

# 2017年8月13日长江中上游强降水云系形成分析

王琼洁\*, 史欣怡, 楚岱蔚

杭州市余杭区气象局, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年10月15日; 录用日期: 2022年11月14日; 发布日期: 2022年11月23日

## 摘要

本文利用ERA-5再分期资料、每日降水资料及国家卫星气象中心发布的云图资料以及美国NoAA网站发布的Himawari云图资料, 对2017年8月13日长江中上游强降水过程云系的形成从实况、环流形势以及热力、动力和水汽诊断方面进行了分析, 发现与长江中上游地区强降水过程对应的云系落区主要位于云系北侧, 达到大暴雨或特大暴雨等级; 此次降水云系主要由华南到东海一带上空多云团演变发展形成; 高低空环流形势上, 地面有一准静止锋位于长江流域, 锋前形成江淮气旋; 500 hPa位势高度上表现为欧亚中高纬度呈两槽一脊的经向环流形势, 副热带高压北抬西伸, 冷暖气流于江淮流域交汇, 低层有加强的偏东气流将大量水汽输送至我国南部地区, 江淮流域建立的低涡、切变线形势, 低涡、切变线是准静止锋对应云系形成和维持的基础; 热力方面, 中纬度地区有物质以及能量密集交换, 动力方面, 垂直速度场上东海-华南一带有三个垂直上升运动大值区, 高低层散度与之配合, 加强了上升运动, 对应云系的发展; 水汽方面, 700 hPa上青藏高原南部到东海一带为相对湿区, 云系即生成在该湿区一带, 之后相对湿度中心减弱, 此时云系新生、发展也减弱, 主要沿着湿区想东北方向移动, 且在海上的湿中心加强。

## 关键词

长江中下游, 强降水, 副热带高压, 云系发展

## Analysis of Formation of Heavy Precipitation Clouds in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River on 13th August, 2017

Qiongjie Wang\*, Xinyi Shi, Daiwei Chu

Yuhang District Meteorological Administration, Hangzhou Zhejiang

\*通讯作者。

## Abstract

In this paper, the formation of heavy precipitation clouds in the upper and middle reaches of the Yangtze River on 13th August, 2017 was analyzed from the perspectives of the actual situation, circulation, and the diagnosis of heat, power and water vapor by weather map released by the Central Meteorological Observatory website, daily precipitation data, cloud map data released by the Satellite Meteorological Center, and Himawari cloud data published by the US NoAA website. It is found that the cloud system falling area corresponding to the heavy precipitation process in the upper and middle reaches of the Yangtze River is mainly located on the north side of the cloud system, reaching the level of heavy rainstorms or extraordinarily heavy rainstorms, and the precipitation cloud system is mainly formed by the evolution and development of a cloudy group over the South China Sea to the East China Sea. In the situation of high and low air circulation, there is a quasi-stationary front on the ground located in the Yangtze River basin, and the Jianghuai cyclone is forming in front of the front. The 500 hPa geopotential height shows a meridional circulation pattern with two troughs and one ridge at middle and high latitudes in Europe and Asia. The subtropical highs stretch north and west, and the cold and warm air flow at the junction of the Yangtze and the Huaihe valleys. The enhanced easterly air flow at the lower level transports large amounts of water vapor to southern China. The vortex and shear line conditions established in the Yangtze and Huaihe River basins, and the low vortex and shear line are the basis for the formation and maintenance of the quasi-stationary frontal cloud system. In terms of thermal power, there are material and energy-intensive exchanges in mid-latitude regions, and in terms of dynamics, the vertical velocity field on the East China Sea and South China Sea has three large areas of vertical upward movement, and the high and low levels of divergence cooperate to strengthen the upward movement and correspond to the development of cloud systems. In the aspect of water vapor, the area from the southern part of the Qinghai-Tibet Plateau to the East China Sea is a relatively wet area at 700 hPa. The cloud system is generated in the wet area, and then the relative humidity center weakens. At this time, the cloud system is new and its development is weakened, mainly along the wet northeast direction. Move and strengthen in the wet center of the sea.

## Keywords

The Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Heavy Precipitation, Subtropical High, Cloud System Development

Copyright © 2022 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

强降水是我国常见的影响极大的天气之一。我国强降水的地域分布非常广，时间跨度也比较大。局地强降水和大范围持续性强降水往往导致严重洪涝灾害。因而，强降水的研究和预报问题一直是我国气象工作者最关心的天气问题之一。

从天气学上来看，强降水是多种天气尺度系统相互作用的产物。大尺度天气系统提供了强降水产生的环流背景中、小尺度天气系统直接导致强降水的产生[1]；从云物理学上来看，降水的发生发展与云的

结构、发生发展演变过程有着直接的关系。强降水形成是云系宏微观结构发展与变化导致的，其物理过程十分复杂，不仅涉及水汽、水滴以及冰晶的相变和碰撞，还引起微物理过程和动力过程的非线性作用[2]。

长江流域中上游地区范围覆盖了湖北、湖南、四川、重庆、青海、西藏、陕西等多个省市，在全国经济中占有重要的战略地位，但频繁的洪涝灾害严重地威胁着两岸人民。此地区地形较复杂，位于我国西南部的青藏高原对其早涝的发生起着重要作用，同时，大尺度大气环流持续性异常也可能造成长江流域早涝的发生，以上是中上游地区早涝的主要原因。所以，本论文通过卫星云图、地面降水以及大尺度再分析等资料，对长江中上游地区 2017 年 8 月 13 日发生的强降水过程云系形成进行系统分析，以期认识强降水过程的形成和发展机制，防御和减轻早涝所带来的灾害，具有重要的科学意义和现实意义。

短时强降水属强对流天气，与中尺度对流系统密切相关。近年来，国内外开展了许多有关中小尺度对流系统云系形成的研究，韦惠红等[3]利用 FY-2C 卫星云图，结合卫星云图资料和高空、地面常规观测资料，总结提炼出低涡冷槽东移型、冷切变南压型、春季暖倒槽型、梅雨锋切变型和台风西移型 5 种区域性暴雨的卫星云图模型；郑永光等[4]发现淮河流域持续暴雨是由梅雨锋云带及与之相伴随的中尺度对流系统造成的；Fabry Frederic 等[5]利用常规气象资料 and 多个波段的雷达回波资料分析了积层混合云的降水，发现层状云降水对浅对流云的发展有明显影响。Sandra E 等[6]利用常规观测资料和卫星资料等多种资料分析了热带大洋上的积层混合云系中的层状云与对流云区的热力、动力结构，发现热带海洋面上的积层混合云中，对流泡附近高空存在辐散，而低层存在辐合；杨培才、张琦娟[7]选择 1976 年夏季北京地区的四次对流性暴雨，三种类型降水过程的雷达回波回波特征进行了探究，发现云体的连续生成和合并，有利于造成较大局地降水；王昂生等[8]利用环北京地区 1980 年至 1983 年 6 月到 9 月的 196 个个例的地面降水和雷达回波等资料，研究环北京地区云降水特征。发现夏季降水过程按不同结构来分，可分为对流型、积层混合型和层状型三种类型降水，尤以对流型降水的次数最多；雷蕾等[9]利用遥感及加密观测资料详细分析了 2005 年 6 月 25~26 日一次低涡过程对流云和降水的结构特征，发现此次低涡过程中出现的中尺度对流云团(MCC)经历了十几小时的发展演变，云顶亮温低达 $-90^{\circ}\text{C}$ ，导致了局地暴雨出现；强西南低空急流水汽输送和水汽辐合与高空偏西风急流的相互作用为对流云团和强降水的形成提供水汽和不稳定条件。那么，在 2017 年 8 月 13 日长江中上游这次强降水过程中，云系的形成和发展是怎样的？为这次降水过程提供了怎样的条件？仍需我们进行更深入一步的研究与探讨。我们基于此前提开展我们的工作。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

本文采用 2017 年 8 月 13 日的 ERA-5 再分析资料及卫星气象中心发布的云图资料、美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)网站发布的 Himawari 云图资料，文内时间均为北京时间。

### 2.2. 方法

本文在分析过程中用到了假相当位温，在此对其进行简要介绍。通常在绝热情况下，气块的温度不但随气压产生变化，还受水汽凝结和蒸发的作用，基于此，引入一个衡量空气冷暖程度的物理量假相当位温 $\theta_{se}$ 。假相当位温( $\theta_{se}$ )是指：气温经湿绝热过程，将所含的所有水汽凝结释放，再沿干绝热过程到 1000 hPa 时所具有的温度，其计算公式是：

$$\theta_{se} = T \left( \frac{1000}{p-e} \right)^{R_d/c_{pd}} \exp \left( \frac{Lr}{c_{pd}T_c} \right), \quad (1)$$

其中,  $\theta_{se}$  是温度、气压、水汽含量的函数, 是表征温压湿综合的物理量, 假相当位温不但考虑了气压对气块温度的作用, 并且还把凝结潜热对气块的增温作用, 也做了最大限度的考虑, 因此假相当位温在干、湿绝热过程中都具有相当的保守性。由 T-lnp 图可知, 在同一气压下,  $\theta_{se}$  越大, 代表空气越暖湿,  $\theta_{se}$  越小, 代表空气越干冷。

### 3. 暴雨过程概况和天气形势

#### 3.1. 暴雨过程概况

2017 年 3 月 13 日长江中下游地区发生强降水过程, 此次过程主要影响范围较广, 云南、湖南、江西、湖北、安徽、江苏、浙江等地均受降水影响。由地面自动观测站观测到的逐小时降水分布可知, 13 日 06 时(图略)降水呈东北-西南带状分布, 降水中心主要位于湖南北部, 安徽南部, 降水强度  $> 10 \text{ mm/h}$ 。随着降水强度逐渐增强, 到 08 时(图略)降水带上出现多个降水中心, 且云南西部降水强度最大, 可达  $20 \text{ mm/h}$  以上。降水中心沿降水带逐渐向东北方向移动, 到 11 时(图略)降水中心移动到湖北南部, 降水强度减弱。11 时~16 时降水中心少动, 一直维持在湖北南部, 强度约为  $10\sim 20 \text{ mm/h}$ 。随后降水强度减弱, 并迅速向东北部移动, 影响江苏、浙江等地。由逐 6 小时降水分布(图略)可知, 02~14 时降水较强, 6 小时降水量  $> 60 \text{ mm}$ , 降水大值区主要位于湖南北部和湖北南部。整个过程造成两地约有  $100\sim 250 \text{ mm}$  降水, 达到大暴雨或特大暴雨等级, 由此可见, 对这次强降水过程云系的形成和发展建立清晰、全面的认识是十分有必要的。

#### 暴雨云系分布与演变特征

##### 1) 从可见光云图上分析暴雨云系分布特征

从卫星云图上可以看到(图 1), 2017 年 08 月 12 日 21 时, 我国华南及东海上空沿西南-东南方向依次分布五个对流云团(A~E)和一条对流云带(F), 其中 B、E 发展较为强盛, 直径可达  $2 \text{ km}$  以上, 中心强度约  $-70^\circ\text{C}$ , A、C 中心强度与 B、E 相当, 但范围较小, D 为典型的逗点云系, 但强度较弱, 中心强度约  $-60^\circ\text{C}$ , 其东部有纤维状卷云分布, 南部与带状云系 F 相连。从云系分布上可以看出, 华南地区中层  $500 \text{ hPa}$  左右可能伴有较强的西南风, 西部多云团侧向排列分布可能与青藏高原或西南涡有关, 且沿海部分空气暖湿, 北部有干冷空气南下, 云团 D 和云带 F 组成典型的锋面云系, 且低压中心位于 D 中心附近。

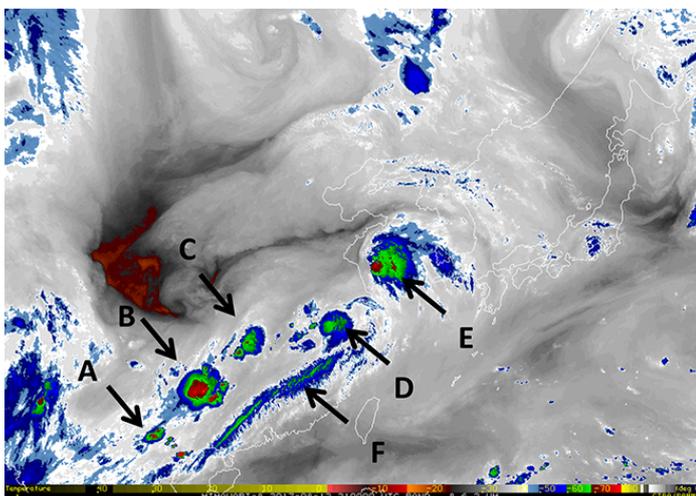
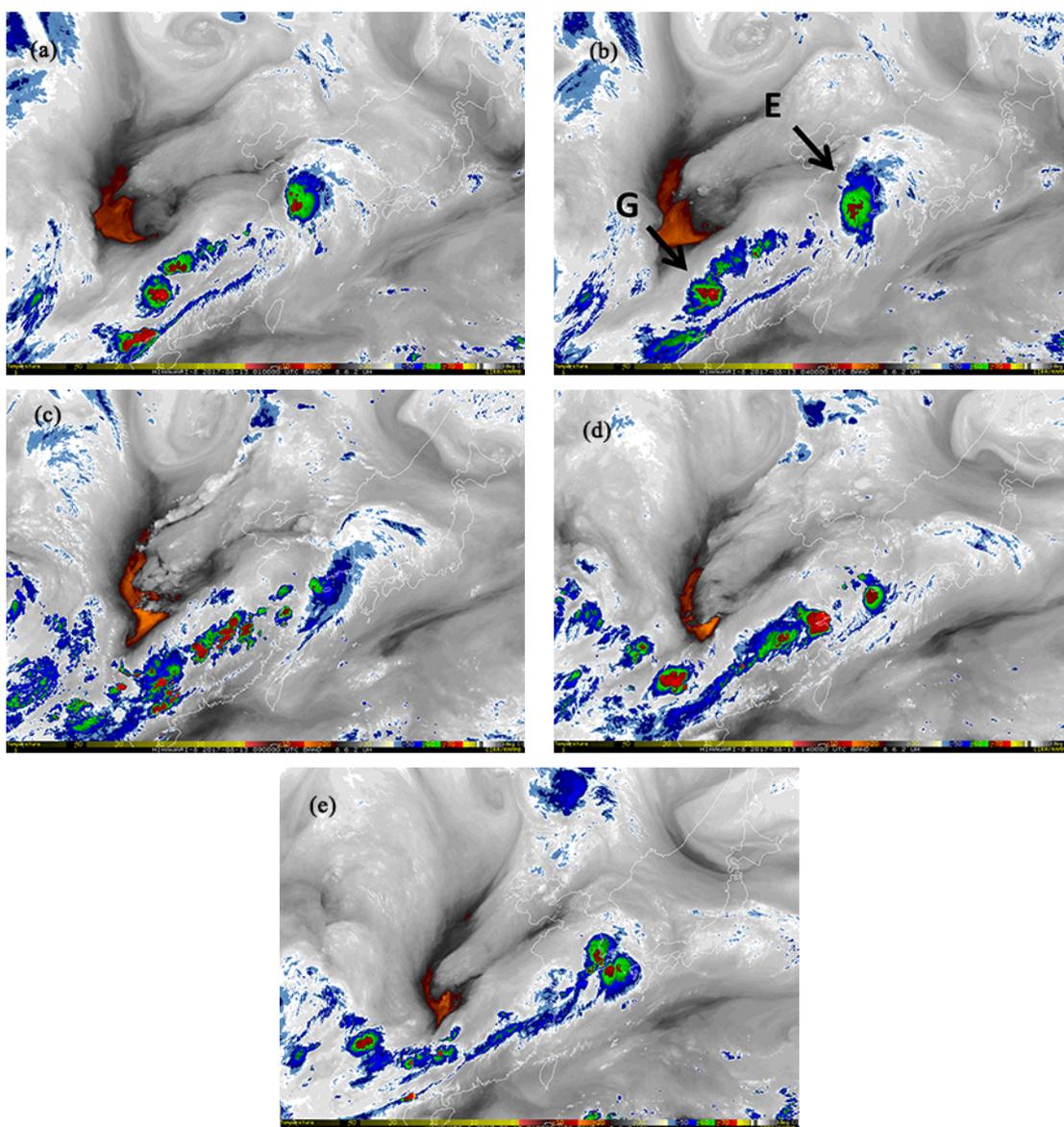


Figure 1. Satellite cloud image at 21:00 on August 12, 2017 (unit:  $^\circ\text{C}$ )

图 1. 2017 年 08 月 12 日 21 时卫星云图(单位:  $^\circ\text{C}$ )

## 2) 从可见光云图上分析暴雨云系演变过程

从 13 日 01 时至 21 时的卫星云图可以发现(图 2), 13 日 01 时, 云团 A 逐渐加强, 并向西南方向移动, 与云带 F 西南部云系合并, 云团 C 略有加强并与后部 B 云团合并, 逗点云系 D 减弱消失, 海上 E 云团维持少动。13 日 04 时, 带状云系减弱, 其北部多云团合并, 形成广东北部较强的云团 G, 其东北侧分布有小的残留云系。此时西部云团受偏西风影响, 呈东西向分布, 且风场相对较弱, 云团四周较为光滑。而海上云团受偏南风影响, 呈现南北向分布。到 09 时, 云团 E, G 均减弱消散, 且在强西南风的影响下成东北 - 西南分布, 云团前部残留云系新生形成多条带状云系, 随后该多条带状云系发展合并, 在东部沿海形成较强的对流云团(14 时), 随后入海, 受下垫面影响迅速减弱后, 再起前部新生, 与海上气团形成如图所示的“蝴蝶状”云系(21 时), 并逐渐东移, 其后部形成的强度 $-50^{\circ}\text{C}$ 的云带, 影响浙江、福建等地区, 到 14 日逐渐消散。

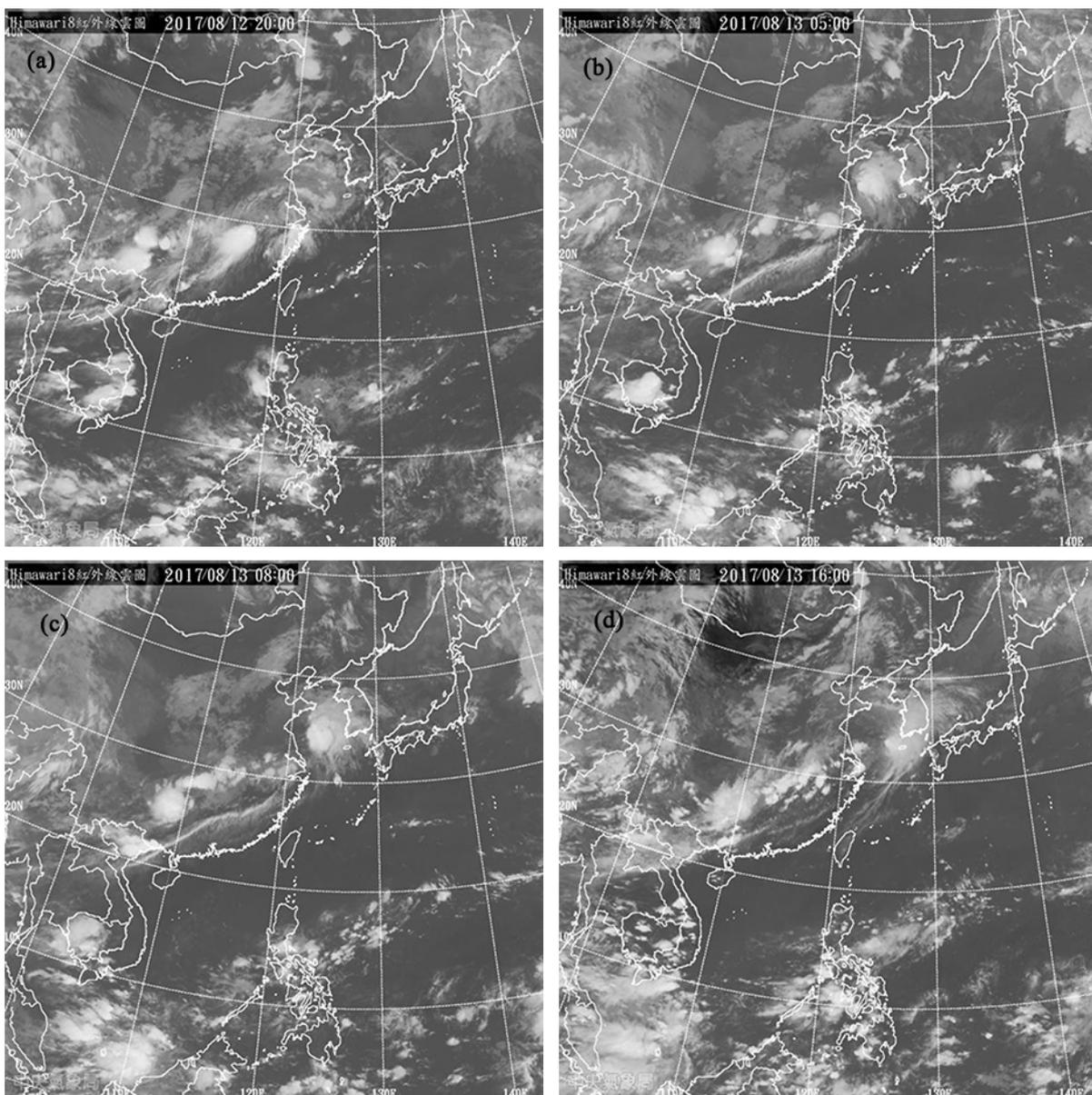


**Figure 2.** On August 13, 2017 (a) 01:00; (b) 04:00; (c) 09:00; (d) 14:00; (e) 21:00 satellite cloud image (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

**图 2.** 2017 年 08 月 13 日(a) 01 时; (b) 04 时; (c) 09 时; (d) 14 时; (e) 21 时卫星云图(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

### 3) 从红外线云图分析暴雨云系形成演变

由红外线图演变(图 3)分析可知, 12 日 20 时(图 3(a))受来自孟加拉湾的西南风和水汽输送影响, 我国张江中下游地区有一强暖湿气团生成, 并沿西南 - 东北方向移动。该气团移速快, 12 小时移动约 10 经度, 云系受西南风影响, 移动过程中其南侧不断有云带形成(图 3(b)), 形成图 3 中所见的逗点云系和尾部云带的结构。08 时(图 3(c)), 前部逗点云系减弱, 后部形成新的暖湿中心, 并在风场的作用下逐渐向东北部输送水汽, 对应图 2(c)中生成多小云团, 其分布较密集, 给地面场多小降水中心。随后前部东南侧多暖中心分布(图 3(d)), 且北部有沿四川附近南下的冷气团输入, 与南部气流在云南附近汇合后向东北方向移动, 因此该云系的发展主要是北侧冷空气南压, 南侧暖湿空气逐渐北上, 沿锋面逐渐抬升, 形成西南 - 东北向多云系的带状分布, 并造成地面的带状降水分布。



**Figure 3.** August 2017 (a) 12, 20:00; (b) 13, 05:00; (c) 13, 08:00; (d) 13, 16:00 infrared cloud image  
**图 3.** 2017 年 08 月(a) 12 日 20 时; (b) 13 日 05 时; (c) 13 日 08 时; (d) 13 日 16 时红外云图

### 3.2. 暴雨天气形势

作为强降水发生、发展的背景，大尺度环流形势的支持十分重要，尤其对于我国长江流域的暴雨过程。从地面图上来看，13日02时(图4(a))长江流域有一准静止锋，从贵州西南部东伸至江苏省北部，锋前出现低压中心，对应长江中上游一带出现降水，至13日08时(图4(b))，地面低压区形成江淮气旋，江淮气旋的形成是由于东亚高空经向环流强烈发展，是中高纬系统与梅雨锋相互影响的结果。随着江淮气旋的形成和发展，长江中上游的强降水持续。

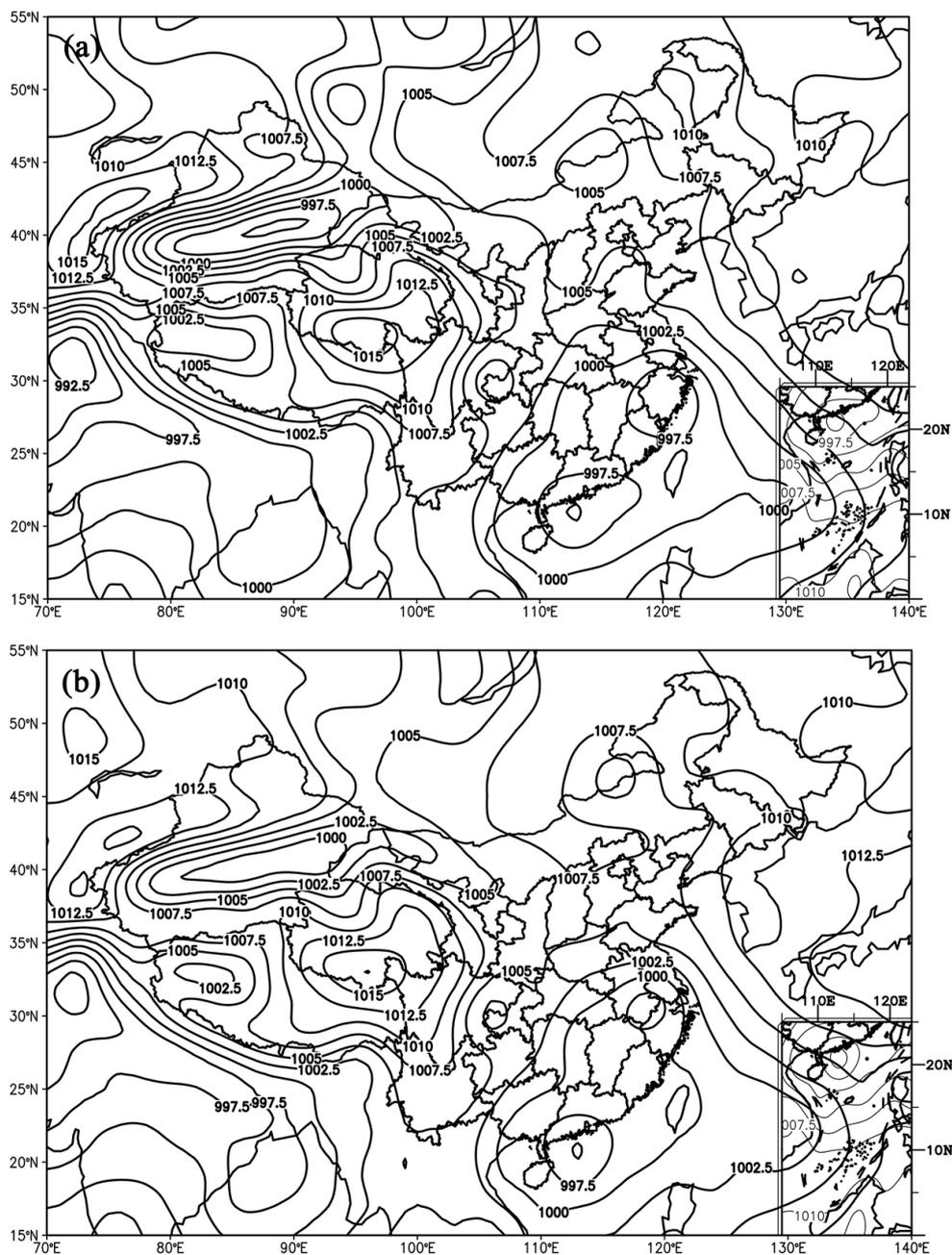
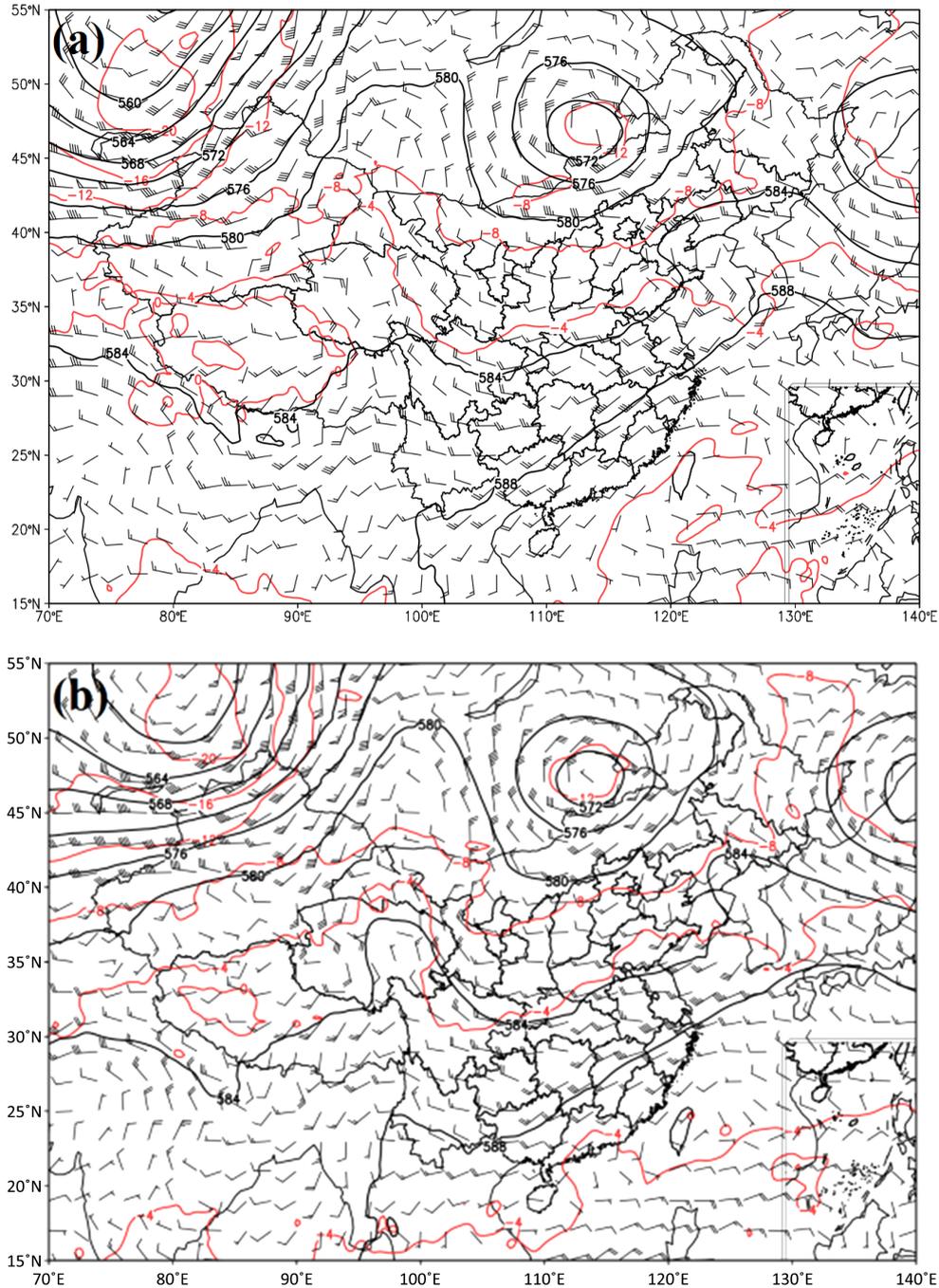


Figure 4. On August 13, 2017 (a) 02:00; (b) 08:00 sea level pressure field (unit: hPa)

图4. 2017年8月13日(a)02时; (b)08时海平面气压场(单位: hPa)

配合地面形势, 500 hPa 位势高度(图 5)上表现为欧亚中高纬度呈两槽一脊的经向环流形势, 阻塞高压位于西伯利亚地区, 其上游与下游为两个长波槽区, 一个从乌拉尔山延伸至欧洲, 另一个盘踞在贝加尔湖东侧, 来自贝加尔湖的冷空气直接南下, 进入我国淮河流域, 副热带高压北抬西伸, 西脊点位于云南省南部, 呈带状分布, 北界抬至长江出海口, 占据我国江南地区, 受副高引导的西南南气流将大量水汽向北输送至江淮地区, 从而使得冷暖气流于江淮流域交汇, 是淮静止锋对应云系产生和维持的重要条件。



**Figure 5.** Aug 2017 (a) 12 Feb 2017; (b) 13 Aug 2017 08:00 500 hPa geopotential height field (unit: gpm)  
**图 5.** 2017 年 8 月(a) 12 日 20 时; (b) 13 日 08 时 500 hPa 位势高度场(单位: gpm)

在高层(图 6(a)), 200 hPa 位势高度场上, 欧亚地区一方面受到中高纬地区的高压控制, 另一方面中低纬度被深厚的南亚高压占据, 其辐散流场的作用, 对于低层辐合上升运动的加强有一定贡献。在低层(图 6(b)), 850 hPa 位势高度场揭示了本次长江中上游强降水过程的水汽来源, 加强的偏东气流将大量水汽输送至我国南部地区, 同时, 江淮流域建立了低涡、切变线形势, 低涡、切变线是准静止锋对应云系形成和维持的基础。

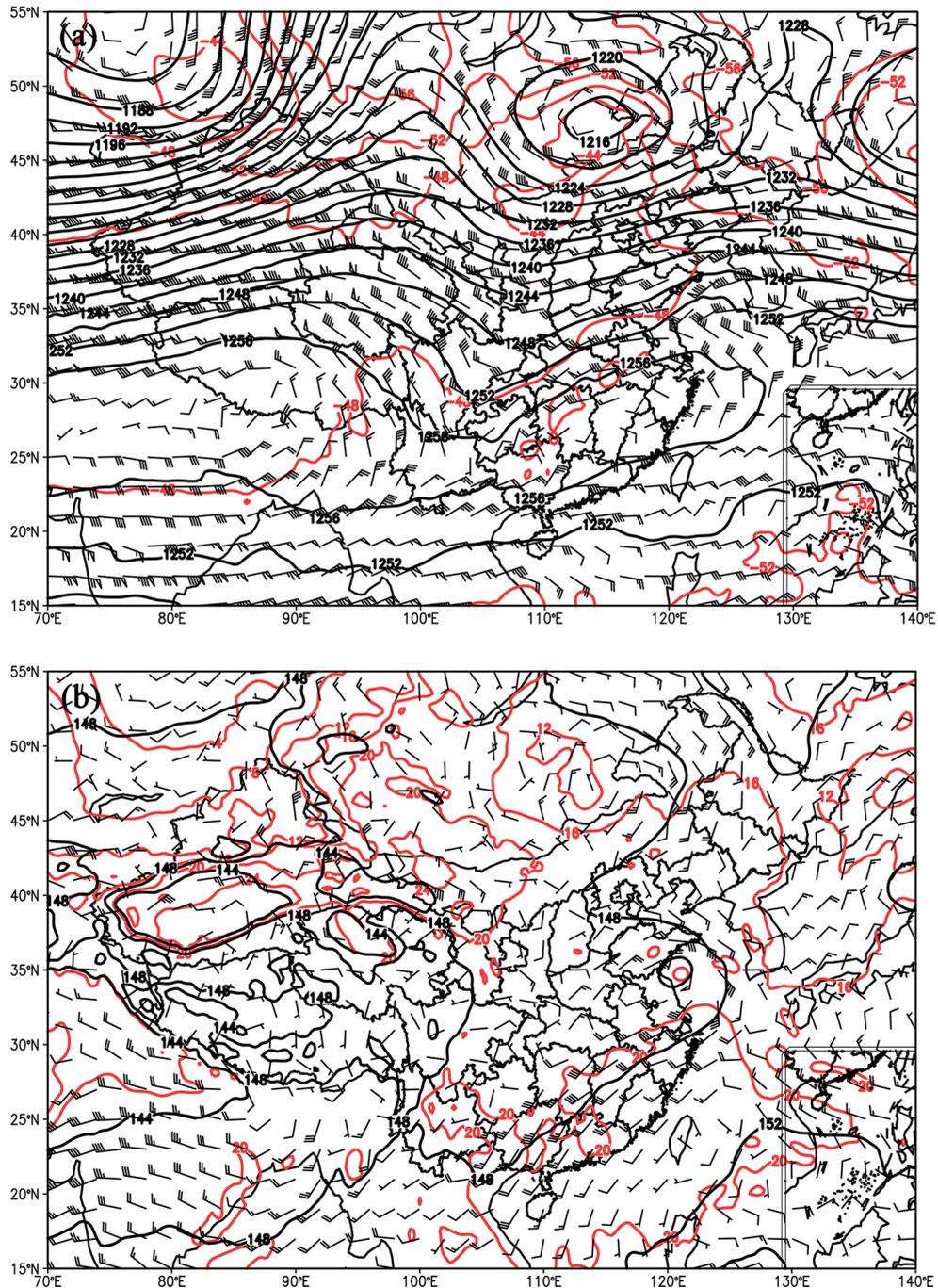


Figure 6. Aug 13, 2017 08:00 (a) 200 hPa; (b) 850 hPa geopotential height field (unit: gpm)

图 6. 2017 年 8 月 13 日 08 时(a) 200 hPa; (b) 850 hPa 位势高度场(单位: gpm)

## 4. 暴雨诊断分析

### 4.1. 由假相当位温分析暴雨云系演变的热力条件

从 850 hPa 假相当位温分布可以看到(图 7), 在 13 日长江中上游强降水期间,  $\theta_{se} \geq 351$  K 的高能区位于长江流域地区, 呈带状分布, 范围随时间扩大。对天气形势场(图 7)的分析发现阻塞高压在亚洲北部的建立和维持, 迫使 500 hPa 高度上的西风锋区向南压, 引导冷空气南下, 导致中纬度地区物质以及能量密集交换, 另一方面西太平洋副热带高压北抬西伸, 稳定控制长江以南地区, 使得长江中上游附近维持着副热带锋区。副热带锋区的维持使得冷暖空气在上空汇合, 从而造成长江中上游准静止锋对应云系的发展和维持。

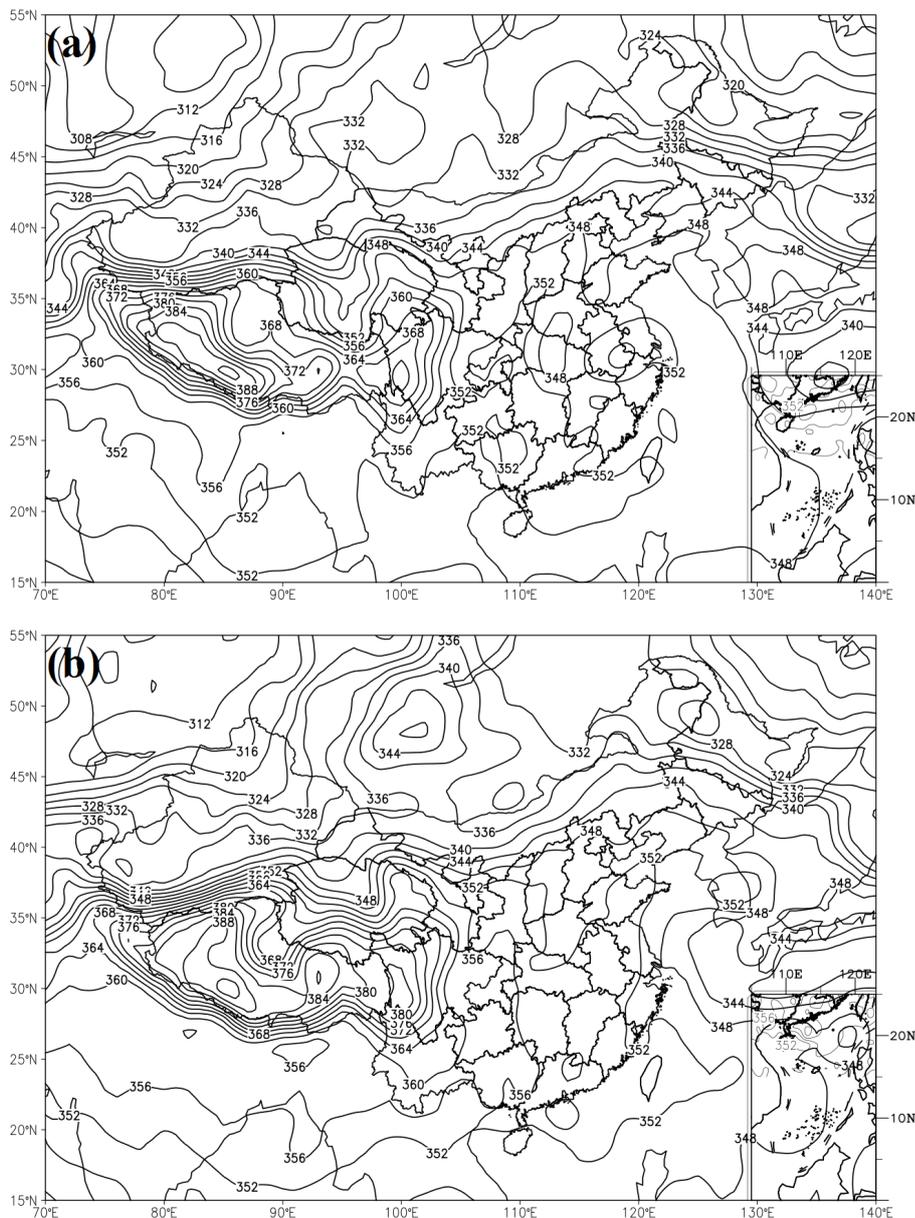
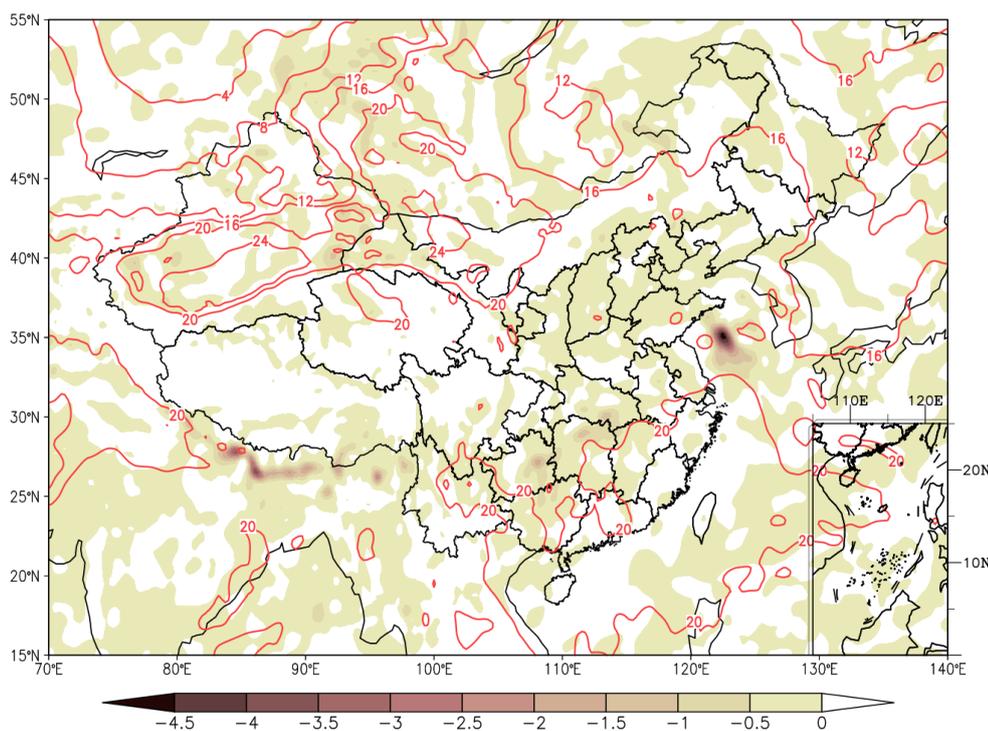


Figure 7. August 13, 2017 (a) 08:00; (b) 20:00 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature field (unit: K)  
 图 7. 2017 年 8 月 13 日(a) 08 时; (b) 20 时 850 hPa 假相当位温场(单位: K)

## 4.2. 由垂直运动和散度分布分析暴雨云系演变的动力条件

垂直方向上风场的散度分布可以反映系统的动力条件，高层辐散产生的抽吸作用有利于上升运动的产生，并引起低层暖湿空气的辐合，辐合抬升后形成云系，并通过水汽凝结释放潜热，进一步加强上升运动，因此强上升运动形成发展旺盛的云系，而低层辐合，高层辐散的风场分布有利于上升运动的加强。

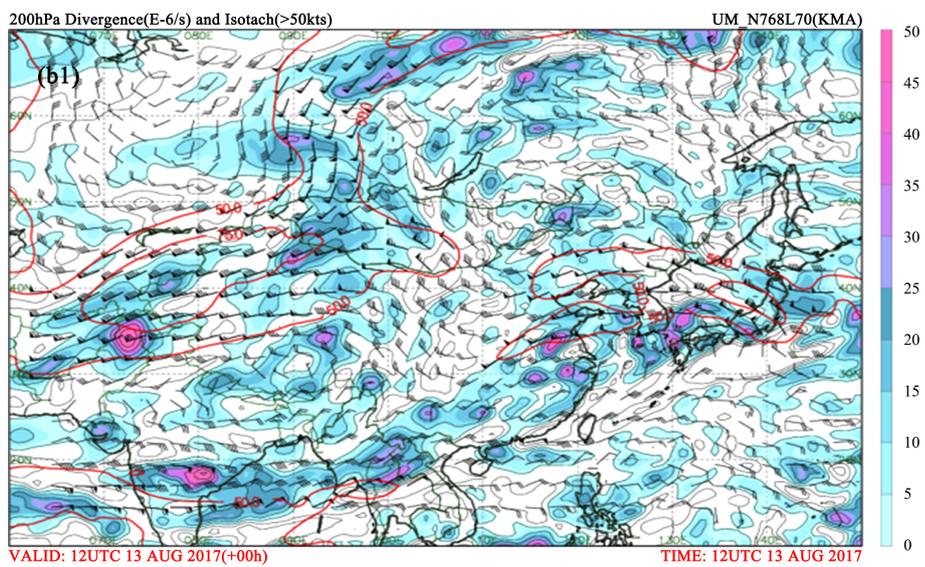
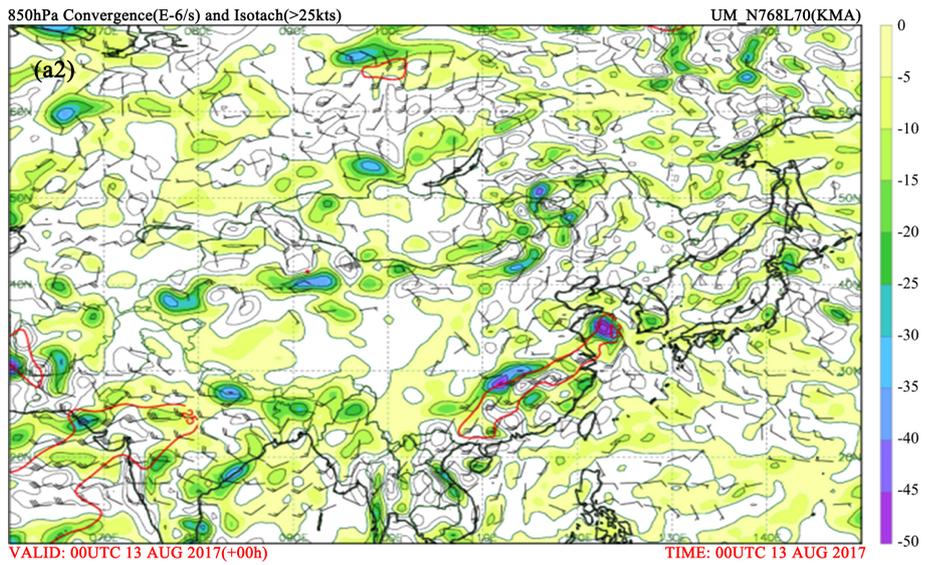
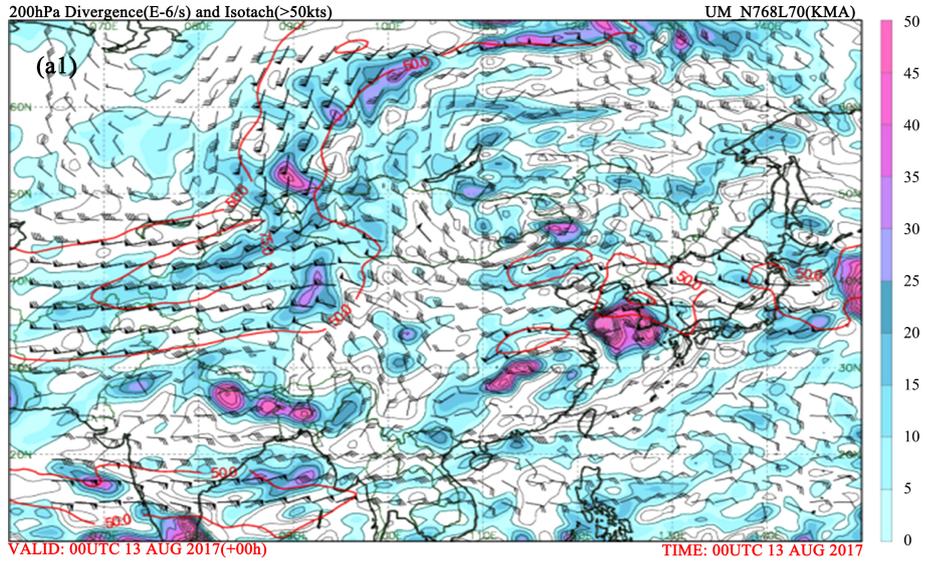
由背景场分析可知，此次过程中降水云系主要分布与 500 hPa 槽前西南气流，属于典型的系统槽前正涡度平流引起气流上升形成云系，此类云系沿系统运动方向移动，且常伴有风场低层辐合、高层辐散的分布特征。以 13 日 08 时为例，700 hPa 垂直速度场(图 8)东海 - 华南一带有三个垂直上升运动大值区，最强上升运动可达 2.5 Pa/s，该垂直上升运动中心则与云系发展强盛区对应，即强上升运动有利于云系发展。

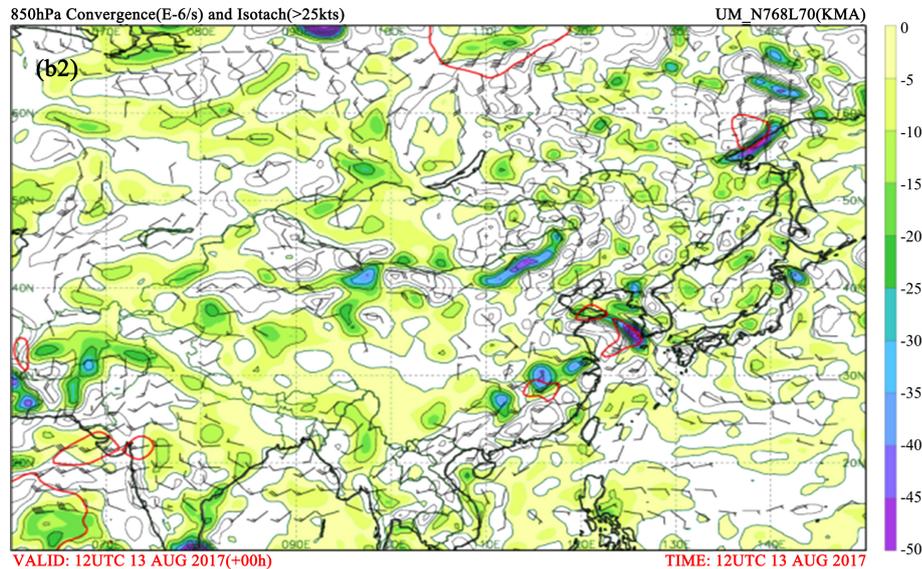


**Figure 8.** Temperature field at 850 hPa (unit: °C), vertical velocity field at 700 hPa (unit: Pa/s) at 08:00 UTC 13 August 2017

**图 8.** 2017 年 8 月 13 日 08 时 850 hPa 温度场(单位: °C), 700 hPa 垂直速度场(单位: Pa/s)

从高低层散度场分布(图 9), 13 日 08 时与上升运动大值区对应, 850 hPa 上三个辐合大值中心, 最大辐合强度可达  $50 \times 10^{-6}/s$ , 弱上升运动中心对应的辐合强度也较弱, 同时, 200 hPa 上分布有三个强辐散中心, 高层辐散低层辐合, 有利于上升运动的加强, 也对应云系的发展, 同时, 海上云系位于高空急流入口区右层, 强辐散抽吸作用有利于海上云系的发展。到 13 日 12 时, 散度大值中心随系统的移动逐渐向东移动, 且高空急流增强, 高层辐散抽吸作用有利于海上云系的发展和槽前减弱云团的海上重新发展。因此过程中的云系形成发展过程与槽前高低层风场散度分布有关, 云系分布方向低层有辐合中心, 高层有辐散中心, 加强了上升运动, 对应云系的发展, 且 200 hPa 高空急流的加强使得海上云团强度和槽前减弱云团的入海加强。

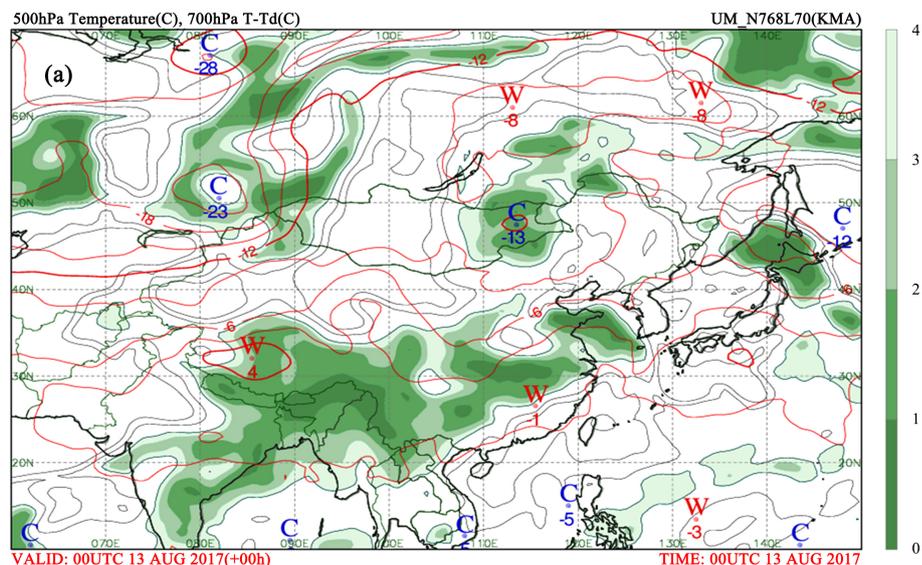


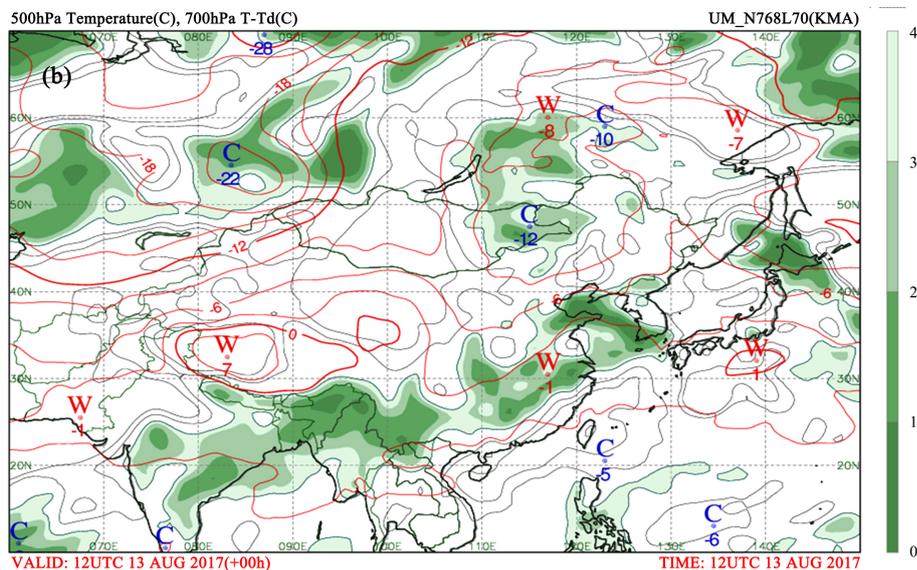


**Figure 9.** August 13, 2017 (a) 08:00; (b) 20:00 divergence field distribution (shadow, unit:  $10^{-6}/s$ ); (1) 200 hpa (isoline, wind speed > 25 m/s); (2) 850 hPa (isoline, wind speed > 12.5 m/s)  
**图 9.** 2017 年 8 月 13 日 (a) 08 时; (b) 20 时散度场分布(阴影, 单位:  $10^{-6}/s$ ); (1) 200 hpa (等值线, 风速 > 25 m/s); (2) 850 hPa (等值线, 风速 > 12.5 m/s)

#### 4.3. 由温度露点差分布分析暴雨云系演变的水汽条件

水汽在上升过程中凝结形成云系, 此次过程中云系成西南 - 东北走向, 且过程中伴有云团的发展、消散、新生, 除了必须有上升运行与之对应外, 必须伴有充足的水汽输送。夏季, 受季风影响, 我国东南沿海由偏南风控制, 经常有来自孟加拉湾、南海, 东海的暖湿空气在我国南部地区辐合, 形成较强的不稳定和强降水。由此次过程中 700 hPa 温度露点差分布(图 10)可知, 13 日 08 时青藏高原南部到东海一带为 t-td 小值区( $t-td < 4$ ), 即为相对湿度区, 云系即生成在该湿区一带。当有冷空气南下或有一定扰动存在时, 容易引发强上升运动, 继而形成云系。到 20 时, 相对湿度中心减弱, 此时云系新生、发展也减弱, 主要沿着湿区想东北方向移动, 且在海上的湿中心加强。





**Figure 10.** August 13, 2017 (a) 08:00; (b) 20:00 500 hPa temperature field (red solid line, unit: °C) and 700 hPa temperature dew point difference (t-td) (shade, unit: °C)

**图 10.** 2017 年 8 月 13 日(a) 08 时;(b) 20 时 500 hPa 温度场(红色实线,单位:°C)及 700 hPa 温度露点差(t-td) (阴影, 单位: °C)

## 5. 结论

对 2017 年 8 月 13 日长江中上游强降水过程云系的形成从实况、环流形势以及热力、动力和水汽诊断方面进行了分析, 得到如下结论:

1) 此次降水过程范围波及全国, 降水大值区位于长江中上游地区, 与此次华南地区带状云系分布对应, 落区主要位于云系北侧, 24 小时降水量为 100~250 mm, 达到大暴雨或特大暴雨等级; 此次降水云系主要由华南到东海一带上空多云团演变发展形成。东海上空云团稳定维持, 华南地区为典型冷锋云系, 多个云团沿锋面向东北方向移动过程中合并发展, 并造成地面降水, 最终形成一较强云团, 该云团入海减弱, 随后在海上云团附近新生。

2) 地面图上一准静止锋位于长江流域, 锋前出现低压中心对应长江中上游一带出现降水, 后形成江淮气旋, 随着江淮气旋的形成和发展, 长江中上游的强降水持续; 500 hPa 位势高度上表现为欧亚中高纬度呈两槽一脊的经向环流形势, 来自贝加尔湖的冷空气直接南下, 进入我国淮河流域, 副热带高压北抬西伸, 受副高引导的西南南气流将大量水汽向北输送至江淮地区, 从而使得冷暖气流于江淮流域交汇, 是准静止锋对应云系产生和维持的重要条件; 对流层高层上欧亚地区流场上表现为辐散, 对于低层辐合上升运动的加强有一定贡献; 低层有加强的偏东气流将大量水汽输送至我国南部地区, 同时, 江淮流域建立了低涡、切变线形势, 低涡、切变线是准静止锋对应云系形成和维持的基础。

3) 对此次过程进行物理量诊断, 热力方面, 850 hPa 上假相当位温大于 351 K 的高能区位于长江流域地区, 另一方面长江中上游附近副热带锋区的存在使得冷暖空气在上空汇合; 动力方面, 700 hPa 垂直速度场上东海 - 华南一带有三个垂直上升运动大值区, 高低层散度与之配合, 云系分布方向低层有辐合中心, 高层有辐散中心, 加强了上升运动, 对应云系的发展, 且 200 hPa 高空急流的加强使得海上云团强度和槽前减弱云团的入海加强; 水汽方面, 700 hPa 上青藏高原南部到东海一带为相对湿区, 云系即生成在该湿区一带, 之后相对湿度中心减弱, 此时云系新生、发展也减弱, 主要沿着湿区想东北方向移动, 且在海上的湿中心加强。

## 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 223.
- [2] 陈德辉, 胡志晋, 徐大海, 等. CAMS 大气数值预报模式系统研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 190.
- [3] 韦惠红, 赵春, 龙利民, 王崇州. 湖北省卫星云图短时暴雨概念模型研究[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 14-19.
- [4] 郑永光, 陈炯, 费增坪, 王洪庆, 张焱. 2003 年淮河流域持续暴雨的云系特征及环境条件[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 157-165.
- [5] Fabry, F., Zawadzki, I. and Cohn, S. (1993) The Influence of Stratiform Precipitation on Shallow Convective Rain: A Case Study. *Monthly Weather Review*, **121**, 3312-3325.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<3312:TIOSPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3312:TIOSPO>2.0.CO;2)
- [6] Yuter, S.E., Houze, R.A., Smith, E.A., Wilhelm, T.T. and Zipser, E. (2005) Physical Characterization of Tropical Oceanic Convection Observed in KWAJEX. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **44**, 385-415.  
<https://doi.org/10.1175/JAM2206.1>
- [7] 杨培才, 张琦娟. 北京地区对流性暴雨雷达回波特征的分析[J]. 大气科学, 1978, 2(2): 131-138.
- [8] 王昂生, 徐乃章, 梁飞燕. 北京 1980-1983 年夏季云和降水的分析研究[J]. 大气科学, 1987, 11(3): 297-303.
- [9] 雷蕾, 周毓荃, 毕宝贵. 低涡过程对流云和降水结构特征及其环境条件分析[J]. 气象科技, 2009, 37(4): 398-406+515.