

陈联寿,许映龙.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,2017,40(1):3-10.

Chen Lianshou, Xu Yinglong. Review of Typhoon Very Heavy Rainfall in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(1): 3-10.
doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.01.001

中国台风特大暴雨综述

陈联寿¹, 许映龙^{2,3}

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: Nina(7503)台风于1975年8月在河南林庄造成24 h 1062 mm的特大暴雨,成为中国大陆台风暴雨之最。1975年,发生在中国大陆的这场特大暴雨,冲垮水库河堤,洪水泛滥,酿成大灾。中国24 h 1000 mm或以上的台风特大暴雨,称之为极端暴雨(Extreme rain),除这次外,还出现过多次,但都发生在台湾。分析表明,台风特大暴雨并不完全依赖于台风强度或内核对流强度,还和环境不同尺度环流系统与台风的相互作用、下垫面对台风环流的作用及台风上层云微物理过程有关。因此,登陆台风残涡复苏所下暴雨往往会超过强台风的暴雨;台风外围尤其是台风倒槽辐合区所下的暴雨也可能会超过台风中心暴雨。造成极端暴雨的台风有一些显著特点:极端暴雨产生在登陆或近海台风维持和停滞时段;低空急流、季风涌、双台风作用及内陆大面积水体是登陆台风获得水汽和潜热能量的主要来源;中纬度槽与登陆台风或残涡相互作用,可向台风或残涡提供位能和不稳定能量,使其产生更大降水;山脉地形对极端暴雨的形成起重要作用;台风高层云团中的微物理过程,对极端暴雨的形成有重要作用。

关键词: 台风;特大暴雨;综述

中图分类号: P458.1⁺24

文献标识码: A

文章编号: 1673-7148(2017)01-0003-08

引言

台风的灾害主要由台风大风、台风暴雨和风暴潮造成。台风 Rammasun(1409)的大风竟达到70~75 m/s^[1],这样大的风力可将岸边巨轮抛上陆地、摧毁房屋桥梁、折断成批大树电塔,灾难深重。比风灾更为严重的是暴雨之灾, Nina(7503)台风的倾盆暴雨造成多座大型水库崩溃,河堤决口,洪水泛滥,冲毁桥梁楼亭,淹没城镇,死伤无数。台风最为严重的灾害往往由风暴潮引起,风暴增水不仅和台风强度有关,还和大陆架浅海区深度及地形有关。孟加拉湾(Bay of Bengal)极易引起大的增水风暴潮之灾。超级气旋性风暴(Super cyclonic storm) Bholu于1970年11月12日登陆在如今孟加拉国的吉大港,恒河三角洲(Ganges Delta)及口外星罗棋布的岛屿遭到风暴的灭顶之灾,死亡人数竟达30~50万人,这是

20世纪人类的一场悲剧。

台风暴雨灾害是上述三种灾害中发生最为频繁之灾,厘清台风暴雨机理是人们长期以来的研究目标。台风暴雨的强度(Rate)和分布(Distribution)与三方面因素有关,即内部结构影响、环境大气控制和下垫面强迫。

内部结构影响:台风内部结构对台风强度和降水有重要影响,内核对流暴发(Convective burst)会引起台风突然增强(Rapid intensification)^[2]和眼壁暴雨的增强。台风环流内部的中尺度切变线和小涡会增强局部降水,台风内核上空云的微物理过程是台风雨强(Rain rate)增幅的重要机制^[3]。

环境大气控制:台风内核结构或台风强度并非决定降雨的唯一因子,弱残涡降雨超过强台风降雨的观测事实,说明环境大气对台风降雨的强度和分布范围有重要控制作用。环境水汽和涡度向台风的输入与

收稿日期:2016-12-30;修订日期:2017-01-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2015CB452804);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206001)资助

作者简介:陈联寿(1934-),男,浙江舟山人,中国工程院院士,从事台风研究. E-mail:LSChen@camsma.cn

雨量强度密切相关。研究结果^[4]表明,输入登陆台风水汽通量的大小对台风在陆上的维持和降水大小有重要作用。登陆台风与季风涌(Monsoon surge)相互作用,将使台风残涡(Remnant)获得大量水汽和潜热能量,能使登陆台风维持不消或使残涡复苏(Revival)而增强台风暴雨^[5]。典型例子是强热带风暴 Bilis (0604),这类台风登陆后往往向偏西或西南方向移动,并与季风涌遭遇。中纬度西风槽与登陆台风的相互作用是环境大气对台风降雨的另一种重要影响,这种作用将使台风获得斜压位能而增强台风暴雨,并使台风形成变性结构(Extratropical transition),生成中小尺度系统而增强台风暴雨^[6]。台风与中纬度槽的相互作用往往发生在台风登陆后向西北或偏北方向移动过程中,典型个例是台风 Nina (7503)。不仅环境西南季风对台风暴雨有重要影响,环境东北信风(Trade wind)也是一个重要的影响成员。移经巴士海峡和中国台湾附近的台风往往会与这支东北信风遭遇,来自热带洋面台风东侧的潮湿偏南气流与干燥的东北信风会使台风倒槽区(Inverted trough area)形成很强的辐合线或强台风倒槽,多次台风特大暴雨都是由这条强辐合线所造成的。高空急流是环境控制影响的另一个重要成员,急流对其南侧台风高空流出气流的强度有重要影响,当急流加强台风高层向东北方向的流出气流时,台风暴雨强度增强。风速垂直切变(Vertical wind shear)是环境控制影响中的又一个重要因子,它影响着台风暖核结构和台风强度,从而对台风降水强度产生影响。此外环境大气中的气溶胶(Aerosol)也会影响台风降雨,这一点目前已引起人们的关注。

下垫面强迫:陆面对登陆台风贴地层环流的强迫(Forcing)作用,强烈地影响着台风降雨。台风中心靠近海岸时,向岸风和离岸风对台风降雨的强度和范围产生不对称分布效应。岛屿和山脉地形在一定条件下会对台风降雨产生增幅作用,台湾海峡产生台风诱生低压^[7]和台湾中央山脉对向风坡气流强迫抬升都会加强台风暴雨。海南岛五指山对台风外围气流强迫产生的中尺度小涡^[8]显著地加强了台风暴雨。内陆大面积水面和饱和湿地对台风降雨也有明显影响。研究结果^[9]表明,水面或台风暴雨所造成的饱和湿地会把水汽反馈到台风气柱,这对维持暖心(Warm core)有利,并会进一步加强台风暴雨。海岛和大陆海岸、山脉地形和内陆水面对台风

降水均有显著影响。

1 极端暴雨台风

登陆或近海台风下特大暴雨的很多,但下 1000 mm/24h 以上的极端暴雨为数不多,下面给出的是下极端暴雨的台风个例。

1.1 超强台风 Nina (7503)

Nina 于 1975 年 8 月 4 日凌晨在福建晋江登陆,登陆时风力 12 级,登陆时 24 h 雨量为 154.8 mm(福建厦门),登陆后 Nina 很快减弱为一个 12 m/s 的残涡,但竟在登陆后 2~3 天复苏(Revival),这与中纬度西风槽相互作用获得斜压位能有关,24 h 雨量竟达到 1062 mm(河南林庄),成为新中国成立以来大陆暴雨之最,这一雨强纪录至今未被打破(图 1)。



图 1 超强台风 Nina(7503) 路径图

1.2 超强台风 Herb (9608)

Herb 于 1996 年 7 月 31 日夜间登陆台湾基隆,登陆时风力为 14 级,Herb 于 8 月 1 日上午再次登陆福建福清,第二次登陆时风力仍有 12 级。Herb 登陆基隆时在台风中心南侧的阿里山出现了 1748.5 mm/24h 的极端特大暴雨,成为我国极端暴雨之最(图 2)。

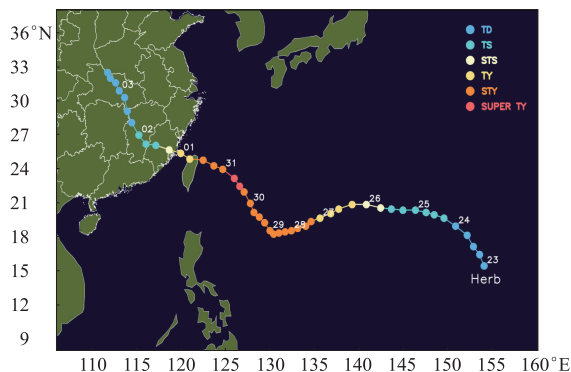


图 2 超强台风 Herb(9608) 路径图

1.3 超强台风 Carla(6718)

Carla 于 1967 年 10 月 17 日凌晨登陆菲律宾吕宋岛,登陆后的日降雨量为 979.4 mm(菲律宾碧瑶市, Baguio City)。Carla 登陆后,穿过吕宋岛北部,移速减慢,17 日夜间移入南海东北部海面。该台风虽未登陆台湾,但台风北侧有辐合线或倒槽掠过台湾,在台湾宜兰新寮出现 1672.6 mm/24h 的极端暴雨。这次台风外包区(Envelope)倒槽造成的如此强烈的极端暴雨(图 3),远远超过了眼区暴雨。

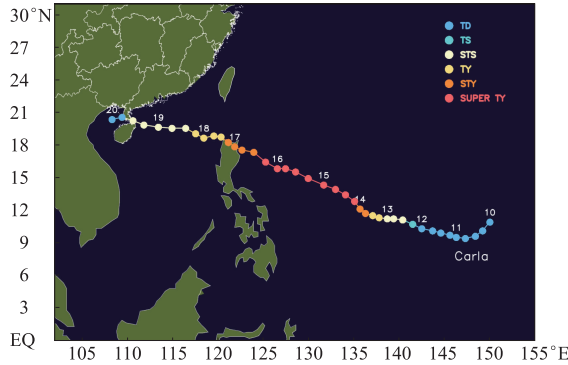


图 3 超强台风 Carla(6718)路径图

1.4 台风 Morakot (0908)

Morakot 于 2009 年 8 月 7 日夜间在台湾花莲登陆,后于 9 日傍晚再次登陆福建霞浦。Morakot 在穿过台湾时,8 日 14 时至 9 日 14 时阿里山 24 h 雨量竟达到 1623.5 mm。如此极端暴雨出现在 Morakot 登陆台湾后移速突然减慢且停滞少动期间(图 4)。另一个特点是 Morakot 在台湾期间与另一个强热带风暴 Goni(0907)发生了相互作用,这与 Morakot 雨量突然增强也存在密切关系^[10]。

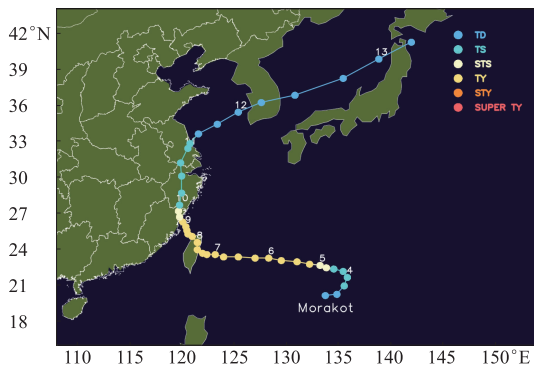


图 4 台风 Morakot(0908)路径图

1.5 超强台风 Gloria (6312)

Gloria 的中心于 1963 年 9 月 11 日掠过台湾岛的北端沿海,眼壁南侧的强降雨落在台湾北部的百新,雨量达到 1248 mm/24h。台风虽然未登陆台湾

(图 5),但中心南侧的这场极端暴雨是在 Gloria 移速显著减慢时产生的,这也与台湾特殊地形影响及西南气流在台风眼壁以南地区出现的强对流有关。Gloria 于次日(12 日)21 时在福建连江登陆,登陆后的最大日雨量仅为 454 mm(浙江岑里)。

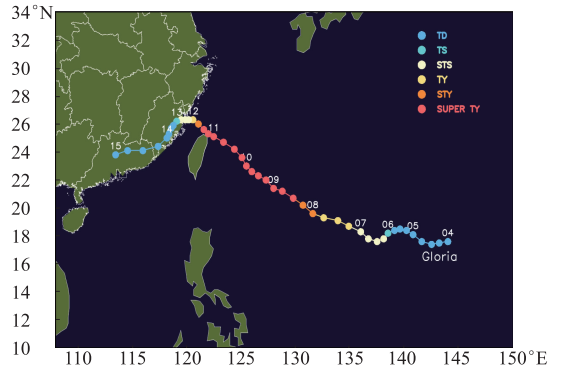


图 5 超强台风 Gloria(6312)路径图

1.6 超强台风 Lynn(8719)

Lynn 于 1987 年 10 月 23-24 日穿过巴士海峡,24-25 日台风倒槽掠过台湾岛其移速突然减慢,台湾东部和中央山脉从南到北出现大范围暴雨,其中 24 日竹子湖出现了 1151.9 mm/24h 的极端暴雨。如此暴雨出现在台风突然减速和停滞少动阶段(图 6),这时台风中心附近日雨量为 379.9 mm(菲律宾卡加延阿帕里, Aparri, Cagayan)。Lynn 台风和 Carla 一样,并未登陆台湾,如此极端暴雨是台风北侧倒槽和强辐合所造成,台湾低空东北信风(Trade wind)与台风东侧偏南潮湿气流的辐合起了重要作用,中央山脉地形辐合起了加剧暴雨的效果。超强台风 Lynn 最后于 10 月 28 日 11 时登陆广东珠海,登陆后最大日降雨量仅为 35 mm(广东中山)。

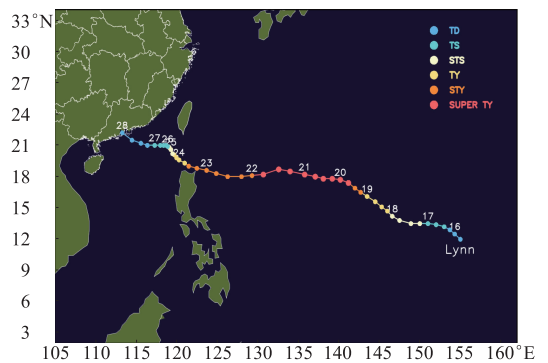


图 6 超强台风 Lynn(8719)路径图

1.7 超强台风 Parma(0917)

Parma 于 2009 年 10 月 3 日下午登陆菲律宾吕宋岛,以后在吕宋岛和北部沿海突然减速,并回旋少

动,直到 10 月 8 日才离开这一带。Parma 虽未登陆我国台湾,但其北侧倒槽辐合区在 Parma 停滞少动期间在台湾宜兰、花莲这一带下了极端暴雨,宜兰大同乡的古鲁雨量竟达 1201.5 mm/24h。这场极端暴雨同样是出现在台风少动停滞的这一特殊阶段(图 7),且是台风北侧倒槽辐合区与弱冷空气相互作用的产物。超强台风 Parma 倒槽在下如此极端暴雨时,其中心附近最大日雨量仅为 685.0 mm(菲律宾碧瑶市, Baguio City)。Parma 最后于 10 月 12 日 09 时在海南万宁登陆,登陆后的最大日雨量仅为 319 mm(海南临高)。

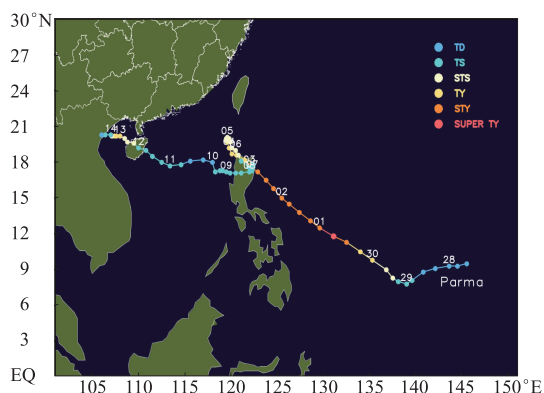


图 7 超强台风 Parma(0917) 路径图

2 产生极端暴雨台风特点

纵观上述 7 场我国台风极端暴雨,6 场发生在台湾,1 场发生在大陆,24 h 雨强最大的由台风 Herb (9608) 造成,出现在台湾,最小的是由台风 Nina (7503) 造成的河南 75·8 特大暴雨。这些台风往往具有以下特点。

2.1 维持和停滞

登陆或近海台风的停滞少动和维持不消是产生台风极端暴雨共同的显著特点,上述极端暴雨台风

不管登陆与否,在下极端暴雨时都有减速或停滞少动的特点。另外,有的登陆台风在陆上经受不住摩擦耗损,一天即消失;有的陆上台风获得了新的能量,令其补偿耗损,经久不衰,或使减弱的残涡复苏,重造极端暴雨。登陆台风残涡在陆上经久不衰的要特别警惕。

有两种能量会使台风在陆上维持不消,即潜能和位能。潜热靠水汽提供,登陆台风大气环境中存在东南或西南风低空急流并有相应水汽通道与其联结,可使其获得潜热。登陆后向偏北移动的台风往往会发生与中纬度槽的相互作用,台风残涡会从中纬度槽中获得位能。这两种获得新能量的方式均有利于台风低压在陆上的维持^[5]。当登陆台风移入鞍型气压场或弱环境引导场时,将会发生减速和停滞少动。

2.2 水汽供应

当台风登陆后,下垫面由海洋变成了陆面,切断了海面对台风水汽的供应,加上陆面摩擦耗损,台风因能量急减而变成一个残涡并将逐渐衰亡。陆面上对台风水汽的供应实为有限,但有时也会有充沛水汽输入,转化为潜热能量,可以延长台风寿命,并可下很大暴雨。登陆台风可由以下 4 种方式获得水汽。

2.2.1 环境水汽输送通道

登陆台风大气环境中存在西南风或东南风低空急流与台风联结,形成水汽输入通道,低层丰沛水汽可由这样的通道输入台风。用 5 个强降水台风与 5 个弱降水台风流场和水汽通量合成分析(Composite analysis)比较结果表明:强降水台风具有明显的水汽输入通道和强的水汽通量;而弱降水台风资料合成分析未见有水汽通道与之联结并且水汽通量很小(图 8)^[11]。

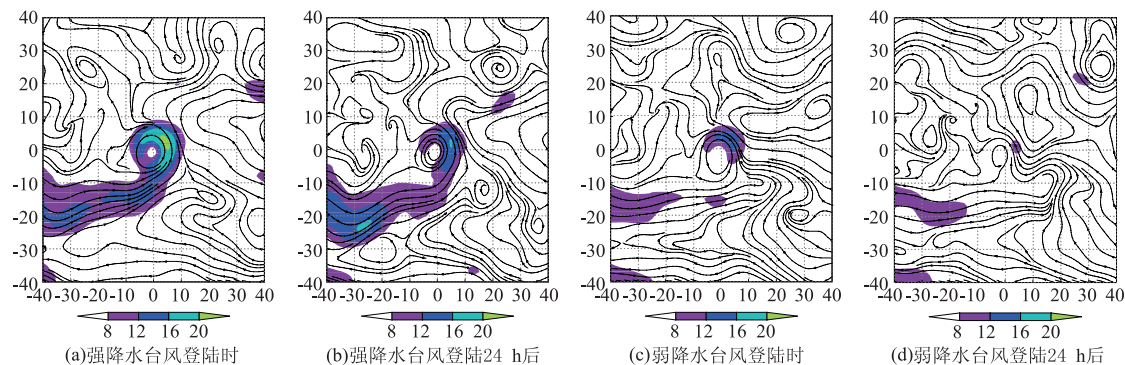


图 8 强降水台风(7503,8107,8607,9009,9711)和弱降水台风(7515,9418,9615,0008,0313)

850 hPa 流场和水汽通量合成分析的对比(程正泉)

横/纵坐标表示离 TC 中心格点距离,单位:1 经/纬距

2.2.2 登陆台风与季风涌的相互作用

我国东南沿海台风登陆频繁,这一地区也是东亚季风最为活跃的地区。台风与季风涌(Monsoon surge)相遇并产生相互作用的概率很高。季风涌由一些中尺度或次天气尺度的潮湿云团(Cloud cluster)组成,当这些云团并入台风或其残涡环流中时,将给台风提供大量水汽,不仅使台风维持时间长,并将显著增强降水量和扩大雨区。最为典型的例子是强热带风暴 Bilis(0604),它于 2006 年 7 月 14 日中午登陆福建霞浦,并与季风云团相遇,潮湿云团源源不断涌入风暴环流,从而给 Bilis 提供了新的能量,使其在陆面上持久不衰(图 9)。它自穿越台湾登陆福建后,一路向偏西移动,穿越江西、湖南、广西各省,进入越南境内消失,一路暴雨强度之大,范围之广,持续时间之长,为历史罕见,造成江河泛滥,山洪暴发,一些城镇被淹,灾害深重。

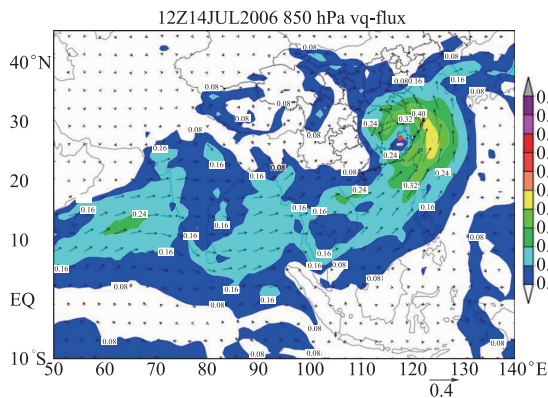


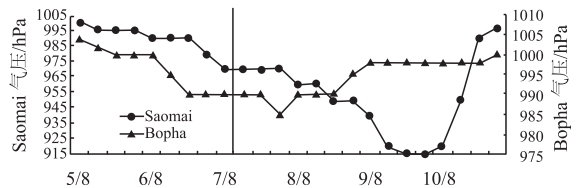
图 9 强热带风暴 Bilis(0604)登陆当天与季风涌的相互作用

2.2.3 双台风(Binary typhoons)相互作用

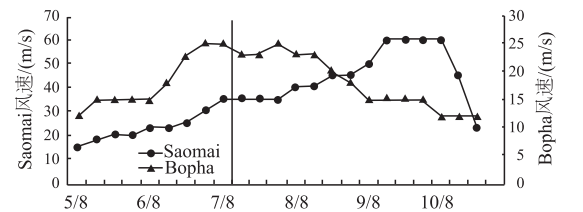
当沿海地区出现双台风相互作用时,其中一个台风将其水汽和涡度通过西南气流向另一个台风(受体)输送,其结果会使受体台风获得新的能量而加强,或使受体台风出现较强降水。

近年来多次出现近海双台风的相互作用现象。近海突然增强的台风 Saomai(0608)与另一个近海台风 Bopha(0609)发生相互作用,结果表明(图 10),Bopha 向受体台风输出了能量而减弱,受体台风(Saomai)得到迅速加强,苍南、福鼎一带测站测到的极值风速竟达 68.0 m/s、75.8 m/s 和 81.3 m/s,苍南的昌禅测到降雨极值达 606 mm。研究结果表明^[12],Saomai 的突然增强与它和另一个热带风暴 Bopha 的相互作用密切相关,当 Bopha 的部分气旋性环流和相应的涡块卷入 Saomai 后,Saomai 发生了突然增强,而 Bopha 开始减弱。

另有一对在沿海发生相互作用的双台风是 Morakot(0908)和 Goni(0907),强热带风暴 Goni 的西南气流向 Morakot 输送水汽和涡度,Morakot 是一个产生极端暴雨的台风。研究结果^[13]表明,Goni 向 Morakot 南边界输入的水汽通量显著地超过了其他边界的(图 11),并增强了 Morakot 的暴雨。

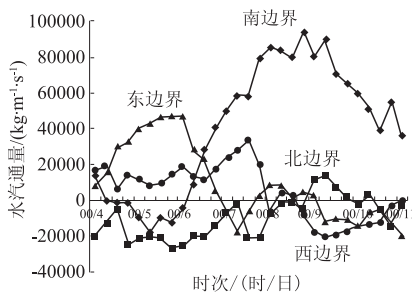


(a) 桑美和宝霞台风中心最低气压演变

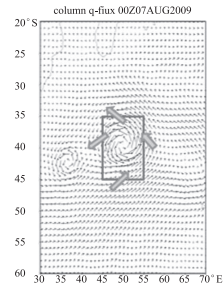


(b) 桑美和宝霞台风中心最大风速演变

图 10 2006 年 8 月 5—10 日 Saomai 和 Bopha 相互作用期间的强度变化(徐洪雄)



(a) 2009 年 8 月 4—11 日台风 Morakot(0908)各边界整层水汽通量随时间变化图 收入为+,支出为-;图中时间为世界时



(b) Goni(0907)向Morakot(0908)输送水汽示意图

图 11 我国东南沿海双台风 Morakot(0908)和 Goni(0907)的相互作用(徐洪雄)

2.2.4 陆上的大尺度水面

我国大陆台风活动区有多块大尺度水面,例如洞庭湖、鄱阳湖、太湖、洪泽湖、高邮湖、杭州湾等,当台风残涡经过这些内陆水面或饱和湿地时,向上的水汽通量会使残涡获得新的能量。研究结果^[14]表明,湖面会使登陆台风获得更多水汽,产生更多的凝结潜热和眼区的强对流活动,对台风环流的维持有利。另外,湖面还有缓解台风衰亡的作用(表 1),该研究结果还显示湖面对模拟的雷达回波有增强作用。

表 1 1980—2009 年经过 5 大湖区 24 个台风
低压的平均衰减率变化^①

经过前后	经过前	经过时	经过后
台风低压衰减率/(hPa/6h)	3.2	0.9	1.4

2.3 中纬度槽与台风的相互作用

当登陆台风有向偏北方向移动的趋势时,就有可能遭遇中纬度西风带槽。台风与西风槽(Westerly trough)相互作用时,台风偏南气流水汽输送会加强西风槽前的降雨,西风槽后冷空气入侵台风环流会使台风暖气层抬升而获得位能,而位能释放就会转化成台风低层动能,这样就有利于台风残涡在陆面上的维持。另外,相互作用也会增加台风残涡的不稳定层结能量,有利于加强降雨。

造成河南极端暴雨的台风 Nina(7503)登陆后向西北移动就受到中纬度西风槽的影响,槽后向南扩散的冷空气使 Nina 残涡发生变性,诱生出一系列中小尺度系统,并受伏牛山喇叭口地形作用,从而在河南驻马店地区产生了如此极端暴雨,中纬度西风槽对此有重要作用。

2.4 台风眼壁和外围强辐合倒槽

台风环流中最强暴雨往往出现在两个区域,即台风眼壁及南侧不稳定辐合区和台风北部倒槽辐合区。台风眼壁暴雨往往出现在台风路径的左侧,这一侧通常有台风的北风或西北风注入,与潮湿的西南气流辐合,产生很强的不稳定层结(Instable stratification)^[15],这是加剧暴雨所必需的条件。超强台风 Gloria 并未在台湾登陆,它在台湾北部造成的极端暴雨就是这类出现在路径左侧的极端暴雨。

台风内部暴雨除出现在眼壁外,还常出现在台风的倒槽区(Inverted trough),它是台风螺旋雨带的一部分,登陆前后演变成南北走向的强辐合区,通常是由台风潮湿的东南气流和东北气流形成的切变辐合线。当台风在福建登陆时,这一倒槽出现在浙江,有时会出现这样的情况:发生在浙江的倒槽暴雨雨量超过福建登陆地点的雨量。尤其台风潮湿的偏南气流与干燥的东北信风构成的台风切变倒槽,造成的倒槽暴雨就更为强烈。例如当台风位于吕宋岛或巴士海峡时,台风倒槽掠过台湾岛,竟造成了极端暴雨,例如台风 Carla(6718)、Lynn(8719)、Parma(0917)和 Megi(1013)都具有这一共同特点。

2.5 山脉地形作用

山脉地形在极端暴雨的形成中均起重要作用。文中所提的几场极端暴雨均和山脉有关。Nina(7503)台风残涡在河南造成的极端暴雨和境内伏牛山喇叭口地形有关,其他几个台风在台湾造成的极端暴雨都和中央山脉地形作用有关。山脉地形对台风近地层环流有强迫作用,这种强迫可以加强迎风坡气流的上升运动,从而加强暴雨强度。近地层残涡环流因地形强迫会生成小涡或地形辐合线,这些中小尺度系统会显著地加强雨量。

2.6 台风云系的微物理过程

台风下的极端暴雨用中尺度动力和热力过程往往解释不了。用低层辐合、中尺度强对流暴发、涡度、上空的辐散或流出气流这些因子来解释 100 mm 的暴雨,也用来解释 1000 mm 的极端暴雨,说明并未找出极端暴雨的成因。云的微物理过程往往在台风特大暴雨热力动力分析中未能涉及,而它和台风特大暴雨可能有十分密切的关系。高层积雨云中的冰粒子或霰(Graupel)播撒到层云中增加了大量凝结核,形成大水滴降落,这种播撒效应(Seeding effect)对造成极端暴雨有作用。

用 WRF 模式对造成极端降雨的登陆台风 Morakot(0908)的云微物理过程作了数值模拟研究^[16],结果表明,Morakot 的强降水是螺旋雨带上空积雨云带所造成。模拟还显示,高空有较强的冰相

①张胜军. 国家自然科学基金重点项目(40170948)成员工作报告.

过程和大量冰粒子、霰粒子将会使降雨增强。高空如没有冰相过程,则对流减弱,降雨显著减小。

3 小 结

特大暴雨中 ≥ 1000 mm/24h雨量强度的称之为“极端暴雨”。中国的暴雨之最是由台风造成的,中国台风极端暴雨中最强的雨量是由台风 Herb (9608) 所造成,极端暴雨中雨量最小的是由台风 Nina (7503) 造成,这些极端台风暴雨的预报目前还很困难。

造成极端暴雨的台风有一些显著特点,这类台风或残涡往往在陆面或近海海面上维持,经久不衰,并停滞少动,极端暴雨往往在其缓慢和停滞少动期间造成。水汽通道极为重要,低空急流、季风涌、双台风相互作用和内陆大面积水体等是登陆台风获得水汽和潜热能量的主要来源。中纬度西风槽与台风或残涡相互作用往往会向台风或残涡提供位能和不稳定能量,并使其产生更大降雨。极端暴雨往往可由台风辐合倒槽产生,尤其是东北信风和台风偏南潮湿气流所形成的辐合倒槽,可产生很强的暴雨。山脉地形在极端暴雨的形式中起了重要作用。另外,台风高层云团中的微物理过程,包括霰 (Graupel) 和冰粒子的分布结构和播撒效应,对台风特大暴雨的形成有重要作用,这方面的研究还有待进一步深入。

台风暴雨大小并不由台风强度决定,而是台风环境条件、下垫面特征和台风内部结构三者相互作用的产物。因此,台风弱残涡的降雨可远远超过强台风的雨量,台风眼北侧倒槽辐合区或南侧不稳定辐合区的降雨也可超过台风眼墙降雨。

致谢:感谢菲律宾大气地球物理和天文管理局 (PAGASA) 的 Renito B. Paciente 先生为本文提供了相关台风的菲律宾降水资料。

参考文献

[1] 许映龙. 1409 号超强台风“威马逊”的强度再分析[J]. 海南气

象,2014,6(3):1-12.

- [2] Chen H, Zhang D L. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective bursts and the upper-level warm core [J]. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 146-162.
- [3] Ren C P, Cui X P. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604) [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(9): 2100-2111.
- [4] Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(5): 967-976.
- [5] Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones [J]. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 3541-3558.
- [6] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆热带气旋海马 (0421) 变性加强的诊断研究 [J]. *气象学报*, 2012, 70(4): 628-641.
- [7] Meng Z Y, Nagata M, Chen L S. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 10(4): 430-443.
- [8] 段丽, 陈联寿. 热带风暴“菲特”(0114) 特大暴雨的诊断研究 [J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 343-353.
- [9] Wei N, Li Y. A modeling study of land surface process impacts on inland behavior of Typhoon Ranim (2004) [J]. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30(2): 367-381.
- [10] Xu X D, Lu C G, Xu H X, et al. A possible mechanism responsible for exceptional rainfall over Taiwan from Typhoon Morakot [J]. *Atmos Sci Lett*, 2011, 12(3): 294-299.
- [11] 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.
- [12] 于玉斌, 陈联寿, 赵大军. 超强台风桑美 (0608) 在残涡卷入后突然增强的数值模拟 [J]. *海洋学报*, 2014, 36(1): 98-108.
- [13] 徐洪雄, 徐祥德, 陈斌, 等. 双台风生消过程涡旋能量、水汽输送相互影响的三维物理图像 [J]. *气象学报*, 2013, 71(5): 825-838.
- [14] Zhang S J, Chen L S, Li Y. Statistical analysis and numerical simulation of poyang lake's influence on tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 18(2): 249-262.
- [15] Chan J C L, Liang X D. Convective asymmetries associated with tropical cyclone landfall. Part I: f-plane simulations [J]. *J Atmos Sci*, 2003, 60(13): 1560-1576.
- [16] 卓鸿. 台风特大暴雨及其云微物理过程关系的研究 [R]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012: 5-105.

Review of Typhoon Very Heavy Rainfall in China

Chen Lianshou¹, Xu Yinglong^{2,3}

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Numerous tropical cyclones (TCs) bring very heavy rainfall in China when precipitation is equal to or more than 1000 mm/24h. Typhoon Nina (7503) produced precipitation of 1062 mm/24h in Henan province 2–3 days after it made landfall in mainland China. That the other TCs produced extreme precipitations were in Taiwan China. The precipitation rates in 24 hours were super typhoon Herb (9608) with 1748.5 mm, super typhoon Carla (6718) with 1672.6 mm, super typhoon Morakot (0908) with 1632.5 mm, super typhoon Gloria (6312) with 1248 mm, super typhoon Lynn (8719) with 1136 mm, super typhoon Parma (0917) with 1086.5 mm in turn. The precipitation rate of 1748.5 mm/24h produced by Herb is the top record. Those typhoons caused extreme rainfalls in Taiwan did not land in Taiwan except Herb and Morakot.

Generally, rainfall inland caused by TCs including landfall typhoons and coastal typhoons depend on following three aspects. 1) TC inner core and outer structure such as the strong convective burst in cloud wall, mesoscale vortices and shear lines inside the TC circulation as well as the cloud microphysical process in the upper level of TC. 2) Environmental influences include moisture supply, vertical wind shear (VWS), jet stream and upper level outflow. An very important environmental effect is TC interacts with a mid-latitude trough or monsoon surge and the peripheral weather systems. 3) Underlying surface forcing includes the offshore water properties, coastal terrain, mountain range topography and huge inland water surface etc. Coastal terrain could lead to asymmetric structure of rain rate and distribution. Mountain range topography could strengthen the upward motion or induce occurrence of a mesoscale vortex. Both of them would increase rainfall. Huge inland water surface would be also favorable to increase TC rainfall.

The observational study and numerical simulation showed that the following conditions would help a TC or its remnant to produce very heavy rainfall (even extreme rainfall). Especially when landfall TC has sufficient energy to compensate the ground frictional consuming and maintain its vortex over land surface. Furthermore, extreme rainfall usually appear in a time period of TC when its motion slowdown or stagnant. Sustainment and stagnancy of landfall TC are the very important condition for the very heavy rainfall. The other necessary condition is the moisture supply. Plentiful moisture could be transported into TC through moisture channel of a low level jet, or cloud clusters of monsoon surges engulfed by TC vortex. It suggested that another way for TC to acquire moisture was from the interaction of binary tropical cyclones or huge inland water surface. Apart from the water supply, the other important process is that the TC or its remnant interacts with a mid-latitude westerly trough. Some of the extreme precipitations of TCs were caused by strong convective burst in eye wall or strong convergence between dry trade wind and TC humid southerly flow in the area of inverted trough. Most extreme rainfall processes have showed that the mountain range topographic effect would provide noticeable contribution to the rainfall. Cloud micro-physical process including the seeding effects in the top level of a TC could be a key factor in producing very heavy rainfall or extreme rainfall. There left us a big room in this area for the further study.

Key words: typhoon; very heavy rainfall; review