

岳彩军. 2009. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析 [J]. 大气科学, 33 (1): 51–70. Yue Caijun. 2009. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with typhoon Haitang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 51–70.

“海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析

岳彩军

中国气象局上海台风研究所 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海 200030

摘 要 2005 年 7 月 19 日 08 时~20 日 08 时“海棠”(Haitang)台风登陆福建省前后 24 小时期间,带来一次明显降水过程,且台风北侧降水较南侧强,呈明显非对称分布。利用 WRF 模式对此次降水过程进行了数值模拟,基于模拟结果,不仅分析研究了相对湿度、垂直上升运动场,同时还进行改进的湿 Q 矢量诊断分析,以及计算分析地形抬升和地表摩擦的强迫作用,定量分析“海棠”台风降水非对称分布特征形成的可能成因。结果表明:(1) WRF 模式成功地模拟出了此次降水非对称分布特征、主要降水落区,以及 300 mm 以上极端强降水的强度、位置,模拟效果令人鼓舞。(2) 垂直上升运动条件可能是造成降水非对称分布特征的主要因素。(3) 台风北侧改进的湿 Q 矢量散度辐合强度明显较其南侧强,进一步计算分析发现,改进的湿 Q 矢量散度强迫产生的降水场也呈明显非对称分布,且台风北侧强于南侧。(4) 地形因子强迫产生的降水强度约是改进的湿 Q 矢量散度强迫产生的降水强度的 1.6~2.5 倍,且地表摩擦作用强迫产生的降水强度约是地形抬升作用强迫产生的降水强度的 2~3 倍。

关键词 登陆台风降水 非对称成因 WRF 模式 改进的湿 Q 矢量 定量研究

文章编号 1006-9895(2009)01-0051-20

中图分类号 P426

文献标识码 A

A Quantitative Study of Asymmetric Characteristic Genesis of Precipitation Associated with Typhoon Haitang

YUE Caijun

Shanghai Typhoon Institute, Laboratory of Typhoon Forecast Technique, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract Typhoon Haitang landing Fujian Province from 0800 LST 19 July to 0800 LST 20 July in 2005, gives rise to a significant rain process during the 24 hours, and precipitation intensity on the north side of typhoon is stronger than that on the south side, which shows obvious asymmetric distribution. The rainfall process is simulated using the WRF model and based on simulated outputs, the relative humidity and vertical ascending motion fields are analyzed, meanwhile, the forcing roles of orographic lifting and surface friction are calculated and the diagnosis of the revised wet Q vector is conducted, so the cause of asymmetric distribution formation of rainfall associated with typhoon Haitang is analyzed quantitatively. The results are as follows: (1) The rain asymmetric distribution feature, the fallout region of primary precipitation, and the intensity and the location of extreme rain exceeding 300 mm are simulated successfully, so the simulation effects are considerably inspiring. (2) Vertical ascending motion condition may be the predominant factor leading to asymmetric distribution of precipitation associated with the typhoon. (3) The convergence intensity of the revised wet Q vector divergence on the north side of the typhoon is stronger than

收稿日期 2007-05-21, 2007-07-13 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875025、40405009、40075009、40205008, 江苏省气象灾害重点实验室开放课题 KJS0602, 上海市自然科学基金项目 08ZR1422900

作者简介 岳彩军,男,1972 年出生,博士,副研究员,主要从事中尺度动力学、海气相互作用研究。E-mail: yuecaijun2000@163.com

that on the south, and from the further calculation and analysis it is found that the rain field forced by the revised wet Q vector divergence also shows marked asymmetric distribution, with intensity on the north stronger as compared with that on the south side of the typhoon. (4) The precipitation intensity forced by orographic factors is about 1.6–2.5 times of the counterpart caused by the revised wet Q vector divergence, and the rain intensity forced by surface friction is approximately 2–3 times of the counterpart caused by orographic lifting.

Key words precipitation associated with landfalling typhoon, cause of asymmetric formation, WRF model, revised wet Q vector, quantitative study

1 引言

登陆热带气旋(简称 TC)带来的强降水常给人民经济财产和生命安全造成重大损失。登陆 TC 降水结构相当复杂,不同个例之间彼此不同,即使同一 TC 的不同发展演变阶段其降水强度及分布特点也会不同,这给登陆 TC 的定量降水预报(简称 QPF)工作造成很大困难。加深认识和全面理解 TC 降水强度及分布成因的研究工作对于改进登陆 TC 的 QPF 具有重要意义。因此,国内外学者通过观测、诊断分析及数值模拟开展了广泛的相关研究。陈联寿等(2002, 2004)和程正泉等(2005)基于大量观测资料研究指出,多数 TC 登陆时在其前进方向的右半圆区内的暴雨范围及强度要明显大于左半圆区。针对 TC 降水非对称特征,陶祖钰等(1994)利用常规天气资料探讨了 9216 号台风登陆后其流场和热力场不对称结构与暴雨形成的关系。丁金才等(1997)从大尺度天气系统配置、卫星云图和数值模拟结果分析 9414 号热带气旋(DOUG)非对称结构对降水的影响。钮学新等(2005)通过 MM5 模式对 0216 号台风(森拉克)降水进行数值模拟试验指出,地形作用使迎风坡及降水中心增加雨量,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称、更不均匀。冀春晓等(2007)通过有无地形的数值对比试验,着重讨论了 0414 号台风 Rananim 登陆期间地形对台风降水、台风结构特征变化的影响。国外对登陆 TC 降水的观测研究始于 20 世纪 20 年代。许多研究(Cline, 1926; Koteswaram et al., 1956; Miller, 1958; Frank, 1977)基于登陆 TC 的观测雨量资料进行合成分析发现,登陆 TC 降水呈明显的非对称分布,且最大降水主要位于 TC 右前方。但后来也有研究(Parrish et al., 1982; Elsberry, 2002)得到相反的结论,发现最大降水位于登陆 TC 的左前方。另外,有研究(Bur-

pee et al., 1989)发现登陆 TC 降水非对称特征存在变化现象,最大降水的位置从 TC 的路径左侧移至右侧。鉴于登陆 TC 降水分布的复杂性,许多学者进行了诊断分析研究。Carr et al. (1978) 诊断计算热带风暴(TS) Agnes 穿越美国东南部期间的稳定降水和对流降水,试图利用诊断计算结果再现观测降水场,以期揭示登陆 TC 降水形成原因。Bosart et al. (1978) 利用运动学方程和非线性平衡 ω 方程,对 Agnes (1972) 引发的暴雨过程进行计算分析,结果表明对流层中上层弱的短波槽是降水增加的触发机制。针对在西南太平洋生成且引发新西兰强降水的热带气旋 Bola (1988), Sinclair (1993) 计算了地形降水,同时利用准地转 ω 方程诊断分析动力和热力因素并分析垂直速度与雨区的对应关系,以理解导致降水形成的物理过程,且指出不考虑地形诊断计算所得降水量明显较观测偏低,地形影响主导了降水场的分布。最近, Lin et al. (2002) 基于对超级热带气旋 Bilis (2000) 的数值模拟结果,采用 Lin et al. (2001) 提出的通量模式(flux model),计算了地形水平湿度通量 $(\mathbf{V} \cdot \nabla_h)q$ 和垂直湿度通量 ωq , 并与实际降水场进行比较,结果发现二者对应得很好,并认为发生在山脉附近的降水主要是由于地形强迫造成的,而不是台风环流内所伴随的原始(original)雨带引起的。此外,也有许多学者(Tuleya et al., 1981; Bender et al., 1985; Wu et al., 2002; Chen et al., 2003)通过(理想)数值模拟试验,以期揭示登陆 TC 降水的非对称分布特征的形成原因。上述研究针对不同 TC 个例都取得了有意义结果。近几年,国内不少学者(钮学新等, 2005; 冀春晓等, 2007; 徐亚梅等, 2005; 李英等, 2005; 闫敬华等, 2005; 段丽等, 2005; 邓国等, 2005; 袁金南等, 2005; 张胜军等, 2005)采用不同的数值模式对不同登陆 TC 个例的结构、路径、强度及降水开展了有意义的模拟研

究,同时,已有研究(章国材,2004; Zhang et al., 2004; Liu et al., 2004; 刘春霞等,2004; 沈元芳等,2004; Gu et al., 2005; 丁伟钰等,2005)表明,美国新一代中尺度细网格数值模式 WRF (Weather Research and Forecast model) 模式对台风(飓风)具有一定的模拟能力。另外, Q 矢量包含了动力学和热力学信息,是用于诊断分析降水成因的有效工具之一(Dunn, 1991; 岳彩军,1999; 岳彩军等,2005)。许多研究(邓之瀛等,1997, 1998; 黄文根等,1997; 姚秀萍等,2000; 李志楠,2000; 李江南等,2005; 郭荣芬等,2005; 朱健等,2006, 2007; 杨宇红等,2006; 颜琼丹等,2006)将 Q 矢量用于台风暴雨及暴雨增幅研究,都取得了很好的效果。最近,岳彩军等(2003)对 Q 矢量作了进一步改进和完善,得到了改进的湿 Q 矢量,其诊断能力有明显提高。本文将针对 2005 年第 5 号“海棠”台风在登陆福建省前后所造成的降水过程,利用 WRF 模式进行数值模拟,在模式成功模拟的基础上,进一步分析模拟输出的与降水密切相关的水汽条件和垂直上升运动场,接着进行改进的湿 Q 矢量诊断分析,然后计算分析地形抬升和地形摩擦所起的作用,通过上述定量分析研究,以期揭示出“海棠”台风降水非对称分布特征的可能成因。

2 “海棠”台风概况及数值模拟

2.1 “海棠”台风概况

2005 年第 5 号台风“海棠”于 7 月 12 日 08 时(北京时,下同)在关岛东北洋面上生成并向偏西移动,强度逐渐加强,18 日 14:50 第一次在台湾省宜兰市登陆,穿越台湾省后进入台湾海峡,19 日 17:10 再次在福建省连江市黄岐镇登陆。在“海棠”台风穿过台湾省再次在福建省登陆前,主要向福建省中北部沿海靠近,但 10 mm 以上雨区及 50 mm 以上暴雨区主要位于浙江省境内。台风再次在福建省登陆后,并在福建省境内向西偏北方向移动,但 10 mm 以上雨区及 50 mm 以上暴雨区仍主要位于浙江省境内。也就是说,在“海棠”台风再次登陆福建省前后 24 小时期间,福建省仅在中北部出现 10 mm 以上降水、东北部出现 50 mm 以上暴雨,福建中南部及广东省境内都没有 10 mm 降水发生,而浙江省全省几乎都出现了 10 mm 以上降水,且 50 mm 以上暴雨主要出现在浙江省中东部,尤其是

300 mm 以上极端强降水发生在浙江省东部沿海地区。显然,相对于西行移动路径,“海棠”台风南北两侧降水呈现明显非对称分布特征。

2.2 WRF 模式模拟方案设计

本文采用 WRF V2.0 版本作为“海棠”台风再次登陆的数值模拟模式,模式的初始条件和侧边界条件均采用 GFS (Global Forecast System) 每 6 小时一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球分析资料。模拟过程没有采用任何“bogus”方案。在模式中采用双重嵌套,模式模拟的区域范围如图 1 所示,模拟区域的中心位置为 $(25^\circ\text{N}, 118^\circ\text{E})$ 。粗网格区域有 81×81 个格点,格距为 45 km; 细网格区域有 121×121 个格点,格距为 15 km。模式垂直方向的分辨率取为 31 层。模拟初始积分时间选在台风登陆前约 9.2 h,即 7 月 19 日 08 时,积分至 20 日 08 时结束,共积分 24 h,每小时输出一次模式结果。模拟输出结果全为细网格格点场 ($15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$) 的计算结果。

本文模拟选用欧拉质量坐标,模式的物理过程主要包括:YSU 边界层过程方案、Kain-Fritsch (new Eta) 积云对流参数化方案、Lin et al. (1983) 的微物理过程方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案和近地面层热力混合方案。粗、细网格使用同样的物理过程。

本文主要研究分析“海棠”台风再次在福建省登陆前后(2005 年 7 月 19 日 08 时~20 日 08 时)

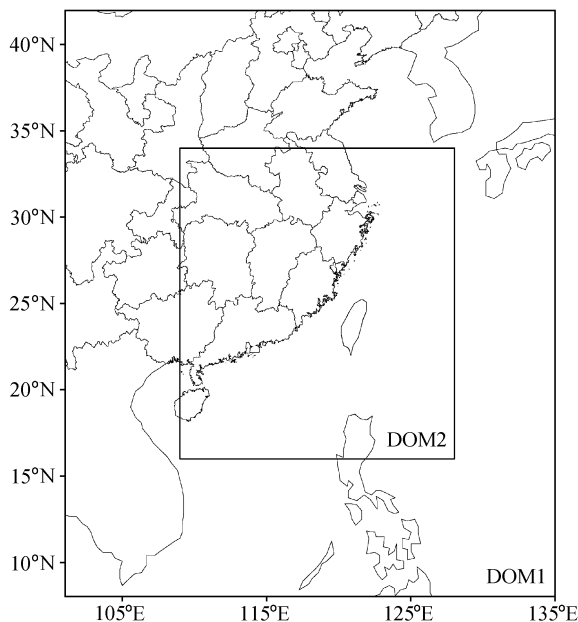


图 1 WRF 模式数值模拟区域

Fig. 1 Design of WRF model domains

24 小时期间, 给我国大陆带来的降水分布特征及成因, 至于海上包括台湾省在内我们不作具体分析。

2.3 路径及强度模拟结果分析

将中央气象台每 3 小时的客观定位路径及强度作为实况。图 2 为 WRF 模式对“海棠”台风路径(图 2a)及强度(图 2b)的模拟结果。在“海棠”台风登陆前 9 小时, WRF 模式模拟的路径与实际路径较为接近, 登陆点较实况偏南 20 km。在台风登陆之后 9 小时, 模式预报路径较实况路径偏南, 最大距离误差约为 114 km, 随后 6 小时预报路径北折, 向实况路径靠近。24 小时内路径平均预报误差约为 50 km。

“海棠”台风登陆前后的强度模拟较实况均偏

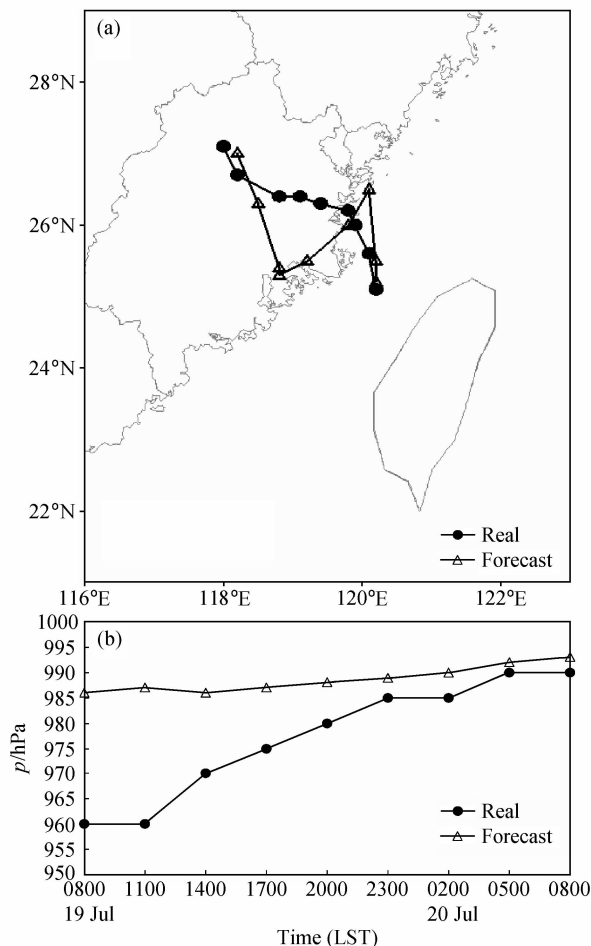


图 2 2005 年 7 月 19 日 08 时~20 日 08 时“海棠”台风观测与预报的 (a) 中心位置及 (b) 中心强度

Fig. 2 (a) Positions and (b) intensities of the observed and predicted centers for typhoon Haitang during 0800 LST 19 Jul to 0800 LST 20 Jul 2005

弱, 尤其在登陆前更为明显, 这与本文模拟工作没有进行人工干预(即采用“bogus”技术), 将模式起报时台风中心位置、中心气压订正到初始场有一定关系。但登陆之后, 模拟强度逐渐与实况接近, 偏弱的程度逐渐减小。尽管模拟强度一直弱于实况, 24 小时内强度预报平均误差约为 11 hPa, 但二者由强到弱的演变趋势基本是一致的。

2.4 降水模拟结果分析

2.4.1 与 24 小时实况降水场对比分析

图 3 为 7 月 19 日 08 时~20 日 08 时期间 24 小时实况降水场和对应的模拟降水场。由图 3a 可知, 10 mm 以上降水主要位于福建省中北部、浙江省全部及安徽省东南部等地, 50 mm 以上暴雨则主要出现在台风北侧的福建省东北部沿海、浙江省沿海及浙江省北部局部地区, 其中 200 mm 以上特大暴雨都出现在浙江省境内, 位于浙江省中南部沿海地区, 在 (28.1°N, 121°E)、(27.9°N, 120.5°E) 附近分别出现了 411 mm 的最大降水中心、336 mm 的次最大降水中心。而处于台风南侧的福建省中南部及广东省境内都没有 10 mm 降水出现。台风南北两侧雨区范围及雨强都呈明显的非对称分布。由图 3b 可知, 同期模拟的 10 mm 以上雨区与实况基本一致, 50 mm 以上暴雨区同样主要出现在浙江省境内, 除浙江省西北部、安徽省东南部模拟的降水较实况明显偏强外, 其他地区与实况基本吻合。200 mm 以上特大暴雨也都出现在浙江省境内, 尤其是在 (28.1°N, 121°E)、(27.9°N, 120.5°E) 附近分别出现了 463 mm 最大降水中心和 343 mm 次最大降水中心, 这与实况相当吻合。模式很好地模拟出 24 小时极端强降水。

2.4.2 与 6 小时实况降水场对比分析

下面将结合 6 小时实况雨量, 进一步分析 WRF 模式对此次降水过程的模拟能力。7 月 19 日 08~14 时期间, 实况(图 4a) 10 mm 以上雨区主要分布在台风西北侧的福建省东北沿海、浙江省沿海及浙江省北部局部地区, 其中, 50 mm 以上暴雨区主要分布在福建省东北沿海、浙江省东南部地区、浙江省中部沿海局部地区, 且在 (27.5°N, 120°E) 处出现 218 mm 最大降水。而台风南侧的福建省大部分地区仅有微量降水, 且广东省境内无 10 mm 降水区。整个雨区呈现出明显的南北非对称分布特征。同期模拟结果(图 4b)为陆地上 10 mm 以上雨

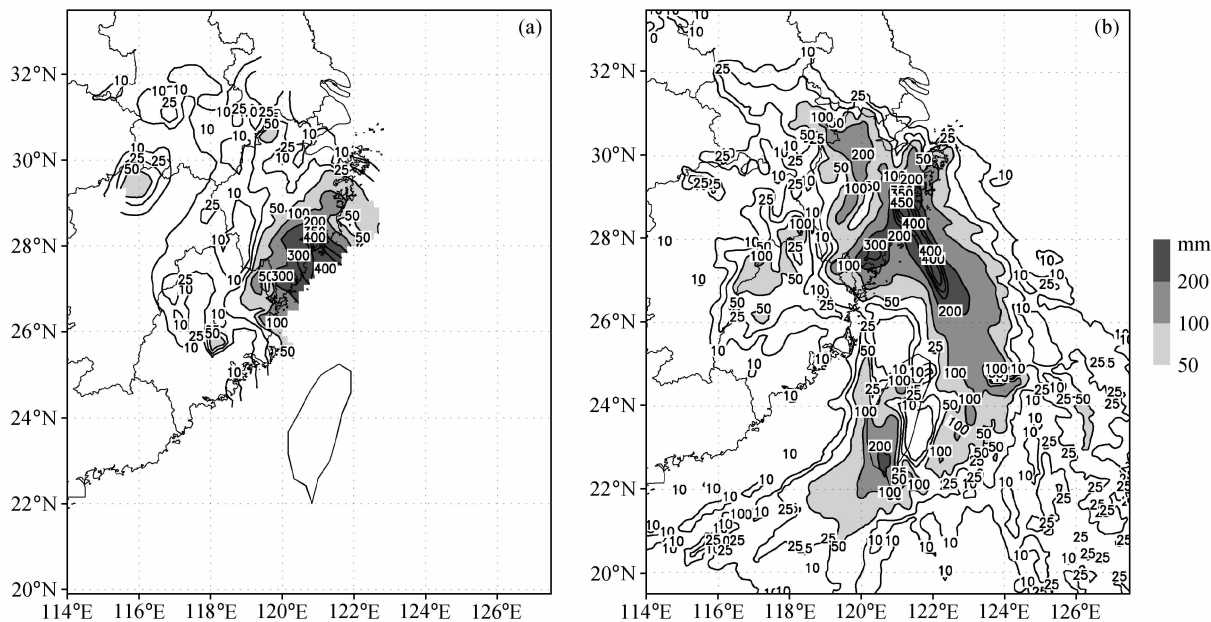


图3 24小时 (a) 实况和 (b) 模拟的累积降水量 (单位: mm)

Fig. 3 (a) Observed and (b) simulated 24 hours accumulated precipitation amount (mm)

区与图 4a 中相似, 呈现明显南北非对称分布。50 mm 以上暴雨区位于浙江省境内, 与实况一致, 且模拟的 171 mm 最大降水中心也出现在 (27.5°N, 120°E) 附近, 仅较实况偏弱 47 mm。7 月 19 日 14~20 时期间, 实况 (图略) 10 mm 以上雨区仍主要位于浙江省境内, 并有所北抬、西伸, 同时福建省中部地区也出现 10 mm 以上降水。50 mm 以上暴雨出现在福建省东北沿海及浙江省东南沿海。100 mm 以上大暴雨区沿海岸线北移, 且 163 mm 最大降水中心位于 (28.1°N, 120.5°E)。同期模拟 (图略) 的 10 mm 以上雨区也主要位于浙江省境内。位于浙江省东南沿海的 50 mm 以上暴雨区范围与实况接近。147 mm 最大降水中心位于 (28.2°N, 120.8°E) 附近, 强度较实况偏弱 16 mm。同时, 模拟的降水在浙江省中部、江西省东中部地区较实况偏强, 而在福建省中北部沿海地区较实况偏弱。不过总体看来, 模式基本模拟出主要降水的落区和强度, 抓住了实况降水南北非对称分布特征。7 月 19 日 20 时~20 日 02 时期间, 实况 (图 4c) 10 mm 以上雨区除在福建省中部略有扩展外, 在其他地区都明显缩小。雨区仍主要出现在浙江省境内, 但位于浙江省东南沿海的 50 mm 以上暴雨区明显减小, 151 mm 最大降水中心出现在 (28°N, 121°E) 附近。同期模拟 (图 4d) 的 10 mm 以上降水同样主要发生

在浙江省境内, 但雨区较实况偏大, 且 50 mm 以上暴雨区也较实况偏大。240 mm 最大降水发生在 (28.8°N, 120.8°E) 附近, 与实况位置接近, 但较实况偏强约 90 mm。福建省中部 10 mm 以上雨区及东北部沿海 50 mm 以上暴雨没有模拟出来。相对而言, 模式对浙江省境内的雨区有较好模拟能力。7 月 20 日 02~08 时期间, 实况 (图略) 10 mm 以上雨区主要出现在福建省中北部及浙江省中东部。50 mm 以上暴雨区略有北移, 位于浙江省中部沿海地区, 最大降水中心仍出现在 (28°N, 121°E) 附近, 但强度减弱为 99 mm。同期模拟 (图略) 的 10 mm 以上雨区位于浙江省东南部及中北部、安徽省东南部。浙江省东部沿海降水范围及强度与实况都很接近。但在浙江省北部及安徽省东南部地区模拟降水较实况明显偏强, 而福建省境内的 10 mm 以上雨区没有模拟出来。

上述分析表明, WRF 模式对“海棠”台风降水有着较强的模拟能力, 模拟出了主要降水落区及极端降水的强度、位置, 以及台风南北两侧降水非对称分布特征, 模拟效果是令人鼓舞的。

3 降水非对称特征成因分析

3.1 水汽条件分析

降水发生需要一定水汽条件和垂直上升运动条

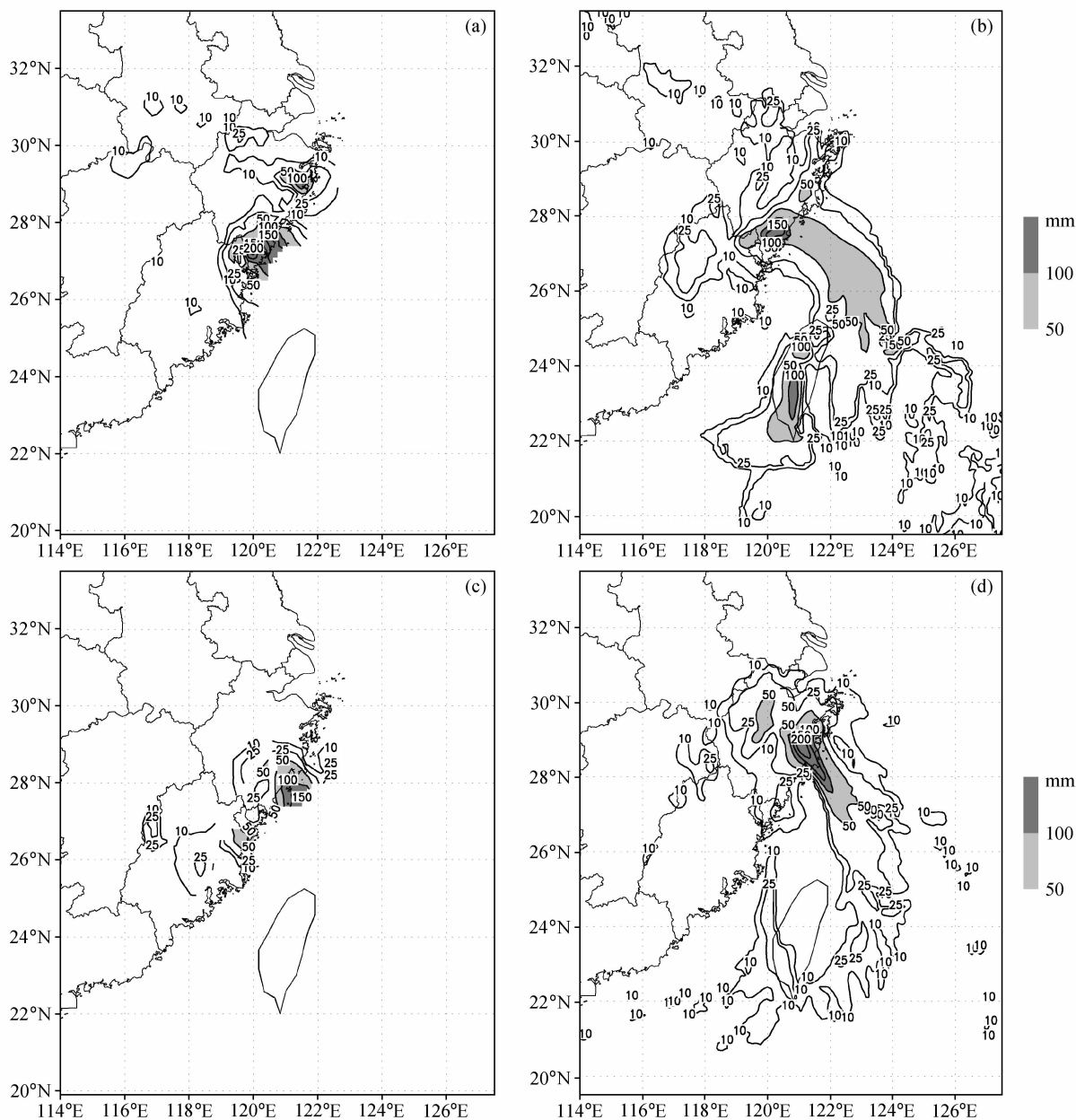


图4 6小时(a、c)实况和(b、d)模拟的累积降水量(单位:mm):(a、b)7月19日08~14时;(c、d)7月19日20时~20日02时
Fig.4 (a, c) Observed and (b, d) simulated 6 hours accumulated precipitation amount (mm):(a, b) 0800 LST to 1400 LST 19 Jul;(c, d) 2000 LST 19 Jul to 0200 LST 20 Jul

件。700 hPa是联系中低层的纽带,该层气象条件与天气系统的发生发展密切相关。一般来说,700 hPa相对湿度 $RH \geq 80\%$ 是出现大、暴雨的必要条件。因此,基于WRF模式模拟的逐时输出结果,我们首先分析700 hPa $RH \geq 80\%$ 区域的水平分布特征。

由图5中等值线水平分布特征可知,2005年7月19日08时~20日08时期间,福建省一直被

80%以上RH覆盖。2005年7月19日08~14时期间,80%以上RH区域覆盖在浙江省中南部地区,之后浙江省境内一直被80%以上RH覆盖。广东省境内在7月19日20时~20日08时期间一直被80%以上RH覆盖。其间,江西省、安徽省东南部、江苏省南部及上海也先后被80%以上RH覆盖。上述分析表明,福建省和浙江省境内的水汽条件基本相当,相对湿度都在80%以上,水汽条件充

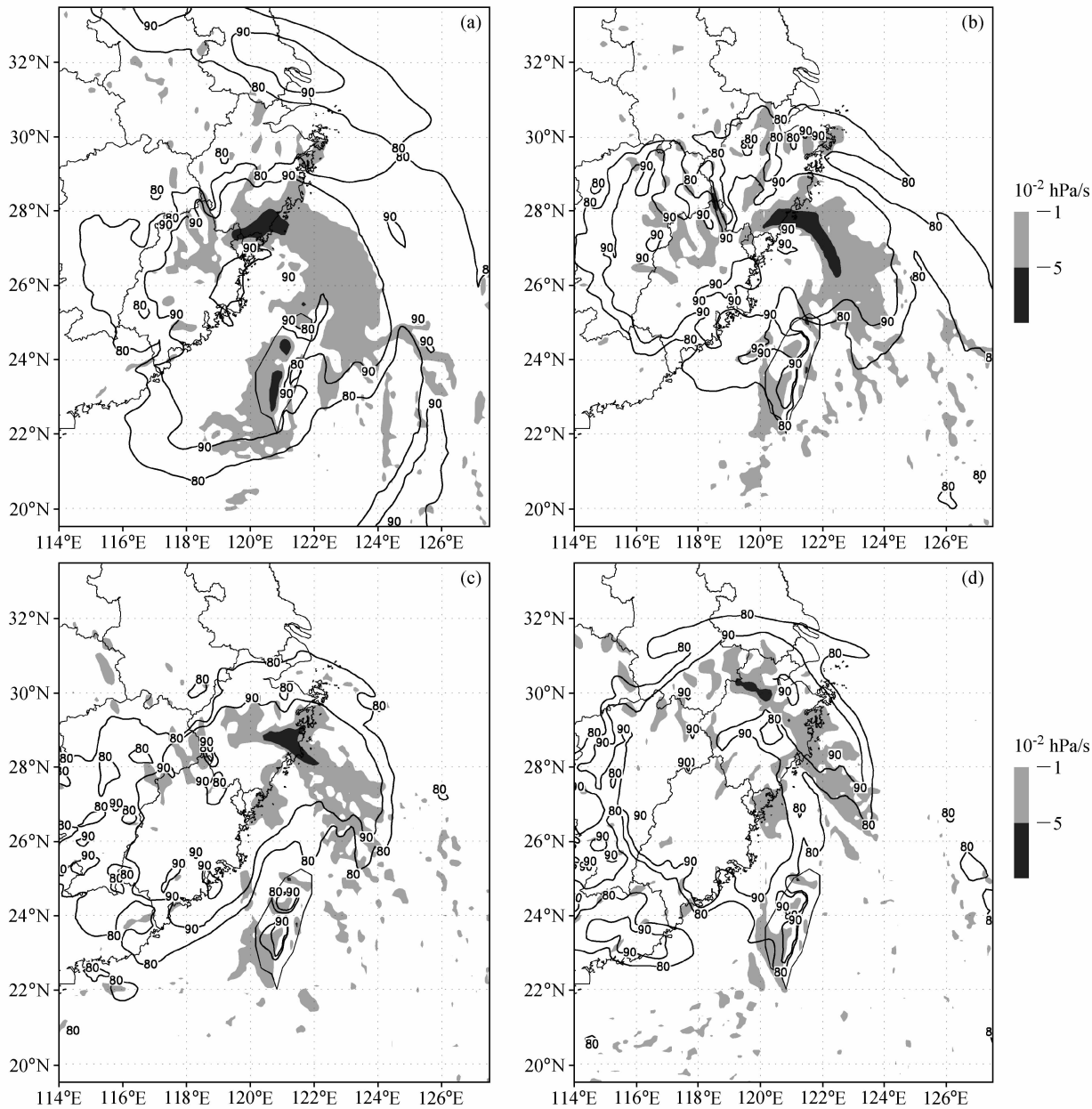


图5 模拟的2005年7月700 hPa相对湿度(实线, $\geq 80\%$)和垂直上升速度(阴影区, $|\omega| \geq 1 \times 10^{-2}$ hPa/s): (a) 19日11时; (b) 19日17时; (c) 19日23时; (d) 20日05时

Fig. 5 Simulated 700-hPa relative humidity (solid lines, $\geq 80\%$) and vertical ascending velocity (shaded areas, $|\omega| \geq 1 \times 10^{-2}$ hPa/s) at (a) 1100 LST, (b) 1700 LST, (c) 2300 LST 19 Jul and (d) 0500 LST 20 Jul in 2005

沛,都有利于降水的发生,台风南北两侧水汽条件没有表现出明显的非对称分布特征。

进一步计算24小时累积可降水量(图6)可知,福建省、浙江省在2005年7月19日08时~20日08时期间24小时的累积可降水量相当,都在160 mm以上,最大可降水量193 mm也位于浙江省和福建省的交接处。同期,广东省境内的可降水

量也在140 mm以上。因此,我们认为水汽条件可能不是导致台风降水南北非对称分布特征形成的主要因素。

3.2 垂直上升速度条件分析

水汽条件仅是降水发生的重要前提条件之一。降水发生的另一个重要前提条件是垂直上升运动条件。由水平方向的水汽通量散度A的计算表达式

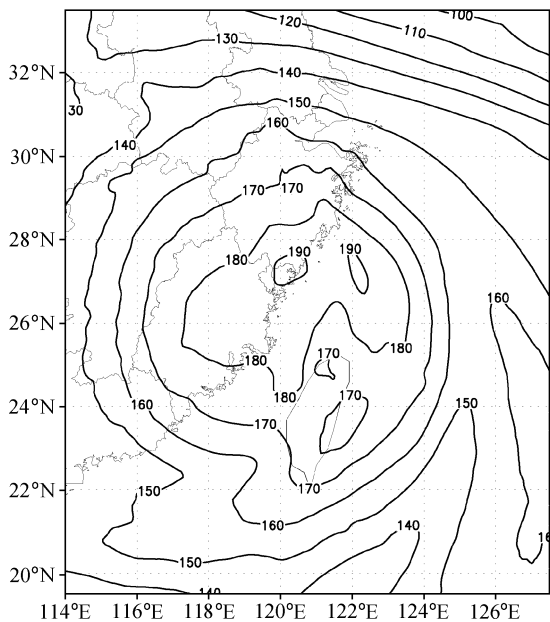


图 6 基于 WRF 模式模拟结果计算所得的 24 小时累积可降水量 (单位: mm)

Fig. 6 24 hours accumulated possible precipitation amount (mm) based on simulated output from the WRF model

$$A = \nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \mathbf{V}_q \right) \quad (1)$$

可知,水汽通量辐合主要决定于空气的水平辐合,因而决定于垂直运动条件。垂直运动不仅可以促使水汽在水平方向聚、散,同时也可将低层的水汽输送到高层,凝结释放潜热,更有利于降水的发生。因此,在水汽条件具备的情况下,垂直运动将是决定降水发生、强度及分布的又一重要因素。下面将从分析垂直上升运动场的水平分布特征入手,进一步分析降水非对称分布成因所在。分析图 5 中阴影区分布特征可见,在 2005 年 7 月 19 日 08~20 时期间,浙江省境内的 1×10^{-2} hPa/s 以上垂直上升速度区面积之和明显大于福建省,而广东省仅有零星分布,况且, 5×10^{-2} hPa/s 以上垂直上升速度基本上都位于浙江省境内,这表明浙江省境内的上升运动更为剧烈。相对来讲,位于台风北侧的福建省中北部及浙江省境内的垂直上升运动明显较位于台风南侧的福建省中南部及广东省境内的强度强,台风南北两侧 1×10^{-2} hPa/s 以上垂直上升运动场,无论在范围还是在强度上都呈现明显的非对称分布特征。因此,我们认为台风南北两侧垂直上升运动条件的非对称,可能是导致降水非对称特征形

成的主要因素。

4 改进的湿 Q 矢量诊断分析

4.1 改进的湿 Q 矢量散度场分析

3.2 节中所分析的模式模拟输出垂直上升运动场是由完全强迫因子所致,而气象条件中的动力和热力因素(简称气象因子)、地形抬升及地表摩擦作用(简称地形因子)是强迫产生垂直上升运动场所有要素中的两大主要成分。 Q 矢量包含了气象条件中的动力学和热力学信息,被认为是气象业务工作中诊断垂直运动的有效方法(Dunn, 1991)。最近,岳彩军等(2003)对 Q 矢量作了进一步改进与完善,改进后的湿 Q 矢量更为全面地考虑非绝热加热因子,不仅包括了大尺度水汽凝结潜热加热,同时还包括了对流水汽凝结潜热加热,从而更能真实地揭示气象条件中动力和热力因素在降水形成过程中所起的强迫作用。因此,改进的湿 Q 矢量散度辐合场可从一个侧面反映气象因子对垂直上升运动产生的强迫作用,分析改进的湿 Q 矢量散度辐合场的水平分布特征,对于揭示气象因子强迫作用的水平分布特征具有重要的现实意义。

4.1.1 改进的湿 Q 矢量散度计算方案

改进的湿 Q 矢量(记为 Q^*)表达式(岳彩军等, 2003)为

$$Q^* = (Q_x^*, Q_y^*) = \left\{ \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta + \frac{R}{c_p p} \frac{\partial}{\partial x} (H_s + H_c) \right], \right. \\ \left. \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta + \frac{R}{c_p p} \frac{\partial}{\partial y} (H_s + H_c) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中,

$$h = \frac{R}{p} \left(\frac{p}{1000} \right)^{R/c_p},$$

$\mathbf{V}$ 代表水平风场 (u, v)。 H_s 算法可参见姚秀萍等(2000)、岳彩军等(2003)和张兴旺(1998), H_c 算法详见岳彩军等(2003)。 Q_x^* 、 Q_y^* 分别为 x 方向和 y 方向 Q^* 矢量的分量。其他为气象上常用物理量参数。

以改进的湿 Q 矢量散度为强迫项的非地转 ω 方程表达式为

$$\nabla^2 (\sigma \omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}^*, \quad (3)$$

式中, $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* = \partial Q_x^* / \partial x + \partial Q_y^* / \partial y$ 为改进的湿 Q 矢量散度。很显然, 当 ω 具有波状特征时, (3) 式左边与 $-\omega$ 成正比, 由此可知 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* \propto \omega$ 。当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* < 0$, 则 $\omega < 0$, 为上升运动; 当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^* > 0$, 则 $\omega > 0$, 为下沉运动。

4.1.2 改进的湿 Q 矢量散度场分析

为了使分析结果更为客观, 我们计算了 900 hPa~600 hPa 气柱平均的改进的湿 Q 矢量散度场。

“海棠”台风登陆前 9 个小时期间 (图 7a~c), 改进的湿 Q 矢量散度辐合区主要位于福建省中北部及浙江省东南部地区, 登陆后 11 个小时期间 (图 7d~g), 改进的湿 Q 矢量散度辐合区北抬, 主要位于浙江省境内, 之后 (图 7h), 逐渐向西北伸展进入安徽省东南部地区。在整个过程中, 位于台风北侧的福建省中北部及浙江省境内的改进的湿 Q 矢量散度辐合强度, 明显较位于台风南侧的福建省中南部

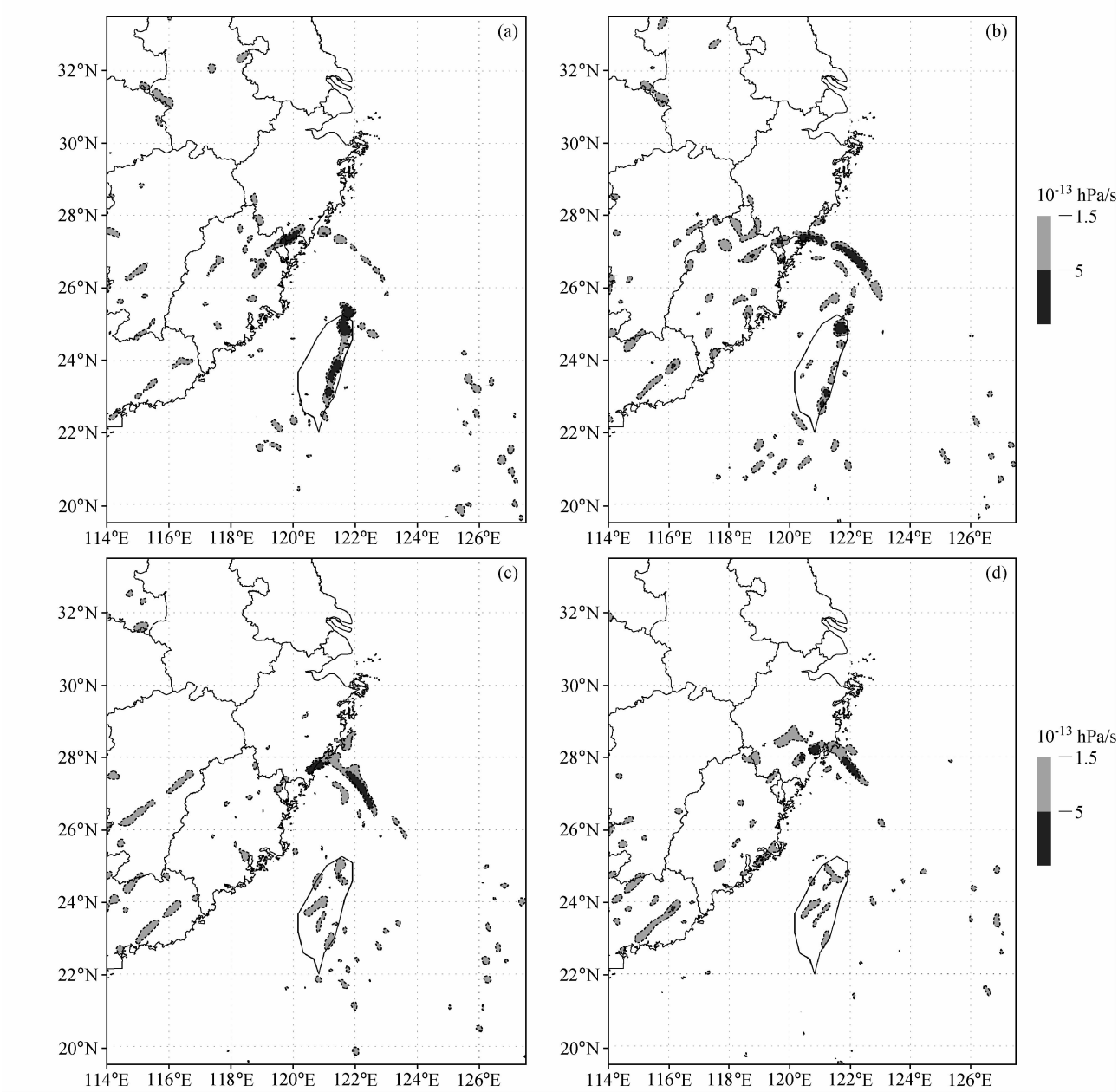


图 7 2005 年 7 月 900 hPa~600 hPa 气柱平均的改进的湿 Q 矢量散度辐合场 ($|\nabla \cdot \mathbf{Q}^*| \geq 1.5 \times 10^{-13} \text{ hPa/s}^3$): (a) 19 日 11 时; (b) 19 日 14 时; (c) 19 日 17 时; (d) 19 日 20 时; (e) 19 日 23 时; (f) 20 日 02 时; (g) 20 日 05 时; (h) 20 日 08 时

Fig. 7 900 hPa–600 hPa volume averaged $\mathbf{Q}^*$ vector divergence convergence field ($|\nabla \cdot \mathbf{Q}^*| \geq 1.5 \times 10^{-13} \text{ hPa/s}^3$) at (a) 1100 LST, (b) 1400 LST, (c) 1700 LST, (d) 2000 LST, (e) 2300 LST 19 Jul and (f) 0200 LST, (g) 0500 LST, (h) 0800 LST 20 Jul in 2005

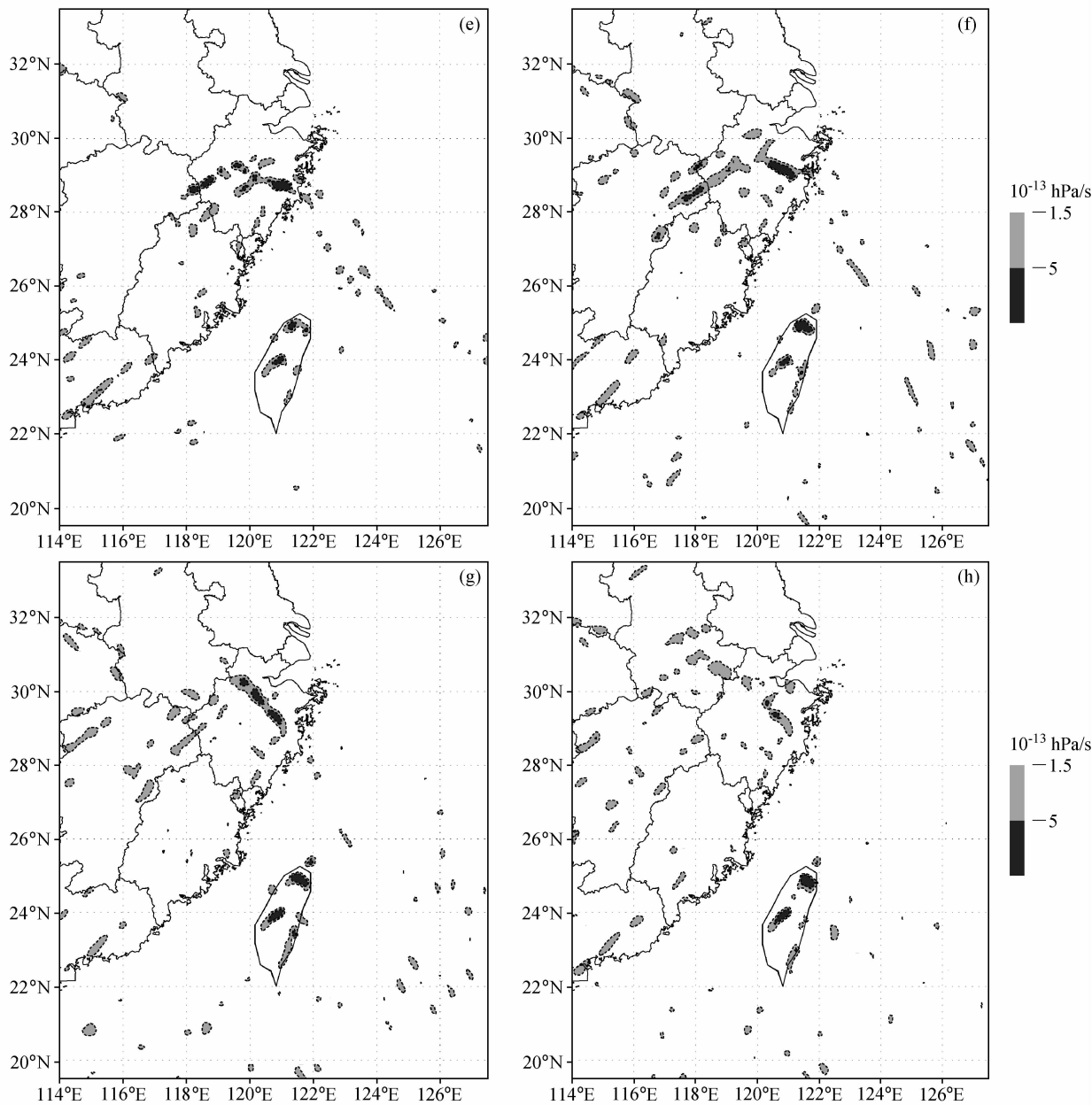


图 7 (续)

Fig. 7 (Continued)

及广东省境内的强,也即表明台风北侧的气象因子强迫作用较其南侧更为剧烈,呈明显南北非对称分布特征。

4.2 改进的湿 Q 矢量散度强迫产生的降水场分析

4.1.2 节的分析表明,改进的湿 Q 矢量散度辐合场在台风南北两侧呈非对称分布,如果由改进的湿 Q 矢量散度所强迫产生的降水场也呈非对称分布,则表明改进的湿 Q 矢量散度辐合场的不对称可导致降水的不对称分布,从而揭示出气象因子强迫

作用自身不对称可导致降水非对称分布特征形成。为了揭示气象因子强迫作用和降水非对称分布特征形成之间的直接关系,下面计算并分析改进的湿 Q 矢量散度强迫产生的降水场的水平分布特征。

4.2.1 降水计算方案

第一步,首先计算 (3) 式右端强迫项 $-2 \nabla \cdot \mathbf{Q}^*$,其次,取上、下边界条件为 $p=100 \text{ hPa}$ 处 $\omega=0$ 、 $p=1000 \text{ hPa}$ 处 $\omega=0$,所有侧边界处垂直速度为 0,同时保持 (3) 式为椭圆方程有解,逐层稳定度 $\sigma=$

$-h\partial\theta/\partial p$ 值取其所在层的平均值, 然后对 (3) 式采用松弛法迭代求解, 得到垂直速度 ω 。

第二步, 计算降水量。降水率计算公式 (Sinclair, 1993) 为

$$I = -\frac{1}{g} \int_0^{1000 \text{ hPa}} \lambda \eta F \omega dp, \tag{4}$$

其中,

$$F = \frac{q_s T}{p} \left(\frac{LR - c_p R_\omega T}{c_p R_\omega T^2 + q_s L^2} \right);$$

当 $\omega < 0$ 时, $\lambda = 1$, 否则, $\lambda = 0$; 当 $q/q_s > 0.6$ 时, $\eta = (q/q_s - 0.6)/0.4$, 否则, $\eta = 0$ 。其他为气象上常用物理量参数。

将第一步骤中计算得到的 ω 代入 (4) 式, 并乘上 3600 s, 则得到 1 小时降水量, 且将降水量的单位转化为毫米。

第三步, 界定降水落区。对于降水量落区的界定, 采用以下两个条件:

(a) $700 \text{ hPa } \nabla \cdot \mathbf{Q}^* < 0$,

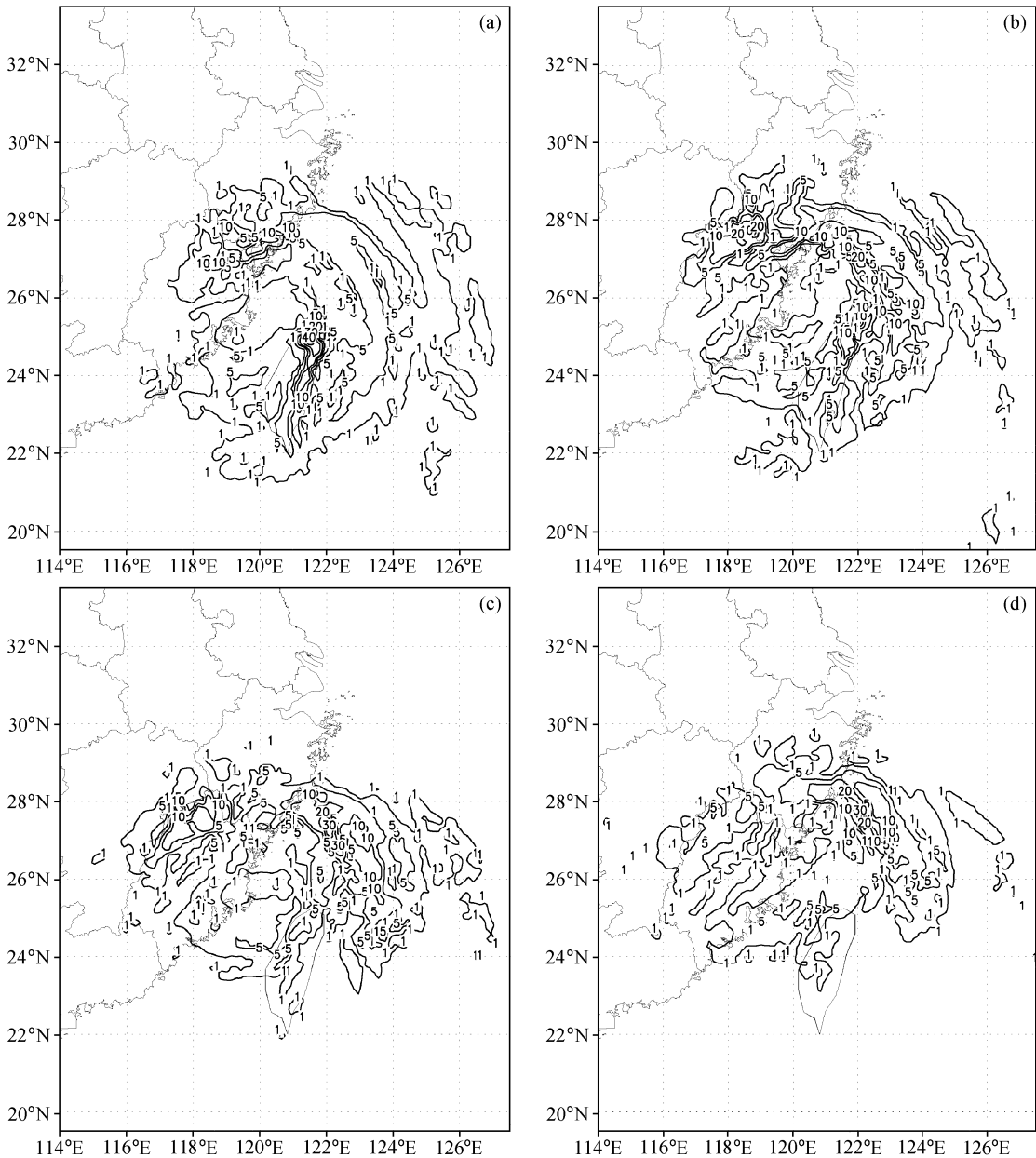


图 8 改进的湿 $\mathbf{Q}$ 矢量散度强迫产生的 3 小时累积降水场 (单位: mm), 其余同图 7

Fig. 8 Same as Fig. 7, except for 3 hours accumulated rainfall (mm) field forced by $\mathbf{Q}^*$ vector divergence

5 地形因子作用分析

许多研究指出,地形抬升和地表摩擦作用(简称地形因子)对降水的发生、分布及强度都会产生很大的影响。因此,本节着重计算、分析地形抬升和地表摩擦作用对“海棠”台风降水非对称形成所起的作用。

5.1 地形分布特征

由图 9 可以看到,浙江省南部地区地形高度在 1200 m 以上,中部地区在 800 m 以上,北部地区在 600 m 以上。福建省北部地区基本在 800 m 以上,中南部地区基本在 1000 m 以上。广东省东南部地形高度基本在 600 m 以上。从地形高度上讲,浙江省和福建省的地形高度基本相当,广东省境内的地形高度相对略低些。总体而言,“海棠”台风南北两侧地形高度基本相当。

5.2 地形因子强迫作用产生的降水场分析

5.1 节分析表明,“海棠”台风南北两侧地形高度没有表现出非对称分布特征,那么台风南北两侧地形因子强迫产生的降水场分布特征又如何呢?本节将进行计算、分析。

5.2.1 降水计算方案

在 p 坐标中,地形抬升作用所造成的垂直速度

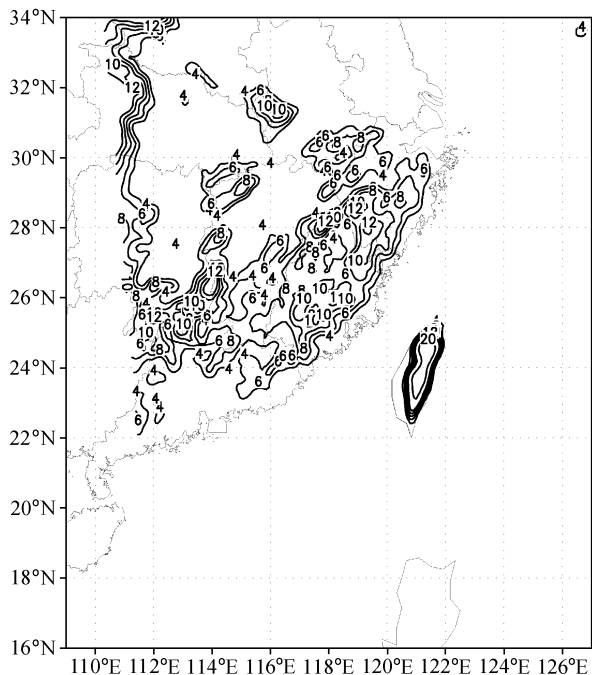


图 9 WRF 模式细网格区域内地形高度场(单位: 100 m)

Fig. 9 Orographic height (units: 100 m) field in the fine-mesh area of the WRF model

(朱乾根等, 1992) 可表示为

$$\omega_{Txy} = -\rho_0 g \left(u_0 \frac{\partial h}{\partial x} + v_0 \frac{\partial h}{\partial y} \right), \quad (5)$$

由边界层摩擦辐合所造成的垂直速度 (Miller et al., 1972) 可表示为

$$\omega_{Fxy} = \frac{\rho_0 g}{f} \left[\frac{\partial}{\partial y} (C_d u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}) - \frac{\partial}{\partial x} (C_d v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}) \right]. \quad (6)$$

(5) 式中, h 是地形高度; (6) 式中, 拖曳系数 $C_d = 2.5 \times 10^{-3}$; (5)、(6) 式中, ρ_0 是地面空气密度, u_0 和 v_0 是地面风的分量, 本文计算时取 900 hPa 作为下界面。

这样, 地形因子引起的垂直速度可取为地形抬升与边界层摩擦辐合作用所引起的垂直速度之和, 即

$$\omega_{Bxy} = \omega_{Txy} + \omega_{Fxy}.$$

令 (3) 式的左端强迫项为 0, 同时, 下边界取为 900 hPa, 且 900 hPa 处的垂直速度等于地形因子作用产生的垂直速度 ω_0 , 具体表示如下,

$$\begin{cases} \nabla^2 (\sigma \omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = 0, \\ (\omega)_{p=100} = 0, (\omega)_{p=900} = \omega_0. \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式的其他计算处理同 4.2.1 节。当 $\omega_0 = \omega_{Txy}$ 时, 利用松弛法迭代计算 (7) 式可得到地形抬升作用产生的三维垂直速度场 ω_{Txy} ; 当 $\omega_0 = \omega_{Fxy}$ 时, 则得到地表摩擦作用产生的三维垂直速度场 ω_{Fxy} ; 当 $\omega_0 = \omega_{Bxy}$ 时, 则得到地形因子作用产生的三维垂直速度场 ω_{Bxy} 。

将 (4) 式的下边界取为 900 hPa, 同时, 利用 700 hPa $T - T_d \leq 4^\circ\text{C}$ 来界定降水的落区, 则基于 ω_{Txy} 、 ω_{Fxy} 及 ω_{Bxy} , 可分别计算得到地形抬升作用产生的降水场、地表摩擦作用产生的降水场, 以及二者共同作用即地形因子强迫产生的降水场。

5.2.2 计算结果分析

台风登陆前 (图 10a~c), 地形因子强迫产生的主雨区主要位于浙江省东南沿海及福建省东北沿海局部地区, 最大降水达到 20 mm/3 h 以上。台风登陆后 (图 10d~h), 主要雨区仍位于浙江省境内, 最大降水为 20 mm/3 h 以上, 同时主雨区逐渐西进、北抬。而在此期间, 福建省境内的雨区主要位于福建省北部, 最大降水也仅为 5 mm/3 h 左右,

强度明显较浙江省境内弱, 并且福建省中南部及广东省境内仅有较弱的零星降水发生。位于台风北侧的浙江省境内地形因子强迫产生的降水场, 较位于台风南侧的福建省境内及广东省境内地形因子强迫产生的降水场范围大、强度强, 呈明显的南北非对称分布。

5.2.3 地形抬升和地表摩擦作用产生的降水场的分析与比较

在台风再次登陆福建省 24 小时期间, 地形抬

升作用(图 11a)强迫产生的 10 mm 以上雨区主要位于浙江省境内, 且 41 mm 最大降水中心位于浙江省中部沿海, 而在福建省及广东省境内仅有零星雨区分布, 且强度小于 20 mm。无论是雨区范围还是强度, 地形抬升作用强迫产生的降水场在台风南北两侧都呈明显非对称。与此同时, 地表摩擦作用(图 11b)强迫产生的 10 mm 以上降水主要位于浙江省、福建省境内以及江西省东部地区, 在安徽省东南部及广东省北部局部地区也有零星的 10 mm

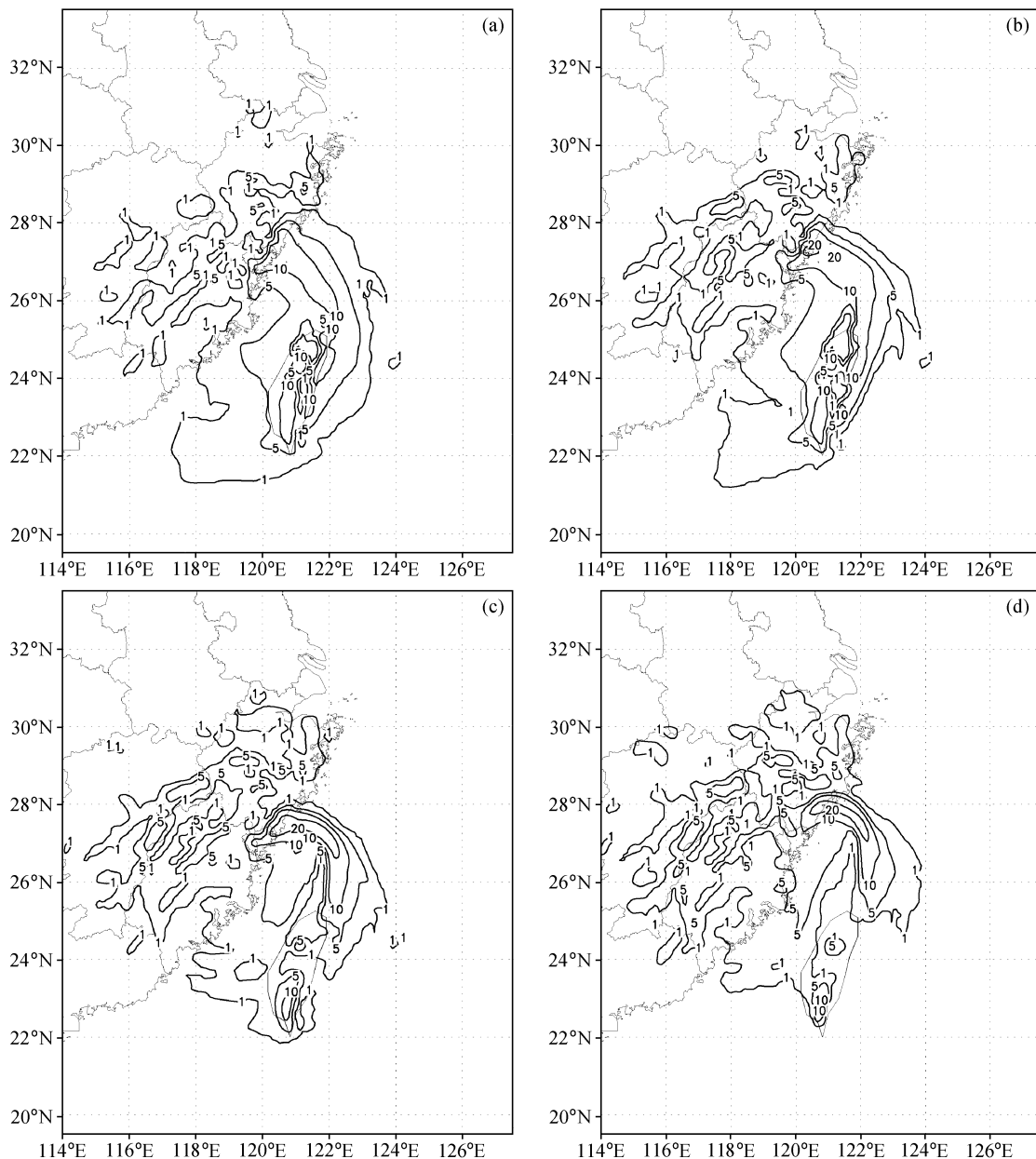


图 10 地形因子强迫作用产生的 3 小时累积降水场(单位: mm), 其余同图 7

Fig. 10 Same as Fig. 7, except for 3 hours accumulated rainfall (mm) field caused by the orographic factors

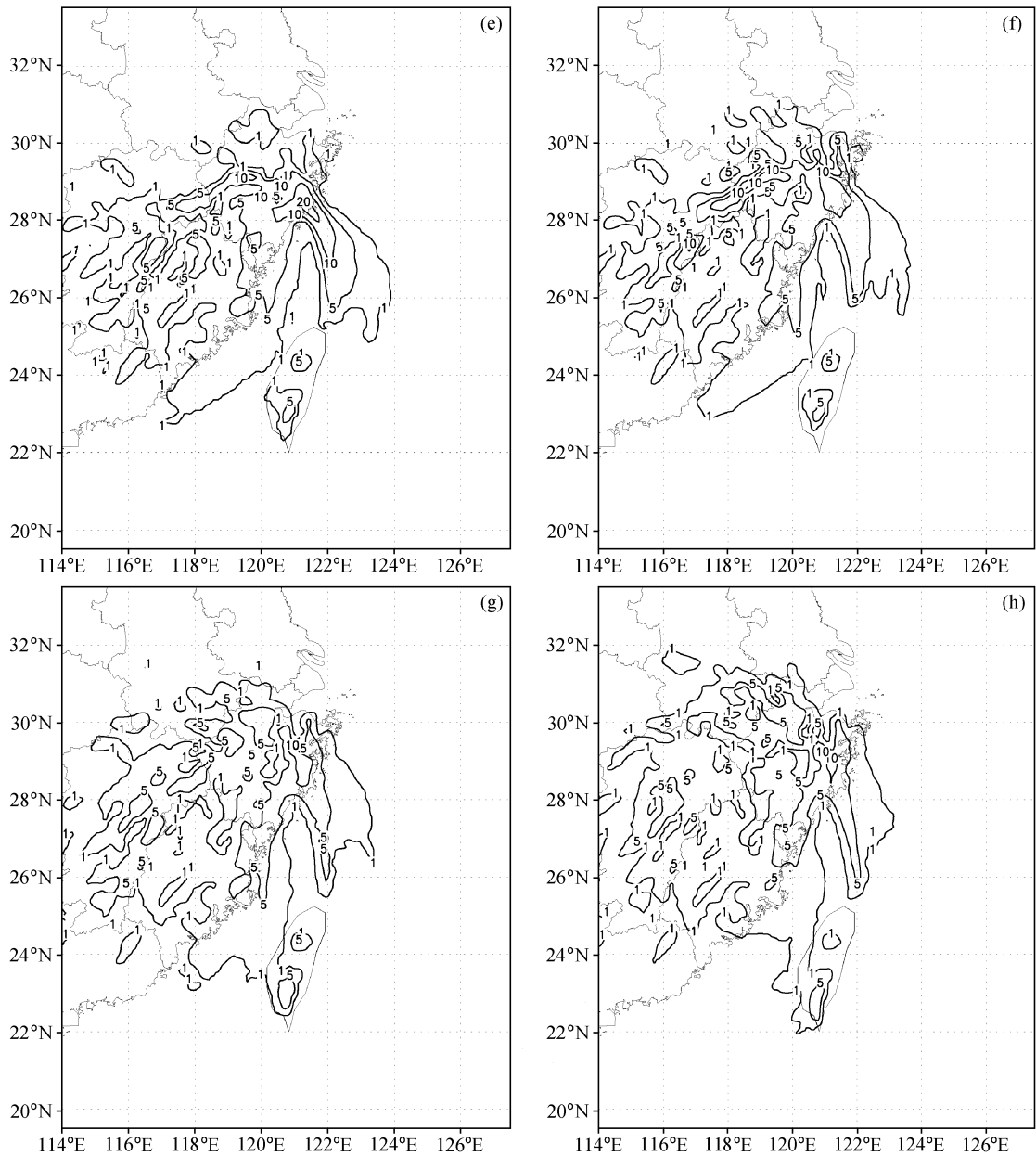


图 10 (续)
Fig. 10 (Continued)

以上雨区存在。浙江、福建两省境内的雨区范围基本相当，但浙江省境内的降水明显强于福建省境内，浙江省东部沿海降水基本都在 50 mm 以上，且 75 mm 最大降水中心也位于浙江省东南沿海，另外，福建省北部地区的降水也明显强于南部地区，37 mm 最大降水中心位于福建省中北部地区。这表明台风北侧地表摩擦作用产生的降水强度，明显较南侧地表摩擦作用强迫产生的降水强度强，台风南北两侧地表摩擦作用产生的降水强度呈明显非对

称分布。比较图 11a 和 11b 可知，地表摩擦作用产生的降水范围较地形抬升产生的降水范围大，且前者的降水强度基本为后者的 2~3 倍。

上述分析表明，地形抬升和地表摩擦作用强迫产生的降水场，在台风南北两侧呈明显非对称分布特征，且台风北侧降水强度明显较南侧强。同时，地表摩擦作用造成的降水强度是地形抬升作用所造成降水强度的 2~3 倍。

“海棠”台风南北两侧的地形高度基本相当，

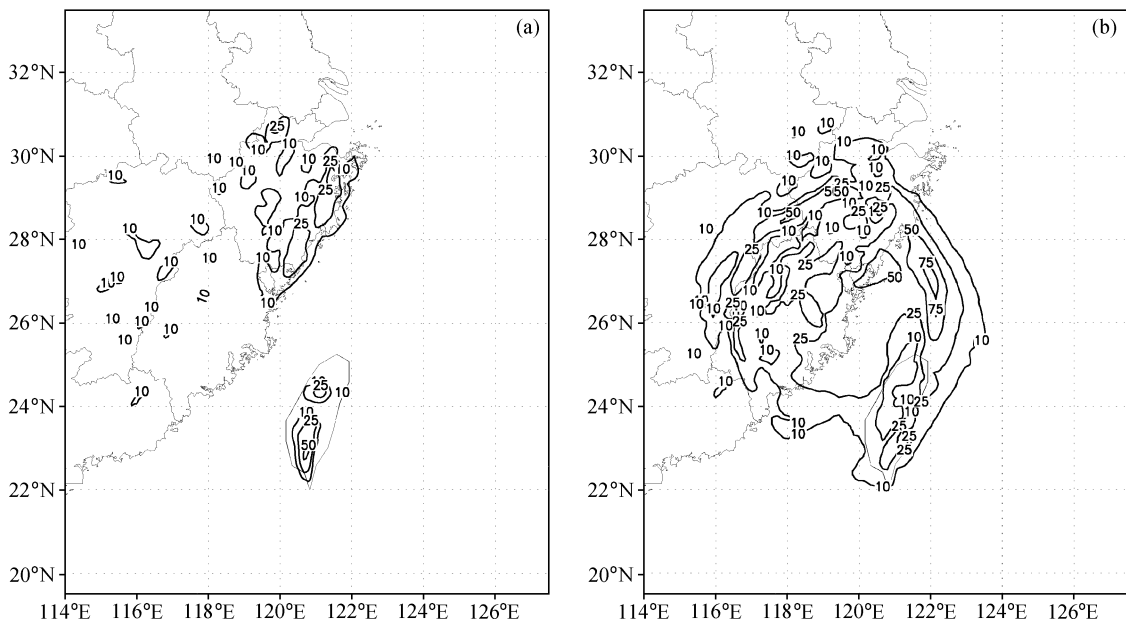


图 11 地形抬升作用 (a) 和地表摩擦作用 (b) 强迫产生的 24 小时累积降水量 (单位: mm)

Fig. 11 24 hours accumulated precipitation amount (mm) caused by (a) the orographic lifting and (b) the surface friction

但两侧地形因子强迫产生的降水却存在明显的不对称分布特征, 北侧降水明显较南侧降水强, 这主要是由于气象因子强迫作用在台风南北两侧的非对称分布造成的, 也就是说, 相对而言, 位于台风北侧的福建省中北部及浙江省境内的气象因子强迫作用明显较位于台风南侧的福建省中南部及广东省境内的强, 在此基础上, 诱发地形因子所产生的强迫作用也呈南北非对称分布, 致使由其强迫引起的降水场也呈南北非对称分布。

6 气象因子和地形因子对降水非对称特征形成的贡献

6.1 气象因子和地形因子强迫产生的 24 小时累积降水量比较

图 12a 和 12b 中雨区水平分布特征颇为相似, 雨区主要位于浙江和福建两省境内, 且浙江省境内的降水强度较福建省强。总体而言, 图 12b 的降水强度较图 12a 的强, 且前者的强度约为后者的 1.6~2.5 倍。

6.2 气象因子和地形因子共同强迫产生的 24 小时累积降水量与模拟降水量比较

由图 13 可以看到, 50 mm 以上雨区主要位于台风北侧的福建省北部及浙江省境内, 137 mm 最大降水中心出现在浙江省东南沿海。位于台风南侧

的福建省中南部及广东省境内无 50 mm 以上降水出现。图 13 中 50 mm 以上雨区的位置、范围、形状与图 3b 中都很接近, 但图 13 中降水强度明显较图 3b 中弱, 且在部分地区图 3b 中降水强度约为图 13 中的 2.1~4.5 倍。这表明计算所得的气象因子和地形因子共同强迫产生的降水量远小于同期模拟降水量。比较图 13 和图 6 可知, 气象因子和地形因子共同强迫产生的降水量小于同期模拟的可降水量。另外, 进一步比较图 6 和图 3b 发现, 浙江省境内大部分地区模拟的可降水量也同样远小于同期模拟的降水量, 尤其是在浙江省东部沿海地区, 图 3b 中的降水强度约为图 6 中的 2~2.5 倍。上述分析结果也与朱乾根等 (1992) 研究结果一致, 即某一地区较大的降水, 其量远远超过该地区的可降水量。

7 结语

本研究利用美国新一代中尺度细网格天气与预报模式 WRF 模式对 2005 年第 5 号“海棠”台风再次在福建省登陆过程进行了数值模拟, 并对台风降水非对称分布特征成因进行了定量分析研究, 初步结果表明:

(1) WRF 模式较为成功地模拟出了“海棠”台风降水非对称分布特征, 并对极端强降水强度也有

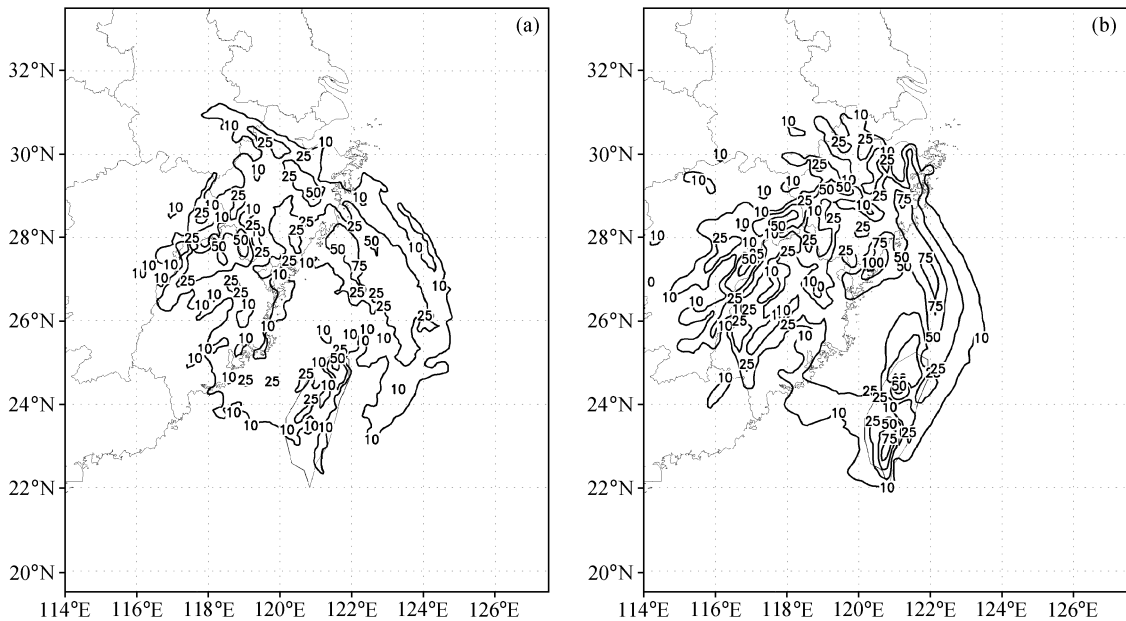


图 12 气象因子 (a) 和地形因子 (b) 强迫产生的 24 小时累积雨量 (单位: mm)
Fig. 12 24 hours accumulated precipitation amount (mm) caused by (a) the meteorological factors and (b) the orographic factors

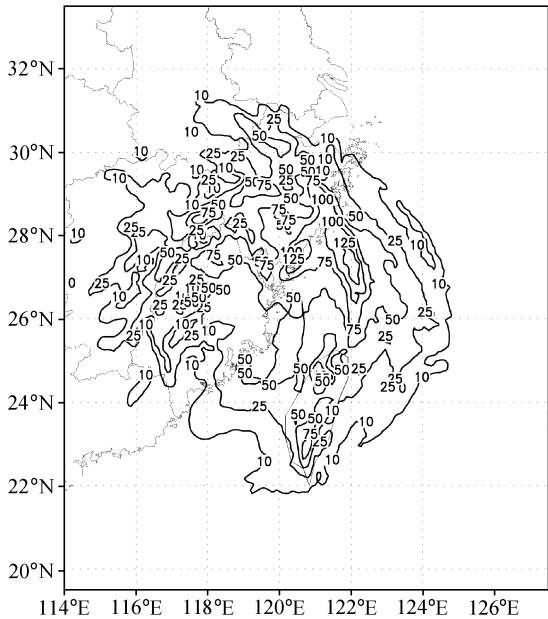


图 13 气象因子和地形因子共同强迫产生的 24 小时累积雨量 (单位: mm)
Fig. 13 24 hours accumulated precipitation amount (mm) caused by the meteorological and orographic factors

很好的模拟能力。对台风路径模拟并不是很理想,个别时刻误差达到 114 km。模拟的台风强度基本都较实况偏弱,但二者随时间减弱的演变趋势是一致的。

(2) 根据对模拟输出结果分析及对模拟的可降水量计算,认为水汽条件可能不是导致“海棠”台风降水非对称特征形成的主要因素。

(3) 通过改进的湿 Q 矢量诊断分析与其强迫产生降水场的计算,以及对台风运动路径南北两侧地形高度的分析与地形抬升、地表摩擦作用(地形因子)强迫产生降水场的计算,认为气象条件中的动力和热力因素(气象因子)可能是“海棠”台风降水非对称特征形成的主要因素。

(4) 基于定量分析及综合考虑,得到“海棠”台风降水非对称分布特征的可能成因:气象因子强迫作用的非对称分布一方面可导致垂直上升运动场的非对称特征形成,进而导致降水非对称特征形成,另一方面,它引发地形因子强迫发挥了重要的促进作用,即地形因子强迫产生的降水场也呈明显的非对称分布,且强度约为气象因子强迫产生降水强度的 1.6~2.5 倍,从而致使整个台风过程降水的非对称特征进一步明显加剧,其中地表摩擦所起的促进作用更为明显。

(5) 研究还发现,尽管改进的湿 Q 矢量散度与地形抬升、地表摩擦作用共同强迫产生的降水场,在水平分布特征上与实况降水场有许多相似之处,但无法再现实况降水的强度,这也与 Carr et al. (1978) 的研究结果相似。同时,地形抬升与地表

摩擦作用共同强迫产生的降水强度远大于改进的湿 Q 矢量降水强度, 对台风降水非对称特征形成的贡献更大, 表明地形的促进作用很显著, 这也与许多研究结论 (钮学新等, 2005; 冀春晓等, 2007; Sinclair, 1993; Lin et al., 2002) 一致。但是, 通过改进的湿 Q 矢量散度诊断及对台风路径南北两侧地形高度的分析, 我们认为气象条件中的动力和热力因素强迫作用的非对称特征可能是导致台风降水非对称特征的主要因素, 这与 Lin et al. (2002) 观点存在不同。

登陆 TC 降水成因是非常复杂的, 影响因素包括 TC 运动路径、地形、海岸走向以及与环境流场的相互作用等。本研究首次将改进的湿 Q 矢量引入对台风降水成因的分析研究, 基于模式模拟输出结果, 尝试通过计算改进的湿 Q 矢量散度强迫产生的降水场以及地形抬升与地表摩擦作用强迫产生的降水场, 以期定量揭示台风降水的成因, 这有别于传统的数值试验手段, 同时也避免考虑数值试验模式积分过程中可能存在的地形对大气非线性作用问题, 可能会对拓展研究思路起到一定促进作用。但需要指出的是, 改进的湿 Q 矢量包含了大气中的动力和热力信息, 就目前来讲是一种非常先进的诊断分析工具, 但也没有完全描述大气的动力与热力状况的能力, 同时地形对台风环流结构的影响也是复杂的, 因此, 本研究试图通过改进的湿 Q 矢量、地形抬升及地表摩擦作用的诊断分析来揭示气象因子和地形因子的作用可能还是属于狭隘意义上的, 因为真实的气象因子和地形因子作用可能远不止于这些。如 Lin et al. (2001) 研究指出的那样, 在某地某时刻测量的风速 (u, v) 可能只是部分地反映地形与天气系统之间非线性作用产生垂直运动的信息。诚然, 将登陆台风降水非对称分布特征的成因区分为气象因子的强迫作用和地形因子的强迫作用可能也有值得商榷之处。因此, 今后对登陆 TC 的降水成因还需要进一步深入研究, 以期有助于改进登陆 TC 的定量降水预报能力。

致谢 南京信息工程大学寿绍文教授在百忙之中与作者进行了热情的讨论, 同时, 审稿老师对本文提出了许多宝贵意见和建议, 《大气科学》编委给予了热情帮助, 在此一并表示最诚挚的感谢!

参考文献 (References)

- Bender M A, Tuleta R E, Kurihara Y. 1985. A numerical study of the effect of a mountain range on a landfalling tropical cyclone [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113: 567–582.
- Bosart L F, Carr F H. 1978. A case study of excessive rainfall centered around Wellsville, New York, 20–21 June 1972 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106: 348–362.
- Burpee R W, Black M L. 1989. Temporal and spatial variations of rainfall near the centers of two tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 2204–2218.
- Carr F H, Bosart L F. 1978. A diagnostic evaluation of rainfall predictability for tropical storm Agnes, June 1972 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106: 363–374.
- 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 2002. 热带气旋动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 303–304. Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian, et al. 2002. Introduction to Tropical Cyclone Dynamics [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 303–304.
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 541–549. Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (5): 541–549.
- Chen Y S, Yau M K. 2003. Asymmetric structures in a simulated landfalling hurricane [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60: 2294–2312.
- 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 Lianshou, 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.
- Cline I M. 1926. Tropical cyclones. Macmillan Co., 301.
- 邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响 [J]. *大气科学*, 29 (3): 417–428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. The effect on the structure of typhoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (3): 417–428.
- 邓之瀛, 杨美川. 1997. 8506 台风暴雨突然增幅的诊断分析 [J]. *大气科学研究与应用*, 12 (1): 23–30. Deng Zhiying, Yang Meichuan. 1997. The diagnosis of the sudden heavy rain amplification for typhoon 8506 [J]. *Atmospheric Science Research and Application* (in Chinese), 12 (1): 23–30.
- 邓之瀛, 杨美川. 1998. 上海地区热带气旋暴雨突然增幅的 Q 矢量分析 [J]. *暴雨灾害*, 11: 56–65. Deng Zhiying, Yang Meichuan. 1998. The Q vector analysis of the sudden amplification of the heavy rain for typhoon in Shanghai [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 11: 56–65.
- 丁金才, 姚祖庆, 唐新章. 1997. 9414 号热带气旋 (DOUG) 非对称结构和对降水影响的分析 [J]. *气象学报*, 55 (3): 379–384. Ding Jincai, Yao Zuqing, Tang Xinzhang. 1997. The analysis of the asymmetric structure of tropical cyclone Doug and its influence on precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55

- (3): 379–384.
- 丁伟钰, 万齐林, 端义宏. 2005. TRMM 降水资料的三维变分同化及其对“杜鹃”(0313) 台风的预报改进 [J]. 大气科学, 29 (4): 600–608. Ding Weiyu, Wan Qilin, Duan Yihong. 2005. 3D-var assimilation of TRMM rain rate and its impact on the typhoon Dujuan (0313) forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 600–608.
- 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.
- Dunn L B. 1991. Evaluation of vertical motion: Past, present, and future [J]. Wea. Forecasting, 6 (1): 65–73.
- Elsberry R L. 2002. Predicting hurricane landfall precipitation: Optimistic and pessimistic views from the symposium on precipitation extremes [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1333–1339.
- Frank W M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone. Part I: Storm structure [J]. Mon. Wea. Rev., 105: 1119–1135.
- Gu Jianfeng, Xiao Qingnong, Kuo Ying-Hwa, et al. 2005. Assimilation and simulation of typhoon Rusa (2000) using the WRF system [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (3): 415–427.
- 郭荣芬, 鲁亚斌, 李燕, 等. 2005. “伊布都”台风影响云南的暴雨过程分析 [J]. 高原气象, 24 (5): 784–791. Guo Rongfen, Lu Yabin, Li Yan, et al. 2005. Analyses of a Yunnan rainstorm process influenced by the “Imbudo” typhoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 784–791.
- 黄文根, 邓北胜, 熊延南. 1997. 一次台风暴雨的初步分析 [J]. 应用气象学报, 8 (2): 247–251. Huang Wen’gen, Deng Beisheng, Xiong Tingnan. 1997. A case study of typhoon torrential rain [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 8 (2): 247–251.
- 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 31 (2): 233–244. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Rananim during landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 233–244.
- Koteswaram P, Gaspar S. 1956. The surface structure of tropical cyclones in the Indian area [J]. Ind. J. Meteor. Geophys., 7: 339–352.
- 李江南, 闫敬华, 魏晓林, 等. 2005. 非地转强迫对 Fitow (0114) 暴雨的影响 [J]. 气象学报, 63 (1): 69–76. Li Jiangnan, Yan Jinghua, Wei Xiaolin, et al. 2005. The effect of ageostrophic forcing on typhoon Fitow (0114) heavy rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 69–76.
- 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.
- 李志楠, 郑新江, 赵亚民, 等. 2000. 9608 号台风低压外围暴雨中尺度云团的发生发展 [J]. 热带气象学报, 2000, 16 (4): 316–326. Li Zhinan, Zheng Xinjiang, Zhao Yamin, et al. 2000. The mesoscale torrential rain cloud cluster from the low pressure periphery area of the typhoon No. 9608 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 16 (4): 316–326. 6–446.
- Lin Y-L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J. Appl. Meteor., 22 (6): 1065–1092.
- Lin Y-L, Chiao S, Wang T-A, et al. 2001. Some common ingredients for heavy orographic rainfall [J]. Wea. Forecasting, 16: 633–660.
- Lin Y-L, Ensley D B, Chiao S. 2002. Orographic influences on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 2929–2950.
- 刘春霞, 王静, 齐义泉, 等. 2004. 基于 WRF 模式同化 QuickSCAT 风场资料的初步试验 [J]. 热带海洋学报, 23 (6): 69–74. Liu Chunxia, Wang Jing, Qi Yiquan, et al. 2004. A preliminary study on QuickSCAT wind data assimilation using model WRF [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 23 (6): 69–74.
- Liu Chunxia, Qi Yiquan, Wang Jing, et al. 2004. Impact on the tropical cyclone “Vongfong” forecast using the QuickSCAT wind data [J]. Acta Oceanologica Sinica, 23 (3): 387–397.
- Miller B I. 1958. Rainfall rates in Florida hurricanes [J]. Mon. Wea. Rev., 86: 258–264.
- Miller B I, Chase P P, Jarvinen B R. 1972. Numerical prediction of tropical weather systems [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (12): 825–835.
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 2005. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验 [J]. 气象学报, 63 (1): 57–68. Niu Xuexin, Du Huiliang, Liu Jianyong. 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons Sinlaku (0216) [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 57–68.
- Parrish J R, Burpee R W, Marks F D. 1982. Rainfall patterns observed by digitized radar during the landfall of Hurricane Frederic (1979) [J]. Mon. Wea. Rev., 110: 1933–1944.
- 沈元芳, 黄丽萍, 徐国强, 等. 2004. 长波辐射对大气变化的敏感性和在 WRF 模式应用中的检验 [J]. 气象学报, 62 (2): 213–227. Shen Yuanfang, Huang Liping, Xu Guoxiang, et al. 2004. The sensitivity of long wave radiation to atmospheric changes and the simulating in the Weather Research and Forecast (WRF) model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 213–227.
- Sinclair M R. 1993. A diagnostic study of the extratropical precipitation resulting from tropical cyclone Bola [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 2690–2707.
- 陶祖钰, 田佰军, 黄伟. 1994. 9216 号台风登陆后的不对称结构和

- 暴雨 [J]. 热带气象学报, 10 (1): 69–77. Tao Zuyu, Tian Baijun, Huang Wei. 1994. Asymmetry structure and torrential rain of landing typhoon 9216 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 10 (1): 69–77.
- Tuleya R E, Kurihara Y. 1981. A numerical simulation of the land-fall of tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 35: 242–257.
- Wu C-C, Yen T-H, Kuo Y-H, et al. 2002. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect [J]. Wea. Forecasting, 17: 1001–1015.
- 徐亚梅, 伍荣生. 2005. 热带气旋碧丽斯 (2000) 发生的数值模拟: 非对称流的发展及转换 [J]. 大气科学, 29 (1): 79–90. Xu Yamei, Wu Rongsheng. 2005. The numerical simulation of the genesis of tropical cyclone Bilis (2000): The evolution and transformation of asymmetric momentum [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 79–90.
- 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.
- 颜琼丹, 蔡亲波. 2006. 非地转湿 Q 矢量在台风“云娜”暴雨过程中的分析应用 [J]. 热带气象学报, 22 (5): 505–509. Yan Qiongdan, Cai Qinbo. 2006. Application of ageostrophic wet Q -vector analysis in torrential rain of typhoon “Rananim” [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (5): 505–509.
- 杨宇红, 沈新勇, 林两位, 等. 2006. 0418 号台风艾利暴雨成因分析 [J]. 气象, 32 (7): 81–87. Yang Yuhong, Shen Xinyong, Lin Liangwei, et al. 2006. Diagnostic analysis and numerical simulation of typhoon Aili rainstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (7): 81–87.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2000. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用 [J]. 气象学报, 58 (4): 436–446. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2000. Non-geostrophic wet Q -vector analysis and its application to typhoon torrential rain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (4): 43
- 袁金南, 谷德军, 梁建茵. 2005. 地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的研究 [J]. 大气科学, 29 (3): 429–437. Yuan Jinnan, Gu Dejun, Liang Jianyin. 2005. A study of the influence of topography and boundary layer friction on landfalling tropical cyclone track and intensity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 429–437.
- 岳彩军. 1999. Q 矢量及其在天气诊断分析中应用研究的进展 [J]. 气象, 25 (11): 3–8. Yue Caijun. 1999. The advances on the Q vector and its application to synoptic diagnosis [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (11): 3–8.
- 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 等. 2003. Q 矢量的改进与完善 [J]. 热带气象学报, 19 (3): 308–316. Yue Caijun, Shou Yixuan, Shou Shaowen, et al. 2003. The improvement and perfection of Q vector [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (3): 308–316.
- 岳彩军, 寿亦萱, 姚秀萍, 等. 2005. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究 [J]. 高原气象, 24 (3): 450–455. Yue Caijun, Shou Yixuan, Yao Xiuping, et al. 2005. Application and research on Q -vector analytic method in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (3): 450–455.
- 章国材. 2004. 美国 WRF 模式的进展和应用前景 [J]. 气象, 30 (12): 27–31. Zhang Guocai. 2004. Progress of weather research and forecast (WRF) model and application in the United States [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (12): 27–31.
- Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. 2004. Application of direct of assimilation of ATVOS microwave radiances to typhoon track prediction [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (2): 283–290.
- 张胜军, 陈联寿, 徐祥德. 2005. Helen 台风 (9505) 异常路径的诊断分析与数值模拟 [J]. 大气科学, 2005, 29 (6): 937–946. Zhang Shengjun, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. The diagnoses and numerical simulation on the unusual track of Helen (9505) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 937–946.
- 张兴旺. 1998. 湿 Q 矢量表达式及其应用 [J]. 气象, 24 (8): 3–7. Zhang Xingwang. 1998. An expression of the wet Q vector and application [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 24 (8): 3–7.
- 朱健, 沈晓玲. 2006. 2004 年几次台风暴雨 Q 矢量诊断的比较分析 [J]. 灾害学, 21 (2): 90–94. Zhu Jian, Shen Xiaoling. 2006. Comparative study on Q vector diagnosis in typhoon rainstorm [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 21 (2): 90–94.
- 朱健, 沈晓玲. 2007. “云娜”台风暴雨的 Q 矢量与螺旋度诊断分析 [J]. 科技通报, 23 (1): 22–27. Zhu Jian, Shen Xiaoling. 2007. The diagnostic analysis for Q vector and helicity of typhoon “Rananim” [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 23 (1): 22–27.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 322–464. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 1992. Synoptic Principle and Method [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 322–464.