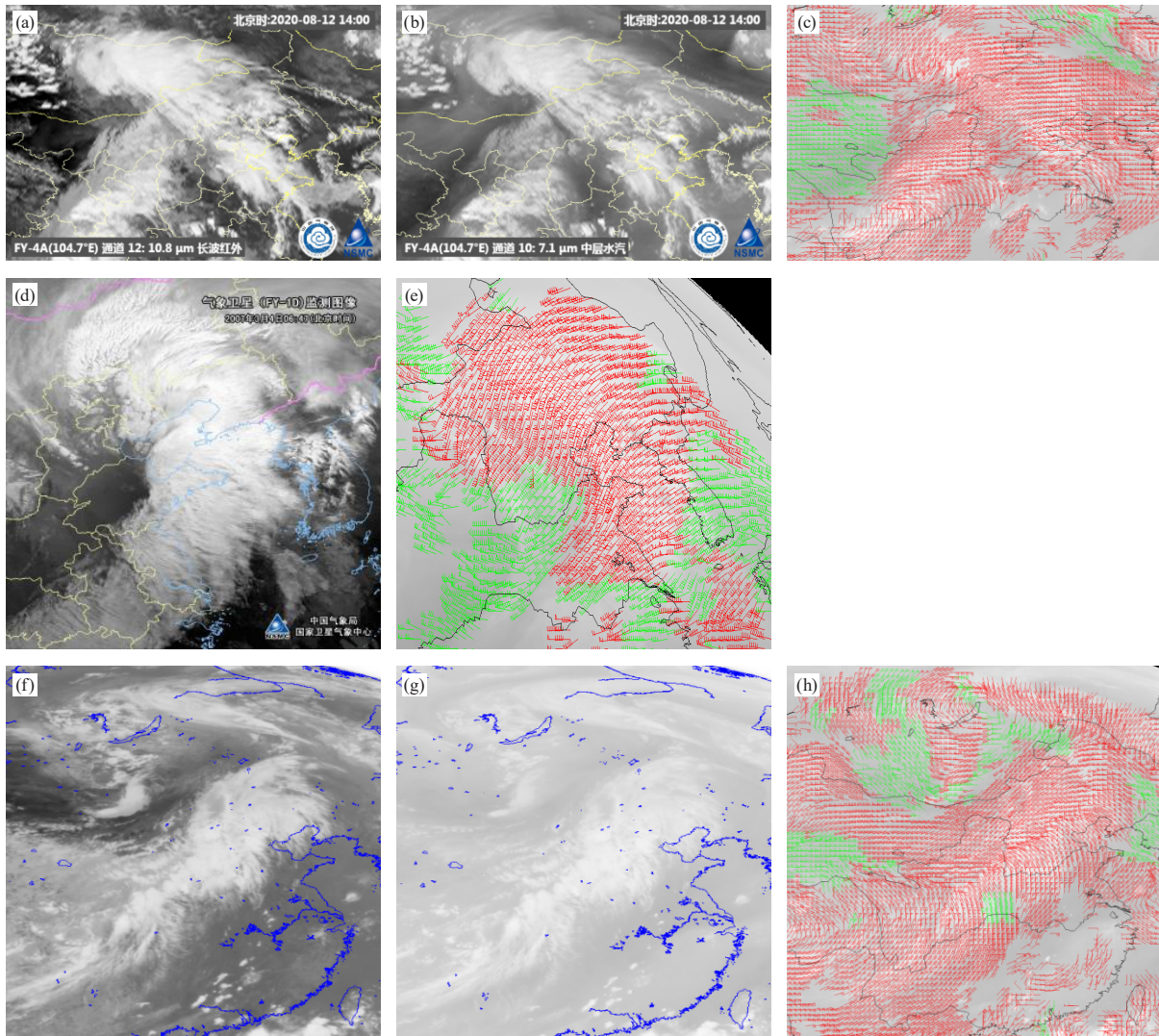


图9 2020年8月12日06时的天气图

(a) FY-4A 10.8 μm 红外图像; (b) FY-4A 7.1 μm 水汽图像; (c) FY-2G 6.9 μm 水汽风; (d) FY-1D 10.8 μm 红外图像; (e) FY-2D 6.9 μm 水汽风; (f) FY-2E 10.8 μm 红外图像; (g) FY-2E 6.9 μm 水汽图像; (h) FY-2G 6.9 μm 水汽风

Fig. 9 Weather map at 00:06 UTC 12 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind, (d) FY-1D 10.8 μm infrared images, (e) FY-2D 6.9 μm water vapour motion wind, (f) FY-2E 10.8 μm infrared image, (g) FY-2E 6.9 μm water and vapor image, (h) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind

流。广义地讲, 这些晴空区或暗区也是气旋云系的组成部分。正是与这些晴空区有关联的气压场形势与气旋一起, 共同形成了三条输送带云系。图10中云最密的地方在内蒙古的锡盟, 从这里到三个晴空区的距离都在1400 km上下, 正好是半个斜压不稳定波长。

2.5 2020年8月10—14日蒙古气旋的减弱消散

8月14日以后气旋减弱消散, 表现为云量的减少和云系组织程度的松散化, 8月15日00时(图11)表现出这样的特征。

在图9~图11中, 可以看到暖输送带云系南侧的

那一段, 在云带上空有一个辐散的反气旋脊。这个反气旋脊是从西藏高原上空伸过来的, 与中国季风的发展有着重要关联。下文分析与这个反气旋脊有关系的梅雨锋气旋。

3 梅雨锋气旋的云图特征

3.1 梅雨锋气旋和气旋云图特征的关联和差别

梅雨锋气旋是组成气旋簇的一系列气旋波里所处纬度最低的, 它在梅雨锋持续的时间段里, 一直处于气旋的初生阶段。①它属于气旋的初生阶段, 在云图上看不到冷输送带从暖输送带云系下面露出; 一旦看

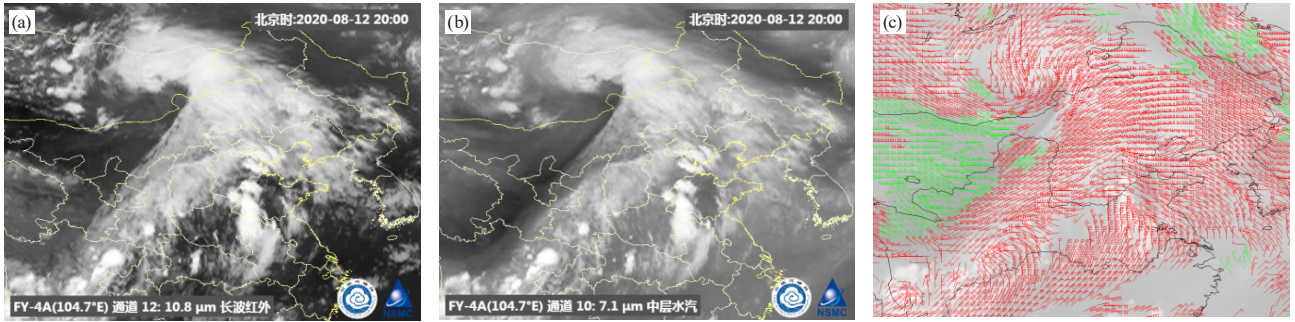


图10 2020年8月12日12时的天气图
(a) FY-4A 10.8 μm红外图像; (b) FY-4A 7.1 μm水汽图像; (c) FY-2G 6.9 μm水汽风

Fig. 10 Weather map at 12:00 UTC 12 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind

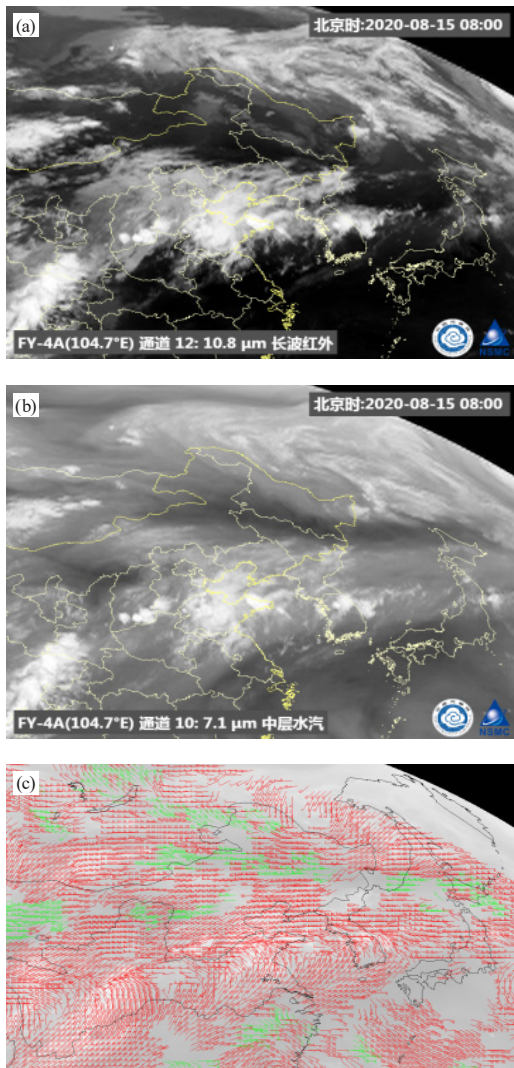


图11 2020年8月15日00时的天气图

(a) FY-4A 10.8 μm红外图像; (b) FY-4A 7.1 μm水汽图像; (c) FY-2G 6.9 μm水汽风

Fig. 11 Weather map at 00:00 UTC 15 August 2020

(a) FY-4A 10.8 μm infrared image, (b) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (c) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind

到则标志着梅雨锋气旋已经发展，云带的西段将会南压，这一次持续的梅雨锋天气过程将告一段落。②水汽图像上与干带相关联的暗区从梅雨锋云带的北侧接连越过，而不是向南从波动的西南侧侵入；一旦发生干区向系统西南侧入侵，也是本次过程将要结束的先兆。③它是在中国特定地理、地形条件下形成的天气系统。由于太平洋西部、印度洋提供的大量水汽以及西藏高原的动力、热力作用，中国东部夏季对流层下部有持续的东西走向的气旋性切变线，对流层上部从西藏高原向东伸展有持续的东西走向的反气旋脊，为梅雨锋云带准备了环流和水汽条件。④梅雨锋云带北侧的晴空区里，盛夏季节地面附近有非常强的太阳辐射非绝热加热，所以在对流层下部梅雨锋云带的两侧没有明显的温度对比，梅雨锋切变线在垂直方向上是直的，不是向北倾斜的。⑤这样的环流形势和要素三度空间结构条件，趋向于符合对称不稳定条件。⑥从卫星云图动画上看，沿梅雨锋云带有持久、剧烈的对流。⑦梅雨锋气旋的能量来源，主要不是位能与动能之间的转换，而是对流潜热释放，即第二类条件不稳定（CISK）机制。⑧梅雨锋过程的开始，不仅要看对流层下部沿副高边缘向北的西南风暖湿气流，而且要看东北方向的东路冷空气。东路冷空气表现为：水汽图像上向东偏南方向移动的干涌、对流层中部500 hPa图上既长又强的西北气流、对流层下部850 hPa甚至700 hPa上出现的暖切变。暖切变北侧的低层偏东风把东部海上的湿空气吹向陆地，此地湿层深厚，容易出现暴雨。⑨梅雨锋过程结束往往是在北边环流形势转变后，环流的经向度加大，本次雨带南压。⑩从卫星导风图上可以看到，从梅雨锋雨带上空辐散出来的气流主要流向雨带的东南侧，在那里汇合下沉。所以这一次梅雨锋天气过程结束后，副高会加强，下一次过程的位置可能更偏北。中国夏季季风期间持续的梅雨

锋雨带，从初夏的华南，向北推到盛夏的华北，都有这样的特征。

3.2 2020年7月6日纬向型梅雨锋云带的云图特征

图12是2020年7月6日的FY-4A卫星0.65 μm 可见光图、10.8 μm 长波红外、7.1 μm 中层水汽、以及FY-2G卫星6.9 μm 水汽风图，这些图代表了2020年7月上旬一次持续梅雨锋天气过程的云图特征。

在图12中三个通道的云图上可以看到，梅雨锋云带从长江上游的四川向东一直伸展到日本，宽度大

约有几百千米，云带里的云非常密实，其曲率不大，在中国大陆上略向南凹陷，从黄海到日本海略向北凸出。在密实的云区内部，在可见光图像上因为太阳光照角斜视，可以看见发展旺盛的对流云在低云上面的影子；在红外图像上，云顶高度起伏也很大；在图像动画上，对流云像锅里烧开的水那样剧烈地翻滚。这些都是梅雨锋南北两侧的气流在此汇合，云带上持续有剧烈对流活动的证据。

云带的北侧边界比较规则，从亮到暗的过渡发生

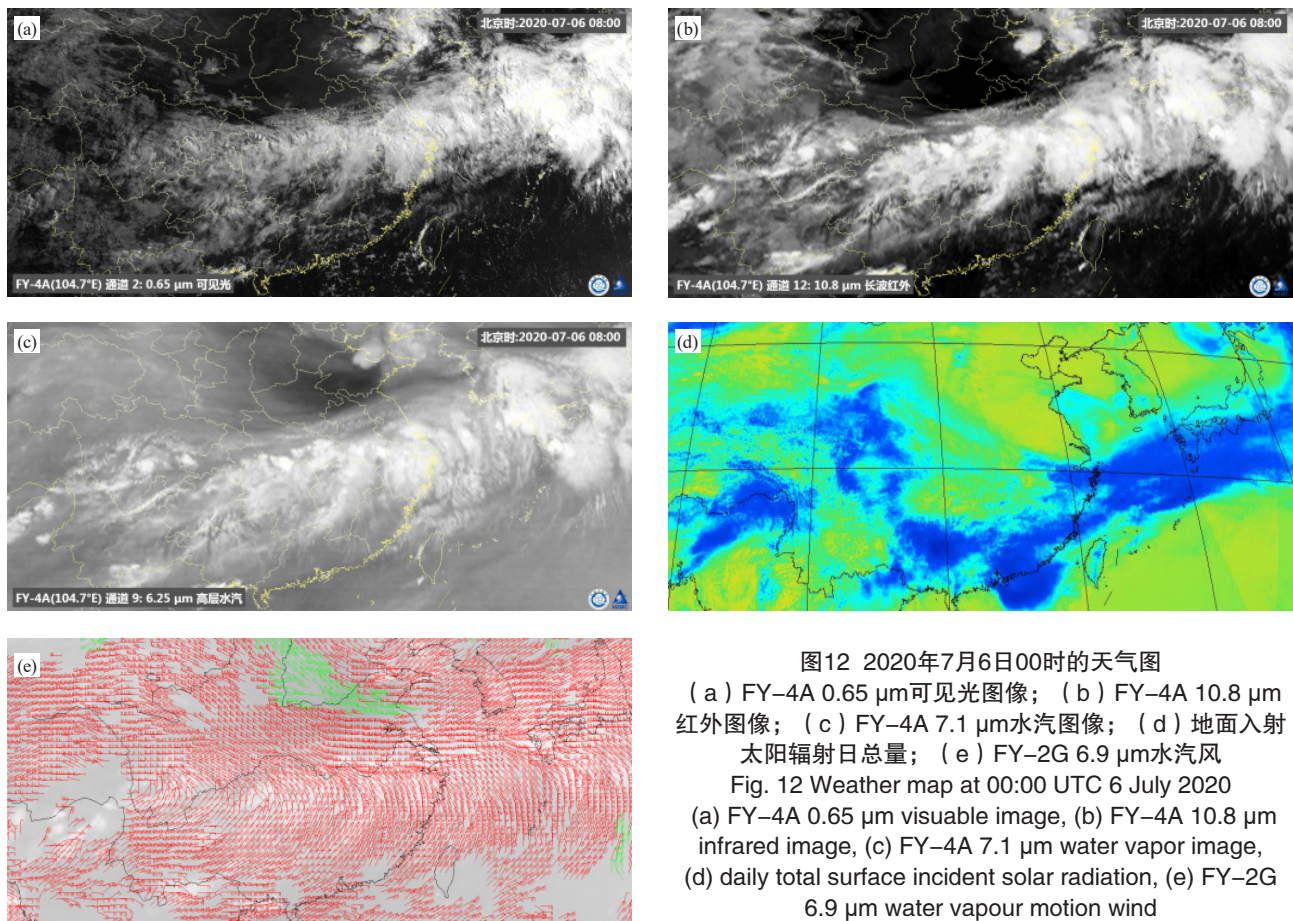


图12 2020年7月6日00时的天气图

(a) FY-4A 0.65 μm 可见光图像；(b) FY-4A 10.8 μm 红外图像；(c) FY-4A 7.1 μm 水汽图像；(d) 地面入射太阳辐射日总量；(e) FY-2G 6.9 μm 水汽风

Fig. 12 Weather map at 00:00 UTC 6 July 2020

(a) FY-4A 0.65 μm visible image, (b) FY-4A 10.8 μm infrared image, (c) FY-4A 7.1 μm water vapor image, (d) daily total surface incident solar radiation, (e) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind

在一个较短的距离范围内，这里图像反差大。云带以北，在河南、山东以及日本海，水汽图像上有暗区，可见光和红外图像上有晴空区。这里是梅雨锋北侧西风气流中的波动。在梅雨锋天气过程持续期间，对流层中部长而且强的西偏北气流中，连续出现这样的小振幅波动东移，在对流层下部则转变为梅雨锋北侧的东偏北风。

梅雨锋云带的南边界从亮到暗的过渡区，比云带的北边界宽，有卷云从云区内向西南方向流出云带。在云图动画上还可以看见，有低云随低层西南风流入云带。在水汽风图上可以看见云带上空的辐散气流：

云带的北边界大致与西风急流的核一致，云带的南边界大致与从青藏高原东伸高压脊的位置一致。云带北侧的西风急流，从淮河、黄海到日本海，风速向东增大，说明有风速辐散；在云带的南侧有一致的北风流出发，说明有风向辐散。水汽风图上的辐散区，正好在剧烈翻滚中的对流云带的上面。

卫星云图从上往下看，主要看见了云的顶部。只有在较薄卷云的缝隙里，才能看到下面的低云。天气图则能看到对流层中下部的环流和要素。图13是2020年7月6日0时的天气图。先看对流层下部的湿度条件。500 hPa、700 hPa和850 hPa三个层面的绝对湿度

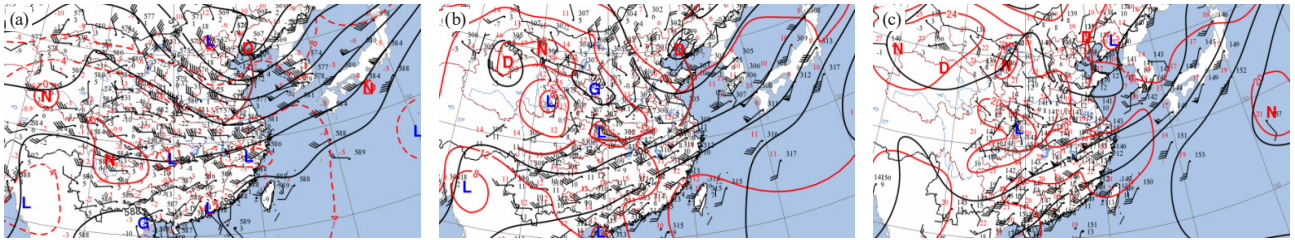


图13 2020年7月6日00时的天气图
(a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa
Fig. 13 Weather map at 2020-07-06 00:00
(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa

分别为5 g/kg、10 g/kg和15 g/kg，这是近于饱和的绝对湿度，与700 hPa和850 hPa上梅雨锋雨带南侧的西南风急流和暖切变有关系，它们给这里输送了水汽。

再看系统的垂直结构。在对流层中下部三个层面的天气图上，500 hPa南北两支气流沿长江的汇合渐近线，700 hPa和850 hPa上从四川到安徽中部的暖切变在垂直方向上位置大致重合，它们与图12e水汽风图上的辐散线也大致重合。这说明梅雨锋系统在垂直方向上是竖直的。在图13b和13c上，700 hPa和850 hPa梅雨锋切变线南北两侧温度分相当均匀，没有明显的温度梯度。在华北平原和黄淮地区，虽然500 hPa处于槽后的西北气流里有冷平流，850 hPa的温度却并不低，这是地面附近强烈太阳入射辐射的非绝热加热作用导致的。图12d显示，地面入射太阳辐射日总量在梅雨锋北侧的华北平原、黄淮地区，比梅雨锋南侧海上的副高地区还要大。正是地面入射太阳辐射在地理分布上的差别，使梅雨锋切变线北侧冷平流区里的温度升高，切变线两侧的温度趋于一致，因此梅雨锋系统的垂直结构是直的。在对流层下部，又暖又湿，静力稳定度向中性靠近，等 θ 面趋于垂直；在对流层上部，这里有副热带急流，等 M 面趋于躺平。这有利于趋向对称不稳定条件，所以沿梅雨锋雨带有剧烈的对流。另外，北边接受到更多的太阳入射辐射，也起到把中国的季风雨带从5月初的华南向北推到8月初的华北的作用。

4 经向型雨带云型和环流特征

4.1 对流层上部南亚高压的第二种模态和经向型云带之间的关联

中国梅雨锋雨带持续稳定的环流形势，在对流层下部有气旋性汇合，在对流层上部有反气旋性疏散，两者相互耦合。对流层上部环流形势对雨带的位置、走向和发展程度有重要的影响。

朱福康等^[9]指出，对流层上部的南亚高压有两种模态。第一种模态即梅雨锋雨带环流形势。这种

模态下，反气旋中心位于西藏高原上空，脊线向东伸向中国东部和西太平洋，它的北侧有一支很强的副热带急流。这支副热带急流所在的地方，对流层顶高度突然改变，其南侧对流层顶高、北侧对流层顶低。从副热带急流向南，它和西藏高原东伸反气旋脊线之间的东西向带状地区最符合对称不稳定条件，雨带即在此处。

与持续的梅雨锋雨带相伴，在对流层中上部有强烈的潜热加热。梅雨锋雨带上空被潜热加热的气流，在对流层上部疏散，并继续向东、向南扩散，在那里下沉，因此对流层下部的副热带高压得以加强北抬。到下一次天气过程发展起来时，雨带的位置会更偏北，或对流层上部形势转变为第二种模态。

第二种模态的对流层上部反气旋中心，位于西藏高原以西的中亚上空，有的文献称其为伊朗高压。在中国东部，对流层上部有一个很深的槽，槽的下面或后面是少雨区，槽前的偏南气流是更向东的日本附近另外一个对流层上部反气旋的组成部分。

偏南气流中，有经向度很大的云带。这支经向型的云带，往往不如前文所分析的梅雨锋云带连续和密实。梅雨锋云带常常发生在初夏季节，而经向型的云带发生时间更晚一些，一般在7—8月。经过一段时间持续梅雨锋云带在对流层中上部的潜热加热，高空气流向东、向南扩散下沉，对流层下部的副热带高压加强北抬，到达日本上空甚至更北。副热带高压以南的西太平洋上，有热带扰动或台风活动，它们的外围气流可以与经向型云带发生相互作用。在低层气流指向（离开）云带的地方，云带加强（减弱）；一旦热带扰动或台风爬上云带，与云带后面的冷空气相互作用，变性为温带气旋，则可以发生灾难性的区域暴雨。所以在关注经向型云带的天气时要注意：云带的密实部分，在对流层下部有气旋性涡度或环境的水汽输送；在对流层上部从卫星导风图上可以看到明显的高空辐散。如果云带中的某一段，高空卫星导风气流

平直, 有指向云带内部的分量, 低层环流有离开云带的分量, 那么云带的这一段不活跃。

4.2 2020年8月27日经向型天气过程的云图特征

图14是2020年8月27日的FY-4A卫星0.65 μm 可见光图、10.8 μm 长波红外、7.1 μm 中层水汽以及FY-2G

卫星6.9 μm 水汽风图, 这些图代表了2020年8月下旬一次经向型形势天气过程的云图特征。图15是2020年8月27日00时的天气图, 可以看到在天气系统的不同部位, 对流层中下部的环流和要素。

图14中从华北向南伸展到中南半岛, 云图上是大

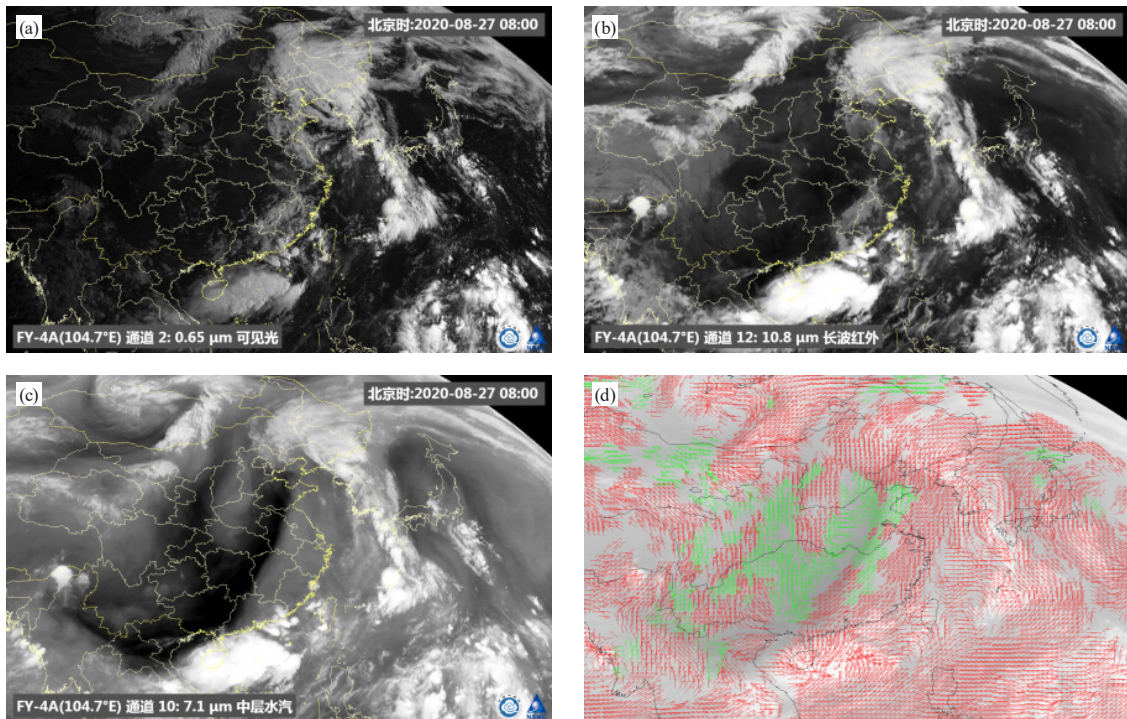


图14 2020年8月27日00时的天气图

(a) FY-4A 0.65 μm 可见光图像; (b) FY-4A 10.8 μm 红外图像; (c) FY-4A 7.1 μm 水汽图像; (d) FY-2G 6.9 μm 水汽风

Fig. 14 Weather map at 00:00 UTC 27 August 2020

(a) FY-4A 0.65 μm visible image, (b) FY-4A 10.8 μm infrared image, (c) FY-2A 7.1 μm water vapor image,

(d) FY-2G 6.9 μm water vapour motion wind

范围的晴空区, 水汽图像上从山东伸向越南北部的是暗区。在这个晴空区的范围里, 各层的风都是北风, 而且北风随高度增加, 热成风是北风。对应图15中的700 hPa和500 hPa上, 西藏高原比中国东部更暖。

经向云带从东北经东部沿海各省伸向南海北部和越南中南部。东北的云系特别密实, 黄海北端朝鲜半岛沿岸的热带气旋正在变性, 变为温带气旋, 它的云型已经不对称。北侧演变为暖输送带云, 干带从气旋中心南侧入侵。

云带中南部密实的地方有两段。一段从朝鲜半岛到日本以南, 这里是热带气旋南侧的注入云带。另一段在南海北部。这两个地方对流层下部都有气旋性涡度和汇合气流, 对流层上部都有反气旋辐散。

从山东到广东的沿海各省, 云带变得非常松散。云带上空 850 hPa、700 hPa、500 hPa和卫星导风图上都是偏南风, 其在热带气旋的南侧。这几个层面的风

还都有西风分量, 从陆地吹向海洋。

5 总结

本文介绍了中国夏季风期间最重要的三种天气过程: 气旋、梅雨锋和经向型云带, 以及它们的云图特征、三度空间结构和发展演变过程。

气旋是中纬度冷暖空气汇合最基本的天气过程, 它由三条输送带组成: 暖输送带、冷输送带、干带。暖输送带云系西北侧边缘清晰、东南侧边缘模糊不清, 冷输送带在地面气旋中心以北从暖输送带下面露出, 干带南侧伴有急流从冷暖输送带交汇处切入气旋。

梅雨锋气旋是气旋簇中一系列气旋波里所处纬度最低的。在西藏高原东侧的东部地区, 由于特定的地形、地理条件所造成的动力、热力作用, 造成对流层上部从高原东伸的脊与北边的副热带急流夹得紧, 两者之间有多方向的外流; 而对流层下部有极其潮湿的

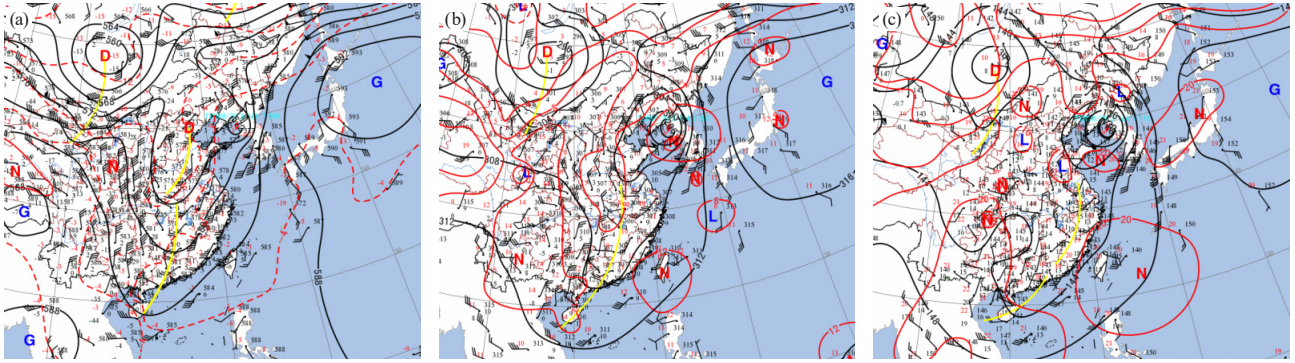


图15 2020年8月27日00时的天气图
(a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa
Fig. 15 Weather map at 00:00 UTC 27 August 2020
(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa

东西向切变线。这样的大气环流三度空间结构配置，趋向于符合对称不稳定条件，中国东部梅雨锋气旋得以稳定持续维持。也正是由于稳定持续雨带上空的潜热加热，使环流形势发生调整，或副高加强雨带北抬，或形势转变为经向型。

经向型环流形势在中国东部有一个很深的槽。槽的后部是好天气区，槽前偏南气流中有经向度较大的云带。云带里不同的区段云系密实程度有差异，这与西太平洋海面上热带扰动的活动以及沿云带低层气流中的涡度有关。

要关注天气系统的尺度。不同尺度的天气系统，有不同的行为规律。对于天气尺度系统，更大尺度的汇合是重要的。它是带来斜压不稳定的两个基本条件之一：平均气流有较强的热成风，即有南北温度对比。南北温度对比，既来自太阳入射辐射的纬度变化，也来自更大尺度的汇合。斜压不稳定的第二个基本条件是合适的波长。最有利于天气尺度系统发展的波动，是波长为2800 km的Rossby波。

重要天气过程一定伴随着贯穿整个对流层的垂直运动。通过贯穿整个对流层的上升运动，对流层上、中、下部的环流紧密地联系在一起。对流层上部的高空槽，压在对流层部的残留斜压区上空，系统立即发展。发展以后，强烈上升运动区的上面有反气旋性外流，下面有气旋性内流。

如果云带上面的高空风平行于云的走向吹，那么水汽可以向云带下游方向积累。如果云带上面的高空

风垂直于云的走向吹向云带内部，那么这样的三度空间结构可能有两种相反的效应：云带上部干燥环境空气的卷入以及与之相伴的夹卷，抑制对流的发展，使云系消散；但是如果这时候对流层下部特别暖湿，那么高空干冷平流与之配合，达到静力不稳定的程度，则可以造成剧烈的强对流和恶劣天气。

天气系统发展的能量来源之一是水汽。对流层下部大范围深厚的暖湿气流，表现为12 m/s以上的低空风急流，相对湿度从地面到700 hPa几乎饱和，绝对湿度达到以下的数值：925 hPa：19~20 g/kg，850 hPa：15~16 g/kg，700 hPa：10~11 g/kg，500 hPa：4~5 g/kg。

参考文献

- [1] Schultz D M, Winters A C, Colle B A, et al. Chapter 16 Extratropical cyclones a century of research on meteorology's centerpiece. *Meteorological Monographs*, 2019, 59: 16.1-16.56.
- [2] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *Journal of Meteorology*, 1947, 4: 135-162.
- [3] Hoskins B J, James I N. *Fluid dynamics of the midlatitude atmosphere*. Chichester: Wiley Blackwell, 2014.
- [4] Carlson T N. Air flow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(10): 1498-1509.
- [5] Houze R A. *Cloud Dynamics*, Second Edition. New York: Academic Press Elsevier, 2014.
- [6] 詹姆斯·霍顿, 等. *动力气象学引论* (原书第五版). 段明铨, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [7] Wu G X, Duan A, Liu Y, et al. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook. *National Science Review*, 2015, 2(1): 100-116.
- [8] M J·巴德, 等. *卫星与雷达图像在天气分析预报中的应用*. 卢乃锰, 等译. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 朱福康, 陆龙骅, 陈咸吉. *南亚高压*. 北京: 科学出版社, 1980.