

谢惠敏,任福民,李国平,等. 2016. 超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用. 气象, 42(2):156-165.

超强台风丹娜丝对 1323 号强台风 菲特极端降水的作用^{*}

谢惠敏^{1,2} 任福民² 李国平¹ 马梁臣³ 邱文玉^{2,4}

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 长春市气象局, 长春 130051

4 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

提 要: 利用地面观测资料、台风定位资料、ECMWF 全球再分析资料等, 采用 TC 降水天气图客观识别法(OSAT)、TC 路径相似面积指数(TSAD)和气流轨迹模式 HYSPLIT 等方法, 从 2013 年第 23 号强台风菲特在我国东南沿海引发台风暴雨的极端性分析及其成因诊断入手, 揭示了双台风作用对极端暴雨的增强作用。结果表明: 首先, 强台风菲特给浙江带来了自 1958 年以来单站日降水排名第二的极端降水, 余姚和奉化日降水量均为 395.6 mm; “菲特”降水过程有两个明显的强降水阶段。其次, 秋季强台风菲特登陆后之所以出现如此强度且持续的台风暴雨, 与超强台风丹娜丝的存在密不可分。在强降水第一阶段, 双台风作用促成了降水的极端性, “丹娜丝”向降水区域输送了约 79.0% 的水汽, 对杭州湾南侧的强降水过程有重要贡献; 在“菲特”强降水第二阶段, “菲特”的环流已经基本消散, 超强台风丹娜丝与冷空气的共同作用主导了这一阶段强降水的产生。

关键词: 强台风菲特, 极端降水, 成因诊断, 双台风作用

中图分类号: P444.458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.2.003

Role of Supper Typhoon Danas in the Extreme Precipitation Caused by Severe Typhoon Fitow

XIE Huimin^{1,2} REN Fumin² LI Guoping¹ MA Liangchen³ QIU Wenyu^{2,4}

1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Changchun Municipal Meteorological Bureau, Changchun 130051

4 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: By using the surface observational data, typhoon track data and ECMWF global reanalysis data, as well as the objective synoptic analysis technique (OSAT), tropical cyclone (TC) track similarity area index (TSAI) and the airflow trajectory model (HYSPLIT4.9), this paper analyzes the characteristics and the causes of the extreme precipitation created by the Severe Typhoon Fitow over the coastal region of Southeast China, and reveals the intensification role of binary typhoons in extreme precipitation. First, Fitow causes the maximum daily precipitation of 395.6 mm in Yuyao and Fenghua, which ranks the second daily extreme TC precipitation in Zhejiang Province in record. Two distinct intense precipitation stages are found in the precipitation process. Secondly, such intense and continuous rainfall during and after Fitow's

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB452806)和国家自然科学基金项目(41375056 和 91224004)共同资助

2015 年 2 月 6 日收稿; 2015 年 12 月 15 日收修定稿

第一作者: 谢惠敏, 主要从事热带气旋降水成因研究. Email: 18210850219@163.com

通信作者: 任福民, 主要从事台风和极端事件研究. Email: fmren@163.com

landfall is mainly due to the existence of Super Typhoon Danas. In the first stage of the severe precipitation on the interaction of the binary tropical cyclones contributes to the extremity, causing Fitow to move much faster than before. Moreover, Danas transports about 79% moisture to the raining region, acting as an important contributor to the extreme precipitation over the southern coast of Hangzhou Bay. In the second stage, as the circulation of Typhoon Fitow almost dissipates, the combined interaction of Super Typhoon Danas and cold air causes the occurrence of the extreme precipitation.

Key words: Severe Typhoon Fitow, extreme precipitation, diagnostic analysis, effect of binary tropical cyclones

引言

热带气旋(tropical cyclone, TC)是一种严重的灾害性天气,其带来的大风、暴雨和风暴潮等剧烈的天气过程常常造成巨大的灾害和损失(陈联寿, 2010),其中,TC暴雨特别是统计上达到极端强度的TC极端降水会造成洪水、城市内涝、农田受淹、耕地流失、道路冲毁以及滑坡、泥石流等灾害(陈联寿等, 2004)。

针对TC极端降水,不少研究给出了成因分析。丁一汇等(1978)在研究河南75.8暴雨时,指出T503号台风(Nina)深入内陆后与弱冷空气的接触,是造成这次特大暴雨的主要原因之一。钮学新等(2005)利用MM5模式对0216号台风的降水过程进行了数值模拟,结果表明冷空气入侵热带气旋外围可以大幅度增加热带气旋外围及倒槽的降水。任丽等(2013)通过对台风布拉万的诊断分析发现高空槽引导的冷空气移动增强了大气的斜压性,从而使垂直扰动得到发展,与大暴雨的产生关系密切。Dimego等(1982)指出稳定的水汽输送是TC暴雨维持和产生的重要条件。丁治英等(1995)通过对不同雨强台风的诊断对比及数值试验得出弱降水台风水汽通道较短,而强降水台风水汽通道较长。孙建华等(2006)从探空资料上分析得出,高低空急流的相互配合对台风暴雨的产生和加强有不可忽视的作用。还有一种特殊情况,就是在双台风的共同影响下出现的极端降水。国内外也有不少学者对双台风的相互作用的距离、影响机制等做过深入的研究,例如Wu等(2010)对1999年的两个热带风暴进行研究后发现,热带风暴Paul的存在对Rachel的降水和运动造成了很大的影响。罗哲贤等(2001)、Prieto等(2003)和Yang等(2008)都就双台风的相互作用对台风的发展与消亡、移动路径、强度以及台风降

水的影响做了相应研究。徐洪雄等(2013)通过诊断分析发现“莫拉克”与“天鹅”在移动过程中存在双台风涡旋互旋、吸引与合并现象,并基于数值敏感性试验揭示了“天鹅”趋于消弱的过程中其水汽、动能输送为台风莫拉克的发展与维持做出了一定贡献。梁军等(2015)发现双台风达维和苏拉相互作用,为辽东半岛强降水的形成提供了十分有利的水汽、能量和动力等条件。

关于双台风对台风暴雨的水汽输送,鲜有研究从定量角度展开,本文以2013年的强台风菲特和超强台风丹娜丝为例,从定量的角度分析了水汽输送在这次台风暴雨中的作用。强台风菲特于2013年10月7日凌晨以强台风强度登陆福建省福鼎市沙埕镇,于7日11时停止编号,是自1949年以来在10月登陆我国大陆的最强台风,给东南沿海造成严重水涝灾害,浙江余姚城区被淹持续近一周,其降水的极端性显而易见(王海平等, 2014; 文永仁等, 2014; 许映龙等, 2015)。秋季台风造成如此程度的极端降水及影响十分罕见。在强台风菲特影响东南沿海期间,其东侧的超强台风丹娜丝强度达到最强,两者距离达到最小。那么,“丹娜丝”对强台风菲特的极端降水是否有作用?如果有,其贡献能有多大?这些问题十分值得关注。

1 资料和方法

1.1 资料

应用以下气象资料:(1)台站降水资料,由于1958年以前,我国气象观测基准站数量较少,故采用了包括我国东南沿海两省一市(浙江、福建和上海)157个台站1958—2013年逐日降水和2013年10月逐小时降水,以及全国2013年10月台站逐日降水,日资料时段为前一日20时至当日20时;(2)

热带气旋资料选自中国气象局上海台风研究所 1958—2013 年西北太平洋热带气旋最佳路径资料,包括每 6 h 的中心位置、中心附近最大风速和最低气压数据;(3)全球分析资料,10 月 7 日 02 时 NCEP FNL 全球分析资料,空间分辨率为 $(1^\circ \times 1^\circ)$,仅用于制作该时刻的要素场分析;(4)再分析资料,包括欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA 1979—2013 年每日 4 次全球再分析资料,空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$;(5)对“菲特”停止编号后 2013 年 10 月 7 日 14、20 时和 8 日 02 时的位置进行人工增补,主要参考了再分析资料距地面 10 m 的环流中心位置,其中 8 日 02 时的位置与 7 日 20 时相同。

1.2 方法

(1)气流轨迹模式 HYSPLIT

HYSPLIT 轨迹模式是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)研发的一种用于计算和分析大气污染输送、扩散轨迹的专业模型(Draxler 等,1998)。该模式使用拉格朗日观点来跟踪气流运动过程中所携带的粒子的移动,分为前向轨迹模型和后向轨迹模型,可以追踪气团的来源,也可以预测气团的未来去向。

本文主要用该方法分析“丹娜丝”对“菲特”极端降水的贡献。具体模拟方案如下:在两个强降水阶段内,分别取每个整点时刻,指定区域内每隔 1 个经纬度,上空 1500 m 的粒子为起始点,追踪其之前 72 h 内的运动轨迹,每一条运动轨迹上包含该粒子每隔 1 h 的经纬度、高度、气压、温度等信息。得到若干条轨迹后,通过聚类分析,将其分为几类,再将每一类的所有条轨迹上的 72 个时刻的物理量(如温度、比湿)进行平均,得到每一类通道的平均物理量。

(2)TC 降水天气图客观识别法

本文采用 Ren 等(2007)提出的 TC 降水天气图客观识别法(Objective Synoptic Analysis Technique, OSAT)识别我国东南沿海地区的热带气旋降水。OSAT 的思想是模拟预报员利用天气图人工分离 TC 降水的过程:首先,基于降水分布的结构分析,将日降水场分解成几个独立的自然雨带和一些离散的降水台站;然后,根据自然雨带与 TC 中心的位置关系,确定出可能 TC 雨带;最后,针对每一个降水台站,根据它是否隶属于可能 TC 雨带的关系以及它与 TC 中心之间的距离大小,判断它的降水是否为 TC 降水,进而所有 TC 降水台站组合成为 TC 降水雨带。本文采用 OSAT 就“菲特”降水的极端性与历史台风个例进行对比分析。

(3)TC 路径相似面积指数

本文在选择与“菲特”路径相似的 TC 时,应用了 Ren 等(2015)提出的 TC 路径相似面积指数(Track Similarity Area Index, TSAI)。对于任意两条 TC 路径, TSAI 指数代表了这两条 TC 路径及它们的首、尾连接线所围成范围的面积。 TSAI 指数越小,则两个 TC 的路径越相似。本文使用该方法分析“菲特”的路径相似台风。

2 “菲特”降水基本特征

“菲特”在东南沿海多地造成了罕见的强降水,尤其是给浙江省余姚市带来了 1958 年以来最大单站日降水。分析 1958—2013 年造成东南沿海 TC 最大单站日降水极端性排名前 50 个个例,发现最大单站日降水发生的时间集中在 7—9 月(占 40 次),尤其以 8 月最多(占 20 次)。表 1 给出了 TC 最大

表 1 造成东南沿海 TC 最大单站日降水极端性排名前 10 位的热带气旋(1958—2013 年)

排名	发生年份	台风	中文名称	台站	最大日降水量/mm
1	2005	Haitang	海棠	福建柘荣	472.5
2	2009	Morakot	莫拉克	福建柘荣	415.2
3	1999	Wendy	范迪	浙江温州	403.8
4	2013	Fitow	菲特	浙江余姚、奉化	395.6
5	1977	AMY	艾美	上海宝山	394.5
6	2003	Morakot	莫拉克	福建南安	392.4
7	1996	Lisa	莉莎	福建长汀	384.1
8	1969	Elsie	叶锡	福建柘荣	381.7
9	2009	Linfa	莲花	福建东山	350.4
10	1999	York	约克	福建长乐	347.2

单站日降水极端性排名前10位的热带气旋。可见,2013年23号强台风菲特以最大单站日降水量395.6 mm(浙江余姚、奉化,10月7日)位列第四;而在影响浙江省的热带气旋中,“菲特”位居第二,仅次于1999年的台风温蒂。“菲特”过程降水量分布如图1所示,“菲特”于2013年10月7日01时登陆,东南沿海降水过程出现在10月5—8日,超过200 mm的过程降水主要位于浙江东北部、南部和上海,其中强降水中心在浙江东北部,超过500 mm的站点为余姚(542.3 mm)和奉化(513 mm)。

考虑到“菲特”的降水主要集中在东南沿海,图2给出了东南沿海TC影响区平均台站降水量逐时演变。可见,“菲特”登陆前后,降水表现出明显的强弱变化,大致表现为两个主要的强降水阶段;若以 $4.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为标准划分强降水,则两个强降水阶段的具体时段为:第一个阶段是“菲特”登陆前后10月6日21时至7日10时,最大降水强度出现在7日02时,为 $9.45 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;第二个阶段是“菲特”停编之后,8日02—10时,最大降水强度出现在8日04时,为 $8.07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。图3为这两个强降水阶段的累积降水量分布,第一阶段(图3a)强降水中心出现在杭州湾南侧,而第二阶段(图3b)强降水中心出现在上海。第二阶段的降水强度整体上较第一阶段小,降水中心有明显的北移。

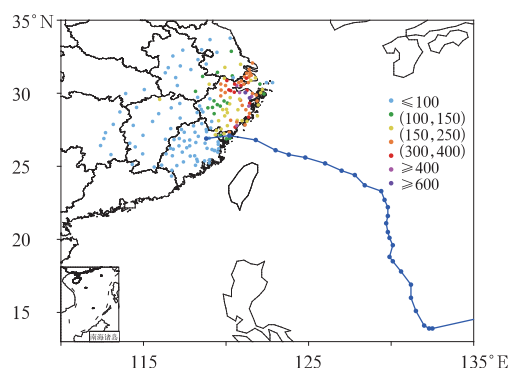


图1 1323号强台风菲特过程
降水量(单位: mm)分布

Fig. 1 Distribution of the precipitation
during the process of Severe
Typhoon Fitow (unit: mm)

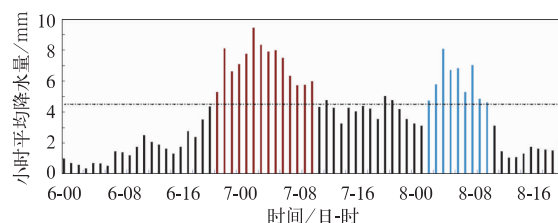


图2 2013年10月6—8日东南沿海
“菲特”影响区降水量演变

Fig. 2 Variation of station averaged hourly
precipitation in Fitow impacted region

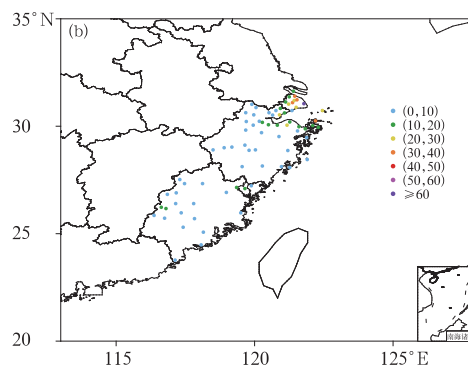
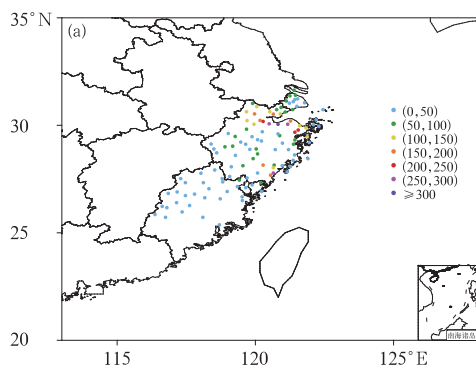


图3 强台风菲特两个强降水阶段的累积降水量(单位: mm)分布

(a)第一阶段10月6日21时至7日10时,(b)第二阶段8日02—10时

Fig. 3 Distribution of accumulated precipitation (unit: mm) for two intense precipitation stages of Severe Typhoon Fitow
(a) 1st stage: 21:00 BT 6—10:00 BT 7 October, (b) 2nd stage: 02:00—10:00 BT 8 October

3 “菲特”强降水成因诊断

3.1 第一阶段强降水

考虑到“菲特”单站最大日降水量出现时间与强

降水第一阶段吻合,为探讨造成“菲特”极端降水的成因,挑选与“菲特”登陆路径最相似的15个台风进行对比,采用TC路径相似面积指数TSAI方法,相似区域为 $23^{\circ} \sim 28^{\circ} \text{N}$ 、 $119^{\circ} \sim 129^{\circ} \text{E}$ 。图4给出“菲特”及与其路径相似排名前15的热带气旋路径,分析表明这15个TC个例集中出现在7—9月。将这

15 个热带气旋按照单站最大日降水量大小分为强降水组(前 7 名)和弱降水组(8~15 名),表 2 为这两组平均的最大降水当日的 TC 中心附近地面最大风速、当日平均移动速度和最大单站日降水量。从表 2 可以看出,强降水组与弱降水组相比,TC 强度明显偏强、移动速度明显偏慢;说明强度强、移速慢的 TC 容易产生极端降水。从表 2 还可以看出,“菲特”最大单站日降水量(395.6 mm)的极端性远高于强降水组(236.3 mm),在 TC 强度上“菲特”(42.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)略弱于强降水组(44.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),移动速度(20.9 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)明显快于强降水组平均移动速度(16.6 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$),甚至超过了弱降水组的平均移动速度(20.2 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。可见,“菲特”的强度对于极端降水的产生起到了积极作用,但是,为何“菲特”表现出如此快的移动速度却依然能产生这么强的降水呢?考虑“菲特”东侧正好存在超强台风丹娜丝,那么“菲特”的强降水是否与“丹娜丝”有关系呢?

表 2 “菲特”及强、弱降水相似热带气旋组要素统计

Table 2 Element values of Fitow, the severe precipitation TC group and the weak precipitation TC group

台风组	中心附近地面最大风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	当日平均移动速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	最大单站日降水量/mm
菲特	42.0	20.9	395.6
强降水组(平均)	44.3	16.6	236.3
弱降水组(平均)	34.8	20.2	161.0

图 5 给出强台风菲特与超强台风丹娜丝的移动位置关系。可见,2013 年 10 月 6 日 08 时至 7 日 20 时,两台风中心之间距离小于 1400 km,尤其进入“菲特”第一阶段强降水的当天(7 日),两台风中心之间

距离在 1200 km 以内,最近 1060 km(图 5b);与此同时,6—7 日两台风出现了明显的逆时针互旋现象(图 5a)。结合图 5a 和 5b,可见“菲特”与“丹娜丝”出现了双台风相互作用,即藤原效应(包澄澜等,1985)。

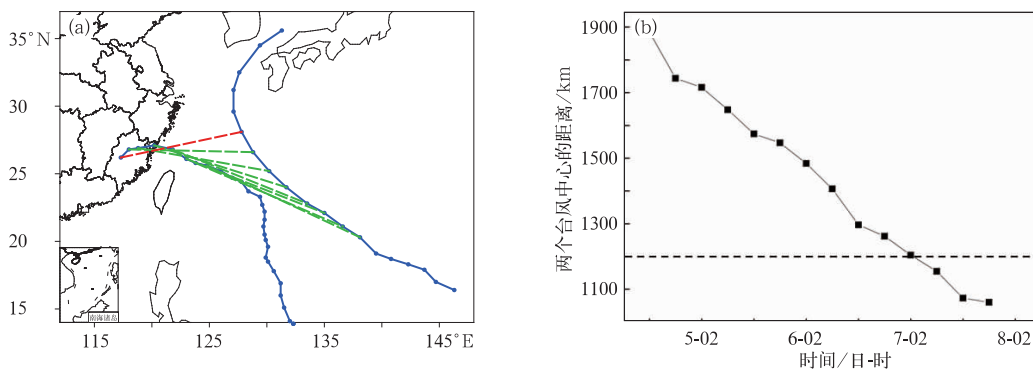


图 5 强台风菲特与超强台风丹娜丝的移动位置关系

(a) 两台风路径及“菲特”登陆前后两个台风中心连线(虚线)演变, (b) 两台风中心之间距离演变

Fig. 5 Relative locations of Severe Typhoon Fitow and super typhoon Danas

(a) tracks of the two typhoons and variation of the line segment (dotted line) between the two typhoon centers during the period of Fitow landfall, (b) variation of the distance between the two typhoon centers

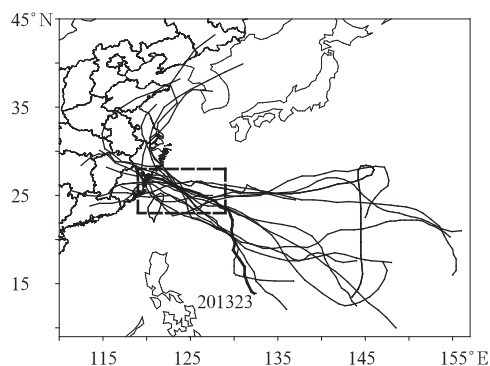


图 4 “菲特”及与其路径相似
排名前 15 的热带气旋路径

[虚线框为相似区域(23°–28°N, 119°–129°E), 粗实线为
“菲特”路径, 细实线为 15 个相似热带气旋路径]

Fig. 4 Tracks of Fitow and the top 15 similar TCs

[Dashed box is the similar region (23°–28°N,
119°–129°E); thick line is the track of Fitow,
thin lines are the tracks of the 15 similar TCs]

进一步分析表明(图略),7月3—4日“菲特”移动速度平均约 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,5日02时至6日14时其移动速度提高到平均约 $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,6日20时至7日08时速度加快至 $25 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,登陆后速度又迅速减弱。可见藤原效应最明显期间(6—7日)“菲特”移动速度达到最大。7日08时“丹娜丝”加强为超强台风,中心附近最大风力达到 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而此时“菲特”已登陆并迅速减弱。

图6给出2013年10月7日02时850 hPa水汽通量分布。可以看出,“菲特”登陆后在东南沿海形成倒槽形势,倒槽北部的浙江大部地区上空为很强的水汽输送带,其东侧和南侧的来源主要包括:一是“菲特”自身环流即东侧的东南向水汽输送,另一个是来自“丹娜丝”的偏东水汽输送。这一结果与周福等(2014)对“菲特”强降水区域的水汽通量收支分析结果相一致。

为了定量分析第一阶段强降水水汽的来源,我们采用 HYSPLIT 模型模拟了第一阶段强降水中心所在区域上空1500 m高度,第一阶段内气流的72 h后向轨迹,并且经过聚类分析得到主要气流通道分布和特性(图7和表3)。图7和表3显示,造成第一阶段强降水的水汽通道有三条,其中通道1为东北向气流,源自江苏以东洋面;通道2为偏东气

流,主要源自“丹娜丝”的环流系统;通道3为东南气流,源自“菲特”自身环流系统。由表3可见,偏东气流(通道2)是第一阶段强降水的主要水汽来源,向降水区域输送了79.0%的水汽,即说明“丹娜丝”对这一阶段强降水的水汽输送起到了至关重要的作用。

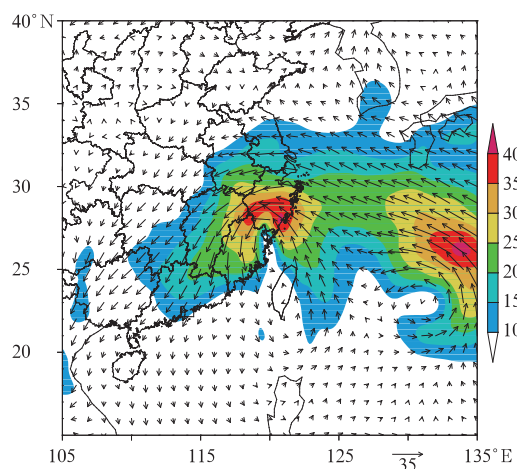


图6 2013年10月7日02时850 hPa水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)分布
Fig. 6 Distribution of vapor flux (unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 02:00 BT 7 October 2013

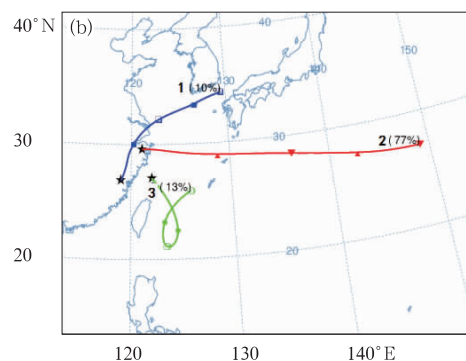
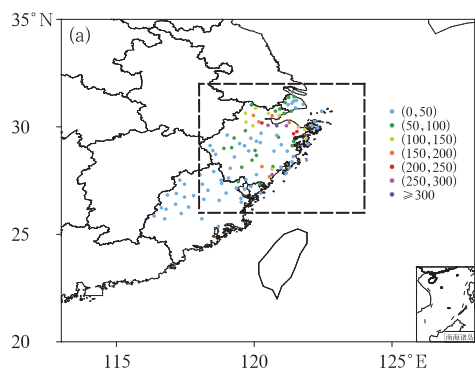


图7 强台风菲特第一阶段降水分布及 HYSPLIT 模型分析区域(a)及水汽通道分布(b)
(图a中虚线框代表 HYSPLIT 模型分析区域,图b中的百分比表示各通道包含的轨迹数占总数的比例)
Fig. 7 Distribution of precipitation (unit: mm) and HYSPLIT model analysis region (a) and distribution of vapor channels (b) during the first intense precipitation stage of Fitow
(Dashed box in Fig. 7a represents the HYSPLIT model analysis region and the percentages in Fig. 7b represent the contribution to the channels)

进一步分析高低层环境场对第一阶段强降水的作用。图8给出2013年10月7日02时200和850 hPa风场及散度场。可以看出,高层200 hPa在江

西、江苏至山东半岛一带有一条中心值超过 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流,且结合前两个时刻分析(图略),位置少动,在高空急流入口区的右侧江西东部至浙江

大部上空存在明显的辐散中心(图 8a);低空 850 hPa 台风倒槽内北部浙江沿海上空存在明显的辐合中心(图 8b)。高低层的这种形势配置十分有利于产生对流,即有利于第一阶段强降水的发生。另外,采用 K 指数(刘建文等,2005)分析了大气不稳定性条件,10 月 7 日 02 时 K 指数场(图 9)显示,在“菲特”登陆初期, K 指数大值中心位于浙江沿海,最大值超过 40°C ,可见该区域上空层结的不稳定为第一阶段强降水创造了极有利的条件。

总结上述分析,第一阶段强降水的成因表明,“菲特”台风倒槽在高层 200 hPa 高空急流有效配置下,浙江大部上空出现底层强辐合高层强辐散、层结

表现为强不稳定的有利于强对流的形势,在低层 850 hPa 来自超强台风丹娜丝的偏东气流源源不断水汽输送的配合下,形成了第一阶段强降水。

表 3 强台风菲特强降水第一阶段
各水汽通道的特征统计

Table 3 Characteristics of the vapor channels during
Fitow's first intense precipitation stage

要素	通道 1	通道 2	通道 3
轨迹数所占比例/%	10	77	13
通道平均比湿/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	11.4	13.0	11.7
水汽贡献率/%	9.0	79.0	11.9
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	19.4	19.6	18.4

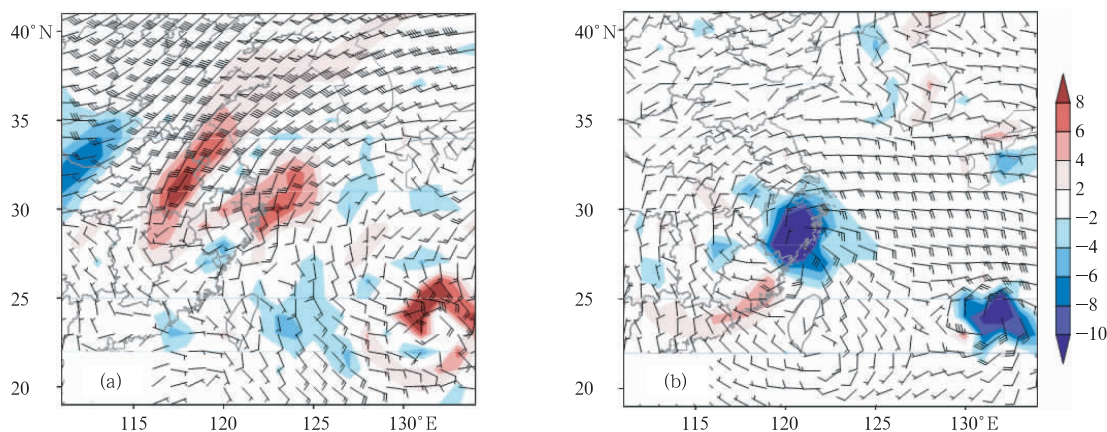


图 8 2013 年 10 月 7 日 02 时 200 hPa (a) 和 850 hPa (b) 风场及散度场
(填色为散度场,单位: 10^{-5} s^{-1} ;风向杆为风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Distribution of wind (wind bar, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (colorful shade, unit: 10^{-5} s^{-1})
at 200 hPa (a) and 850 hPa (b) at 02:00 BT 7 October 2013

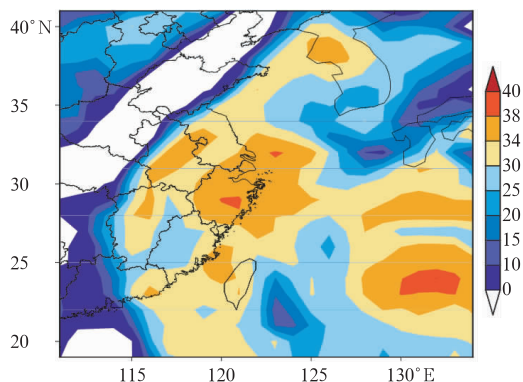


图 9 2013 年 10 月 7 日 02 时 K 指数(单位: $^{\circ}\text{C}$)分布
Fig. 9 Distribution of index K at
02:00 BT 7 October 2013 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

3.2 第二阶段强降水

在第二阶段 8 日 02—10 时,“菲特”的环流已经

基本消散,随着“丹娜丝”的北移,降水区域主要处于“丹娜丝”环流控制下,此阶段累积降水的最大值中心(上海南汇站)距“丹娜丝”中心平均距离仅 592 km。从 10 月 8 日 02 时低层 850 hPa 水汽通量场(图 10a)可以看出,偏东气流从海洋上给降水中心区域带来充足的水汽,给第二阶段降水提供了有利的水汽条件。随着“丹娜丝”逐渐远离中国,到 8 日 14 时 850 hPa 上海等地上空转为偏东北气流,水汽输送迅速减少(图 10b),第二阶段降水结束。

为了定量分析第二阶段水汽的来源,采用 HY-SPLIT 模型模拟了第二阶段强降水中心所在区域上空 1500 m 高度,第二阶段内气流的 72 h 后向轨迹追踪,并且经过聚类分析得到主要气流通道分布和特性(图 11 和表 4)。可以看出,造成第二阶段强降水的水汽通道有两条,其中通道 1 为东北向气流,通道 2 为偏东气流。由表 4 可见,东北向气流明显

更加干、冷,而偏东气流相对暖、湿。偏东气流(通道 2)是这一阶段强降水的主要水汽来源,向降水区域

输送了 73.5%的水汽,即说明“丹娜丝”对这一阶段强降水的水汽输送至关重要。

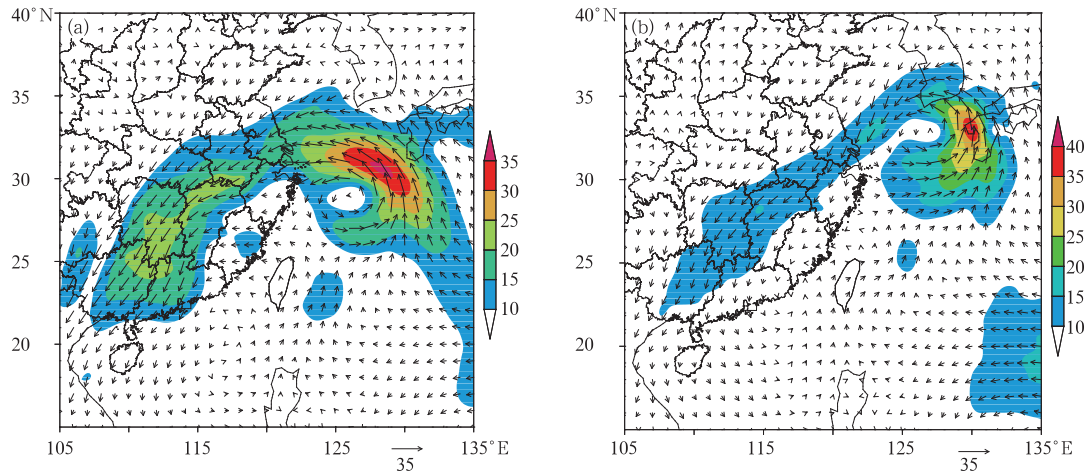


图 10 2013 年 10 月 8 日 850 hPa 水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)分布

(a)第二阶段期间 02 时,(b)第二阶段过后 14 时

Fig. 10 Distribution of vapor flux (unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa on October 2013

(a) 02:00 BT during Fitow's second intense precipitation stage,

(b) 14:00 BT after Fitow's second intense precipitation stage

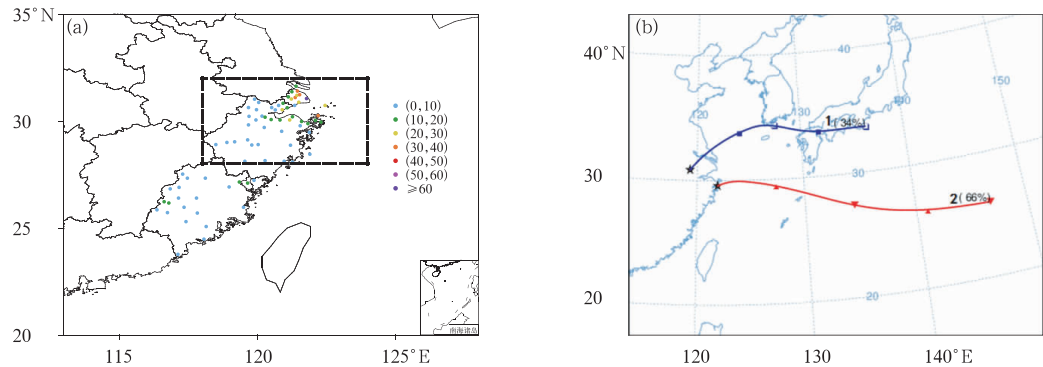


图 11 同图 7,但为第二阶段

Fig. 11 Same as Fig. 7, but for the second intense precipitation of Fitow

表 4 同表 3,但为第二阶段

Table 4 Same as Table 3, but for the second intense precipitation of Fitow

要素	通道 1	通道 2
轨迹数所占比例/%	34	66
通道平均比湿/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	9.6	13.6
水汽贡献率/%	26.5	73.5
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.4	19.9

图 12 是 8 日 02 时 925 hPa 风场和温度场分布,在这一阶段强降水中心附近,等温线密集,呈东北—西南的带状分布,有明显的东北风穿越等温线

南下,即存在明显的冷空气入侵。图 13a 是 10 月 8 日 02 时纬带($119^{\circ} \sim 123^{\circ}\text{E}$)平均垂直速度高度-经向剖面,在纬度 $30^{\circ} \sim 36^{\circ}\text{N}$ 存在一个明显向北倾斜的上升运动区,而此时 $33^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 低层有较弱($0 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的下沉运动区。图 13b 是同一时刻该纬度的平均假相当位温高度-经向剖面,在低层以 31°N 为界,南侧是明显的大值中心,而北侧是明显的低值中心,且北侧的低值中心呈现出从低层到高层逐渐向北倾斜的结构。结合图 13a 和 13b 可知,冷空气造成的大气斜压结构十分明显,结合前文中分析的冷空气来源追踪,得出此时冷空气从北边入

侵,促使该地区较暖的空气得以迅速抬升。可见,冷空气的灌入(即图 11b 中通道 1 所示)是第二阶段强降水的重要原因。

进一步分析高低层环境场对第二阶段强降水的作用。图 14 给出 2013 年 10 月 8 日 02 时 200 和 850 hPa 风场及散度场。在 850 hPa 上东北气流与“丹娜丝”环流的偏东气流汇合,在浙江北部、上海延伸至黄海上空为一条明显的切变线和辐合带(图 14b);与此相对应,200 hPa 高空在江苏北部至山东半岛一带为明显的辐散区(图 14a)。高低层的这种形势配置给第二阶段强降水提供了有利的动力条件。

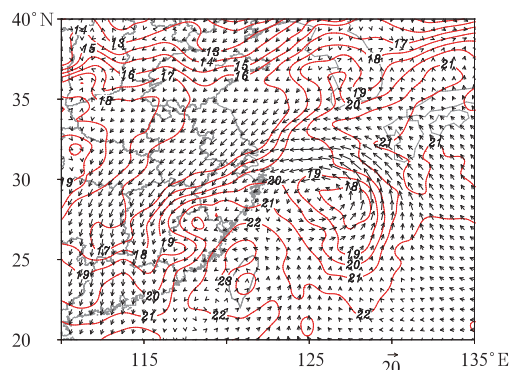


图 12 2013 年 8 月 02 时 925 hPa 风场和温度场(等值线,单位:°C)

Fig. 12 Distribution of wind and temperature (isoline, unit: °C) at 925 hPa at 02:00 BT 8 October 2013

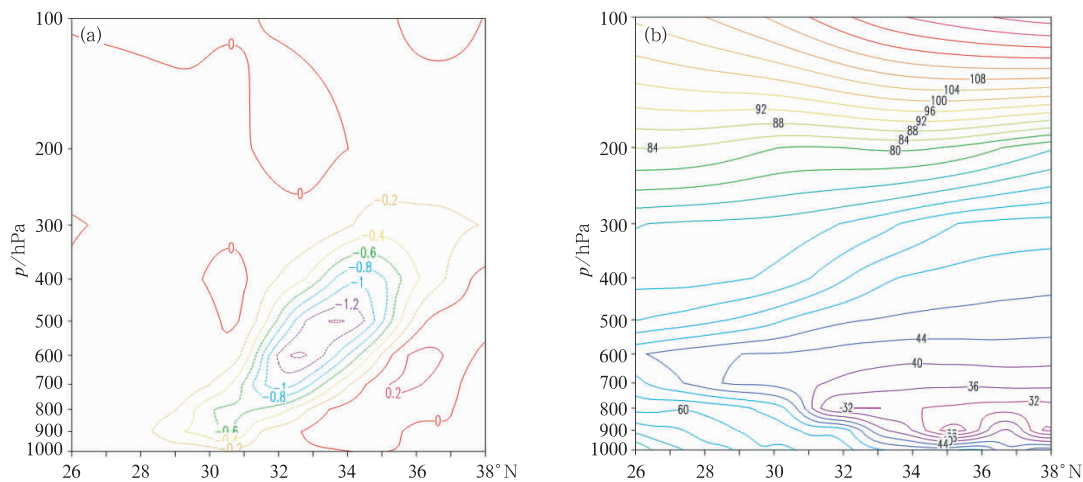


图 13 2013 年 10 月 8 日 02 时纬带(119°~123°E)平均的垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a)和假相当位温(单位:°C)(b)高度-经向剖面

Fig. 13 Height-meridional sections of zonal belt (119°–123°E) mean vertical velocity (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a) and potential pseudo-equivalent temperature (unit: °C) (b) at 02:00 BT 8 October 2013

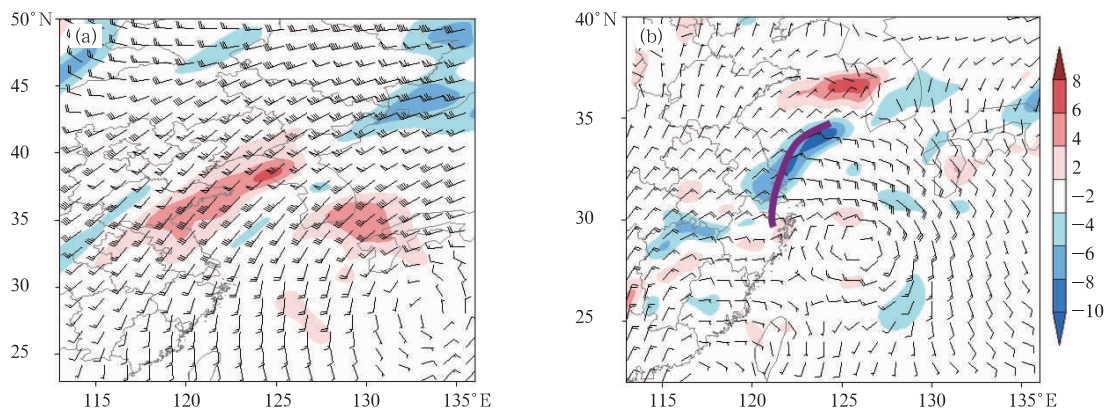


图 14 同图 8,但为 2013 年 10 月 8 日 02 时(粗紫色线为切变线)

Fig. 14 Same as Fig. 8, but for 02:00 BT 8 October 2013
(Thick purple line is shear line)

4 结论与讨论

(1)2013年10月23号强台风菲特是自1958年以来给浙江带来了单站日降水排名第二的台风,200~500 mm的台风过程降水主要出现在浙江东北部、南部和上海;“菲特”降水过程有两个明显的强降水阶段:第一个阶段是10月6日21时至7日10时,第二个阶段是8日02—10时。

(2)在“菲特”强降水第一阶段,“菲特”低层台风倒槽在高层200 hPa高空急流的有效配置下,浙江大部上空出现低层强辐合高层强辐散、层结表现为强不稳定有利于强对流的形势,在低层850 hPa来自超强台风丹娜丝的偏东气流源源不断水汽输送的配合下,形成了杭州湾南侧的强降水过程。

(3)“菲特”强降水第二阶段,主要是由“丹娜丝”主导的降水过程。东北向干冷气流与“丹娜丝”偏东暖湿气流的强烈汇合,以及“丹娜丝”偏东气流的充足水汽输送,造成了这一阶段以上海为中心的强降水过程。

7—9月是东南沿海台风极端降水容易出现的季节。从本文的分析可看出,发生在2013年10月的秋季强台风菲特登陆后之所以出现如此强度且持续的台风暴雨,与超强台风丹娜丝的存在密不可分。在强降水第一阶段,双台风作用使得“菲特”降水增强;在强降水第二阶段,超强台风丹娜丝与冷空气的共同作用导致了强降水的发生。上述分析主要是基于诊断分析的结果,其中更细致的机制有待于数值模拟的进一步检验。

致谢:感谢中国气象科学研究院灾害天气重点实验室台风小组提供的大力支持。

参考文献

- 包澄澜,阮均石,朱跃建.1985.双台风互旋与引导气流关系的研究.海洋学报(中文版),7(6):696-705.
- 陈联寿.2010.热带气象灾害及其研究进展.气象,36(7):101-110.
- 陈联寿,罗哲贤,李英.2004.登陆热带气旋研究的进展.气象学报,62(5):541-549.
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺.1978.1975年8月上旬河南特大暴雨的研究.大气科学,2(4):276-289.
- 丁治英,陈久康.1995.不同雨强台风的诊断对比与数值试验研究.南

- 京气象学院报,(2):234-241.
- 梁军,张胜军,黄艇,等.2015.辽东半岛“达维”(1210)台风暴雨的诊断分析.气象,41(3):364-371.
- 刘建文,郭虎,李耀东,等.2005.天气分析预报物理量计算基础.北京:气象出版社,216-218.
- 罗哲贤,马镜娴.2001.副热带高压南侧双台风相互作用的数值研究.气象学报,59(4):450-458.
- 钮学新,杜惠良,刘建勇.2005.0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验.气象学报,63(1):57-68.
- 任丽,王承伟,张桂华,等.2013.台风布拉万(1215)深入内陆所致的大暴雨成因分析.气象,39(12):1561-1569.
- 孙建华,齐琳琳,赵思雄.2006.“9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究.气象学报,64(1):57-71.
- 王海平,高拴柱.2014.2013年10月大气环流和天气分析.气象,40(1):126-131.
- 文永仁,魏娜,张雪蓉,等.2014.1323号强台风菲特登陆后迅速衰亡的原因分析.气象,40(11):1316-1323.
- 徐洪雄,徐祥德,陈斌,等.2013.双台风生消过程涡旋能量、水汽输送相互影响的三维物理图像.气象学报,71(5):825-838.
- 许映龙,吕心艳,张玲,等.2015.1323号强台风菲特特点及预报难点分析.气象,41(10):1222-1231.
- 周福,钱燕珍,朱宪春,等.2014.“菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析.气象,40(8):930-939.
- Dimego G J, Bosart I F. 1982. The Transformation of tropical Storm Agnes into an extratropical cyclone. Part II: moisture, vorticity and kinetic energy budgets. Mon Wea Rev, 110(5):412-433.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT 4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. Australian Meteor Magazine, 47: 295-308.
- Prieto R, McNoldy B D, Fulton S R, et al. 2003. A classification of binary tropical cyclone-like vortex interactions. Mon Wea Rev, 131(11):2656-2666.
- Ren F, Qiu W, Jiang X, et al. 2015. An objective index for identifying tropical cyclone track similarity. Mon Wea Rev, submitted.
- Ren F, Wang Y, Wang X, et al. 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations. Adv Atmos Sci, 24(4):700-711.
- Wu C C, Cheung W, Chen J H, et al. 2010. The impact of Tropical Storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with Tropical Storm Rachel (1999) near Taiwan. Mon Wea Rev, 138(5):1635-1650.
- Yang C C, Wu C C, Chou K H, et al. 2008. Binary interaction between Typhoons Fengshen (2002) and Fungwong (2002) based on the potential vorticity diagnosis. Mon Wea Rev, 136(12):4593-4611.