

2020年08号台风特征分析

曾久洋, 王 伟, 邵清林

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

Email: 550095150@qq.com, wei2009@cuit.edu.cn, 2042683939@qq.com

收稿日期: 2021年8月20日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年9月24日

摘 要

为研究2020年08号台风“巴威”发生期间的降水及结构等特征, 选用2020年8月14~30日的台风资料、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提供的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的ERA5再分析资料以及英国气象局哈德莱中心提供的海温资料, 对台风登陆前后的环流形势、海温与垂直风切变的特征、降水时空分布及水汽通量散度特征、以及台风的动力场进行分析。结果表明: 1) “巴威”自生成以来路径较稳定、2008号台风“巴威”具有生命史长, 强度大, 发展快, 影响时间长, 降雨强度大的特点。2) 台风登陆前后的降水在环流形势上的表现很好, 并且水汽通量散度上也有良好的表现, 有大量充沛而连续的水汽从沿海一带向北方输送, 低层有着比较大的水汽通量辐合。3) 台风“巴威”在其强度急剧加强的过程之中, 台风的中心周围低层维持着辐合, 高层则维持辐散, 这种情况是非常有利于对流的发展, 并且还还为暴雨的产生提供了有利的动力条件。

关键词

“巴威”台风, 台风降水, 环流形势, 水汽通量散度

Characteristic Analysis of Typhoon No. 08, 2020

Jiuyang Zeng, Wei Wang, Qinglin Shao

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: 550095150@qq.com, wei2009@cuit.edu.cn, 2042683939@qq.com

Received: Aug. 20th, 2021; accepted: Sep. 17th, 2021; published: Sep. 24th, 2021

Abstract

In order to study the characteristics of precipitation and structures during the occurrence of Typhoon “Baweishan” in 2020, using typhoon data from August 14~30, 2020, ERA5 re-analyzed by

文章引用: 曾久洋, 王伟, 邵清林. 2020 年 08 号台风特征分析[J]. 自然科学, 2021, 9(5): 818-827.

DOI: 10.12677/ojns.2021.95089

ERA5 provided by ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) and the British Meteorological Bureau, the sea temperature data provided by Hadley Center has the characteristics of the typhoon login, the characteristics of the sea temperature and the vertical wind turbine, the precipitation time and space distribution, and the water vapor flux feature, and the power field of the typhoon. The results showed that: 1) "Baweishan" has been more stable since the generation, the "Baweishan" has the history of life, the strength, fast development, long influence, and high rainfall intensity. 2) The precipitation before and after the typhoon landing is very good in the circulation situation, and there is also a good performance in the water vapor flux, there is a lot of energetic and continuous water vapor to transport from the coastal, and the low-rise has a relatively large water vapor pass. 3) Typhoon "Baweisan" is in the process of strongly strengthening its strength, the low-level high-rise in the center of the typhoon, the high-rise is maintained, which is very conducive to convection development, and provides favorable dynamic conditions for the generation of heavy rain.

Keywords

"Baweisan" Typhoon, Typhoon Precipitation, Circulation Situation, Water Vapor Flux

Copyright © 2021 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

我国是受台风影响比较严重的国家之一。随着科技的进步,气象工作者对台风研究日益深入,对我们了解台风这一自然现象提供了许多具有指导和实践意义的经验、方法以及研究角度。

康志明、陈涛等利用自动站实况降型环流场的形势,对强热带风暴“碧利斯”引发的特大暴雨进行了诊断研究[1]。郭浩鑫、杨杰颖等整合卫星云图、NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析等资料,研究“彩虹”台风的路径变化显副高的紧密联系,并对台风降水特征进行了分析[2]。梁宝荣、陈秋吉等利用常规气象资料,对0907号热带风暴“天鹅”进行特征分析,重点分析“天鹅”登陆粤西以后折向西南方向移动进入北部湾的原因,并指出“天鹅”与“莫拉克”台风的互旋作用也是使其方向折向西南的一个重要影响因素[3]。谭成坤、彭自强等通过整合广东省的气象数据和卫星云图等资料,研究了2010年11号超强台风“凡亚比”的发生背景和物理量场,得出在台风发生时的200 hPa风场上,广东上空存在一个较强的高空辐散系统,而这个辐散系统所影响产生的强烈抽吸作用为“凡亚比”产生与发展提供了良好的环流背景。当台风登陆时,西太副高缓慢西进也促进了台风的发展增强[4]。蔡敏、梁宝荣等利用MICAPS常规资料对“康森”台风进行分析,研究指出台风“康森”的路径与移动速度都是较为稳定的,但由于2010年的西太平洋副高的位置与强度是比较偏南偏强的,故导致“康森”的移动路径也比较偏向西南方向;除此之外还分析了“康森”台风的预报偏差原因[5]。梁卉林、唐晓东等利用NCEP最终分析(FNL)资料分析和中国自动站与CMORPH融合的逐时降水量 0.1° 网格数据,对1211号台风“海葵”登陆后引发的强降水过程进行了探讨研究[6]。许晓林、张维等利用美国国家环境预测中心逐日4次的经纬网格(分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料对0801号台风“浣熊”的移动路径、强度进行分析,得出“浣熊”生成、发展较早的主要原因是受到了2008年4月西北太平洋副高脊线异常偏北,以及前期的La Nina使南海海表温度异常偏高的影响[7]。

在台风预报方面也有许多研究。危国飞、刘会军等以台风路径数值预报的短时效预报偏差和目标时

效的维度预报为预报因子,采用多元线性回归方法建立了台风路径预报的偏差预估方程,继而对台风路径预报进行了实施订正[8]。张广平、张晨晓等基于小程序开发平台,使用小程序 API 接口访问技术获取灾害相关要素数据,调用 MAP 组件实现“一张图”展示海洋牧场气象要素信息、水文要素信息、海洋要素信息及灾害灾情信息,实时发布灾害警报并推送减灾防灾文本、语音、视频信息[9]。

本文将利用再分析资料、台风路径数据、海温等资料,对 2020 年 08 号台风“巴威”实况及登陆前后的环流形势、台风降水时空分布特征等进行个例分析。

2. 资料与方法

2.1. 资料概况

本文所使用资料来源如下:

- 1) 台风数据: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/year/wnp/2020.html.en>。
- 2) 本文所用的再分析资料来自于 <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> 网站,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,包括温度场、风场、位势高度场、降水量、水汽,时间长度是从 2020 年 8 月 22~29 日。
- 3) 逐日海温数据是 <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate/met-office-hadley-centre/index> 网站所提供,其水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

2.2. 研究方法

水平速度散度公式:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

其中, u 是水平方向上的风速分量(单位: m/s), v 是垂直方向上的风速分量(单位: m/s)。

根据中国气象局官网提供的 24 小时降水总量(单位: mm)的大小制定的降水量分级表对降水进行等级划分。根据“关于实施热带气旋等级国家标准”GBT 19201-2006 的通知而制定的气旋对热带气旋发展过程中的等级进行标定。

3. 研究结果

3.1. “巴威”台风实况

台风的移动路径通常受到西太平洋副热带高压的位置的制约,它们之间的关系非常密切[10]。

图 1 给出了 2020 年 08 号台风的移动路径与等级情况,“巴威”台风的路径总体是向着偏北方向一路行进的。2020 年 08 号台风“巴威”于 8 月 15 日在日本关岛东南方向上的海域生成低压扰动,在 8 月 21 日加强成为热带低压,此时根据台风数据显示其位置在北纬 22° ,东经 123° 左右,中心气压约为 1006 hPa。在 22 日升级为强热带风暴并给中国台湾地区造成了不稳定的天气。此时位置在北纬 25° ,东经 123° 左右,其中中心最低气压达到 990 hPa。24 日中国气象局将其升级为台风级别。此时台风已经移动至北纬 $26^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 附近了,与此同时其中心气压已经低至 975 hPa。在 25 日“巴威”台风的强度达到顶峰,其中心 42 m/s (约为 14 级的风力),中心最低气压达到了 955 hPa。在 27 日上午台风“巴威”登陆。台风“巴威”从开始生成初期向着西北方向前进,到靠近台湾岛附近海域转向为东北向移动至钓鱼岛附近向着北方前进,到达赤尾屿附近又重新转为东北向,前行一段距离后向西北向前行,在一段时间内向着偏北方向移动,台风“巴威”在辽宁省庄河市到朝鲜平安北道沿海一带登陆,登陆后逐渐转为北偏东方向而后又向着东北方向移动,之后台风“巴威”穿越东北三省,之后其强度逐渐减弱直至消亡。

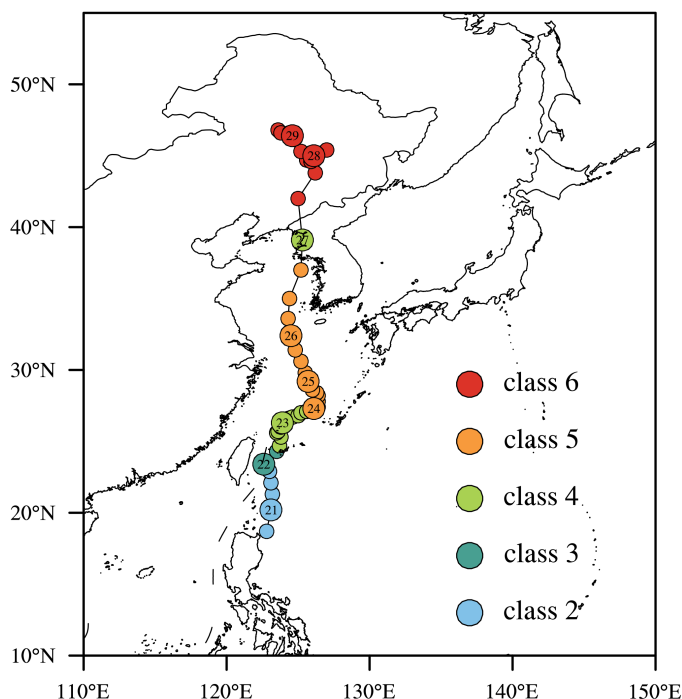


Figure 1. Central position and grade evolution of Typhoon Bawean of 08 in 2020

图 1. 2020 年 08 号台风“巴威”中心位置与等级演变情况

台风的强度是由台风中心地面最大平均风速和台风中心海平面最低气压二者所确定的。由图 2 可以看出台风中心地面最大平均风速与台风中心海平面最低气压是呈现出相反的关系：当台风中心最低气压逐渐降低或者升高时，台风中心地面最大平均风速则逐渐增强或者减弱。

8 月 21 日 18 时~23 日 18 时(图 2)，地面最大风速变化曲线的斜率陡然增大至 60 m/s，并且台风中心气压从 1008 hPa 骤降至 985 hPa，对应着“巴威”台风的发展中由低压扰动增强到强热带风暴这一过程，之后 23~25 日的海平面最低气压变化曲线斜率持续走低，即从 985 hPa 降至 955 hPa，这对应着台风强度的升级。在 8 月 26 日 06 时最低气压与最大风速分别达到峰值代表着台风“巴威”的强度达到最大，地面最低气压低至 950 hPa，而地面最大风速则达到 85 m/s。在 26 日上午“巴威”台风在中朝交界附近的朝鲜平安北道登陆之后，由于地面的摩擦作用，台风的强度有所减弱，直至最终的消亡。

“巴威”台风是 2020 年全球最强的风暴之一，登陆前后加之活跃西南季风水汽的影响给我国沿海一带以及东北地区带来暴雨甚至特大暴雨的强降水过程。

图 3 给出了 2020 年 8 月 22~27 日 24 h 降水量的分布情况。在“巴威”台风登陆之前(图 3(a1))，最为主要的降水都集中在中国台湾东北部海域，基本上可以达到特大暴雨的级别，这与台风数据所提供的台风中心位置刚好对应。而在我国南海海域和菲律宾也有大于或者暴雨的降水量级出现。8 月 23 日(图 3(b1))，在我国部分地区诸如河北、山西、陕西、四川、重庆等也出现了大雨天气。8 月 24 日(图 3(c1))，我国东北地区出现强降水。尤其是辽宁省的靠海地区以及黑龙江的部分地区雨量可达到暴雨的级别。8 月 25~26 日(图 3(d1)、图 3(a2))，江苏北部、山东中东部、辽宁东部有大到暴雨，其中，山东中部等地局地有大暴雨(100~150 毫米)。在 26 日的渤海海域有暴雨出现，相应的台风中心也是移到了渤海海域。当台风登陆之后的 8 月 27 日(图 3(b2))，在中朝交界处雨量骤增出现暴雨，并且持续影响我国东北地区，造成强降水。而在菲律宾以南的附近海域出现了特大暴雨。此后，随着残留云系的逐渐消散，雨量显著减小。

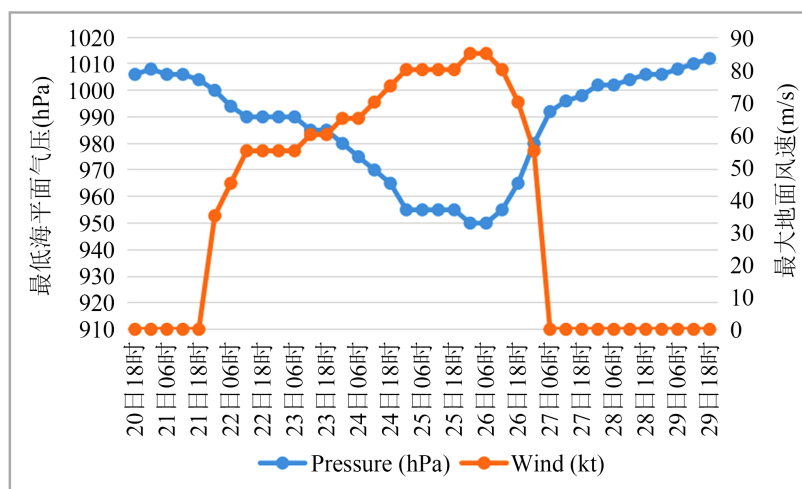


Figure 2. The time evolution of the maximum average wind speed (unit: m/s) and the minimum air pressure (unit: hPa) during the development of Typhoon Baweisani

图 2. 台风“巴威”发展过程中最大平均风速(单位: m/s)与最低气压(单位: hPa)的时间演变情况

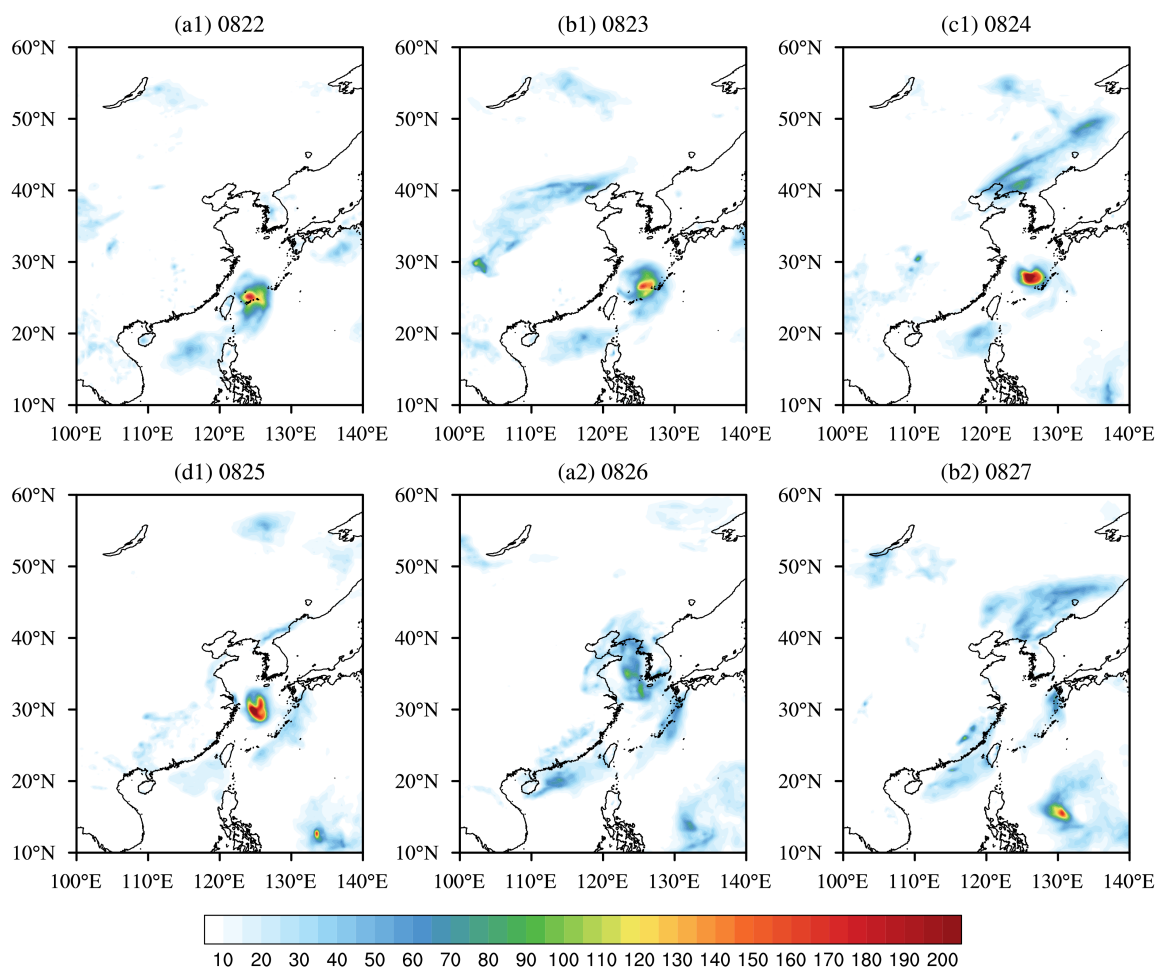


Figure 3. The distributions of 24 h precipitation (unit: mm) from 22 to 27, August 2020

图 3. 2020 年 8 月 22~27 日 24 h 降水量(单位: mm)分布形势

3.2. “巴威”台风背景场特征

3.2.1. 海温

台风发生发展的必要条件之一为要有足够大的海面或者洋面, 并且扰动生成的洋面温度必须大于 $26^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$ [10]。图 4 显示, 西太平洋的海温基本上都是高于 27°C 的, 在日本东南部以及中国台湾附近的海域的海水表面温度尤为高, 也为“巴威”台风的产生提供了足够的能量。

在 24 日中国气象局将台风“巴威”升级为台风级别(图 1), 在 25 日“巴威”台风的强度达到顶峰。与之对应的 8 月 24~25 日的海温(图 4(b)、图 4(c)), 西太平洋的海温均高于 26 摄氏度, 这是非常有利于台风的发展的。

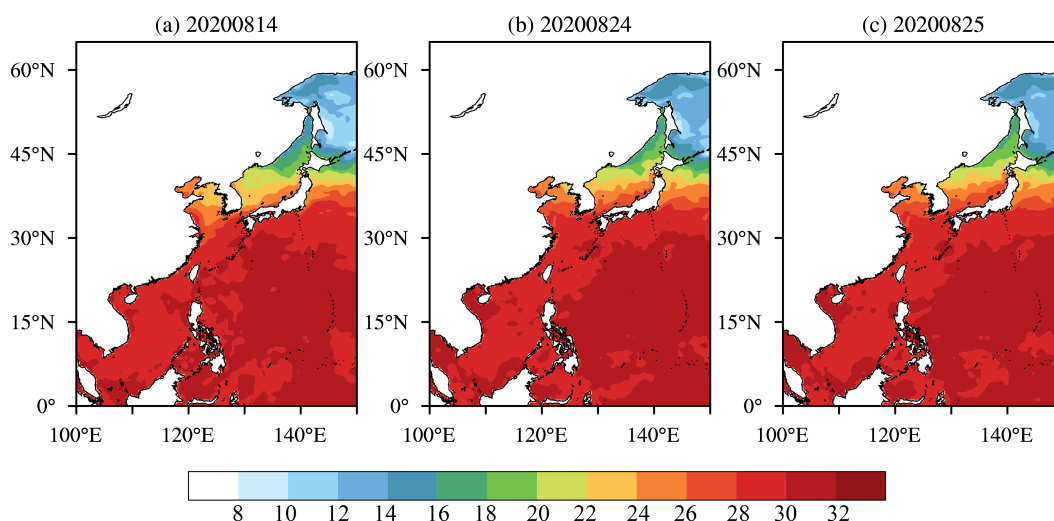


Figure 4. The distributions of surface sea temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) over Western Pacific on 14, 24, 25 August 2020

图 4. 2020 年 8 月 14 日, 24 日, 25 日西太平洋海温分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

3.2.2. 垂直风切变

台风的形成还需要对流层风速垂直切变足够小, 从而很快地形成暖心结构, 也保证了初始扰动的气压不断地迅速降低直至最后形成台风[10]。

北京时间 2020 年 8 月 22 日 9 时左右, 中央气象台发布“巴威”级别升至热带风暴, 8 月 22 日 17 时左右, 升级到强热带风暴级别。图 5 显示, 在 8 月 22 日 9 时至 17 时, 从 200 hPa 到 700 hPa 的高低空垂直风切变约在 4 m/s 到 8 m/s , 这样就可以解释初始扰动的强度维持并且增强的现象。

3.3. 台风“巴威”的暖心结构

暖心的温度结构是台风最明显的特征之一。Palmen [11]最早给出了台风的温度与气压分布模式, 清晰地显示出台风中心的暖性结构。俞伟[12]以台风“海棠”为主题, 研究了其发展过程中暖心变化特征。鉴于此本文也分别绘制分析了 2020 年 8 月 26~29 日的“巴威”台风中心的温度剖面(图略)。在台风“巴威”登陆之前, 台风的暖心是呈现出突起的样式, 而在登陆之后, 突起状的部分迅速减小直至等温面放平缓, 表征台风的暖心在迅速减小, 而这一点也与台风路径中所给出的地面最低气压与台风中心最大风速的变化不谋而合。另外, 在“巴威”台风登陆之前, 其暖心高度要比登陆之后的暖心高度高出 50 hPa 左右, 分析结果与前人的研究基本一致[13] [14] [15]。

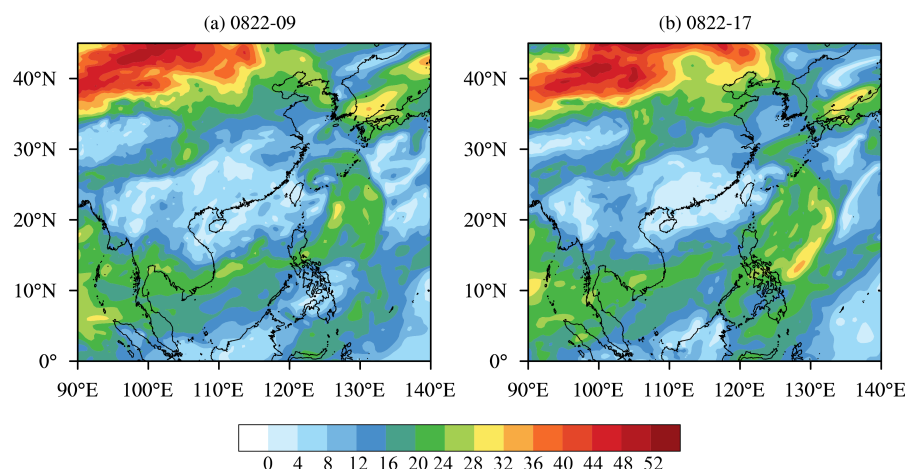


Figure 5. The spatial distributions of vertical wind shear (unit: m/s) at 09 and 17 on August 22, 2020

图 5. 2020 年 8 月 22 日 09 时与 17 时的垂直风切变(单位: m/s)

3.4. 环流形势

3.4.1. 500 hPa 环流形势

热带气旋路径受西太平洋副热带高压影响的程度非常深, 图 6 给出了 8 月 26 日 12 时, 27 日 00、06、12 时 500 hPa 风场、位势高度场和温度场的分布形势。

台风的移动路径数据显示 8 月 26 日 12 时“巴威”台风的中心处于北纬 35°, 东经 124.4° (图 1), 图 6(a1)中可以看到高压中心大约处于我国渤海海域, 结合风场可以清楚地显示此时“巴威”台风的结构, 并且 588 线是向着南边延伸的, 在低纬的海域上空还有一个反气旋环流与之相匹配形成有利于降水形成的水汽输送通道。西太平洋副热带高压处于“巴威”台风的偏东方向, 故由于西太副高偏西北一侧的西南气流的引导作用而使得台风“巴威”的路径在 26 日略微折向东北方, 又由于我国华南沿海正处在夏季西南季风比较活跃时期, 有着大量的偏南暖湿水汽输入, 以及副高西南侧的偏东气流对台风“巴威”的气旋性有着加强作用, 这就使得“巴威”台风在 26 日迅速发展, 其中心最大风速达到了 45 m/s 左右, 并且其地面最低气压达到了 985 hPa 左右(图 2)。

8 月 27 日 00 时(图 6(b1)), 在高纬地区出现了一个反气旋性环流, 副高脊线略向西南方向延展, 而在图 6(a1)中原本位于台风东侧的大型反气旋环流在 8 月 27 日 00 时刻与台风的反气旋环流相合并。

8 月 27 日 06 时(图 6(c1)), 高纬的反气旋性环流的范围稍有扩大, 并且反气旋环流的槽线向着偏南方向加深, 西太副高的范围与 00 时刻相比略有缩小, 在低纬海上的反气旋环流再一次出现。

8 月 27 日 12 时(图 6(d1)), 高纬反气旋性环流的范围进一步扩大, 反气旋环流的槽线向南进一步深入, 副高范围增大。在 27 日台风登陆之后, 风速有增大, 而在随后的几小时内由于地面的摩擦作用风速迅速减小, “巴威”台风的强度开始减弱了(图 2)。台风登陆后(图 7(d1)), 在华北一带的一个较大的低值系统的槽线加深, 并且向着西南地区延伸, 而与此同时在中高纬地区又形成了一个反气旋性系统, 这样就使得台风消散的更为快速并且在登陆之后“巴威”台风在东北地区其路径又向着西北方向略有偏折。

3.4.2. 850 hPa 环流形势

图 7 给出了 8 月 26 日 12 时, 27 日 00、06、12 时 850 hPa 风场、位势高度场和温度场的分布形势。台风“巴威”在登陆之前(图 7(a2)~(b2)), 台风的结构是非常的紧密并且是其形状是比较规则的圆形, 而在登陆之后(图 7(c2)~(d2))台风的形状也慢慢变成了椭圆形, 并且也在慢慢变得疏松。

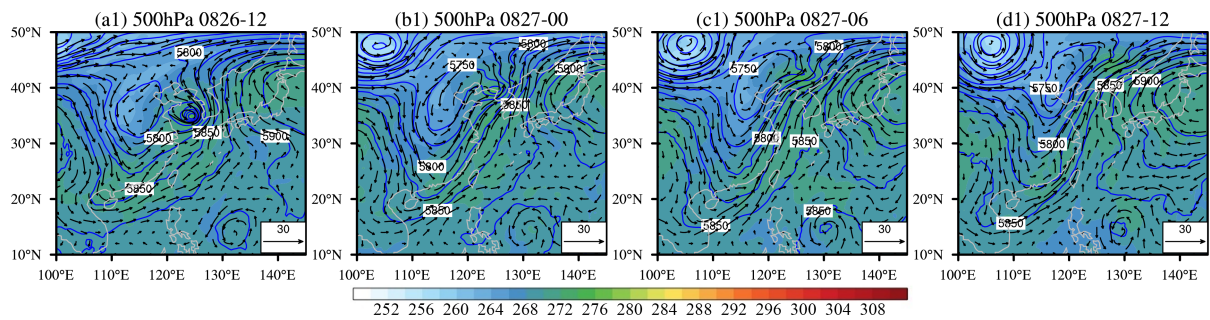


Figure 6. The distributions of 500 hPa circulation situation at 12:00 of August 26th and 00, 06, 12 of August 27th: (geopotential height: contour, unit: gpm; wind: vector, unit: m/s; temperature: color map, unit: K)

图 6. 8 月 26 日 12 时, 27 日 00、06、12 时 500 hPa 环流形势(位势高度场: 等值线, 单位: gpm; 风场: 矢量, 单位: m/s; 温度场: 填色图, 单位: K)

8 月 26 日 12 时(图 7(a2)), 台风中心位于我国渤海海域, 其结构十分清晰明显。在低纬海域有一个反气旋环流与高层的图对应, 故可以得出这个反气旋环流是十分深厚的。8 月 27 日 00 时刻(图 7(b2)), 台风结构与前一日相比变得略微松散, 到了 27 日 06 时(图 7(c2)), 台风结构进一步松散, 在高纬地区也形成了反气旋环流与高层相对应, 即表明了该环流系统也是十分的深厚。到了 12 时(图 7(d2)), 台风在中朝交界处登陆后, 台风本体云系造成我国东北地区等地出现大雨天气。

结合台风“巴威”于 27 日登陆后所造成的强降水分布(图 3), 其主要降水落区即为台风本体云系所在位置。台风登陆以后向着偏北方向移动。27 日 06 时台风中心位置仍位于东北, 强度明显减弱。27 日 12 时台风继续向东北移, 强度继续减弱。由此可见, 台风强降水过程主要是由于登陆台风的本体云系影响所产生。

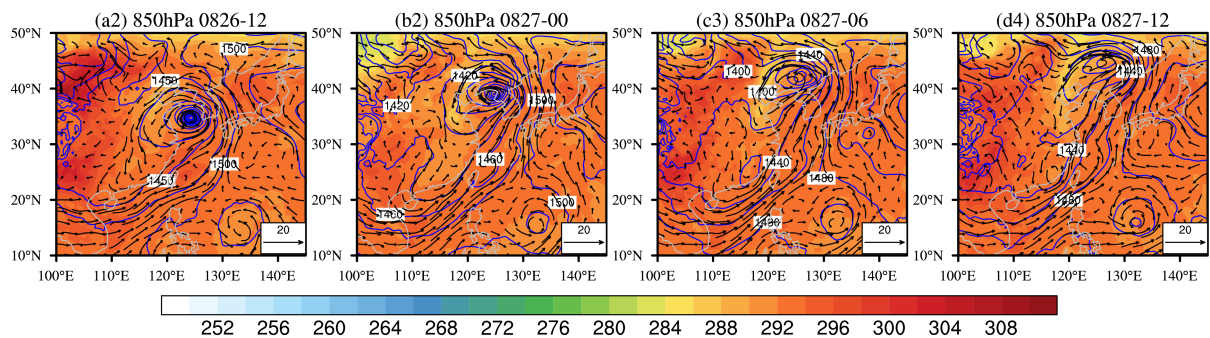


Figure 7. The distributions of 850 hPa circulation situation at 12:00 of August 26th and 00, 06, 12 of August 27th: (geopotential height: contour, unit: gpm; wind: vector, unit: m/s; temperature: color map, unit: K)

图 7. 8 月 26 日 12 时, 27 日 00、06、12 时 850 hPa 环流形势(位势高度场: 等值线, 单位: gpm; 风场: 矢量, 单位: m/s; 温度场: 填色图, 单位: K)

3.4.3. 散度场分析

图 8 给出了不同时刻台风“巴威”中心位置的散度剖面图。“巴威”的强度是在 26~27 日有一增强过程(图 1), “巴威”台风的中心所在的位置与图 8 中所显示的辐合与辐散中心大致吻合, 最大散度甚至可以达到 3 s^{-1} , 在台风中心的低层是辐合中心, 而在其高层则是辐散中心。低层辐合高层辐散配置的维持使台风“巴威”的中心气压不断地降低, 强度不断增强。在台风登陆之后, “巴威”强度变得越来越弱, 其中心周围高层的辐散也变得越来越弱(图 8)。因此可知: 台风“巴威”中心周围高层气流的辐散增强将导致台风增强, 高层气流的辐散减弱则会造成台风强度减弱。

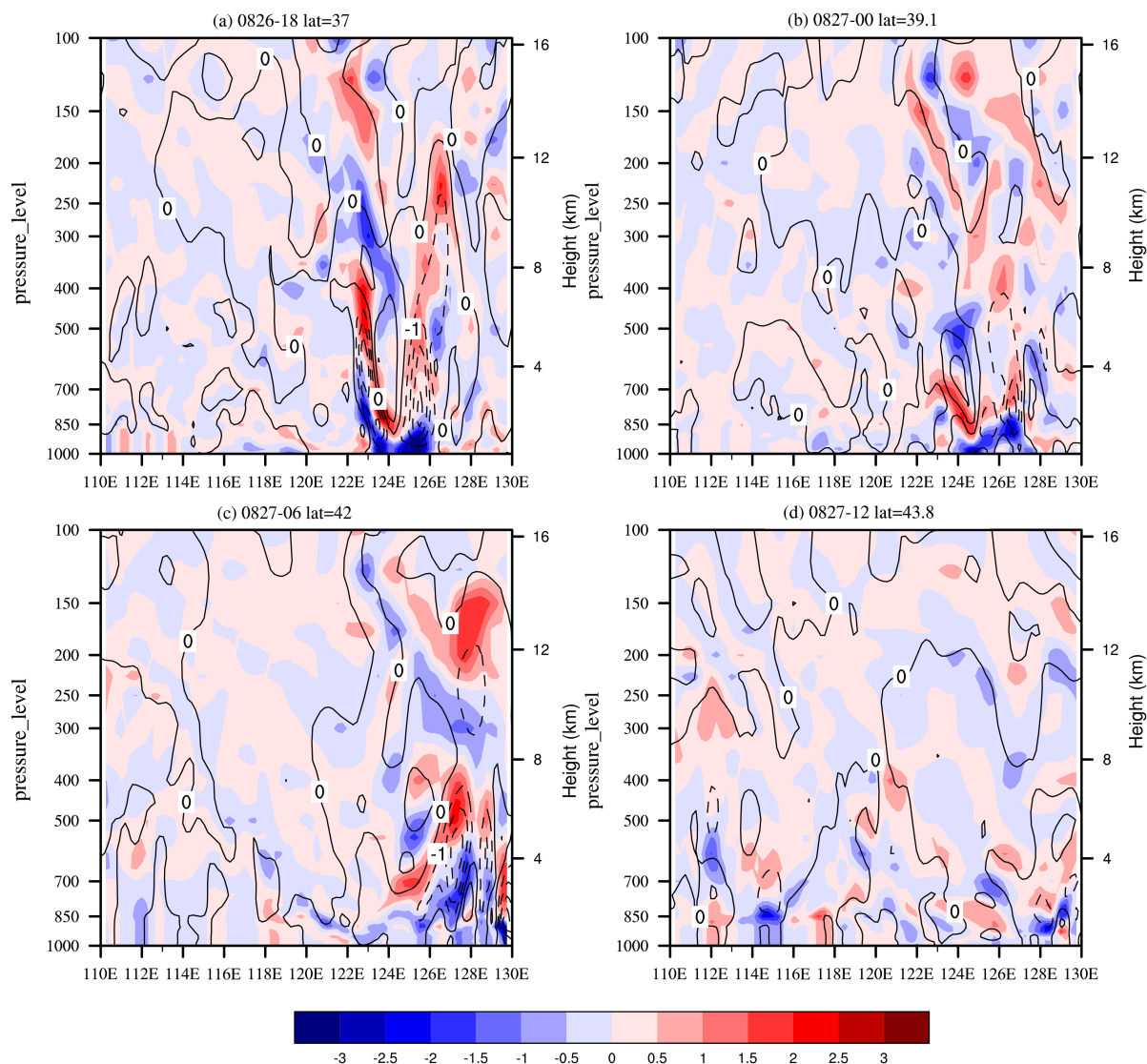


Figure 8. Perverse-height profile of horizontal divergence (unit: s^{-1}) along the center of Typhoon on 26 at 08 and 00, 06 and 12 on 27 August, 2020

图 8. 2020 年 8 月 26 日 18 时及 27 日 00、06、12 时, 水平散度沿台风“巴威”中心位置的经向 - 高度剖面图(单位: s^{-1})

4. 结论

本文利用 ERA5 的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的再分析资料、台风路径数据、英国哈德来中心提供的海温资料, 分析了“巴威”台风登陆时 500、850 hPa 的环流形势、台风降水时空分布特征和水平散度特征等, 主要得出以下结论:

1) “巴威”台风中心最低气压与地面最大风速的变化呈现出相反的关系, 二者均表征了台风的强度。台风“巴威”的移动路径是比较稳定的, 从低压扰动在关岛附近海域生成开始就几乎是一路向北行进, 仅在台湾附近的海域与登陆之后有着两次略微的转折, 总体上还是保持着向北移动的大方向。台风影响所致的降水大值区随台风中心位置的变动不断移动。

2) 环流形势场上, 西太副高偏西北一侧的西南气流的引导作用使得台风“巴威”的路径在登陆之前略微折向东北方, 而台风登陆之后由于高纬反气旋性环流的范围进一步扩大, 反气旋环流的槽线向南进

一步深入并且副高范围增大而路径略向西北方向弯曲行进。

3) “巴威”台风在急剧增强的过程当中, 台风中心周围低层维持一个辐合中心, 其高层则维持一个辐散中心, 这种情况有利于对流的发展, 为暴雨产生提供了有利的动力条件。

参考文献

- [1] 康志明, 陈涛, 等. 0604 号强热带风暴“碧利斯”特大暴雨的诊断研究[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 596-607.
- [2] 郭浩鑫, 杨杰颜, 等. 1522 号强台风“彩虹”特征分析[J]. 广东气象, 2016, 38(5): 6-9.
- [3] 梁宝荣, 陈秋吉, 丁绍金. 0907 号热带风暴“天鹅”特征分析[J]. 气象研究与应用, 2010(A2): 35-36.
- [4] 谭成坤, 彭自强, 等. 2010 年 11 号超强台风“凡亚比”浅析[J]. 民营科技, 2012(7): 69.
- [5] 蔡敏, 梁宝荣, 等. 1002 号台风“康森”的特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(33): 18897-18900.
- [6] 梁卉林, 唐晓东, 袁慧玲. 1211 号台风“海葵”降水特征分析[C]//中国气象学会. 第 30 届中国气象学会年会——S18 第四届研究生年会. 北京: 中国气象学会, 2013: 9.
- [7] 谭燕, 许晓林, 等. 0801 号台风“浣熊” (Noguri)特征分析及预报效果检验[J]. 大气科学研究与应用, 2010(1): 32-46.
- [8] 危国飞, 刘会军, 等. 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用[J]. 大气科学, 2021, 45(1): 195-204.
- [9] 张广平, 张晨晓, 等. 基于小程序的海洋牧场台风灾害预警预报服务[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 82-87.
- [10] 朱乾根, 林锦瑞, 等. 天气学原理和方法[M]. 第 3 版. 北京: 气象出版社, 2000: 489-489.
- [11] Palmen, E. (1948) On the Formation and Structure of Tropical Hurricanes. *Geophysica*, **3**, 26-38.
- [12] 俞玮. 台风暖心结构变化及其影响因子相关分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.
- [13] 韩芙蓉, 鹿翔, 冯晓钰, 等. 台风 Lekima (1909)登陆前后动热力结构变化对浙江极端降水的影响[J]. 热带气象学报, 2021, 37(1): 34-48.
- [14] 沈阳, 吴海英, 孙燕, 等. 热带气旋“利奇马”(1909)暖心演变分析及变性过程探讨[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 53-64.
- [15] Liu, M.J., Deng, L., Huang, W., *et al.* (2021) The Impact of Vertical Resolution on the Simulation of Typhoon Lekima (2019) by a Cloud-Permitting Model. *Frontiers of Earth Science*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11707-021-0923-8>