

陈联寿,孟智勇,丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 1-7.  
Chen Lianshou, Meng Zhiyong, Cong Chunhua. An overview on the research of typhoon rainfall distribution [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4): 1-7. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.001. (in Chinese)

## 台风暴雨落区研究综述

陈联寿<sup>1</sup>, 孟智勇<sup>2</sup>, 丛春华<sup>3</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;  
3. 山东省气象局, 山东 济南 250031)

**摘要:** 台风暴雨最重要的两个因素是雨强和降雨分布, 后者即为暴雨的落区。影响台风暴雨落区的因子主要有 3 个: 1) 台风涡旋内部结构; 2) 台风周围环境大气影响; 3) 台风下垫面强迫作用。本文对这 3 类因子的作用和影响作了总结。台风暴雨可分为台风环流内的暴雨和台风环流之外的暴雨两大类。本文把台风环流内的暴雨概括为 5 个落区, 包括眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、小涡暴雨、倒槽暴雨、切变暴雨。把台风环流之外的暴雨分为台前飚线暴雨、远距离暴雨和变性下游效应暴雨。地形可能会改变两类暴雨的强度和落区。本文对每一个落区的暴雨特点和形成机理作了总结, 对台风暴雨业务预报有一定的参考价值。

**关键词:** 台风暴雨; 落区; 台风环流

中图分类号: P444 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2017)04-0001-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.001

## An overview on the research of typhoon rainfall distribution

CHEN Lianshou<sup>1</sup>, MENG Zhiyong<sup>2</sup>, CONG Chunhua<sup>3</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China)

**Abstract** Typhoon rainfall rate and distribution are the two major components in the operational typhoon rainfall forecast. The distribution of typhoon rainfall is mainly affected by three factors: 1) typhoon inner structure; 2) peripheral atmospheric circulation and systems; and 3) underlying surface topography. The rainfalls inside typhoon circulation are grouped into five categories including eyewall rain, spiral band rain, small vortex rain, inverted trough rain, and shear line rain. Typhoon-associated rainfall outside typhoon circulation are divided into squall line rain (about 600 km in front of typhoon center), typhoon remote precipitation (TRP, about one thousand kilometers away from a typhoon), and downstream-effect rainfall (several thousand kilometers away from an extratropical transition typhoon). This paper reviews research progress on the impact of the three factors that may affect typhoon rainfall, the features and formation mechanism of the above different types of typhoon rainfall, which could be helpful for typhoon rainfall operational forecast.

**Key words** typhoon rainfall; distribution; typhoon circulation

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2017-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452804); 国家自然科学基金项目(41425018); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ009); 环渤海区域科技协同创新项目(QYXM201612)

作者简介: 陈联寿(1934—), 男, 研究员, 中国工程院院士, 主要从事天气动力学、热带气旋、中低纬度环流相互作用等研究, lschen@cma.gov.cn。

通信作者: 孟智勇(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事中小尺度灾害性天气的机理、资料同化、可预报性等研究, zymeng@pku.edu.cn。

## 引言

要准确预报台风暴雨就要准确预报台风暴雨的强度和落区,两者缺一不可。台风暴雨落区预报受多种因子影响,有较大不确定性,是很复杂的问题。暴雨落区首先与台风涡旋内部结构有关。台风涡旋水平结构可分三层,即台风内核区、中间为外包区、再向外为外围区,这三个区都是台风暴雨的落区。相对于台风中心,每个登陆台风其暴雨多呈不对称分布,不同登陆台风因受不同物理因子影响,其暴雨落区也各不相同。台风暴雨落区的主要影响因子可分三类,即台风涡旋内部结构、台风周围环流和天气系统的影响以及不同海岸、山脉地形、海湾、湖泊等的强迫作用。这三类因子影响着登陆台风暴雨的落区和雨量分布。

台风暴雨可分为台风环流内的暴雨和台风环流之外的暴雨。台风环流内的暴雨对应于台风眼壁或内核区、台风螺旋雨带即外包区以及外围区。台风环流之外的暴雨与台风本体脱离,但与台风存

在着紧密的物理联系。例如,有的台风会在涡旋范围之外的前进方向激发出一条飚线,称为台前飚线,该飚线会产生强暴雨;有的台风环流与中纬度西风槽相互作用在槽前产生暴雨;与台风相关的暴雨落区还可能出现在更远的地方,相距台风几千千米处,这种甚远距离的台风暴雨可能由台风变性后并入长波所产生的下游效应造成。台风边缘或以外气流受山脉地形作用会出现地形暴雨,地形暴雨可以出现在台风涡旋之外,也可以出现在涡旋之内。分析和研究台风暴雨不同落区,对提高台风暴雨的预报能力有重要参考价值。本文将对台风暴雨的落区及其物理机制做简要总结。

## 1 影响台风暴雨落区分布的因子

很多物理因子影响着登陆台风暴雨的落区分布,尽管错综复杂,但可概括为三类(图1):台风涡旋环流内的结构特征、台风周围环流和天气系统影响、台风环流下垫面地形强迫作用。

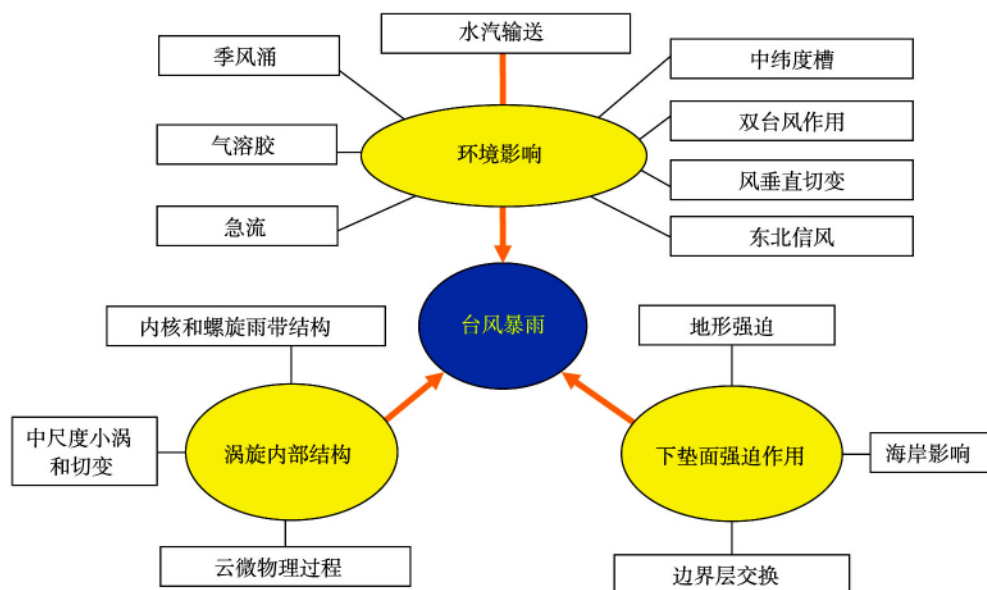


图1 影响台风暴雨强度和落区的诸因子

Fig.1 Factors that affect typhoon-associated rainfall rate and distribution

### 1.1 台风涡旋环流结构特征

台风中最明显的结构特征是内核眼壁。通常台风中最强的暴雨由眼壁对流造成。除眼壁外,强降水还分布在螺旋雨带的范围内。台风登陆时雨带的螺旋结构受到破坏,但台风强降水会在外包区强对流所在范围内出现。台风涡旋范围内在螺旋雨带甚至眼壁上有时会出现中尺度小涡,强降水落

区也会由小涡产生。例如台风 Mujigae(1522)在其外围螺旋雨带上出现了数十个超级单体<sup>[1]</sup>。著名的大西洋飓风 Isabel(2013)在其内核出现了6个中尺度小涡,1个位于飓风中心,另外5个在周围眼壁上形成海星状<sup>[2]</sup>。在台风涡旋范围内还经常出现中尺度切变线,常出现的部位为台风的北侧、西南侧和东南侧<sup>[3]</sup>,出现在北侧的是台风环流东南风和

东北风的切变,称为台风倒槽,该切变区经常出现很强的暴雨,有时甚至超过台风中心暴雨。这些中尺度小涡和中尺度切变往往会产生很强的暴雨。此外,台风涡旋上层云的微物理结构也会影响台风暴雨(图1),冰粒子、软雹(soft hail)和霰(graupel)的垂直和水平分布、浓度等相对于其他粒子对暴雨落区的影响较大<sup>[4]</sup>。

### 1.2 台风周围环流和系统影响

台风周围环流和系统对台风暴雨落区的影响可分为三类(图1)。

#### 1) 干冷空气和辐合线

台风周围干冷空气侵入会破坏台风内核暖心结构,其结果有两种可能,一是可造成“空心”台风,使内核暴雨消失或减弱。另一种可能是使台风变性,通常会使暴雨落区扩大。台风前方的干冷空气与台风外围潮湿东南气流辐合会发展成台前爬线,台前爬线会在台风涡旋之外形成一块与台风密切相关的暴雨落区。西北太平洋西部中纬度东北信风带来的干冷空气与台风东南气流辐合,会在台风北侧形成很强的倒槽辐合区,这会使得我国东南沿海台风在倒槽区产生强暴雨。

#### 2) 季风涌

东亚和南海不仅台风频繁,也是全球季风最为活跃的地区之一。台风与西南气流输送的季风云团相遇的机率很高,被台风卷入的季风云团可能会改变台风暴雨的落区。

#### 3) 中纬度西风槽

中纬度西风槽是影响登陆台风暴雨落区最为重要的环境天气系统,它会使台风暴雨落区向北伸展,形成台风中心暴雨南北不对称分布。中纬度西风槽与台风环流的相互作用不仅会造成台风变性,改变暴雨落区,也是形成台风远距离暴雨的主要原因。

### 1.3 下垫面的强迫作用

登陆台风下垫面特征对台风暴雨落区也有显著影响。台风在登陆前后,其环流相对海岸有向岸风和离岸风,这会产生台风暴雨落区的不对称分布。统计结果<sup>①</sup>显示,登陆华南的台风通常中心东侧降雨落区大于西侧;登陆华东的台风通常中心北侧降雨落区大于南侧。山脉地形的迎风坡和背风坡同样会产生相应的暴雨。

## 2 台风涡旋范围内的暴雨落区

### 2.1 眼壁暴雨

台风内核由眼区和眼壁组成,眼区为下沉运动,晴空少云。眼壁为对流环形区,台风中最强的暴雨往往出现在这一环形区内。内核是台风最具有特色的结构特征。台风环形眼壁有收缩和扩张的变化,这往往和台风强度变化有关。有时在眼壁收缩时会在其外另生一眼环,出现同心双眼现象,其结果往往是内眼消失,外眼取而代之,眼环扩大。双眼现象多见于登陆之前的海上台风,登陆之后的台风少见。眼环的这种变化和替换会影响内核暴雨强度和落区。有的台风靠近陆地时会变成空心台风,主要是大陆干冷空气入侵破坏内核结构所致,这样的台风登陆时,内核暴雨强度弱、落区范围小。

台风眼壁暴雨强度和落区并不完全由台风的强度和尺度决定,环境系统与台风的相互作用和地形的影响也会造成眼壁暴雨强度的变化以及落区的不对称性。当台风与季风涌相遇,西南气流将潮湿季风云团在台风南侧卷入,眼壁南环会出现很强暴雨,通常位于台风路径的左侧。当台风与西北太平洋东北信风遭遇时,干冷的东北风和台风潮湿的东南风形成强辐合,会显著加强台风的内核暴雨。

### 2.2 螺旋雨带暴雨

螺旋雨带是台风另一个颇有特点的结构,它的形态和分布与地球尺度西风带中的长波或称罗斯贝(Rossby)波相似,故也称为涡旋 Rossby 波。它出现在台风外包和外围区,主要出现在外包区。台风带来的大范围降雨区就出现在这一区域。

通常台风涡旋环流包含3~4条螺旋雨带,每条雨带由强对流系统组成。不同雨带的物理参数(如水汽含量、垂直运动、涡度、云顶霰和冰粒子浓度等)、结构(如有的雨带中含有中尺度小涡或中尺度切变线等)以及与环境环流系统的相互作用有所不同,导致各雨带不同的降水强度和分布特征。另外,螺旋雨带具有生消、旋转、收缩、扩展、停滞等活动特征,使降水强度和分布变化很复杂。台风登陆以后受到陆面摩擦和山脉地形的影响,雨带的螺旋结构变得模糊,但这并不影响定量估测台风环流内的雨强和落区。

<sup>①</sup> 胡皓 2017 年博士论文部分成果。

### 2.3 小涡暴雨

台风环流内会产生小涡。小涡在台风的 不同 部位 都可能 产生。小 涡往 往会 对 应 强 暴 雨 落 区。超 级 单 体 是 一 类 比 较 典 型 的 小 涡。台 风 环 境 下 由 于 垂 直 风 切 变 较 弱,其 超 级 单 体 一 般 强 度 较 弱、尺 度 较 小、质 心 偏 低,常 被 称 为 Mini-supercell。台 风 内 的 龙 卷 往 往 由 这 些 迷 你 超 级 单 体 产 生。台 风 内 的 龙 卷 多 出 现 在 台 风 的 东 北 象 限 或 前 进 方 向 的 右 前 象 限,强 度 一 般 较 弱,多 出 现 在 下 午。台 风 中 的 龙 卷 多 会 成 群 出 现。大 部 分 的 台 风 龙 卷 都 出 现 在 北 半 球,大 西 洋 飓 风 中 的 龙 卷 显 著 多 于 西 北 太 平 洋 台 风 中 的 龙 卷。台 风 龙 卷 多 形 成 于 距 离 海 岸 线 500 km 以 内 以 及 台 风 登 陆 之 前 12 h 到 登 陆 之 后 的 24 h

之内<sup>[5]</sup>。

2015 年 10 月 4 日,台 风 Mujigae 在 湛 江 登 陆,其 螺 旋 雨 带 中 一 个 超 级 单 体 造 成 了 三 个 龙 卷<sup>[1]</sup>。最 强 的 一 个 龙 卷(EF3 级)出 现 在 佛 山,造 成 4 人 死 亡,90 多 人 受 伤。北 京 大 学 联 合 广 东 佛 山 龙 卷 风 研 究 中 心 开 展 了 台 风 龙 卷 的 详 细 灾 害 调 查 和 雷 达 分 析,得 到 了 龙 卷 灾 害 分 布 和 近 地 面 风 场 特 征,揭 示 了 EF 风 速 与 视 频 风 速 估 计 的 一 致 性、漏 斗 云 地 面 直 径 和 EF 等 值 线 的 关 联、雷 达 上 龙 卷 涡 旋 与 漏 斗 云 地 面 位 置 的 相 对 偏 差 信 息 以 及 雷 达 上 龙 卷 涡 旋 强 度 与 地 面 灾 害 强 度 的 对 应 关 系(图 2)。这 个 超 级 单 体 同 时 还 造 成 了 局 地 强 降 水(图 2d)。这 些 结 果 为 未 来 台 风 龙 卷 的 预 警 提 供 了 重 要 观 测 事 实。

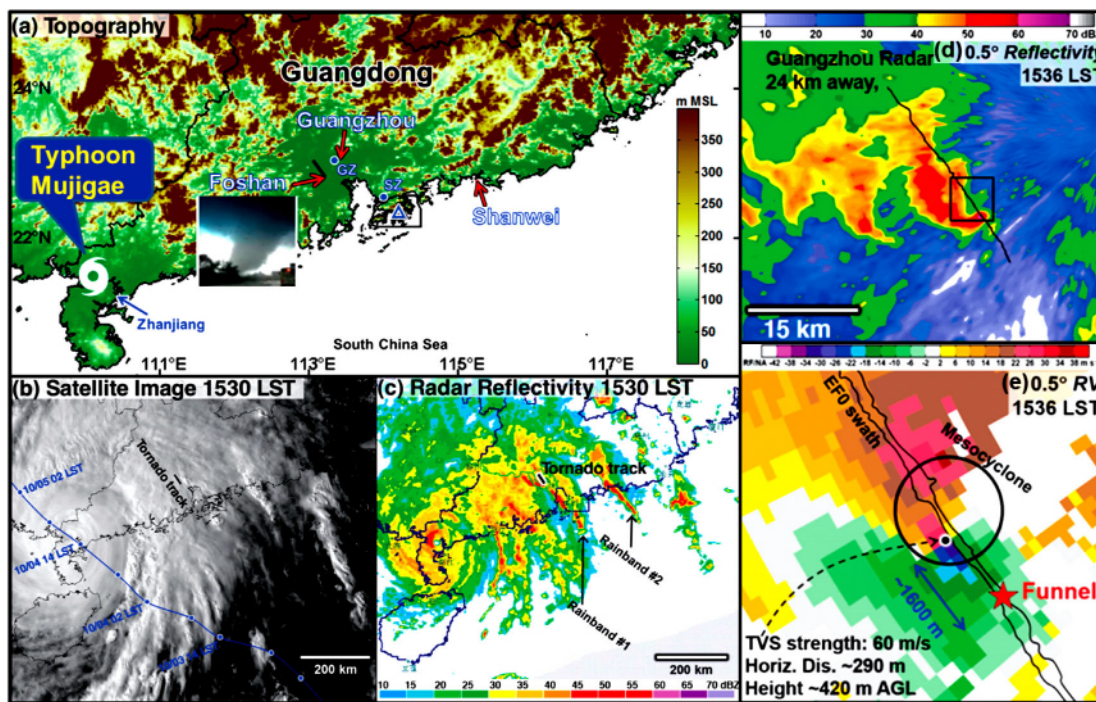


图 2 台风 Mujigae(1522) 造成的龙卷分布(a,包含佛山龙卷的照片),台风的卫星云图以及台风和龙卷的路径(b),台风造成佛山龙卷时刻的雷达回波(c),以及螺旋雨带上造成佛山龙卷的超级单体的基本反射率(d,黑线为龙卷路径)和径向风(e)分布(e中还显示了漏斗云地面位置(红色星号)和地面灾害路径以及雷达观测的中气旋(黑色圆圈)与龙卷涡旋(TVS,黑点)的对应关系)。图片摘自文献[1]

Fig.2 The Foshan tornado and its parent supercell characteristics caused by Typhoon Mujigae(1522) on 4 October 2015. Adapted from reference [1]

### 2.4 倒槽暴雨

有的台风会有倒槽形成。倒槽位于台风北侧,由潮湿的东南气流和东北气流辐合而成。倒槽暴雨可能会很强,有时会超过眼壁暴雨。在福建登陆的台风,其倒槽暴雨落区出现在浙江。

### 2.5 切变暴雨

台风中有可能形成两条中尺度切变线。它们通常位于台风的西南侧和东南侧,分别为由偏北

风和偏西风以及西南风和东南风形成的切变。当冷空气侵入台风,代表冷空气的东北风或西北风与台风中的西南风或东南风在台风的外包区或外围区形成一定走向的中尺度切变。这类中尺度切变往往会产生暴雨。

## 3 台风涡旋环流外与台风有关的暴雨落区

台风涡外暴雨是指暴雨落区与台风涡旋内雨

区不相连结,但暴雨的发生机理与台风密切相关。

### 3.1 台前飚线暴雨

台前飚线并不是台风本身的结构,它是台风在其前进方向前方被激发出来的中尺度辐合带,往往产生很强的风雨天气。据2007年6月—2009年10月三年多的资料统计<sup>[6]</sup>表明,有43%的登陆台风携带着台前飚线。台前飚线多出现在8月、下午至前半夜、台风移动方向的右前象限距离台风中心约600 km处。与中纬度飚线相比,台前飚线长度较短、生命期较短、要素变化较弱、可降水量较强、冷池偏弱。台前飚线长度为200 km左右,最大雷达反射率为57~62 dBz,生命期约为4 h,移速约为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。台前飚线维持时间虽短,但其暴雨落区中雨强较强,平均小时降水率为 $18 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

台前飚线的形成是台风与周围环境复杂相互作用的结果。低空强辐合和抬升、充沛水汽、强的不稳定层结是台前飚线生成的有利条件。台前飚线多形成于台风和副热带高压的过渡地带。低空垂直风切变一般与飚线的走向垂直,强度较弱。台风和周边天气系统相互作用往往首先在地面形成中尺度辐合线。台风东南潮湿气流输送充沛水汽,形成高湿环境,增强了辐合区的对流有效位能(CAPE),形成不稳定层结(图3)。飚线多发生在预先存在的地面辐合线上,主要的触发机制为低层的中尺度锋生、辐合或汇流,而非天气尺度的强迫。

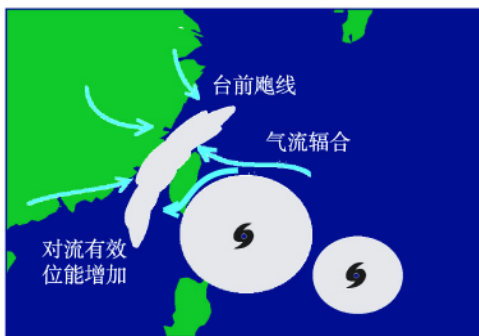


图3 台前飚线的形成

Fig.3 The formation of a squall line in front of a typhoon

台风Kammuri(0809)是一个典型携带台前飚线的台风,数值试验<sup>[6]</sup>能成功模拟出台前飚线的发展过程。敏感性试验表明,如果剔除台风,地面辐合线上即使出现零散对流也无法组织发展成飚线,主要原因是因台风被剔除之后,辐合变弱,水汽输入减少,CAPE减弱。较弱的台风造成的台前飚线强度较弱、长度和维持时间都较短。可见台风本体对

台前飚线的形成和发展具有显著的影响。

### 3.2 台风远距离暴雨落区

台风与远处中纬度西风槽相互作用在槽前产生的暴雨称为台风远距离暴雨(typhoon remote precipitation,简称TRP),这块暴雨落区与台风中心相距上千千米,与台风本体暴雨分割开来。TRP是一个小概率事件,只有14.7%的台风产生TRP<sup>[7]</sup>。TRP在中国、日本和美国都有发生。TRP在美国被称为Pre rainfall events(PRE)。

我国TRP事件有两个高频落区<sup>[7]</sup>,即环渤海地区和川陕交界处。出现时间为6—9月,尤以7、8月为高频月份。西北或偏西路径进入南海北部或在华南沿海登陆以及登陆东南沿海或在东部沿海转向的台风易于产生TRP。TRP雨量一般能达暴雨或大暴雨,维持时间一般为2 d左右。

TRP的产生与台风向槽前的水汽输送密切相关。产生TRP的台风能将水汽输送到远处,而不产生TRP的台风水汽仅限制在台风范围内,未能输送到远处(中纬度)(图4)<sup>[7]</sup>。台风Songda(0419)和中纬度西风槽相互作用在台风中心1200 km以北的日本产生了远距离暴雨落区<sup>[8]</sup>,这块远距离暴雨落区的产生与台风Songda向中纬度槽前输送水汽密切相关。热带风暴Vicente(1208)的远距离水汽输送对北京“7·21”特大暴雨有重要贡献<sup>[9]</sup>。Vicente从菲律宾以东洋面向西北偏西方向移动,于2012年7月21日移入南海东北部。从低层850 hPa流场(图5)可以看出,Vicente外围一支东南气流输送水汽直达北京地区。TRP的位置和强度与台风的强度有关。台风Vicente的数值试验结果<sup>[9]</sup>表明,减弱台风强度会使水汽输送偏弱偏南,暴雨落区南移,低层涡减弱,暴雨变弱,增强台风的试验显示,水汽输送增强,落区移到偏北位置,低层涡度加强,雨量加强。

台风Matsa(0509)是一个产生远距离暴雨的台风。Matsa于2005年8月4日和5日移向浙江南部沿海,TRP出现在山东半岛和辽东半岛,一些地区12 h雨量超过100 mm。对台风Matsa的个例分析<sup>[10]</sup>表明,TRP是台风和西风槽相互作用的产物。数值研究发现,TRP与台风存在密切关系,台风东侧东南气流对往TRP落区的水汽输送十分重要。不同强度西风槽的敏感性试验结果表明,西风槽对TRP同样很重要,TRP的雨量大小和西风槽的强弱存在正相关。

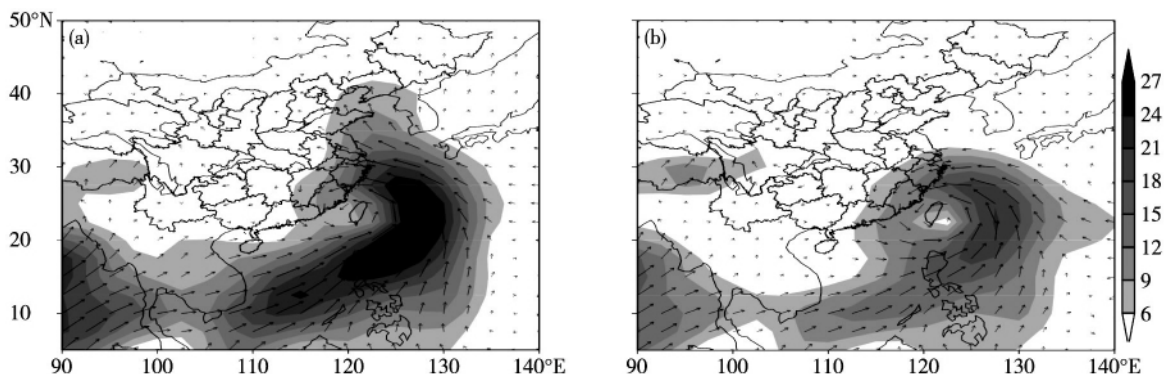


图 4 产生 TRP (a) 和不产生 TRP (b) 两组台风造成的水汽通量垂直积分(积分从地面至 300 hPa; 单位:  $10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 阴影表示积分值  $\geq 6 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的对比(前者能将水汽输送到远处落区,后者只能将水汽围绕台风输送)。图片摘自文献[7]

Fig.4 Comparison of water vapor transportation between TRP group and No TRP group( TRP group can transport moisture to farther region while No TRP group can not) . Adapted from reference [7]

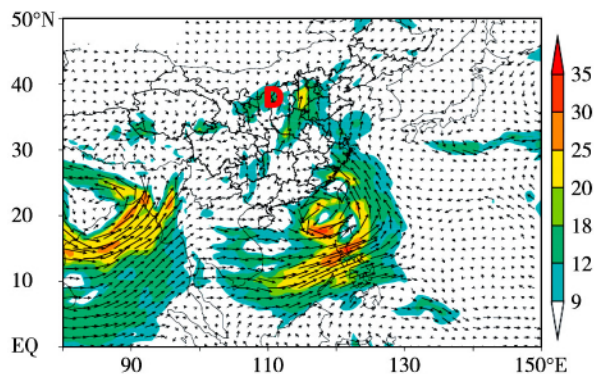


图 5 2012 年 7 月 21 日 14 时 850 hPa 的水汽通量(箭头; 单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 填色表示水汽通量的值  $\geq 9 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 热带风暴 Vicente(1208) 将水汽输送到远处的北京地区)。图片摘自文献[11]

Fig.5 Water vapor flux ( vectors;  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) with the magnitude of  $\geq 9 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  shaded. Severe storm Vicente transport moisture to Beijing area far from the storm location. Adapted from reference [11]

### 3.3 变性下游效应暴雨落区

西北太平洋是台风变性的高频海域,当台风在西北太平洋西部或中国东部沿海转向北上,与中纬度西风槽相遇,就有发生变性的可能。西风槽是中纬度 Rossby 波列中的一个。当转向台风与中纬度西风槽相互作用或并入槽内时,台风携带的大量水汽和涡度输入槽内,会导致槽的加强和发展。受能量频散的影响,变性事件所在中纬度槽的加强发展会经过 Rossby 波列传播,跨过北太平洋,引起变性事件遥远的下游 Rossby 波槽的发展,从而产生暴雨,通常称此为变性台风的下游效应(downstream-

effect rainfall)<sup>[11]</sup>。强暴雨落区有可能出现在北美洲。暴雨虽然发生在变性事件下游遥远处,但它和上游台风的变性密切相关。

## 4 地形暴雨

台风内核区、外包区、外围区环流都可能和山脉产生辐合抬升,或因山脉地形强迫而产生小涡,使暴雨增幅。地形暴雨通常出现在台风外包区或外围区。热带风暴 Fitow(0114)在穿过琼州海峡时,其外围环流与海南岛五指山辐合,在山脉强迫作用下,在向风侧生成一中尺度小涡,并产生了 Fitow 最强的暴雨落区<sup>[12]</sup>。我国台湾岛的中央山脉多次在台风倒槽区产生很强的暴雨,山脉暴雨的雨强有时超过台风内核区暴雨<sup>[13]</sup>。

地形对 TRP 的落区也有一定的影响,对其强度有增幅作用。台风 Meari(0422)在日本 Kyushu 登陆时,最强暴雨落区竟出现在 Meari 东面相距 500 km 的 Kii 半岛上,那里有三块暴雨落区,其中一块出现在山脉地形区。在敏感性试验中移除了该山脉,这块暴雨落区也就消失了<sup>[13]</sup>,这表明该暴雨落区是由山脉地形造成的。

## 5 小结

台风暴雨落区是不同尺度、不同高度、不同纬度、不同经度环流相互作用并在下垫面影响下的产物,其机理复杂,预报难度大,了解台风暴雨落区形成的原因,有助于提高其预报准确性。本文对不同落区暴雨出现的机理作了总结,对业务预报具有一定的参考价值。

由台风引起的暴雨落区,总体可分为台风环流内的暴雨和台风环流之外的暴雨两大类。台风环流内的暴雨落区与台风结构密切相关,可分为眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、小涡暴雨、倒槽暴雨、切变暴雨。通常最强的暴雨出现在眼壁区,但倒槽暴雨往往会超过眼壁暴雨,有时小涡暴雨、切变暴雨和地形引起的暴雨也会超过眼壁暴雨。台风环流外的暴雨落区主要有台前飚线暴雨、远距离暴雨和变性下游效应暴雨。地形对台风环流内的暴雨和台风环流之外的暴雨的强度和落区都可能造成重要影响。

#### 参考文献:

- [1] Bai L, Meng Z, Huang L, et al. An integrated damage, visual and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong EF3 tornado in China produced by the landfalling typhoon Mujigae (2015) [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2017. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0015.1.
- [2] Kepert J D. Tropical cyclone inner core dynamics [R]. San José: The Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VI) 2006: 79-119.
- [3] 吴伯雄, 陈士仁. 台风结构的不对称性和切变线[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1981, 17(1): 119-134.
- [4] 卓鸿. 台风特大暴雨及其云微物理过程关系的研究(博士后研究报告) [R]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
- [5] Edwards R. Tropical cyclone tornadoes: A review of knowledge in research and prediction [J]. Electronic J Severe Storms Meteor, 2012, 7(6): 1-61.
- [6] Meng Z, Zhang Y. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclone in China [J]. Mon Wea Rev, 2012, 140(2): 445-470.
- [7] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 717-727.
- [8] Wang Y, Wang Y, Fudeyasu H. The role of typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan [J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(11): 3699-3716.
- [9] Wen Y, Lin X, Li Y, et al. Impacts of interaction between typhoon Vicente (1208) and subtropical high impacts on Beijing torrential rain of 21 July 2012 [J]. J Meteor Res, 2015, 29(2): 293-304.
- [10] 丛春华, 陈联寿, 李英. 一次台风远距离暴雨成因分析 [C]// 天气预报与气候预测技术文集(2013). 北京: 气象出版社, 2013: 150-155.
- [11] Harr P A. Tropical cyclone formation and extratropical transition (Topic 2) [R]. San José: The Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VI) 2006: 256-260.
- [12] 段丽, 陈联寿, 徐祥德. 山脉地形对热带风暴 Fitow 结构和运动影响的数值试验 [J]. 气象学报, 2006, 64(2): 186-193.
- [13] Murata A. A cloud-resolving numerical simulation for orographic rainfall associated with typhoon Meari (2004) [M]// CAS/JSC WGNE. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (Blue Book No. 36). Geneva: WMO, 2006: 37-38.