

进入内陆的两个台风降水特征对比分析^{*}

朱红芳 杨祖祥 王东勇 余金龙

ZHU Hongfang YANG Zuxiang WANG Dongyong YU Jinlong

安徽省气象台,合肥,230031

Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China

2017-12-27 收稿,2018-07-11 改回.

朱红芳,杨祖祥,王东勇,余金龙. 2019. 进入内陆的两个台风降水特征对比分析. 气象学报, 77(2):268-281

Zhu Hongfang, Yang Zuxiang, Wang Dongyong, Yu Jinlong. 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(2):268-281

Abstract Typhoon Haikui and Matmo made landfall in China and passed through Anhui Province in August 2012 and July 2014, respectively. Both of them caused regional heavy rainstorm in Anhui Province. By using daily observational data, the NCEP/NCAR reanalysis data and raindrop size distributions observed at Chuzhou, the tracks and the mechanisms of the rainstorms caused by the two typhoons are analyzed and compared. The results are as follows: (1) Typhoon Haikui and Matmo were distinctly different in their moving paths. The lasting time and heavy rainfall distributions of the rainstorms caused by the two typhoons were also quite different. Compared with Haikui, Matmo was characterized by faster moving speed, shorter rainfall duration, smaller cumulative rainfall and rainstorm range. In addition, the heavy rainfall duration associated with Matmo was longer and the precipitation intensity of the rainstorm center was greater. (2) Although strong water vapor transport and convergence occurred during the precipitation process associated with both Haikui and Matmo, their spatial and temporal distributions were different. Due to different water vapor transports, the heavy rainfall distribution of Haikui exhibited a zonal pattern, while that of Matmo showed a meridional pattern. Furthermore, the duration of moisture convergence can explain why the Matmo's rainfall duration was shorter than that of Haikui. However, the deep moisture convergence of Matmo made the heavy rainfall last longer and enhanced the rainfall intensity at the rainstorm center. (3) The precipitation of Haikui was a mixed type with the majority being stratiform precipitation, while the precipitation of Matmo was characterized by convective precipitation. During both of the two typhoon precipitation processes, short-period convective precipitation made large contribution to the total rainfall, and heavy rainfall mostly occurred on the left side of the area where environmental vertical wind shear occurred. (4) Matmo had higher raindrop concentration and larger raindrop size than Haikui. When the rainfall intensity is less than 10 mm/h, a large number of small raindrops contributed to the precipitation in both typhoons. On the contrary, when rainfall intensity is higher than 10 mm/h, the raindrop size increased while the number decreased. (5) The two typhoon precipitation processes showed a good exponential relationship between Z and R , which is consistent with their fitting curves. However, for different precipitation types of stratiform and convective precipitation, the values of a and b are obviously different in the $Z-R$ relationship. Therefore, for different types of precipitation, different $Z-R$ relationships should be used to estimate precipitation based on radar observations.

Key words Typhoon, Comparative analysis, Moisture convergence, Vertical wind shear, Raindrop size distribution (DSD)

摘 要 2012年8月台风海葵和2014年7月台风麦德姆登陆进入安徽省后,均造成了区域性暴雨或大暴雨天气。利用常规

^{*} 资助课题:中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-032)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201603)、安徽省气象局面上项目(KM201501)。

作者简介:朱红芳,主要从事天气预报服务、数值预报产品释用。E-mail: xzmhfnew@sina.com

观测资料、NCEP/NCAR再分析资料和雨滴谱资料,对这两个直接影响安徽省的台风移动路径和暴雨形成机制进行了对比分析。结果表明:(1)海葵和麦德姆的移动路径、停留时间和强降水分布特征有明显不同。与海葵相比,麦德姆的移动速度快、降水持续时间短、累计降雨量和暴雨范围较小;但其短时强降水持续时间长、暴雨中心降水强度更大。(2)海葵和麦德姆降水过程中均有强的水汽输送和辐合,但水汽输送方向的差异使得海葵和麦德姆的强降水空间分布分别呈纬向型和经向型特征。同时水汽辐合持续时间决定了麦德姆的降水持续时间比海葵短,但其较深厚的强水汽辐合使得麦德姆的短时强降水持续时间长、暴雨中心降水强度大。(3)海葵是以稳定性降水为主的混合型降水,麦德姆则呈现出明显的对流性降水特征;两次台风降水过程中均是短时间的对流性降水对总降雨量贡献最大,且强降水区域均位于风垂直切变的顺风切左侧。(4)麦德姆降水过程比海葵具有更高的雨滴数浓度和更大的降水粒子直径。当雨强小于10 mm/h时,两次台风降水过程均以小雨滴为主且数浓度较大;雨强>10 mm/h时,雨滴粒径增大但数浓度明显降低。(5)两次台风降水过程的雷达反射率因子-雨强($Z-R$)均有较好的指数关系且拟合曲线比较一致,但在不同降水类型即层云降水和对流性降水中,其 $Z-R$ 关系的 a 、 b 值差异较明显。因此,针对不同降水类型,应采用分型 $Z-R$ 关系来进行雷达降水定量估测。

关键词 台风,对比分析,水汽辐合,风垂直切变,雨滴谱

中图法分类号 P458

1 引言

热带气旋是影响中国的主要灾害性天气系统之一,其造成的灾害往往由热带气旋引发的强降水所致,因此,长期以来台风暴雨一直是人们关注的焦点(陈联寿等,1979)。近年来,中外学者在台风远距离暴雨、下垫面特征对暴雨的影响及增幅、台风暴雨的数值模拟和诊断分析等方面进行了大量的研究。结果表明,近海或登陆台风与地形、西风带槽和梅雨锋的相互作用将对暴雨强度、分布产生重要影响(陈联寿等,2001,2004;雷小途等,2001);登陆台风在与环境场发生作用时能否获得更有利的动力环境条件、水汽以及能量的补充,都可影响到强降水的强度和范围(程正泉等,2009);Li等(2012)也利用高分辨率理想数值模式TCM4(Tropical Cyclone Model version 4)对热带气旋外螺旋雨带形成和准周期活动动力机制进行了探讨,模拟结果发现热带气旋外雨带表现出22—26 h的准周期活动,并与边界层对流有效位能(CAPE)的恢复有紧密关系。由此可见,登陆台风暴雨产生原因复杂,且降水往往呈非对称特征,Meng等(2016a,2016b)对1311号台风尤特登陆后强降雨的特征等做了深入分析,并利用位涡反演方法对台风登陆后由西南季风加强引起的强降雨阶段进行了诊断分析,结果表明,环境风垂直切变和随之发展的地表冷池在尤特降水的不对称分布中起到了重要作用,强降雨主要发生在顺风切左侧,同时西南季风和中尺度对流系统外雨带之间的正反馈是尤特维持以及登陆后强降水不对称分布的重要机制。梁军等(2015)通过对比分析路径相似并均发

生变性的两个台风米雷(1105)和梅花(1109)对辽东半岛降水的不同影响,得出这两个台风不同的变性环境以及变性不同阶段有不同的对流分布特征,因而对辽东半岛的降水影响也不同。以上这些研究多集中在近海登陆的台风,而深入内陆的台风与大尺度环流的相互影响更加复杂,其引发的暴雨强度和落区研究仍需加强。

近年来随着探测技术的发展,雨滴谱资料的观测分析成为研究云降水物理特征的一个重要方面(王俊等,2016;周黎明等,2015)。金祺等(2015)利用滁州地基雨滴谱仪2011—2013年6—8月的观测资料,根据雨强及其随时间的变化将降水分成对流降水和层云降水,分析不同降水类型的雨滴谱特征。Chen等(2012)分析了台风莫拉克(0908)登陆前后雨滴谱特征及其微物理参量变化,探讨台风不同部位的云体结构区别。但中国对热带气旋内部云微物理过程的研究仍以卫星、雷达观测资料为主,台风雨滴谱的研究成果不多。

2010年以来影响安徽并造成暴雨的台风呈增多趋势,过境或在安徽境内填塞的台风有4个,其中以海葵(1211)和麦德姆(1410)对安徽造成的风雨影响较大,同时这两个台风在华东地区也产生了大范围的暴雨天气,但其强降水落区、持续时间等均存在显著差异。因此,文中利用常规观测资料、NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 逐6 h再分析资料以及安徽滁州地基雨滴谱仪观测资料从台风路径、环流形势及其降水性质等方面对这两次台风暴雨过程进行对比分析,并初步对强降水中心的雨滴谱特征及其微物理参数进行研究,以探讨造成差异的可能原因,从而增强对

内陆台风暴雨产生机制的认识,为台风暴雨预报提供参考。

2 台风海葵和麦德姆概况及其降水分布特征

2.1 海葵和麦德姆概况

图1给出了台风海葵和麦德姆的移动路径。2012年第11号台风海葵于8月3日08时(北京时,下同)在日本冲绳县东偏南的西北太平洋洋面上生成,并向西北偏西方向移动,于8日03时以强台风等级在浙江省象山县鹤浦镇沿海登陆。登陆后海葵继续向西北方向移动,8日20时进入安徽省东南部宁国县境内,并沿安徽省宁国、泾县、青阳、池州一线以5—10 km/h的速度缓慢移动,强度逐渐减弱;9日11时后原地回旋少动,12时减弱为热带低压,23时在池州停止编报。

2014年第10号台风麦德姆7月18日02时在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成,并沿西北偏北方向移动;于7月23日15时在福建省福清市高山镇沿海登陆,登陆时为强热带风暴。登陆后麦德

姆以20 km/h左右的速度逐渐向偏北方向移动,24日16时前后从江西省上饶市进入安徽省南部休宁县境内;25日03时后由安徽东部滁州市移入江苏省,10时后再次入海。

2.2 降水分布特征

海葵自2012年8月8日凌晨登陆浙江后,移动速度先快后慢,对中国的风雨影响时间长达4 d(7—10日)。从海葵降水分布来看(图略),其登陆后深入内陆的过程中,8—9日在安徽、江苏、浙江三省交界处有强降水发生;10日强降水位于江西省北部。麦德姆于2014年7月23日下午在福建沿海登陆,其移速一直较快,降水影响时间仅有2 d,即23—24日;受其影响,自福建东部、安徽中东部、江苏西部至山东东部先后出现暴雨(图略)。

大量研究表明,台风暴雨不仅可在登陆前后发生,在有利条件下台风低压深入内陆后与中纬度西风带天气系统相互作用,亦可带来超过登陆时的特大暴雨(陈联寿等,2017;程正泉等,2009),造成严重灾害,如2005年泰利(何立富等,2006)和2008年凤凰(谢义明等,2011),均对华东地区造成了严重影响。由海葵和麦德姆这两次台风降水过程的逐日降水分布(图略)来看,两者在登陆北上时,均有冷空气的侵入和变性,加剧了台风暴雨的发生、发展。因此,本研究选取了冷空气与台风低压结合前后的影响时段,其中海葵的影响时段为2012年8月8日08时—9日20时,麦德姆为2014年7月24日08时—25日08时;同时统计了逐日降水的暴雨站数,发现上述影响时段也是各台风降水过程中的最强降水时段。文中亦重点针对上述时段进行分析。从累计雨量分布(图2)可见,海葵强降水集中在安徽、江苏、浙江三省交界处,其中,安徽中南部、江苏南部普遍超过50 mm,而100 mm以上的强降水中心分别位于安徽东南部、江苏南部;强降雨带为东西走向,纬向特征明显。而麦德姆大暴雨中心分别位于安徽东部、江苏西部和山东东部;强降雨带呈东北—西南向分布,经向特征明显。

3 暴雨成因对比分析

3.1 环流形势对比分析

台风的移动路径和维持时间主要受引导气流和大尺度环流控制(陈联寿等,2001;李英等,2004)。海葵和麦德姆登陆前,海上的西太平洋副热带高压

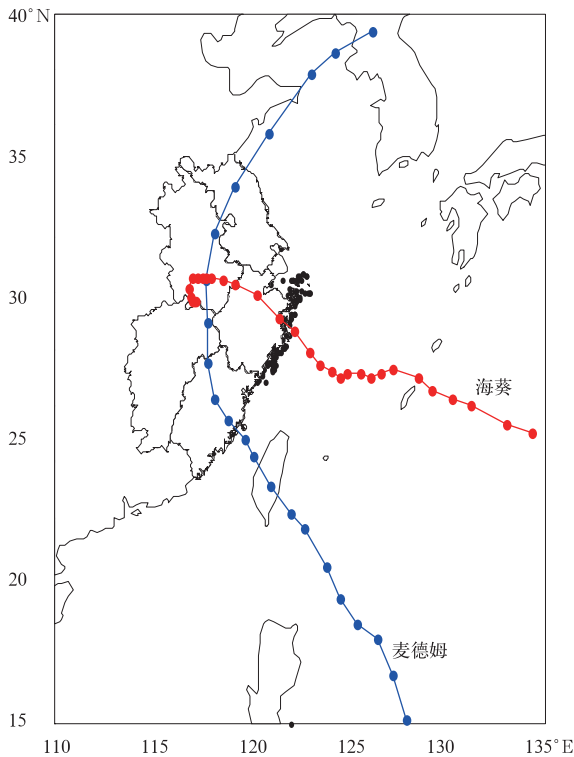


图1 海葵和麦德姆的移动路径
Fig. 1 Observed tracks of Haikui and Matmo

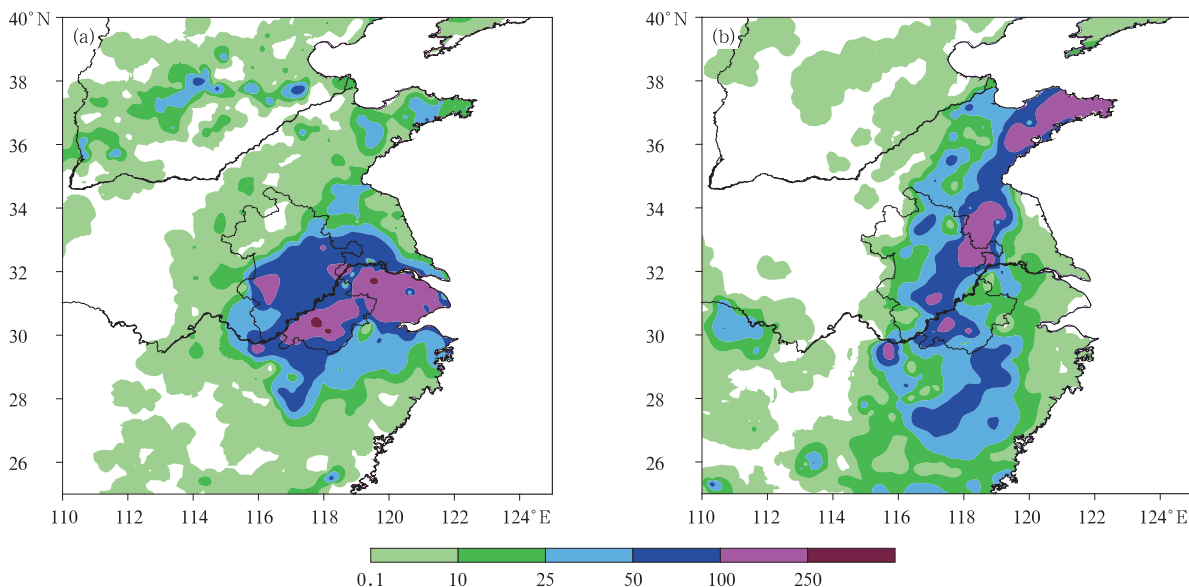


图2 海葵2012年8月8日08时—9日20时(a)和麦德姆2014年7月24日08时—25日08时(b)累计雨量(单位:mm)分布

Fig. 2 Accumulated precipitation (unit: mm) of Haikui from 08:00 BT 8 to 20:00 BT 9 August 2012 (a) and Matmo from 08:00 BT 24 to 08:00 BT 25 July 2014 (b)

(副高)比较强盛,且形状也较相似,均伸向内陆与大陆高压相连呈东西带状走向,副高南侧的偏东南气流引导台风稳定地向西北方向移动;登陆后,由于副高形态、演变的不同以及台风低压环流北侧中、高纬度地区的环流形势不同,使得海葵和麦德姆的移动路径出现了不同的偏折。

图3为2012年8月8日08时—9日20时和

2014年7月23日20时—25日08时500 hPa平均高度场,分析可知:海葵台风暴雨过程中,其北侧有一稳定、窄长的东西向高压坝形成,自海上一直深入到青藏高原东部;这个高压坝阻挡了海葵的北上,其南侧的偏东气流引导海葵往西移动;同时由于这个高压坝的存在,北方南下的冷空气难以迅速到达江淮流域与台风结合,因此海葵不会因为冷空气的

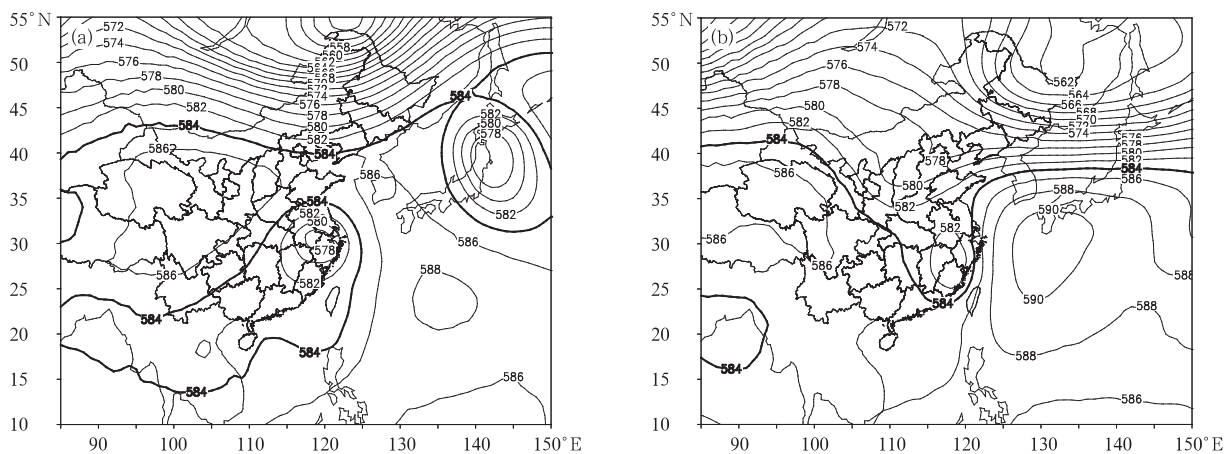


图3 2012年8月8日08时—9日20时(a)和2014年7月23日20时—25日08时(b) 500 hPa平均高度场(单位:dagpm)

Fig. 3 Mean geopotential height fields at 500 hPa (unit: dagpm) averaged from 08:00 BT 8 to 20:00 BT 9 August 2012 (a) and from 20:00 BT 23 to 08:00 BT 25 July 2014 (b)

侵入而快速消亡,从而使得低压环流滞留安徽少动,维持时间长达3 d,直至12日才消散。麦德姆影响安徽时,在河套地区有西风槽快速东移,槽后西北气流明显,冷空气沿西北路径入侵台风外围,激发台风环流西北侧的对流发生发展;同时前期自华东沿海伸向长江中、上游的带状副高断裂后减弱东退,副高主体呈块状位于东海海面,对台风北上和西风槽南下无明显的阻挡作用,当台风低压与西风槽结合后能快速东移出海,因此麦德姆移速远快于海葵,其降水持续时间明显短于海葵。

可见,两次台风影响期间其大尺度环境场有明显差异,海葵造成苏皖一带强降水主要是由台风本体引起的,后期有弱冷空气的渗透;而麦德姆则受台风和中纬度西风槽共同影响,冷空气活动较明显。

3.2 水汽条件分析

充沛的水汽输送是产生暴雨的首要条件,利用NCEP/NCAR再分析资料计算2个台风的水汽通量(图4)可知:(1)海葵登陆后,850 hPa上其中心北侧低层一直维持强的东南急流,风速均超过20 m/s,同时在江苏南部到安徽沿江江南一带有中心值高达 $48 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$ 的东西向水汽通量大值区将水汽由东海向西输送到台风暴雨区与之相配合。而麦德姆的水汽输送以南侧为主,其中心南侧的西南急流要略弱于海葵,南北向的水汽通量大值区位于浙江及其沿海附近,中心值为 $40 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$,较海葵略弱。(2)水汽输送的差异导致了两者强降水的空间分布也存在较大差异:海葵强降水的纬向性较强,沿台风北侧的偏东风急流呈东—

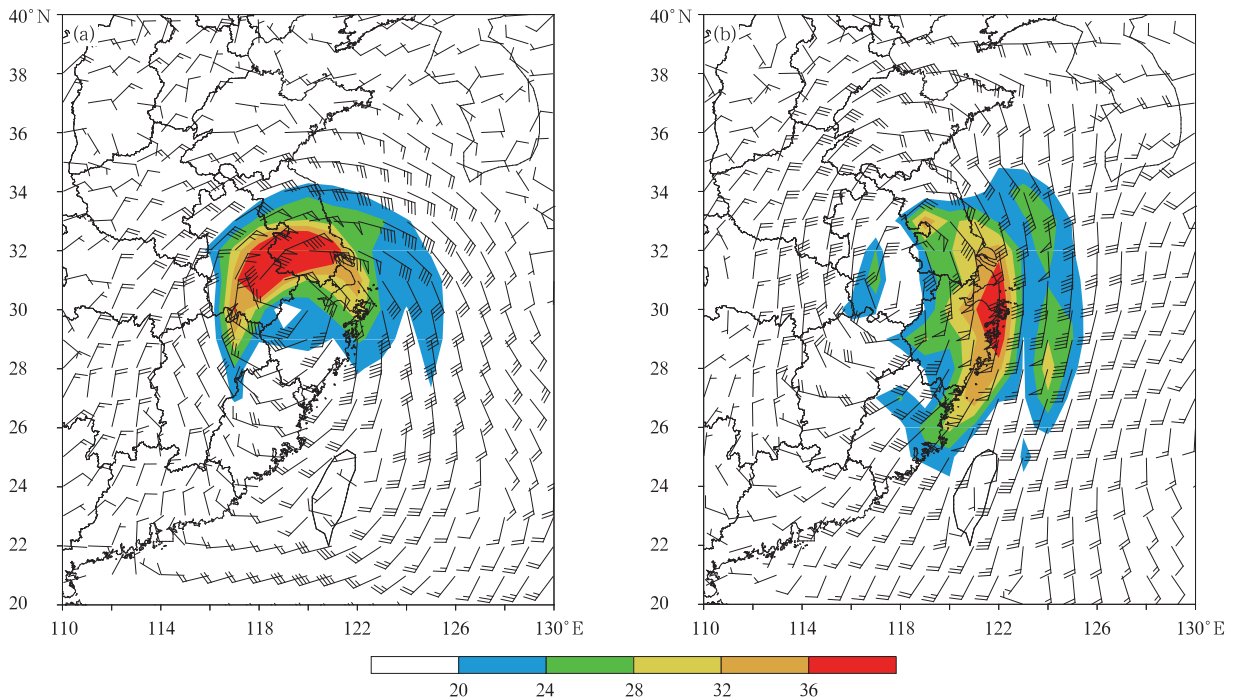


图4 2012年8月8日20时(a)和2014年7月24日20时(b)850 hPa风场(风矢)和水汽通量(色阶,单位: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$)

Fig. 4 850 hPa wind fields (barbed arrow) and moisture fluxes (shaded, unit: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$) at 20:00 BT 8 August 2012 (a) and 20:00 BT 24 July 2014 (b)

西向分布;而麦德姆强降水的经向特征明显,沿台风倒槽呈东北—西南向分布。

由此可见海葵和麦德姆降水过程中均有强的水汽输送和辐合,从而导致了这两次台风降水过程都达到暴雨量级,但水汽输送方向的差异使得海葵和

麦德姆的强降水空间分布分别呈纬向型和经向型特征。

3.3 环境风垂直切变

研究表明,在环境风垂直切变的作用下,热带气旋内对流和降水趋于集中在顺切变方向的左侧(余

贞寿等,2009;李英等,2013);Yu等(2010)利用热带测雨卫星(TRMM)产品等资料对2006年台风碧利斯进行分析,结果表明环境风垂直切变对碧利斯降水的非对称结构有极大影响,强降水区通常发生在顺风切附近或其左侧。

文中采用Palmer等(2006)的环境风垂直切变计算方案,即计算以台风中心为原点的10个经纬距区域内200与850 hPa平均风场的垂直切变。图5是海葵和麦德姆台风区域的平均风矢量垂直分布(图5a,b)以及台风区域200与850 hPa平均风垂直

切变(图5c,d)随时间的演变。可见海葵和麦德姆影响期间,其台风区域的平均风速分布差异显著。海葵强降水期间,其各层均为较强的东南风,环境风垂直切变增强至约5 m/s,风向为西南风;麦德姆强降水时段各层由南风转为西南风,环境风垂直切变大于海葵,由2 m/s增强至约6 m/s,风向也是西南风。对比雨量分布来看,两个台风的强降水区域与风垂直切变分布都有较好的对应关系,均位于顺风切左侧,这与Yu等(2010)和梁军等(2015)的研究结果一致。

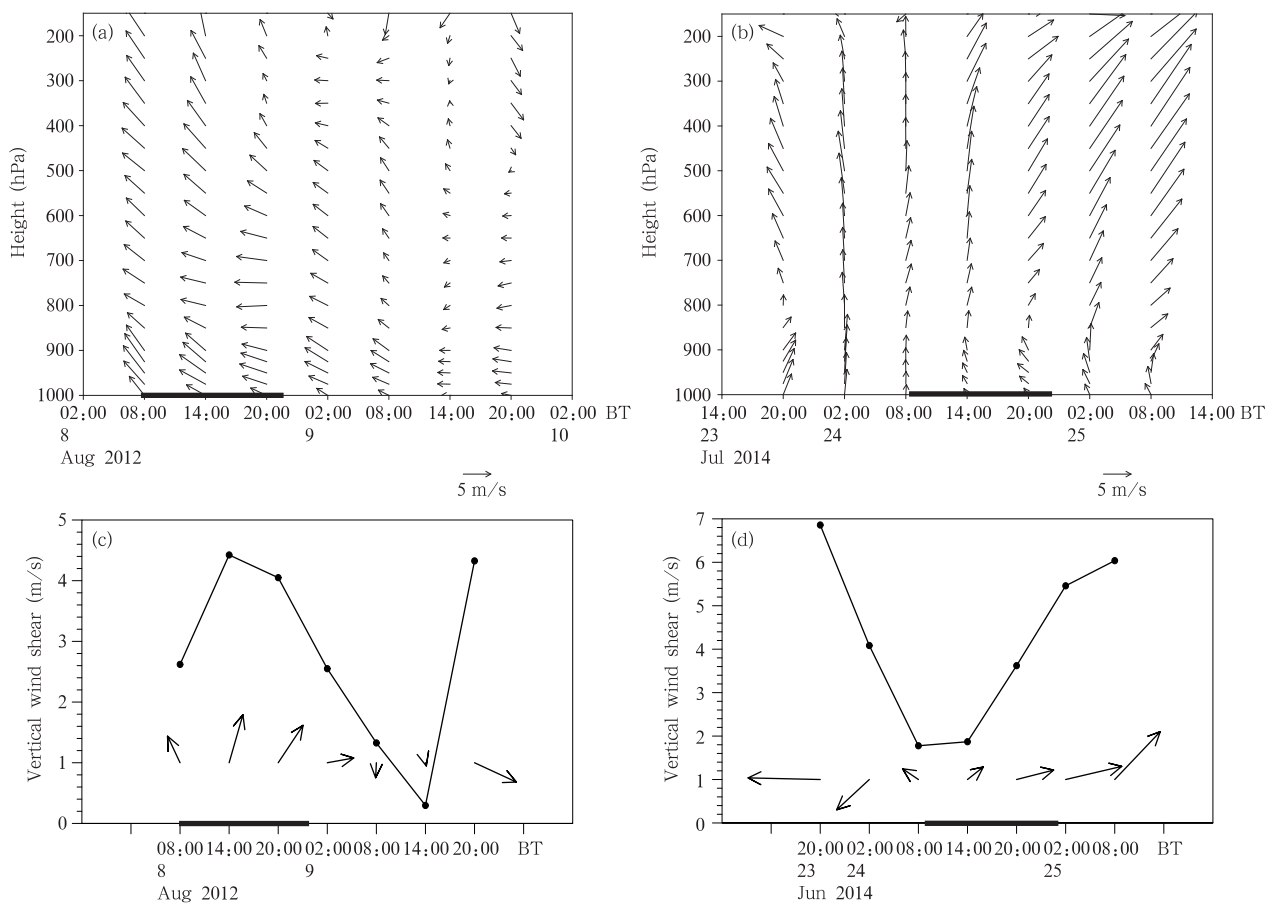


图5 台风区域平均风矢量(a. 海葵, b. 麦德姆,单位:m/s)高度-时间演变及其风垂直切变(c. 海葵, d. 麦德姆,箭头为方向,折线为200 hPa与850 hPa风切值,单位:m/s)时间演变
(横坐标上的粗线段为强降水时间)

Fig. 5 Height-time cross sections of wind vectors (vectors, unit: m/s) averaged over the areas of Haikui (a) and Matmo (b) and temporal variations of vertical wind shear (between 200 hPa and 850 hPa) averaged over the areas of Haikui (c) and Matmo (d)
(arrows indicate the direction of vertical wind shear and curves show their magnitudes in unit of m/s, bold lines on the abscissa indicate the period of heavy precipitation)

3.4 不稳定条件分析

假相当位温(θ_{se})是表征大气温、湿状况的物理量,可反映大气的的不稳定情况。图6为2012年8月8日20时和2014年7月24日20时850 hPa风场和 θ_{se} 沿32°N的垂直剖面,可见,海葵影响期间,900 hPa以下为350 K以上的高温、高湿区,远离台风中心西侧700 hPa附近有一320 K的冷中心,始终位于114°E以西,即冷空气主体偏西;8月8日20时(图6a)500 hPa以下有346 K的相对低值区自西向东伸展到台风中心附近,在风场上表现为东北风,

这表明有弱冷空气从东北部侵入,叠加在低层高能舌上,造成对流不稳定进而引发强降水。麦德姆降水过程中近地面层为中心值高达364 K的 θ_{se} 大值区,在台风中心略偏西一侧114°E处有338 K的冷中心,且位于600 hPa附近的冷中心随着西北到偏北风逐渐东移至台风中心附近;7月24日20时(图6b)冷空气自600 hPa向东、向低层推进至台风中心所在位置,800 hPa以下等 θ_{se} 线陡立密集,在台风中心西侧有明显的能量锋区,假相当位温梯度远大于海葵,更有利于对流不稳定的发展,产生暴雨。

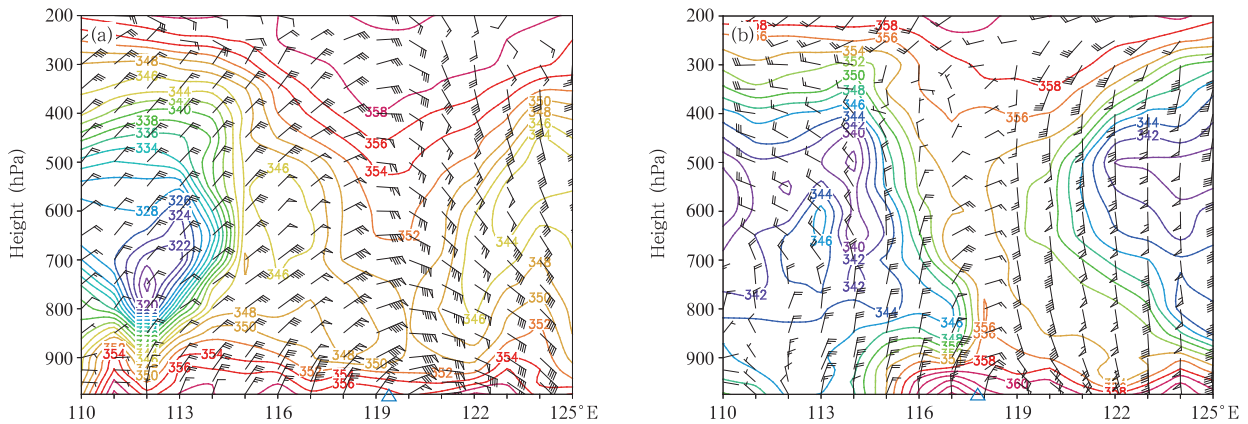


图6 2012年8月8日20时(a)和2014年7月24日20时(b)850 hPa风场(风矢)和 θ_{se} (等值线,单位:K)沿32°N的垂直剖面
(△为台风中心所在位置)

Fig. 6 Vertical cross sections of 850 hPa wind field (barbed arrow) and pseudo-equivalent potential temperature θ_{se} (contours, unit: K) along 32°N at 20:00 BT 8 August 2012 (a) and 20:00 BT 24 July 2014 (b) (△ shows the center of the typhoon)

以上分析表明,海葵和麦德姆影响期间,低层大气均为高温、高湿,且都有较强的不稳定能量;但麦德姆有密集的能量锋区、更大的假相当位温梯度,其对流性降水特征更明显。

4 海葵和麦德姆在安徽暴雨差异性的对比分析

4.1 降水特征分析

对比台风海葵和麦德姆在安徽的移动(图1)及降雨分布(图7)可知:(1)海葵在安徽境内直至填塞移动速度仅为5—10 km/h,维持时间约24 h;具有移动速度慢、影响时间长的特点。而麦德姆在安徽滞留时间约12 h,移动速度为20—30 km/h;与海葵

相比,其移动速度快、影响安徽的时间较短。(2)2012年海葵影响安徽期间,强降水主要位于安徽淮河以南地区,8日08时—9日20时(图7a)大别山区、江淮之间东部和江南地区出现大暴雨;2014年麦德姆影响安徽省期间淮河以南地区有强降水,但强降水范围小于海葵,24日08时—25日08时(图7b)大暴雨区位于大别山区、江淮之间中东部以及江南西部地区。

进一步分析两次台风降水过程中安徽省加密自动雨量站的逐时降水 ≥ 10 mm、 ≥ 25 mm站数和最大小时雨强(图8)可知,海葵台风降水过程持续时间长达36 h,降水主要特点是降水时间长,累计雨量大;强降水时段(雨强 ≥ 25 mm/h)可分为8日10

时—21 时和 9 日 13 时—20 时两个阶段,但仅有 2 个时次的最大雨强超过 50 mm/h,过程最大雨强为 51.3 mm/h。而麦德姆的降水持续时间仅为 17 h

(24日11时—25日03时);强降雨时段为24日12—23 时,有 14 个时次的最大雨强均超过 50 mm/h,过程最大雨强达95.2 mm/h,强度远超过海葵降水

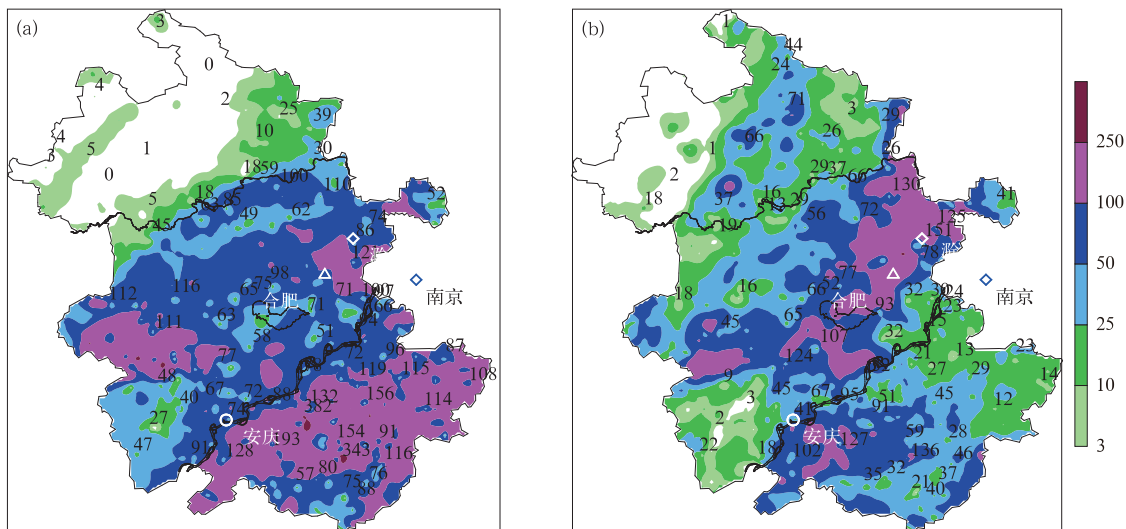


图 7 安徽省累计雨量(单位:mm)分布

(a. 2012年8月8日08时—9日20时, b. 2014年7月24日08时—25日08时;
白色○、白色◇、蓝色◇分别为安庆、滁州、南京所在位置,白色△为32°N,118°E点所在位置)

Fig. 7 Accumulated precipitation (unit; mm)

(a. 08:00 BT 8 - 20:00 BT 9 August 2012, b. 08:00 BT 24 - 08:00 BT 25 July 2014; white ○, white ◇ and blue ◇ mark the locations of Anqing, Chuzhou and Nanjing, respectively, white △ marks the location of 32°N, 118°E)

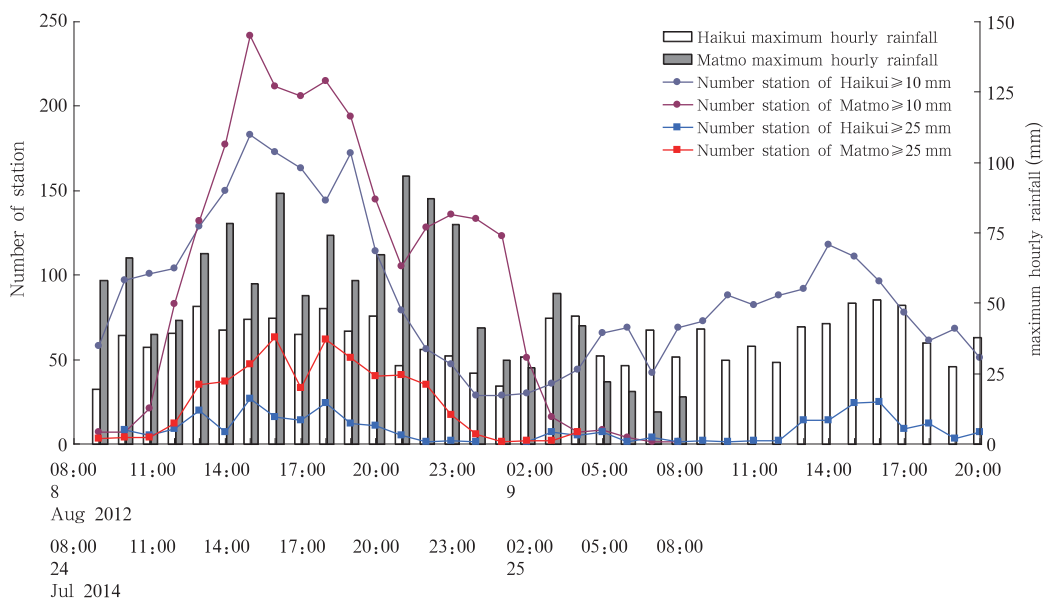


图 8 海葵和麦德姆降水过程中逐时降水[10 mm, ∞)、[25 mm, ∞)的站数以及最大雨强

Fig. 8 Number of stations with hourly rainfall in [10 mm, ∞), [25 mm, ∞) and the maximum hourly rainfall during the precipitation processes of Haiyui and Matmo

过程。

综上所述,这两个台风都给安徽造成了大范围的暴雨天气。与海葵相比,麦德姆的降水持续时间短、累计降雨量略小,暴雨发生面积也较小,但其短时强降水持续时间长、暴雨中心降水强度更大。

4.2 强降水中心水汽、不稳定能量的对比分析

由上分析可知,这两次台风降水过程的最大小时雨强均出现在滁州站(图7中白色◇)附近,因此,针对江淮之间东部暴雨中心的水汽条件、不稳定条件进行对比分析。

降水强度的差异主要受水汽输送的强度和持续时间的影响(李英等,2005;孙力等,2015)。图9为海葵、麦德姆台风降水过程中水汽通量散度在江淮

东部强降水中心(32°N,118°E,图7中白色△)的高度-时间剖面,可见海葵自8月8日20时开始水汽辐合,一直持续至9日20时;强水汽辐合集中在900 hPa以下,水汽辐合中心值达 $-20 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$;麦德姆自7月24日14时开始较明显水汽辐合,25日02时后逐渐减弱,维持时间较海葵短;辐合中心值也为 $-20 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$,但其强水汽辐合高度在24日20时前后伸展至800 hPa以上,与海葵相比有更深厚的水汽辐合层。以上分析表明水汽辐合持续时间决定了麦德姆的降水过程持续时间比海葵短,但其较深厚的强水汽辐合使得麦德姆的短时强降水持续时间更长、暴雨中心降水强度更大。

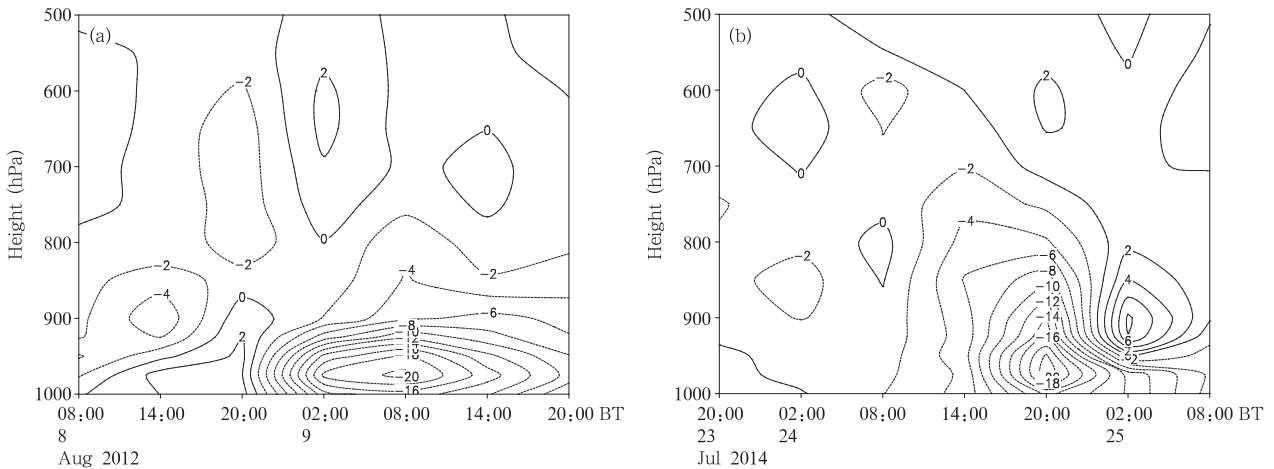


图9 2012年8月8日08时—9日20时(a)和2014年7月23日20时—25日08时(b)水汽通量散度(单位: $10^{-6} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$)在强降水中心(32°N, 118°E)的高度-时间剖面

Fig. 9 Height-time cross sections of moisture flux divergence (unit: $10^{-6} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$) through the precipitation center at (32°N, 118°E) from 08:00 BT 8 to 20:00 BT 9 August 2012 (a) and from 20:00 BT 23 to 08:00 BT 25 July 2014 (b)

使用常规探空资料对两次台风降水过程进行分析,从安庆(图7中白色○)、南京(图7中蓝色◇)的各时次对流有效位能(图10)可见:(1)两站的各时次对流有效位能在麦德姆降水过程中均明显大于海葵。海葵降水过程中安庆的对流有效位能最大为690 J/kg,南京最大为1167 J/kg;而麦德姆降水过程中安庆的对流有效位能峰值达2815 J/kg,南京站峰值为2809 J/kg,且均连续2个时次超过2000 J/kg;这表明麦德姆台风降水的不稳定能量要远高于海

葵。(2)两站的对流有效位能在两次降水过程中均表现出前期增大、后期下降的特征,即能量的聚集、释放过程。在海葵降水过程中对流有效位能小幅波动,能量的聚集、释放不明显;而麦德姆降水过程中24日08—20时对流有效位能有一陡降,说明此过程中对流能量的聚集、释放过程非常明显且快速。

再结合两次过程的逐时雨量分析,可知海葵台风降水是以稳定性降水为主的混合型降水,而麦德姆台风降水则呈现出明显的对流性降水特征。

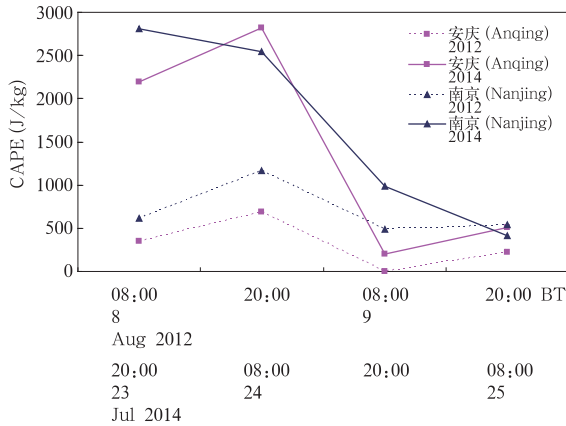


图 10 安庆、南京的 CAPE(单位: J/kg)演变
Fig. 10 Temporal evolutions of CAPE (unit: J/kg)
at Anqing and Nanjing

4.3 雨滴谱特征分析

近年来雨滴谱资料的研究表明,随着降水云系和降水形成机制等的不同,雨滴谱特征有明显差异,文中利用滁州地基(32.3°N,118.31°E,图7中白色◇所在位置)雨滴谱仪的观测资料对两次过程中位于江淮东部的强降水中心进行分析。

4.3.1 数据处理

首先采用 Tokay 等(2010)方法对雨滴谱数据进行质量控制,即对于每分钟的数据,如果总雨滴数小于 10 或者雨强小于 0.1 mm/h,则该数据被剔除,反之则记为有效降水分钟数。再计算雨滴数浓度 $N(D)$

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot t \cdot V_j \cdot \Delta D_i} \quad (1)$$

式中, n_{ij} 为第 i 个直径通道、第 j 个速度通道的雨滴数, A (单位: m^2) 和 t (单位: s) 分别为取样面积和取样时间, V_j (单位: m/s) 为第 j 个速度通道的雨滴下落末速度, D_i (单位: mm) 为第 i 个直径通道的雨滴直径, ΔD_i 为对应的分档尺度间隔, $N(D_i)$ (单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$) 为第 i 个直径通道 D_i 至 $D_i + \Delta D_i$ 的雨滴数浓度。

通过 $N(D_i)$ 可计算质量加权平均直径 D_m (单位: mm)、反射率因子 Z (单位: mm^6/m^3)、雨强 R (单位: mm/h)、雨水含量 W (单位: g/m^3) 和标准化参数 N_w (单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$) (金祺等, 2015) 等雨滴谱参数, 其中

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_w} \left(\frac{10^3 W}{D_m^4} \right) \quad (2)$$

式中, ρ_w (近似为 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$) 为雨水密度。 N_w 也是反映雨滴数浓度大小的物理量。

4.3.2 降水参数对比分析

统计分析滁州站的雨滴谱资料,首先根据雨强及其随时间的变化对其降水类型进行划分(Chen, et al, 2013),具体是:若在持续 10 min 以上的时段内,雨强大于 5 mm/h,且雨强标准偏差大于 1.5 mm/h,则识别为对流性降水;雨强为 0.5—5 mm/h,且该时段内雨强标准偏差小于 1.5 mm/h,则识别为层状云降水。两个条件均不满足的,则为其他类型降水;文中重点对层状云降水和对流降水进行讨论,不考虑其他类型降水。计算后可知:海葵总有效降雨时数为 1569 min,其中,层状云降水发生时数为 576 min,对流降水为 173 min,分别占总降雨时间的 37% 和 11%;总降雨量为 129.1 mm,其中,对流降水量为 90.3 mm,主要集中在 9 日 12—14 时,占总降雨量的 70%;层云降水量为 17.9 mm,占总降雨量的 14%。而麦德姆总有效降雨时数为 827 min,其中,层云降水 303 min,对流降水 183 min,分别占总降雨时间的 37% 和 22%;总降雨量为 97.6 mm,其中,对流降水为 73.8 mm,主要发生在 24 日 19—22 时,对总降雨量的贡献为 76%;层云降水仅为 9.4 mm,占总降雨量的 9%。以上分析表明两次降水过程中均是短时间的对流性降水对总降雨量贡献最大;海葵降水持续时间约为麦德姆的 2 倍,其层云降水对总降雨量的贡献大于麦德姆,但麦德姆的对流性降水时间要长于海葵。

图 11 为这两次台风降水过程中雨滴数浓度 $\lg N(D)$ 及雨强的时间分布,分析可知:(1)海葵的降水大多数时间比较平稳,9 日 12—14 时雨强陡增,最大雨强超过 100 mm/h;麦德姆的降水持续时间明显短于海葵,且降水波动剧烈,最大雨强也超过 100 mm/h。(2)麦德姆降水过程中观测的雨滴数浓度普遍高于海葵,但强降水时段麦德姆与海葵的雨滴数浓度基本相当。海葵大部分降水时段中 $\lg N(D)$ 为 1.7—2.2 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,但 9 日 12—14 时雨滴数浓度 $\lg N(D)$ 达到 3.2 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$;而麦德姆整个降水时段中雨滴数浓度 $\lg N(D)$ 普遍大于 2.2 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,最大超过 3.2 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。(3)从粒子直径分布情况看,两次降水过程的最大粒子直径都达到 5 mm。但海葵降水过程中浓度大值区 ($\lg N(D) > 1.7 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,下同) 的降水粒子直

径普遍为 1 mm 左右;而麦德姆浓度大值区的降水粒子直径基本为 2 mm,其中 24 日 20 时前后有数小

时达到 3 mm。这表明麦德姆比海葵具有更高的雨滴数浓度和更大的降水粒子。

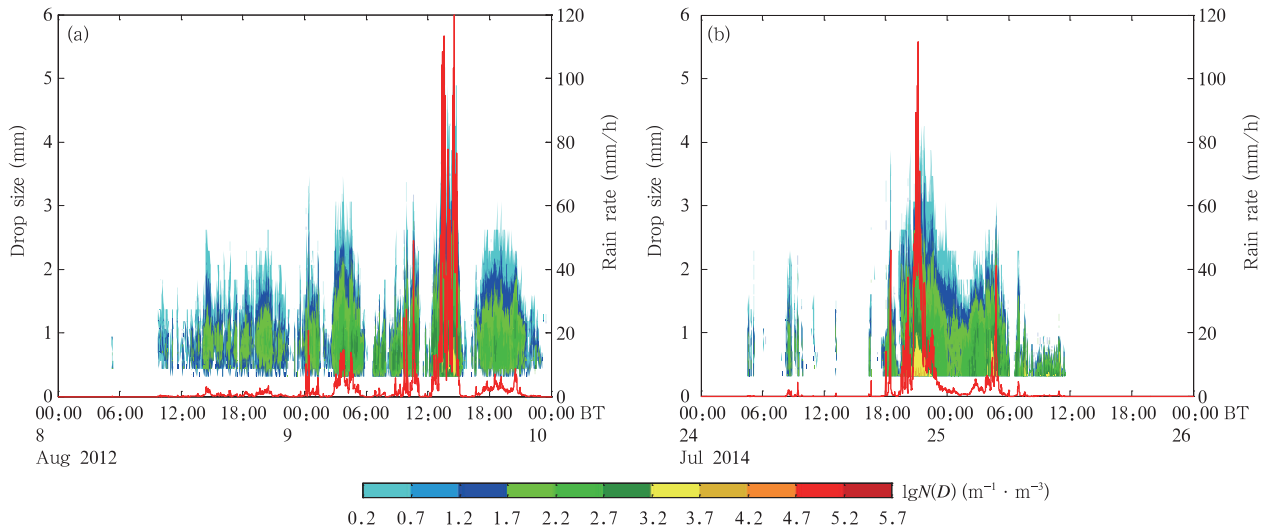


图 11 2012 年(a)和 2014 年(b)两次台风降水过程中滁州站的雨滴谱时间分布
(雨滴直径范围:左侧纵坐标,色阶;雨强:右侧纵坐标,红色线)

Fig. 11 Time series of raindrop size distributions (DSD) at Chuzhou (shaded: left Y-axis, raindrop concentration; red line: right Y-axis, rain rate) during the precipitation processes of Haikui (a) and Matmo (b)

4.3.3 雨滴谱参数的对比分析

从两次台风降水过程中质量平均直径(D_m)、标准化参数($\lg N_w$)与雨强的散点分布(图 12)可见:(1)两次台风降水过程中,雨强较小时(<10 mm/h),雨滴粒径分布范围为 0.5—2 mm,以小雨滴为主且数量较多。雨强 >10 mm/h 时,雨滴粒径普遍超过 1.5 mm,且雨滴尺寸随雨强增大而增大;但雨滴密度变得稀疏(图 12a),这表明直径超过 2 mm 的大粒子数量明显减少,同时雨强越大,大雨滴数量越少。此外,对比来看,大雨强时,在降雨率相同的情况下,海葵降水的雨滴粒径大于麦德姆。(2)雨强较小时(图 12b), $\lg N_w$ 分布范围较广;随着雨强增大,其值随之缓慢变大,增大到一定程度后保持稳定。而大雨强时,相同雨强的 $\lg N_w$ 是海葵小于麦德姆,表明此时麦德姆降水有更高的雨滴数浓度。

4.3.4 Z-R 关系的分析

目前雷达定量估测降水最常用的方法是雷达反射率因子-雨强(Z-R)关系法($Z = aR^b$),经验公式为 $Z = 300 R^{1.4}$;但 Z-R 关系会随地域、时间和降水性质等发生变化,这对降水估测的影响很大。由雨滴

谱资料可直接计算出反射率(Z)和雨强(R),通过拟合可确定更合适的 Z-R 关系,从而提高雷达估测降水精度。

由海葵和麦德姆两次台风降水过程的 Z-R 散点图及其拟合的 Z-R 关系式(图 13a)可见:两次过程的 Z-R 关系与经验公式有明显差别,系数 a 均小于 300,指数均大于 1.4;两者比较来看,两次过程整体拟合曲线比较一致,与这两次过程均为混合型降水有关,其指数 b 的差别不大;但海葵的系数 a 要大于麦德姆,这表明海葵的层云降水占了较大比重。

现有的研究表明,对流降水和层云降水的 Z-R 关系差别也很大,一部分研究显示对流降水的 a 值更大(Sharma, et al, 2009; 冯雷等, 2009; 金祺等, 2015);另一部分观测研究发现层云降水的 a 值更大(Moumouni, et al, 2008; 吴亚昊等, 2016)。为进一步分析不同降水类型对 a 、 b 值的影响,将两次台风降水过程中的层云降水、对流降水样本分别合并,并拟合各自的 Z-R 关系,图 13b 为不同降水类型(S:层云降水,C:对流降水)Z-R 关系散点分布及其对应的 Z-R 关系式。可见降水类型不同,其 Z-R

关系差异较明显:层云降水的系数 a 约为对流降水的 3 倍,远大于对流降水;但对流降水的指数 b 要明显大于层云降水。由此可见在不同地区、针对不同

降水类型,应采用分型 $Z-R$ 关系来进行雷达定量估测降水。

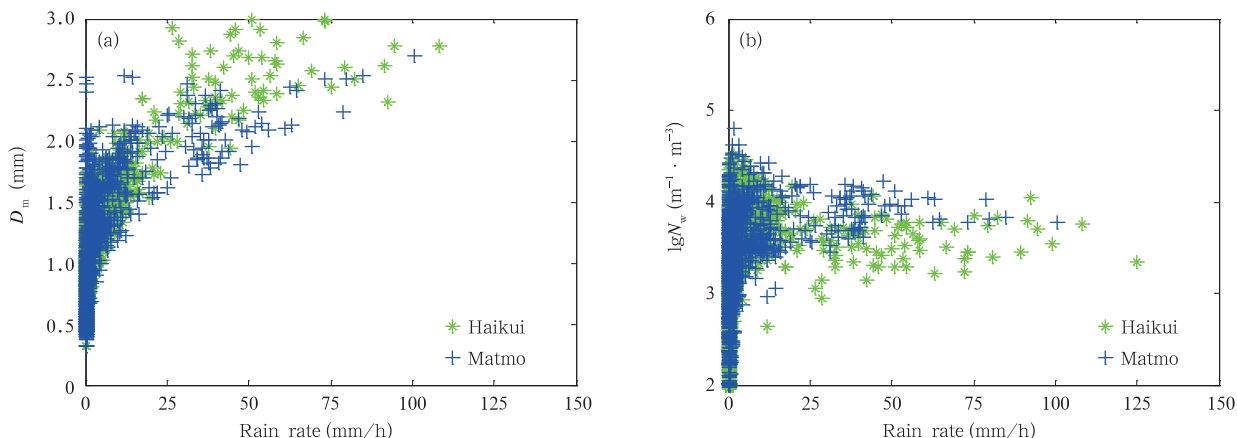


图 12 两次台风降水过程中质量平均直径 D_m (a)、标准化参数 $\lg N_w$ (b) 与雨强的散点分布

Fig. 12 Relationships of D_m-R (a) and $\lg N_w-R$ (b) during the precipitation processes of Hai kui and Matmo

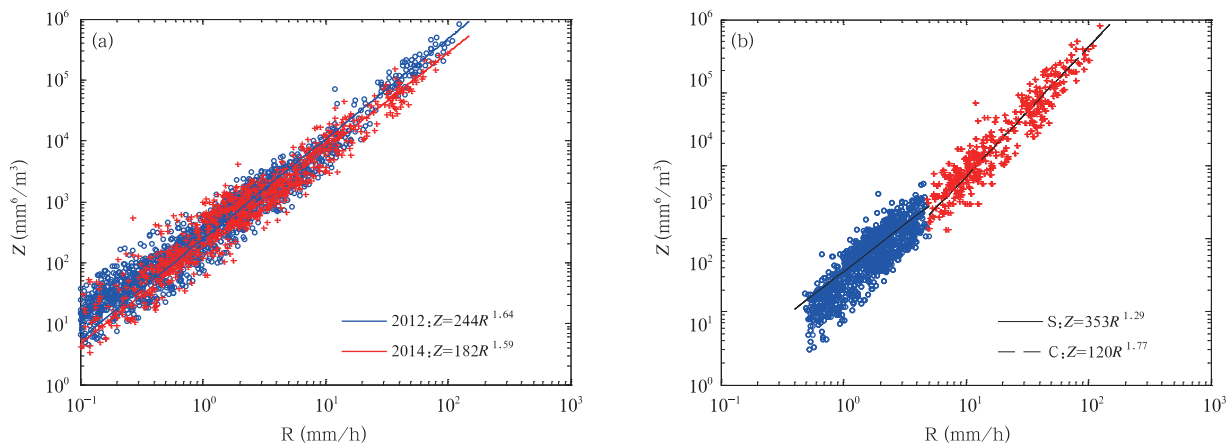


图 13 两次台风降水过程的 $Z-R$ 散点分布 (o:海葵, +:麦德姆)(a)、不同降水类型的 $Z-R$ 散点分布 (b)(o:层云降水, +:对流降水) 及其估算的 $Z-R$ 关系式

Fig. 13 Relationships of $Z-R$ during the two precipitation processes (a) (o: Hai kui, +: Matmo) and for different rain types (b) (o: stratiform precipitation, +: convective precipitation)

5 结 论

利用常规观测资料、NCEP GFS 资料和雨滴谱资料对影响安徽的海葵和麦德姆两次台风降水过程进行了对比分析和研究,结果表明:

(1) 海葵和麦德姆登陆后,由于副高形态、演变

的不同以及台风低压环流北侧中、高纬度地区的环流形势不同,使得它们的移动路径、滞留时间和强降水分布特征有明显不同。与海葵相比,麦德姆的移动速度快、降水持续时间短、累计降雨量和暴雨范围较小;但其短时强降水持续时间长、暴雨中心降水强度更大。

(2) 海葵和麦德姆降水过程中均有强的水汽输送和辐合,海葵主要由其中心北侧的东南急流提供水汽输送,而麦德姆水汽输送以南侧的西南急流为主,水汽输送的差异使得海葵和麦德姆的强降水空间分布分别呈纬向型和经向型特征。同时水汽辐合持续时间决定了麦德姆的降水持续时间比海葵短,但其较深厚的强水汽辐合使得麦德姆的短时强降水持续时间长、暴雨中心降水强度大。

(3) 两次台风降水过程中均包含了层云降水和对流降水,且均是短时间的对流性降水对总降雨量贡献最大。麦德姆有密集的能量锋区、更大的假相当位温梯度,其不稳定能量远高于海葵,对流性降水特征更明显;而海葵是以稳定性降水为主的混合型降水。另外这两次台风降水的强降水区域与环境风垂直切变分布有较好的对应关系,均位于顺风切左侧。

(4) 麦德姆降水过程比海葵具有更高的雨滴数浓度和更大的降水粒子直径。当雨强小于10 mm/h时,两次台风降水过程均以小雨滴为主且数量较多;雨强>10 mm/h时,雨滴粒径增大但数量明显减少。

(5) 两次台风降水过程的 $Z-R$ 拟合曲线比较一致,其指数 b 的差别不大,但海葵的系数 a 要大于麦德姆;在不同降水类型即层云降水和对流性降水中,其 $Z-R$ 关系的 a 、 b 值差异较明显。

参考文献

- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1-9. Chen L S, Ding Y H. 1979. An Introduction to Western Pacific Typhoons. Beijing: Science Press, 1-9 (in Chinese)
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 25(3): 420-431. Chen L S, Meng Z Y. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years. Chinese J Atmos Sci, 25(3): 420-431 (in Chinese)
- 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. Chen L S, Luo Z Y, Li Y. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process. Acta Meteor Sinica, 62(5): 541-549 (in Chinese)
- 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 2017. 台风暴雨落区研究综述. 海洋气象学报, 37(4): 1-7. Chen L S, Meng Z Y, Cong C H. 2017. An overview on the research of typhoon rainfall distribution. J Mar Meteor, 37(4): 1-7 (in Chinese)
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析. 气象学报, 67(5): 840-850. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y. 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events. Acta Meteor Sinica, 67(5): 840-850 (in Chinese)
- 冯雷, 陈宝君. 2009. 利用PMS的GBPP-100型雨滴谱仪观测资料确定 $Z-R$ 关系. 气象科学, 29(2): 192-198. Feng L, Chen B J. 2009. The radar reflectivity-rainrate relationships as inferred from ground-based raindrop spectra observed by GBPP-100 probe. Scientia Meteor Sinica, 29(2): 192-198 (in Chinese)
- 何立富, 梁生俊, 毛卫星等. 2006. 0513号台风泰利异常强暴雨过程的综合分析. 气象, 32(4): 84-90. He L F, Liang S J, Mao W X, et al. 2006. Analysis of torrential rain event of landing typhoon Tailim. Meteor Mon, 32(4): 84-90 (in Chinese)
- 金祺, 袁野, 刘慧娟等. 2015. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析. 气象学报, 73(4): 778-788. Jin Q, Yuan Y, Liu H J, et al. 2015. Analysis of microphysical characteristics of the raindrop spectrum over the area between the Yangtze River and the Huaihe River during summer. Acta Meteor Sinica, 73(4): 778-788 (in Chinese)
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 大尺度环境场对热带气旋影响的动力分析. 气象学报, 59(4): 429-439. Lei X T, Chen L S. 2001. Dynamical studies on the effect of large-scale environmental flow on tropical cyclones. Acta Meteor Sinica, 59(4): 429-439 (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. 气象学报, 60(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 its landfall. Acta Meteor Sinica, 60(2): 167-179 (in Chinese)
- 李英, 陈联寿, 雷小途. 2013. Winnie(9711)台风变性加强过程中的降水变化研究. 大气科学, 37(3): 623-633. Li Y, Chen L S, Lei X T. 2013. Study on rainfall variation associated with typhoon Winnie (9711) during its extratropical transition process. Chinese J Atmos Sci, 37(3): 623-633 (in Chinese)
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验. 大气科学, 29(1): 91-98. Li Y, Chen L S, Xu X D. 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation. Chinese J Atmos Sci, 29(1): 91-98 (in Chinese)
- 梁军, 李英, 张胜军等. 2015. 影响辽东半岛两个台风Meari和Muifa暴雨环流特征的对比分析. 大气科学, 39(6): 1215-1224. Liang J, Li Y, Zhang S J, et al. 2015. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula. Chinese J Atmos Sci, 39(6): 1215-1224 (in Chinese)
- 孙力, 董伟, 药明等. 2015. 1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析. 气象学报, 73(1): 36-49. Sun L, Dong W, Yao M, et al. 2015. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven (2012). Acta Meteor Sinica, 73(1): 36-49

- (in Chinese)
- 王俊,姚展予,侯淑梅等. 2016. 一次飑线过程的雨滴谱特征研究. 气象学报, 74(3): 450-464. Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al. 2016. Characteristics of the raindrop size distribution in a squall line measured by thies optical disdrometers. Acta Meteor Sinica, 74(3): 450-464 (in Chinese)
- 吴亚昊,刘黎平,周筠珺等. 2016. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究. 高原气象, 35(1): 220-230. Wu Y H, Liu L P, Zhou Y J, et al. 2016. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation. Plateau Meteor, 35(1): 220-230 (in Chinese)
- 谢义明,胡玉玲,沙维茹等. 2011. “0808”号台风残留引发特大暴雨成因分析. 气象科学, 31(1): 61-66. Xie Y M, Hu Y L, Sha W R, et al. 2011. Mechanism analysis of torrential rain initiated by residual circulation of typhoon Phoenix(0808). Scientia Meteor Sinica, 31(1): 61-66 (in Chinese)
- 余贞寿,陈敏,叶子祥等. 2009. 相似路径热带气旋“海棠”(0505)和“碧利斯”(0604)暴雨对比分析. 热带气象学报, 25(1): 37-47. Yu Z S, Chen M, Ye Z X, et al. 2009. Analysis of rainstorm associated with similar track tropical cyclones "Haitang" (0505) and "Bilis" (0604). J Trop Meteor, 25(1): 37-47 (in Chinese)
- 周黎明,王庆,龚佃利等. 2015. 山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析. 气象, 41(2): 192-199. Zhou L M, Wang Q, Gong D L, et al. 2015. Microphysical properties of cloud and precipitation during a rainstorm process in Shandong Province. Meteor Mon, 41(2): 192-199 (in Chinese)
- Chen B J, Wang Y, Ming J. 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in typhoon Morakot (2009). J Trop Meteor, 18(2): 162-171
- Chen B J, Yang J, Pu J P. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China. J Meteor Soc Japan, 91(2): 215-227
- Li Q Q, Wang Y Q. 2012. Formation and quasi-periodic behavior of outer spiral rainbands in a numerically simulated tropical cyclone. J Atmos Sci, 69(3): 997-1020
- 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 Geophys Res, 121(21): 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 Geophys Res, 121(21): 12803-12819
- Moumouni S, Gosset M, Houngninou E. 2008. Main features of rain drop size distributions observed in Benin, West Africa, with optical disdrometers. Geophys Res Lett, 35(23): L23807
- Palmer C K, Barnes G M. 2006. The effect of vertical wind shear as diagnosed by the NCEP reanalysis data on northeast Pacific hurricane intensity// AMSA 25th Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, CA, 122-123
- Sharma S, Konwar M, Sarma D K, et al. 2009. Characteristics of rain integral parameters during tropical convective, transition, and stratiform rain at Gadanki and its application in rain retrieval. J Appl Meteor Climatol, 48(6): 1245-1266
- Tokay A, Bashor P G. 2010. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution. J Appl Meteor Climatol, 49(11): 2348-2365
- Yu J H, Tan Z M, Wang Y Q. 2010. Effects of vertical wind shear on intensity and rainfall asymmetries of strong tropical storm Bilis (2006). Adv Atmos Sci, 27(3): 552-561