

1323 号台风“菲特”螺旋云带中“列车效应”特征及形成分析

薛煜¹ 李靓靓¹ 朱业² 张红蕾^{1,3} 刘瑞¹ 翟国庆¹

1 浙江大学地球科学学院, 杭州, 310027

2 浙江省海洋监测预报中心, 杭州, 310007

3 浙江省气象科学研究所, 杭州, 310004

摘要 本文针对 1323 号强台风“菲特”螺旋云带中出现“列车效应”的特征及形成开展了分析研究。研究发现, 浙江钱塘江湾南岸持续性降水中具有“列车效应”特征, 按照雨带的稳定位置, 将其分为两次“列车效应”过程, 时间跨度都在 3-4 小时左右, 空间跨度在 1-2 个经度距离; 暴雨区呈现出带状特征, 降水效率高, 每小时降水超过 25mm 并向前线性传播; 台风螺旋云带中强度在 35dBZ 以上的雷达回波平均反射率也呈现线性带状结构; 降水带走向和雷达回波运动方向与台风中心运动方向产生了大致在 25°以上的向右偏离。从“列车效应”的形成来看, 高空引导气流的方向和地面中尺度扰动辐合带走向与“列车效应”中对流单体运动方向基本一致, 为其呈近线性排列提供依据。沿海形成的中尺度扰动辐合或扰动涡旋, 为螺旋云带中对流在沿海地区发生或发展提供重要条件, 形成了对流云的快速增长和后续发展的启动和维持机制, 对于“列车效应”的形成、发展和维持起了重要作用。

关键词 螺旋云带 列车效应 台风暴雨 中尺度滤波 中尺度辐合

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

An Analysis of Characteristics and Formation of "Train Effect" in the Spiral Cloud Belts of Typhoon "Fitow" (No 1323)

Xue Yu¹, Li Liangliang¹, Zhu Ye², Zhang Honglei^{1,3},

Liu Rui¹, and Zhai Guoqing¹

1 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2 Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007

3 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310004

Abstract In this paper, the characteristics and formation of "train effect" in the spiral cloud belt of Typhoon "Fitow" (No 1323) are analyzed. The results show that there is a "train effect" during persistent rainfall over the south bank of the Bay of Qiantangjiang in Zhejiang. According to the stable position of the rain belt, it can be divided into two "train effect", they last about 3-4 hours, and the space span is 1-2 longitude distance; The rainstorm area shows the characteristics of band, with high precipitation efficiency. The precipitation exceeds 25mm per hour and propagates forward linearly. The average reflectivity of radar echo in the spiral cloud belt of typhoon with over 35dBZ also shows a linear band structure. The trend of precipitation belt and radar echo deviated from the typhoon center by more than 25 degree to the right. From the formation of the "train effect", the direction of the high-altitude guided air flow and the direction of the surface mesoscale disturbance convergence zone are basically consistent with the movement direction of the convective cell in the "train effect", which provides the basis for its nearly linear arrangement. The mesoscale disturbance convergence or vortex formed along the coast provides important conditions for the occurrence or development of convection in the spiral cloud belt in coastal areas, and forms the beginning and maintenance mechanism for the rapid growth and subsequent development of convective clouds, which plays an important role in the formation, development and maintenance of "train effect".

Keywords Spiral cloud belts; train effect; typhoon rainstorm; mesoscale filtering; mesoscale convergence

引言

我国位处东亚地区，有着狭长的海岸线，是世界上受台风影响最多的国家之一。台风雨是台风活动造成的降水现象，也是引起我国暴雨的一个主要类型（陈联寿, 孟智勇, 2001）。登陆台风的暴雨强度和落区除与台风本身强度、结构有关外，还与高低空急流、冷空气活动、中纬度系统、不稳定能量、地形及强的环境垂直风切变、低层辐合高层辐散的高低空配置等因素有关，也存在多种尺度天气系统配合（寿绍文, 2019）。因此登陆台风暴雨的形成机理十分复杂，预报难度大。

Ryan P. Aylward 和 Jamie L. Dyer (2010) 认为, “列车效应” 风暴系统是一个个对流单体在同一位置不断传播。当多个风暴单体(雷雨云团)先后经过同一个地点, 就像列车的不同车厢先后经过同一铁轨一样, 间歇性的短时强降水将最终对该地造成局地大暴雨或特大暴雨, 国内气象工作者将这种现象形象地称为“列车效应”。台风造成的暴雨常与台风螺旋云带有关, 螺旋云带往往就像一条条水汽通道, 跟随台风中心呈螺旋式向前运动, 因此常会引起大暴雨或特大暴雨。因此, 研究台风螺旋云带中的“列车效应”对于完善极端降水预报和减少人民群众生命财产损失具有重要意义。

陈华宣等(2011)认为副热带高压、高低空急流、风速辐合、低层辐合高层辐散流场等是有利于产生特大暴雨的环流形势特征, 暴雨雨带通常位于 500hPa 副高 588 线外侧的 100~200km 范围内, 稳定的环流形势有利于对流性降水发生“列车效应”。黄小玉等(2009)研究了台风“碧利斯”与“圣帕”中暴雨的“列车效应”, 两次过程都有暖平流上叠加辐合风场的特征, 形成了有利于强降水的环境背景。此外, 地形对暴雨的增幅作用不能忽视, 地形对降水的增幅作用包括地形摩擦辐合与抬升作用。郑庆林等(1996)提出, 海岸线的分布会造成台风降水的不对称分布和强度变化, 在华南登陆的台风主雨区多在台风东侧, 而华东登陆的台风雨区常在北侧。

研究中发现, 台风引起的“列车效应”影响时间有长有短, 短则 2-4 小时, 长的可达 10 小时, 如胡端英等(2012)发现台风“巨爵”回波单体强度强, 传播慢, 传播方向和系统整体移向基本一致, 影响时间可达到 13 小时, 而黄小玉(2009)对台风“碧利斯”研究发现“列车效应”作用时间约为 4 小时。螺旋雨带的形成及其中对流单体的排列可能与重力惯性波有关。李英(2007)发现台风麦莎(Matsa)在移动方向上具有强降雨带波状分布和传播特征, 指出台风北向传播的大型波状雨带分布特征与大气重力内波与大气惯性波的混合波特征有关。寿绍文(2003)也指出, 近年来的研究中发现传播性的中尺度雨带和重力波有密切关系, 与强降水相联系的重力波一般是振幅较大, 存在时间较长的重力波, 重力波出现于对流天气发展之前, 起着一种触发机制的作用, 当已经产生的对流天气区有重力波通过时, 对流强度会发生周期性变化。一方面, 台风螺旋云带作为一个绕着中心轴旋转运动的整体, 在登陆之后云系向外扩展而偏离原有轨道并受到重力波作用, 螺

旋雨带中的对流单体可能会呈现近似线性的排列方式。另一方面,受到充沛的水汽输送、低层弱冷空气的渗透触发、环境风切变、地面辐合线以及地形的组织抬升等多种物理条件的作用,这些均可能成为台风“列车效应”形成和维持的条件(蔡小辉等, 2012; 柯文华等, 2012)。

1323 号“菲特”台风对我国造成了严重的影响尤其是浙江省,国内研究者对“菲特”台风做了许多较深入的研究。菲特台风带来的降水主要可以分成两个时间段,一是 6 日 21 时至 7 日 10 时左右,从浙江象山至宁波一带形成的强降水带,二是大约 8 日 02 时至 8 日 10 时,由冷空气从低层扩散南下在江苏东南部、浙江东北部、上海地区产生了区域性大暴雨(田红军等, 2014; 谢慧敏等, 2016; 姚丽娜等, 2018),而多数的研究中未对第一段暴雨发生做细致的分析,研究表明,发生于宁波象山至余姚一带的第一阶段强降水与台风螺旋云带相关并出现典型“列车效应”的现象,而冷空气所起作用并不大。

一般来说,暴雨中“列车效应”发生时的各种天气尺度因素和中尺度条件的都较为普遍,而台风暴雨中的“列车效应”形成机制也成为研究的难点,目前由于具有典型“列车效应”的台风暴雨个例较少,降水量极端,模拟难度大,因此人们对台风螺旋云带中“列车效应”的研究也开展较少。本文主要以 1323 号台风“菲特”螺旋云带中出现的第一段大暴雨过程,着重分析台风“列车效应”特征和形成的机制。

1 资料与研究方法

1.1 资料简介

本文利用北京时 2013 年 10 月 6 日—2013 年 10 月 8 日:(1)美国国家环境中心/大气研究中心 NCEP/NCAR 提供的 GFS 逐 6 小时再分析资料($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$);

(2)华东地面自动站每小时实况加密资料,资料加入了近海地区的岛屿站、浮标等数据;(3)中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集;(4)每 6 分钟一次的宁波多普勒雷达基数据资料;(5)中国热带气旋灾害数据集和温州台风网台风路径信息资料。

1.2 方法

中尺度滤波方法,可以从大尺度背景场中提取到中尺度系统信息。本文使用 Shuman-Shapiro 平滑滤波法(章国材等, 2007; 覃丹宇, 2010)来进行尺度分离,该方法可以分离出 β 中尺度到 γ 中尺度的中小尺度信息场,提取波段是基于客观

分析到格点的格距为基准，基本思路是：先通过插值处理将选定区域的气象要素资料插值到格点场，再选取适当的滤波系数 S，对于二维要素场来说，9 点平滑的滤波算子为：

$$\bar{f}_{i,j} = f_{i,j} + \frac{S(1-S)}{2}(f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} - 4f_{i,j}) + \frac{S^2}{4}(f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j+1} + f_{i-1,j-1} - 4f_{i,j}) \quad (1)$$

其中 S 为滤波系数， $\bar{f}_{i,j}$ 是滤波后的平滑场， $f_{i,j}$ 是相应的格点要素值。

它的响应函数： $R(S,n) = (1-2\sin^2 \frac{\pi}{n})^2$ ，令 $R(S,n) = 0$ ，可以得到 S 与 n 的关系，选取适当格距倍数 n 得到相应的滤波系数 S，可以滤除不同倍数的格距波，再用原始场减去滤波后的平滑场，就可以分离出 n 倍格距波长的扰动波。

采用 9 点平滑滤波算子，取 S=0.5，得到如下响应曲线：

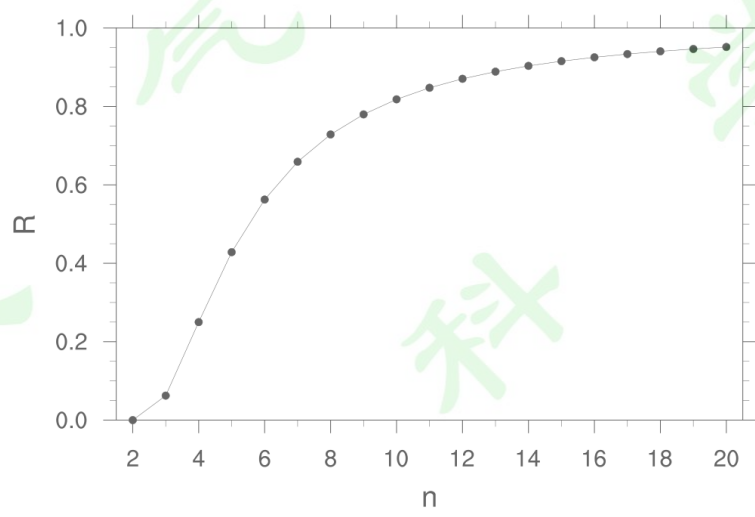


图 1 9 点滤波算子响应函数曲线

Fig.1 Response function curve of nine point filter operator

2 菲特台风和降水概况

2013 年第 23 号强台风“菲特”（Fitow），于 2013 年 9 月 30 日 20 时在菲律宾以东洋面生成，10 月 3 日凌晨加强为台风，10 月 4 日 17 时加强为强台风，10 月 7 日凌晨 1 时 15 分左右在福建省福鼎市沙埕镇沿海登陆，登陆时强度为强台风，中心附近最大风力有 14 级（42m/s），中心最低气压为 955 百帕，登陆后于 10 月 7 日 9 时在福建省建瓯市境内迅速减弱为热带低压，11 时停止编报。在此

期间，1324 号强热带风暴“丹娜丝”于 10 月 4 日生成，5 日 14 时在西北太平洋上发展成热带风暴，并以每小时 25km 左右的速度向西北移动并加强，与菲特形成“藤原效应”。“菲特”台风是新中国成立以来正面登陆我国大陆的最强“秋台风”，对中国造成的经济损失达 623.3 亿人民币，形成的倒槽降水使浙江全境出现罕见洪涝灾害，降雨强度破历史纪录，沿海强风持续时间长。

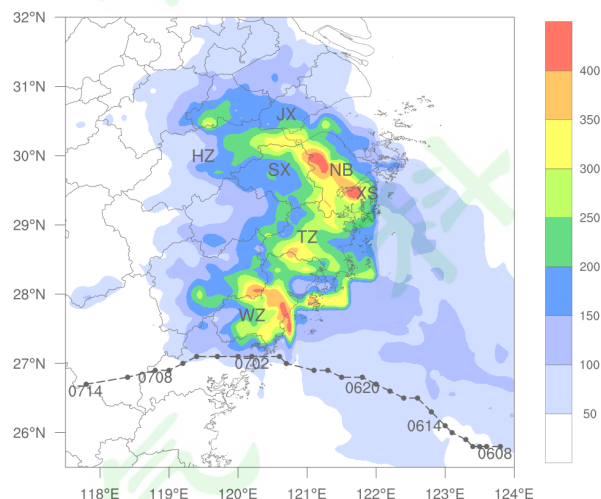


图 2 2013 年 10 月 6 日 08 时至 7 日 14 时台风“菲特”登陆前后移动路径（点虚线，虚线下方为日和时）和过程降水量（填色区，单位:mm）

Fig.2 Moving path of Typhoon "Fitow" before and after the landing (dotted line, the day and hour below the dotted line) and process precipitation (colored area, unit:mm) from 08:00 BT 6 to 14:00 BT 7 on October 2013

图 2 是菲特台风在 10 月 6 日 08 时—7 日 14 时共计 30 小时的过程降水量(填色)，可以看到，该时段降水位于浙江沿海一带，其中暴雨中心集中在两个区域，一是浙江东北部沿海，以象山（XS）到宁波（NB）为中心的杭州湾南线一带，主要受台风外围螺旋云带影响；另一个是浙江东南部沿海，位于温州（WZ）、台州（TZ）一带，主要受台风近中心环流影响。图 1 显示，浙江东北部的降水强度最高，大于 350mm 主降水带由象山和宁波两个降水中心相连，呈现带状分布，最大过程降水量到 507.3mm。台风中心路径呈现大圆弧状，登陆之前，路径呈东南-西北向，登陆之后路径呈偏西方向。

3 环流背景

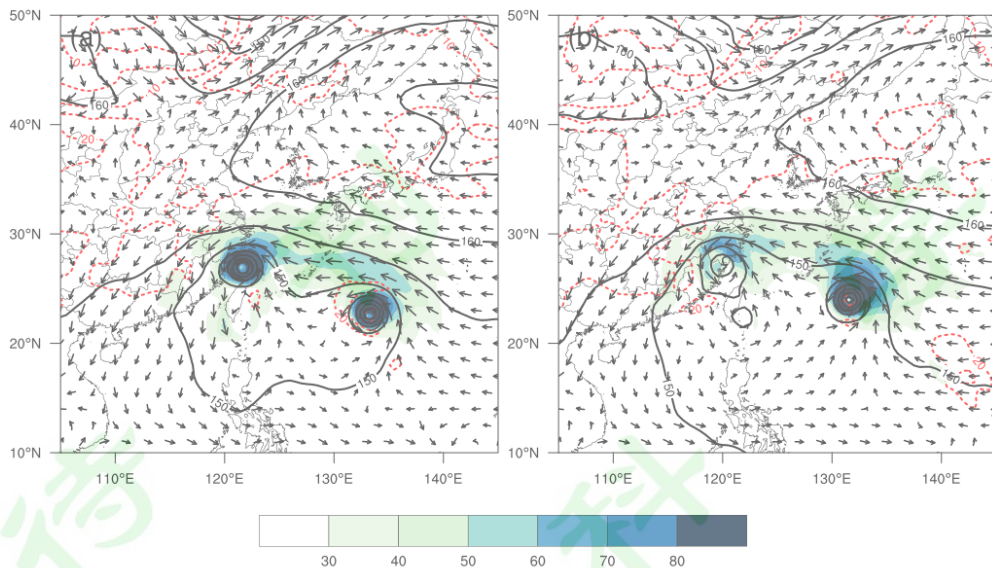
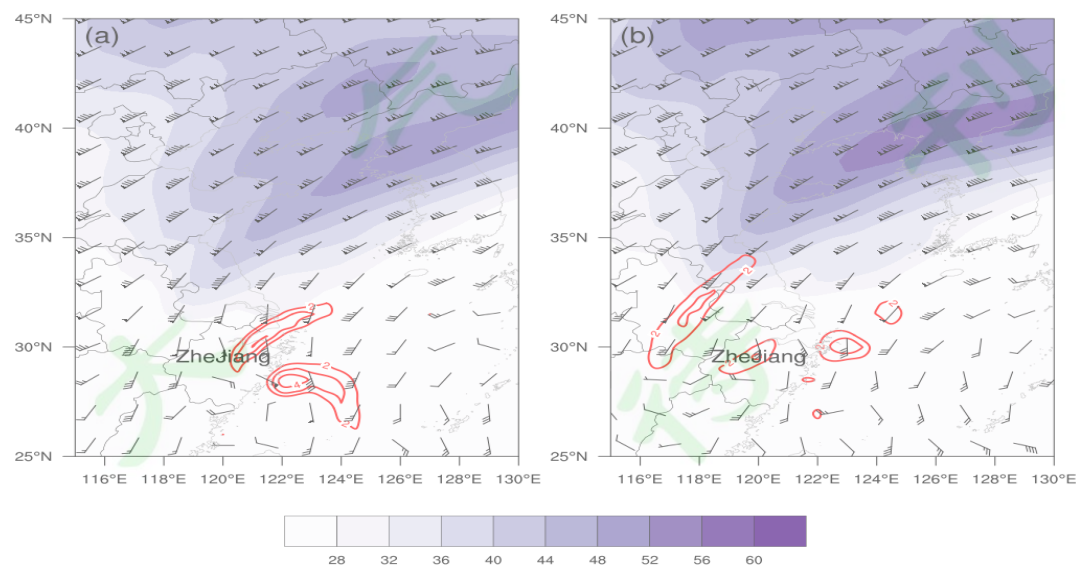


图3 2013年10月6日20时(a)、7日02时(b) 850hPa 位势高度(黑色实线,单位:dagpm)、温度(红色虚线,单位:°C)、水汽通量(填色区,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和流场(黑色箭头)

Fig.3 Geopotential height (black solid line, unit: dagpm), temperature (red dotted line, unit: °C), water vapor flux (colored area, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and flow field (black arrow) at 850 hPa at 20:00 BT 6 October 2013 (a) and 2:00 BT 7 October 2013 (b)

为了简单回顾本次台风形势和水汽条件,我们以 850hPa 上的基本要素场为代表。图3中是10月6日20时和10月7日02时的850hPa低层的环流形式,由图可见,副高较强呈带状分布且基本稳定,南侧是偏东气流。中高纬有西风槽东移,浙江与福建沿海地区存在一个台风倒槽,槽后是偏南气流,在台风倒槽、副高和台风“丹娜丝”共同作用下,双台风之间建立起一条深厚的水汽通道(填色区),07日02时“菲特”台风登陆减弱时仍有大量水汽输送和聚集,强水汽通道为浙江沿海地区暴雨提供水汽来源。



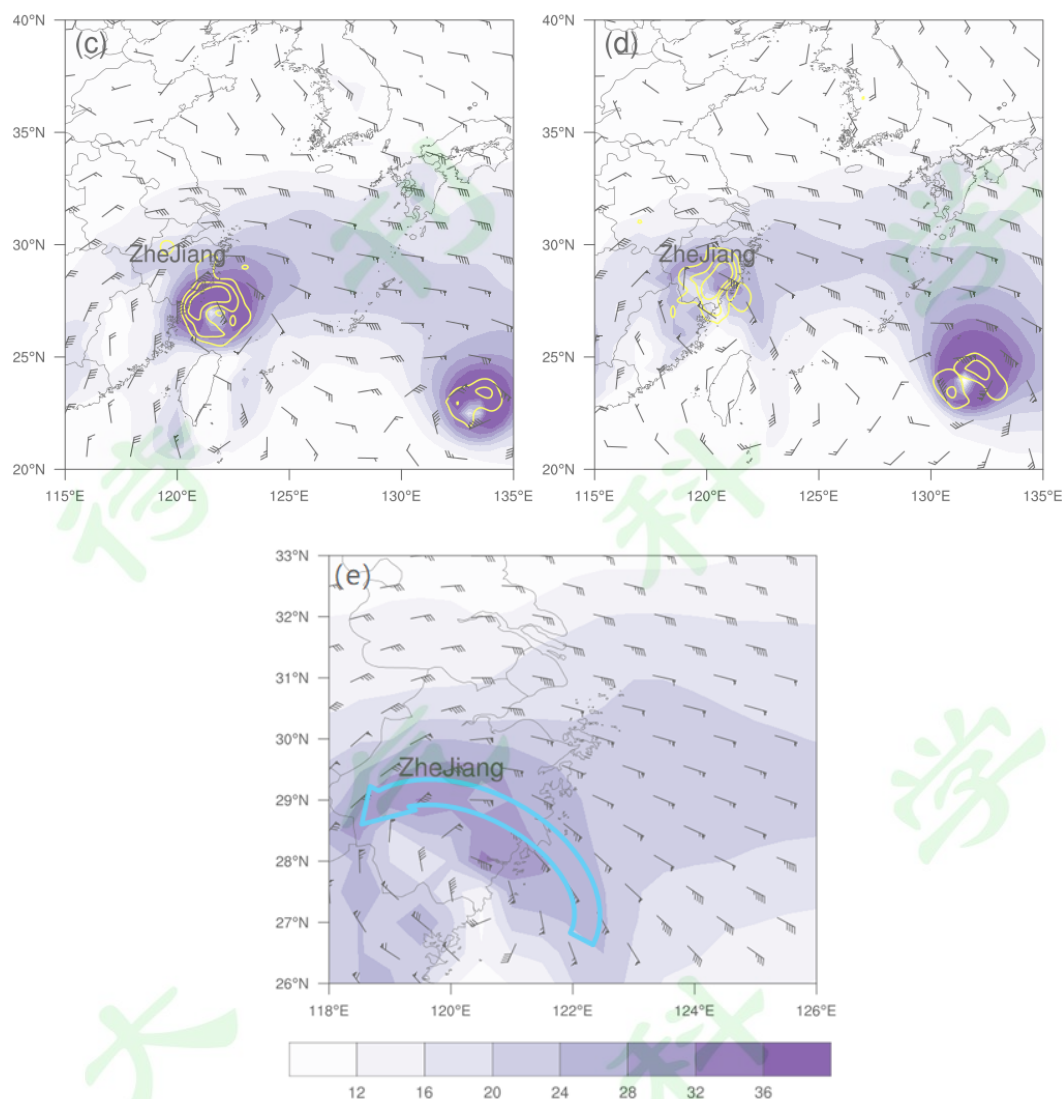


图4 2013年10月6日20时(a)、7日02时(b) 200hPa 风场(风矢)和水平辐散场(红色等值线, 单位: $10^{-5}s^{-1}$);2013年10月6日20时(c)、7日02时(d) 850hPa 风场(风矢)和925hPa 水平辐合场(黄色等值线, 单位: $10^{-5}s^{-1}$), 图e是2013年10月7日02时浙江及沿海地区 850hPa 风场(风矢), 蓝色箭头代表低空急流轴位置; 填色区为风速

Fig.4 Wind (wind vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) and horizontal divergence (red contour, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 200 hPa at 20:00 BT 6 October 2013 (a) and 2:00 BT 7 October 2013 (b). Wind (wind vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa and horizontal divergence (red contour, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 925 hPa at 20:00 BT 6 October 2013 (c) and 2:00 BT 7 October 2013 (d). Figure 4e shows the 850 hPa wind field in Zhejiang and coastal areas, with the blue arrow representing the position of the jet stream axis. Filling area represents wind speed

为了了解浙北暴雨发生的环境条件, 我们选择了不同高度的风场特征, 以了解环境场对此次浙北强降水的起到积极作用。图4a和4b的两个时刻中可以看到, 200hPa 上, 在黄海至朝鲜半岛北纬 35° 以北一直存在一支高空急流, 风速达到40m/s 以上, 位置稳定少动并不断加强, 高空的辐散区(红色实线)中心值达到 $4 \times 10^{-5}s^{-1}$, 暴雨区基本处在高空急流入口区右侧。与此同时, 在低层(图4c)以

大范围的低空偏东急流为主，850hPa 双台风之间存在大风速带，而 7 日 02 时(图 4e) 台风近中心有一支东南向强低空急流，急流轴位于宁波暴雨区南侧，温台暴雨区北侧，低空急流为暴雨区输送水汽和能量。台风倒槽内部，07 日 02 时的 925hPa 高度上(图 4d)，浙江大部地区成为辐合区(黄色实线)，辐合中心达 $-5\times 10^{-5}s^{-1}$ ，因此在浙江地区形成高层辐散、低层辐合的有效配置，并有低层水汽不断输送的有利背景。

4 菲特“列车效应”特征分析

台风登陆之后，多数情况下暴雨和螺旋云带跟随着台风环流一致运动，当暴雨中心呈现出带状特征(这种情况常与台风螺旋云带被“甩”离相似，降水雨团运动逐渐远离台风中心路径，沿着台风中心轨迹切线方向呈直线性运动)向前传播，易出现“列车效应”现象。

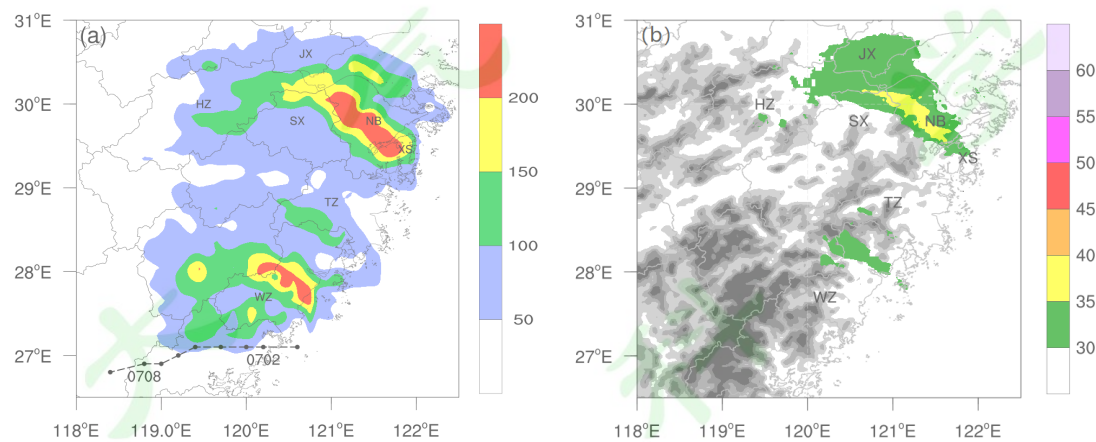


图 5 2013 年 10 月 7 日 01 时至 7 日 09 时 (a) 8 小时降水量(填色, 单位: mm)，黑色点线为台风中心路径。(b) 是宁波多普勒雷达 8 小时平均反射率(填色, 单位: dBZ)，灰色阴影是 200 米以上地形

Fig.5 Eight hour precipitation (coloring, unit: mm) from 01:00 BT 7 to 09:00 BT 7 on October 2013. The black dotted line is the central path of the typhoon. (b) is the 8-hour average reflectance (colored area, unit: dBZ) of the Ningbo Doppler radar. Gray shade is the terrain above 200 meters

我们分析了“菲特”第一阶段降水中的 8 小时连续强降水，图 5a 可以看到，以宁波为中心的暴雨带和雷达回波带位置一致，呈带状走向，暴雨中心呈长轴状(长度超过 200km)，结合雷达回波对流单体运动表明，该时段的台风螺旋雨带产生的降水现象中出现了“列车效应”。其暴雨中心长轴和雷达回波中心长轴与台风中心路径走向有明显偏离，偏离角大约在 25° 以上。然而，深入研究发现，台风造成的列车效应也存在“位移”，即它也会发生位置上的移动。根据暴雨发生的地理位置，将 10 月 7 日 01 时至 09 时象山到宁波地区发生的“列车效应”，

大致划定 7 日 01-04 时为第一次“列车效应”，04-05 时是为过渡期，05-09 时为第二次“列车效应”。此次连续“列车效应”过程，由象山—宁波地区形成主降水带，该地区 8 小时平均降水量超过 200mm,最大降水达到 309.1mm，螺旋云带中雷达回波平均反射率在 35dBZ 以上，降水和雷达时空关系对应基本一致。此次“列车效应”8 小时连续降水时间只占图 2 中(30 小时)过程降水时间的 27%，但最大降水量占比却达到 61%，呈现出高降水效率，因此研究菲特台风“列车效应”降水的形成具有重要意义。

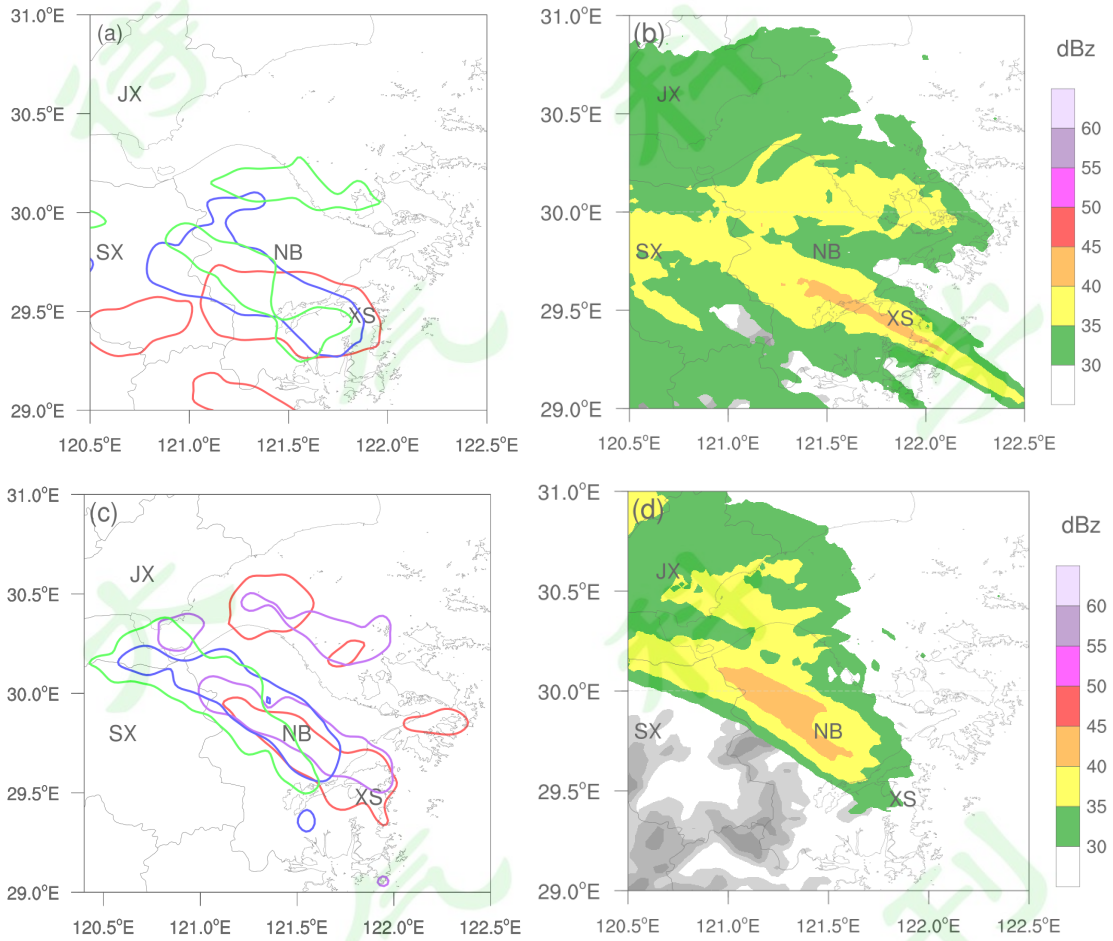


图 6 2013 年 10 月 7 日 01 时至 7 日 04 时第 1 次“列车效应” (a) 与 7 日 05 时至 09 时第 2 次“列车效应” (c) 每小时降水量分布。(a) 中红色，蓝色，绿色分别代表 01-02、02-03、03-04 时段的每小时大于 25mm 降水量，(c) 中红色，紫色，蓝色，绿色分别代表 05-06、06-07、07-08、08-09 时段每小时大于 25mm 的降水量。(b) 和 (d) 是两次“列车效应”雷达平均反射率 (填色区，单位 dBZ)

Fig.6 Hourly precipitation distribution of the 1st "train effect" (a) from 01:00 BT 7 to 04:00 BT 7 on October 2013 and the 2nd "train effect" (c) from 05:00 BT 7 to 09:00 BT 7 on October 2013. In figure(a), red, blue and green lines represent hourly precipitation greater than 25mm per hour during the periods of 01:00-02:00, 02:00-03:00 and 03:00-04:00. In figure(c), red, purple, blue and green lines represent hourly precipitation greater than 25mm per hour during the period of 05:00 to 06:00, 06:00-07:00, 07:00-08:00 and 08:00-09:00. Figure (b) and (d) are the average radar reflectance of the two "train effect" (colored area, unit: dBZ)

两次“列车效应”都从宁波市沿海的象山县（XS）开始，持续时间为 3-4 小时。每小时降水 25mm 以上的雨带沿着东南到西北方向从象山到宁波向前缓慢推进，第一次“列车效应”雨带跨度在 1.5 个经度距离左右（图 6a），第二次接近 2 个经度距离（图 6c）。主降水区第二次较第一次略有北抬，若按暴雨中心长轴估算，暴雨的东段（XS）北抬 10km，暴雨西段北抬约 50km，雨带移动方向发生顺时针小角度偏转，这可能是因为随着台风本体登陆减弱，螺旋云带逐渐向外围扩散导致。一个个回波强度达到 40dBZ 的强对流单体呈连续线性向前传播并对象山—宁波地区造成短时强降水最终造成该地区的特大降水。“列车效应”过程中降水区的螺旋云带平均回波强度可以维持在 35dBZ 以上，那么形成“列车效应”的 40dBZ 以上的强对流单体从哪里产生、如何产生和维持并呈现东南—西北向的线性走向？

5 “列车效应”诊断分析

5.1 对流单体传播

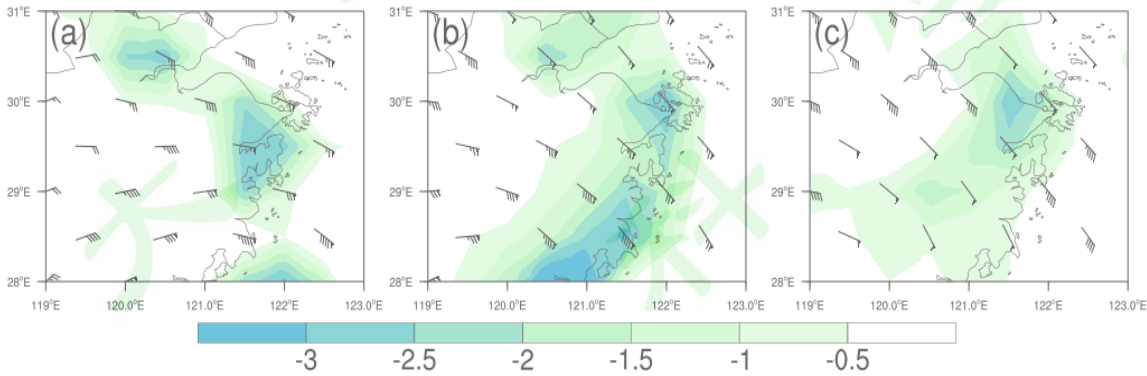


图 7 2013 年 10 月 6 日 20 时 (a)、7 日 02 时 (b)，7 日 08 时 (c) 925hPa 散度场（填色区，单位： 10^{-4}s^{-1} ）和 500hPa 风场（风矢）

Fig.7 Divergence disturbance (colored area, unit: 10^{-4}s^{-1}) at 925hPa and wind (wind vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 500 hPa at 20:00 BT 6 (a), 2:00 BT 7 (b) and 8:00 BT 7(c) on October 2013

众所周知，地面系统移速与引导气流风速大小成正比，移向与高空引导气流方向一致。500hPa 引导层上的风向 06 日 20 时（图 7a）在象山到宁波一带为偏东方向，07 日 02 时发生逆时针偏转转为东南方向并在“列车效应”发生期间稳定维持（7 日 02 到 08 时），与发生“列车效应”的系统走向一致，这为“列车效应”呈线性走向提供大环流背景。从 925hPa 散度场来看，除了台风主体，06 日 20 时开始的浙江北部沿海存在强辐合中心，中心值达到 $-4\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ，构成除沿海辐合带之外的象山、宁波、杭州走向的东南至西北向的辐合带（图 7a），到

07 日 02 时强辐合区主要位于象山和宁波的沿海地区，07 日 08 时强辐合区稳定在宁波地区低层上空，强辐合区与强上升运动一致（图略），有利于“列车效应”对流单体产生、发展和传播。

5.2 对流单体加强区域

图 7 反映出沿海低层有了较强的辐合，这有利于对流发生发展。我们利用宁波多普勒雷达每 6 分钟一次的观测数据，分析研究“列车效应”对流发生发展的源头及增强机制。考虑到对流发生发展演变较快，难以定量得出对流发生发展的准确概念，因此假定格点上每单位时间雷达回波反射率因子比上一时刻（6 分钟）增长量超过 10dBZ，则记为 1 次增长，以此方法为对流回波在短时间内快速增长的条件。将每个格点 8 小时(88 个时次)的增长次数进行统计，得到雷达回波快速加强的频次分布图（图 8）。

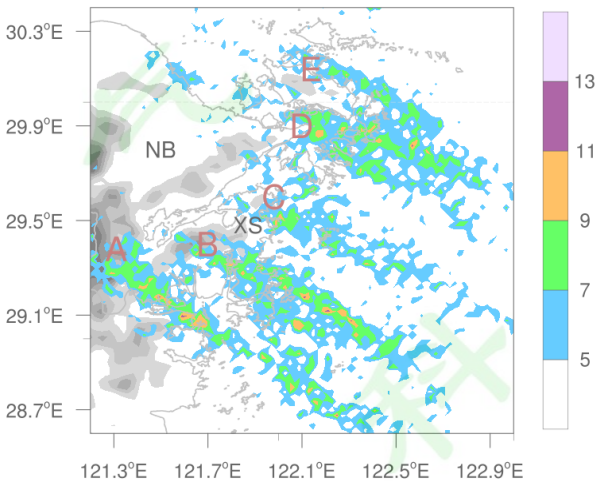


图 8 2013 年 10 月 7 日 01 时至 09 时雷达回波快速加强区分布（填色区，单位：增长次数），A，B，C，D，E 代表 5 条带状回波运动轨迹。灰色阴影区为海拔 100m 以上地形

Fig.8 Radar echo enhancement area distribution (colored area, unit: number of times of increase)from 01:00 BT 7 to 09:00 BT 7 on October 2013. Number A, B, C, D, E represent the movement trajectory of 5 stripe echoes. Gray shaded area is terrain above 100 meters

在我们统计的区域中，我们获得有意思的结果，图 8 可以看到，浙北沿海有 5 条明显的快速增强的带状回波运动轨迹，我们将其编为 A-E。图中陆地上并没有出现快速增长频次，但这并不意味着对流单体回波强度本身的减弱，一是因为陆地上对流单体已经发展到成熟阶段，不再继续以短时快速的生长，二是对流云团运动至陆地之后降水增强，导致回波发展速度减慢；图中反映对流回波增长出现了明显的条状，类似于台风外围的螺旋云带，这表明卫星和雷达遥感图像上，宽阔的螺旋回波带中有可能镶嵌着一条或多条发展更为快速的对流云团，这些快

速增长的条状回波带中存有中尺度发展特性。

虽然图 8 的范围并不大，但每条回波快速增长带上也不平衡，沿海频次明显更多，这可能与下垫面岛屿增多导致的摩擦、辐合等加大有关，而各条之间的分布也不均匀，其中 B，C 分别是两次发生“列车效应”的起源带。从第一次“列车效应”的主回波带(B)加强区位置和增长数来看，从海上出现就多个超过 9 次增长的增长数大值区，一个个对流单体从浙江沿海的海上开始形成并快速向前发展，到达象山附近的海域时发展成熟，形成具有高降水效率的“列车效应”降水系统，在象山到宁波偏南侧地区造成短时连续强降水(图 6a)。而第二次“列车效应”的主回波带（C）在海上发展强度比第一次弱，整个主回波带比第一次向北抬升约 0.2 个纬距，增长数大值区主要出现在象山附近，从象山附近开始主回波带的对流单体开始进一步发展加强，到宁波地区趋于成熟，因此第二次“列车效应”雨带略有北抬，在象山到宁波偏北侧地区造成短时连续强降水（图 6c），这与上面看到的两次“列车效应”降水分布相吻合。从回波发展速度频次上看，台风螺旋云带内的对流云在近海得以明显快速增强，这可能是沿海复杂的下垫面导致。

5.3 沿海对流单体形成分析

众所周知，大尺度系统提供了支持中尺度系统形成的条件和环境场，中尺度系统才是直接造成暴雨的天气系统，而对流的快速发生常与有利的环境条件和中尺度触发条件有关（陶诗言，1980），由于东部海岸附近资料较为不均匀，直接寻找中尺度相关信息较为困难，因此设法提取有效的“列车效应”中尺度扰动场信息，并分析内在形成机制。虽然从加密的地面资料辐合场中可以一定程度上获得对流发展特征，但中尺度辐合线或是尺度较小的汇合点不一定能在流场上显现出来，因此若能从自动站流场中提取相应的中尺度辐合带或辐合区，便能够在时空尺度中更有效地判定对流单体的短时发生发展趋势，进一步了解此次“列车效应”过程的形成机制。我们运用 shuman-shapiro 中尺度滤波方法，得到时间尺度约 8 小时，空间尺度 300-500 公里的中尺度波动特征。

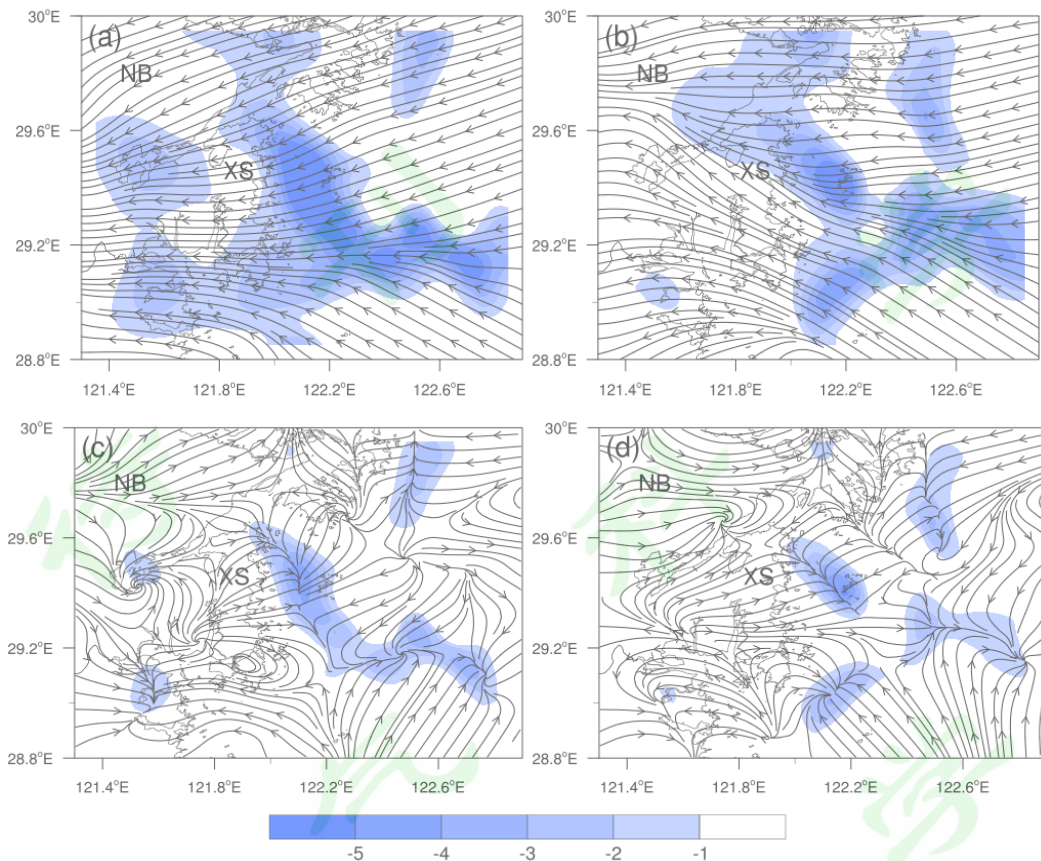


图9 2013年10月7日01时(a、c)和04时(b、d)地面流场(黑色箭头)和散度场(填色,单位: 10^{-4}); (a、b)是未滤波场; (c、d)是进行滤波处理后的滤波场

Fig.9 Ground flow (black arrow) and divergence (colored, unit: 10^{-4}) at 01:00 BT 7 (a, c) and 4:00 BT 7 (b, d) on October 2013. Figure(a, b) are unfiltered fields; Figure(c, d) are filtered fields after filtering

为了了解列车效应发生和起源,如图9所示,将范围缩小至宁波—象山及沿海。图9a、9c和图9b、9d分别代表两次“列车效应”开始时的地面风场特征。图9a、9b是初始的流场,未采用滤波方案,图9c、9d采用了shuman-shapiro中尺度滤波方案。从流场中可以看到,两次“列车效应”开始时(7日01时、04时),未滤波的象山东南侧海域的地面流场中沿海存在大片的辐合区,进行滤波后,两次“列车效应”的初始时刻都形成了东南至西北向的带状中尺度辐合带,辐合带上出现数个的中尺度涡旋扰动中心。这些滤波后的扰动辐合带(填色区),基本也代表了大尺度场上表现出来的辐合中心(图9a、9b)。第二次“列车效应”的中尺度辐合带位置略有北抬,与图6c中第二次“列车效应”降水带的北抬相一致。由此可知,“列车效应”形成过程中,关键是上游的中尺度扰动辐合带的形成,其对于台风螺旋云带中的对流单体发生发展和下游降水系统的演变有着重要的作用。

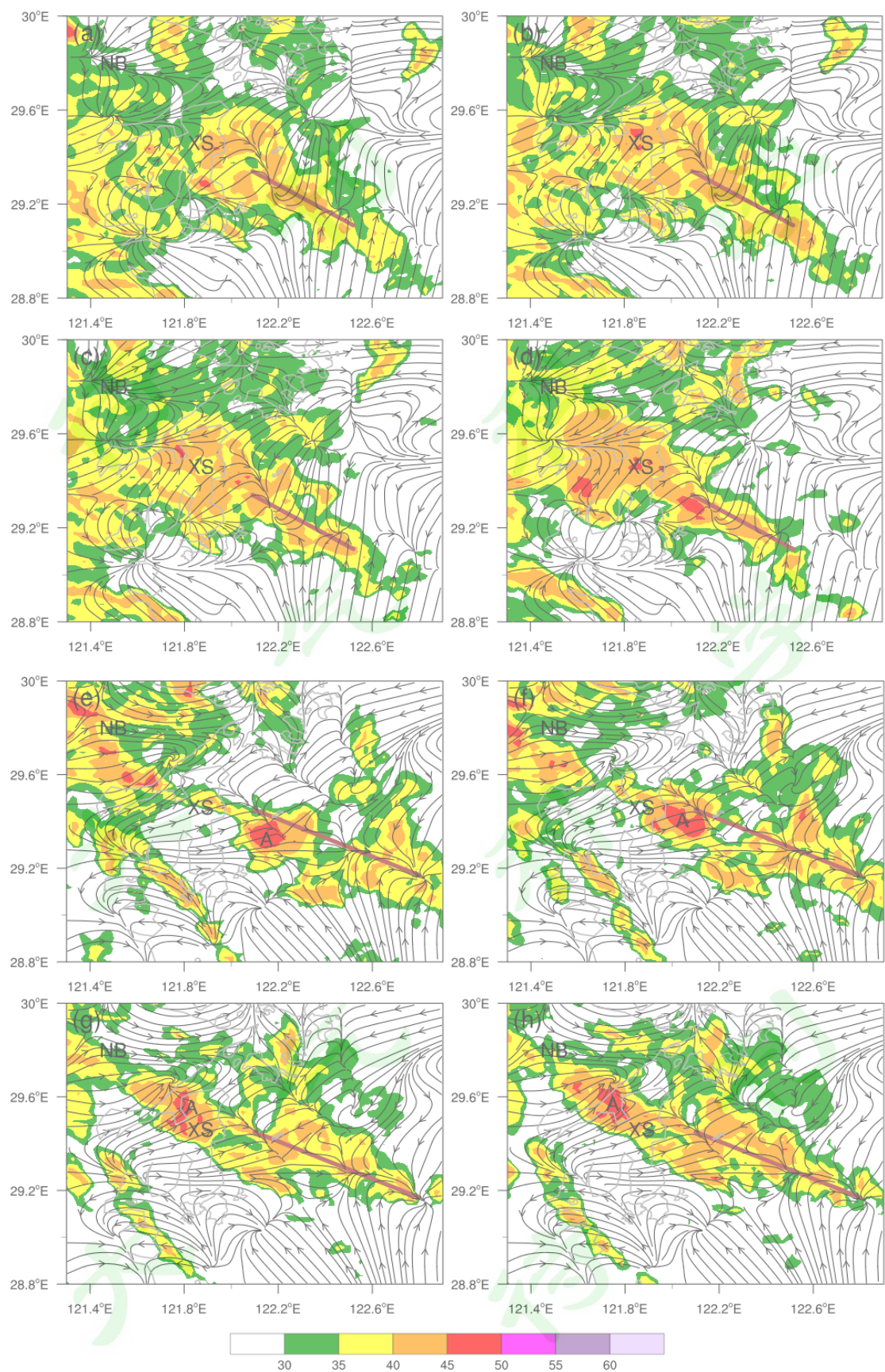


图 10 第 1 次 (a-d) 和第 2 次 (e-h) “列车效应”雷达回波演变图 (填色, 单位: dBZ) 及地面扰动场。a.00 时 45 分, b.00 时 51 分, c.00 时 57 分, d.01 时 14 分, e.04 时 14 分, f.04 时 31 分, g.04 时 42 分, h.04 时

48 分

Fig.10 The first (a-d) and the second (e-h) "train effect" radar echo evolution(colored, unit:dBZ) and ground disturbance field.a.00:45.b.00:51.c.00:57.d.01:14.e.04:14. f.04:31.g.04:42. h.04:48

为进一步了解两段“列车效应”起源之前沿海对流演变，图 10 给出“列车效应”发生前滤波后的扰动流场。两次“列车效应”分别在 07 日 00 时 45 分（图 10a）和 04 时 14 分（图 10e）开始，螺旋云带后部有源源不断的高于 40dBZ 的强对流单体从沿海海面中尺度扰动辐合带中生成，并沿辐合线（棕色粗实线）由沿海到象山向前发展。如第一段列车效应发生之前，象山沿海已形成中尺度扰动辐合线（图 10a），在半个小时左右的时间内，该扰动辐合线保持稳定维持，并促进对流回波逐渐增强和扩大形成紧密的结构（a-d）。在第二段“列车效应”过程中（e-h），04 时 14 分（图 10e）已观测到对流回波单体“A”在象山沿海快速增强，其位置上对应着中尺度扰动辐合线以及图 8d 的滤波辐合中心，快速增强后的强对流单体沿着辐合线方向，半小时后移到了象山与宁波的之间（图 10e）并仍然保持着 45dbZ 以上的回波强度，在这段时间过程中，地面始终维持着中尺度的扰动辐合以及强度在 35dBZ 以上的对流回波带，说明沿海的扰动辐合线对回波单体在沿海快速发展起到重要作用。两次“列车效应”的形成来看，在具有复杂海岸线和地形的沿海或海陆交界处，以及在一定的环流背景和物理条件下，易构成对流层低层的中尺度扰动辐合场，并促成了对流系统的组织化，典型时刻分别如 01 时 14 分和 04 时 48 分，形成了具有中尺度系统特征、连续的线性带状对流回波，“列车效应”由此产生，进而影响象山—宁波地区。在类似的个例研究中，朱业等（2019）利用模式水平分辨率为 333m 的研究发现，台风靠近沿海时的大风带主要位于行星边界层附近，造成围绕大风速柱横向排列辐合，有利于沿海对流云发展。

5.4 对流单体维持分析

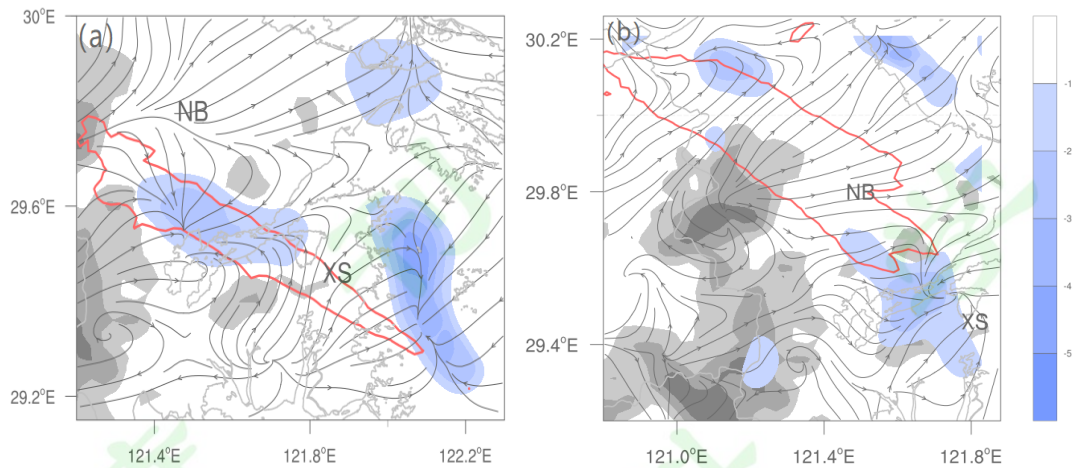


图 11 2013 年 10 月 7 日 01 时至 04 时 (a)、05 时—09 时 (b) 平均流场 (黑色箭头)、辐合带平均扰动场 (填色, 单位 $10^{-4}s^{-1}$) 和雷达平均反射率 (红色等值线代表平均强度在 40dBZ 以上, 单位: dBZ), 灰色阴影是 100 米以上地形

Fig.11 Average flow(black arrow), average disturbance field (filling, unit $10^{-4}s^{-1}$) and radar average reflectance (red contour line represents average intensity above 40dBZ, unit: dBZ) from 01:00 BT to 04:00 BT (a)and 05:00 BT to 09:00 (b)on 7 October 2013. Gray shadow is terrain above 100 meters

通过雷达回波和地面中尺度滤波分析,对流回波的发生发展与地面中尺度扰动物理场关系密切, 对流回波多产生在扰动辐合区内,而成熟阶段的回波往往落后于中尺度辐合中心 (翟国庆等, 1991)。由于两段列车效应发生时环流形势是相对稳定的, 因此我们将其物理场进行合成, 图 11 中可以看到, 第一次“列车效应”时段内 (图 11a), 象山以东面沿海和象山与宁波之间海湾都存在着一个中尺度扰动辐合中心, 平均强雷达回波 (大于 40dBZ 的红色线所围区域) 从象山东面的沿海延伸到宁波方向, 可见, 象山沿海海域以及象山与宁波之间的中尺度扰动辐合, 对对流回波加速增强、维持与发展有着重要的作用; 同样的, 第二次“列车效应”中 (图 11b), 40dBZ 以上的强回波带 (红色实线) 产生的上游、象山至宁波之间一直稳定存在一个中尺度扰动辐合中心, 持续时间达数小时。即: 当螺旋云带前进方向上有辐合中心能维持数小时以上, 有利于“列车效应”的稳定维持。沿海中尺度辐合带或辐合中心可能来之三个方面: 一是因沿海摩擦增强导致的风速的辐合; 二是因风速辐合导致的地转偏差 (Paul Markowski 和 Yvette Richardson, 2010); 三是沿海岛屿和复杂的海湾造成沿海风场的不规则运动。

由此我们概纳出本次浙北台风列车效应的概念模型 (图 12)。

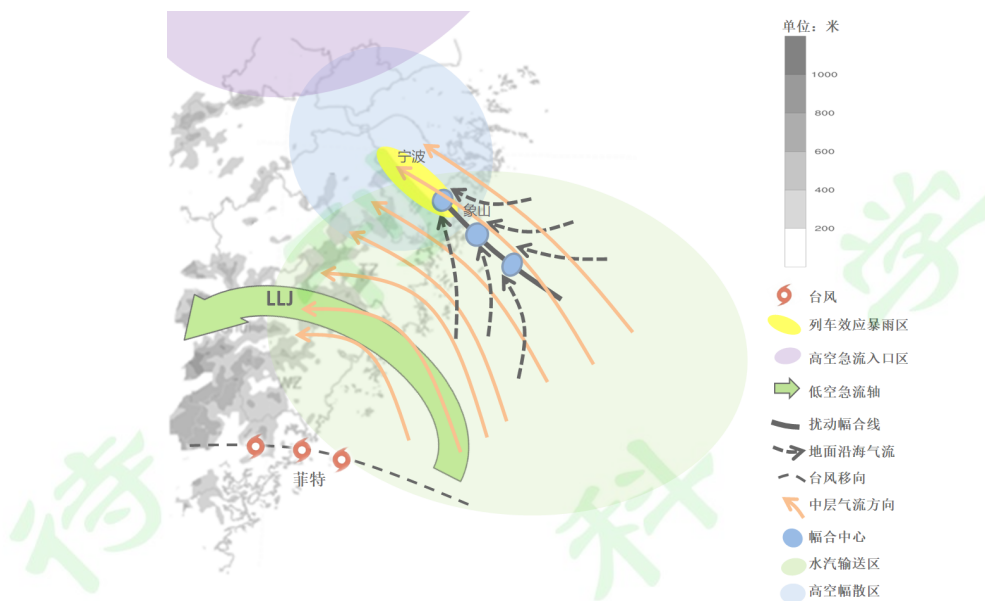


图 12 “菲特”台风螺旋云带中“列车效应”特大暴雨概念模型

Fig.12 Conceptual model of "train effect" rainstorm in the spiral cloud belts of typhoon "Fitow"

本文是以实况资料分析概纳的台风带状暴雨模型，在图 12 中，在宁波有带状的“列车效应”暴雨区（黄色），在其上游方向是中尺度扰动辐合带（黑实线），这里有复杂的海岸地形（灰色）及扰动汇合气流（黑虚线）；低空有台风的东南急流（深绿色）和水汽输送（浅绿色），中层有引导气流（橙色线）；“列车效应”暴雨带的高层有大范围的辐散场（浅蓝色）和北部的高空西南风急流（淡紫色），这些大、中尺度系统空间结构的耦合，是可能导致台风“列车效应”发生与维持的机制。但此概念模型仅出自一典型个例，是否具有普适性仍需更多个例的分析。此外，在暴雨的发生过程中除了海岸效应导致的对流发生发展之外，是否还存在其他物理过程如台风重力波等因素，也有待进一步深入分析和研究。

6 总结与讨论

利用观测资料分析了 1323 号台风“菲特”螺旋云带中出现的典型“列车效应”过程，也是浙北地区主要暴雨灾害的时段，本文着重分析了“列车效应”发生和起源，主要结论如下：

（1）根据主要暴雨时段和雷达回波中心带移动轴线，将长达 8 小时左右维持在钱塘江南岸的“列车效应”分为两段，两次“列车效应”作用时间都在 3-4 小时左右，空间跨度在 1-2 个经度距离；暴雨区呈现出带状特征，降水效率高，每小时降水超过 25mm 并向前线性传播；螺旋云带中强度在 35dBZ 以上的雷达

回波平均反射率也呈现线性带状结构;降水带走向和雷达回波运动方向与台风中心运动方向产生了大致 25° 以上的向右偏离。

(2) 高空引导气流的方向和地面中尺度扰动辐合带走向与“列车效应”中对流单体运动方向基本一致,为其呈近线性排列提供依据。台风螺旋云带内的对流云在近海得以明显快速增强,到陆地回波发展速度减慢,一是因为陆地上对流单体已经发展到成熟阶段,不再继续以短时快速的生长,二是对流云团运动至陆地之后降水增强。

(3) 螺旋云带后部有源源不断的高于 40dBZ 的强对流单体从沿海海面中尺度辐合带中生成,并沿扰动辐合线由沿海到象山向前发展,形成具有中尺度系统特征、连续的线性带状对流回波,台风螺旋云带中暴雨的“列车效应”由此产生,进而影响象山到宁波地区。螺旋云带前进方向上有中尺度扰动辐合中心能维持数小时以上,有利于“列车效应”的稳定维持。

因此,沿海形成的中尺度扰动辐合或扰动涡旋,为螺旋云带中对流在沿海地区发生或发展提供重要条件,形成了对流云的快速增长和后续发展的启动和维持机制,对于“列车效应”的形成、发展和维持起了重要作用。

参考文献 (References)

- Aylward R P , Dyer J L . Synoptic Environments Associated with the Training of Convective Cells[J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(2):446-464.
- Characteristics of U.S. Extreme Rain Events During 1999-2003[J]. Weather and Forecasting, 2006, 21(1): 69-85.
- Corfidi SF. Cold Pools and Mcs Propagation: Forecasting the Motion of Downwind-developing Mcss[J]. Weather and Forecasting, 2003, 18(6): 997-1017.
- 蔡小辉,杨仁勇等.1117 号强台风“纳沙”引发海南岛特大暴雨过程分析[J] 2012,气象研究与应用, 2012,33(02):5-8+122.Cai Xiao hui, Yang Renyong, Zhou Guohai, et al. Analysis on Heavy Rainfall Process Caused by 1117 Strong Typhoon“Neuchtel”in Hainan Island[J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 2012,33(02):5-8+122.
- Davis, R. S., 2001: Flash flood forecast and detection methods. Severe Convective Storms, Meteor. Monogr., No. 50, Amer. Meteor. Soc., 481–525.
- 陈联寿,孟智勇.我国热带气旋研究十年进展[J].大气科学,2001(3):420-432.Chen Lianshou and

- Meng Zhiyon. An Overview on Tropical Cyclone Research Progress in China during the Past Ten Year[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science(in Chinese), 2001(3):420-432
- 陈华宣,黄淑娟,唐毓勇.平果县2008年11月致洪暴雨天气成因分析[J].气象研究与应
用,2011,32(01):34-36+39. Chen Huaxuan, Huang Shujuan,Tang Yuyong. Analysis on the
Torrential Rain of Pingguo County in Nov.2008[J]. Journal of Meteorological Research and
Application (in Chinese),2011,32(01):34-36+39.
- 陈见,赖珍权,罗小莉,等“尤特”超强台风残留低涡引发的广西特大暴雨成因分析[J].暴雨灾
害,2014,33(1):19-25 CHEN Jian, LAI Zhenquan, LUO Xiaoli, 等. Cause analysis of a
torrential rain event induced by residual vortex from super severe typhoon Utor in Guangxi
[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2014, 33(1): 19-25
- Durkee JD,Campbell L,Berry K, et al. A Synoptic Perspective of the Record 1-2 May 2010
Mid-south Heavy Precipitation Event[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,
2012, 93(5): 611-620.
- Galarneau jr TJ,Bosart LF,Schumacher RS. Predecessor Rain Events Ahead of Tropical
Cyclones[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(8): 3272-3297.
- John m peters, Paul j roebber. Synoptic Control of Heavy-rain-producing Convective Training
Episodes[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(7): 2464-2482.
- 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等.一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究[J].气
象,2012,38(05):552-560.KE Wenhua, YU Xiaoding, Lin Weiwang, et al. The Analysis of the
Heavy Rainstorm Caused by Train Effect[J].Meteorological Monthly (in Chinese),
2012,38(05):552-560.
- 李英,王继志,陈联寿,等.台风麦莎(Matsa)的波状降水特征研究[J].科学通报,2007(03):344-353.
Li Ying, Wang Jizhi, Chen Lianshou, et al. Characteristics of wavy precipitation in Typhoon
Matsa[J]. Chinese Science Bulletin(in Chinese), 2007(03):344-353
- 李启华, 陆汉城, 钟玮,等. 双台风条件下水汽的中尺度输送特征与收支诊断[J]. 物理学报,
2018,67(03):286-299.Li Qihua, Lu Hancheng, Zhong Wei, et al. Meso-scale transport
characteristics and budget diagnoses of water vapor in binary typhoons[J]. Acta Physical
Sinica (in Chinese) , 2018,67(03):286-299.
- Lynch S,Schumacher R. Ensemble-based Analysis of the May 2010 Extreme Rainfall in Tennessee
and Kentucky[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(1): 222-239.

- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 9406号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征[J]. 气象学报, 2002, 60(1):31-39. Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. Mesoscale characteristics of the interaction between TC TIM(9406) and mid-latitude circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2002, 60(1):31-39.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. Synoptic and Meso- α Scale Aspects of Flash Flood Events1[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1979, 60(2):115-121.
- Mesoscale Processes Contributing to Extreme Rainfall in a Midlatitude Warm-Season Flash Flood*[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(10): 3964-3986.
- Mechanisms for Quasi-stationary Behavior in Simulated Heavy-rain-producing Convective Systems[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(6): 1543-1568.
- Paul M. Markowski, Yvette P. Richardson. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. America: Wiley, 2010:155-169.
- 钱燕珍, 王继志, 郑铮, 黄旋旋. 台风麦莎 (Matsa) 特大暴雨及其结构特征分析[J]. 气象科技, 2010, 38(05):543-549+663. Qian Yanzhen, Wang Jizhi et al. Severe Heavy Rainfall and Unusual Structure of the Typhoon Matsa[J]. Meteorology Science and Technology (in Chinese), 2010, 38(05):543-549+663.
- 钱燕珍, 张胜军, 黄奕武, 等. 强台风“海葵”(1211)近海急剧增强的数值研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6):1069-1079. Qian Yanzhen, Zhang Shengjun et al. The Numerical Simulation Study on Rapid Intensification of Typhoon HaiKui(1211) over the Offshore Area of China[J]. Journal of the Tropical Meteorology (in Chinese), 2014, 30(6):1069-1079.
- 覃丹宇. 用滤波方法进行Meso- α 云团形态差异的个例分析[J]. 大气科学, 2010, 34(1):154-162. Qin Danyu. A case study of meso- α -scale convective system shape differences using filtering analysis[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010, 34 (1):154-162.
- 寿绍文. 中尺度气象学[M]. 气象出版社. 2003, 56-62. Shou Shaowen. Mesometeorology[M]. China Meteorological Press. 2003, 56-62
- 寿绍文. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5):450-463. Shou Shaowen. Progress of synoptic studies for heavy rain in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5):450-463
- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学, 37 (1):137-148. Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train

effect mechanism of multi-cell storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 137-148.

沈晓玲,孙琦旻.“菲特”台风暴雨成因分析[J].气象与环境科学,2014,37(04):33-39.Shen Xiaoling, Sun Qimin.Rainstorm Cause Analysis of the Fitow Typhoon[J].Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese),2014,37(04):33-39.

Schumacher RS, Johnson RH. Organization and Environmental Properties of Extreme-rain-producing Mesoscale Convective Systems[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(4): 961-976.

田洪军,施春红,王海滨,等.冷空气入侵与1323号强台风“菲特”登陆上海期间降雨增幅关系的初步分析[J].大气科学研究与应用,2014(02):102-111.Tian Hongjun, Shi Chunhong, Wang Haibin, et al. Preliminary Analysis on Enhancement of Landfall Typhoon Rainfall Caused by Invasion of the Cold Air into Binary Typhoons. Atmospheric Science Research and Application (in Chinese), 2014(02):102-111.

王晓,余晖,鲍旭炜,等.“菲特”(1323) 台风降水的极端性分析. 气象科学, 2017, 37(4):514-521. Wang Xiao, Yu Hui, BAO Xuwei, et al. Analysis on extreme characteristics of the precipitation brought by typhoon“Fitow”(1323).Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2017, 37(4):514-521.

谢惠敏,任福民,李国平,等. 超强台风丹娜丝对1323号强台风菲特极端降水的作用[J].气象, 2016, 42(2):156-165.Xie Huimin, Ren Fumin, Li Guoping, et al. Role of Supper Typhoon Danas in the Extreme Precipitation Caused by Severe Typhoon Fitow[J].Meteorological Monthly (in Chinese),2016, 42(2):156-165.

郑艳,蔡亲波,赵付竹,等.强台风“纳沙”暴雨中尺度特征分析[J].自然灾害学报,2014,23(04):134-141.Zheng Yan, Cai Qinbo, Zhao Fuzhu, et al. Mesoscale characteristic analysis of rainstorm of violent typhoon“Neast” [J]. Journal of natural disasters (in Chinese), 2014,23(04):134-141.

章国材,矫梅燕,李延香等,现代天气预报技术和方法[M].气象出版社, 2007, 140-143.Zhang Guocai, Jiao Meiyun, Li Yanxiang, et al. Techniques and Methods of Contemporary Weather Forecast[M].China Meteorological Press (in Chinese), 2007, 140-143.

翟国庆,俞樟孝,孙柏民.应用雷达回波与地面中尺度扰动场作强对流天气分析[J].科技通报,1991(04):196-201.Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, Sun Bomin. Analysis of Severe

Convective Weather with Radar Echoes and Surface Meso-Scale Perturbation[J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 1991(04):196-201.

Zhu Ye, Zhang Honglei, Chen Youli, et al. A modeling study of non-homogeneous coastal gales associated with the landfall of typhoon Soudelor(2015)[J]. J Trop Meteor, 2018, 25(1):1-10.