

李媛,张泽铭,高广强,等.台风环流对远距离暴雨水汽输送影响研究[J].海洋气象学报,2017,37(1):111-117.
Li Yuan, Zhang Zeming, Gao Guangqiang, et al. Impacts of typhoon circulation on the water vapor transportation of remote precipitation[J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(1):111-117. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.013. (in Chinese)

台风环流对远距离暴雨水汽输送影响研究

李媛¹,张泽铭¹,高广强¹,丛春华²,李瑞芬¹

(1. 济宁市气象局,山东 济宁 272000; 2. 山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 利用 NCEP 再分析资料,结合 WRF 模式对 2008 年 7 月 17—19 日发生在山东省的台风远距离暴雨水汽输送过程进行分析。结果表明:台风环流不仅有利于低纬度西太平洋水汽输送到山东内陆地区,而且迫使来自孟加拉湾的气流强度和方向发生变化,进而对远距离降水强度和持续时间产生重大影响;台风环流对鲁东南地区的水汽贡献远大于鲁西南地区,移除台风环流能间接地增强鲁西南地区的水汽供应;台风环流使远距离降水区水汽辐合范围集中,辐合强度增强,从而增强降水强度。

关键词: 台风;水汽;暴雨;数值模拟

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0111-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.013

Impacts of typhoon circulation on the water vapor transportation of remote precipitation

LI Yuan¹, ZHANG Zeming¹, GAO Guangqiang¹, CONG Chunhua², LI Ruifen¹

(1. Jining Meteorological Bureau, Jining 272000, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract By using NCEP reanalysis data and WRF model, the water vapor transport process of long-range typhoon rainstorm was studied with a case in Shandong province during 17-19 July 2008. The results show that the typhoon circulation not only provides favorable conditions for water vapor transportation from the Western Pacific Ocean to Shandong inland area, but also affects the intensity and time duration of the long-range precipitation by changing the intensity and direction of the airflow from the Bay of Bengal. The contribution of water vapor from typhoon to the southeastern Shandong is much greater than that to the southwestern Shandong. Therefore, removal of typhoon circulation can indirectly enhance the water vapor supply to the southwestern Shandong. The typhoon circulation intensifies the long-range precipitation by contracting the water vapor convergence area and intensifying the convergence.

Key words typhoon; water vapor; rainstorm; numerical simulation

引言

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)远距离暴雨的特点是突发性强、降水强度大、预报难度大,对中纬度地区人民的生命财产安全造成很大威胁,国内外

学者对此进行了大量研究。陈联寿^[1]于 2007 年给出了 TC 远距离暴雨的宏观定义,定义指出:1)降水发生在台风范围之外;2)这块降雨与台风存在着内在的物理联系。此定义清楚地将台风远距离暴雨与台风本体暴雨区分开,从此这方面的研究才有了

收稿日期:2016-11-28; 修订日期:2017-02-28

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ009);山东省气象局青年科研基金项目(2016SDQN16)

作者简介:李媛(1988—),女,硕士,工程师,主要从事天气预报与气象服务工作,sdliy2016@163.com。

一个宏观标准。丛春华等^[2]统计表明 TC 远距离暴雨是热带气旋水汽输送、中纬度槽和地形三者相互作用的结果,有无 TC 远距离暴雨的关键在于热带气旋东侧环流能否将水汽输送到中纬度槽前。孙建华等^[3]对 9406 号台风 Tim 的研究发现,水汽通量的大值区位于台风倒槽的两侧,倒槽东部的水汽通量最大,随着倒槽的北移,水汽通量逐渐减小,但水汽通量的辐合并未减少。Schumacher 等^[4]对 2007 年 8 月 18—19 日发生在美国大平原北部和五大湖南部由台风 Erin 引发的远距离暴雨进行数值模拟得出台风外围环流对水汽的输送起到重要作用,当将台风环流移除时,对流有效位能减小,中尺度对流云团减弱,最大降水量约减少 50%,总降水量约减少 25%。Wu 等^[5]和 Wang 等^[6]分别对发生在台湾和日本的远距离暴雨进行模拟均得出台风的涡旋结构及强度均对远距离暴雨有重要影响,台风的重要作用是向降水区输送暖湿空气。杨晓霞等^[7]的统计表明,在华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风带环流系统和副热带高压相互作用在山东造成的远距离台风暴雨年平均达 2.5 次。热带气旋降水多集中出现在山东中东部地区,暴雨的高值区则主要集中在鲁东南、山东半岛南部和半岛东部地区^[8]。基于以上研究成果,本文通过数值模拟敏感性试验来研究台风对山东远距离降水过程中水汽输送的具体影响。

1 资料与方法

选用中尺度模式 WRF3.2 对此次降水过程进行数值模拟。模式初始条件和侧边界条件均采用 NCEP 每 6 h 一次再分析格点资料,模式中采用的物理方案主要包括:Lin 微物理方案、Noah 陆面过程方案、Eta MYJanjic TKE 边界层方案、Betts-Miller-Janjic 和 Grell-Devenyi 积云参数化方案。采用两层双向嵌套网格方案,水平分辨率分别为 30 km 和 10 km,垂直方向为 28 层,模式顶取 50 hPa。模式积分的初始时间为 17 日 20 时,积分 24 h,粗、细网格的输出频率均为 1 h。

为了找出台风环流对远距离降水水汽输送的影响,利用 Bogus 方案将原有的台风涡旋从初始场中分离作为敏感性试验。该方案最早应用于 MM5 REGRID 模块,从 WRF3.1 开始引入 WRF 中。首先根据给定的台风信息(中心位置、最大风速、最大风速半径等)在近地面气压场(1 000 hPa)中查找台风最大相对涡度,搜索半径为 400 km。然后去除第一

初猜场涡度周围 300 km 范围内的涡度和散度,并重新计算速度得到去除了初猜场中台风信息的背景场。重新积分新的初始场,模拟参数和模拟时间均不变,将此试验定为敏感性试验。

2 远距离降水实况

2008 年第 7 号台风“海鸥”,于 2008 年 7 月 15 日下午在菲律宾以东洋面上生成,17 日夜在中国台湾省宜兰县登陆,登陆时中心附近最大风速为 33 m/s,18 日 07 时(北京时,下同)于桃园附近移入台湾海峡,18 日 18 时在福建省霞浦县长春镇再次登陆。7 月 17—19 日,受台风海鸥与中纬度系统的共同影响,山东出现该年汛期最强的降雨。17 日 20 时—18 日 20 时(图 1a),山东省普降大到暴雨,共有 29 个县(市、区)平均雨量超过 100 mm,两个降水中心分别位于鲁中山区的沂源和鲁西南地区的曹县,降水量分别为 129.1 mm 和 115 mm。从每 6 h 一次的降水分布图上(图略)可以看到,降水落区自山东西部开始,逐渐东移,鲁中地区的强降水中心 18 日 08—14 时形成,沂源 6 h 降水达 103 mm,随后降水落区东移到山东半岛地区。

此次暴雨过程与特定的环流形势密切相关。从图 1b 500 hPa 高度场和 200 hPa 风速 ≥ 30 m/s 的环流形势合成分布图上能够看出,17 日 20 时,200 hPa 高空急流位于 38°N 以北,急流核位于辽宁东部,中心风速达 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;500 hPa 乌拉尔山地区为一阻塞高压,其下游巴尔喀什湖北部为一高空冷涡,不断分裂小股冷空气侵入中国中东部地区,河套地区东北部为一低涡,低压槽伸至四川省西南部,温度槽落后于高度槽,槽后冷平流明显,槽发展,移动缓慢;副热带高压呈块状位于海上,台风海鸥位于台湾岛东部海面,到 18 日 08 时,山东仍处于 500 hPa 槽前(图略)。随着台风海鸥移近大陆,850 hPa 和 925 hPa 副热带高压和台风外围的偏南风速明显增强(图 1c-d)。这是一次典型的远距离台风暴雨过程。

3 模拟结果与实况的对比分析

与实况对比发现,模式(图 2a)较好地再现了此次降水过程,模拟的雨带走向、雨区范围、降水中心位置和量级与实况基本一致。

对比滤除台风前后模拟的 17 日 20 时—18 日 20 时 24 h 累计降水量可以看出(图 2a-b),滤除台风后山东半岛地区雨区范围增大,黄海海域降水量

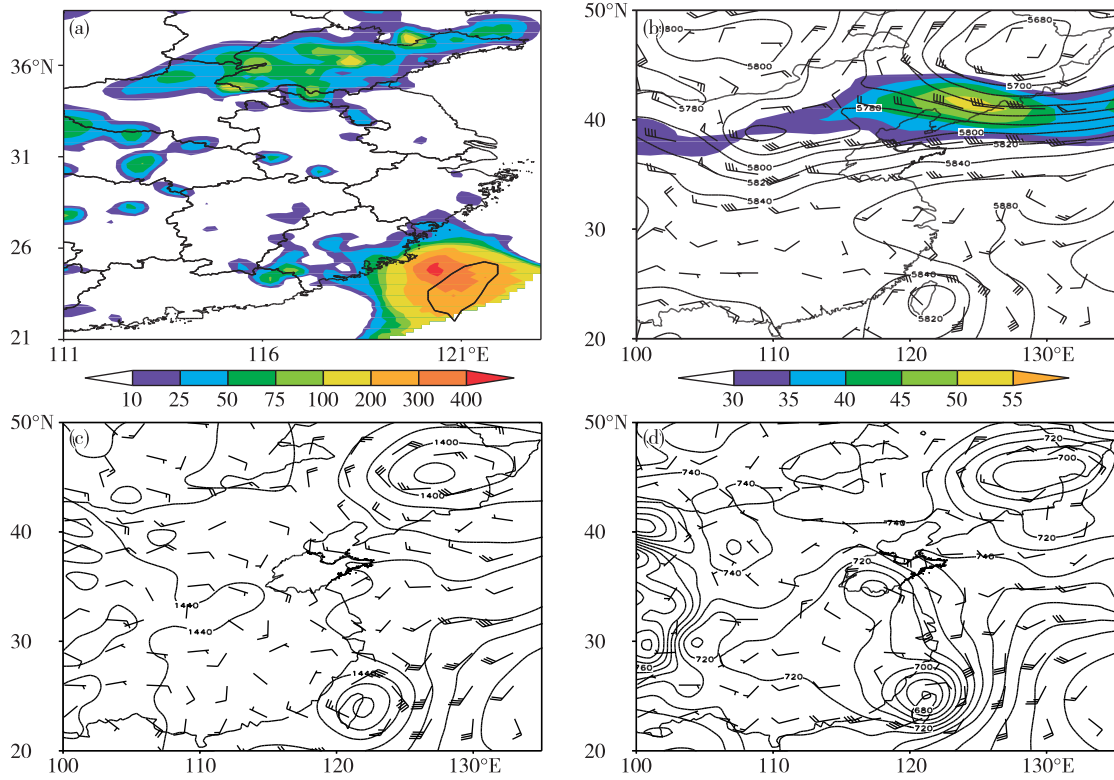


图 1 17 日 20 时—18 日 20 时累积降水量分布 (a, 单位: mm); 17 日 20 时 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm)、风场 (风向杆) 与 200 hPa 高空急流 (阴影区风速 ≥ 30 m/s) 分布 (b); 17 日 20 时 850 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (风向杆) (c); 18 日 08 时 925 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (风向杆) (d)

Fig.1 a. Distribution of accumulated precipitation (unit: mm) from 20:00 BST 17 to 20:00 BST 18, b. geopotential height (contour, unit: gpm) and wind (barb) at 500 hPa, and upper level jet (shaded areas with wind speed greater than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 200 hPa at 20:00 BST 17, c. geopotential height (contour, unit: gpm) and wind (barb) at 850 hPa at 20:00 BST 17, d. geopotential height (contour, unit: gpm) and wind (barb) at 925 hPa at 08:00 BST 18

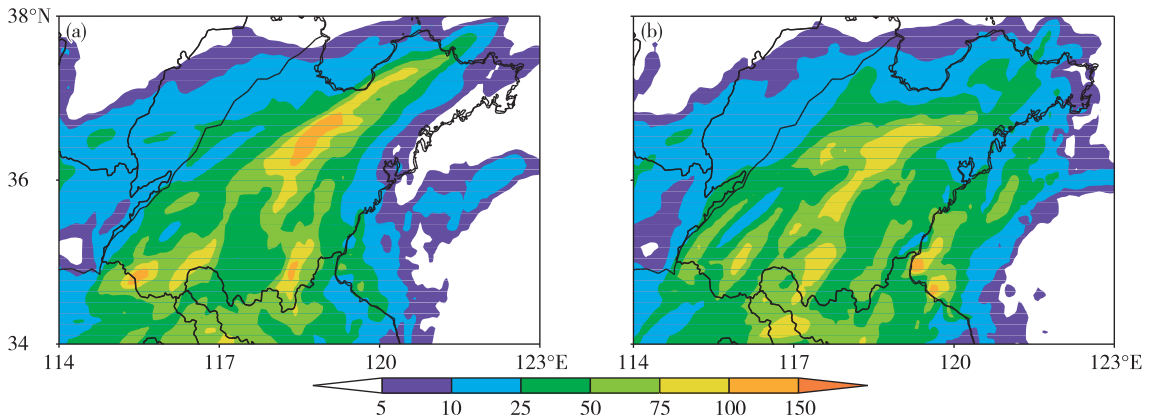


图 2 模拟的 17 日 20 时—18 日 20 时控制试验 (a) 和无台风试验 (b) 累计降水量 (单位: mm)

Fig.2 Distributions of accumulated precipitation (unit: mm) from 20:00 BST 17 to 20:00 BST 18 July 2008 in control (a) and non-typhoon (b) numerical experiments

明显增加。山东省内陆地区强降水区域的分布及降水强度发生了明显变化,鲁西南强降水中心消失,鲁西南强降水中心比移除台风前偏少 42 mm,鲁中强降水中心消失,最大降水量减少了 71 mm,6 h

降水(图略)减少了 30 mm,可见台风海鸥对山东的降水有重要影响,移除台风后山东省内陆地区强降水减弱明显。对比分析 1 h 降水(图略)演变可以看出,移除台风后鲁西南 1 h 降水明显减小,18 日 00

时,最强降水减少 15 mm 以上,之后降水虽有所加强,但仍比移除台风前偏弱,且强降水范围也大大缩小。对比鲁中地区的 1 h 降水,移除台风后,18 日 10—14 时的 1 h 降水反而增大,但到 18 日 15 时,短时强降水迅速减弱,18 日 16 时,鲁中地区的降水基本结束,比移除台风前的结束时间提前了近 5 h。

4 台风对水汽输送的影响

4.1 水汽通量分析

图 3 给出了从 1 000 hPa 积分到 300 hPa 的水汽通量场,从图 3a 可以看出降水初期山东省水汽来源有三处,分别是孟加拉湾水汽经西南气流输送至山东、台风与副高之间的偏南气流将东海水汽输送至山东、华北南部气旋性环流南侧的偏西气流将内

陆地区的水汽输送到山东,其中后两条水汽输送通道存在于整个降水期间,而孟加拉湾水汽输送通道只持续至 18 日 05 时,从 18 日 06 时起,来自孟加拉湾的水汽在台风环流和华北气旋性环流共同作用下在 28°N 以南全部转向为偏西或西北气流进入台风环流,使其不能直接输送到华北地区。对比移除台风后水汽通量的分布情况,可以发现有两个明显的变化,其一是孟加拉湾水汽在西南气流的引导下直驱北上输送到山东省,不似控制试验中发生转向;另一个变化则是东海的水汽在副热带高压西侧偏南气流的引导下输送北上,由于缺少台风北侧偏东分量的引导使其不能输送到山东内陆地区,只能到达山东半岛及其以东的区域。

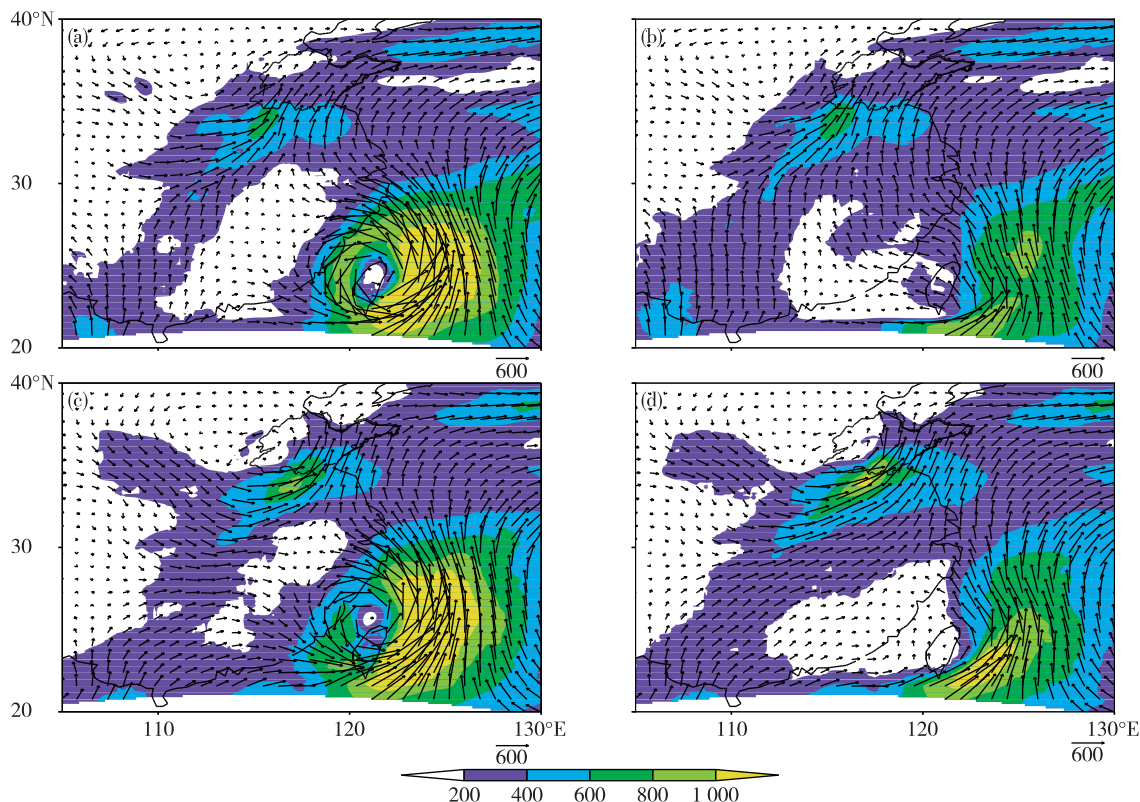


图 3 18 日 02 时(a,b)和 08 时(c,d)模拟控制试验(a,c)和无台风试验(b,d)1 000~300 hPa 的水汽通量垂直积分(填色表示水汽通量大于 200 的区域,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.3 Vertical integration of moisture flux (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, color shaded areas indicate moisture flux greater than 200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) from 1 000 hPa to 300 hPa at 02:00 BST (a, b) and 08:00 BST (c, d) 18 July 2008 in control (a, c) and non-typhoon (b, d) numerical experiments

从暴雨区上空的整层水汽通量来看,18 日 02 时(图 3a-b)鲁西南地区移除台风后的水汽通量较控制试验中略有增大,到 18 日 08 时(图 3c-d),水汽通量大值区东移到鲁东南地区,且敏感性试验中的整层水汽通量仍然比控制试验大,这或许是由于

孟加拉湾水汽是这次暴雨过程的主要水汽来源之一,台风环流使来自孟加拉湾气流的强度和方向发生了变化,当把台风环流移除后,孟加拉湾水汽在西南气流的引导下可以直驱北上输送到山东省,所以移除台风后山东省整层水汽通量反而比移除前

要大。分析控制试验中各层水汽通量(图略)发现,水汽输送主要集中在 850~925 hPa 等压面之间,以 850 hPa 等压面附近最大,原因是与台风远距离暴雨相联系的偏南急流主要位于 850 hPa 等压面及以下的低层,将台风移除后,偏南急流加强,急流高度没有明显变化。

4.2 暴雨区大气可降水量分析

下面通过大气可降水量来分析暴雨区上空的水汽含量变化情况,进一步揭示台风环流对远距离暴雨水汽条件的影响。通过以上分析得知,18 日 02 时鲁西南强降水过程中的水汽有三处来源,图 4a 也显示了在这三股水汽的贡献下鲁南的南部大气可降水量在 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,同时在鲁西南和鲁东南分别有两个大于 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的中心,而将台风环流移除后,鲁东南的大值中心消失,鲁西南地区的大气可降水量分布基本没有变化(图 4b),说明在此次暴雨过程中台风环流对鲁东南地区的水汽含量贡

献远比鲁西南地区大的多。到 18 日 06 时(图略),随台风环流移近大陆,来自孟加拉湾的水汽在台风环流和华北气旋环流共同作用下在 28°N 以南全都转为偏西或西北气流进入台风环流,使其不能直接输送到华北地区,对应的鲁西南地区的大气可降水量分布则是移除台风后要比控制试验中大的多,也就是说台风环流的移除虽然会削减鲁东南地区的水汽含量,但是能够增强鲁西南地区的水汽供应,这与上一节中移除台风后水汽通量反而增大的结果相一致。18 日 15 时(图 4c-d),对比控制试验和敏感性试验的大气可降水量可以发现,移除台风后鲁东南地区大于 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的中心消失,并且鲁中地区的大气可降水量较控制试验偏小,此时对应鲁中地区的短时强降水迅速减弱结束,比控制试验中降水的结束时间提前了近 5 h,这说明台风环流通过影响暴雨区水汽含量来延长鲁中降水的持续时间。

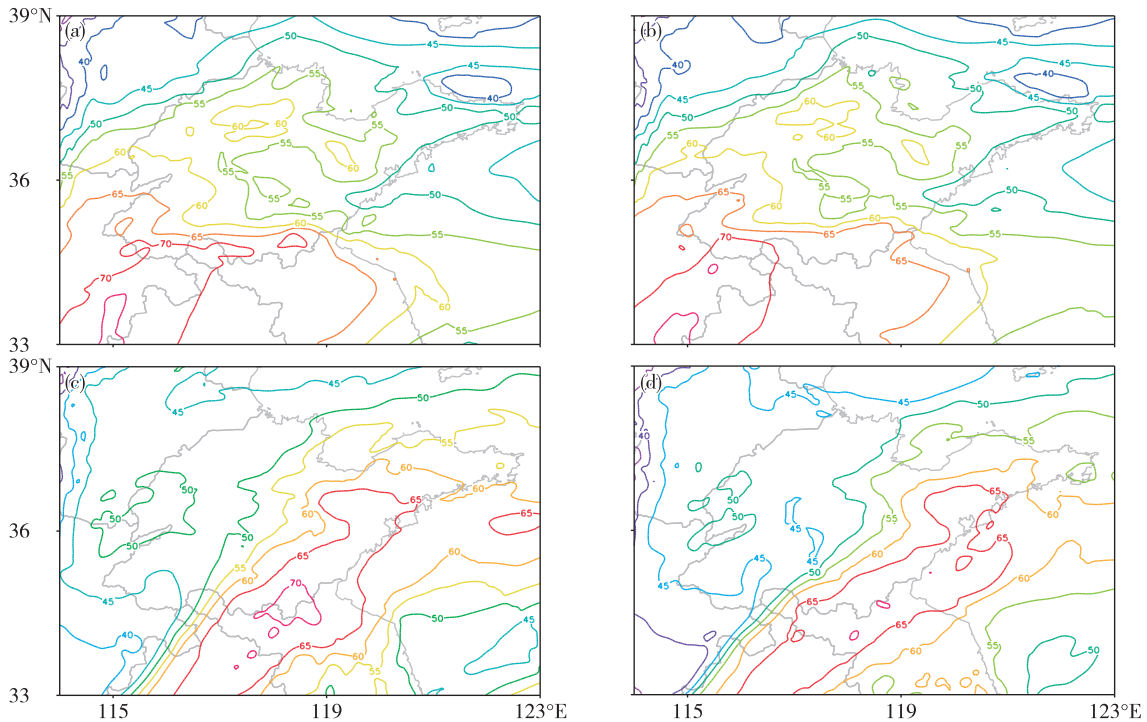


图 4 18 日 02 时(a,b) 和 15 时(c,d) 模拟控制试验(a,c)和无台风试验(b,d)大气可降水量分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig.4 Total column water vapor (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) at 02:00 BST (a, b) and 15:00 BST (c, d) 18 July 2008 in control (a, c) and non-typhoon (b, d) numerical experiments

4.3 暴雨区水汽的辐合

以上分析得出暴雨过程的水汽输送及水汽含量情况,但水汽能否在某地集中才是暴雨产生的根本条件。从 18 日 02 时(图 5a)850 hPa 水汽通量散度图中能够看出,位于鲁豫交界的水汽辐合中心由

17 日 23 时的 $-5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $-13 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 伴随水汽通量的增大,鲁西南降水增强,之后的 3h 强水汽辐合区东移,强降水也向东北方向发展移动;18 日 04 时(图略),水汽辐合区进一步东移,辐合强度减弱,鲁西南强

降水随之减弱结束。18日10时(图5c),水汽辐合带在鲁中地区发展加强,辐合带近似于东西走向,辐合中心达 $-9 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁中降水也随之加强发展,之后,辐合带向东北方向推进且转为东东北-西西南走向,强辐合一直维持到18日14时。18日15时(图略),水汽辐合中心开始减弱东移,与之伴随的鲁中强降水也减弱东移。对照敏感性试验可以发现,18日02时(图5b),鲁西南水

汽辐合较之前有增强的趋势,但辐合中心强度远小于控制试验,中心最大值仅达到 $-9 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,并且辐合区范围增大,中心分散,这或许就是移除台风后虽然降水区上空水汽通量和大气可降水量增大,但是强降水中心消失、降水量减小的原因所在,对比移除台风前后鲁中强降水区850 hPa水汽通量散度的变化也和鲁西南地区基本一致,不再赘述。

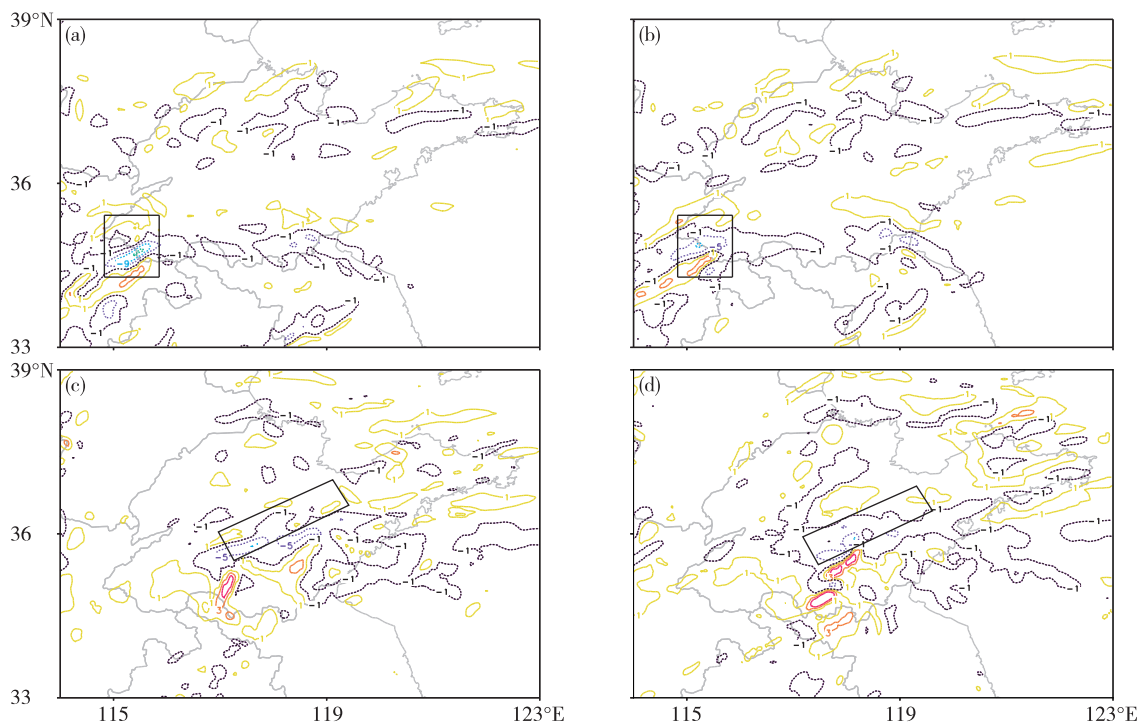


图5 18日02时(a,b)、10时(c,d)控制模拟试验(a,c)和无台风模拟试验(b,d)850 hPa水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.5 Water vapor flux divergence (unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 02:00 BST (a, b) and 10:00 BST (c, d) 18 July 2008 in control (a, c) and non-typhoon (b, d) numerical experiments

5 小结

1) 台风环流对山东地区降水分布有重要影响。移除台风环流后山东内陆地区强降水减弱明显,且分布也发生了明显变化,鲁西南强降水中心消失,鲁中强降水区不仅降水量明显减少,而且降水中心向西南方向移动了近一个经纬度。移除台风后,山东半岛地区雨区范围增大,黄海海域降水量增加明显。

2) 此次暴雨过程中,台风环流对鲁东南地区的水汽贡献远大于鲁西南地区;台风环流的移除削减鲁东南地区的水汽含量,但却间接地增强鲁西南地区的水汽供应。

3) 台风环流使远距离降水区水汽辐合范围集中,辐合强度增强,从而增强降水强度,台风环流通过对暴雨区水汽含量的影响来延长鲁中降水的持续时间。

参考文献:

- [1] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C]//第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集. 2007:3-7.
- [2] 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.
- [3] 孙建华,赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究[J]. 大气科学,2000,24(2):223-237.
- [4] Schumacher R S, Galarnau T J, Bosart L F. Distant effects of a recurring tropical cyclone on rainfall in a mid-

- latitude convective system; a high-impact predecessor rain event [J]. *Mon Wea Rev*, 2010, 139(2): 650-667.
- [5] Wu C C, Cheung K K W, Lo Y Y. Numerical study of the rainfall event due to the interaction of typhoon Babs (1998) and the Northeasterly Monsoon [J]. *Mon Wea Rev*, 2009, 137:2049-2064.
- [6] 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.
- [7] 杨晓霞, 陈联寿, 刘诗军, 等. 山东省远距离热带气旋暴雨研究[J]. *气象学报*, 2008, 66(2): 236-250.
- [8] 丛春华, 吴炜, 孙莎莎. 1949—2012 年影响山东地区热带气旋的特征 [J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(5): 67-73.