

周玉淑, 邓涤菲, 李建通. 2014. 登陆热带气旋 Bilis (0604) 暴雨增幅与风场结构变化 [J]. 大气科学, 38 (3): 563–576, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12220. Zhou Yushu, Deng Difei, Li Jiantong. 2014. Rainstorm amplification of typhoon Bilis (0604) and its wind structural change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 563–576.

登陆热带气旋 Bilis (0604) 暴雨增幅 与风场结构变化

周玉淑¹ 邓涤菲¹ 李建通²

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室, 北京 100029

² 厦门市气象局, 厦门 361012

摘 要 利用日本气象厅区域谱模式 (RSM) 20 km 再分析资料及改进的调和—余弦算法, 对 2006 年 4 号台风 Bilis 登陆后暴雨增幅前后风场的结构变化特征进行了比较分析。Bilis 台风登陆西行过程中, 于 14 日 18:00 (协调世界时, 下同) 开始, 至 15 日 12:00 出现明显的暴雨增幅现象。在暴雨增幅前后时段, 暴雨区的全风场及无辐散风分布变化强度小于无旋风。具体表现为: 暴雨增幅前, Bilis 低层西南部的无旋风速加强, 辐合中心与 Bilis 中心逐步靠近, 垂直上升运动加强; 在暴雨增幅期间, Bilis 西南部的低层和高层的无旋风速都一致持续加强。这种无旋风场上的变化与暴雨强度变化有很好的相关性, 即: 无旋风在 Bilis 西南部的增强及辐合增强与该区域暴雨的增强相对应, 暴雨增幅的时段与高低层无旋风的风速加大和辐合增强是一致的。对暴雨增幅起主导作用的是无旋风的变化及其引起的散度变化。无旋风速及辐合增强时, 暴雨增强并维持; 无旋风及辐合减弱后, 暴雨强度逐渐减弱。无辐散风强度变化与暴雨强度变化相反, 而全风速在暴雨增幅前主要由无旋风决定, 暴雨减弱阶段主要由无辐散风决定, 对无旋风及无辐散风的分析能更加明显的揭示出暴雨增幅时期风场的具体变化。相对于全风场分析, 无辐散风和无旋风能提供更多的风场结构变化与暴雨增幅的关系, 这对于预报和分析登陆台风的风雨分布有一定的促进作用。

关键词 Bilis 台风 暴雨增幅 风场结构 无旋风

文章编号 1006-9895(2014)03-0563-14

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12220

Rainstorm Amplification of Typhoon Bilis (0604) and Its Wind Structural Change

ZHOU Yushu¹, DENG Difei¹, and LI Jiantong²

¹ Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

Abstract By using the regional spectrum model reanalysis data from the Japan Meteorological Agency with a horizontal resolution of 20 km and a time interval of 6 h, in addition to nondivergent and irrotational wind components derived through harmonic-cosine spectrum expansion, wind structure features were compared prior to and following the rainstorm amplification of typhoon Bilis (0604). After Bilis landed on the Chinese mainland, the rain amplification was noticeable on its southeast quadrant, particularly from 18 UTC July 14 to 12 UTC July 15, 2006. The analysis results show that the variation amplification of the entire wind speed and the nondivergent wind component were less than that of the irrotational wind component. In detail, before the rainstorm amplification occurred, the irrotational wind component of the southeast

收稿日期 2012-12-18, 2013-11-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421505, 国家自然科学基金资助项目 41275065、41075044、41375054

作者简介 周玉淑, 女, 博士, 研究方向: 中尺度气象学。E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

quadrant increased on the lower and upper levels, and the distance between convergence center and the center of Bilis narrowed. Thus, the vertical upward motion strengthened. During the period of rain amount amplification, the irrotational wind of the lower and upper levels increased as well. Therefore, the variation of irrotational wind is relevant to the variation in rainfall intensity. The variation of irrotational wind and its resultant divergence were the main factors for the rainfall amplification. The enhancement/diminishing of irrotational wind and divergence were always accompanied by an increase/decrease in rainfall amount. The tendency of nondivergent wind was opposite that of the rainfall amount, and although the whole wind speed was determined mainly by the irrotational wind during the rainfall amplification, it was affected more by the nondivergent wind during the rainfall weakening process. The analysis for the irrotational and nondivergent winds can indicate additional wind variation characteristics. The conventional analysis method for the entire wind cannot reveal the changes of irrotational and nondivergent winds and their relative importance when rainfall occurred. From the wind decomposition results, we conclude that before and after the rainstorm amplification of Bilis, the change in wind field was reflected mainly on the irrotational component, which was sensitive to the change in rainfall. Thus, this method is effective for predicting wind and rainfall distribution for the landed typhoons.

Keywords Typhoon Bilis, Rainstorm amplification, Wind structure, Nondivergent wind

1 引言

我国是世界上台风登陆最多、受台风灾害最严重的国家（陈联寿和丁一汇，1979），台风是造成我国气象灾害和次生灾害最主要的天气系统之一。过去几十年，国内外气象学家对台风进行了大量的研究，内容涉及台风的运动机理和路径预报方法，台风发生发展及结构和强度变化，台风的登陆和变性过程，以及台风登陆后的衰减和维持机制及其引起的暴雨分布等。目前，台风的研究和业务预报技术虽然有了很大发展，预报准确率也有提高，但提高得不快（程正泉等，2005；陈联寿，2006）。借助于气象卫星、多普勒天气雷达、自动气象观测站等多种观测手段对台风的全方位精确监测，以及数值预报技术和模式的发展，我国在台风路径的业务预报方面取得了长足的进步，从上世纪九十年代以来，特别是最近几年，我国台风路径的综合预报误差呈现逐渐减小的趋势。但是，在台风的风雨分布预报方面，进步不大。随着中尺度数值模式的发展和广泛应用，对台风的数值模拟研究迅速增多，而且，雷达、卫星等高时间分辨率的非常规资料逐渐进入气象学研究范畴，在台风和暴雨模拟分析及预报等方面得到了广泛应用（张庆红等，2000；程麟生和冯伍虎，2001；邓国等，2005；李柏等，2007；周玉淑和李柏，2010），也较好地改进了模拟效果。但直接利用这些模拟结果在登陆台风的暴雨增幅与风场结构分析方面仍然不够，对台风登陆后暴雨增幅及其风雨分布的了解都还远远落后于模拟本身。这其中的一个原因在于模式输出风场资料的无辐散风和无旋风是混在一起的，无法分别分析它们

在台风发展过程中的变化作用。

以往对台风风场分布的分析，主要都是利用已有的全风场来进行的，没有将无辐散分量和无旋分量区分，而台风是旋转运动和辐合辐散运动都很强的系统，有必要分别针对它的旋转变化和辐合辐散变化来分析对应风场的分布和结构的变化，这也是研究登陆台风的暴雨增幅与风场结构变化之间的重要内容之一，但有关这方面的研究还不多见。2006 年的第 4 号（0604 号）台风 Bilis，在登陆后出现了明显的暴雨强度增强现象，为我们研究登陆台风的暴雨增幅与其风场结构变化之间的联系提供了较典型的个例。目前，对 Bilis 的研究已有很多成果，如康志明等（2008）的诊断结果认为西太平洋副热带高压和大陆高压合并、西南季风异常活跃、高空强辐散流场和弱垂直切变等均有利于 Bilis 在陆上维持不消；周海光（2008）利用多普勒雷达反演资料分析了 Bilis 中引发特大暴雨的中尺度结构，认为 Bilis 引发的特大暴雨主要是由中低层西南—东北走向的 β 中尺度辐合线引发的，辐合线对于水汽输送以及暴雨的形成、触发、维持具有重要作用；Gao et al.（2009）通过资料分析指出：垂直风切变、暖平流、锋生及地形对 Bilis 登陆后的强降水都有影响；Wang et al.（2010a）认为低频振荡及季风涌活跃是 Bilis 登陆后造成华南降水突然增加的一个原因；Wang et al.（2010b）利用云分辨模拟结果分析了层云及对流云降水区中大尺度强迫对 Bilis 垂直结构的影响；Yu et al.（2010）的分析结果也表明，环境风的垂直风切变对 Bilis 降水的非对称分布有重要作用，而石顺吉等（2009）利用中尺度数值模式 WRF-ARW 对 Bilis 进行的数值模拟

敏感性试验分析表明,环境垂直风切变对 Bilis 的一波非对称降水结构形成的影响显著大于地形、下垫面属性的改变及风暴移动速度的影响,并认为冷空气的侵入对 Bilis 降水的形成也有重要贡献。

以上研究基于诊断分析或数值模拟,从不同角度针对 Bilis 登陆后残涡维持不消及其引发的暴雨过程做了深入探讨,但均没有涉及 Bilis 自身的风场结构变化分析。本文利用改进的调和一余弦算法 (Chen and Kuo, 1992; 周玉淑等, 2008) 计算得到的无辐散风和无旋风,结合常规天气图分析,从风场分解角度揭示台风内部无辐散风与无旋风的特征,对 Bilis 台风登陆后暴雨增幅前后的风场结构进行对比分析,并以此来揭示 Bilis 台风风场强度及结构变化与其暴雨增幅之间的相互联系,研究台风风场垂直结构变化对暴雨强度及落区的影响,这对台风科学研究和业务应用都具有重要价值。

2 资料及方法

按照改进的调和一余弦算法的基本步骤,利用日本气象厅区域谱模式 (RSM) 20 km 分辨率的再分析资料 (该资料以日本为中心,往西约到 108°E,往东约到 165°E,可以描述西太平洋上台风移动及登陆我国的过程;资料时间间隔为 6 h,每天共 4 个时次),对 0604 号登陆热带气旋 Bilis 作水平风场分解,以分析这个给我国南方带来严重洪涝灾害的台风在登陆后移动过程中的结构变化,并结合常规天气图分析方法,提取更细致的台风风场结构信息及其与暴雨增幅的关系。文中用到的 Bilis 环流

背景分析资料为美国环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料。

3 Bilis 台风简介

2006 年西北太平洋热带气旋活动频繁,且具有登陆比率大、登陆热带气旋强度级别高等特点。其中,4 号台风 Bilis 于 7 月 9 日下午在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成,之后向西北方向移动,强度逐渐加强,11 日下午加强为强热带风暴,向台湾省东北沿海靠近,13 日 22:20 (协调世界时,下同) 在宜兰附近登陆,中心附近最大风力有 11 级,登陆后向偏西方向移动穿过台湾北部,于 13 日晚进入台湾海峡并继续向北移动,向福建北部沿海靠近。14 日 12:50 前后在福建霞浦地区再次登陆,中心附近最大风力仍有 11 级,之后向偏西方向移动,强度逐渐减弱,当天下午在福建闽侯县境内减弱为热带风暴,但继续向中国内陆深入。15 日下午在江西境内减弱为热带低压,中心向西偏南方向移动,先后穿越湖南、广西等省区,最后 18 日晚在云南东部地区消亡。该强热带风暴减弱为低气压后深入内陆,其生命史之长,降雨强度之大,影响范围之广,在历史上极为少见。Bilis 台风在整个发展过程中,结构松散,中心附近对流不强,没有眼壁和台风眼结构,风力不是特别强,但降水强度大,持续时间长,汛情严重,山体滑坡,泥石流等地质灾害多发,是近十年来台风灾害导致伤亡人数最多的一次。

图 1a、b 分别是 Bilis 的移动路径和强度变化。由图可见, Bilis 在其发展移动过程中,强度不

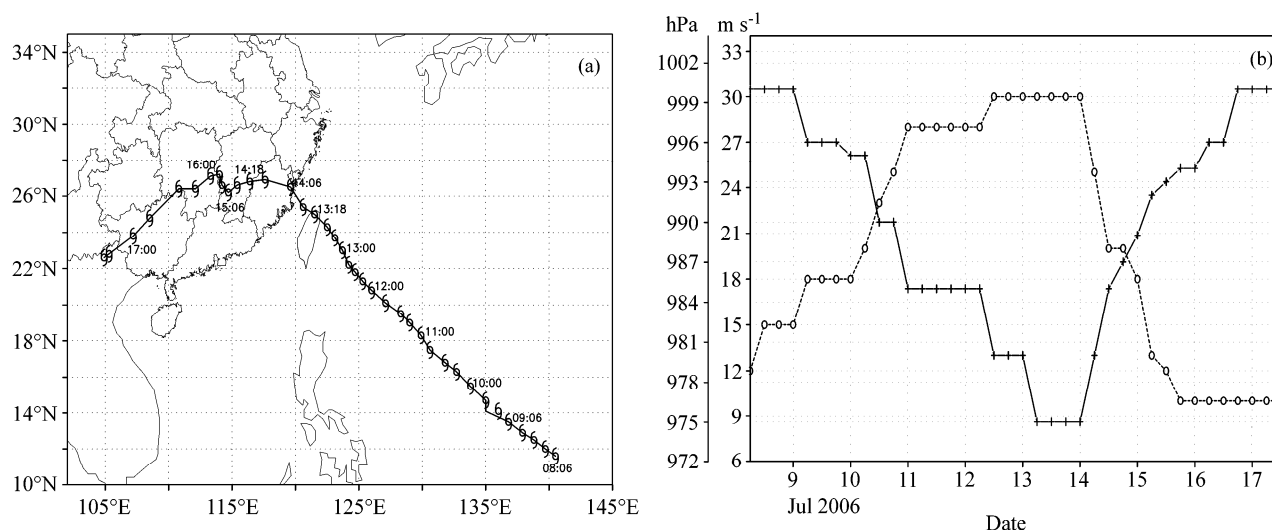


图 1 台风 Bilis 的 (a) 移动路径和 (b) 最大风速 (虚线, 单位: m s^{-1}) 及中心最低气压 (实线, 单位: hPa) 变化

Fig. 1 (a) The track, (b) the maximum wind speed (dashed line, unit in m s^{-1}) and the center minimum air pressure (solid line, unit in hPa) of Bilis

强, 最大风速仅在 7 月 12 日 12:00 到 14 日 00:00 达到 31 m s^{-1} , 在 14 日 12:00 登陆以后减弱到 20 m s^{-1} , 最低中心气压也只达到 975 hPa, 但是登陆后, 在西行过程中, 其残涡不消, 在陆地上维持了 4 d 之久, 造成福建、江西、湖南和广西等省大面积的暴雨洪涝灾害, 尤其在 14 日 18:00 以后出现了明显的暴雨强度增强现象。本文重点分析 Bilis 登陆西行过程中造成的暴雨强度增强过程及对应的风场结构变化。

4 Bilis 台风的环流背景及其登陆后的暴雨增幅情况

4.1 Bilis 台风的环流背景分析

在 Bilis 形成初期 (7 月 8 日 00:00 到 12 日

00:00, 图略), 西太平洋上还有另外一个热带气旋 Ewiniar (0603 号台风), 在 Bilis 形成并向西北方向移动的同时, Ewiniar 沿东海、黄海向东北偏北移动, 之后登陆朝鲜半岛并减弱成温带气旋, 与此同时, 中国大陆长江流域以南的大部分地区都位于副热带高压的西侧, 处于孟加拉湾至中南半岛的低槽前, 在副热带高压西侧偏南气流和孟加拉湾到中南半岛低槽前西南暖湿气流的持续输送下, 我国华南地区水汽条件非常充沛。7 月 12 日 12:00 (图 2a), 中南半岛上的低槽已减弱, 副热带高压西伸脊点位于 $(30^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E})$ 附近, Ewiniar 向东北方向移动并已减弱合并到中纬度西风槽中, 此时 Bilis 加强为强热带风暴向西北方向移动; 13 日 12:00 (图 2b),

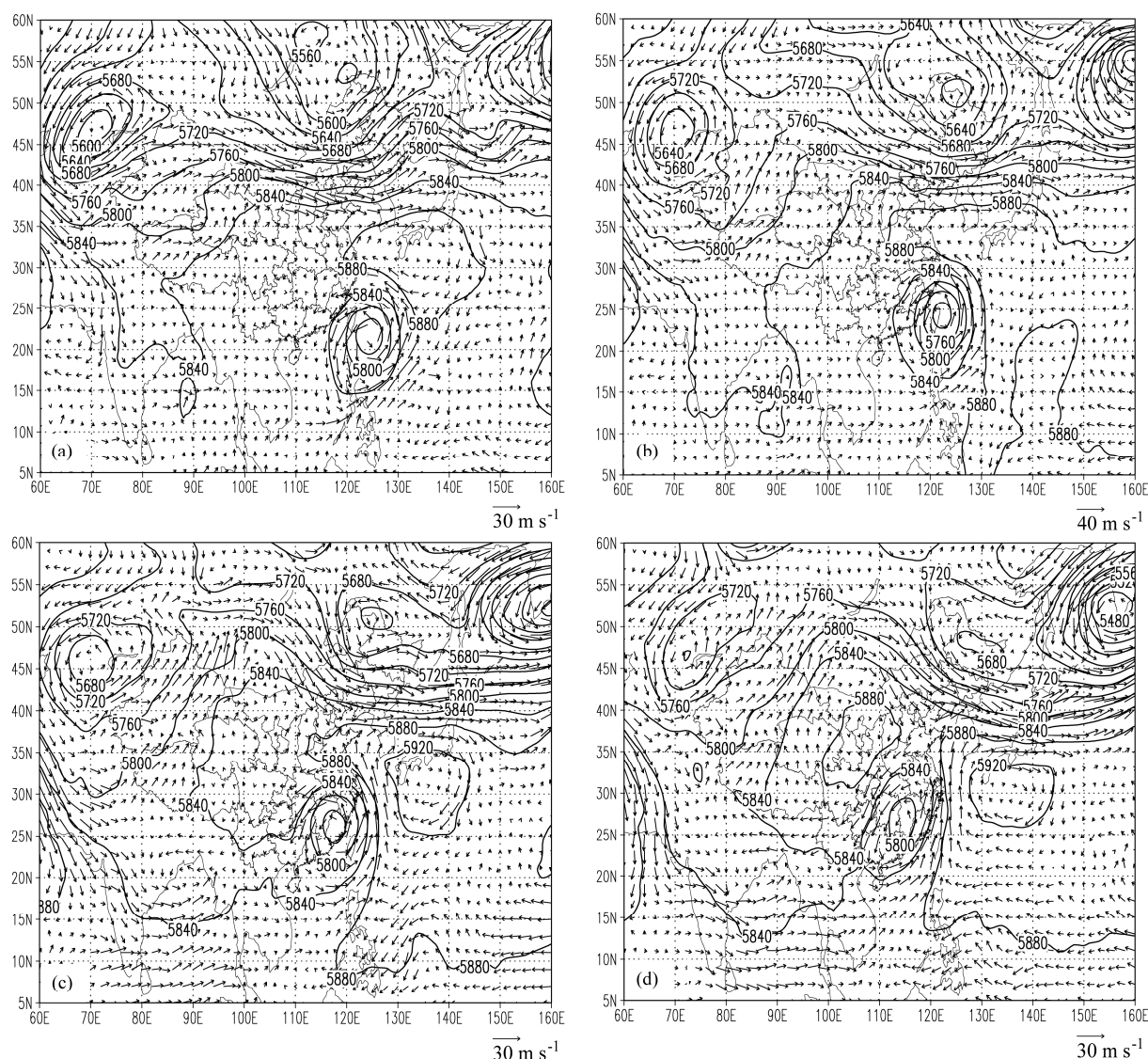


图 2 500 hPa 位势高度 (单位: gpm) 及风场 (单位: m s^{-1}) 分布: (a) 2006 年 7 月 12 日 12:00; (b) 2006 年 7 月 13 日 12:00; (c) 2006 年 7 月 14 日 12:00; (d) 2006 年 7 月 15 日 12:00

Fig. 2 Geopotential height (unit in gpm) and horizontal wind (unit in m s^{-1}) at 500 hPa: (a) At 1200 UTC 12 July 2006; (b) at 1200 UTC 13 July 2006; (c) at 1200 UTC 14 July 2006; (d) at 1200 UTC 15 July 2006

副热带高压突然西伸北抬, 西伸脊点到达 (35°N , 115°E), Bilis 登陆台湾北部; 14 日 12:00 (图 2c), 副热带高压西伸至 110°E , Bilis 在福建霞浦地区再次登陆, 中心附近最大风力仍有 11 级; 15 日 12:00 (图 2d), 西伸的副热带高压断裂成东西两部分, 其中东部高压回撤至 120°E 以东的西太平洋上, 而西部高压位于中国大陆上空。受西部大陆高压东侧偏北气流影响, Bilis 转而向西偏南方向移动, 在江西境内减弱为热带低压; 其后 Bilis 先后穿越湖南、广西等省区, 最后 18 日晚在云南东部地区消亡。

Bilis 发展初期 (图 3a), 在副热带高压西侧偏南气流和孟加拉湾到中南半岛低槽前西南气流的暖湿气流共同作用下, 我国中东部存在一条从云南经四川、湖南西北部、湖北中西部到河北西部的西南东北走向的带状高湿区。除东部地区外, 南方大部地区 850 hPa 等压面上的相对湿度都超过 80%, 同时刻 Bilis 环流中的相对湿度更是高达 98%, 部分区域甚至达到 99%, 水汽含量非常充沛。在 Bilis 发生发展及登陆减弱过程中, 除中国南方地区已经具备充足的水汽条件外, Bilis 自身环流也一直位于西南季风气流和西太平洋副高西部偏南气流中, 这两支气流输送的水汽随着 Bilis 外围的气旋性环流卷入台风中, 使得 Bilis 的环流一直处在高湿环境中。在 Bilis 登陆后 (图 3b), 中东部高水汽带与 Bilis 环流水汽高值区结合在一起, 使得南方地区的高湿大值区连成一片, 且这个高水汽特征维持至 Bilis 减弱消亡。因此, 尽管 Bilis 最强的强度只是达到强热带风暴, 但其水汽条件一直非常充足 (Bilis

移动过程中各时刻相对湿度及比湿都很大, 图略), 这是 Bilis 登陆后造成严重洪涝灾害的重要条件之一。

4.2 Bilis 台风登陆后的暴雨增幅情况

Bilis 登陆我国大陆后引发的强降水从 14 日开始, 至 18 日结束, 共持续 5 天。其中, 14 日至 15 日白天主要是 Bilis 云系降水, 暴雨落区主要位于 Bilis 中心附近及其西南侧; 15 日夜间到 18 日强降水是在季风槽支持下的 Bilis 再生加强云带 (也可说是季风槽云系) 降水, 暴雨落区位于台风东部的南岭附近及其南面的广东、广西; 其中广东北部和东部、湖南南部、广西东部, 以及浙江南部沿海、福建沿海的过程雨量达 200~500 mm。

具体而言, 由图 4 可以看到, 在台风登陆初期的 7 月 14 日 12:00 (图 4a), 由 Bilis 引发的降水主要发生在台风中心东南侧的中国沿海的福建和广东交界附近, 6 小时累积降水量最大达 30 mm; 6 小时后, 7 月 14 日 18 时 (图 4b), 降水量大值区转至台风西南侧, 6 小时累积降水量猛增至 70 mm 以上; 随后 15 日 00:00 (图 4c) 和 06:00 (图 4d), 降水量大值区一直位于 Bilis 的西南侧, 6 小时累积降水中心极大值都超过 80 mm。15 日 12:00 开始 (图 4e), 虽然单站 6 小时累积降水量最大值还有 77 mm 左右, 但大范围的降水强度已明显减弱, 降水范围明显缩小, 15 日 18:00 (图 4f), 台风中心西南侧降水开始减少, 而台风的东南侧和福建沿海地区降水有一定程度的增加, 这与新一轮的季风涌和地形有关, 不是本文分析的 Bilis 暴雨增幅期间的降水。

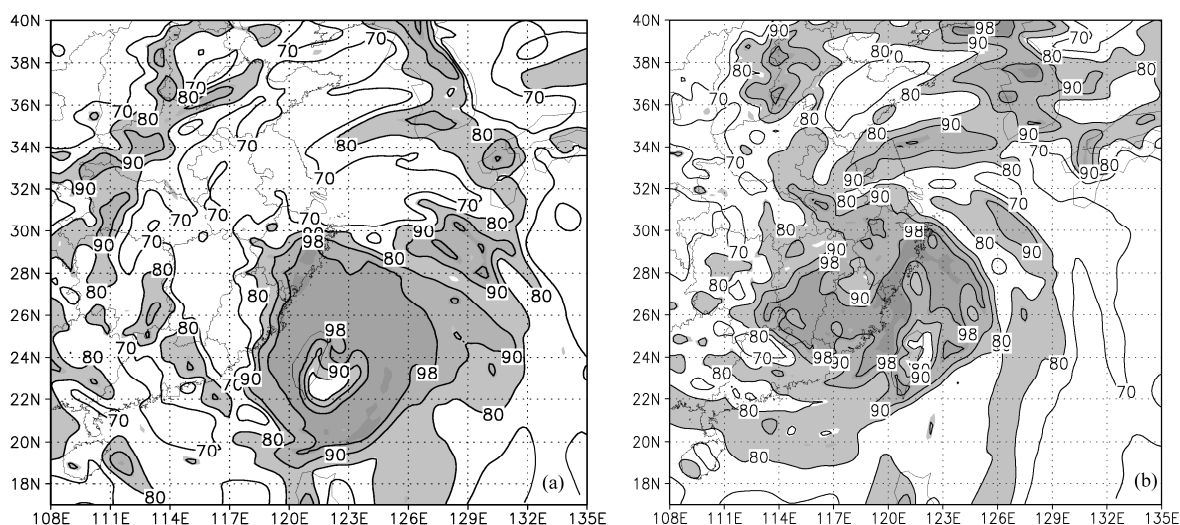


图3 850 hPa 相对湿度分布: (a) 2006 年 7 月 13 日 12:00; (b) 2006 年 7 月 14 日 12:00

Fig. 3 Relative humidity at 850 hPa: (a) At 1200 UTC 13 July 2006; (b) at 1200 UTC 14 July 2006

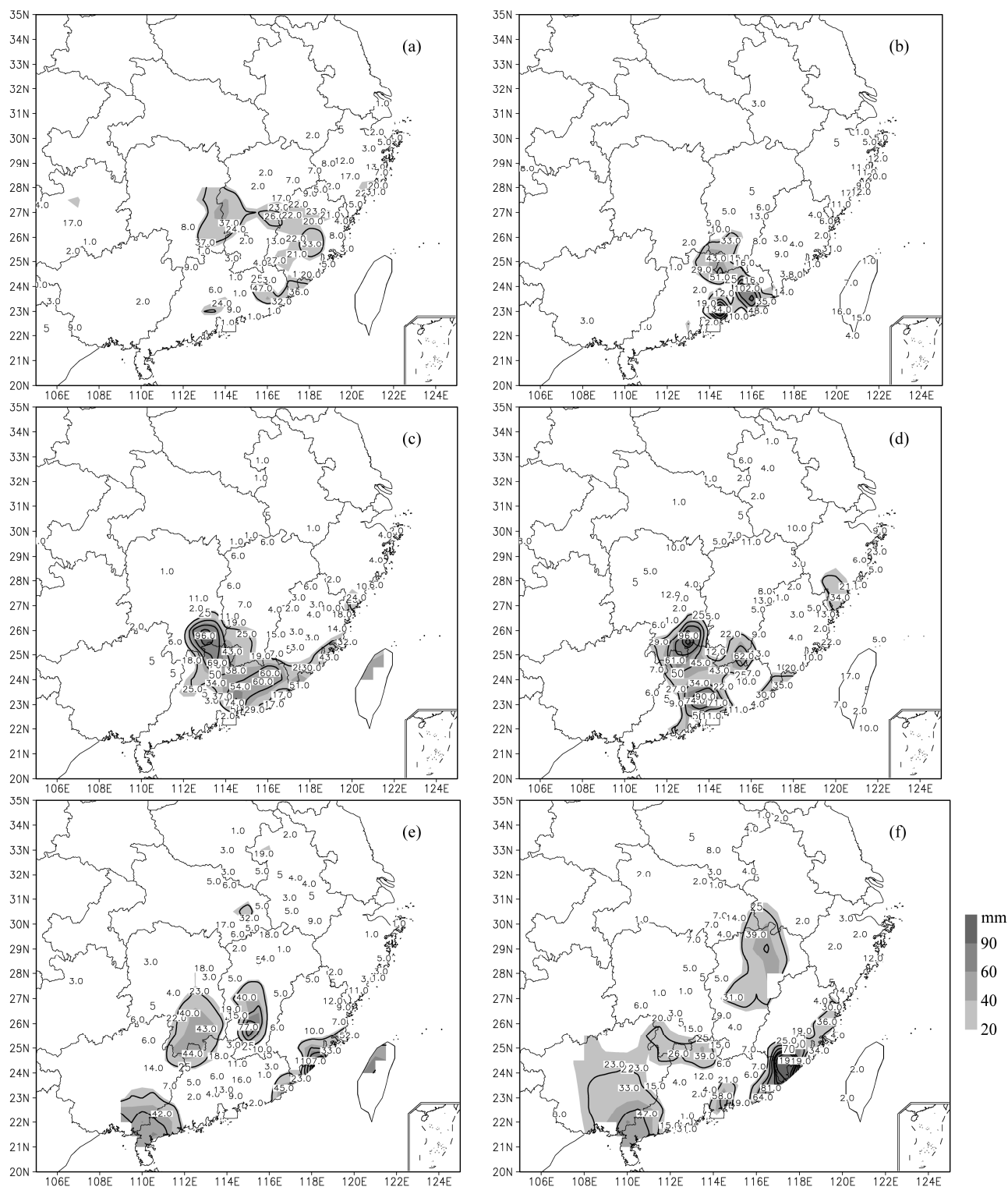


图4 6小时累积地面降水实况(单位: mm): (a) 7月14日12:00; (b) 7月14日18:00; (c) 7月15日00:00; (d) 7月15日06:00; (e) 7月15日12:00; (f) 7月15日18:00。图中数字为降水量, 阴影表示降水量大于20 mm

Fig. 4 The 6-h accumulated precipitation (unit in mm): (a) on 12:00 UTC 14 July 2006; (b) on 18:00 UTC 14 July 2006; (c) on 00:00 UTC 15 July 2006; (d) on 06:00 UTC 15 July 2006; (e) on 06:00 UTC 15 July 2006; (f) on 18:00 UTC 15 July 2006. Digits and shading indicate the rainfall amount and that more than 20 mm, respectively

5 Bilis 台风暴雨增幅前后的风场结构变化

5.1 Bilis 台风暴雨增幅前后的水平风场变化特征

一般而言, 在台风登陆后, 随着台风强度的减弱, 台风降水一般会减少, 但从前面的分析可知, 0604 号台风 Bilis 登陆后的 7 月 14 日 12:00 至 15 日 12:00, 尽管台风中心气压升高了 7 hPa, 中心附近最大风速减小了 7 m s^{-1} (图 1), 但在 Bilis 台风西南侧的湖南、江西和广东交界处 6 小时累积降水量却突然增强了近 50 mm (图 4)。台风登陆强度减弱伴随的这种台风降水却突然增加是很难预测

的, 目前仍然是台风降水业务预报及研究面临的一个难题。如果能找出一种可以提前预测登陆台风降水异常变化的方法, 将能很大程度上为登陆台风降水的预报提供帮助, 减少不必要的经济损失和人员伤亡。因此, 在水汽条件充足的情况下 (图 3), 本节主要从风场分解出的无旋风和无辐散风出发, 分析台风降水增幅前后表现出的风场变化特征, 以期了解台风降水突然增幅的原因。

在 Bilis 台风降水增幅的整个过程中, Bilis 台风的原风场 (图 5) 上, 大风区主要出现在台风的东部及北部区域 (图 5 中由等值线表示), 如图 5a 中, 降水开始增幅时刻, 除了 Bilis 西南部区域外,

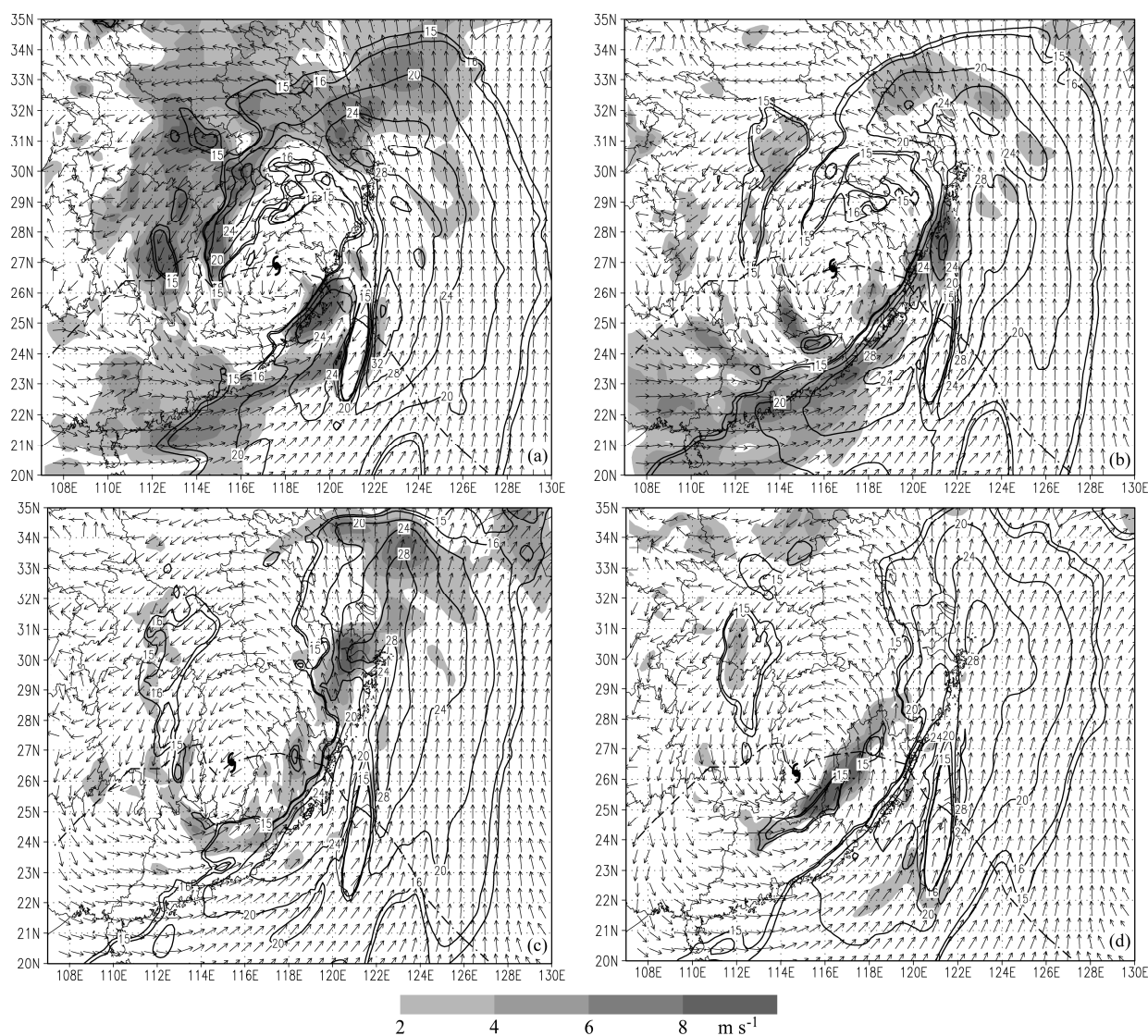


图 5 Bilis 900 hPa 全风场 (实线: 全风速大于 15 m s^{-1} 的区域, 阴影区: 全风速的时间变化大于 2 m s^{-1} 的区域) 分布: (a) 7 月 14 日 12:00; (b) 7 月 14 日 18:00; (c) 7 月 15 日 00:00; (d) 7 月 15 日 06:00。图中长虚线为台风移动轨迹, 台风符号为中国气象局定位的台风该时刻的中心位置
Fig. 5 Distribution of the whole wind at 900 hPa: (a) At 1200 UTC 14 July 2006; (b) at 1800 UTC 14 July 2006; (c) at 0000 UTC 15 July 2006; (d) at 0600 UTC 15 July 2006. Solid line: wind speed more than 15 m s^{-1} ; shading: difference (6-h variation) of wind speed more than 2 m s^{-1} . Long-dashed line indicates the track of Bilis, typhoon symbol is the location of Bilis center

其他区域的风速都大于 15 m s^{-1} , 随着 Bilis 西移及降水增幅发展, 其中心以北地区的大风区逐渐减小 (图 5b) 并被切断 (图 5c), 随后其西北部的小范围的风速大于 15 m s^{-1} 的区域向南发展 (图 5c、d) 并减小, 但这个区域与降水增幅区域 (图 4) 并不重叠。从图中阴影区表示的全风场的 6 小时变化来看, 降水增幅前, 风速变化较大的区域则处于台风中心东南及西北部地区 (图中阴影区), 这可能与台风系统的整体移动及西南季风有关, 到了 14 日 18:00, 也就是暴雨增幅开始时刻, 全风速变化主要出现在台风中心南部和东部, 继续保持一条西南—东北走向的风速变化大值区, 西北部的风速变化大值区明显减小。而在暴雨增幅区域 ($24^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, 114°E) 附近, 出现了小范围集中的风速变化大值

区。从相同时刻的无辐散风 (图 6a-d) 的分布来看, 等值线代表的无辐散风速与全风场的分布类似, 大风区都位于 Bilis 台风环流的东部, 但其北部风速明显小于全风速。也有一条西南—东北走向的带状风速变化大值区, 但在降水增幅时期, 如 14 日 18:00, 暴雨区附近 ($24^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, 114°E) 的无旋风速无明显变化, 与全风场上该区域的小范围风速变化大值区不一致。在 15 日 00:00 和 06:00, 与全风场上西北部对应的大于 15 m s^{-1} 的区域在无辐散风分布上不明显, 在 Bilis 西北部, 只有较小范围的区域刚刚达到 15 m s^{-1} (图 6c、d 中等值线), 且这个区域到 15 日 18:00 已完全消失。在暴雨增幅期间, 全风速在暴雨增幅开始时刻的 14 日 18 时有明显的变化, 在 15 日 00:00 和 06:00, 暴雨最强的时段虽然

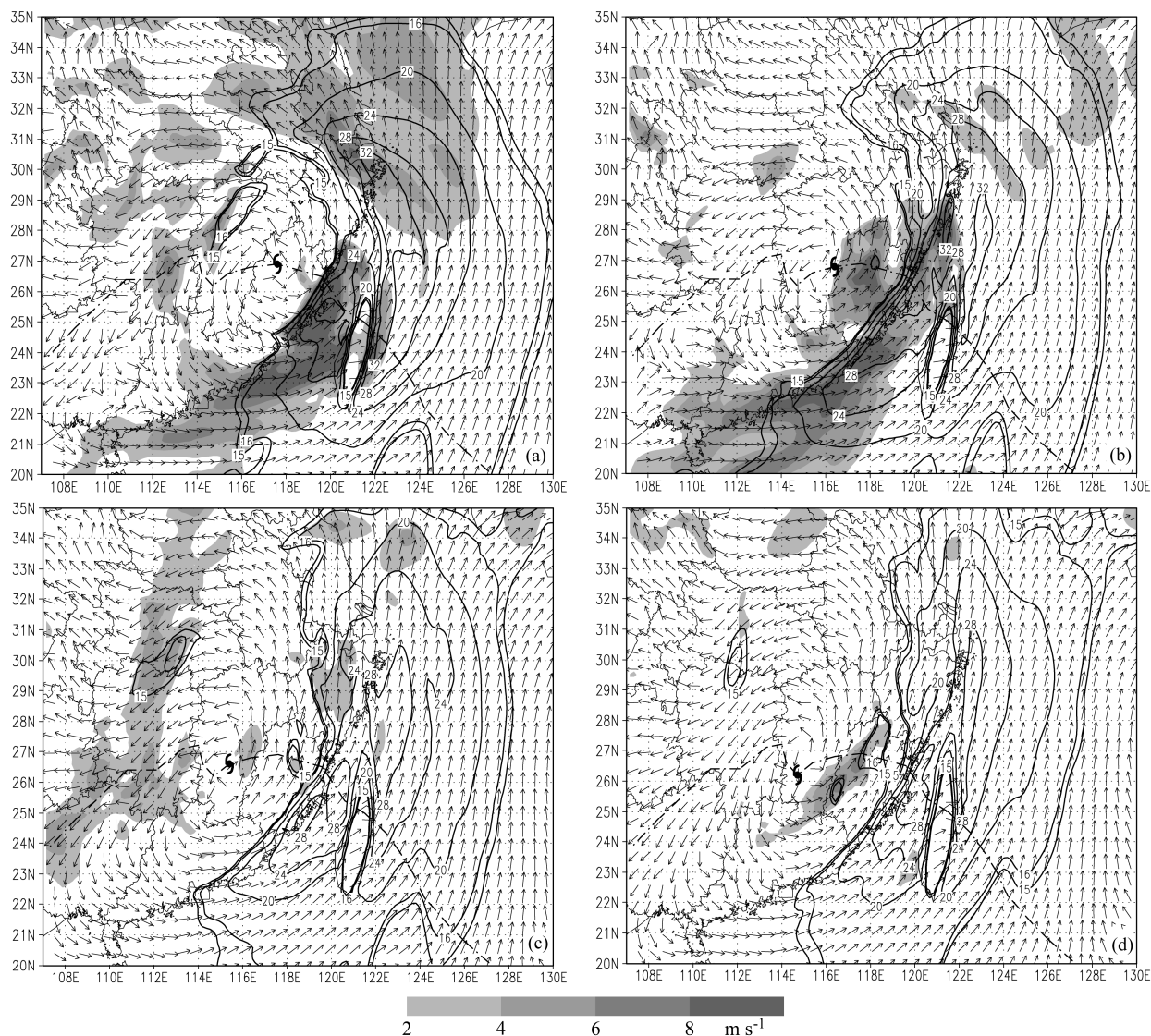


图 6 同图 5, 但为无辐散风分量, 阴影区为无辐散风速时间变化大于 2 m s^{-1} 的区域

Fig. 6 The same as Fig. 5, but for the non-divergence wind, shading means difference (6-h variation) of non-divergence wind speed more than 2 m s^{-1}

有变化, 但变化不大。而无辐散风速的变化较小, 变化区与降水区也不一致, 说明无辐散风变化与降水增幅的关系并不明显。

与全风场及无辐散风的分布变化相比, 在 Bilis 暴雨增幅期间, 其无旋风分布及强度出现了明显的变化, 且其强度变化大值区与散度辐合增强区与暴雨增幅区是一致的, 说明 Bilis 登陆后的暴雨增幅与无旋风强度及其辐合辐散的强弱变化可能有一定的关联。具体分析如下。

在 7 月 14 日 12:00, 即暴雨增幅前 6 小时 (图 7a), 900 hPa 无旋风速度大值区出现在台风中心的东北和东南侧 (图中等值线), 台风中心东北侧主要表现为一致的东北大风, 风速最大达 12 m s^{-1} , 而

台风东南侧主要以东南风为主, 风速最大达 11 m s^{-1} 。尽管台风东北和东南侧无旋风很大, 但东北侧盛行较一致的东北风, 东南侧盛行较一致的东南风, 风场辐合都较弱。而在 Bilis 的西南象限, 虽然无旋风风速相对要小, 最大只有 8 m s^{-1} , 但偏北风和西南风辐合明显, 使得该处出现辐合最强区, 散度最小值超过 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (散度图略)。该时刻风速变化 (图中阴影区) 也是出现在台风中心的东北和偏东侧。

7 月 14 日 18 时, Bilis 台风西南侧降水开始出现增幅, 900 hPa 无旋风速度大值区仍然出现在台风中心的东南至东北侧 (图 7b 等值线), 无旋风最大风速达 14 m s^{-1} , 但风向比较一致, 风场辐合还是

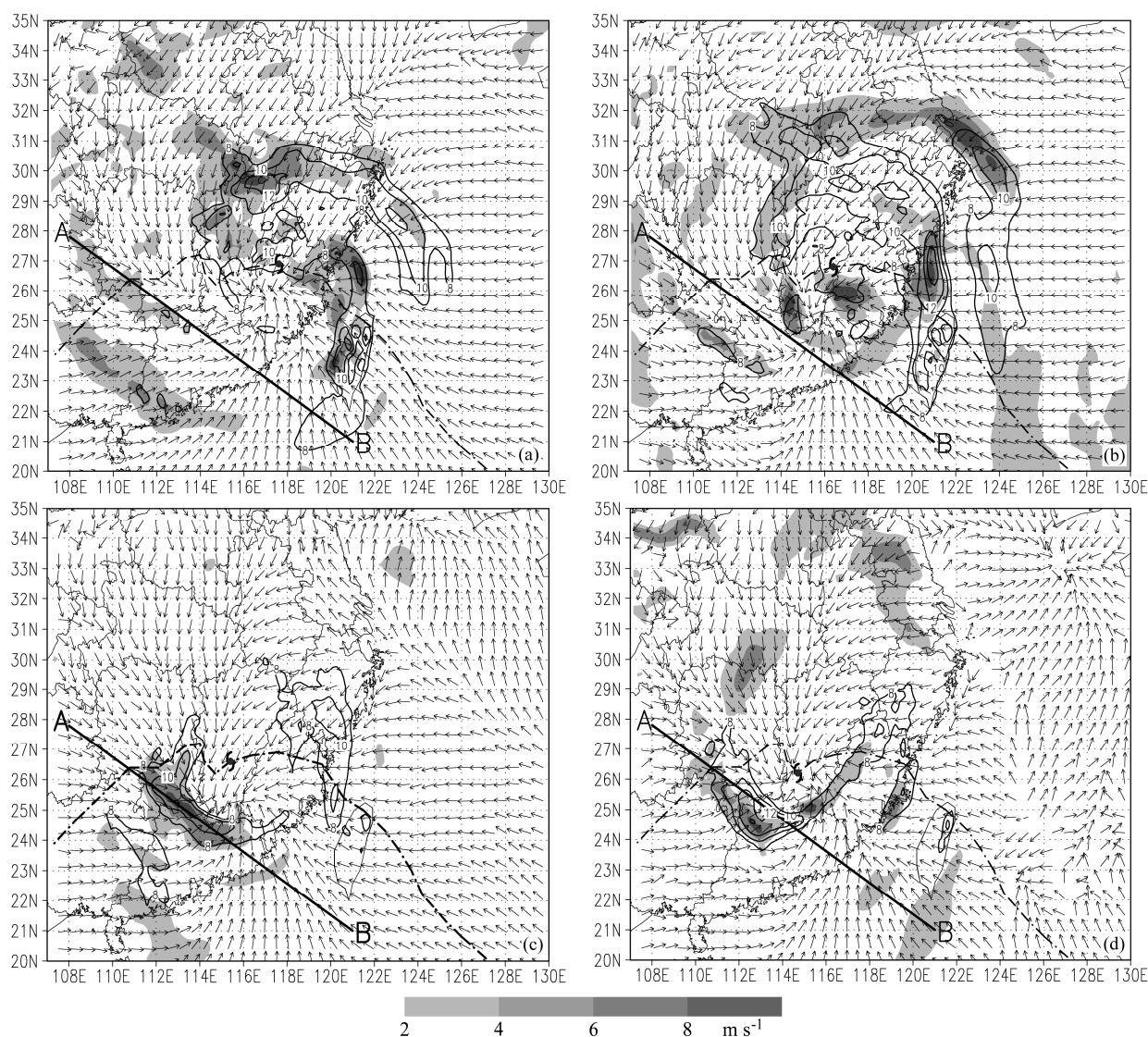


图 7 同图 5, 但为无旋风分量, 阴影区为无旋风速度时间变化大于 2 m s^{-1} 的区域。图中 AB 线为过暴雨区的线段, 将用于图 8 的剖面分析

Fig. 7 The same as Fig. 5, but for the irrotational wind, shading means difference (6-h variation) of irrotational wind speed more than 2 m s^{-1} . Line AB is a line cross the torrential rain area and the cross section along AB will be analyzed in Fig. 8

很弱。风场辐合最强区位于台风西南象限, 东北无旋风、西南无旋风和西北无旋风在此辐合, 散度较 7 月 14 日 12:00 略有减小。和 7 月 14 日 12:00 相比, 最明显的变化是无旋风大风区自台风东北象限向西南象限移动, 8 m s^{-1} 无旋风等值线已穿过台风中心。阴影区表示的风速变化除了在台风中心东侧及北侧区域外, 在其西南侧的暴雨增幅区, 出现了无旋风速度变化的大值, 这个高值区与全风速上该区域的风速变化是一致的, 而无旋风在该区域没有明显变化, 说明该处全风场的变化主要是由无旋风的变化造成的。

至 7 月 15 日 00:00 (图 7c), Bilis 台风降水增加更为明显, 900 hPa 无旋转风分布较前 12 小时有了很大改变, 台风东北侧无旋风大风区明显减弱, 而西南侧的无旋风速度突然增大至 11 m s^{-1} , 各种风向气流自四周涌入台风西南象限, 辐合明显。此时台风辐合中心与无旋风速度大值中心逐渐靠近。从阴影区表示的风速变化可见, 该时刻的风速变化集中在暴雨增幅区, 其他区域的无旋风变化则不明显。

7 月 15 日 06:00 (图 7d), Bilis 台风降水继续保持, 台风东北侧大风区继续减弱, 至 8 m s^{-1} , 而台风西南侧的无旋风速度继续增大, 达到 13 m s^{-1} 。风速变化与 15 日 00:00 类似, 集中在暴雨增幅区, 其他区域的无旋风变化则不明显。该时刻是无旋风大风区和散度最小(辐合最强)区最接近的时刻, 也是 Bilis 西南侧强降水维持的时段, 表明低层无旋风分量增大导致辐合增强, 有利于降水的增强。

自 7 月 15 日 12:00, Bilis 台风西南侧降水开始减弱, 900 hPa 无旋转风大风区在台风的东北侧较前一时刻有所加强, 尽管其西南侧的无旋风速度最大值仍有 12 m s^{-1} , 但强度较前一时刻已减弱(图略)。该时刻无旋风大风区虽然还维持, 但无明显强度变化, 负散度大值区在台风西南侧较 Bilis 台风降水增幅时略有偏移, 降水减小。到了 15 日 18:00, Bilis 登陆后造成的暴雨增幅现象不再维持, 从相应时刻无旋风的分布(图略)可以看到, 此时 Bilis 西南部的无旋风大风区及其强度变化都已明显减弱。

通过以上对 Bilis 暴雨增幅期间的降水与对应时刻的风场及其强度变化分布分析可知, 在暴雨增幅期间, 无辐散风分量虽然在 Bilis 环流的西北部及西部有小范围的风速增强, 但该区域没有明显

降水, 与暴雨增幅关系不明显。暴雨增幅开始时刻, 全风速在暴雨区的增强主要由无旋风增强造成。无旋风分量在暴雨增幅期间, 其强度及其变化都出现明显增强, 且增强变化区域与暴雨增幅的区域基本重合, 说明无旋风分量的增强对暴雨强度有重要影响, 这是因为无旋风变化导致了低层辐合辐散运动的变化, 从而引起垂直运动的调整, 垂直运动将水汽往高层输送后, 往往会带来强的降水。为对 Bilis 暴雨增幅有更深的认识, 下面本文对暴雨增幅前后风场的垂直结构进行分析。

5.2 Bilis 台风暴雨增幅前后的风场垂直结构特征

在 Bilis 暴雨增幅前 6 小时(图 8a), 即 7 月 14 日 12:00, 过 Bilis 台风的西南部暴雨区的剖面中(图 7 中 AB 线), Bilis 台风中心附近低层和高层的无旋风较东北象限剖面(图略)要小得多, 没有形成连成一致的无旋风速度大值区, 但是台风中心附近高低层贯通的垂直上升速度已经形成, 最大的上升速度 -1.4 hPa s^{-1} 在 400 hPa。在 Bilis 降水开始增幅时, 即 7 月 14 日 18:00, 沿图 7b 中 AB 线的垂直剖面(图 8b)上, Bilis 台风中心附近低层和中高层的无旋风大值区与前一时刻比开始向台风中心靠近, 最大的上升速度提高到 -1.8 hPa s^{-1} , 这可能是由于在 Bilis 移动过程中, 由于来自南部海域季风水汽的持续向北输送, 被 Bilis 减弱后的低涡环流系统卷入低涡内, 而东北风与西南风及偏南季风在湖南江西附近辐合加剧了该区域冷暖空气的温度和湿度对比, 也有利于上升运动的维持和对流的发生。7 月 15 日 00 时, 图 7c 中 AB 线的剖面(图 8c)上, 高中低层的无旋风速度都突然增大, 低层以 900 hPa 为中心和高层以 400 hPa 为中心的最大无旋风速度都增大到了 10 m s^{-1} , 中层在 112°E 左右 700~600 hPa 最大风速增大到了 6 m s^{-1} , 而更高一点在 116°E 增加到了 10 m s^{-1} , 200 hPa 台风的西侧无旋风增大 15 m s^{-1} , 由于有低层辐合高层辐散动力场的形成和维持, 使得整层的垂直速度最大在 600 hPa 达到 -2.1 Pa s^{-1} 了。7 月 15 日 06:00 (图 8d), 中高层的无旋风速度变化不大, 低层以 900 hPa 为中心无旋风速度继续增大, 最大值已超过 13 m s^{-1} , 整层的垂直速度仍然很强。7 月 15 日 12:00, Bilis 西南侧降水开始减弱, 中高层的无旋风速度都开始减弱, 低层以 900 hPa 为中心无旋风速度减弱到 6 m s^{-1} (剖面图略), 高层 200 hPa 台风的西侧无旋风也较弱了 2 m s^{-1} , 但整层的垂直速度仍然很维持, 在 111°E 和 113°E 各为

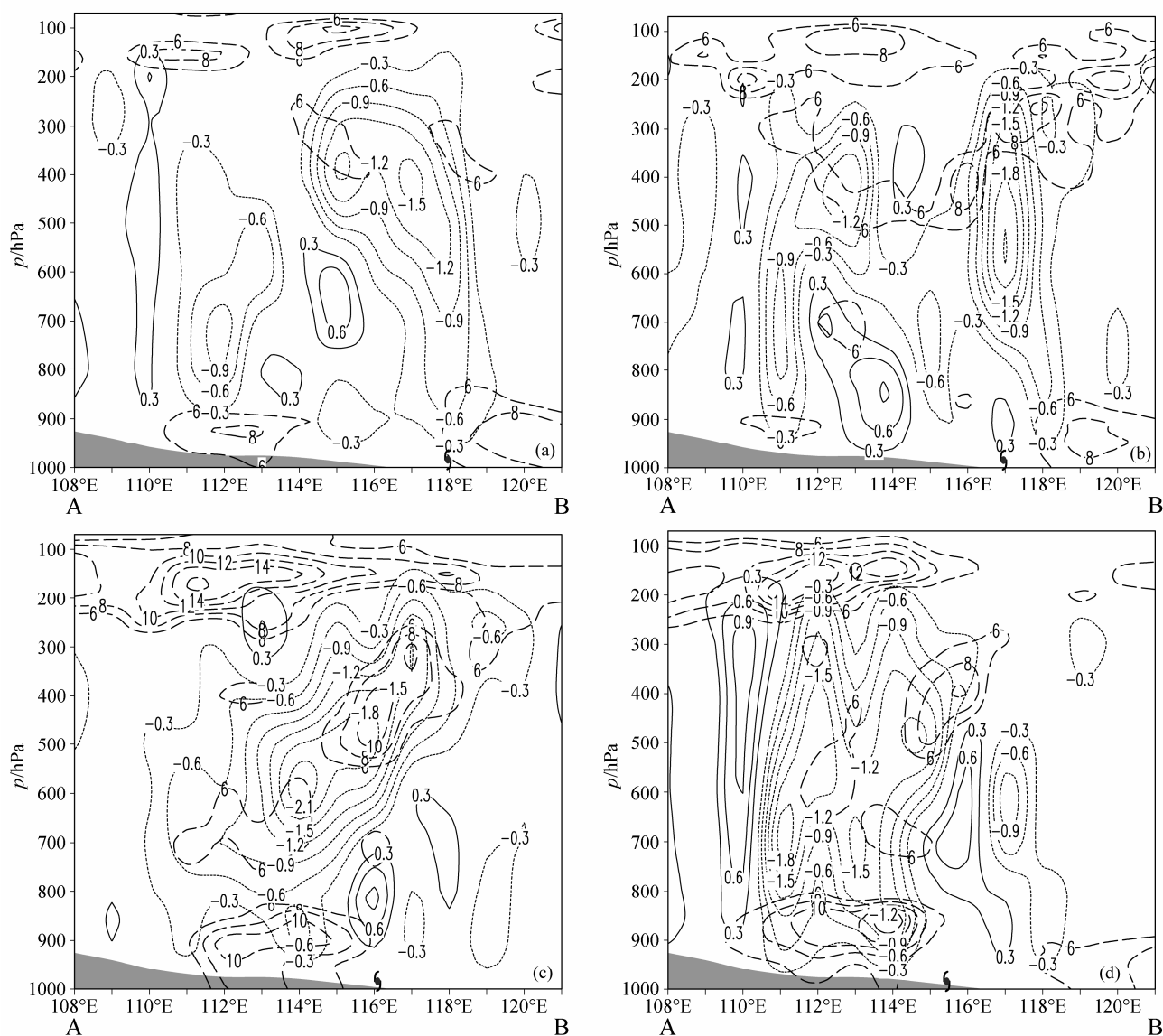


图 8 沿图 7 中 AB 线段的无旋风(粗虚线: 无旋风速大于 6 m s^{-1}) 及垂直速度(单位: Pa s^{-1}) 分布: (a) 7 月 14 日 12:00; (b) 7 月 14 日 18:00; (c) 7 月 15 日 00:00; (d) 7 月 15 日 06:00。阴影区为地形

Fig. 8 The vertical cross sections of the horizontal irrotational wind speed and the vertical speed (unit in Pa s^{-1}) along lines AB in Fig. 7 (thick dashed: the irrotational wind speed more than 8 m s^{-1}): (a) At 1200 UTC 14 July 2006; (b) at 1800 UTC 14 July 2006; (c) at 0000 UTC 15 July 2006; (d) at 0600 UTC 15 July 2006. Shading means terrain

一个上升速度大值区, 分别为 -1.8 和 -2.1 Pa s^{-1} 。

总的来说, 暴雨增幅前, 低层 Bilis 西南部的无旋风速明显加强, 且辐合中心与 Bilis 无旋风速大值中心逐步靠近, 而高层的无旋风速也有明显的增强, 对应的垂直上升速度也明显加强; 在暴雨强度最强的 15 日 00:00~12:00 期间, Bilis 西南部的低层和高层的无旋风速都一致持续加强。这种无旋风场上的变化与暴雨强度变化有很好的相关性, 即: 无旋风在 Bilis 西南部的增强及辐合增强与该区域暴雨的增强相对应, 暴雨增幅出现在高低层无旋风

的风速加大和辐合增强以后。低层辐合及高层辐散的增强使得暴雨区上空垂直运动增强发展, 低层水汽得以不断被输送到中高层, 是暴雨增幅的动力条件之一。与 Bilis 西南部无旋风增强相反的是, 在 Bilis 东北部无旋风速和对应的微弱低层的上升运动在暴雨增幅时期则是明显减弱, 使得 Bilis 暴雨增幅前后, 其无旋风场分布在西南部与东北部出现明显的非对称变化, 表现为西南部无旋风速增大, 辐合加强, 而东北部无旋风速减小。

从 4.1 和 4.2 节的分析中, 在 Bilis 台风西南侧

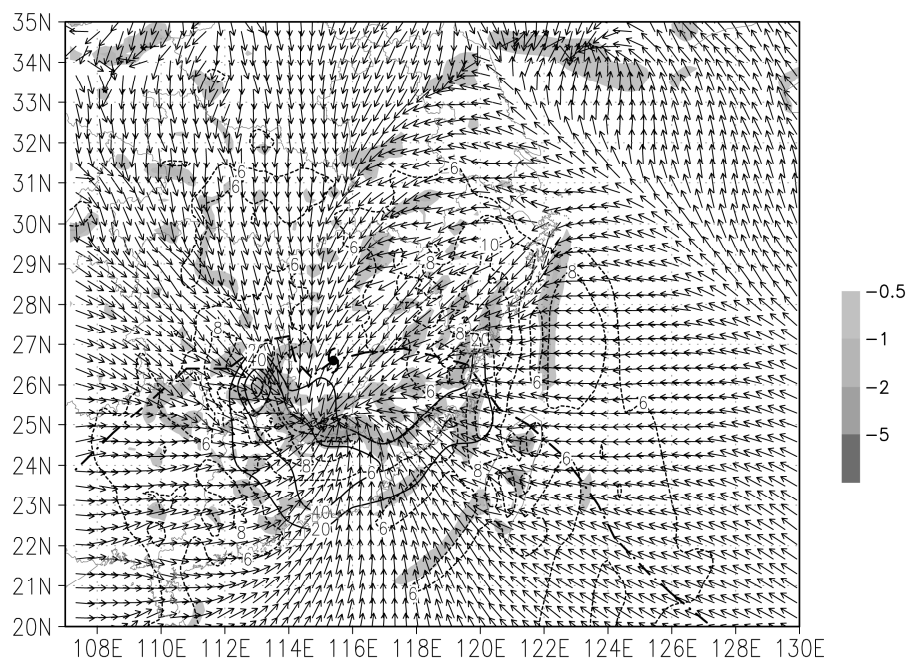


图9 2006年7月15日00:00 900 hPa等压面上 8 m s^{-1} 无旋转风(虚线)、散度小于 0 s^{-1} 区域(阴影)及6小时累积降水量(实线,单位:mm)分布,点虚线为Bilis路径

Fig. 9 The distribution of irrotational wind speed more than 8 m s^{-1} (dot-dashed), convergence region (shading, unit in s^{-1}) at 900 hPa and 6-h accumulated precipitation (solid, unit in mm) at 0000 UTC 15 July 2006. Dot-dashed is the track of Bilis

降水增幅出现前后的整个过程中,台风中心附近无旋风大风区位于台风的东北和东南侧,但由于此处风向为比较一致的偏东风,所以风场辐合比较弱,上升速度也非常弱,因此,虽然中国华南地区已经具备相当丰富的水汽条件,但动力抬升运动没有满足,此处不能产生降水。在台风的西南侧,降水增幅前,此时该处还是无旋风速的一小值区,但是由于来自南部海域的季风气流被 Bilis 减弱后的低涡环流系统卷入低涡内,而东北风与西南风及偏南季风在湖南江西附近辐合加剧了该区域风场辐合,使得该处为一个风场辐合的大值区,风场的辐合也有利于该处上升运动的产生和维持,虽然水汽条件和垂直上升速度在该处都满足,6小时最大降水量却没有超过 30 mm ,直到低层和高层无旋风大值区也移动到了这一风场辐合和垂直上升运动大值区,有持续的动力抬升和水汽辐合,才产生了较强的降水增幅,6小时最大降水量增加到 80 mm 以上,图9清晰地表明,无旋风大值区增强与散度最小(辐合最强)区增强且最接近的时刻,降水也最强。当低层和高层的无旋风及其强度变化减弱时,降水也减弱。这说明无旋转风的变化与降水变化有关系。

从7月14日18:00开始到15日12:00,在Bilis台风移动方向的西南侧,湖南、江西和广东交界处

6小时累积降水量突然较7月14日12时增强了近 50 mm ,在满足充分的水汽条件和动力抬升作用的情况下,在什么情况下降水会突然增加呢?图10为暴雨区区域平均的降水量、全风速、无旋风速、无辐散风速及散度的时间演变(为了与其他物理量直观比较,图中散度取了负号,正的数值越大表示辐合越强)。图10中,左右的纵坐标分别表示风速及散度,降水量数值没有在图的坐标中给出,但是可以表示出降水增幅的过程。从直方图可见,降水增幅前后,直方图所示的区域降水量相差在2倍及以上,表示降水增幅没有问题。从图10可见,暴雨增幅前,即14日12:00到14日18:00,全风速、散度及无旋风速都出现明显的增强趋势,而无辐散风速则表现为减小,这也意味着全风速的增加是由无旋风的增强引起的。从14日18:00一直到15日06:00,暴雨维持,全风速、无旋风速及辐合都继续增强,期间的无辐散风速也有增加,但相对于无旋风速的增强来说,其变化很小。15日06:00到12:00,降水强度维持,散度在15日06:00达到最强后开始减弱,无旋风速也开始减弱,而无辐散风则出现明显增强。从15日12:00到15日18:00,无旋风速及散度都出现明显减弱的趋势,暴雨区雨量减小,暴雨过程结束,而无辐散风继续增强,全风速只表现

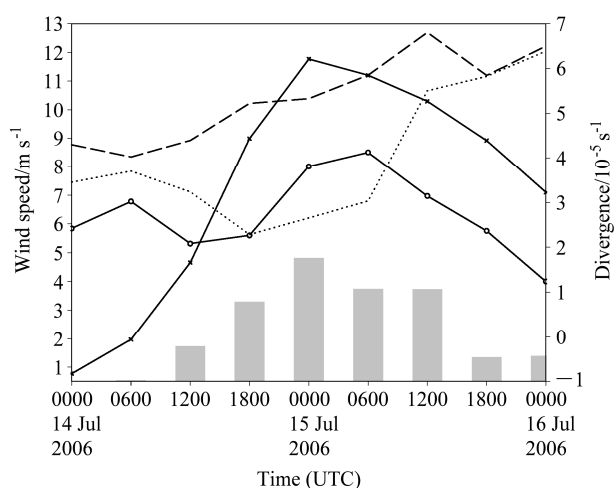


图 10 暴雨区 ($24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$) 平均的 6 h 累积降水量 (直方图, 单位: mm)、全风速 (虚线, 单位: m s^{-1})、无旋风速 (空心的园线, 单位: m s^{-1})、无辐散风速 (点线, 单位: m s^{-1})、散度 (叉线, 单位: 10^{-5}s^{-1}) 从 14 日 00:00 到 16 日 00:00 的时间演变。纵坐标左边标值为风速, 右边标值为散度

Fig. 10 The time evolution of the 6-h accumulated precipitation (bar, unit in mm), whole wind speed (dashed, unit in m s^{-1}), irrotational wind speed (line with open circles, unit in m s^{-1}), non-divergence wind speed (dotted line, unit in m s^{-1}), and divergence (line with crosses, unit in 10^{-5}s^{-1}) averaged in ($24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$), from 0000 UTC 14 to 0000 UTC 16 July 2006

为弱的减弱后转为增强, 意味着这 2 个时刻的全风速强度主要由无辐散风维持。因此, 从暴雨增幅及维持和减弱的整个过程来分析, 对暴雨增幅直接起作用的是无旋风的变化及其引起的散度的变化。无旋风速及辐合增强时, 暴雨出现增幅并维持; 无旋风及辐合减弱后, 暴雨强度逐渐减弱。从无辐散风变化来看, 暴雨增幅前, 无辐散风减弱, 暴雨将要减弱时, 无辐散风开始增强 (这与无旋风动能向无辐散风动能的转换有关), 无辐散风强度变化与暴雨增幅及减弱过程相反。在暴雨增幅和减弱过程中, 暴雨区平均的全风速强度虽然在 15 日 12:00 到 18:00 有稍微减弱, 但在整个暴雨过程中是逐步加强的。其强度在暴雨增幅前主要由无旋风决定, 暴雨减弱阶段主要由无辐散风决定。因此, 虽然从全风速计算的散度也能指示暴雨强度的变化, 但单从全风速的变化, 分析不出其中无旋风及无辐散风的相对大小及其作用, 且全风速计算的散度其实也就是无旋风的散度, 也是由无旋风变化引起的。可见, 把全风场分解后的无旋风及无辐散风的分析能更加明显的揭示出暴雨增幅时期风场的具体变化。

6 结论和讨论

本文利用改进的调和一余弦算法, 对日本气象厅区域谱模式 20 km 分辨率的再分析资料做水平风场的分解, 对 2006 年第 4 号台风 Bilis 登陆后降水增幅的过程进行了分析, 从无辐散风和无旋风分量上得到了比原始全风场更多的台风风场结构变化的信息。分析结果表明, 在 Bilis 台风西南侧降水增幅的整个过程中, 水汽条件都非常充分, 无论是在中国华南地区已具备的外部水汽场还是 Bilis 环流所包含的台风内部的水汽都相当充沛。从风场上看, Bilis 台风的原风场和无辐散风场上表现出的大风区都位于 Bilis 台风的东北和东南象限, 同时, 散度场表示出的风场辐合大值区也并不出现在原风场和无辐散风最大风速区, 而是在原风速和无辐散风速相对小的 Bilis 环流的西南象限。通过对分解出来的无旋转风进一步的分析可知, 台风中心附近无旋风大风区从台风的东北侧向台风风场辐合和垂直上升运动已经很强的台风西南象限移动后, 持续的动力抬升和水汽辐合产生了大幅度的降水增强, 最大 6 小时降水量超过 80 mm。从暴雨增幅及维持和减弱的整个过程来分析, 对暴雨增幅起主导作用的, 是无旋风的变化及其引起的散度变化。无旋风速及辐合增强时, 暴雨出现增幅并维持; 无旋风及辐合减弱后, 暴雨强度逐渐减弱。无辐散风强度变化与暴雨增幅及减弱过程相反。全风速在暴雨增幅前其强度主要由无旋风决定, 暴雨减弱阶段主要由无辐散风决定, 把全风场分解后的无旋风及无辐散风的分析能更加明显的揭示出暴雨增幅时期风场的具体变化。

目前分析 Bilis 台风西南部降水增幅的过程中, 低层和高层的无旋转风速都有相当大的加强, 但这个现象的原因是什么, 还需要进一步的探讨。在下一阶段的工作中, 我们将从能量转换及非平衡运动出发, 试图将这一现象的机理解释清楚, 实现运动学分解与动力学的结合, 并把相应的研究成果应用到日常天气分析和暴雨等灾害天气的预报预警中。

参考文献 (References)

- 陈联寿. 2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 672–681. Chen Lianshou. 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 672–681.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社,

- 1–491. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. The generality of typhoon in the western Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–491.
- Chen Q S, Kuo Y H. 1992. A consistency condition for wind-field reconstruction in a limited area and a harmonic-cosine series expansion [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 2653–2670.
- 程麟生, 冯伍虎. 2001. “98. 7” 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟 [J]. *大气科学*, 25: 465–478. Cheng Linsheng, Feng Wuhu. 2001. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25: 465–478.
- 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.
- 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: 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: 417–428.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 1881–1897.
- 康志明, 陈涛, 钱传海, 等. 2008. 0604 号强热带风暴“碧利斯”特大暴雨的诊断研究 [J]. *高原气象*, 27 (3): 596–607. Kang Zhiming, Chen Tao, Qian Chuanhai, et al. 2008. Diagnostic analysis on torrential rain caused by the tropical storm Bilis (0604) [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (3): 596–607.
- 李柏, 周玉淑, 张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年淮河流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. *大气科学*, 31 (5): 826–838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze River–Huaihe River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (5): 826–838.
- 石顺吉, 余锦华, 张大林. 2009. 热带风暴 Bilis (2006) 登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨 [J]. *热带海洋学报*, 28 (1): 35–42. Shi Shunji, Yu Jinhua, Zhang Dalin. 2009. Causes of wave number-1 asymmetric rainfall distribution of tropical storm Bilis (2006) during its landfall [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 28 (1): 35–42.
- Wang L J, Lu S, Guan Z Y, et al. 2010a. Effect of low-latitude monsoon surge on the increase in downpour from tropical storm Bilis [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 16: 101–108. doi:10.3969/J.issn.1006-8775.2010.02.001.
- Wang D H, Li X F, Tao W K. 2010b. Responses of vertical structures in convective and stratiform regions to large-scale forcing during the landfall of severe tropical storm Bilis (2006) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (1): 33–46.
- 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). [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (3): 552–561. doi:10.1007/s00376-009-9030-6.
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟 [J]. *科学通报*, 45: 1988–1992. Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Hongqing, et al. 2000. Numerical simulation of mesoscale convective systems over the Meiyu front in South China [J]. *Chinese Sciences Bulletin* (in Chinese), 45: 1988–1992.
- 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.
- 周玉淑, 李柏. 2010. 2003 年 7 月 8~9 日江淮流域暴雨过程中涡旋的结构特征分析 [J]. *大气科学*, 34 (3): 629–639. Zhou Yushu, Li Bai. 2010. Structural analyses of vortex causing torrential rain over the Changjiang–Huaihe River basin during 8 and 9 July 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 629–639.
- 周玉淑, 曹洁, 高守亭. 2008. 有限区域风场分解方法及其在台风 SAOMEI 研究中的应用 [J]. *物理学报*, 57 (10): 6654–6665. Zhou Yushu, Cao Jie, Gao Shouting. 2008. The method of decomposing wind field in a limited area and its application to typhoon SAOMEI [J]. *Acta Phys. Sin.* (in Chinese), 57 (10): 6654–6665.