

文萍,许映龙,柳龙生. 台风“山竹”(1822)引发华南暴雨过程机制分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):29-35.
WEN Ping, XU Yinglong, LIU Longsheng. Analysis on mechanism of torrential rain in South China induced by Typhoon MANGKHUT (2018) [J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(3): 29-35. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.004. (in Chinese)

台风“山竹”(1822)引发华南暴雨过程机制分析

文萍¹,许映龙²,柳龙生²

(1. 中国气象局预报与网络司,北京 100081; 2. 国家气象中心,北京 100081)

摘要: 利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL 再分析资料、CMORPH (CPC MORPHing technique) 卫星-地面自动站融合降水数据以及 FY-2G 卫星反演的 TBB (black-body temperature, 云顶亮温) 对 1822 号台风“山竹”在华南造成强降水过程进行了分析。结果表明:西北太平洋副热带高压和南亚高压的稳定维持有利于台风残涡持续影响华南地区;低层来自孟加拉湾的低空急流与西北太平洋副热带高压南侧偏东风汇合后建立起一条连接华南的水汽通道;在登陆台风影响下,大气视热源和视水汽汇主要来自于垂直运动释放的凝结潜热;湿位涡诊断分析表明强的水平风垂直切变导致低层大气斜压性增强,出现显著的对流不稳定。

关键词: 台风;暴雨;低空急流;湿位涡

中图分类号: P457.8; P426.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2019)03-0029-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.004

Analysis on mechanism of torrential rain in South China induced by Typhoon MANGKHUT (2018)

WEN Ping¹, XU Yinglong², LIU Longsheng²

(1. Department of Forecasting and Networking, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract Based on NCEP/NCAR FNL reanalysis data ($1^\circ \times 1^\circ$), CMORPH-AWS merged hourly gridded precipitation product, and FY-2G TBB (black-body temperature), the mechanism of the torrential rain caused by Typhoon MANGKHUT (2018) is analyzed. The results show that the maintenance of the western North Pacific subtropical high and the South Asia high is beneficial to the continuous influence of typhoon residual vortex on South China. The low-level jet stream from the Bay of Bengal converges with the easterly wind on the south side of the subtropical high, setting up a water vapor channel accessing South China. The apparent heat source and apparent vapor sink are mainly generated with latent heat release of condensation by vertical motion under the influence of Typhoon MANGKHUT. The diagnosis of moist potential vorticity (MPV) indicates that vertical shear of strong horizontal wind leads to the enhancement of baroclinicity at lower level and significant convective instability.

Key words typhoon; torrential rain; low-level jet stream; moist potential vorticity

收稿日期: 2019-04-26; 修订日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775048); 国家气象中心预报员专项(Y201911)

作者简介: 文萍,女,硕士,助理工程师,主要从事灾害性天气机理研究与预报服务,373161026@qq.com。

引言

CHEN and LI^[1]将登陆台风暴雨分为6种:台风核心区降雨、台风螺旋雨带或外围降雨、台风内部中小尺度降雨、不稳定降雨、台前飚线雨和台风远距离暴雨。其中,台风螺旋雨带或外围降雨,台前飚线雨和台风远距离暴雨主要发生在台风前侧^[2-3]。台风登陆后产生的暴雨与外界能量的输入有直接关系^[4],低空急流对台风残涡的维持具有十分显著的影响^[5-8]。低空急流通过中尺度扰动的形式向暴雨区输送动量、热量和水汽^[9],有利于强对流活动连续发展。个例分析也表明,登陆台风与低空急流相互作用时容易导致连续强降水^[10-12]。冷空气对登陆台风降水也具有重要影响,其造成的强迫抬升运动可以加强台风螺旋雨带的对流过程,使不稳定能量释放^[13-14]。与此同时,地形对台风暴雨的增幅作用同样重要,复杂的地形让台风降水落区和强度的预报更为困难^[15]。1822号台风“山竹”登陆后给华南造成严重灾害,受大风和强降水影响,粤港澳出现大面积航班延误或取消、高铁停运、部分地区停工停业、学校停课,两广中小河流发生超警洪水,“山竹”是1979年以来影响珠三角大部分地区最严重的台风,造成巨大的经济损失。强降水发生前后,广东阳江探空站的CAPE(对流有效位能)值和各种抬升指数(K指数、SI指数等)表现并不显著(图略),预报员对暴雨强度和落区的判断更加困难。本文采用NCEP/NCAR 1°×1°的FNL再分析资料,基于CMORPH(CPC MORPHing technique)卫星-地面自动站融合降水数据和FY-2G卫星反演的TBB(black-body temperature,云顶亮温)来分析“山竹”对华南强降水产生的可能物理机制,为今后预报此类登陆台风影响过程提供一些参考依据。

1 台风与降水概述

2018年第22号台风“山竹”(MANGKHUT)于9月7日12时(世界时,下同)在西太平洋洋面上生成(图1),随后一路西行并不断加强,15日凌晨在菲律宾吕宋岛东北部沿海登陆(超强台风级,风力17级以上,风速 $65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),16日09时前后在广东省台山市沿海登陆我国(强台风级,风力14级,风速 $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),这也是2018年度最强登陆台风,9月17日09时在广西境内停止编号。受台风“山竹”影响,9月16—18日,多地出现强降水,广东、广西、海南岛北部等地出现大暴雨、局地特大暴雨,累

计降雨100~280 mm,其中广东茂名、阳江、深圳、惠州及广西河池等地累计降雨300~497 mm。

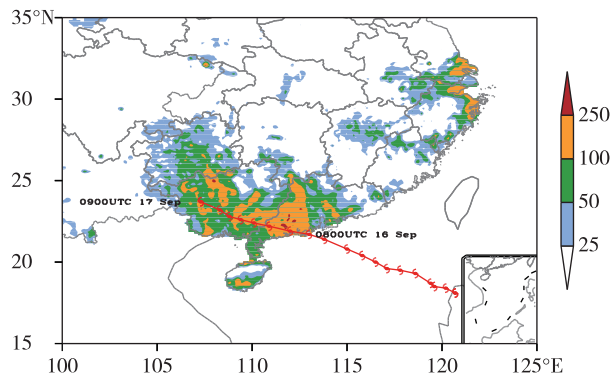


图1 2018年9月16日00时—18日00时台风“山竹”过程累计降水量(填色,单位:mm)和3 h移动路径(红线)

Fig.1 Cumulative precipitation (colored, units:mm) from 00:00 UTC on 16 to 00:00 UTC on 18 September 2018 and track (red line) with an interval of 3 h for Typhoon MANGKHUT

2 环流背景

分析16日12时形势场(图2a),“山竹”登陆后在西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)外围引导气流的牵引下向西北方向移动,850 hPa低空急流长时间与“山竹”残余环流保持联接,急流中心风速达到 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,形成一条孟加拉湾—中南半岛—南海—华南的水汽输送带,在强西南风的驱动下持续向华南大气输送水汽。由于副高进一步西伸,南北气压梯度加大,有利于低层西南风加速,这是低空急流长时间与台风残涡维持的重要动力因子。由高层100 hPa环流(图2c)可以看出,我国江南至日本南部海面一带是一个巨大的反气旋环流,存在两个中心,西边的是南亚高压,东边的是副热带高压,“山竹”位于南亚高压环流中心偏南侧,存在显著的指向西的出流,这对于低空台风残涡的维持十分有利。17日台风残涡移入广西境内(图2b),低空急流中心风速达到 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,急流一方面将孟加拉湾和南海的水汽向华南地区输送,另一方面向暴雨落区输送正涡度,高温高湿的大气加上辐合抬升运动造成华南地区对流降水持续发展,整个华南地区上空高层100 hPa依旧由南亚高压控制(图2d),高层辐散抽吸,低层辐合抬升,这是台风残涡登陆维持并引发暴雨的重要因素。由此可见,500 hPa副高西伸有利于台风残涡持续影响华南地区,850 hPa来自孟加拉湾的低空急流穿越南海后

与副高南侧偏东风汇合后建立起一条连接华南的水汽通道,因为“山竹”的存在使得高层出流变得更强,南亚高压造成持续出流有利于低层入流、垂直

上升运动的维持,这种高层辐散、低层辐合的系统配置是华南地区发生暴雨的重要天气背景。

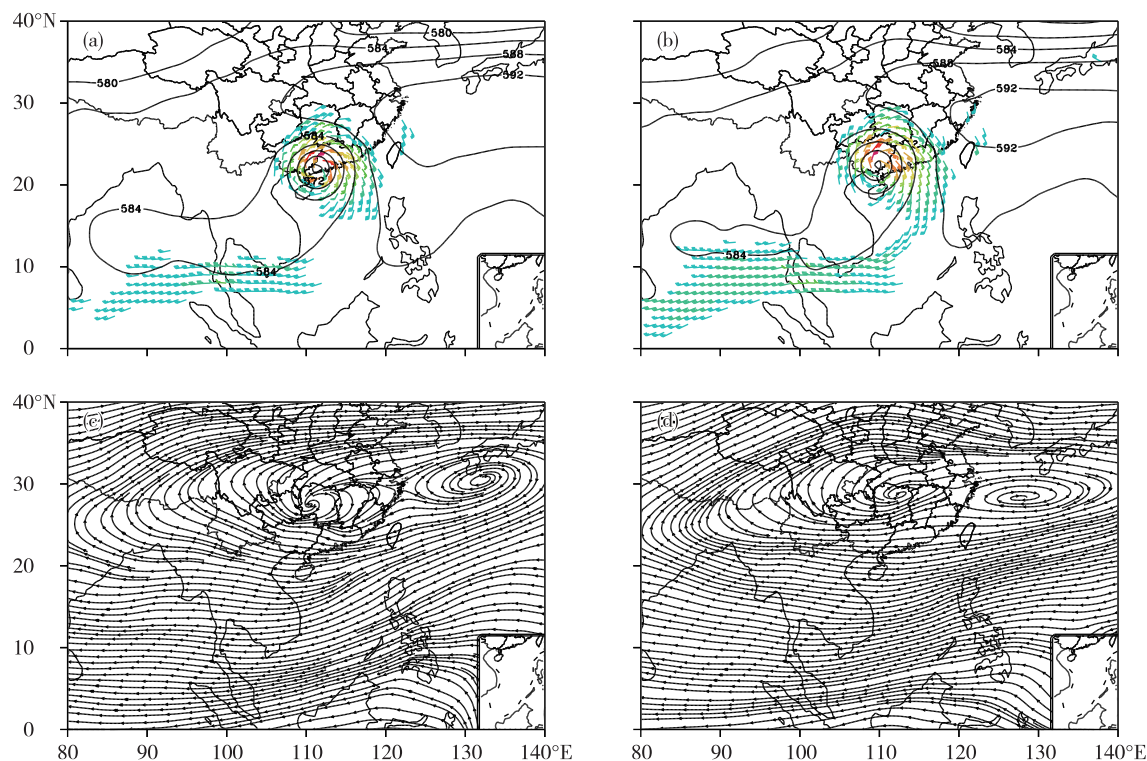


图2 2018年9月16日12时(a,c)、17日06时(b,d)500 hPa位势高度场(实线,单位:dagpm)、850 hPa低空急流(风矢,风速 $v \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a,b)和100 hPa流场(c,d)

Fig.2 Geopotential height (solid line, units: dagpm) at 500 hPa and low-level jet stream (wind barb, wind speed equal to or higher than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa (a, b) and flow field (c, d) at 100 hPa at 12:00 UTC on 16 (a, c) and 06:00 UTC on 17 (b, d) on September 2018

3 环境条件分析

3.1 动力条件

吴国雄等^[16]证明了绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡的守恒性,湿等熵面的倾斜,大气水平风垂直切变或湿斜压性增加能够导致垂直涡度的显著发展,等压面上湿位涡:

$$\zeta_{\text{MPV}} = \zeta_{\text{MPV1}} + \zeta_{\text{MPV2}} - g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式(1)中符号为气象常用符号,单位:PVU,1 PVU = $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, ζ_{MPV2} 为湿斜压项,由风的垂直切变和相当位温的水平梯度决定。由华南暴雨落区大气湿位涡斜压项 ζ_{MPV2} 、垂直速度和涡度的垂直剖面图来看,16日12时(图3a),“山竹”登陆后华南 $110^\circ \sim 112^\circ \text{E}$ 之间形成强正涡度柱,垂直高度

延伸至150 hPa,暴雨区上空涡度中心达到 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,整层维持强的气旋式辐合,这是在台风本体环流的作用下暴雨区出现强的螺旋上升运动,垂直上升速度达到 $-5 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,低层大气不稳定性开始建立,暴雨中心区域700 hPa附近 ζ_{MPV2} 出现负值中心(-0.8 PVU)且等值线密集,这对强降雨落区具有重要的指示意义^[17],同时700 hPa假相当位温水平梯度为正值(图3c),说明大气的斜压性主要是由水平风垂直切变导致的,500 hPa附近出现 ζ_{MPV2} 正值中心(0.2 PVU),而200 hPa附近 ζ_{MPV2} 表现为负值,这种湿位涡正负叠加的形势有利于垂直涡度的增长。到16日18时,随着台风西移, ζ_{MPV2} 数值显著减小(图3b),700 hPa假相当位温水平梯度依旧为正值(图3d),这主要是由于风垂直切变减小导致的,而暴雨区上空依旧为正涡度所覆盖,111°E附近850 hPa有一正涡度中心,中心值达到 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,仍有较强的气旋式辐合,110°~112°E

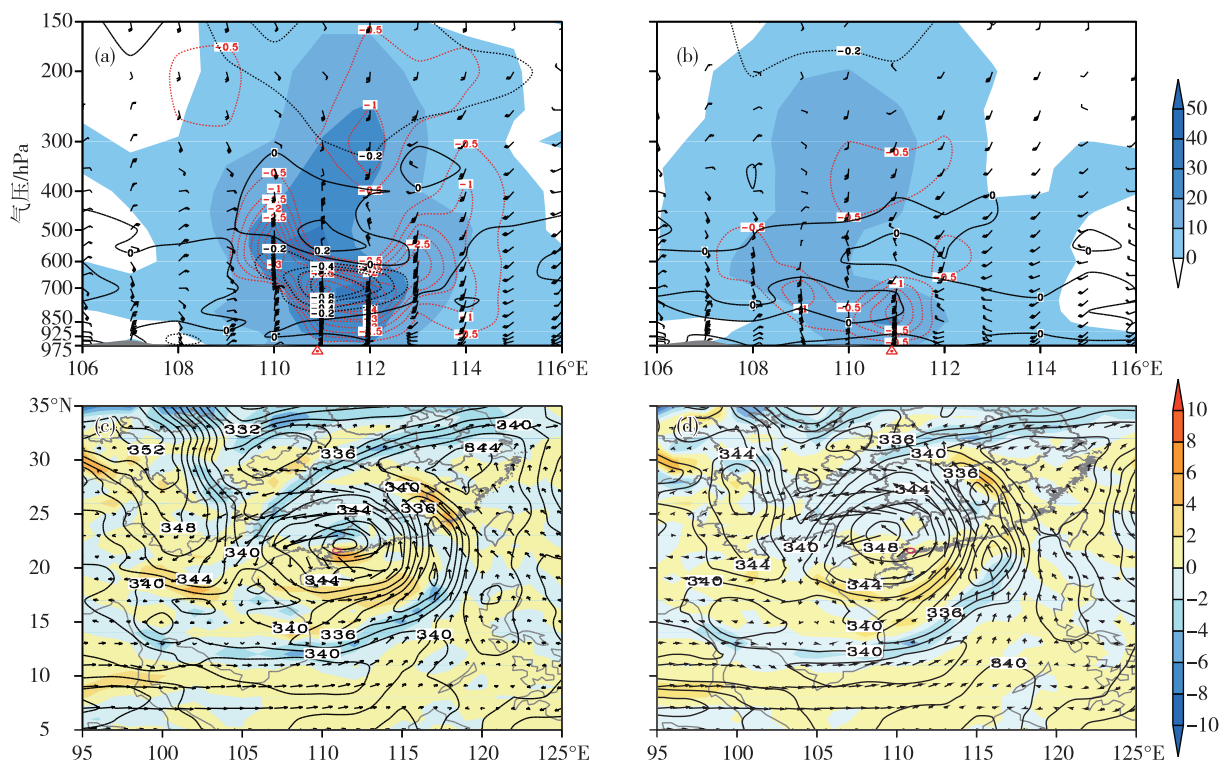


图3 2018年9月16日12时(a,c)、18时(b,d)沿21°N湿位涡斜压项 ζ_{MPV2} (黑线,单位:PVU)、垂直速度(红线,单位: 10^{-2} hPa \cdot s $^{-1}$)、涡度(填色,单位: 10^{-5} s $^{-1}$)的垂直剖面图(a,b)以及700 hPa假相当位温(实线,单位:K)和经向梯度(填色,单位:K/100 km)(c,d)(\blacktriangle 表示暴雨中心)

Fig.3 Vertical cross section (a, b) of ζ_{MPV2} (black line, units: PVU), vertical velocity (red line, units: 10^{-2} hPa \cdot s $^{-1}$), and vorticity (colored, units: 10^{-5} s $^{-1}$) along 21°N & pseudo-equivalent potential temperature (solid line, units: K) and meridional gradient (colored, units: K/100 km) at 12:00 UTC (a, c) and 18:00 UTC (b, d) on 16 September 2018 (\blacktriangle indicates the center of torrential rain)

区域200 hPa以下都表现为上升运动,这是强降水得以维持的重要动力因子。

3.2 水汽条件

水汽主要集中在对流层下层,整层大气可降水量(PWAT)是从地面到200 hPa的水汽积分,可以代表大气中的水汽总含量。从9月15日12时起,华南上空的PWAT一直维持在 $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上(图4a),16日随着台风“山竹”在广东登陆,华南上空PWAT逐步增加到峰值 $61 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,处于高湿的状态,为暴雨的发生提供丰沛的水汽条件。一直到18日,PWAT保持在 $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。TIAN et al.^[18]研究表明,超过75%的强降水出现在PWAT大于 $51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 环境中,由此可见,本次华南暴雨的发生有较好的本地水汽条件。为了进一步探求水汽的来源,取暴雨区域($21^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$)计算4个方向水汽通量的垂直积分,图4b显示强降水区4个边界的整层水汽通量及其总和。从4个方向的水汽收支来看,在台风登陆前,水汽来源主要在北侧和

东侧,即台风本体带来的水汽;登陆后随着台风进一步西移,16日12时开始,西侧和南侧的整层水汽通量开始加大,这时水汽主要来源于低空急流和副热带高压边沿的汇聚。从700 hPa水汽通量场(图4c)可以发现,来自孟加拉湾的一支低空急流穿过南海与副热带高压南侧的偏东气流汇合后向华南地区输送,中心值达到 $50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,这是暴雨得以发生的重要水汽来源。到16日18时,偏南低空急流的水汽输送依然维持,水汽通量值在暴雨区达到 $45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图4d),南边界的水汽通量随时间的变化与4个边界水汽通量总和随时间的变化基本一致,这说明来自南部的水汽输入在暴雨发生过程中占据主导地位。

3.3 云顶亮温

利用高时空分辨率的气象卫星观测资料能够分析造成暴雨的中尺度对流系统,对流云团中冷核的演变与地面降水量大值的落区间有很好的一致性^[19]。从FY-2G卫星反演的TBB空间分布可以

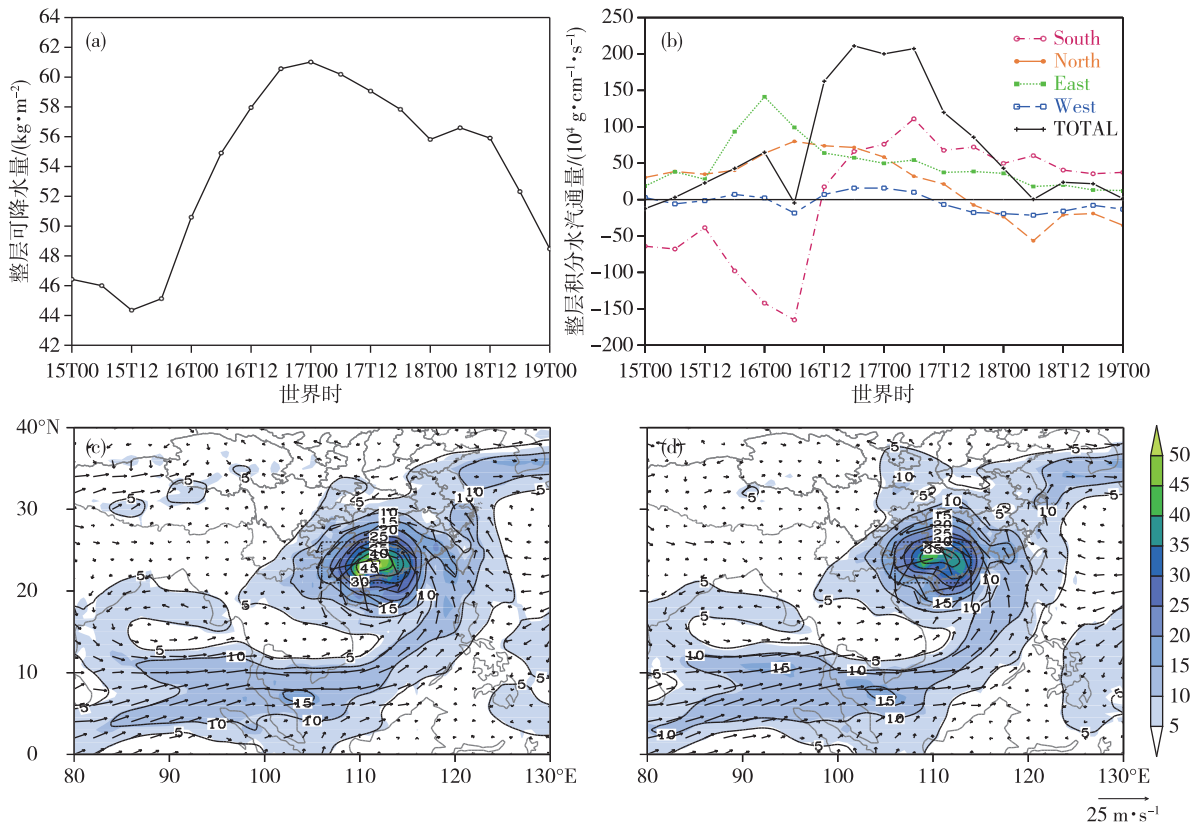


图4 2018年9月15日00时—19日00时暴雨落区(21°~26°N,106°~114°E)平均的整层可降水量(a;单位:kg·m⁻²)、整层积分水汽通量(b;红、黄、绿、蓝、黑线分别代表南边界、北边界、东边界、西边界和4个边界总和,单位:10⁴g·cm⁻¹·s⁻¹)、16日12时(c)和18时(d)700 hPa风场(矢量)、水汽通量(填色,单位:g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹)

Fig.4 Precipitable water (a; units: kg·m⁻²) and integral water vapor flux (b; red, yellow, green, blue, and black line represent southern, northern, eastern, western, and total boundaries, respectively; units: 10⁴g·cm⁻¹·s⁻¹) averaged over heavy rainfall area (21°~26°N,106°~114°E) from 00:00 UTC on 15 to 00:00 UTC on 19 & wind field (vector) and water vapor flux (colored, units: g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹) at 700 hPa at 12:00 UTC (c) and 18:00 UTC (d) on 16 September 2018

看到,16日12时,“山竹”登陆广东后,能观测到清晰的台风本体环流产生的中尺度对流云团,TBB中心值低于-70℃(图5a),最强云团中心区对应着外围的强风速辐合区,华南地区强降水也开始加剧,暴雨落区与TBB中心区域有较好的对应关系。16日18时TBB(图5b)显示,台风登陆后减弱,中尺度对流云团的发展厚度明显减小,来自孟加拉湾的水汽与南海湿润的大气汇合后在台风的东南侧形成强的对流云团,在强劲西南风的驱动下持续影响华南地区。6h后,台风残涡形成的对流云团进一步减弱(图5c),由台风本体造成的降水也因此而弱化,此时在北部湾和南海北部有一条较强的对流云团发展,这主要是南部低空急流的发展加强所致,暴雨的发生需要源源不断的水汽和热量的输送,在台风登陆逐渐减弱后,南支低空急流无疑对暴雨的维持起着重要作用。17日06时,北部湾和南海北部

的对流云团北上(图5d),持续影响华南地区。

3.4 热力条件

视热源和视水汽汇的计算公式^[20-21]为:

$$Q_1 = C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \quad (2)$$

$$Q_2 = -L \left[\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right] \quad (3)$$

式(2)(3)中的 θ 为位温, q 为比湿, \mathbf{v} 为水平风矢量, ω 为 p 坐标垂直速度, $\kappa = \frac{R}{C_p}$, R 和 C_p 分别是气体常数和干空气的等压比热, L 为水汽凝结潜热, $p_0 = 1\ 000$ hPa。

对式(2)(3)整层积分得到视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$,这里: $\langle \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_t} (\) dp$, p_t 和 p_0 表示顶层和底层气压。视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 均包含局

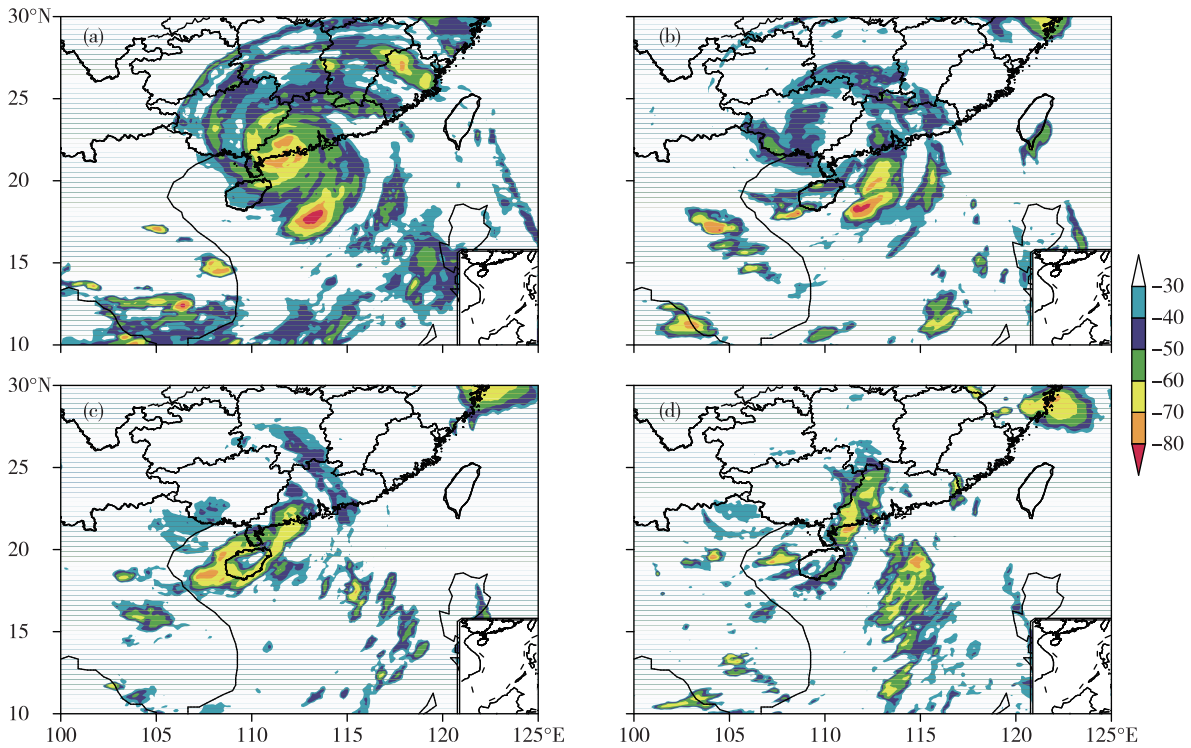


图5 2018年9月16日12时(a)、16日18时(b)、17日00时(c)、17日06时(d)FY-2G卫星TBB(单位:°C)图
 Fig.5 FY-2G TBB (units: °C) at 12:00 UTC on 16 (a), 18:00 UTC on 16 (b), 00:00 UTC on 17 (c), and 06:00 UTC on 17 (d) on September 2018

地项、平流项和垂直运动项 3 个分量,取暴雨区域 (22°~26°N,106°~114°E)16日00时—18日00时

计算 Q_1 、 Q_2 各项在垂直方向的分布情况(图6)。从视热源 Q_1 及其各项分布(图6a)来看,局地项 Q_{1lg} 和

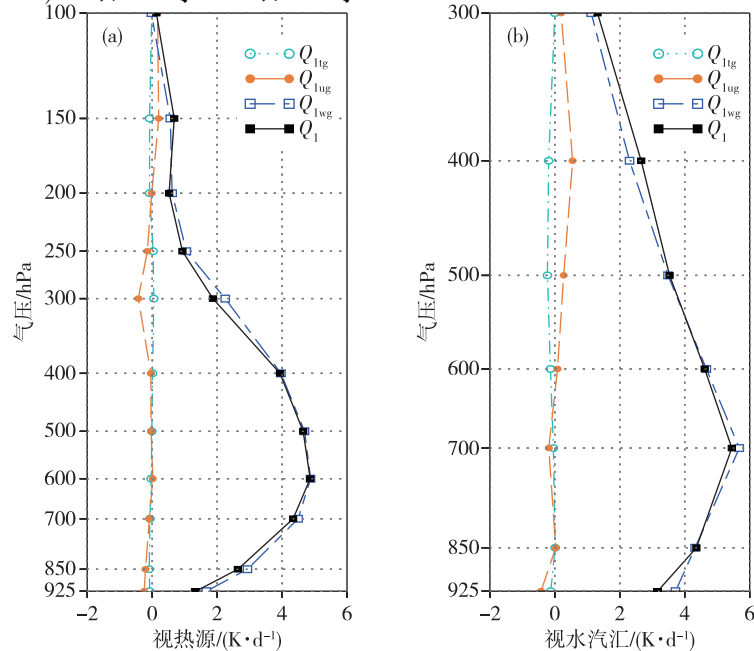


图6 2018年9月16日00时—18日00时区域平均(22°~26°N,106°~114°E)的视热源(a)和视水汽汇(b)的局地项 (Q_{1lg}, Q_{2lg})、平流项(Q_{1ug}, Q_{2ug})和垂直运动项(Q_{1wg}, Q_{2wg})的垂直廓线(单位: $K \cdot d^{-1}$)

Fig.6 Vertical profile of local term (Q_{1lg}, Q_{2lg}), advection term (Q_{1ug}, Q_{2ug}), and vertical motion term (Q_{1wg}, Q_{2wg}) of apparent heat source (a) and apparent vapor sink (b) averaged over heavy rainfall area (22°~26°N, 106°~114°E) from 00:00 UTC on 16 to 00:00 UTC on 18 September 2018 (units: $K \cdot d^{-1}$)

平流项 Q_{1wg} 的作用并不显著,垂直运动项 Q_{1wg} 占主导地位,说明大气热源主要来自于垂直运动释放的凝结潜热,这在 600 hPa 表现的最为显著。从相应视水汽汇 Q_2 (图 6b)来看,局地项 Q_{2lg} 和平流项 Q_{2wg} 同样不显著,垂直运动项 Q_{2wg} 基本反映了 Q_2 的特征,在 700 hPa 达到最强。对比 Q_1 和 Q_2 可以发现,在登陆台风影响下,大气的热源中心在大气水汽汇中心上方,这主要是由台风本体和低空急流相互作用激发的强烈上升运动产生的。强垂直运动把低层暖湿气流抬升到高层,使台风气柱中的大量积云对流发展并释放潜热增暖,对流运动加强并造成较强的视热源和视水汽汇,增强高空辐散,有利于低压环流的维持和强降雨的产生。

4 结论与讨论

通过对 1822 号台风“山竹”对华南地区暴雨的产生物理机制进行分析发现:本次暴雨过程是在台风残涡与低空急流相互作用下发生的,来自孟加拉湾的低空急流与副高南侧偏东风汇合后持续向华南大气输送水汽和热量,使得暴雨可以持续发生;副高西伸和南亚高压的稳定维持为台风残涡持续影响华南地区提供了大尺度背景场;通过湿位涡诊断分析表明,华南暴雨落区大气的斜压性主要是由水平风垂直切变导致的,这有利于垂直涡度的增大;在登陆台风影响下,强垂直运动把低层暖湿气流抬升到高层,产生凝结核潜热释放,对流运动加强并造成较强的视热源和视水汽汇。

此次登陆台风给华南地区带来强降水是在强的西南低空急流背景下发生的,然而影响强降水发生的因素较多,此文从单个个例分析得到的结论不一定具有普适性,后期还应该分析更多的相似个例来进一步探求登陆台风影响华南降水的成因。

参考文献:

- [1] CHEN L S, LI Y. An overview on the study of the tropical cyclone rainfall [C]//Proceedings of the International Conference on Storms. Brisbane: Australian Meteorological and Oceanographic Society, 2004: 112-113.
- [2] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420-432.
- [3] MENG Z Y, ZHANG Y J. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. Mon Wea Rev, 2012, 140(2): 445-470.
- [4] 陈联寿. 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论文集. 上海: 中国气象学会, 2007: 3-7.
- [5] 李英, 陈联寿, 王继志. 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, 2004, 62(2): 167-179.
- [6] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 840-850.
- [7] 沈杭锋, 高天赤, 周春雨, 等. 台风海葵引发浙西山区大暴雨的成因[J]. 气象, 2014, 40(6): 733-743.
- [8] 周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 930-939.
- [9] DING Y H. Summer monsoon rainfalls in China [J]. J Meteor Soc Japan, 1992, 70(1B): 373-396.
- [10] 程正泉, 项颂翔, 黄晓莹, 等. “凡亚比”登陆引发的粤西特大暴雨分析[J]. 广东气象, 2013, 35(1): 1-5.
- [11] 尤红, 周泓, 李艳平, 等. 0906 号台风“莫拉菲”大范围暴雨过程诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(1): 44-50.
- [12] 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.
- [13] 魏应植, 吴陈锋, 林长城, 等. 冷空气侵入台风“珍珠”的多普勒雷达回波特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(6): 599-608.
- [14] 施春红, 吴君婧, 漆梁波. 两例相似路径台风降水差异的成因及预报分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3): 36-45.
- [15] FANG X Q, KUO Y H, WANG A Y. The impacts of Taiwan topography on the predictability of typhoon Morakot's record-breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation [J]. Wea Forecasting, 2011, 26(5): 613-633.
- [16] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [17] 张建海, 庞盛荣. “莫兰蒂”台风(1010)暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 305-312.
- [18] TIAN F Y, ZHENG Y G, ZHANG T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China [J]. J Meteor Res, 2015, 29(3): 370-384.
- [19] 刘健, 蒋建莹. FY-2C 高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 873-880.
- [20] NITTA T. Energy budget of wave disturbances over the Marshall Islands during the years of 1956 and 1958 [J]. J Meteor Soc Japan, 1972, 50(2): 71-84.
- [21] YANAI M, ESBENSEN S, CHU J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. J Atmos Sci, 1973, 30(4): 611-627.