周玲丽, 翟国庆, 王东法, 等. 2009. 0505 号 "海棠" 台风暴雨数值模拟试验和分析 [J]. 大气科学, 33 (3): 489-500. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Dongfa, et al. 2009. Numerical simulation and analysis of typhoon Haitang (0505) heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 489-500.

# 0505号"海棠"台风暴雨数值模拟试验和分析

周玲丽1 翟国庆1 王东法2 谷风鸣3 何斌4

1浙江大学地球科学系,杭州 310027
 2浙江省气象台,杭州 310017
 3浙江温州市气象局,温州 325027
 4浙江嘉兴市气象局,嘉兴 314001

**摘 要**利用中尺度数值模式 WRFv2.2 较好的模拟结果,并结合 NCEP 再分析资料、地面自动站降水资料以及 实况雷达回波资料对台风"海棠"造成的浙闽地区特大暴雨进行分析。研究发现,这次暴雨属于台风中心北侧附 近的螺旋云带降水,主要是由边界层强中尺度辐合带直接影响造成的,降水伴随着辐合带发展;边界层顶的强东 风急流和对流层低层强偏南气流在浙闽地区的交汇是强辐合带的成因;台风向西北方向移动相伴东风急流和强 辐合带的北移,这是本次暴雨出现稳步北抬的原因。台风的三支不同气流在浙江南部和福建北部地区交汇上升, 起到了水汽通道和能量输送以及建立不稳定区的作用,提供了暴雨的增幅与维持,而气流的汇合主要发生在边界 层内,这也是中尺度辐合带高度受限于边界层的原因。浙闽地区复杂的中尺度地形对本场暴雨的发生有重要作 用,为暴雨的增幅做出了重要贡献,但是,对边界层不同气流造成的中尺度辐合带而言,地形的作用较小,仅可 阻挡降水向西延伸。

关键词 台风暴雨 数值模拟 WRF 模式 中尺度辐合带 地形
 文章编号 1006 - 9895 (2009) 03 - 0489 - 12
 中图分类号 P444
 文献标识码 A

## Numerical Simulation and Analysis of Typhoon Haitang (0505) Heavy Rainfall

ZHOU Lingli<sup>1</sup>, ZHAI Guoqing<sup>1</sup>, WANG Dongfa<sup>2</sup>, GU Fengming<sup>3</sup>, and HE Bin<sup>4</sup>

1 Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2 Zhejiang Province Meteorological Bureau, Hangzhou 310002

3 Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou 325027

4 Jiaxing Meteorological Bureau, Jiaxing 314001

**Abstract** Successful numerical simulation output from WRFV2. 2 combined with NCEP reanalysis data, observed precipitation data from automatic stations and Doppler radar reflectivity are used to analyze the heavy rainfall caused by typhoon Haitang in Zhejiang and Fujian provinces. The results show that the heavy rainfall is from the spiral clouds band close to the north of the typhoon center, and caused directly by the strong mesoscale convergence belt in the boundary layer. The rain belt develops and moves northward corresponding to the convergence belt. Three ty-

**收稿日期** 2007-11-07, 2008-02-29 收修定稿

作者简介 周玲丽,女,1982年出生,博士研究生,主要研究方向为数值模拟研究。E-mail: zhoulingli\_1231@sohu.com

**资助项目** 浙江省重大科技攻关专项和社会发展重点项目 2006C13025,浙江省气象科技开放项目 KF006007,国家自然科学基金资助项目 40805018

phoon currents from different directions converge and ascend near the boundary of Zhejiang and Fujian provinces, transporting moisture and energy for the strengthening and maintenance of heavy rainfall. The confluence of these currents mainly happens in the boundary layer, which is the reason why the mesoscale convergence belt is confined in the boundary layer. The complicated mesoscale orography in Zhejiang and Fujian provinces plays an important role in the storm. The three different currents lift upward along the mountains ranging from north to south and trigger precipitation, which contributes to the heavy rainfall. However, the terrain plays no effect on the mesoscale convergence belt but prevents the precipitation from extending westward.

Key words numerical simulation of typhoon heavy rainfall, WRF model, mesoscale convergence belt, orography

## 1 引言

台风是热带海洋上强烈的气旋系统,可造成最 严重的自然灾害,其累计损失也是不可估量的。我 国是一个多台风的国家,每年夏季都会遭受台风暴 雨的侵袭。因此,台风暴雨长期以来一直都是人们 关注的焦点,许多气象学者为此进行了大量的研究 (陈联寿等, 2001; 李江南等, 2003, 2004; 程正泉 等,2005)。陈联寿等(1979)对台风特大暴雨的成 因进行了系统的概述,提出中尺度系统是特大暴雨 必备的条件。而几乎所有的台风暴雨都与地形有着 密切的联系。段丽等(2005)在后来的研究中进一 步发现,山脉阻挡产生的中尺度对流小涡系统 (MCS) 是造成台风特大暴雨的直接原因, 特大暴 雨就出现在 MCS 所在地区。随着数值预报模式的 不断发展,人们开始利用模式对台风进行数值模拟 研究,并且开始不断尝试模拟方案参数化及变分同 化的试验,为深入研究台风和提高预报效果提供了 重要参考和宝贵经验(谭锐志等,1994;朱洪岩等, 2000;李英等,2005; 闫敬华等,2005; 张林等, 2006)

2005 年 7 月 12 日 08 时 (北京时,下同),0505 号台风"海棠"在关岛东北洋面上生成并向偏西移 动,强度逐渐加强为强热带风暴,最终发展为台 风。7 月 18 日 14:50"海棠"在台湾省宜兰市登陆。 19 日 17:10 在福建省连江登陆,以后继续向西北偏 西移动,经过福建中北部,于 20 日 15 时进入江西。 21 日 20 时减弱为热带低气压进入湖南,但其影响 远未结束,对华北地区的影响一直持续到 24 日前 后。

台风"海棠"范围大,强度强,路径复杂,影响 我国时风力强且持续时间长,降雨强度大,使浙闽 地区遭受重大灾害。浙江南部沿海地区 10 级以上 大风持续近 40 小时,浙江东部地区出现暴雨和大 暴雨,而东南沿海则发生特大暴雨。有 75 个气象 站超过 200 mm,其中 19 个超过 400 mm,最大降 水出现在乐清砩头(水文站)和苍南县昌蝉(气象 站),分别达到了 736 mm。全省 31 个县(市)、 762.4万人受灾,40 多万人被洪水围困,直接经济 损失 72.2亿元(薛根元等,2005)。关于这次台风 过程已有不少研究,朱健等(2007)利用 MM5 模 式模拟了"海棠"台风登陆过程,初步分析了其中 的中尺度结构演变特征;靖春悦等(2007)从位涡 方面分析了"海棠"在河南的暴雨机制;沈晓玲 (2007)则通过分析湿位涡及其各分量的变化,揭 示了强降水中心与 MPVI 密集区的对应关系。然 而,对这次台风过程在浙闽地区产生的特大暴雨机 理的研究分析仍不够深入。

本文采用美国新一代中尺度数值模式 WRFv2.2 对"海棠"台风进行模拟,在较好模拟的情况下, 利用模式输出的高时空分辨率结果对"海棠"台 风在浙闽地区产生的强暴雨进行研究,分析影响 暴雨产生的主要中尺度系统,揭示暴雨的成因和 机理。

### 2 "海棠"台风概况和环流背景

图 1a 显示了当"海棠"台风登陆台湾前的高空 500 hPa 形势场,从图中可见,该时刻我国北部主 要呈现两槽一脊形势,在 123°E 副高的两侧有两个 比较深厚的低槽稳定维持在巴尔喀什湖以北和鄂霍 次克海附近地区,其中副高西侧的西风槽从高纬 60°N 一直向南伸至 30°N 附近。而在我国东南沿海 和台湾海峡一带则为台风控制范围,台风倒槽从台 湾向北延伸至浙江北部地区。在台风以北和东侧为 强大的副热带高压,副高中心位于辽宁附近,范围 伸向长江下游,构成一条高压坝。南北槽东西脊这 样的天气系统配置为台风暴雨的发生提供了有力的 环境场。图 1b 为同一时刻的卫星云图,图中可辨



图 1 2005 年 7 月 18 日 08 时 (a) 500 hPa 位势高度场和 (b) FY2C 红外卫星云图 Fig. 1 (a) Geopotential height (gpm) at 500 hPa and (b) FY2C infrared satellite cloud image at 0800 LST 18 Jul 2005



图 2 海平面气压场 (单位: hPa): (a) 18 日 20 时的实况场; (b) 积分第 12 小时的模拟场 Fig. 2 Sea level pressure (hPa): (a) Observed at 2000 LST 18 Jul 2005; (b) simulated at the 12th integral hour

别台风眼的位置和台风螺旋云带,其外围环流已影 响到浙闽沿海。受台风影响,台湾地区持续强降水 和大风,福建、浙江南部地区降水也普遍加大,浙 江中南部沿海海面、台湾海峡和台湾沿海地区维持 12级以上大风。

## 3 资料及模拟方案

本文研究使用美国新一代中尺度模式 WRFv2.2对发生在浙江南部的暴雨过程进行数值 模拟。背景场资料采用分辨率为1°×1°的GFS资 料,初始时刻为2005年7月18日08时,积分48 小时。模拟采用双重嵌套方案,第一重网格距为 30 km,第二重网格距为10 km。模式中主要采用 Kessler 微物理方案,Kain-Fritsch积云参数化方案 和 Monin-Obukhov 近地面层选项等物理参数。

491

### 4 模拟结果验证

#### 4.1 海平面气压

图 2 给出的是实况和模拟海平面气压场。从图 2a 的实况海平面气压场可见,台风低压中心在海平面上位于台湾海峡约 (24.5°N,120.1°E)处,根据中国气象局发布的台风路径报文,该时刻台风中心气压已达到 960 hPa,整个低压系统影响了我国东南部沿海地区。台风东北侧为一副热带高压带。对比模拟积分 12 小时的细网格海平面气压场 (图 2b),台风中心位置与实况接近,模拟的近中心等压线也已达到了 980 hPa,对比实况近中心等压线来看,也较为接近。



图 3 24 小时累积降水量 (单位: mm): (a) 2005 年 7 月 18 日 20 时~19 日 20 时实况; (b) 积分第 12~36 小时的模拟 Fig. 3 24-hour accumulated precipitation (mm): (a) Observed from 2000 LST 18 Jul to 2000 LST 19 Jul 2005; (b) simulated for integral hours 12 - 36

#### 4.2 降水量的比较

图 3a 为实况 18 日 20 时至 19 日 20 时的 24 小 时累积降水量,也是整个暴雨过程中降水比较集中 的一个阶段。该时段降水除海上无实况资料外,主 要发生在浙江东南沿海的台州和温州地区以及福建 北部部分地区,整个雨区沿海岸线呈东北-西南走 向,最大降水中心集中在苍南和福鼎附近,24小时 降水高达 400 mm, 大暴雨范围约有 100 km<sup>2</sup> 左右; 在该中心北侧还有一个中心在 300 mm 以上的雨 团,与南面的强中心连成一条南北向的强暴雨带, 其他地区的降水则稳定在 100~200 mm 左右。利 用细网格模拟的雨量(图 3b)较好地再现了实况降 水的分布,基本模拟出了位于浙南闽北的最大降水 中心,对降水位置模拟基本可行,但降水量的模拟 则偏大,造成浙西南地区出现了一些虚假的降水, 而台州北部地区则未能模拟出降水,整个模拟雨带 比实况略偏南。但是,模式还是模拟出了关键雨带 和强暴雨区。

为了深入了解暴雨发生的过程并进一步验证模式对中尺度暴雨的模拟效果,图4给出了其中强度 最强的6小时降水的实况和模拟结果进行对比分析。实况19日08时主要有两个降水区,一个位于临海附近为大于50mm的雨团,另一个位于福建 北部及延伸至浙江南部温州地区的降水中心(图 4a);19日14时,暴雨雨团均向北移动了20~ 30 km,原闽北的雨团有了强烈的发展,暴雨中心 也北移到达浙江境内并且有大幅增强,达到了约 250 mm,影响范围也扩大到了整个浙南地区(图 4c)。对比模拟雨量可以发现,积分 24 小时后,浙 闽交界区的强暴雨雨团较为明显地被模拟出,雨量 中心比实况偏高,但主要暴雨区位置与实况基本吻 合(图 4b);积分 30 小时的模拟降水位置基本可 行,除北部雨团处出现零星的小雨外,南部的强雨 带还是基本模拟出来了,中心雨量与实况也比较接 近,暴雨中心位置与实况也大体相符(图 4d)。

通过对海平面形势场、长短时雨量的对比分 析,发现模拟的台风暴雨过程的雨带分布还是比较 符合实况的。虽然模拟的雨量比实况偏大,但通过 多次不同初始场的模拟试验发现,雨量偏大的现象 普遍存在。因此这可能是由于模式本身或资料等方 面的因素造成的,目前还有待进一步的探讨研究。 总体来说,本次台风暴雨过程的模拟效果较为理 想,可作为深入分析和研究"海棠"台风中尺度暴 雨的依据。

## 5 台风螺旋云带的中尺度特征和暴雨 成因分析

### 5.1 流场特征

暴雨的发生发展过程必须满足水汽、热量和动 力等条件,因此低层的强气流结构是重要的原因之



图 4 6 小时累积降水量(单位: mm): 2005 年 7 月 19 日 (a) 02~08 时和 (c) 08~14 时实况; 积分 (b) 第 18~24 小时和 (d) 第 24~30 小时的模拟

Fig. 4 (a, c) Observed and (b, d) simulated 6-hour accumulated precipitation (mm): (a) 0200-0800 LST and (c) 0800-1400 LST 19 Jul 2005; (b) integral hours 18-24 and (d) integral hours 24-30

一。为了分析台风环流中强气流的作用,我们分析 了对流层不同高度的流场变化。如图 5a 所示,在 对流层低层σ=0.933 (近似 900 hPa)高度上,台 风中心北侧和东侧各有一个中心风速大于 45 m/s 的东风急流和南风急流,这两支急流呈气旋式旋转 过程中逐渐汇合,在 27°N 附近形成气流强辐合带; 同时,大风速区还对应着水汽通量高值区(图 5a 阴 影),说明东风急流和南风急流是水汽的主要输送 通道,为暴雨区提供源源不断的水汽条件。在对流 层高层 200 hPa (图 5b),台风高层气流呈逆时针向 外流出,从而使外围环流与台风中心附近的内层逆 环流之间形成一个辐散区,其台风中心的偏东北一 侧正好对应于低层台风中心的偏北方辐合带上空, 形成这一地区高层辐散、低层辐合的垂直耦合,有 利于这一地区气流的垂直运动的加强,为暴雨提供 了动力条件。

### 5.2 低层中尺度辐合与暴雨

研究表明,台风中尺度强对流系统往往是造成 台风特大暴雨的主要因素(Chen, 1995; Chen et al., 1995; Meng et al., 1996)。Chen et al. (2004)



图 5 2005 年 7 月 19 日 03 时的模拟细网格流场: (a)  $\sigma$ =0.933 高度,等值线:全风速大于 40 m/s 的急流区,空心箭头:低空急流轴,阴影:水汽通量大于 60 g·cm<sup>-1</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>; (b) 200 hPa 高度,空心箭头代表高空气流

Fig. 5 Simulated stream fields at 0300 LST 19 Jul 2005: (a) at  $\sigma=0.933$ , isolines: the wind velocity larger than 40 m/s, hollow arrows: the low-level jet axes, shadows: the moisture flux larger than 60 g·cm<sup>-1</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>; (b) at 200 hPa, hollow arrows: the high-level currents

还指出,当台风趋近陆地时,因地形影响在台风前 部低空辐合加强,在台风登陆后受山脉影响经常会 在台风右前方出现强烈天气。周海光(2008)在分 析多普勒雷达资料时,发现碧利斯台风引发的特大 暴是由β中尺度辐合线引发的,辐合线对与水汽输 送以及暴雨的形成、触发、维持具有重要作用,其 变化过程与降水的强弱演变过程基本同步。为了解 这次台风中尺度系统与暴雨之间的关系,本文利用 数值模拟输出的高分辨率结果,对暴雨发生最强烈 的几个时次进行分析。

为了较逼真地反映中尺度模拟结果,尤其是海 上实况的对比,本文采用低仰角(0.5°)的 PPI 反 射率资料。考虑到图 6 中模拟流场、中尺度辐合带 及实况降水的尺度,为了能更清晰地反映出雷达回 波和中尺度辐合带及雨带的对应关系,故只截取雷 达图中与模拟图相当位置的部分进行对比。19 日 06 时,台风接近福建沿海,台风中心东部低层偏南 气流与外围的偏东气流在闽北地区沿海(26.7°N) 附近形成气流的汇合,由此形成一条延绵几百公里 的东西向辐合带(图 6a 中阴影带),在辐合带上排 列呈多个强辐合中心,强度达到-15×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>以 上,这就是 MCS 云团。这条辐合带是台风低层环 流在作逆时针旋转时,由于台风近中心环流与外侧 环流之间形成了气流运动速度和方向上的差异而造 成的。这种过程有可能是台风螺旋云带之间在运动 上产生的物理原因。如图 5a 中所示,在台风东至 东北侧是以偏南气流为主, 它代表了台风内螺旋云 带的特征;在台风的北侧是以偏东气流为主,它代 表了更大范围的环流场,其螺旋云带如图 1b 中显 示的云带呈近东西向排列的特征。即台风近中心的 云带与外侧云带之间的排列并非同心圆, 这就是造 成云带之间有汇合的因素。我们称图 6a 中两条辐 合带中南侧辐合带为南支辐合带,是由偏南气流和 偏东气流造成的。此外,在该辐合带北侧、位于浙 江南部及浙闽交界地区还有一条呈东北西南走向的 辐合带(我们称之为北支辐合带)。为了比较中尺 度模拟结果,选取离实况暴雨区(图6中红色等值 线) 最近的浙江温州多普勒雷达资料。对比同时刻 的雷达回波图(图 6b)可见,与气流汇合带对应 的、位于温州以南 100 km 处, 有一条十分清晰的 呈细窄带状东西走向的雷达强回波结构,回波强度 在 40 dBZ 以上;同时,模拟的浙闽交界处的北支辐 合带在雷达回波上也有明显反映,即在南支回波带 的西北侧也有若干强回波块组成的短回波带呈东北 -西南向排列。可见,模拟的低层流场和中尺度辐 合带与实况雷达强回波很相似,包括其地理位置、 水平尺度,形状和范围均十分逼真。受强对流系统 影响,强辐合带(南支辐合带)以北的福建省太姥

495



图 6 2005 年 7 月 19 日 σ=0.966 高度上的模拟细网格流场、散度场(阴影)和实况后 1 小时雨量(红色等值线)(a、c、e、g)及同时刻的 温州多普勒雷达 PPI 回波 (b、d、f、h): (a、b) 06 时; (c、d) 07 时; (e、f) 08 时; (g、h) 09 时

Fig. 6 (a, c, e, g) Simulated streamline and divergence (shadows) fields at  $\sigma=0.966$  with observed precipitation (mm) in the next 1 hour (red isolines), and (b, d, f, h) observed radar PPI reflectivity at elevation 0.5° from Wenzhou Doppler radar on 19 Jul 2005: (a, b) 0600 LST; (c, d) 0700 LST; (e, f) 0800 LST; (g, h) 0900 LST

山附近,实况后1小时出现约40 mm 以上的强暴 雨(图 6a 中红线)。

1小时后(07时),随着台风进一步西进(图 6c),台风中心东部低层的偏南风急流中心增强并 向北延伸, 汇合线以北的偏东急流位置也向北抬, 两者交汇所产生的南支强辐合带也北移至 27°N, 向北推进了约30 km, 而北支辐合带减弱到图6c中 给定的分辨率以下未能直接显示在图中:此时的后 1小时实况降水区与辐合带对应很好,基本位于辐 合最强处。在雷达回波图上(图 6d),清晰可见一 条平直的南支强回波带和北支回波带依然存在并逐 渐靠近,其中北支回波带呈逆时针旋转成近东西 向。08时(图 6e), 辐合带进一步北移到 27.3°N (浙江苍南附近),由于汇合气流的其中一支是由原 来的偏南风转成东南气流,此时的辐合带呈"眉 状"的特征,周围的辐合中心都合并到其中,使得 该辐合带进一步发展强大。最大降水中心也随之向 北移动并发展增强到了 60 mm 以上,降水区逐渐 沿辐合带发展,形成了明显的东西向带状雨带。从 雷达回波图(图 6f)上看,南支回波带向北推进并 与北支短回波带结合成一体。更有意思的是,回波 带在沿海地区也明显有一个弧状的回波波动特征 (图 6f 中箭头所指位置),可见本次模拟的中尺度

重要特征与雷达所观测到的重要特征十分相似。到 了 19 日 09 时(图 6g, AB、CD 线为垂直剖面位 置), 辐合带继续发展增强并北抬到 27.6°N, 进入 温州以南的瑞安市附近, 后 1 小时实况降水区与辐 合带一致并随之相应北移, 强雨量中心与辐合中心 对应并增强到 50 mm 以上。此时的强雷达回波带 发展到 50 dBZ 以上(图 6h), 位置向北移动了几十 公里, 和辐合带的变化基本一致。

从以上模拟的分析场可以看出,模拟流场上的 中尺度辐合带与实况雷达图上强回波带基本吻合, 且两者的变化保持同步,这也进一步验证这次中尺 度模拟基本表述了实况的一些重要特征与信息。这 次主暴雨区主要是台风中心偏北附近的螺旋云带降 水,降水的发展和辐合带之间存在着明显的对应关 系,随着辐合带的移动和增强,降水分布和雨量中 心也随之出现相应的变化。

### 5.3 中尺度辐合和低层急流的垂直结构

为了进一步了解中尺度辐合线的成因、垂直结构及其对暴雨的作用,图7给出了积分第25小时,即19日09时的垂直于辐合线和沿辐合线的剖面, 剖线的具体位置见图6g。图7a为切过暴雨区的南北向垂直剖面(图6g中CD线),从图中平行于剖面的风分量等值线可看到(即v风量),暴雨区(图



图 7 2005 年 7 月 19 日 09 时风场和散度的垂直剖面: (a) 沿图 6g 的 CD 线; (b) 沿图 6g 的 AB 线。彩色阴影: 散度场; 等值线: 平行于 剖面的等风速线; 矢量: 环流; 红色粗线: 降雨区

Fig. 7 Vertical cross sections of wind circulation (vectors), divergence (shadows) and wind component (contours) in parallel with the cross section at 0900 LST 19 Jul 2005: (a) Cross section along line CD in Fig. 6g; (b) cross section along line AB in Fig. 6g. The bold red lines are the position of rain belt

中红色粗线位置) 南侧 30 km 处有一支较强的偏南 气流,中心(J<sub>L</sub>)位于边界层顶附近,强度达到了 24 m/s。对应台风环流可知,该偏南气流主要来自 台风中心低层的偏东南急流;在暴雨区北侧近地面 另有一支非常浅簿的偏东北气流(JL),中心强度 为13 m/s, 它是来自台风外围环流中的偏东气流。 在接近大陆沿海时逐渐转成偏东北气流, 这支浅薄 的气流带来了弱冷湿空气,并嵌入到辐合线的底 层,起到了增强和触发对流发生或增强的作用,并 导致两支气流在暴雨区边界层汇合,由此在边界层 内形成-28×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>的强辐合中心;在暴雨区北 侧偏北气流的上方约 750 hPa 高度处还有一支强偏 南气流,中心风速达到 34 m/s,这就引起其后部的 气流在中层出现辐散区,从而有利于边界层形成辐 合、对流层中低层辐散的垂直有利环境,有利于造 成强烈的上升运动。另一方面,在对流层低层出现 的风向差这一风场垂直结构,构成垂直风不同风向 切变,产生强烈的不稳定,也为暴雨区的发展提供 了有利条件。

由垂直于剖面风分量等值线可见(图略),对 应图 7a 暴雨区南侧偏南气流的是一支 30 m/s 的强 偏东气流,而对应暴雨区北侧近地面偏北气流的是 一支中心风速高达 50 m/s 的偏东急流。对应台风 环流可知,在暴雨区附近构成汇合的正是偏东南和 偏东北两支气流。

沿东西向 AB 线的垂直剖面 (图 7b) 可见, 这 次台风倒槽以东的气流分布与图 7a 中所反映的情 况基本一致, 在整体东风气流下, 出现多个边界层 急流中心, 在边界层内急流中心的前方出现辐合, 其中多个暴雨区内(图中红色粗线)近地面对应多 个强辐合中心, 辐合主要发生在边界层内; 而沿气 流汇合线的暴雨区上空的对流层中低层出现强辐 散。由图 7b 可以看出, 台风北侧的螺旋云带中, 边界层偏东气流在暴雨区上空上升, 在对流层中 低层辐散并向西北倾斜穿越剖面, 形成倾斜的上升 气流。

### 5.4 "海棠"台风中尺度暴雨天气过程的气流概念 模型

为了能进一步说明本次暴雨发生过程的气流结构,我们绘制了台风不同部位、不同高度的质点轨迹(图略),根据不同的轨迹路线,绘制了台风北侧中尺度暴雨的气流概念模型(图8)。本次暴雨过程

中,造成暴雨的主要有三支交汇上升气流。一支为 来自菲律宾东侧海面的台风外围偏东南气流 A, 该 气流在台风东部时缓慢爬升,在到达浙闽交界沿海 地区突然剧烈上升到 250 hPa 高度左右, 后又逆时 针旋转上升到 100 hPa 向西北方向流去;另一支偏 北气流 B 来自台风西部环流(江西南部)的近地 面,这支气流从低层就开始气旋性运动,到达台湾 海峡开始向上爬升,并在浙江南部与上升中的气流 A 交汇,达到 700 hPa 高度又与气流 A 分离作气旋 性转动 360°, 最后流向东北方向; 第三支为来自东 海海面上的偏东气流 C, 该气流进入浙闽沿海时转 为东北东气流,经过浙江、江西、福建,在南海海 面上逆时针旋转 360°后, 上升再次到达浙江省南部 地区, 与气流 A 和气流 B 一起交汇上升到 700 hPa 高度附近分流出来,再次旋转强烈上升到 100 hPa 左右向西北分流而去。

497

这三支气流对台风暴雨的发生起到了重要的作 用。根据图 5a 中水汽通量高值区分布的情况可知, 气流 A 具有丰富的水汽,为暴雨区提供源源不断的 水汽,使得暴雨得以维持;气流 A 还是三支气流中 上升运动最为剧烈的,它释放大量的能量使得暴雨 产生并增幅。气流 B 对水汽的输送也具有一定的 作用,当它运动到台湾海峡附近时,携带水汽爬升 并与其他两支气流汇合,有利于辐合发展。气流 C 来自东北偏东方向,其冷湿的北风分量嵌入到气流 A 和气流 B 的下层,有利于触发系统发展和地面辐 合的加强。随后,气流 C 又再次与气流 A、B 汇合 上升,释放出能量,产生降水。

### 5.5 沿海中尺度地形对暴雨的作用

从以上的分析中可以看出边界层中尺度汇合线 在暴雨过程中所起到的重要作用,由于浙闽交界处 位于南雁荡山脉,地形的作用是否更为重要?郑庆 林等(1996a,1996b)对9216号台风的数值模拟结 果表明,地形的抬升辐合在台风暴雨的增幅中起到 很大的作用。为了研究这次过程中尺度地形和中尺 度辐合线的共同影响,本文在原模拟试验的基础上 分别将原地形高度削低至 300 m 进行地形敏感性 试验,以观察中尺度地形对暴雨的影响。图 9 为控 制试验和地形敏感性试验模拟结果的对比。从图 9a 可以看出,降水主要有两部分组成,一是由海面 上延伸到浙江东部沿海的西北-东南走向的雨带,6 小时中心雨量为 150 mm,主要落在浙闽东部交界



图 8 海棠台风暴雨气流的概念模型

Fig. 8 The circulation concept model of the heavy rainfall during typhoon Haitang



图 9 2005 年 7 月 19 日 09 时模拟过去 6 小时累积降水 (粗等值线)、地形及 σ=0.966 高度上的流场: (a) 控制试验 (阴影:高于 600 m 的 地形); (b) 地形敏感性试验 (地形不高于 300 m)。虚线框:两个雨带的位置

Fig. 9 Simulated streamline field at  $\sigma=0.966$  and accumulated precipitation in the past 6 hours (bold isolines, units; mm) at 0900 LST 19 Jul 2005: (a) Control experiment (shadows: the terrain height  $\geq 600$  m); (b) terrain sensitivity experiment with the terrain height lower than 300 m. The dashed rectangles give positions of rain belt

处;另外一个是沿地形分布呈南北走向的雨带,6 小时中心雨量达到100 mm,主要落在福建鹫峰山 东麓。对比图9b,当地形高度削减至300 m时,雨 带略有西伸,雨带大致走向及雨量中心的位置和大 小基本没有明显变化。但是,十分明显的是,位于 福建鹫峰山区的雨带随地形高度降低而减弱消失, 这从另一个侧面反映出WRF模式在地形参数反馈 中有可能激发出过多的中尺度暴雨中心。根据前面 的分析和试验结果可知,在边界层近东风气流作用 下,雨带一是台风螺旋云带降水,是由上文提到的 中尺度辐合带导致的,也是此次台风暴雨的主要降 水,地形作用可阻挡降水向西延伸;雨带二则是浙 闽地区地形作用产生的降水,是由台风偏东暖湿气 流受地形抬升所导致的。当地形削减,气流没有受 到抬升便无降水产生,同时台风北侧偏东气流不再 受到山脉阻挡,与偏南气流的辐合带在西侧延伸, 因此螺旋雨带也较控制试验更向西伸。由此可见, 浙闽山地地形起伏增强了地面对大气的拖曳效应, 使得垂直运动加强,并改善了积云对流和大尺度降 水条件,增加了对流降水和大尺度降水,从而引起 台风暴雨的增幅,

## 6 结论

结合实况和模拟结果对此次暴雨进行分析,得 到以下结论:

(1) 对于这次由于台风"海棠"影响发生在浙 江和福建北部的强暴雨过程,利用 WRF 模式再现 了中尺度暴雨位置,并且清晰地反映出了引起暴雨 发生的边界层强中尺度辐合带系统。对于分析研究 暴雨成因和机制具有重要的参考作用。

(2)这次暴雨是台风螺旋云带暴雨,边界层强 中尺度辐合带是直接导致暴雨发生的主要系统之 一。该中尺度辐合带是由台风外围边界层顶处中心 风速达到 45 m/s以上的强东风急流和台风中心东 侧的强偏南气流在浙闽地区交汇形成的多个强辐合 中心东西向排列所组成的。出现在对流层中层的强 辐散中心与边界层辐合带上东西向排列的强辐合中 心形成中低层垂直耦合,促使低层暖湿气流强烈地 上升运动,产生强暴雨,因此暴雨区主要出现在辐 合带所在位置。与耦合结构对应的强正涡度中心则 有利于对流系统的发展,使暴雨过程得以持续增 幅。当台风不断向西北推进,东风急流的位置相应 北抬,并且偏南风急流中心也不断向北延伸,导致 气流交汇处的北移,因此雨带伴随着强辐合带出现 不断的北抬。

(3)位于暴雨区上空中尺度辐合线,主要有三 支来自不同方向的气流起到了水汽通道和能量输送 的作用,保证了暴雨的增幅和维持;而气流的汇合主 要发生在边界层内,在达到边界层顶后便各自分流而 去,这也是中尺度辐合带高度局限于边界层的原因。

(4)地形是这次暴雨发生的另一个重要原因。 浙闽地区地形复杂,气流沿着南北向的山脉爬升触 发降水,为暴雨的增幅做出了重要贡献。但是,对 于边界层东风急流造成的中尺度辐合带,地形的作 用较小,仅可阻挡降水向西延伸。

#### 参考文献 (References)

陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京:科学出版 社,1-490. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction of the Western Pacific Typhoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1-490.

- Chen Lianshou. 1995. An overview on tropical cyclones structure and structure change [C]//Proceeding of the Second WMO International Workshop WMO/TD, No. 361, 52-62.
- Chen Lianshou, Luo Zhexian. 1995. Effect of the interaction of different-scale vortices on the structure and motion of typhoons [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 12 (2): 207-214.
- 陈联寿,孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科 学,25 (3):420-432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3):420-432.
- Chen Lianshou, Luo Zhexian. 2004. Interaction of typhoon and mesoscale vortex [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (4): 515-528.
- 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进 展 [J]. 气象, 31 (12): 3-9. Cheng Zhengquan, Chen Liangshou, Xu Xiangde, et al. 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (12): 3-9.
- 段丽, 陈联寿. 2005. 热带风暴"菲特"(0114) 特大暴雨的诊断研 究 [J]. 大气科学, 29(3): 343-353. Duan Li, Chen Lianshou. 2005. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 343-353.
- 靖春悦,寿绍文,贺哲,等. 2007. 台风海棠造成河南暴雨过程的位 涡分析 [J]. 气象,33 (4):58-64. Jing Chunyue, Shou Shaowen, He Zhe, et al. 2007. Analysis of potential vorticity for the rainstorm processes in Henan Province caused by typhoon Haitang [J]. Meteorological Monthly (in Chinese),33 (4):58-64.
- 李江南,王安宇,杨兆礼,等. 2003. 台风暴雨的研究进展 [J]. 热 带气象学报,19 (增刊):152-159. Li Jiangnan, Wang Anyu, Yang Zhaoli, et al. 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (Suppl.): 152-159.
- 李江南, 龚志鹏, 王安宇, 等. 2004. 近十年来台风暴雨研究的若干 进展与讨论 [J]. 热带地理, 24 (2): 113-117. Li Jiangnan, Gong Zhipeng, Wang Anyu, et al. 2004. Progress in the study of typhoon rainstorm in recent ten years [J]. Tropical Geography (in Chinese), 24 (2): 113-117.
- 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 [J]. 大气科学, 29 (1): 91 - 98. Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 91 - 98.
- Meng Zhiyong, Nagata Masashi, Chen Lianshou. 1996. 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, 10 (4): 430-443.

- 沈晓玲, 2007. 台风海棠暴雨的湿位涡分析 [J]. 科技通报, 23 (2):180-186. Shen Xiaoling. 2007. Analysis of moist potential vorticity in typhoon Haitang heavy rain [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 23 (2): 180-186.
- 谭锐志,林元弼. 1994. 台风暴雨积云参数化试验 [J]. 大气科学, 18 (3): 331-340. Tan Ruizhi, Lin Yuanbi. 1994. A test of cumulus parameterization schemes for the typhoon rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (3): 331-340.
- 薛根元,诸晓明,朱健. 2005. 0505 号台风"海棠"灾害的初步诊断 研究 [J]. 科技导报,23 (10): 30 - 35. Xue Genyuan, Zhu Xiaoming, Zhu Jian. 2005. Diagnose and research on typhoon disasters caused by 0505 typhoon Haitang [J]. Science & Technology Review (in Chinese), 23 (10): 30 - 35.
- 闫敬华,徐建平,丁伟钰,等. 2005. 地形对登陆热带气旋"黄蜂"
  (2002)强度影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 29 (2): 205-212.
  Yan Jinghua, Xu Jianping, Ding Weiyu, et al. 2005. A modeling study of the impact of terrain on the intensity of landfalling tropical cyclone Vongfong (0214) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 205-212.
- 张林, 倪允琪. 2006. 雷达径向风资料的思维变分同化试验 [J]. 大 气科学, 30 (3): 433-440. Zhang Lin, Ni Yunqi. 2006. Fourdimensional variational data assimilation of radar radial velocity observation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 433-440.
- 郑庆林, 吴军. 1996a. 地形对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 19 (1): 8-17. Zhen Qinglin, Wu

Jun. 1996a. Numerical study of orographic effect on amplification of typhoon precipitation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (1); 8-17.

- 郑庆林,宋青丽. 1996b. 一个台风暴雨模式和山地地面拖曳效应对 登陆台风暴雨增幅影响的数值研究 [M]//85-906-07 课题组. 台 风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册). 北京: 气象出版社, 215-221. Zhen Qinglin, Song Qingli. 1996b. Numerical study of the impact of a typhoon rain storm model and mountain trail effect to the increment of landing typhoon rain storm [M]//85-906-07 Group. Study of Typhoon Sciences, Operational Experiments and Theory of Synoptic Dynamics (Vol. 4) (in Chinese). Beijing, China Meteorological Press, 215-221.
- 周海光. 2008. 强热带风暴碧利斯(0604)引发的特大暴雨中尺度 结构多普勒雷达资料分析 [J]. 大气科学, 32(6): 1289-1308. Zhou Haiguang. 2008. 3D structure of the heavy rainfall caused by BILIS (0604) with doppler radar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(6): 1289-1308.
- 朱洪岩,陈联寿,徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及 其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学,24(5):669-675. Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669-675.
- 朱健,张建海,陈红梅. 2007. 0505 号台风的数值模拟和中尺度结 构分析 [J]. 海洋预报,24 (1):81-89. Zhu Jian, Zhang Jianhai, Chen Hongmei. 2007. Numerical simulation and meso-scale analysis of typhoon Haitang [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 24 (1):81-89.