

周冠博,柳龙生,李兴宇,2023.水汽通量散度分解在一次台风暴雨中的应用[J].气象,49(6):671-681. Zhou G B, Liu L S, Li X Y, 2023. Decomposition of water vapor flux divergence and its application to a rainstorm caused by typhoon[J]. Meteor Mon, 49 (6):671-681(in Chinese).

水汽通量散度分解在一次台风暴雨中的应用*

周冠博^{1,2} 柳龙生¹ 李兴宇³

1 国家气象中心,北京 100081

2 海南省南海气象防灾减灾重点实验室,海南 570203

3 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

提 要: 作为表征异常降水的一个重要参数,水汽通量散度(Q_v)根据亥姆霍兹定理被分解为三个分量,即旋转风引起的水汽平流(Q_r)、辐散风引起的水汽平流(Q_d)和气流辐合辐散造成的水汽通量散度(Q_{div})。以 2018 年 18 号台风温比亚造成的河南商丘和江苏徐州的强降水为例,分析了水汽通量散度分解后的三个分量的时空演变。结果表明: Q_v 仅能得到水汽聚集的情况,分解之后的分量可以更清楚地了解不同的降水时段内具体是哪些项起到了主导因素。总的 Q_v 贡献主要来自于 Q_{div} , 而降水的增强一般与 Q_r 的正贡献对应较好,降水的减小往往是由于 Q_d 的抑制作用引起的,未来将应用这种水汽通量散度分解方法有效改进台风降水落区的诊断和分析。

关键词: 水汽通量散度,气流分解,台风暴雨

中图分类号: P433.P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.030801

Decomposition of Water Vapor Flux Divergence and Its Application to a Rainstorm Caused by Typhoon

ZHOU Guanbo^{1,2} LIU Longsheng¹ LI Xingyu³

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Hainan 570203

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: As an important parameter in representing precipitation anomalies, water vapor flux divergence (Q_v) is decomposed into three components based on the Helmholtz theorem, i. e., flow convergence caused by rotating winds (Q_r), moisture advections by divergent winds (Q_d) and water vapor flux divergence by large-scale airflow convergence and divergence (Q_{div}). Taking the severe rainfall event caused by Typhoon Rumbia (No. 18) in 2018 as an example, this paper analyzes the temporal evolutions and spatial distributions of the three components from the perspective of water vapor flux divergence and its three decomposed components. The results show that Q_v only indicates water vapor accumulations, while the decomposed components can better represent their individual leading roles at different precipitating stages. The value of Q_v mainly originates from Q_{div} , while the positive contribution of Q_r caused by the rotational wind component is better when heavy precipitation occurs. The decrease in precipitation is often caused by the inhibition effect of Q_d caused by the divergent wind component. Further applications of this decomposition

* 国家重点研发计划(2022YFC3004200)、海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金项目(SCSF202201)和国家自然科学基金项目(41405049)共同资助

2022 年 3 月 14 日收稿; 2023 年 3 月 3 日收修定稿

第一作者:周冠博,主要从事热带气旋预报及研究工作. E-mail: zhougb@cma.gov.cn

technique of water vapor flux divergence will potentially improve the diagnosis and prediction of typhoon rainstorms in the future.

Key words: water vapor flux divergence, flow decomposition, typhoon rainstorm

引 言

强烈的热带气旋(TC)通常会带来狂风、暴雨和风暴潮,并在登陆时给沿海地区造成巨大的损失。而一些弱的登陆 TC 及其残余物在向内陆移动后,也会带来大范围的暴雨,造成意想不到的破坏性损失(陈联寿和丁一汇,1979; Jones et al, 2003; Meng and Wang, 2016a; 2016b; 任丽等, 2013; 周冠博等, 2022)。例如,引人注目的河南“75·8”的洪灾灾害,正是减弱后的热带风暴尼娜(1975年)的残余环流造成的。“尼娜”在我国东南地区以热带风暴级登陆,但当它向内陆移动时,却带来了强烈的暴雨和山洪,导致水库崩溃和致命的灾难(陈联寿和丁一汇, 1979)。2018年8月17日台风温比亚登陆时也只是一个热带风暴,它在内陆地区持续了大约4d,并在我国东部和中部的内陆地区造成了破纪录的极端降雨(高栓柱, 2020)。因此,对弱热带风暴登陆后的强降雨的研究是值得关注的,并对防灾减灾尤为重要。

然而,准确预测登陆 TC 所引起的降水分布一直是一个巨大的挑战。困难主要来自于对 TC 降水机制的理解不充分和物理学模型不清晰。研究表明,与登陆的 TC 相关的降水是由复杂的多尺度相互作用控制的,并表现出高度的不对称分布性。其中水汽供应是台风降水的必要条件,异常降水与水汽供应直接相关。有关水汽输送在台风暴雨中的应用, Ding(1994)、黄荣辉等(1998)、李英等(2004)、丛春华等(2011; 2016)、陈有利等(2018)、梁军等(2019)和 Wang and Wang(2021)等做了很多的研究。另外,多尺度系统相互作用导致极端降水的机制研究也取得了很多的进展。比如副热带西风急流及其强迫次级环流是一个重要的大尺度系统(张家宝和邓子风, 1987)。然而由于复杂地形、模式误差、不同尺度的天气系统相互作用和快速演变的中尺度系统等等,使得台风暴雨的预报依然十分困难,精细化的暴雨落区也很难被预测。

客观分析和滤波结合起来的诊断分析方法是尺度分离最常用的有效技术之一。对于天气到气候分

析,统计工具通过在时间或空间上求平均值来获得平均流和瞬态分量(Zhou and Yu, 2005; Yuan et al, 2020)。在梅雨锋日降水研究中,采用 Barnes(1964)滤波器从总流量中提取天气或地转分量(Xu et al, 2017; Xue et al, 2018)。对于天气学研究,尺度分离理论首先源于 Hoskins et al(1985)的位涡概念,具有坚实的物理意义,并广泛引用到大尺度的准地转运动中。然而,对于中尺度问题,准地转近似不再适用,数学求解高阶近似的平衡模型的困难限制了它在预报应用中的适用性和普及性。亥姆霍兹定理将风分成旋转和发散分量(Hawkins and Rosenthal, 1965),旋转分量描述大尺度运动,与位势直接相关,而辐散分量描述非地转运动或次天气运动,与引起降水等强对流的垂直运动关联。它已被广泛用于大气和海洋环流(Fu et al, 2017; You and Fung, 2019; Han and Huang, 2020; Ullah et al, 2021a; 2021b)和数据同化(Hollingsworth and Lönnberg, 1986; Daley, 1991; Parrish and Derber, 1992; Xu et al, 2006; 2007)。国内外已经有不少相关工作将风场分解为无旋风和无辐散风并应用于气象研究当中, Xu et al(2011)通过最小化区域积分原始和重建水平风场的动能之差,建立了求解任意形状有限区域内流函数和速度势的高精度方法。周玉淑等(2008)在对台风 Saomei 的研究中认为,相对于原始风场,调和余弦方法分解得到的台风风场结构可以展现出更加清晰的细节,有着重要的应用前景。周玉淑和曹洁(2010)用 Chen and Kuo(1992)提出的调和余弦谱展开法对一次华北暴雨过程进行了诊断分析,发现利用正弦/余弦调和函数都能较好地分解和重现有限区域的风场,但调和余弦方法精度更高、收敛更快。邓涤菲等(2012)进一步把该方法应用到动能分解中,配合水汽通量矢量研究一次东北冷涡暴雨发展过程中不同分量动能收支与降水变化的关系。任晨平等(2013)比较分析了有限区域流函数和速度势的三种求解方法在台风 Bilis 暴雨增幅中的作用。而 Dimego and Bosart(1982)对水汽通量分量进行了划分,以检验在不考虑地形影响的情况下热带风暴中水汽汇聚收支的相对重要性。

本文采用亥姆霍兹定理,将水汽通量散度进行

分解,利用分解后的水汽通量散度来分析它们在 2018 年台风温比亚影响下暴雨过程中的相对重要性和影响。从水汽通量散度及其分解后的三个变量(大尺度运动输送的水汽平流 Q_r 、中小尺度运动输送的水汽平流 Q_d 和气流辐合辐散造成的水汽通量散度 Q_{div})的变化方面着手,分析“温比亚”在河南商丘和江苏徐州引起的强降水的变化原因。通过与总的水汽通量散度的比较,研究分解后的水汽通量散度的各个分量与强降水落区及演变之间的关系。

1 资料与方法

1.1 资料

本文采用中央气象台业务中发布的台风路径、强度及中心风雨等实况资料。环境场分析采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-Interim 逐 6 h 再分析数据(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)。用 HYSPLIT 轨迹模式对此次降水过程进行后向水汽追踪,使用的是 NCEP GDAS 全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的数据。运用天气学诊断分析方法,针对台风温比亚强降水变化的不同时段,从水汽通量散度及其分解后的三个变量的变化方面着手,分析台风温比亚在河南商丘和江苏徐州引起的强降水的演变原因。

1.2 水汽通量散度的分解方法

根据亥姆霍兹定理,水平速度场 \mathbf{v} 可以被分成分别由流函数 ψ 和速度势 χ 表示的旋转和辐散分量,如下所示:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_d \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{k} \times \nabla \psi \quad (2a)$$

$$\mathbf{v}_d = \nabla \chi \quad (2b)$$

式中: \mathbf{k} 是垂直方向上的单位向量, ∇ 是梯度算子。对于有限的域 D ,以下关系成立:

$$\nabla^2 \psi = \zeta \quad \text{in } D \quad (3a)$$

$$\nabla^2 \chi = \alpha \quad \text{in } D \quad (3b)$$

$$\partial_n \psi + \partial_s \chi = v_s \quad \text{along } \partial D \quad (4a)$$

$$\partial_n \chi - \partial_s \psi = v_n \quad \text{along } \partial D \quad (4b)$$

式中: ζ 和 α 分别是涡度和散度。 ∂D 表示区域 D 的边界。 v_s 和 v_n 是沿 ∂D 的边界切向速度和边界法向速度。

在计算两个泊松方程(3)之前,传统方法使用的是超张弛迭代方案(Sangster, 1960)用于求解 ψ 和

χ ,主要原理是将上述边界条件中的 ψ 或 χ 设置为沿 ∂D 的任意值。以 ψ 为例,式(3a)首先可以通过沿 ∂D 规定任意值 ψ 而解出,用计算得到的全区域的 ψ 可以得到它沿 ∂D 的正态导数 $\partial_n \psi$ 。 $\partial_s \chi$ 的边界值同样可以由式(4a)得到。 $\partial_s \chi$ 沿 ∂D 的积分可以导出方程导致式(3b)的 Dirichlet 条件。这种数值方法的优势在于它对于具有任意空间变化边界值的流函数的计算效率和适用性,因此通常用于大气和海洋分析以及数值模拟。

利用式(1)水汽通量散度可以写为:

$$\nabla \cdot (q\mathbf{v}) = q\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v}_r \cdot \nabla q + \mathbf{v}_d \cdot \nabla q \quad (5)$$

由式(5)可知,水汽通量散度 Q_v 即 $\nabla \cdot (q\mathbf{v})$ 可以被分解为三个分量,分别是大尺度运动输送的水汽平流 Q_r 即 $\mathbf{v}_r \cdot \nabla q$,中小尺度运动输送的水汽平流 Q_d 即 $\mathbf{v}_d \cdot \nabla q$ 和气流辐合辐散造成的水汽通量散度 Q_{div} 即 $q\nabla \cdot \mathbf{v}$ 。利用上式可以分析不同尺度系统对局地水汽快速集中或发散的影响,在接下来的内容中将分别评估水汽通量散度及其分解后的分量在 2018 年台风温比亚降水过程中的贡献,以了解它们在不同时期对降水的相对重要性。

2 台风温比亚降水及其水汽贡献分析

台风温比亚于 2018 年 8 月 15 日生成,17 日 04 时(北京时)前后在上海浦东新区南部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力达 9 级($23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,热带风暴级),18 日下午在河南境内减弱为热带低压,20 日凌晨在山东北部变性为温带气旋,之后进入渤海,20 日夜间在黄海北部海面进一步减弱,21 日 02 时中央气象台对其停止编号(图 1a)。

受台风温比亚影响,浙沪苏皖豫鲁辽等地出现了强降雨和大风,最大累计降雨量超过 500 mm。16—21 日,受“温比亚”影响,浙江北部、上海、江苏、安徽、河南、山东以及辽宁东部、吉林东南部等地出现暴雨或大暴雨,河南东部、苏皖北部、山东中西部及辽宁大连等地出现特大暴雨;河南商丘和周口、山东济宁、泰安、淄博、临沂、潍坊、东营,以及安徽宿州和淮北、江苏徐州、辽宁大连等地累计降雨量为 300~480 mm,河南商丘柘城最大降雨量达 554 mm;江苏徐州的最大降雨量达 534 mm(图 1b)。另外,18 日傍晚江苏徐州铜山区三堡镇出现两次龙卷风。

用 HYSPLIT 轨迹模式对此次降水过程进行后向水汽追踪(图 2a),首先来自西南季风的暖湿气流

一直源源不断为“温比亚”输送水汽,另外在“温比亚”的东侧同时存在另外一个台风苏力,它为“温比亚”东侧的水汽输送起到了助力的作用(图 2b),随着“温比亚”从近岸到登陆的过程也是“温比亚”北侧低层偏东风输送逐渐增强的过程。从四个方位的水

汽输送贡献来看(图 2c),河南商丘出现降水极值的时刻,水汽输送来源主要是来自东侧和南侧,“温比亚”登陆之后,低层有来自东海的水汽输送至台风中心的北侧,其环流内水汽通量呈现出不对称分布,水汽输送集中在台风路径的右前方(图略)。由此可

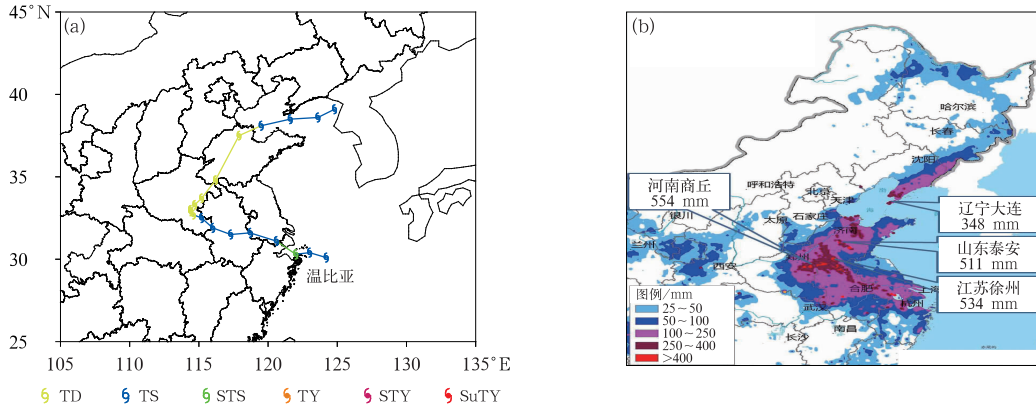


图 1 2018 年(a)第 18 号台风温比亚全路径图,(b)8 月 16—21 日过程降雨量

Fig.1 (a) The whole path map of Typhoon Rumbia and (b) process rainfall during 16—21 August 2018

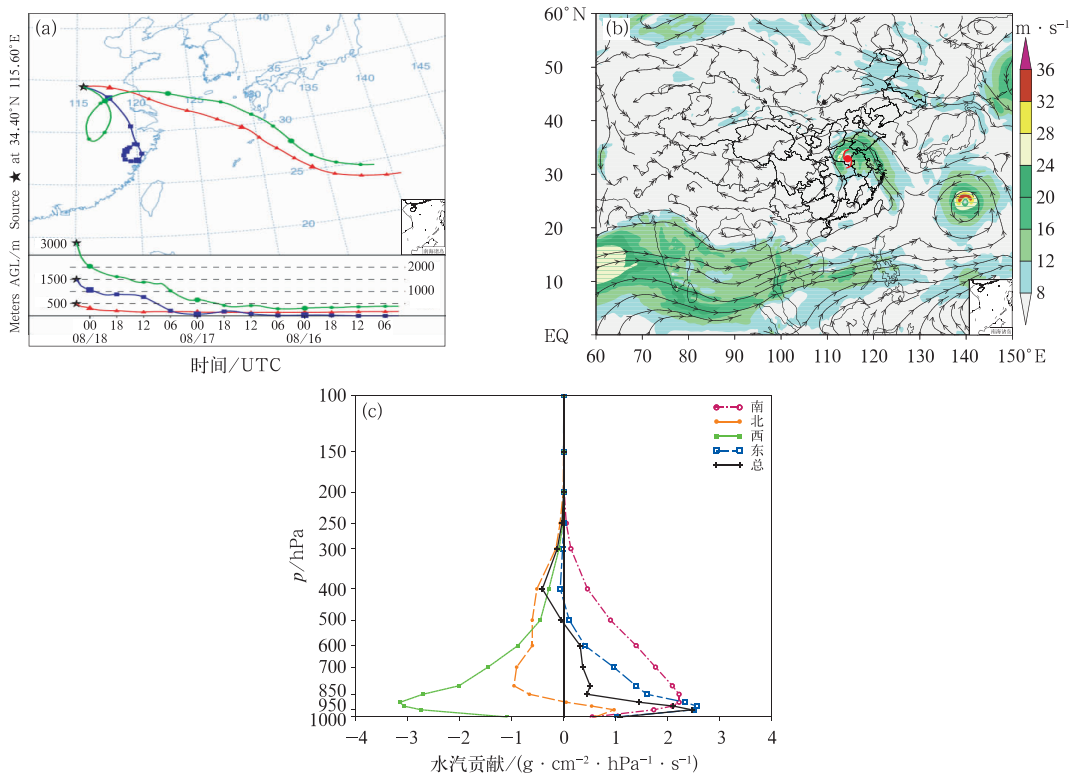


图 2 2018 年 8 月(a)18 日 11 时(世界时)的 HYSPLIT 轨迹模式后向水汽追踪,(b)20 时 850 hPa 流场,(c)11 时对商丘站东南西北四个方位水汽贡献的大小

Fig.2 (a) Backward water vapor tracking ending at 11 UTC by NOAA HYSPLIT model, (b) 850 hPa stream at 20 UTC, and (c) contribution of water vapor to Shangqiu Station in east, south, west, north directions at 11 UTC 18 August 2018

见,水汽供应是“温比亚”强度一直维持的必要条件。

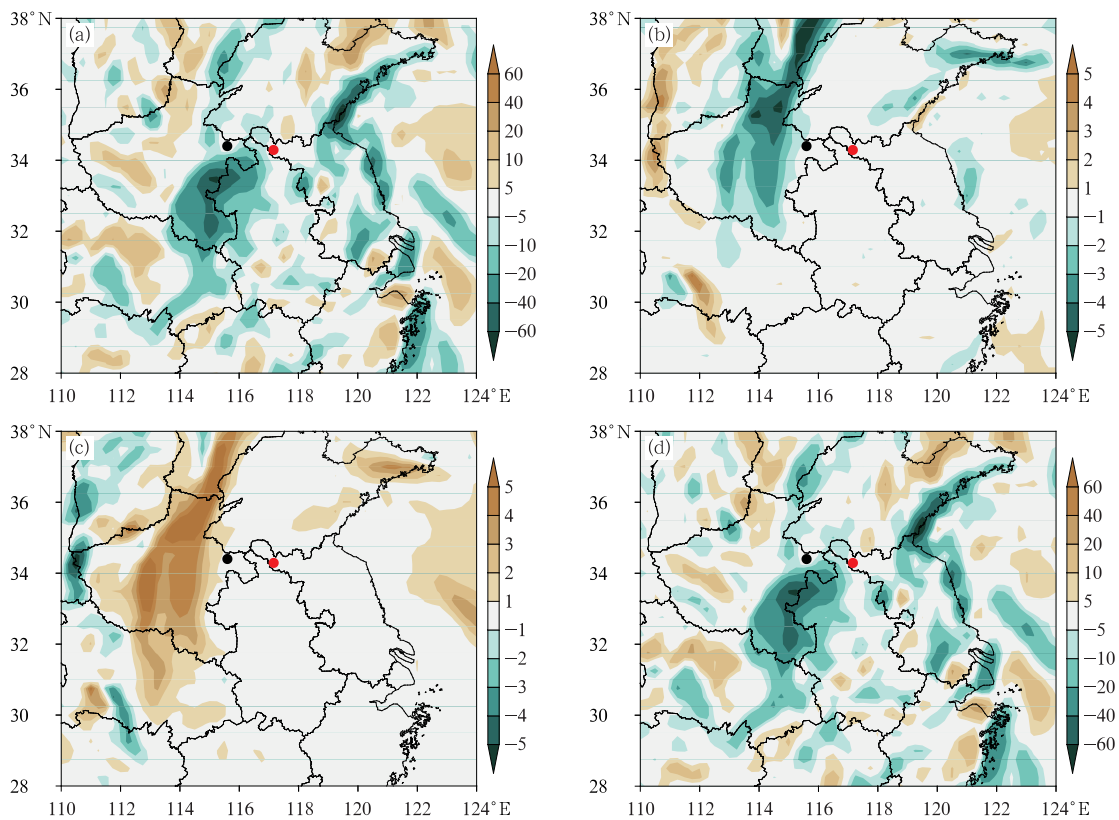
3 水汽通量散度及各个分量的分析

分别选取过程雨量最大的河南商丘站(554 mm)和江苏徐州站(534 mm)作对比,分析水汽通量散度及其三个分解后分量的时间演变情况,详细分析造成河南商丘和江苏徐州极端暴雨的水汽聚集的主要原因。

从 2018 年 8 月 18 日 03 时(世界时,下同)垂直积分的水汽通量散度(Q_v)、旋转风引起的水汽平流(Q_r)、辐散风引起的水汽平流(Q_d)和气流辐合辐散造成的水汽通量散度(Q_{div})的水平分布(图 3)可以看到, Q_v 的水平分布与 Q_{div} 的分布基本一致,说明总的水汽通量散度主要来自于气流辐合辐散造成的水汽通量散度的贡献,而 Q_r 的量级较小,但是也是负

值,有利于水汽的输送,对于总的水汽输送起到的是正的贡献,而 Q_d 的量级也较小,但主要以正值为,不利于水汽的输送,对于总的水汽输送起到的是负贡献,不利于降水的发展。

综上所述, Q_r 和 Q_d 分别体现了天气尺度和中小尺度运动输送的水汽平流作用。对于风场分解后,旋转风主要负责台风的动力系统,而辐散风主要负责水汽的输送和聚集。另外,旋转风和辐散风引起的水汽平流代表水汽输送情况,而散度项代表的是水汽局地集中的情况。虽然 Q_{div} 量级很大,但主要体现的是风场的辐合辐散信号,而另外两个分量 Q_r 和 Q_d 体现的是风场和湿度场配合的信号,通常 V_d (辐散风)本身值很小,所以 Q_d 的量值很小,但它的强弱变化,却能反映中小尺度系统对水汽通量散度的正负贡献,因而有必要从 Q_v 中分离出来诊断分析。



注:黑点代表商丘站,红点代表徐州站。

图 3 2018 年 8 月 18 日 03 时垂直积分的(a)水汽通量散度(Q_v), (b)旋转风引起的水汽平流(Q_r), (c)辐散风引起的水汽平流(Q_d)和(d)气流辐合辐散造成的水汽通量散度(Q_{div})

的水平分布(单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Horizontal distribution diagrams of (a) Q_v , (b) Q_r , (c) Q_d , (d) Q_{div} at 03 UTC 18 August 2018 (unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

从 2018 年 8 月 18 日 03 时过商丘站的 Q_v 、 Q_r 、 Q_d 和 Q_{div} 的垂直剖面(图 4a)可以看出,商丘站的水汽输送主要位于 600 hPa 以下,尤其是 800 hPa 以下的 Q_{div} 达到了 $-20 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, Q_v 与 Q_{div} 的量级相当,而低层的 Q_r 和 Q_d 的数值较小,其中 Q_r 以正贡献为主, Q_d 以负贡献为主。

从 2018 年 8 月 18 日 12 时过徐州站的垂直剖面图(图 4b)可以看出,徐州站的水汽输送主要位于中层 500 hPa 左右,在 800 hPa 和 950 hPa 还有两个水汽辐合的大值中心(水汽通量散度负的大值区), Q_v 与 Q_{div} 的量级相当,这可能与 18 日傍晚江苏徐州铜山区三堡镇出现了两次龙卷风相对应。而低层的 Q_r 和 Q_d 的数值较小,且均以负贡献为主,其中 Q_r 的负贡献更大,对于强降水的发生起到了抑制作用。

从逐小时的累计降雨量时序图(图 5),可以看到河南商丘站在 8 月 18 日 08—18 时的降水量一直

较大,最大值出现在 18 日 11 时,而江苏徐州站的降水则是从 18 日 18 时之后开始逐渐增大,最大值出现在 18 日 20 时,河南商丘站的降水则从 18 日 18 时之后开始明显减小。从华北雷达拼图(图 6)也可以看到,大的降水区有一个明显的从河南商丘附近移至江苏徐州附近的过程。

由河南商丘站的 Q_v 、 Q_r 、 Q_d 和 Q_{div} 的时间-高度剖面(图 7)可见, Q_r 在 18 日 00—10 时的中低层的蓝色框内一直是负值,表示水汽通量散度为负,有利于强降水的产生;而 Q_d 从 18 日 07 时开始在中低层的红色框内开始出现正值,表示水汽通量散度为正,不利于降水的产生。同时, Q_r 从 18 日 09 时开始,中高层出现了正值中心,并随时间的推移逐渐向下层传播,由图 5a 可知,18 日 00—10 时的降水量大,与 Q_r 对应较好;18 日 10 时之后降水量减小,与 Q_d 的不利作用及 Q_r 的中高层出现正值中心的不利因素对应得较好; Q_v 和 Q_{div} 的低层演变基本为负值,

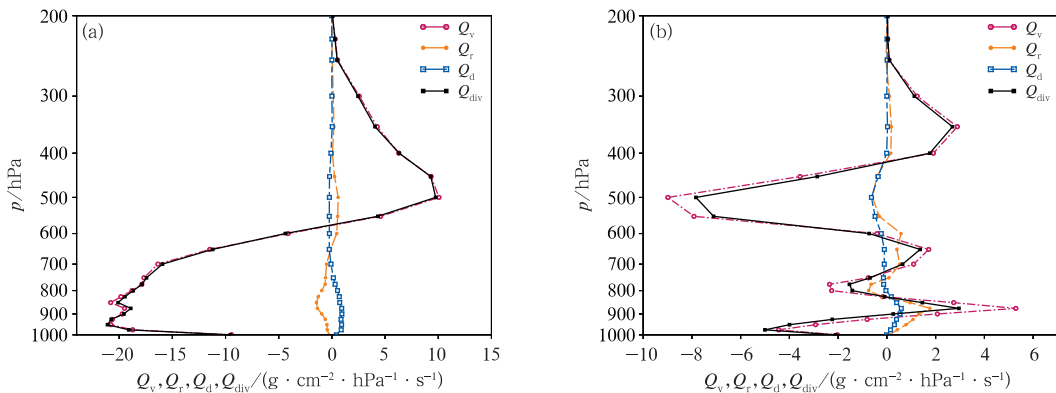
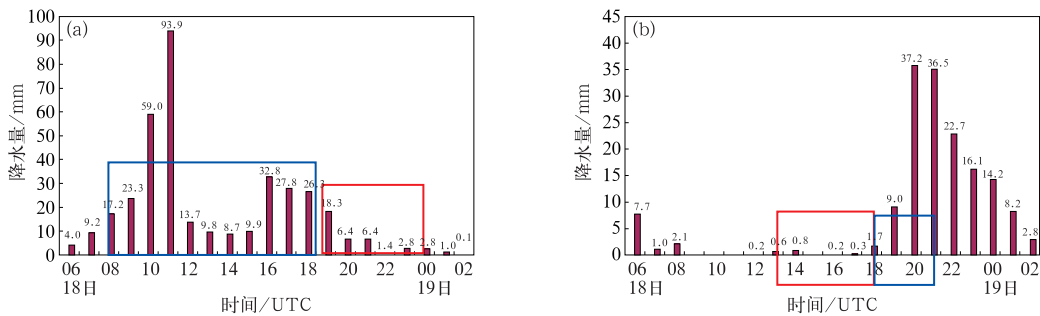


图 4 2018 年 8 月 18 日 Q_v 、 Q_r 、 Q_d 和 Q_{div} (a)03 时过商丘站, (b)12 时过徐州站的垂直剖面
Fig. 4 Vertical profiles of Q_v , Q_r , Q_d and Q_{div} passing through (a) Shangqiu Station at 03 UTC and (b) Xuzhou Station at 12 UTC 18 August 2018



注:蓝框代表降水较多的时段,红框代表降水较少的时段,下同。
图 5 2018 年 8 月 18 日 06 时至 19 日 02 时的 1 h 观测降水时序图
(a)商丘站, (b)徐州站

Fig. 5 Time series of observed 1 h precipitation from 06 UTC 18 to 02 UTC 19 August 2018
(a) Shangqiu Station, (b) Xuzhou Station

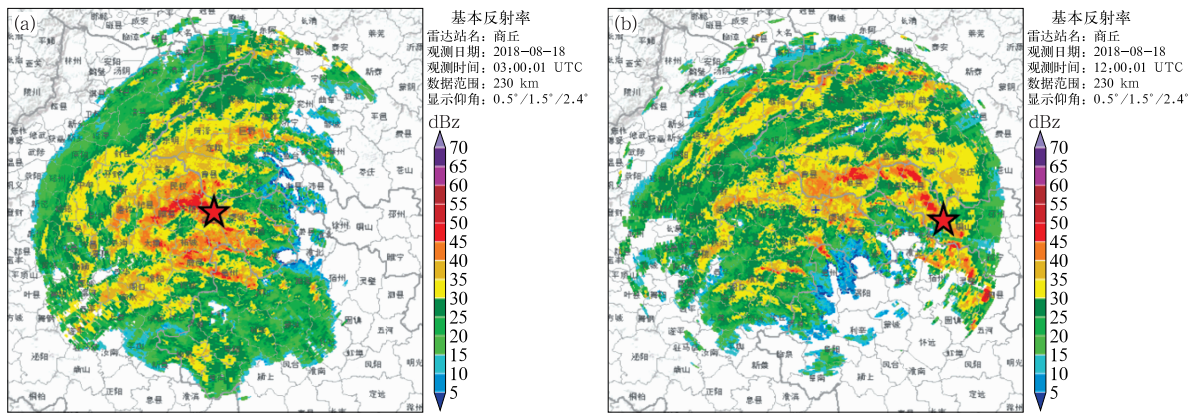


图 6 2018 年 8 月 18 日(a)03 时(星号:商丘站), (b)12 时(星号:徐州站)的商丘站雷达拼图
 Fig. 6 Radar mosaic of Shangqiu Station at (a) 03 UTC (star; Shangqiu Station),
 (b) 12 UTC (star; Xuzhou Station) 18 August 2018

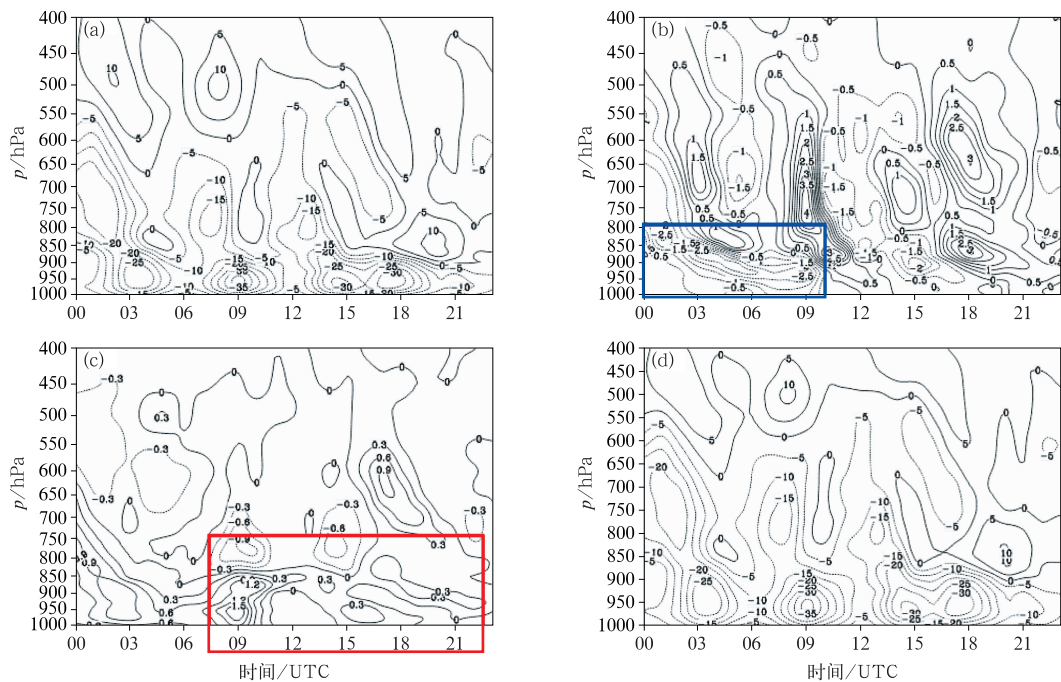


图 7 2018 年 8 月 18 日商丘站(a) Q_v , (b) Q_r , (c) Q_d 和 (d) Q_{div} 的时间-高度剖面(单位: $g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)
 Fig. 7 Time-height profile diagrams of (a) Q_v , (b) Q_r , (c) Q_d and (d) Q_{div}
 (unit: $g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) at Shangqiu Station on 18 August 2018

整体的水汽输送条件有利于强降水的发生,同时在 18 日 03 时和 09 时前后中低层(850~600 hPa)表现为明显的辐合中心,与前期的降水大值中心对应较好。

由此可见,在商丘站降水的大值时段, Q_v 和 Q_{div} 的低层一直为负值,并且在商丘降水极值出现的时刻前后,其中低层表现为明显的辐合中心,有利于强降水的发生。而商丘站降水量的减小,主要是与

Q_r 的中高层正值中心以及 Q_d 的不利作用有关。

由江苏徐州站 Q_v 、 Q_r 、 Q_d 和 Q_{div} 的时间-高度剖面(图 8)可见, Q_r 在 18 日 12—18 时的中低层的蓝色框内出现了明显的负值大值中心,表示水汽通量散度为负,有利于强降水的产生;而 Q_d 从 00—12 时在中低层的红色框内一直维持正值,表示水汽通量散度为正,不利于降水的产生。由图 5b 可知,18 日 12—18 时降水量大,与 Q_r 的水汽输送对应较好;

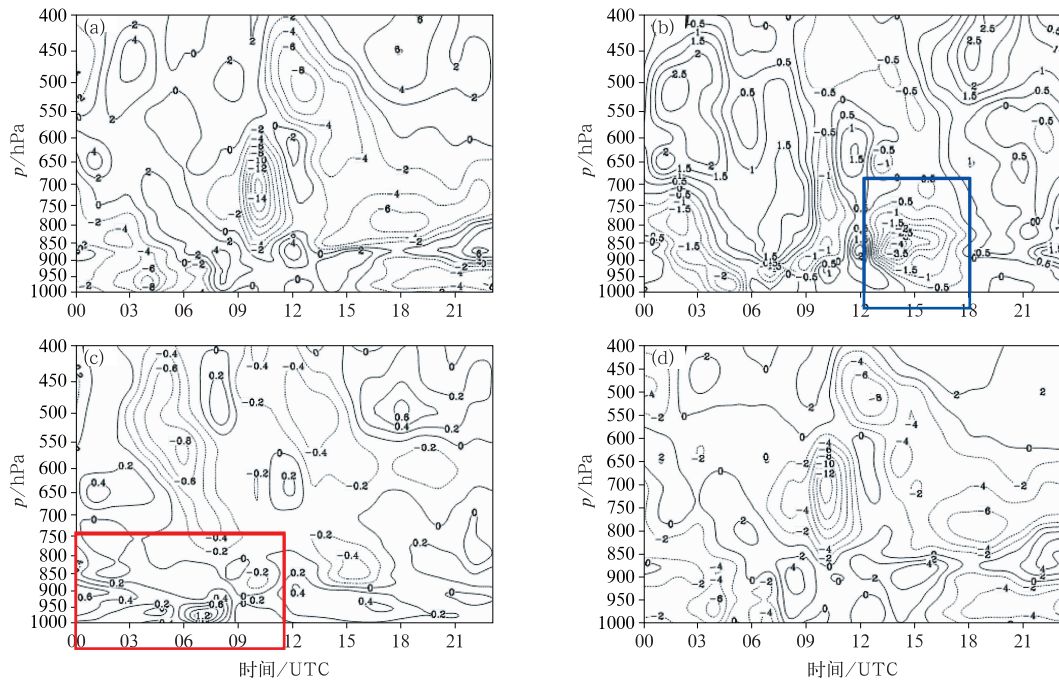


图 8 2018 年 8 月 18 日徐州站 (a) Q_v , (b) Q_r , (c) Q_d , (d) Q_{div} 的

时间-高度剖面(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Time-height profile diagrams of (a) Q_v , (b) Q_r , (c) Q_d and (d) Q_{div} (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at Xuzhou Station on 18 August 2018

18 日 12 时之前降水量一直偏小,与 Q_d 的不利作用对应较好; Q_v 和 Q_{div} 的低层演变从 08 时之后一直维持正值,但是在 10 时前后中低层(850~600 hPa)表现为明显的辐合,可能导致辐合上升运动增加从而有利于降水发展。

从徐州站的情况可以得到结论: Q_v 和 Q_{div} 的低层演变在强降水发生时一直维持正值,但是在中低层表现为明显的辐合,可能导致辐合上升运动增加从而不利于降水发展,分解之后的 Q_r 、 Q_d 可能与降水的增强和减弱有着更好的对应关系。由此可见,徐州站强降水的发生,是由于 Q_r 的正贡献以及辐合上升运动增加而有利于降水的发生发展。

4 结论与讨论

本文采用中央气象台业务发布的台风路径、强度及中心风雨等实况资料,运用天气学诊断分析方法,针对台风强度变化不同时段,从水汽通量散度及其分解后三个变量的变化方面着手,分析台风温比亚在河南商丘和江苏徐州引起的强降水的变化原因,并总结和归纳了这些原因的异同点(表 1),得到以下结论:

(1)总的水汽通量散度(Q_v)的贡献主要来自于气流辐合辐散造成的水汽通量散度项(Q_{div}),而降水的增强一般与旋转风引起的水汽平流(Q_r)的正贡献对应较好,降水的减小往往是由于辐散风引起的水汽平流(Q_d)的负贡献引起的。

(2)河南商丘站在 8 月 18 日 11 时降水量最大,与 Q_r 以及 Q_v 和 Q_{div} 引起的中低层(850~600 hPa)明显辐合中心对应较好;而 18 时之后河南商丘站降水量明显减小,与 Q_d 的不利作用以及 Q_r 造成的中高层的不利作用关系密切。

(3)江苏徐州站在 8 月 18 日 20 时降水量最大,与 Q_v 和 Q_{div} 引起的辐合上升运动增加以及 Q_r 的水汽输送对应较好;而 20 时之前徐州站的降水量一直偏小,与 Q_d 的不利作用对应较好。

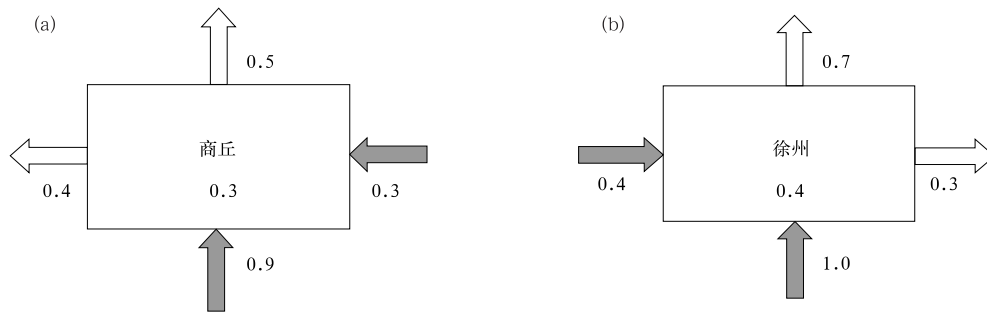
(4) Q_d 的量值虽然很小,但它的强弱变化却能反映中小尺度系统对水汽通量散度的正负贡献。如图 9 所示,当出现降水极值时商丘站的 Q_d 主要来自东侧和南侧,而徐州站的 Q_d 主要来自西侧和南侧。

综上所述,传统的水汽通量散度考虑到重要的湿度和风矢量信息,可以得到水汽的聚集情况,是降水等天气事件诊断分析中的常用物理量。通过分解水汽通量散度、定量分析不同降水位置上空各高度

表 1 引起商丘和徐州暴雨的水汽通量散度及各个分量的对比

Table 1 Comparison of water vapor divergence and each component responsible for the rainstorms in Shangqiu and Xuzhou

站点	商丘	徐州
相同点	主要来源都是 $Q_{div}<0$; $Q_r<0$,有利于水汽输送; $Q_d>0$,不利于水汽输送	主要来源都是 $Q_{div}<0$; $Q_r<0$,有利于水汽输送; $Q_d>0$,不利于水汽输送
不同点	降水极值出现在 18 日 11 时, 以层状云降水为主; 600 hPa 以下整层湿,500 hPa 以上都是干区, 水汽通量散度在中层(500 hPa)有正的大值中心; 旋转风引起的水汽平流在中高层有明显的正的大值区, Q_r 的中高层出现明显的抑制作用	降水极值出现在 18 日 20 时, 以对流降水为主并伴有龙卷; 950 hPa、800 hPa、500 hPa 多个湿中心,干湿交错, 水汽通量散度在中层(500 hPa)有负的大值中心; 旋转风引起的水汽平流在中高层有明显的负的大值区, Q_r 的中高层出现明显的促进作用



注:灰色箭头代表流入,白色箭头代表流出。

图 9 2018 年 8 月 18 日(a)11 时过商丘站,(b)20 时过徐州站的 Q_d 中低层东南北西四个边界收支对比(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 Budge comparison of Q_d in the mid-low levels in four-direction boundaries passing through (a) Shangqiu Station at 11 UTC,

(b) Xuzhou Station at 20 UTC 18 August 2018 (unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

上的通量散度及其三个分量,在整个降水过程中随时间演变规律的异同特征、及其与水汽追踪和 1 小时观测降水时序图显示的降水多寡变化的直接对应关系,可以更清楚地了解具体是哪些项起到了主导因素。这种水汽通量散度的流函数分解方法在其他地形复杂地区的极端降水预报中的应用,以及与不同水汽通量散度的分解方法的比较,还有待进一步研究。

参考文献

陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:123-474. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press:123-474(in Chinese).
陈有利,钱燕珍,潘灵杰,等,2018. 一次与台风相关联的浙江东北部暴雨成因及预报难点分析[J]. 干旱气象,36(2):272-281. Chen Y L, Qian Y Z, Pan L J, et al, 2018. Causes analysis of a heavy rainfall associated with typhoon and forecast difficulties in northeastern Zhejiang[J]. J Arid Meteor, 36(2): 272-281 (in

Chinese).
丛春华,陈联寿,雷小途,等,2011. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报,27(2):264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall[J]. J Trop Meteor, 27(2):264-270(in Chinese).
丛春华,雷小途,陈佩燕,2016. 山东两次台风远距离暴雨对比分析[J]. 中国海洋大学学报,46(12):21-31. Cong C H, Lei X T, Chen P Y, 2016. A comparative study on two processes of typhoon remote rainfall over Shandong Province[J]. Period Ocean Univ China, 46(12):21-31(in Chinese).
邓涤菲,周玉淑,王东海,2012. 有限区域分解分析方法在 2006 年一次东北冷涡暴雨分析中的应用[J]. 地球物理学报,55(6):1852-1866. Deng D F, Zhou Y S, Wang D H, 2012. The application of wind and water-vapor flux partitioning technique to the structure of a northeast vortex in 2006[J]. Chin J Geophys, 55(6): 1852-1866(in Chinese).
高拴柱,2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象,46(6):792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6):792-800(in Chinese).
黄荣辉,张振洲,黄刚,等,1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其

- 与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 22(4):460-469.
- Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al, 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. *Sci Atmos Sin*, 22(4):460-469(in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 王继志, 2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报, 62(2):167-179. Li Y, Chen L S, Wang J Z, 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(2):167-179(in Chinese).
- 梁军, 张胜军, 冯呈呈, 等, 2019. 台风 Polly(9216)和 Matmo(1410)对辽东半岛降水影响的对比分析[J]. 气象, 45(6):766-776. Liang J, Zhang S J, Feng C C, et al, 2019. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Polly and Matmo over Liaodong Peninsula[J]. *Meteor Mon*, 45(6):766-776(in Chinese).
- 任晨平, 曹洁, 王黎娟, 等, 2013. 有限区域流函数和速度势的 3 种求解方法在分析台风 Bilis 暴雨增幅中的比较研究[J]. 气候与环境研究, 18(6):721-732. Ren C P, Cao J, Wang L J, et al, 2013. Comparison study of the impacts of three approaches for calculating stream function and potential velocity in a limited domain on the analysis of the rainfall enhancement of Typhoon Bilis[J]. *Climatic Environ Res*, 18(6):721-732(in Chinese).
- 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[J]. 气象, 39(12):1561-1569. Ren L, Wang C W, Zhang G H, et al, 2013. Analysis of severe rainstorm caused by Typhoon Bolaven(1215) invading interior territory[J]. *Meteor Mon*, 39(12):1561-1569(in Chinese).
- 张家宝, 邓子凤, 1987. 新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社:400-405. Zhang J B, Deng Z F, 1987. An Introduction to the Precipitation in Xinjiang[M]. Beijing:China Meteorological Press:400-405(in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022. 2020 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(4):504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in western North Pacific in 2020[J]. *Meteor Mon*, 48(4):504-515(in Chinese).
- 周玉淑, 曹洁, 2010. 有限区域风场的分解和重建[J]. 物理学报, 59(4):2898-2906. Zhou Y S, Cao J, 2010. Partitioning and reconstruction problem of the wind in a limited region[J]. *Acta Phys Sin*, 59(4):2898-2906(in Chinese).
- 周玉淑, 曹洁, 高守亭, 2008. 有限区域风场分解方法及其在台风 Saomei 研究中的应用[J]. 物理学报, 57(10):6654-6665. Zhou Y S, Cao J, Gao S T, 2008. The method of decomposing wind field in a limited area and its application to Typhoon Saomei[J]. *Acta Phys Sin*, 57(10):6654-6665(in Chinese).
- Barnes S L, 1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis[J]. *J Appl Meteor*, 3(4):396-409.
- Chen Q S, Kuo Y H, 1992. A harmonic-sine series expansion and its application to partitioning and reconstruction problems in a limited area[J]. *Mon Wea Rev*, 120(1):91-112.
- Daley R, 1991. Atmospheric Data Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dimego G J, Bosart L F, 1982. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part II: moisture, vorticity and kinetic energy budgets[J]. *Mon Wea Rev*, 110(5):412-433.
- Ding Y H, 1994. Monsoons over China[M]. Dordrecht:Springer.
- Fu S M, Cao J, Jiang X W, et al, 2017. On the variation of divergent flow: an eddy-flux form equation based on the quasi-geostrophic balance and its application[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(5):599-612.
- Han L, Huang R X, 2020. Using the Helmholtz decomposition to define the Indian Ocean meridional overturning stream function [J]. *J Phys Oceanogr*, 50(3):679-694.
- Hawkins H F, Rosenthal S L, 1965. On the computation of stream functions from the wind field[J]. *Mon Wea Rev*, 93(4):245-252.
- Hollingsworth A, Lönnberg P, 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: the wind field[J]. *Tellus A*, 38(2):111-136.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W, 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 111(470):877-946.
- Jones S C, Harr P A, Abraham J, et al, 2003. The extratropical transition of tropical cyclones: forecast challenges, current understanding, and future directions[J]. *Wea Forecasting*, 18(6).
- Meng W G, Wang Y Q, 2016a. A diagnostic study on heavy rainfall induced by Typhoon Utor (2013) in South China: 1. rainfall asymmetry at landfall[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121:12781-12802.
- Meng W G, Wang Y Q, 2016b. A diagnostic study on heavy rainfall induced by landfalling Typhoon Utor(2013) in South China: 2. postlandfall rainfall [J]. *J Geophys Res Atmos*, 121:12803-12819.
- Parrish D F, Derber J C, 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. *Mon Wea Rev*, 120(8):1747-1763.
- Sangster W E, 1960. A method of representing the horizontal pressure force without reduction of station pressures to sea level[J]. *J Meteor*, 17(2):166-176.
- Ullah W, Wang G J, Gao Z Q, et al, 2021a. Observed linkage between Tibetan Plateau soil moisture and South Asian summer precipitation and the possible mechanism[J]. *J Climate*, 34(1):361-377.
- Ullah W, Wang G J, Lou D, et al, 2021b. Large-scale atmospheric circulation patterns associated with extreme monsoon precipitation in Pakistan during 1981-2018[J]. *Atmos Res*, 253:105489.
- Wang Y, Wang T, 2021. Numerical simulation of a heavy rainstorm in Northeast China caused by the residual vortex of Typhoon 1909 (Lekima)[J]. *Atmos*, 12:120.
- Xu Q, Cao J, Gao S T, 2011. Computing streamfunction and velocity potential in a limited domain of arbitrary shape. Part I: theory

- and integral formulae[J]. *Adv Atmos Sci*,28(6):1433-1444.
- Xu Q,Liu S,Xue M,2006. Background error covariance functions for vector wind analyses using Doppler-radar radial-velocity observations[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*,132(621C):2887-2904.
- Xu Q,Nai K,Wei L,2007. An innovation method for estimating radar radial-velocity observation error and background wind error covariances[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*,133(623):407-415.
- Xu X,Xue M,Wang Y,et al,2017. Mechanisms of secondary convection within a Mei-Yu frontal mesoscale convective system in eastern China[J]. *J Geophys Res: Atmos*,122(1):47-64.
- Xue M,Luo X,Zhu K F,et al,2018. The controlling role of boundary layer inertial oscillations in Meiyu frontal precipitation and its diurnal cycles over China[J]. *J Geophys Res: Atmos*,123(10):5090-5115.
- You C,Fung J C H,2019. Characteristics of the sea-breeze circulation in the Pearl River Delta Region and its dynamical diagnosis[J]. *J Appl Meteor Climatol*,58(4):741-755.
- Yuan Z P,Zhuge X Y,Wang Y,2020. The forced secondary circulation of the Mei-Yu front[J]. *Adv Atmos Sci*,37(7):766-780.
- Zhou T J,Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. *J Geophys Res: Atmos*,110(D8):D08104.

(本文责编:俞卫平)