

# 浙江东部两次极端台风暴雨的水汽特征研究

顾雨亭, 张灵杰, 康天伟, 赖丽娜

三门县气象局, 浙江 台州

收稿日期: 2023年12月14日; 录用日期: 2024年1月24日; 发布日期: 2024年1月31日

## 摘要

本文利用自动站资料、ERA5 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) 逐时再分析等资料, 基于天气学和诊断方法对2013年23号台风“菲特”、2019年09号台风“利奇马”引发浙江东部极端暴雨过程的水汽输送特征进行综合分析。结果表明: (1) 浙江东部极端台风暴雨过程通常对应水汽通道的长时间稳定维持, 为暴雨发生发展提供源源不断的水汽条件。并且一些情况下水汽通道存在多条。(2) 造成浙江东部极端台风暴雨过程往往洋面上存在多个台风相互作用, 多台风带来的水汽更为充沛。(3) Hysplit三维轨迹能更直观立体反应水汽来源, 其与水汽输送路径分析结论基本一致。浙江省东部极端台风暴雨的水汽净输入边界往往为东边界。(4) 暴雨发生前、发生时, 水汽通量散度强负中心与强暴雨区对应很好, 并且水汽通量散度负值中心的变化往往对应降水的减弱或暴雨带位置的变化。(5) 极端台风降水时段近地面往往稳定存在急流输送水汽, 并且降水增强伴随急流增强; 站点上空为整层饱和区, 水汽条件极佳。

## 关键词

台风暴雨, 水汽通量, 水汽通量散度, Hysplit

# Study on Water Vapor Characteristics of Two Extreme Typhoon Rainstorms in Eastern Zhejiang Province

Yuting Gu, Lingjie Zhang, Tianwei Kang, Lina Lai

Sanmen Meteorological Bureau, Taizhou Zhejiang

Received: Dec. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Based on the meteorological and diagnostic methods, this paper comprehensively analyzes the water vapor transport characteristics of extreme rainstorm caused by Severe Typhoon Fitow and

**Super Typhoon Lekimain in eastern Zhejiang Province by using automatic station data and hourly re-analysis of ERA5 (0.25° × 0.25°). (1) The extreme typhoon rainstorm process in eastern Zhejiang usually corresponds to the long-term stable maintenance of water vapor channel, providing continuous water vapor conditions for the occurrence and development of rainstorm. And in some extreme cases, there are several water vapor channels. (2) In the process of extreme typhoon rainstorm in eastern Zhejiang, there are often several typhoons interacting on the ocean surface, which bring more abundant water vapor. (3) The three-dimensional trajectory of Hysplit can more intuitively reflect the water vapor source, which is basically consistent with the analysis conclusion of water vapor transport path. The net water vapor input boundary of extreme typhoon rainstorm in eastern Zhejiang Province is usually the eastern boundary. (4) Before and during the rainstorm, the strong negative center of Moisture Flux Convergence corresponds well to the severe rain area, and the change of the negative center of Moisture Flux Convergence often corresponds to the weakening of precipitation or the change of the location of the rainstorm zone. (5) During the extreme typhoon precipitation period, water vapor is usually transported by the jet stream near the surface, and the increase of precipitation is accompanied by the increase of the jet stream. The whole layer is saturated above the station, and the water vapor condition is excellent.**

## Keywords

Typhoon Rainstorm, Moisture Flux, Moisture Flux Convergence, Hysplit

Copyright © 2024 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

台风是引发暴雨的主要天气系统，长期以来台风降水一直为气象工作者所关注。浙江省也是受台风影响严重的省份之一。台风暴雨的强度可能与大尺度环流背景，冷空气，低空急流，季风等密切相关[1]。李美颖等以台风“利奇马”为例，从动力和热力因素两个方面研究了中纬度高空槽与台风之间的相互作用对台风远距离暴雨的影响[2]。地形对台风暴雨的增强也有明显作用，在大范围雨区中强暴雨中心都常常与地形有关(陈联寿等) [1]。周福等[3]对 1509 号台风“灿鸿”研究得出强降水主要分布在杭州湾南岸的四明山区、象山港南岸山区，这些区域对东北气流有迎风坡作用和地形辐合。段晶晶[4]等研究表明台风接近陆地时，会与地形发生复杂的相互作用，影响其内部中小尺度系统结构和演变，引起降水的异常变化。热带气旋倒槽暴雨是浙江台风暴雨的一个重要组成(董美莹等) [5]。曹晓岗等[6]研究得出近海北上热带气旋对华东沿海是否有较严重风雨影响，取决于其北上路径与沿海地区距离远近、NTC 的强度和范围大小。另外，水汽输送对台风暴雨的发生发展、维持至关重要，持续不断的水汽输送有利于台风暴雨的发生发展以及登陆台风环流的维持[7] [8]。李超等[9]研究表明台风烟花与中高纬稳定的大气环流形势共同影响下建立的远距离通道，使海上的水汽源源不断地输送到内陆极端降水区。谭震等[10]研究得出涡度、水汽通量、水汽通量相对散度等物理量的大小与分布对暴雨的落区与强度具有一定的指示意义。

本文对 2013 年 23 号台风菲特、2019 年 09 号台风利奇马引发浙江东部极端暴雨过程的水汽输送进行分析总结，希望对今后极端台风暴雨的预报预警工作提供帮助。

## 2. 资料说明和方法

本文使用浙江省常规地面观测资料(降水量)、欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料(ERA5) (0.25°

× 0.25°)逐小时(气温、位势高度、风场、相对湿度、散度、垂直速度等), 基于天气学方法和诊断分析方法对 2013 年 23 号菲特、2019 年 09 号台风利奇马引发浙江东部极端暴雨过程进行综合分析, 从实况演变、高低空环流形势、水汽来源、hysplit 后向轨迹模型、四边界水汽输送等方面研究其水汽输送特征。

水汽通量含义是在单位时间内流经某一单位面积的水汽质量, 是表示水汽输送强度的物理量。根据其定义, 若截取面积的高为 1 hPa, 底边长为 1 cm, 并考虑水汽输送的方向, 则水平水汽通量的表达式如下:

$$A = \frac{1}{g} q \vec{V} \quad (1)$$

式中:  $q$  为比湿(单位: g/kg),  $\vec{V}$  为风速(单位: m/s),  $A$  为水汽通量(单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 风的方向即为水汽输送的方向[11] [12]。

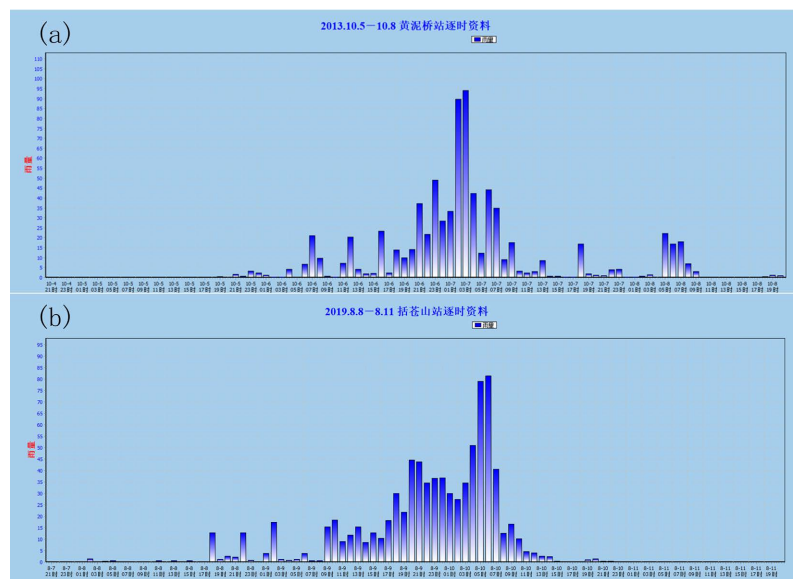
水汽通量散度是表示输送来的水汽集中程度的物理量。其含义是单位时间内每体积汇合进来或辐散出去的水汽质量[11]。则水汽通量散度的表达式如下:

$$A1 = \nabla \cdot \left( \frac{1}{g} q \vec{V} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{g} uq \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{g} vq \right) \quad (2)$$

式中:  $q$  为比湿(单位: g/kg),  $\vec{V}$  为风速(单位: m/s)。若  $A1 > 0$ , 则该区域水汽是减少的; 若  $A1 < 0$ , 则该区域水汽是增加的[11]。

### 3. “菲特”和“利奇马”概况和极端暴雨影响

1323 号台风“菲特”于 2013 年 10 月 7 日 1 时 15 分在福建省福鼎市沙埕镇沿海登陆, 是一个秋台风, 对我国造成了严重的影响尤其是浙江省。强降水带主要集中在浙江东部沿海和浙北地区, 中西部雨量相对较小。“菲特”暴雨过程可以分为两个阶段, 阶段一: 暴雨中心主要在浙江东部沿海地区, 暴雨主要由台风环流本身、倒槽及偏东气流共同影响, 阶段二: 暴雨中心主要在浙北地区, 主要由“菲特”残留低压和冷空气共同作用造成的。雨量最大的两个站点分别出现在象山黄泥桥和安吉天荒坪, 雨量分别达 788.7 mm (图 1(a))和 1056.4 mm。



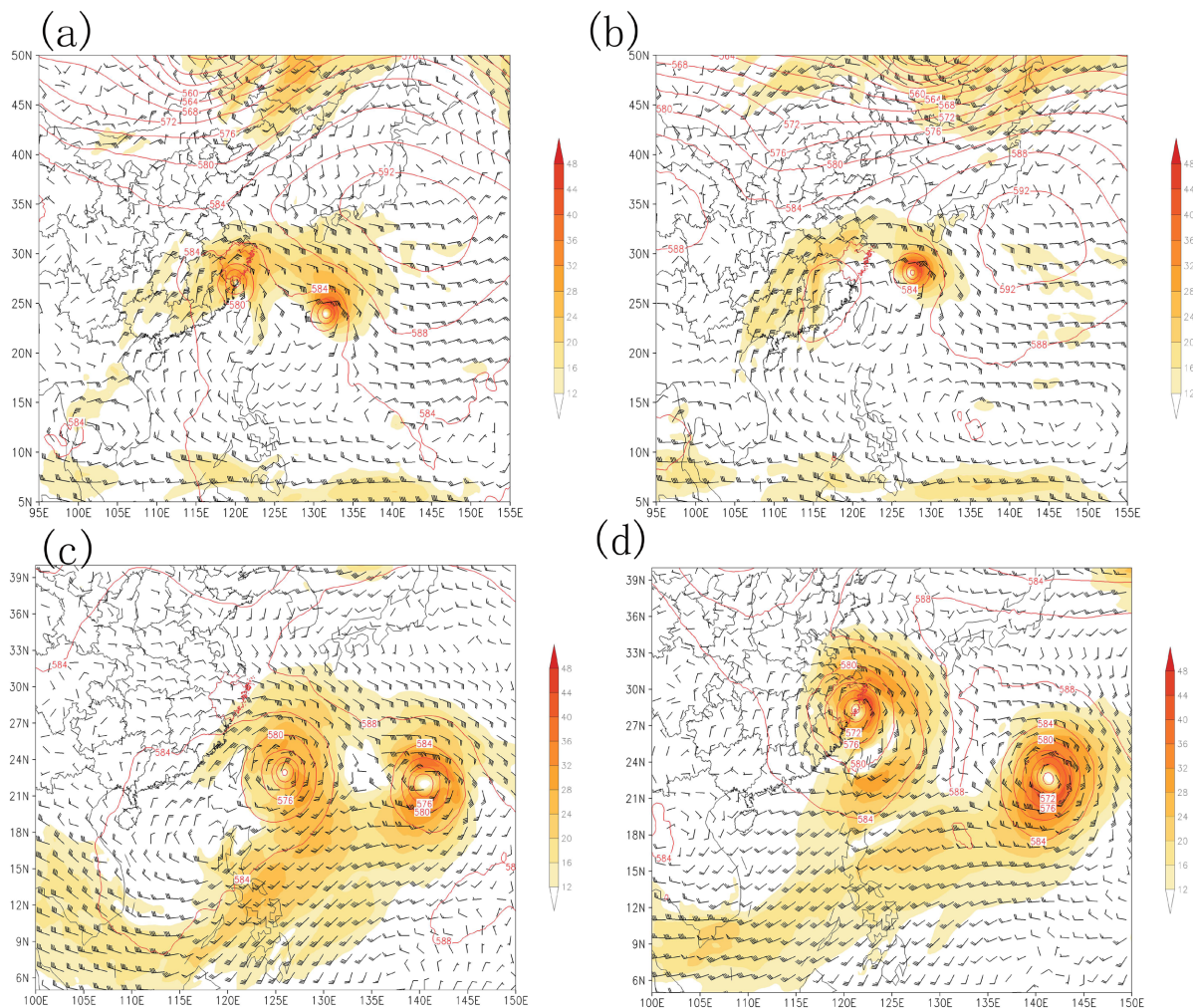
**Figure 1.** Hourly rainfall map of Huangniqiao Station from October 5th to 8th, 2013 (a) and hourly rainfall map of Kuocangshan Station from August 8th to 11th, 2019 (unit: mm) (b)

**图 1.** 2013 年 10 月 5 日~8 日黄泥桥站逐时雨量图(a)、2019 年 8 月 8 日~11 日括苍山站逐时雨量图(单位: mm) (b)

1909 号台风“利奇马”于 10 日 01 时 45 分在浙江省台州市温岭城南镇登陆，“利奇马”登陆后在浙江省移动较慢，中心环流在浙江省境内停留时间长达 20 h。受“利奇马”影响，浙江省普降大暴雨，东部沿海出现特大暴雨，局部出现极端降水。其中临海市括苍山站过程雨量达 833 mm (图 1(b))。

#### 4. 环流分析

2013 年 10 月 6 日 08 时，台风“丹娜丝”加强副高西伸，使其南侧偏东引导气流加强，致使台风“菲特”移速加快(图略)。7 日 02 时，“菲特”刚登陆，强度维持，西风槽槽线东移到 115°E，槽底位置在 35°N，此时弱冷空气还未影响。因此前期暴雨主要为台风本体、倒槽、偏东气流共同作用造成的暖性降水(图 2(a))，该阶段的降水主要发生在浙江省东部沿海地区。7 日 20 时(图 2(b))，西风槽槽底南压到了 32°N 左右，槽后西北气流向南输送冷空气，随着“丹娜丝”进一步北上，弱冷空气南下渗透与“菲特”残留云系及“丹娜丝”外围环流共同作用，造成浙北地区的暴雨。8 日 08 时随着“丹娜丝”北移并入西风槽中，浙江省降水趋于结束。



**Figure 2.** Overlaid 850 hPa wind field (wind vector, unit: m/s) at 500 hPa geopotential height (contour line, unit: gpm) on October 7, 2013 at 02:00 (a), October 7 at 20:00 (b), August 8, 2019 at 08:00 (c), and August 10, at 02:00 (d)

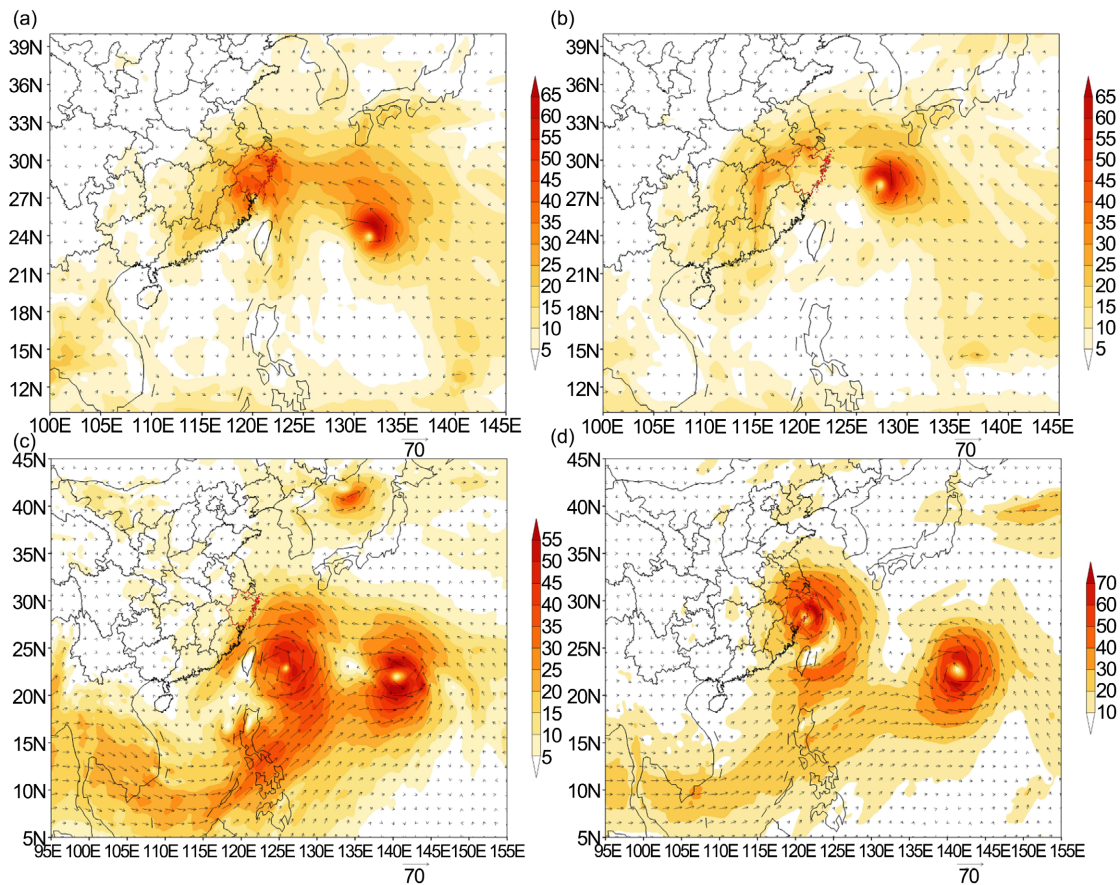
**图 2.** 2013 年 10 月 7 日 02 时(a)、10 月 7 日 20 时(b)、2019 年 8 月 8 日 08 时(c)、8 月 10 日 02 时 500 hPa 位势高度(等值线, 单位: gpm)叠加 850 hPa 风场(风矢, 单位: m/s)图

2019年8月8日08时,中纬度多短波槽活动,副热带高压西进受阻,主体位于西太平洋上,西伸点位于126°E附近,且10号台风“罗莎”位于“利奇马”东侧,“利奇马”在副高南侧东南气流引导下向西北方向移动。同时,“利奇马”南侧与西南气流相连,水汽源源不断向“利奇马”输送,使得台风得到发展(图2(c))。10日02时,“利奇马”登陆后,处于两高之间鞍型场中,引导气流偏弱,台风缓慢向西北移动,致使台风在浙江东部停留时间长,直接导致浙江东部地区特大暴雨(图2(d))。10日08时,西风槽西退,副热带高压西退,有利于“利奇马”北行,浙江省东部暴雨减弱。

## 5. 水汽分析

### 5.1. 水汽通量分析

大暴雨的形成需要源源不断的水汽输送。从水汽通量矢量图来看,台风“菲特”造成浙江省东部沿海暴雨阶段:水汽主要由“菲特”南侧的偏南风低空急流和东侧的偏东风低空急流从南海和西太平洋输送水汽,并且该阶段水汽输送以偏东急流输送为主,偏东急流的水汽输送达到30~40  $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3(a))。第二阶段:仅为“丹娜丝”外围的偏东风急流从西太平洋输送水汽(图3(b))。由此可见,整个暴雨过程的水汽来源主要表现为副高南侧的东风急流,并且这支东风急流在暴雨过程中始终维持,为浙江省大暴雨的发生发展提供极佳的水汽条件。



**Figure 3.** Moisture flux at 850 hPa on October 7, 2013 at 02:00 (a), October 7 at 20:00 (b), August 8, 2019 at 08:00 (c), and August 10 at 02:00 (unit:  $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ )

**图3.** 2013年10月7日02时(a)、10月7日20时(b)、2019年8月8日08时(c)、8月10日02时850 hPa水汽通量图(单位:  $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ )

“利奇马”期间存在及其优越的水汽输送条件。8日08时,850 hPa存在两条主要的水汽通道:一是“利奇马”南部来自孟加拉湾和南海的西南急流水汽输送,水汽通量大小为 $20\sim 35\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,二是“罗莎”与副高之间东风水汽输送,大小为 $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3(c))。台风登陆后,850 hPa东风急流水汽输送明显减弱,但“利奇马”南部水汽输送仍然维持在 $20\sim 40\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3(d))。因此,孟加拉湾和南海的西南急流水汽输送对“利奇马”的水汽维持起巨大作用,为大暴雨的长时间维持提供源源不断的水汽条件。

## 5.2. Hysplit 后向轨迹

从黄泥桥站的水汽质点后向96 h的追踪轨迹(图4(a))可知,暴雨区各层的水汽来源均来自太平洋的水汽输送,与“菲特”期间东风急流在整场台风暴雨过程中始终维持分析一致。

从括苍站的水汽质点后向96 h的追踪轨迹(图4(b))可知,暴雨区的水汽主要来自孟加拉湾和南海、还有就是太平洋的水汽输送。受天气系统和地形升高的影响,水汽质点高度不断上升,孟加拉湾和南海的水汽以对流层中层的高度输送到暴雨区。太平洋东路水汽以对流层低层的高度输送到暴雨区。后向轨迹追踪水汽来源的结果与水汽输送路径分析结论一致。

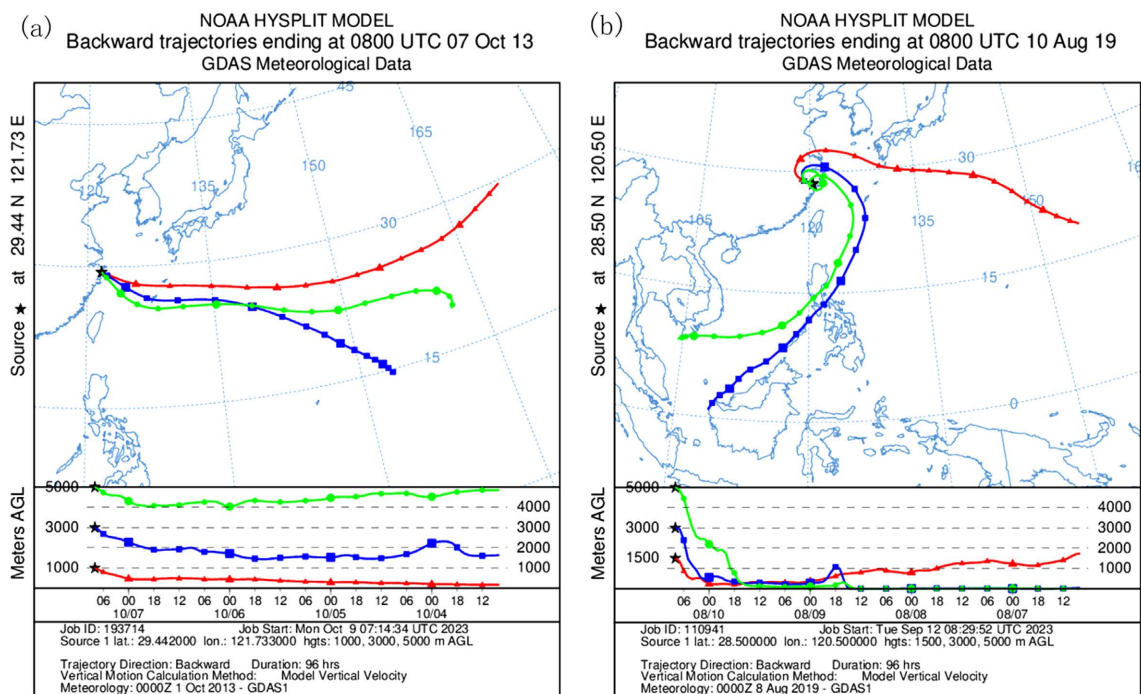
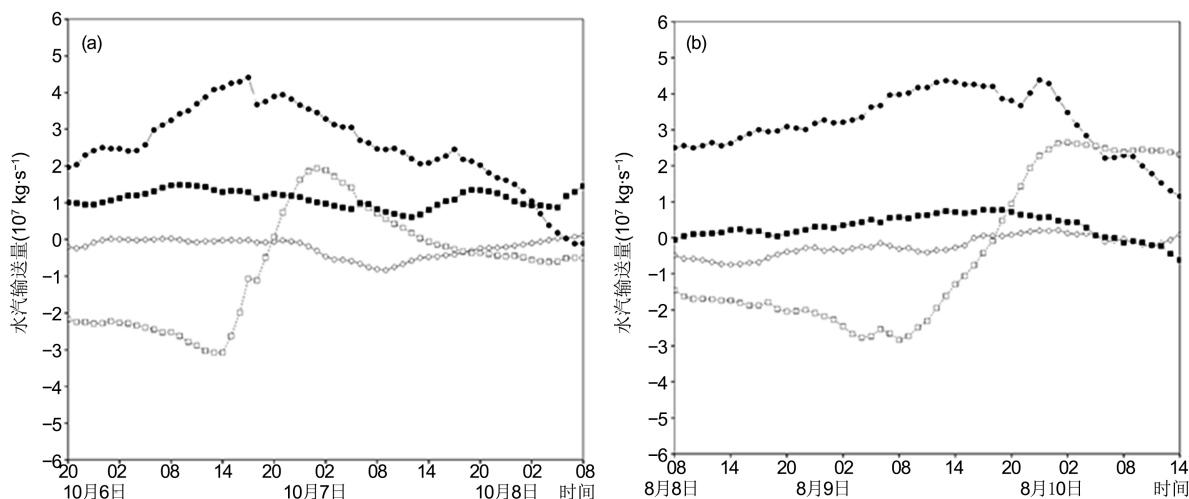


Figure 4. Hysplit backward 96 h trajectory at Huangniqiao Station (a) and Kuocangshan Station (b)

图4. 黄泥桥站(a)、括苍山站(b) hysplit 后向96 h 轨迹图

## 5.3. 四边界水汽通量分析

选取四边界为浙江省东部地区(经度:  $120^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 、纬度:  $27^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ ),暴雨区不同边界、不同层次的水汽输送量先由 ERA5 再分析资料计算各层各格点的水汽通量,再进行水平边界和垂直厚度积分,从而得到各边界的水汽输送量。通过边界向暴雨区有水汽输入时,水汽收支为正值,表示有净输入;反之有净输出。计算得出两次极端台风暴雨过程,得出东边界始终为水汽净输入(图5),由此可见东边界为两次过程浙江省东部地区极端台风暴雨主要水汽来源,水汽强净输入时段与暴雨发生时段基本相一致。



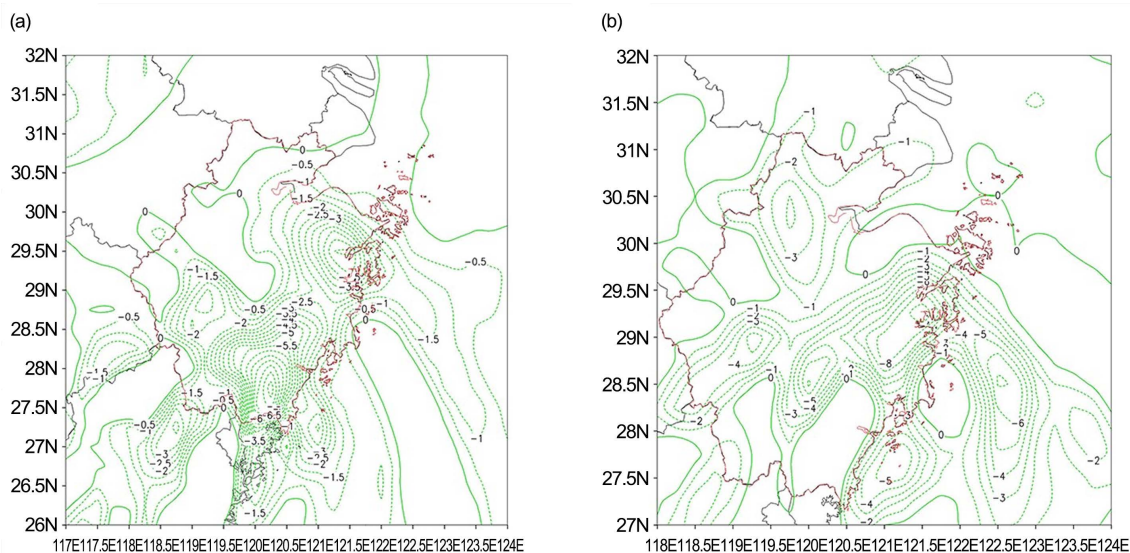
**Figure 5.** Fitow (a) and Lekima (b), water vapor transport at the four boundaries (the hollow circle represents the west boundary, the solid circle represents the east boundary, the hollow square represents the south boundary, and the solid square represents the north boundary)

**图 5.** 台风“菲特”(a)、台风“利奇马”(b)期间四边界水汽输送(空心圆为西边界; 实心圆为东边界; 空心正方形为南边界; 实心正方形为北边界)

### 5.4. 水汽通量散度

台风“菲特”暴雨第一阶段, 浙江省东部沿海基本都为水汽通量散度负值区, 且强负值中心位于浙江省东部(图 6(a)), 伴随第一阶段台风本体环流造成的降水过程结束, 水汽通量散度负值区转移到浙江省北部地区, 东部地区负值区变小。台风“利奇马”期间浙江省东部地区水汽通量散度长时间维持负值中心(图 6(b)), 08 时后, 随着“利奇马”登陆后北移, 浙江省东部地区负值中心变小。

水汽通量散度与暴雨发生时间吻合较好, 且水汽通量散度强负值中心出现与对应强暴雨发生有 2~3 小时提前量。因此得出水汽通量散度对极端台风暴雨的预报有很好指示作用。

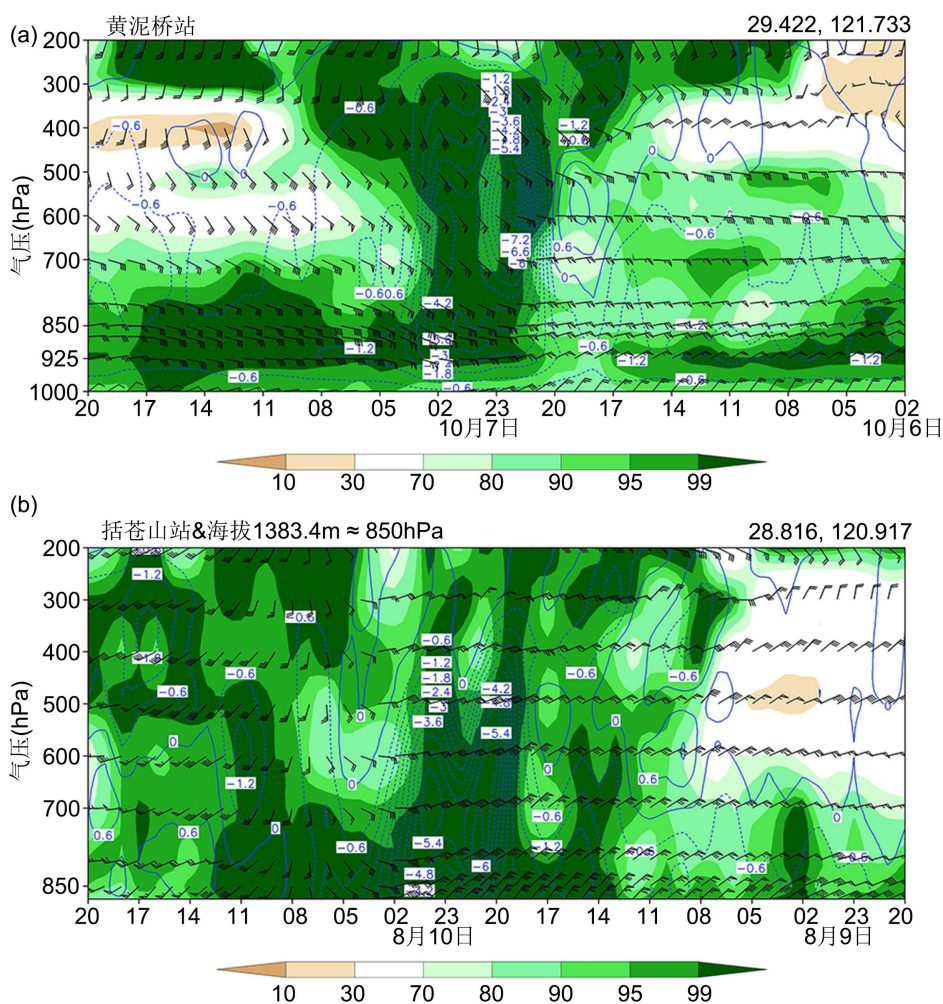


**Figure 6.** Moisture flux convergence chart (unit:  $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ) at 02:00 (a) on October 7, 2013 and 02:00 (b) on August 10, 2019)

**图 6.** 2013 年 10 月 7 日 02 时(a)、2019 年 8 月 10 日 02 时(b)水汽通量散度图(单位:  $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )

## 6. 单站时间序列剖面分析

分析象山黄泥桥站(台风“菲特”期间浙江省东部地区累计雨量最大站点)的物理量场时间序列剖面图(图 7(a))可知,台风“菲特”暴雨期间,该站点低层始终维持强劲的东风急流,为暴雨发生发展带来很好的水汽和动力条件。6日 20 时前,黄泥桥站湿层不深厚,水汽主要集中在中低层(500 hPa 以下),中低层也配合一定上升运动,实况显示该时段有降水,最大小时雨量集中在 10~20 mm/h。6日 20 时~7 日凌晨,随着台风“菲特”靠近和登陆前后,该站点低层东风急流强度明显增强,湿层变深厚,可见整层都为饱和区,并且 300 hPa 以下存在很强的上升运动区,最大上升运动达 $-7$  pa/s。该时段雨强也对应明显增强,小时雨强达到 90 mm/h 左右。



**Figure 7.** Time profile of hourly relative humidity (colored, unit: %), vertical velocity (contour, unit: pa/s), and wind field (wind vector, unit: m/s) at Huangniqiao Station from 02:00 to 20:00 on October 6, 2013 (a) and Kuocangshan Station from 20:00 to 20:00 on August 8, 2019 (b)

**图 7.** 黄泥桥站 2013 年 10 月 6 日 02 时~7 日 20 时(a)括苍山站 2019 年 8 月 8 日 20 时~10 日 20 时(b)逐小时相对湿度(填色, 单位: %)、垂直速度(等值线, 单位: pa/s)、风场(风矢, 单位: m/s)时间剖面图

分析临海括苍山站(台风“利奇马”期间累计雨量最大站点)的物理量场时间序列剖面图(图 7(b))可知,利奇马暴雨期间整层风向存在东北风向西南风的转变,主要暴雨时段对应东北风期间,风向转为西南风



后括苍山站雨量开始减小。强降水主要集中在 9 日夜间~10 日凌晨, 该段时间括苍山站湿层深厚, 并且中低层有强上升运动区, 最大上升运动达 $-5.4 \text{ pa/s}$ , 低层维持强劲的东北风急流, 垂直运动和水汽条件极佳, 该时段小时最大雨强达到  $80 \text{ mm/h}$  左右。伴随台风登陆后, 括苍山站风向的转变, 垂直速度变弱且近地面转为弱下沉运动, 该站雨量开始减小。由此可见风向的转变对迎风坡站点台风暴雨雨量后续的预报有一定的指示作用。

分析主要强降水站点的时间序列坡面图总结得出: 极端台风降水时段近地面往往稳定存在急流输送水汽, 并且降水增强伴随急流增强; 站点上空为整层饱和区, 水汽条件极佳; 中低层存在强垂直上升运动区, 配合动力条件好。另外方向的转变, 低层垂直速度的改变往往可以一定程度上指示降水的减弱。

## 7. 结论

本文通过对 2013 年 23 号台风“菲特”、2019 年 09 号台风“利奇马”引发浙江东部极端暴雨过程的水汽特征进行综合分析。得出以下主要结论:

(1) 浙江东部两次极端台风暴雨过程对应水汽通道的长时间稳定维持, 为暴雨发生发展提供源源不断的水汽条件。

(2) 造成浙江东部极端台风暴雨过程往往洋面上有多个台风相互作用, 多台风带来的水汽更为充沛, 今后在预报台风暴雨的过程中, 我们要更加密切关注多台风间水汽通道的建立和维持。

(3) Hysplit 三维轨迹能更直观立体反应水汽来源, 水汽来源与水汽输送路径分析结论基本一致。浙江省东部极端台风暴雨的水汽净输入边界往往为东边界。

(4) 暴雨发生前、发生时, 水汽通量散度强负中心与强暴雨区对应很好, 并且水汽通量散度负值中心的变化往往对应降水的减弱或暴雨带位置的变化。

(5) 极端台风降水时段近地面往往稳定存在急流输送水汽, 并且降水增强伴随急流增强; 站点上空为整层饱和区, 水汽条件极佳; 中低层存在强垂直上升运动区, 配合动力条件好。

## 基金项目

台州市气象局科研项目(TZ2022QN06)资助。

## 参考文献

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 456-462.
- [2] 李艳, 林曲凤, 等. 中纬度高空槽-台风相互作用对台风“利奇马”远距离暴雨的影响[J]. 气象科学, 2022, 42(1): 89-98.
- [3] 周福, 钱燕珍, 方艳莹, 等. “灿鸿”台风造成浙江东北部大暴雨成因分析[J]. 气象, 2016, 42(3): 305-313.
- [4] 段晶晶, 钱燕珍, 周福, 等. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J]. 气象, 2017, 43(6): 686-695.
- [5] 董美莹, 陈锋, 许雯, 等. 浙江省热带气旋倒槽暴雨气候特征研究[J]. 热带气象学报, 2017, 33(1): 84-92.
- [6] 曹晓岗, 王慧, 傅洁, 等. 近海北上热带气旋特征及对华东沿海地区影响分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 861-870.
- [7] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 91-98.
- [8] 郑铮, 潘灵杰, 钱燕珍, 等. 台风“利奇马”造成浙江沿海极端强降水的演变特征[J]. 干旱气象, 2021(2): 269-278.
- [9] 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 2022, 48(12): 1497-1511.
- [10] 谭震, 梁梅, 薛宇峰, 等. 1909 号超强台风“利奇马”强降水特征的诊断[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),

2020, 12(4): 450-459.

- [11] 尚可政, 程一帆, 李旭, 等. 天气诊断分析与数值预报产品释用[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 83-85.
- [12] 顾雨亭, 严小杰, 许东蓓, 等. 山地机场一次平流雾天气演变特征及成因分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(1): 71-80.