稿件编号 2020126C
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

台风“山竹”(1822)远距离暴雨的成因分析

陈淑琴[1,2,3] 李英[2*] 范悦敏[1] 徐哲永[1] 李帆[4]

1 舟山市气象局，浙江舟山 316021
2 中国气象科学研究院，北京 100081
3 中国气象局上海台风研究所，上海 200030
4 舟山市定海区气象局， 浙江舟山 316000

摘要 热带气旋远距离暴雨（TRP）往往成为高影响天气，是业务预报难点。本文用地面、探空观测资料、雷达遥感资料以及 NCEP 一日四次 0.5°×0.5°再分析资料，对 2018 年第 22 号台风“山竹”登陆广东期间在长三角地区引起的远距离暴雨过程进行分析。结果表明：1）这是一次发生在副热带高压控制范围内的热带气旋远距离暴雨，低层受台风倒槽影响。2）这次过程第一阶段暴雨主要是在强的对流不稳定条件下，由对流层低层“山竹”倒槽中的辐合线触发对流产生，同时对流层高层“山竹”的极向流出汇入加大了中纬度西风风速，在长三角地区上空产生辐散，有利于上升运动的维持。第二阶段，对流不稳定条件有所减弱，但前一阶段强回波产生的偏北外出气流与东南风形成辐合线，辐合线上还有中 y 尺度的涡旋产生，又促进了对流发展。850hPa 台风倒槽北端形成一个低涡，500hPa 副高边缘发展出一个短波槽，暴雨的动力条件更为有利。3）长三角的 3 个强降水中心分别在长江口、杭州湾北岸的嘉兴沿海及宁波沿海，都是在水陆边界附近。4）远距离暴雨区的涡度收支诊断发现：暴雨的初始扰动主要由近地层水平辐合辐散项提供，850hPa 的水平辐合辐散项和扭曲项共同作用形成和加强低涡，并通过垂直运动上传使中层 700-500hPa 附近涡度增长，进而发展出 500hPa 短波槽。850hPa 涡度来自于台风倒槽和副高边缘的偏南急流。5）在这次远距离暴雨过程中，台风“山竹”与海上西太平洋副热带高压（副高）之间形成偏南低空急流，向长三角输送水汽，与典型 TRP 事件相似。不同之处在于：典型 TRP 中暴雨的初始扰动一般由西风槽提供，而这次过程主要由低空台风倒槽和偏南急流提供，涡度上传形成高空短波槽，是不同于典型 TRP 事件的一个物理过程。

关键词： 台风“山竹” 远距离暴雨 副高 短波槽 涡度收支

Analysis of the long-distance Heavy rains caused by typhoon "Mangosteen" (1822)

CHEN Shuqin[1,2,3], LI Ying[2*] Fan Yueming[1], XU Zheyong[1], LI Fan[4]

1 Zhou shan Meteorology Bureau，Zhoushan，Zhejiang 316021
2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration，shanghai 200030
4 Dinghai Meteorology Bureau，Zhoushan，Zhejiang 316021

Abstract Tropical cyclone Remote Precipitation (TRP), usually as a high-impact weather is difficult to do an accurate forecasting. In this paper, ground and sounding observation data, radar remote sensing data and NCEP re-analysis data of 0.5°×0.5° resolution at 6-h intervals were used to analyze the physical process of long-distance rainstorm in the Yangtze river delta region associated with typhoon “Mangosteen” during its landfalling process in Guangdong province in 2018. The results show that: 1) the TRP event occurred under the control of the western

收稿日期 2020-03-09；**网络预出版日期**：
作者简介 陈淑琴，1975 年 3 月生，女，硕士，正高级工程师，主要从事热带气旋天气研究。E-mail: 457920850@qq.com
通讯作者 李英，E-mail: yli@cma.gov.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 4193097、41775055；国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目 2015CB452804；浙江省气象科技计划项目 2019YB16、2020YB22；舟山市公益性科技项目 2019C31054；上海台风研究基金项目 TFJJ201912
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41930972,41775055), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804)，Zhejiang Meteorological Science and Technology Planning Project (Grants2019YB16, 2020YB22); Zhoushan Public Welfare Science and Technology Project (Grant 2019C31054); Shanghai Typhoon Research Foundation(Grant TFJJ201912)

North Pacific subtropical high, while was affected by typhoon inverted trough in lower layer. 2) The heavy rain process in the first stage was mainly under the condition of strong convective instability, which was triggered by convergence line in the typhoon “Mangosteen” inverted trough in the lower troposphere, and the "Mangosteen" poloidal outflow at higher level merged into the mid-latitude westerly wind over the Yangtze river delta region thus strengthening the divergence and upward movement in the rainstorm area. In the second stage, the convective instability conditions were weakened, but a low pressure vortex had been formed at the north end of typhoon inverted trough at 850-hPa with a short-wave trough developed at the edge of subtropical high at 500-hPa, so that the dynamic conditions of rainstorm were more favorable. 3) The three heavy rainfall centers in the Yangtze river Delta region were located at the mouth of the Yangtze River, along the coast of Jiaxing on the north coast of Hangzhou Bay and along the coast of Ningbo, all of which were near the land and water boundary. 4)the diagnosis of vorticity budgets in the remote rainstorm area suggest that: the initial disturbance of the rainstorm was mainly provided by the horizontal convergence and divergence term near the surface, and then a low pressure vortex at 850-hPa was developed due to the horizontal convergence and divergence term combined with the twist term , which were related to the lower layer southerly jet between the typhoon inverted trough and the subtropical high. Finally and the vorticity was increased upward to the middle layer near 700-500-hPa attributed to the vertical ascending motion, resulting in the development of a short-wave trough at 500-hPa at the edge of the subtropical high.5) In the process of long-distance rainstorm, a lower layer southerly jet formed between typhoon “Mangosteen” and the western North Pacific subtropical high transporting water vapor to the Yangtze river Delta area, which was similar to the typical TRP event. The difference was that the initial disturbance of the rainstorm in a typical TRP was generally provided by the westerly trough in mid-latitude, while in this rainstorm it was mainly provided by the typhoon inverted trough and the southerly jet stream in lower layer, then the vorticity was transported upward leading to the development of a short-wave trough.

Keywords typhoon Mangosteen, Tropical cyclone Remote Precipitation, western Pacific subtropical high, shortwave trough, diagnoswas of vorticity input and output

1 引言

热带气旋暴雨在我国时有发生（段丽等，2005；周玲丽等，2009，2011；梁军等，2015；汪亚萍等，2015；潘劲松等，2019），往往造成城市内涝、交通中断、房屋垮塌、农田被毁，引发地质灾害，有时还会产生远距离暴雨。陈联寿（2007）提出了热带气旋远距离降水（Tropical cyclone Remote Precipitation—TRP）定义：远距离降水发生在 TC 范围之外，但与 TC 之间存在内在物理联系。美国科学家 Cote(2007）将此类降雨称为 Predecessor Rain Events ahead of tropical cyclones (PREs)，定义为位于 TC 或其残涡的主雨带之外，但与 TC 有间接联系的降水。他统计分析了 1998-2006 年美国的 47 个 PRE 事件，给出了 PRE 概念模型：1）落区位于高空急流的右后象限，2）中层位于西风带长波槽前，3）位于热带水汽羽的边缘，4）靠近或位于低层假相当位温脊线的西面，靠近锋区。Galarneau et al（2010）合成分析多个个例的天气尺度特征指出，PRE 发生在 200hPa 急流西侧入口区、925hPa 假相当位温脊区、700hPa 槽前。并对美国明尼苏达州的一次特大暴雨 PRE 事件进行诊断分析，认为由锋面强迫的低层斜压带、以及 TC 带来深厚的水汽输送共同产生了一条长时间维持的中尺度对流系统。Wang et al（2009）通过数值模拟试验证明台风 Songda (2004) 主要是通过外围环流向北输送水汽，在日本的远距离降水中起了加强作用。Byun 和 Lee（2012）统计分析了朝鲜半岛的热带气旋远距离暴雨，总结了该地区这类降水的天气形势特征，与 Cote(2007）提出的类似。

关于 TRP 国内学者也开展了很多研究。指出 TRP 与西风槽和冷空气有关（如李明等，2011；孙力等，2015；曹晓岗等，2016；陈联寿等，2017）；并提出 TC 的重要作用是向暴雨区输送水汽（如朱洪岩等，2000；范学峰等，2007；李改琴等，2007；杨晓霞等，2008；孙欣等，2009；孙兴池等，2019；黄克慧等，2019）。丛春华（2011）系统研究了我国 TRP，指出我国 TRP 主要位于环渤海地区和川陕交界处，其发生概念模型为：1）TC 通过低空急流

向 TRP 区输送水汽；2）中纬度槽是产生 TRP 的动力条件；3）高空急流位于 TRP 区域北侧；4）山脉或海岸地形对上升运动的动力强迫加强垂直运动；5）副高脊有加强低空台风东侧东南急流向远距离暴雨区输送水汽的作用。丛春华等（2016）研究发现，台风倒槽顶端脱离出的气旋性涡旋，与西风槽和冷锋相遇形成温带气旋，从而产生暴雨。

然而，业务中发现有些台风远距离降水与上述总结的概念模型有所不同，没有西风槽配合。如，1720 号台风“卡努”在广东登陆期间，浙江中北部沿海地区出现大暴雨，舟山降水量 200-400mm，最大普陀南岙站 574 毫米。1822 号台风“山竹”在广东登陆，江浙沪出现大暴雨，过程雨量 100-300mm，多个站点雨强超过 100mm・h^{-1}。这两次热带气旋远距离暴雨均发生在副高 588dagpm 线范围内，在暴雨发生过程中副高边缘产生短波槽。此类热带气旋远距离暴雨往往难以预报，而其产生机制认识还不多。如，此类暴雨如何被激发？其中短波槽是如何形成？与 TC 之间有何联系等问题都值得研究。本文拟采用 TC 的业务定位资料、高空、地面观测资料、卫星云图、江苏南通、浙江湖州、舟山的 S 波段多普勒雷达资料和 NCEP 水平分辨为 0.5°×0.5°的 CFSR（Climate Forecast System Reanalysis）再分析资料，对 1822 号台风“山竹”在长江三角洲地区引起的远距离暴雨过程进行分析。

2 台风“山竹”概况及其长江三角洲远距离暴雨

2018 年第 22 号台风“山竹”于 9 月 7 日 20 时（北京时，下同）在西北太平洋洋面上生成，之后朝偏西方向移动，11 日 08 时发展为超强台风，15 日凌晨从菲律宾北部登陆后移入南海，减弱为强台风，并在西太平洋副高南侧偏东气流引导下向西北偏西方向移动（图 1a 黑线）。16 日 17 时“山竹”在广东台山市登陆，登陆时为强台风，中心最低气压 955 百帕，中心附近最大风力 14 级（45m・s^{-1}）。登陆后西北行进入广西境内，17 日 20 时中央气象台停止编号。“山竹”在广东登陆时强度强，结构完整，范围大。登陆后 16 日 20 时其东北方向云系长达 1000 多公里（图 1b），覆盖华南大部分地区，此时台风云系之外的长江三角洲地区已有较强的对流云团发展(图 1b 黄色方框)。

2018 年 9 月 16-17 日总降水量分布显示（图 1a，未显示 20mm 以下降水），强降水主要分布在两个区域，一个是台风经过的广东、广西境内，最强的降水在台风登陆点附近，超过 400mm。另一个在长江三角洲地区（下简称长三角）的江苏、安徽南部到浙江北部，累计雨量 100-250mm，个别站点超过 300mm。两个强降水中心相距约 1300km。长三角地区的降水主要发生在 16 日下午到 17 日下午，对应台风登陆及之后西行减弱时期。长三角地区还观测到雷电和雷雨大风，降水对流性强，降水范围相对集中，3 个强降水中心分别在长江口附近、杭州湾北岸的嘉兴沿海和宁波沿海。图 1c 给出该区域从北到南 3 个站的小时雨强序列图，上海明珠湖站的降水主要发生在 16 日傍晚到 17 日早晨，最大雨强 131mm・h^{-1}，出现在 16 日夜间；嘉兴海宁主要强的降水发生在 17 日凌晨，最大雨强 94mm・h^{-1}；而宁波上阳小学的降水主要发生在 17 日白天，最大雨强 104mm・h^{-1}。

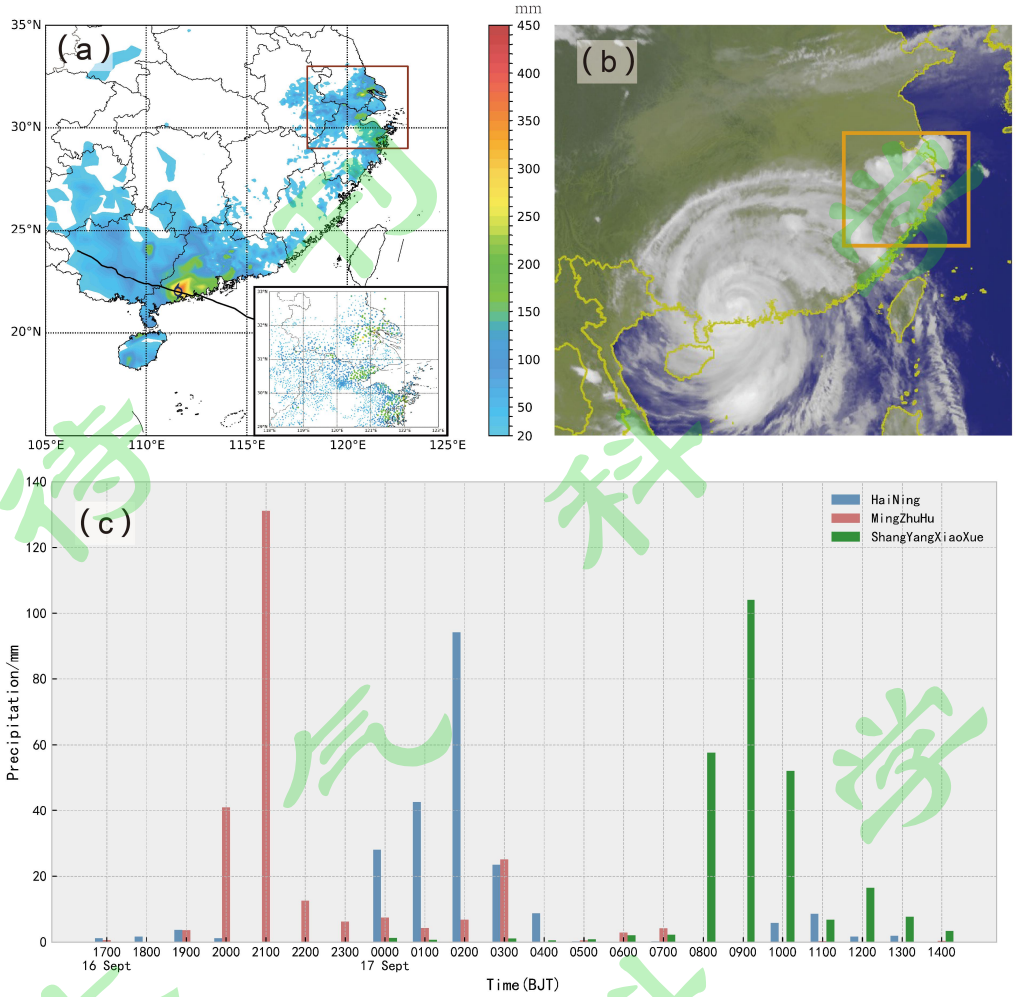

图 1 （a）台风“山竹”路径（黑实线，台风标志处为 2018 年 9 月 16 日 20 时台风位置）及 2018 年 9 月 15 日 20 时-17 日 20 时累计降水量（单位：mm）(方框：远距离降水区)（b）2018 年 9 月 16 日 20 时葵花 8 号红外卫星云图（方框：远距离暴雨云区）；（c）2018 年 9 月 16-17 日上海明珠湖、嘉兴海宁、宁波上阳小学站小时雨量时间序列

Fig.1 (a) track of typhoon Mangosteen (black solid line, typhoon mark position at 2000 BJT on 16 September 2018) and accumulated precipitation from 2000 BJT on 15 September to 2000 BJT on 17 September 2018 (unit: mm) (box: remote precipitation area) (b)infrared cloud image of satellite GMS-8 at 2000 BJT on 16 September 2018 (box: remote rainstorm cloud area) (c)Time series of 1-h precipitation at Mingzhuhu in Shanghai, Haining in Jiaxing and Shangyang primary school in Ningbo on 16-17 September 2018

这次历时两天的暴雨过程按照降水系统的移动可分为两个阶段：第一个阶段是 16 日下午到夜里，苏南到浙江境内有零散的对流单体生成发展，朝偏北方向移动，在苏南浙北地区形成强对流雨带，且停滞少动。降水中心在长江口附近，雨量 100-200mm。第二阶段是 17 日凌晨到下午，江苏南部的雨带缓慢东移，与浙东的雨带合并后逐渐南压到浙江南部沿海。降水中心在浙北沿海，雨量也是 100-200mm。

3 大气环流背景

2018 年 9 月 16 日 20 时地面观测资料分析的环流形势（图 2a)显示，山东、河南以北地区受冷高压控制，以南为台风“山竹”低压环流控制，其东北象限有一倒槽一直伸展到长三角地区，倒槽东部为东南风，倒槽西部为东北风。

从 NCEP 再分析资料分析的高空环流来看，16 日 20 时 850hPa 流场（图 2b) “山竹”气

旋性环流范围很大，巴士海峡的东南气流到达台湾被山脉阻挡发生绕流，与海上副高共同形成一支东南偏南急流，向华东地区输送水汽。水汽通量大值中心在浙江沿海 28°N 附近，约为 22g/(s•hPa•cm)，水汽通量散度负值中心在安徽南部，达-12×10^{-7} g/(s•hPa•cm^2)。17 日 02 时（图略）“山竹”西北行，副高边缘这支偏南急流仍维持，并且水汽通量大值中心略向北推进到 30°N 附近，水汽辐合中心东移到江苏南部。

16 日 20 时 500hPa（图 2c），“山竹”北侧副高强盛，588dagpm 脊线西伸到 107°E 附近，形成高压坝，不利于“山竹”北上。长三角暴雨区处于 592dagpm 线附近，为副高控制，而此时是长江口附近降水最强的时刻。之后副高 588dagpm 线西脊点位置维持在 107°E 附近，北侧有短波槽生成。其间北方在 115°E 附近有西风带长波槽，但槽底位于 35°N 以北，距长三角暴雨区约 400km，之后西风槽东移，对长三角降水影响不大。

16 日 20 时 200hPa（图 2d)随着“山竹”登陆，其北侧的极向流出北上，与西风带的汇合加强，30°N 附近的西风带风速加大，安徽南部的安庆站实测风速由 08 时的 12m•s^{-1} 增大到 22m•s^{-1}，杭州站由 08 时的 14m•s^{-1} 增大到 20m•s^{-1}。这使得长三角地区的散度明显加大，江苏的辐散中心达 3.2×$10^{-5}s^{-1}$，产生抽吸作用，有利于上升运动的维持和加强。

从水平风和垂直涡度沿 31°N 的垂直分布（图 2e)来看，120°E 附近 1000hPa 有偏东风和东北风辐合的倒槽，往上到 850hPa 倒槽往偏西方向倾斜，涡度中心在 925hPa 附近。长三角暴雨区（黑色方框内）的涡度正值基本上在 850hPa 以下，700hPa 以上涡度都是负的，2km 高度以下为东南风，2-9km 高度盛行西南风，说明倒槽仅分布在 2km 以下，中高层处于副高边缘或副高范围内。

陈联寿等(2017)指出台风暴雨可分为台风环流内的暴雨和台风环流之外的暴雨两大类，台风环流内的暴雨包括倒槽暴雨。董美莹等（2017）统计浙江的台风倒槽暴雨一般距离台风中心 2.5-10 个纬距，大于 10 个纬距的非常罕见，此次过程暴雨中心距离台风中心约 13 个纬距。虽然长三角地区 850hPa 以下有台风倒槽，但与台风本体环流联系并不紧密，从 850hPa 的水汽来源看，长三角地区和台风本体的水汽通道是分开的。地面降水分布（图 1a)台风北侧倒槽区的湖南、江西等地降水量非常小，基本在 20mm 以下。卫星云图（图 1b)上长三角的降水云团也和台风本体的螺旋云系一直是分开的。而且雷达产品显示长三角地区的降水回波前期是朝偏北方向移动，后期朝偏东方向移动，没有随台风倒槽西行。总的看来，长三角地区的降水不是台风环流内的降水，不算典型的台风倒槽降水，而是一次远距离降水过程。但是目前对台风倒槽暴雨还没有明确的定义，如果从广义来说与台风倒槽有关的暴雨都是台风倒槽暴雨，那这次过程也可以认为是远距离台风倒槽暴雨。

总的形势特点，低层形势与前人研究结果类似：台风外围有偏南风低空急流向暴雨区输送水汽。而 500hPa 形势差别较大，一般台风远距离降水发生在西风槽前或槽区（Cote，2007、丛春华，2011），但此次远距离降水发生在强盛的副高控制范围内，无西风槽提供涡度使降水系统发展。

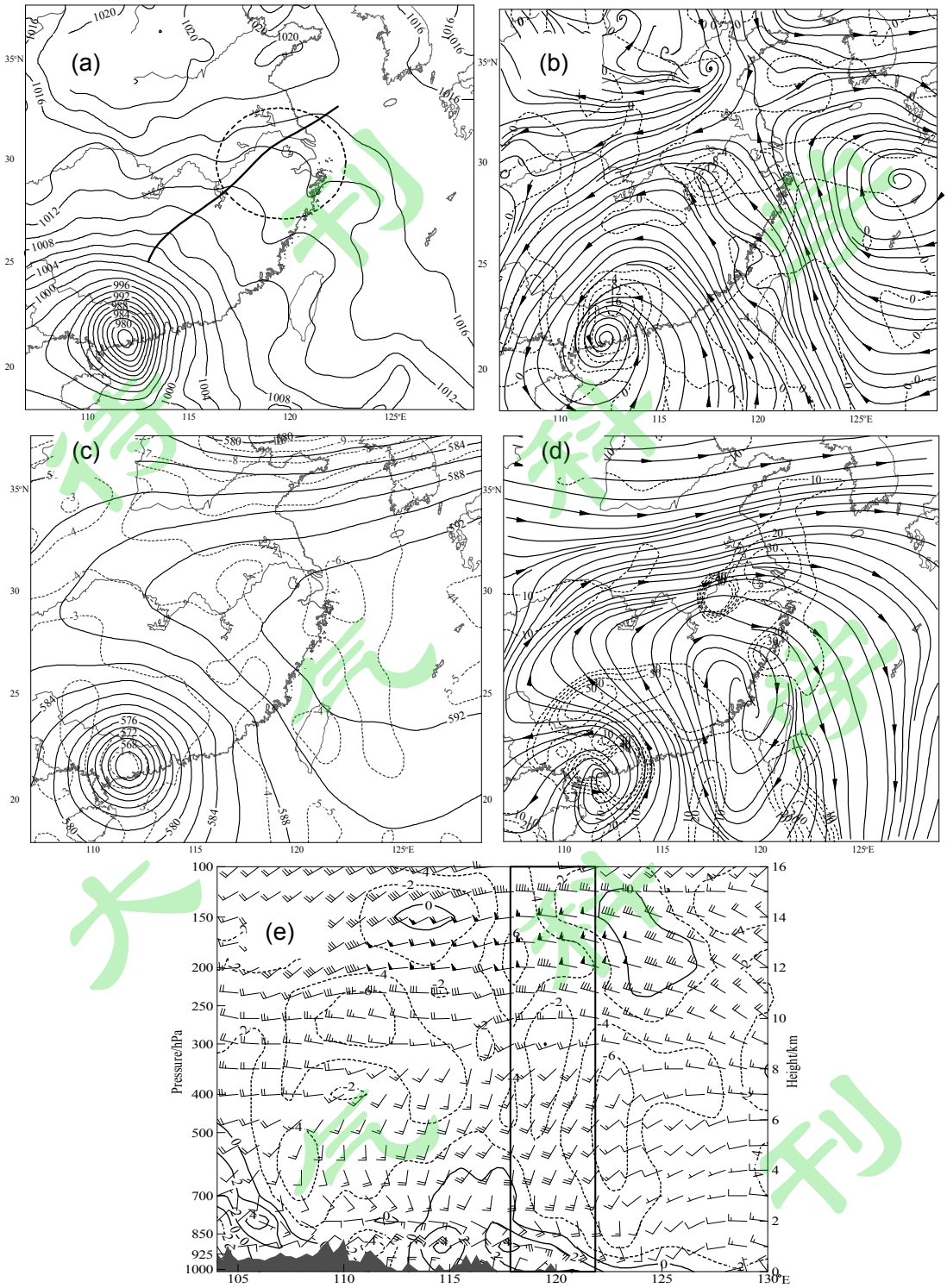

图 2　2018 年 9 月 16 日 20 时各层形势

（a）地面观测资料分析的气压场（黑线，单位：hPa）（虚线椭圆：暴雨区大致位置 粗实线为槽线）

（b）850hPa 流场和水汽通量散度（虚线，单位：10^{-7} g/(s•hPa•cm^2)）

（c）500hPa 高度场(黑实线，单位：dagpm）、温度场(虚线，单位：° C）

（d）200hPa 流场和散度(虚线，单位：10^{-6}•s^{-1}）

(e)垂直涡度(黑线，单位：10^{-5} • s^{-1}）和水平风沿北纬 31°N 剖面的分布（方框：暴雨区大致位置）

Fig. 2 situation of serval layers at 2000 BJT on 16 September 2018

(a) surface pressure analyzed by observed data (black lines,unit: hPa) (dotted line ellipse: approximate location of heavy rain the heavy line is a trough line)

(b) 850-hPa stream lines and vapor flux divergence(dotted lines, unit: 10^{-7} g/(s•hPa•cm^2))

(c)500-hPa geopotential height (black lines,unit: dagpm), temperature (dotted lines,unit: ° C)

(d) 200-hPa stream lines and divergence (dotted lines, unit: $10^{-6}\cdot s^{-1}$)

(e)distribution of vertical vorticity (black lines, unit: $10^{-5}\cdot s^{-1}$) and horizontal wind along 31°N

(box: approximate location of heavy rain)

4 远距离暴雨的动热力条件及台风影响

4.1 第一阶段

第一阶段最强的降水发生在 2018 年 9 月 16 日 18-22 时，主要在长江口附近。16 日上午长三角地区受副高控制，天气晴好，14 时地面气温高达 30-33℃，用上海宝山站 14 时地面温度和露点温度修正 08 时的状态曲线得到的 CAPE 高达 2245J/kg，500hPa 和地面 θ_{se} 差达 22K。16 日 20 时长三角地区 K 指数约为 36-38°C。说明 16 日下午到夜里大气具有较强的条件不稳定性，只要有合适的触发条件就能产生对流。

16 日 17 时地面观测资料分析的气压场（图 3a)，可以看出倒槽曲率最大的地方从皖南伸到苏南沿海，槽线附近及其南侧的浙江中北部地面假相当位温 θ_{se} 约 360-364K，为高能量区。槽线以北的江苏安徽北部有 θ_{se} 密集带，有弱冷空气渗透南下。槽线附近及其南侧已出现降水。20（图 3b）地面气压场变化不大，等 θ_{se} 线略有南压，倒槽区 θ_{se} 梯度增大。江苏南部部分地区 6 小时降水已超过 100mm，基本发生在平原地区，没有明显的地形抬升。19 时（图 3c)地面观测的极大风，苏南沿海东南风 5-6 级，进入内陆后，风速减小，以 4 级为主，形成风速的辐合，这应该是由于海陆摩擦差异产生的。20 时（图 3d)在崇明岛的西面出现了 6-7 级的北到东北风，与其东面的东南风形成辐合。而其北侧有小范围的反气旋环流，疑似雷暴高压。20-21 时崇明岛的西侧还出现了 8 级的北到东北风。

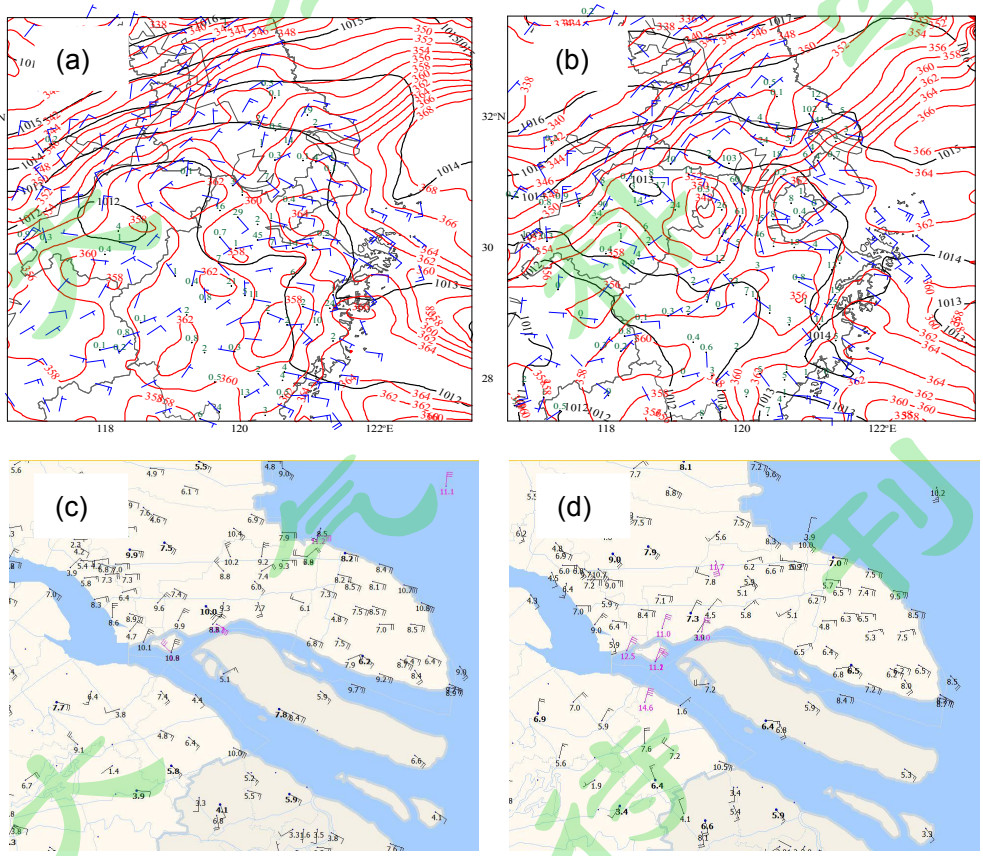

图 3　2018 年 9 月 16 日 17 时（a）、20 时（b）地面观测的气压(黑色等值线，单位：hPa) 、风、假相当位温(红色等值线，单位：K)和前 6 小时降水（绿色填图）

2018 年 9 月 16 日 19 时（c）、20 时（d）地面观测 1 小时极大风向风速

Fig. 3 surface pressure (black lines, unit: hPa), wind , pseudo-equivalent potential temperature (red lines, unit: K) and precipitation in the recent 6 hours (green mapping) at 1700 BJT (a) and 2000 BJT (b) on 16 September, 2018

maximum wind observed on surface in the recent 1 hour at 1900 BJT(c) and 2000 BJT (d) on 16 September, 2018

浙江湖州、江苏南通的雷达反射率因子产品都显示 16 日下午开始有一些零散的对流单体生成，在低层偏南气流引导下，朝偏北方向移动，但移至江苏中南部时低层环境场转为偏北气流，对流系统无法继续北上停滞在江苏南部。18：12（图 4a)在苏南形成较大范围的强回波，中心达 55dBz。根据径向速度产品（图 4b)风速和零线的分布可以推断南通附近近地层为东北风，南通站南侧约 20 km 处有一条明显的辐合线。之后在这条辐合线附近一直有 45-55dBz 的强回波维持。同时南通站北面约 30 km 处的回波也逐渐加强，19：30（图 4c)形成一条强的回波带，中心 50-55dBz。径向速度产品（图 4d)显示此时南通附近近地层转为东南风，说明地面倒槽北顶，槽线应在南通站北面的辐合区中，与强降水带对应。但在南通站南侧仍有小范围的偏北风和东南风交汇，并且在崇明岛西端形成了一个尺度约 10km 的气旋式涡旋。之后此涡旋缓慢东移，对应反射率因子产品崇明岛西端产生了一个很强的单体，组合反射率因子达到了 60dBz，顶高达 17km。此强回波移动非常缓慢，21：06（图 4e)崇明岛西部仍有很强的回波，呈弓状。径向速度产品（图 4f)上弓形回波前侧有尺度约 15km 的气旋，北侧有尺度约 10km 的反气旋性，说明此系统有强对流特征，此时地面观测到的 8 级偏北风为雷雨大风。20-21 时在此处产生了第一阶段最大的雨强（131mm • h^{-1}）。21：06 径向速度产品（图 4f)还显示低层的东南风有所加强，南通站北面的辐合线变得更加清晰，说明冷暖空气交汇更加强烈，对应此处的降水回波也加强（图 4e)。21-22 时雷达回波变化不大。22 时以后南通站北侧的强回波带和崇明岛附近的强回波都减弱了，但在常熟附近和东面海上还有强的单体生成（图略)，对应径向速度产品（图略)可以看到两个强单体对应的位置处各有一个 10-20km 的辐合区。强降水回波与倒槽辐合区密切相关，而东北风和东南风的相互渗透交汇形成的中 y 尺度的气旋性辐合是产生极端短时强降水的关键系统。

可见第一阶段暴雨是在强的对流不稳定条件下，对流层低层“山竹”倒槽辐合线在副高范围内触发对流产生。强对流系统产生的偏北风和东南风交汇加强了地面辐合，并形成了中 y 尺度的辐合系统，又使得系统发展加强。倒槽两侧东南风和东北风势力相当，使辐合线长时间在苏南维持，强回波长时间维持在同一地方，产生极端短时强降水。

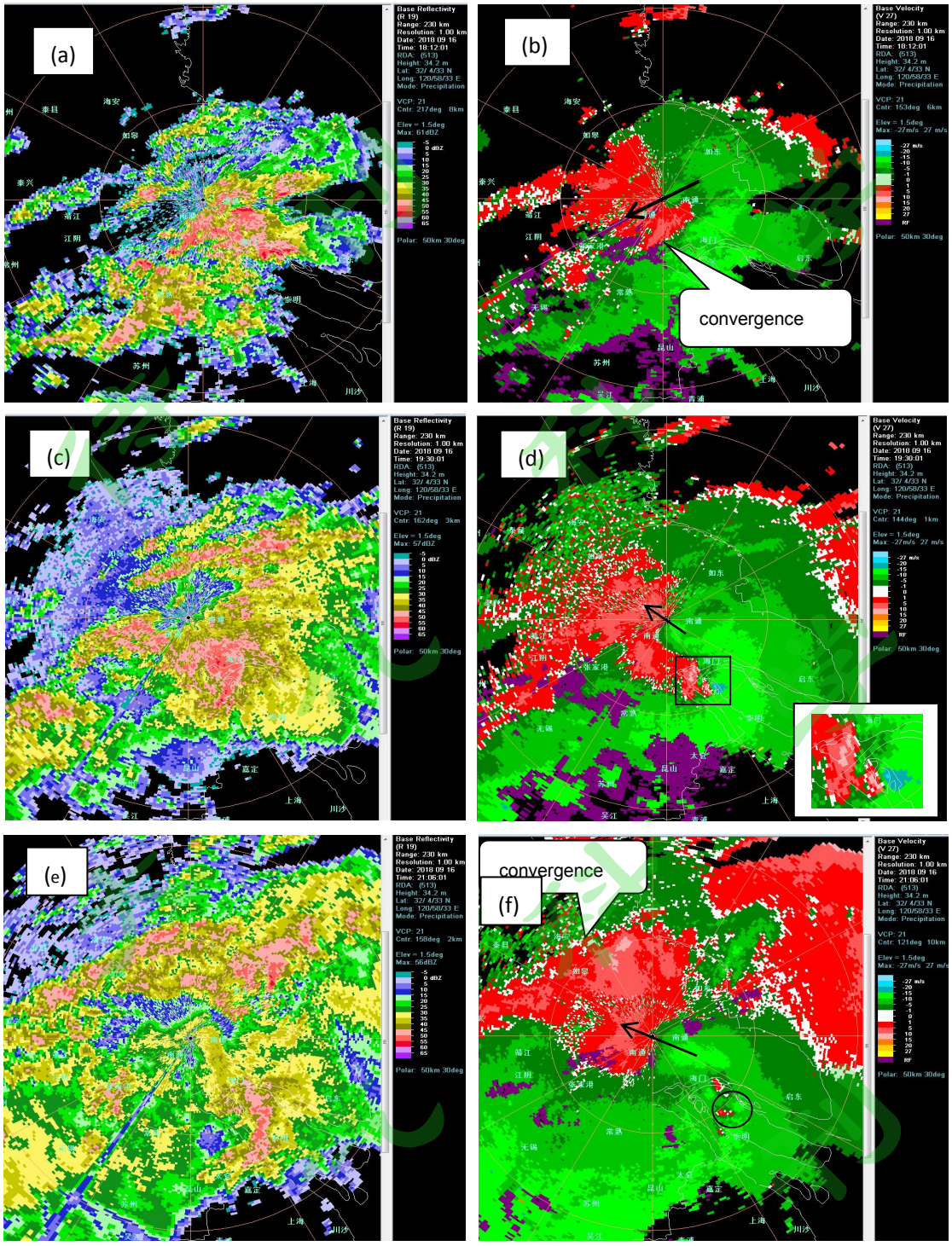

图 4　2018 年 9 月 16 日南通雷达 1.5 度仰角反射率因子（a :18:12 c:19:30 e: 21:06）和径向速度（b:18:12 d:19:30 f:21:06）

Fig. 4　The reflectivity factor with 1.5 degree elevation of Nantong radar at (a)18:12(BJT), (c)19:30(BJT), (e)21:06(BJT) on Sept 16, 2018 and radial velocity at (b)18:12(BJT), (d)19:30(BJT), (f)20:06(BJT) on Sept 16, 2018

4. 2 第二阶段

第二阶段是 17 日凌晨到夜里，17 日凌晨江苏南部的雨带缓慢东移，与浙东的雨带合并后逐渐南压到浙江南部沿海，降水中心在浙北沿海，雨量也是 100-200mm。

湖州雷达产品显示 16 日 19 时（图略）在安徽南部有较强的对流单体，反射率因子中心 50dBz（可能偏弱，距离雷达约 180km)，顶高最高 14km，回波前侧地面 1 小时降温 3°C，20 时（图 3b)在徽南浙北交界处形成一个闭合的 θ_{se} 低值中心，为 348K。湖州雷达产品显示 23 时以后苏南到浙北的回波开始朝北偏东方向移动，17 日 1：30（图 5a）在嘉兴海宁附近

形成了较强的回波单体，中心 50dBz，顶高最高 15km。同时速度产品（图 5b）可以看到近地层有下沉气流形成的辐散场。17 日 02 时（图 6a）地面观测资料显示 θ_{se} 低值中心到达嘉兴，受冷的下沉气流影响，附近地面气压升高，在倒槽区中部形成高压脊区，虽然还没有形成闭合的等压线，但风场已出现反气旋性环流特征。杭州湾区的等 θ_{se} 线变得密集，有锋生趋势。海宁附近下沉气流形成的辐散风与其南侧的东南风又形成辐合线（图 5b），使得此处长时间有强的降水系统维持。2：54（图 5c）在杭州湾北岸又形成了一个强的单体，相应的速度产品可以看到气旋性辐合（图 5d）。此后降水回波逐渐转向东北偏东方向移动，苏南的回波强度逐渐减弱。17 日 08 时（图 6b）地面 θ_{se} 低值中心进入杭州湾，又有所加强，中心达 346K。锋区南压到舟山、宁波沿海，锋区等 θ_{se} 线走向分布为东北西南向。受其影响，宁波沿海的偏北风力加大，11-12 时极大风力增大到 7 级，与海上的东南风辐合加强。并且宁波沿海有山脉，海上东南气流上岸后会受到地形抬升。浙江舟山雷达产品显示 17 日上午降水回波东移过程中，强中心逐渐南压，最强的回波维持在宁波沿海直到下午，并变为东北西南走向带状（图 5e），与地面图上的锋区走向一致。速度产品（图 5f)可以看到强回波处有两个气旋性的环流，一个直径约 40km，另一个约 20km，匀位于海岸线附近。11-14 时宁波多个站点雨强超过 100mm・h^{-1}。

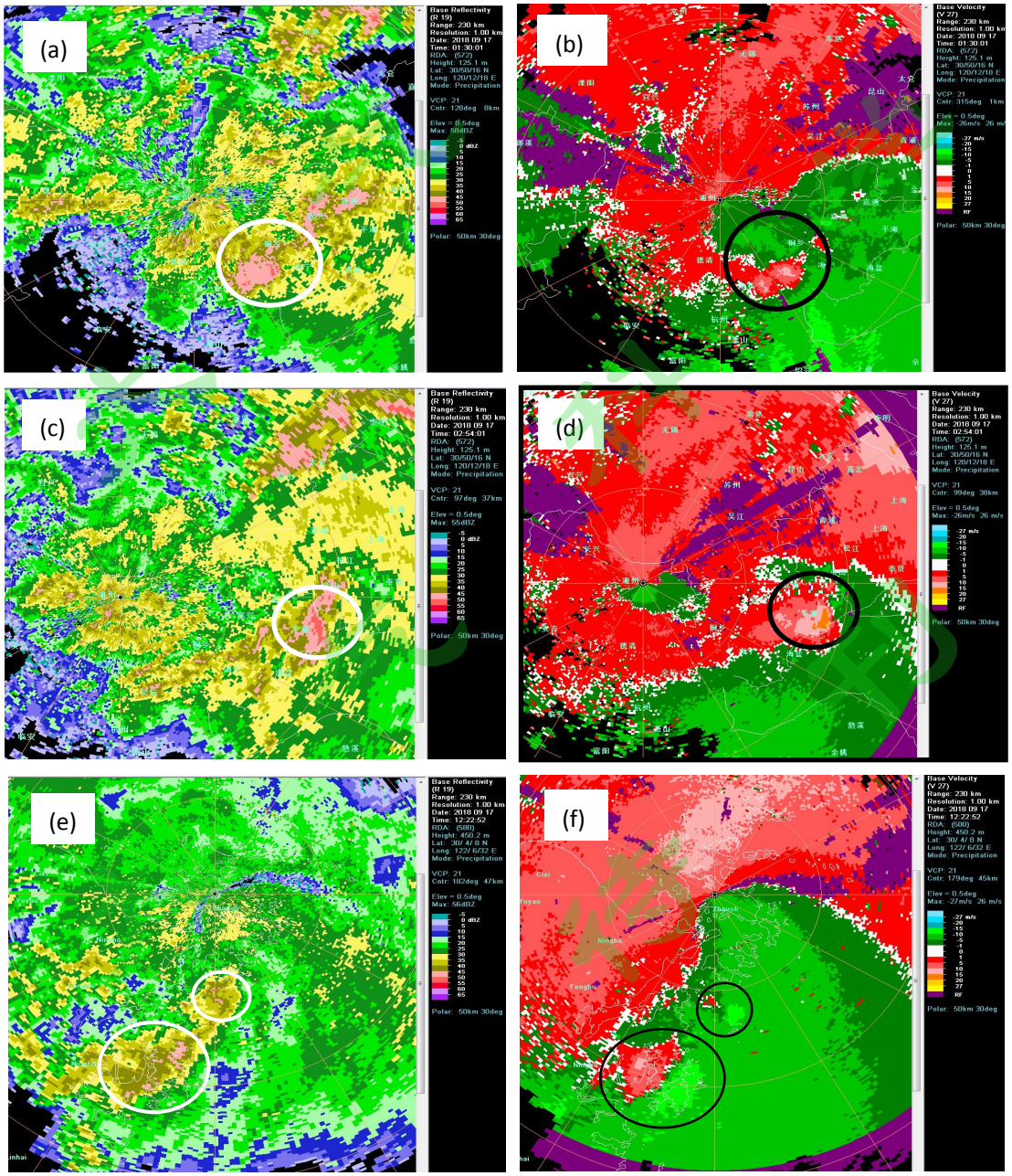

图 5　2018 年 9 月 17 日湖州雷达 0.5 度仰角反射率因子（a :01:30 c:02:54）和径向速度（b:01:30 d:02:54）

2018 年 9 月 17 日舟山雷达 0.5 度仰角反射率因子（e: 12:23）和径向速度（f:12:23）

Fig. 5　The reflectivity factor with 0.5 degree elevation of Huzhou radar at (a)01:30(BJT), (c)02:54(BJT) on September 17, 2018 and radial velocity at (b)01:30(BJT), (d)02:54(BJT) on September 17, 2018

The reflectivity factor with 0.5 degree elevation of Zhoushan radar at (e)12:23(BJT) on September 17, 2018 and radial velocity at (f)12:23(BJT) on September 17, 2018

17 日 02 时沿 121°E（过 29-32°N 暴雨区，绿色方框）的垂直速度、流场、θ_{se} 的剖面分布显示（图 6d），32°N 以北等 θ_{se} 线分布非常陡峭，南方暖湿空气沿等熵面上升。暴雨区低层水平风为东南偏南风，高空为西南风（图略），有一定的垂直风切变，即水平涡度。空气在水平辐合上升过程中可把水平涡度转为垂直涡度，有利于气旋的发展。主要暴雨区上空天气尺度的上升速度中心为-2.4hPa•s^{-1}，是非常强的上升速度。17 日 08 时随着 500hPa 短波槽的东移南压，上升速度中心南压到 30°N 附近（图略），地面强降水中心也随之南移，是第二阶段降水最强的时刻。

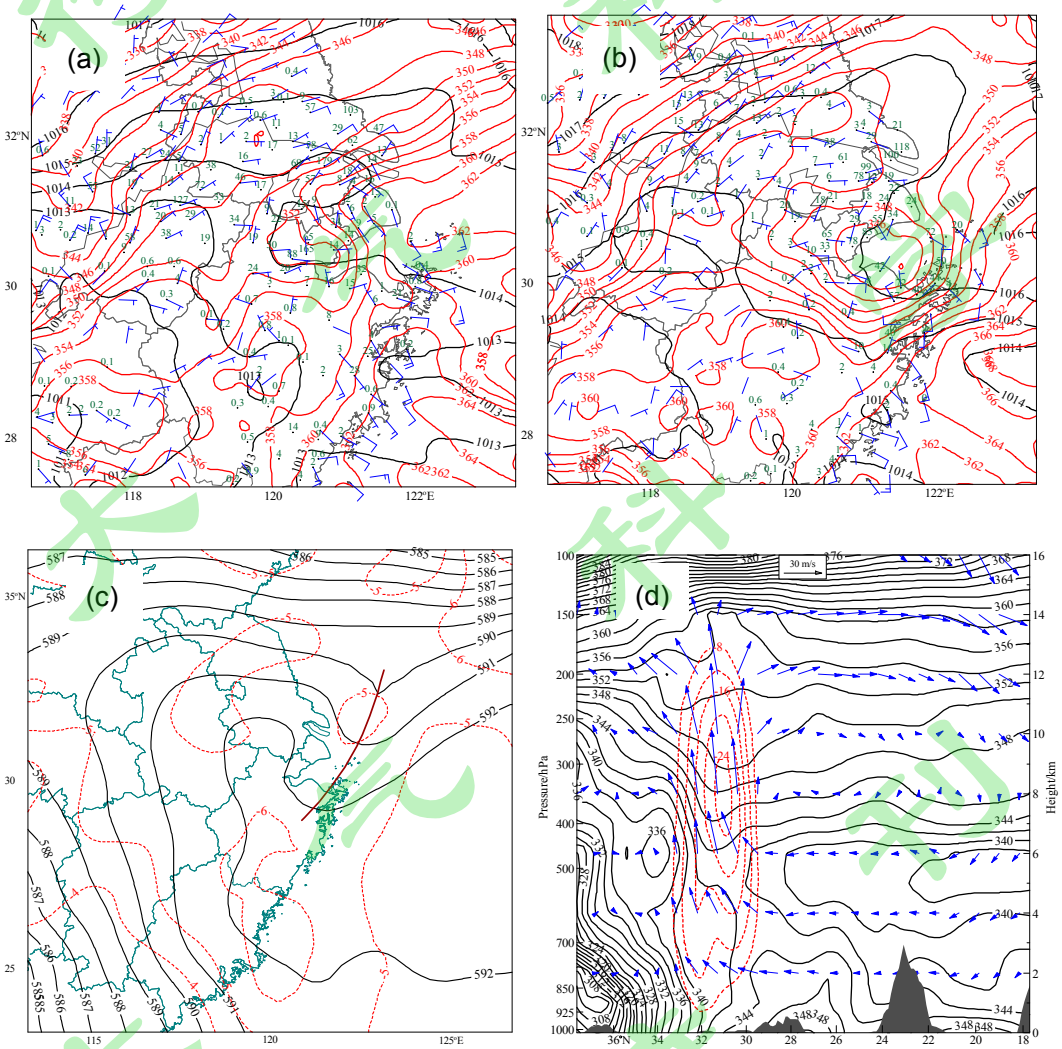

图 6　2018 年 9 月 17 日 02 时（a）、08 时（b）地面观测的气压(黑色等值线，单位：hPa) 、风、假相当位温(红色等值线，单位：K)和前 6 小时降水（绿色填图）

（c）2018 年 9 月 17 日 08 时 500hPa 高度（黑色等值线，单位：dagpm）、温度(红色等值线，单位：℃) （棕色粗实线为槽线）

（d）2018 年 9 月 17 日 02 时假相当位温(黑色实线，单位：K)、垂直速度(红色虚线，单位：10^{-1}hPa•s^{-1})、风矢量（垂直速度放大 100 倍）沿 121° E 垂直剖面

Fig.6 surface pressure (black lines, unit: hPa), wind,pseudo-equivalent potential temperature (red lines, unit: K) and precipitation in the recent 6 hours (green mapping) at 0200 BJT (a) and 0800 BJT (b)on 17 September 2018

(c) 500-hPa geopotential height (black lines, unit: dagpm), temperature (red lines, unit: ℃) (the thick brown line is a trough line) at 0800 BJT on 17 September 2018

(d) false-equivalent potential temperature (solid black lines, unit: K), vertical velocity (dotted red lines, unit: 10^{-1}hpa • s^{-1}), wind vector (vertical velocity magnified by 100 times), along 121° E on 0200 BJT 17 September 2018

第二阶段和第一阶段相比，地面气温降低，垂直对流不稳定条件有所减弱。但仍有很强的降水回波生成，主要是因为前一阶段生成的强回波单体中产生较强的偏北外出气流，与前侧东南风形成辐合线，辐合线上还有中 γ 尺度的涡旋产生，又促进了对流发展。而对流层低层台风倒槽中低涡发展，500hPa 副高边缘短波槽的生成，使暴雨区垂直速度明显增加，动力条件更为有利。长三角的强降水中心有 3 个（图 1a)，分别在长江口、杭州湾北岸的嘉兴沿海及宁波沿海，都是在水陆边界附近。地面观测资料可以看到海上的东南风到陆地上减小，形成风速的辐合。另外雷达径向速度产品显示在崇明岛、嘉兴及宁波沿海都有中 γ 尺度的涡旋系统，对应强降水回波。这种水陆边界处的涡旋系统有可能的形成原因是：由于水陆摩擦的差异，实际风与地转风的偏折角大小不同，东南风在水陆边界处会减小，并向左偏折，形成正涡度。还有可能大气受到陆地不匀均地形的阻挡，发生绕流之后形成涡旋。这都还有待进一步深入研究确认。

4.3 远距离暴雨区的涡度收支

根据以上分析，在降水过程中 850hPa 台风倒槽顶端发展出低涡，500hPa 则生成短波槽，为第二阶段暴雨提供了更强的动力作用。尤其是 12 小时内在副高边缘形成一个明显短波槽，这种情况比较少见。下文采用涡度方程来诊断短波槽的生成发展机制。不考虑摩擦及积云对垂直涡度的输送效应，涡度方程如下：

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}=-[(u\frac{\partial\zeta}{\partial x}+v\frac{\partial\zeta}{\partial y}+v\frac{\partial f}{\partial y})]-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}-(\zeta+f)(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y})+(\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p}-\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}) \quad (1)$$

其中 u , v 分别为纬向、经向水平风速（单位：m•s^{-1})，ω 为垂直速度（单位：hPa•s^{-1}), ζ 为涡度（单位：s^{-1})， f 为科里奥利参数（单位：s^{-1})。公式右边四项分别为绝对涡度水平平流项（用 A 表示），相对涡度垂直输送项（用 B 表示），水平辐合辐散项（用 C 表示），扭曲项（用 D 表示），总涡度收支用 E 表示。选择强降水区域（29-33°N，118-123°E，即图 1a 中紫色方框内）诊断涡度方程各项，采用水平分辨为 0.5° ×0.5° 的 NCEP 再分析资料，中央差分的方式计算各偏微分项。

图 7 给出暴雨发生主要时刻涡度方程各项及总涡度收支的垂直廓线。16 日 14 时降水开始时（图 7a），总的涡度收入最大值出现在 1000hPa，为 $1\times10^{-9}s^{-2}$。这完全是水平辐合辐散项 C 提供的。16 日 20 时（图 7b）总的涡度收入 1000hPa 略有增加，而 850hPa 增加非常明显，达到 $1.8\times10^{-9}s^{-2}$，成为最大收入层，主要来自水平辐合辐散项 C 和扭曲项 D 的贡献。此时，850hPa 以上高度层相对涡度垂直输送项 B 开始增大，即垂直运动加强把低层的垂直涡度向上输送。17 日 02 时(图 7c)总的涡度收入最大层在 850hPa-700hPa 之间，约为 $2.1\times10^{-9}s^{-2}$，仍主要是由水平辐合辐散项 C 和扭曲项 D 贡献，其中水平辐合辐散项 C 达到了 $3.2\times10^{-9}s^{-2}$。700hPa 以上高度相对涡度垂直输送项 B 增加明显，最大值在 500hPa，也达到了 $3.2\times10^{-9}s^{-2}$，成为 500hPa 涡度增加的重要原因。与此同时 700hPa-500hPa 的水平辐合辐散项 C 也开始增加。17 日 08 时（图 7d）总的涡度收入最大层在 600-450hPa 之间，主要由垂直输送项 B 和水平辐合辐散项 C 贡献。

可以看出，整个远距离暴雨过程中主要由近地层水平辐合辐散项 C 提供初始扰动，然后 850hPa 水平辐合辐散项 C 和扭曲项 D 共同作用使低涡发展加强。同时在垂直运动作用下把涡度往上传递，使中层 700-500hPa 附近涡度增长，发展出短波槽。之后中层的水平辐合辐散项 C 也开始增长，使总涡度增加，短波槽进一步加深。这一过程中 500hPa 以下绝对涡度水平平流项 A 没有正的贡献，即没有西风槽或其它外来系统为暴雨区提供正涡度。

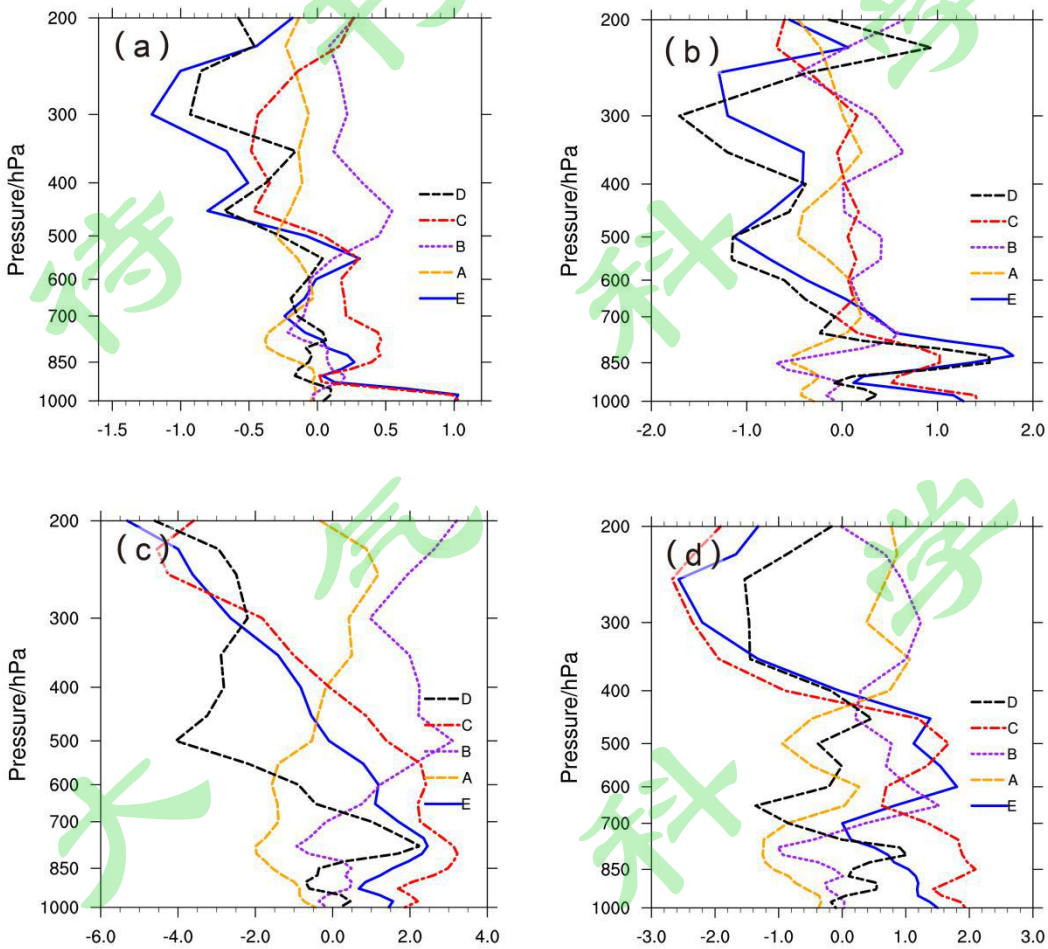

图 7　2018 年 9 月 16 日 14 时（a）、16 日 20 时（b）、17 日 02 时（c）、17 日 08 时（d）降水区（29-33° N，118-123° E）涡度方程各项收支（A、B、C、D）及总涡度收支（E）平均的垂直分布（单位：$10^{-9}s^{-2}$）

Fig. 7 mean vertical distribution (unit: $10^{-9}s^{-2}$) of all terms of vorticity (A、B、C、D) and the total vorticity balance (E) in the heavy rain area (29-33°N, 118-123°E)

(a)1400 BJT,(b)2000 BJT, on 16 September 2018,(c)0200 BJT,(d)0800 BJT,on 17 September 2018

下面通过涡度各项的水平分布结合流场进一步分析涡度的来源（图 8）。上述分析可知最初的涡动扰动主要来自 1000hPa 的水平辐合辐散项 C。图 8a 给出 2018 年 9 月 16 日 14 时 1000hPa 流场和水平辐合项 C 分布。可见两个大值中心，一个位于江苏沿海，即台风倒槽顶端，另一个在浙江、福建交界处，也是台风倒槽曲率最大处。16 日 20 时（图略）随着台风西移，其倒槽也西行，但倒槽顶端受西面冷高压的阻挡，在江苏、安徽南部形成一条辐合线，水平辐合项 C 增大。可见台风倒槽提供了 1000hPa 的正涡度。

图 8b 显示 16 日 20 时 850hPa 的流场和涡度扭曲项 D 分布。安徽南部为台风倒槽区，涡度扭曲项 D 在此处最大，超过 $50\times10^{-9}s^{-2}$，涡度扭曲项 D 的物理意义是由于风的垂直切变形成水平涡度，在水平分布不均匀的垂直运动作用下将使水平涡度向垂直涡度转换。由于 850hPa 此处为东南急流的左前侧，风速比 1000hPa 大，形成了较强的垂直风切变，即水平

涡度。而倒槽区垂直速度的水平梯度较大，使水平涡度向垂直涡度转换。此时涡度水平辐合项 C 大值区也是位于安徽南部台风倒槽区（图略）。17 日 02 时（图 8c）850hPa 在江苏西南部形成气旋性环流中心，即低涡，涡度水平辐合项 C 大值位于低涡东南侧。17 日 08 时 850hPa（图略）低涡东移到江苏南部到上海沿海，其南侧为偏南急流前沿，垂直风切变较大，形成涡度扭曲项 D 正值中心。总的来看，850hPa 的涡度水平辐合项 C 和涡度扭曲项 D 的大值中心都位于倒槽或低涡的东南侧或南侧，即急流的前沿左侧。可认为 850hPa 的涡度来自于台风倒槽和副高边缘的偏南风急流。

而前述分析表明 500hPa 的涡度主要是来自于相对涡度垂直输送项 B。17 日 02 时 500hPa（图 8d）显示，涡度垂直输送项 B 大值区位于江苏南部，对应 850hPa（图 8c）低涡及海上倒槽的位置，说明 500hPa 的涡度主要来自于低层。

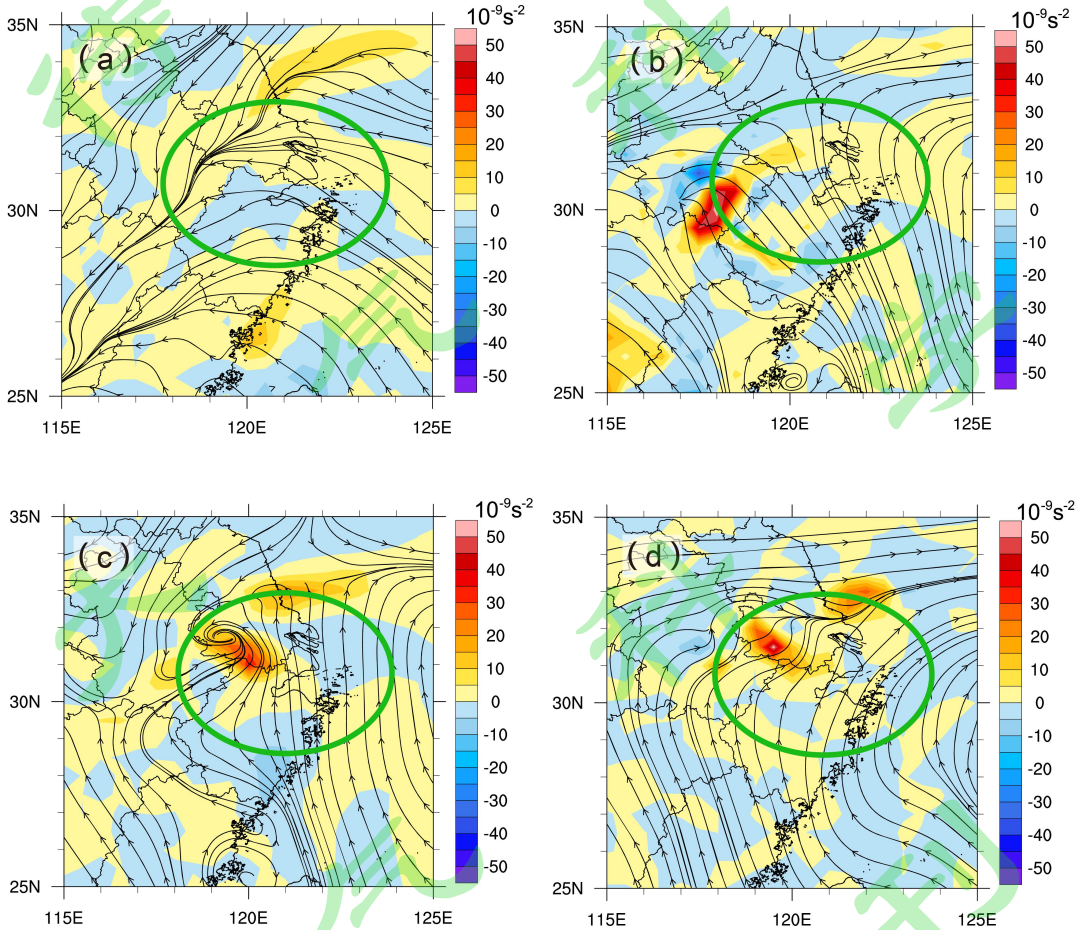

图 8 （a） 2018 年 9 月 16 日 14 时 1000hPa 流场和涡度散合项分布（阴影，单位：$10^{-9}s^{-2}$）
（b） 2018 年 9 月 16 日 20 时 850hPa 流场和涡度扭曲项分布（阴影，单位：$10^{-9}s^{-2}$）
（c）2018 年 9 月 17 日 02 时 850hPa 流场和涡度散合项分布（阴影，单位：$10^{-9}s^{-2}$）
（d）2018 年 9 月 17 日 02 时 500hPa 流场和涡度垂直输送项分布（阴影，单位：$10^{-9}s^{-2}$）
（绿色椭圆：整个过程暴雨区大致位置）

Fig. 8 (a)1000-hPa stream lines and distribution of divergence vorticity term at 1400 BJT on 16 September 2018 (shadow, unit: $10^{-9}s^{-2}$)
(b) 850-hPa stream lines and distribution of vorticity distortion term at 2000 BJT on 16 September 2018 (shadow, unit: $10^{-9}s^{-2}$)
(c) 850-hPa stream lines and distribution of vorticity divergence term at 0200 BJT on 17 September 2018 (shadow, unit: $10^{-9}s^{-2}$)
(d) 500-hPa stream lines and distribution of vertical vorticity transport item at 0200 BJT on 17 September 2018 (shadow, unit:$10^{-9}s^{-2}$)
(green ellipse： the approximate location of the rainstorm area during the whole process)

为了进一步说明副高中短波槽的发展机制，我们对另一次相似个例的涡度收支进行诊断。2017 年 10 月 16 日凌晨台风“卡努”以强热带风暴级登陆广东徐闻，10 月 15-16 日浙江舟

山、宁波和台州沿海出现大暴雨。天气形势与本次过程类似，低层 850hPa 以下有台风倒槽，500hPa 处于副高 588dagpm 线范围内，在暴雨过程中 850hPa 形成低涡，500hPa 副高北侧边缘产生一个短波槽。诊断 2017 年 10 月 15 日 08 时到 16 日 08 时暴雨区（29-31°N，121-124°E）的涡度收支情况。发现两次过程暴雨区的涡度收支有共同的特点：近地层水平辐合辐散项 C 提供初始扰动，然后低层水平辐合辐散项 C 和扭曲项 D 共同作用使低涡发展加强，在垂直运动作用下涡度上传使中层 700-500hPa 附近涡度增长，最终发展出短波槽。低层台风倒槽和副高边缘的偏南急流是该区域涡度增长的主要原因。

5. 结论

利用地面、探空观测资料、雷达遥感资料以及 NCEP 一日四次 0.5° ×0.5° 再分析资料，对 2018 年第 22 号台风“山竹”影响下 9 月 16-17 日长三角区域暴雨的降水实况、天气系统和动热力条件进行诊断分析，获得以下结论：

1）长三角暴雨发生在“山竹”云系和本体降水范围之外，距离“山竹”中心大于 1000km，是一次发生在强盛的副高环流控制下的 TRP，低层受台风倒槽影响。

2）此暴雨过程分为两个阶段：第一阶段，主要是在强的对流不稳定条件下，对流层低层“山竹”倒槽中的辐合线触发对流产生，倒槽两侧东南风和东北风势力相当，使辐合线长时间在苏南维持，产生极端强降水。同时高空“山竹”极向流出汇入西风带，加大了中纬度的西风风速和辐散，有利于上升运动的维持。第二阶段，对流不稳定条件有所减弱，但前一阶段生成的强回波中产生较强的偏北外出气流，与前侧东南风形成辐合线，辐合线上还有中 y 尺度的涡旋产生，又促进了对流发展。台风倒槽顶端在偏南风急流的作用下形成一个低涡，500hPa 发展出一个短波槽，垂直速度明显加大，动力条件更有利。

3）长三角的 3 个强降水中心分别在长江口、杭州湾北岸的嘉兴沿海及宁波沿海，都是在水陆边界附近。雷达径向速度产品显示在崇明岛、嘉兴及宁波沿海都有中 y 尺度的系统，对应强降水回波。

4）台风“山竹”对长三角地区远距离暴雨的作用：（1）与副高之间形成偏南风低空急流向长三角地区输送水汽；（2）台风倒槽提供初始涡度扰动，触发对流；（3）台风高层极向流出汇入西风带，加大了中纬度的西风风速及辐散，加强了暴雨区上升运动。

5）典型 TRP 的降水系统主要是东移的西风槽，而这次过程主要由低空台风倒槽和偏南急流提供初始扰动，涡度上传形成副高边缘短波槽，是不同于典型 TRP 事件的一个物理过程，另一次“卡努”台风的远距离暴雨也有类似的物理过程。

本研究对实际业务的启示：当南海有台风时，长三角地区应注意考虑是否有远距离降水，即使高空是高压系统控制。地面风场辐合和雷达产品显示的辐合线与强降水相对应，而雷达产品若有中 y 尺度系统，则可能有短时强降水。注意水陆边界对降水的增幅影响。

研究也存在一些有待深入探讨的问题，暴雨过程中水汽输送和降水凝结释放潜热对 850hPa 低涡和 500hPa 短波槽的形成是否存在积极作用。涡度诊断采用的再分析资料时空分辨率不够精细，可进行数值模拟后再作进一步分析。另外还需要对多个相似个例进行分析，得出更有代表性的结论。

参考文献（Reference）

Byun K Y, Lee T Y. 2012. Remote effects of tropical cyclones on heavy rainfall over the Korean peninsula - statistical and composite analysis [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 64(1): 14983. doi:10.3402/tellusa.v64i0.14983

曹晓岗，王慧. 2016. “8• 23—24”上海远距离台风大暴雨影响分析 [J]. 气象，42(10): 1184-1196. Cao Xiaogang，Wang Hui. 2016. Analysis on the influence of long-distance heavy rain caused by typhoon "8 • 23 -- 24" in Shanghai [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(10): 1184-1196. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.003

陈联寿. 2007. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C].第十四届全国热带气旋科学讨论会，上海，3-7p. Chen Lianshou. 2007. Study and forecast of tropical cyclone Rainstorm landing [C]. 14th National Symposium on Tropical Cyclone Science, Shanghai, 3-7

陈联寿，孟智勇,丛春华. 2017. 台风暴雨落区研究综述[J] .海洋气象学报，37(4) :1-7. CHEN L S, MENG Z Y, CONG C H. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4):1-7. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.001

陈联寿，许映龙. 2017. 中国台风特大暴雨综述 [J]. 气象与环境科学，40(1): 3-10. Chen Lianshou, Xu Yinglong. 2017. Summary of heavy rainstorms caused by typhoons in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 40(1): 3-10. doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.01.001

丛春华. 2011. 热带气旋远距离暴雨的研究 [D]. 中国气象科学研究院. Cong Chunhua. 2011. On the study of the mechanism of Tropical Cyclone remote precipitation [D]. Chinese academy of meteorological sciences.

丛春华，雷小途，陈佩燕. 2016. 山东两次热带气旋远距离暴雨对比分析 [J]. 中国海洋大学学报，46(12): 21-31. Cong Chunhua, Lei Xiaotu, Chen Peiyan. 2016. A comparative analysis of long-distance rainstorm caused by two typhoons in Shandong Province [J]. Periodical of Ocean University of China, 46(12): 21-31. doi: 10.16441/j.cnki.hdxb.20160034

Cote M R. 2007. Predecessor rain events in advance of tropical cyclones [D]. Department of Atmospheric and Environmental Sciences, University at Albany, State University of New York.

董美莹，陈锋，许娈，等.2017. 浙江省热带气旋倒槽暴雨气候特征研究 [J]. 热带气象学报，33(1): 84-92. Dong Meiying, Chen Feng, XU Soi, et al.2017. Climate characteristics of tropical cyclone Downpours in Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Tropical Meteorology, 33(1): 84-92.doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2017.01.009

段丽，陈联寿. 2005. 热带风暴“菲特” (0114) 特大暴雨的诊断研究 [J]. 大气科学，29(3): 343-353. Duan Li, Chen Lianshou. 2005. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 343-353. doi: 10.3878/j.ssn.1006-9895.2005.03.02

范学峰，吴蓁，席世平. 2007. AERE 台风远距离降水形成机制分析 [J]. 气象，33(8): 12-16. Fan Xuefeng, Wu Zhen, Xi Shiping. 2007. Analysis on the formation mechanism of long-distance precipitation caused by typhoon AERE [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(8): 12-16.doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.08.002

Galarneau Jr T J, Bosart L F, Schumacher R S. 2010. Predecessor rain events ahead of tropical cyclones [J]. Monthly Weather Review, 138(8): 3272-3297. doi: 10.1175/2010MWR3243.1

黄克慧，陈宣淼，楼茂园，等. 2019. 台风倒槽浙江暴雨的“配料法”研究 [J]. 科技通报，35 (9): 12-21. Huang Kehui, Chen Xuanmiao, Lou Maoyuan, et al. 2019. Study on "batching method" of heavy rain caused by typhoon trough in zhejiang province [J]. Bulletin of Science and Technology, 35(9): 12-21. doi: 10.13774/j.cnki.kjtb.2019.09.003

李改琴，梁海河，王树文，等. 2007. 台风海棠远距离暴雨中尺度系统特征 [J]. 气象，33 (8)：18－22. Li Gaiqin, Liang Haihe, Wang Shuwen, et al. 2007. The mesoscale system character analysis of far distance typhoon Haitang rainstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (8): 18－22.doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2007.08.003

李明，高维英，杜继稳，等. 2011. 远距离台风影响下的陕西大暴雨分析 [J]. 干旱区研究，28(3)：514-523. Li Ming, Gao Weiying, Du Jiwen, et al. 2011. Analysis of heavy rain in shaanxi province under the influence of long-distance typhoon [J]. Arid Zone Research, 28(3): 514-523.doi: 10.13866/j.azr.2011.03.023

梁军，李英，张胜军，等. 2015. 影响辽东半岛两个台风Meari和Muifa暴雨环流特征的对比分析 [J]. 大气科学，39(6)：1215-1224. Liang Jun, Li Ying, Zhang Shengjun, et al. 2015. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1215-1224. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14191

潘劲松，周玲丽，陆玮，等. 2019. 两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析 [J]. 大气科学，43(6)：1399-1412. PAN Jinsong, ZHOU Lingli, LU Wei, et al. 2019. Comparative Analyses of Mechanisms and Energy Budgets of Local Extreme Rainfall Events Caused by Remnant Clouds ofTwo Typhoons with Similar Tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1399-1412. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18239

孙力，董伟，药明，等. 2015. 1215 号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析 [J]. 气象学报，73(01)：36-49. Sun Li, Dong Wei, Yao Ming, et al. 2015. Analysis on the cause of rainstorm and asymmetric distribution of precipitation of "bravan" typhoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73(01):36-49. doi: 10.11676/qxxb2015.004

孙欣，陈传雷. 2009. “环高”热带风暴登陆后路径分析及其对辽宁暴雨影响 [J]. 气象科学，29(4)：536-540. Sun Xin, Chen Chuanlei. 2009. Analysis of the track of tropical storm "Vamco" after landfall and its influence on rainstorm in liaoning province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29(4): 536-540.doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2009.04.017

孙兴池，吴炜，孙莎莎. 2019. 登陆北上山东台风暴雨非对称分布的成因对比分析 [J]. 海洋气象学报， 39(3)：55-63. Sun Xingchi, Wu Wei, Sun Shasha. 2019. A comparative analysis of the causes of the asymmetric distribution of typhoon and rainstorm in the east of shangshan [J]. Journal of Marine Meteorology, 39(3): 55-63. doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.007

Wang Y, Wang Y, Fudeyasu H. 2009. The role of Typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan [J]. Monthly Weather Review, 137(11): 3699-3716.doi: 10.1175/2009mwr2933.1

汪亚萍，崔晓鹏，冉令坤，等. 2015. 动力因子对 2006“碧利斯”台风暴雨的诊断分析 [J]. 大气科学，39 (4)：747-756. Wang Yaping, Cui Xiaopeng, Ran Lingkun, et al. 2015. Diagnosis of dynamical parameters in torrential rain associated with typhoon “Bilis” in 2006 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 747-756, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14184.

杨晓霞，陈联寿，刘诗军，等. 2008. 山东省远距离热带气旋暴雨研究 [J]. 气象学报，66 (2)：236－250. Yang Xiaoxia, Chen Lianshou, Liu Shijun, et al. 2008. A study of the far distance

tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (2): 236－250, doi:10.11676/qxxb2008.023.

周玲丽, 翟国庆, 王东法, 等. 2009. 0505 号“海棠”台风暴雨数值模拟试验和分析 [J]. 大气科学, 33(3): 489-500. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Dongfa, et al. 2009. Numerical simulation and analysis of typhoon Haitang (0505) heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(3): 489-500. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.07

周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 2011. 0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析 [J]. 大气科学, 35(6): 1046-1056. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Donghai, et al. 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 typhoon Wipha [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(6): 1046-1056. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.05

朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (5): 669－675. Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669－675, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.11