

徐洪雄, 徐祥德, 张胜军, 等. 2014. 台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京 7·21 暴雨的影响 [J]. 大气科学, 38 (3): 537–550, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13173. Xu Hongxiong, Xu Xiangde, Zhang Shengjun, et al. 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 537–550.

台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应 及其对北京“7·21”暴雨的影响

徐洪雄¹ 徐祥德¹ 张胜军¹ 付志康²

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074

摘 要 2012 年 7 月 21 日北京地区遭受了 61 年以来最大的暴雨, 造成了大量的人员伤亡与巨大的财产损失。资料综合分析表明台风韦森特在暴雨发生过程中的水汽输送起到“枢纽”的作用, 夏季季风通过台风韦森特在副高的影响下将水汽“转运”至暴雨区。为了验证北京异常暴雨过程中台风韦森特的“转运”效应, 利用中尺度数值模式 WRF 对暴雨过程进行数值模拟, 结果表明模式能够较好的模拟出此次降水过程的强度、落区, 且暴雨发生过程中的水汽输送亦能够较好的再现。通过设计剔除台风的敏感性试验发现, 剔除台风韦森特之后降水强度仅为控制试验的 50%。进一步分析表明低纬季风水汽气流通过处于东南沿海的台风韦森特向暴雨区域输送水汽, 在此过程中西南气流直接向北京区域的水汽输送减少, 而西南气流向台风的水汽输送增加, 台风与东侧副热带高压之间的偏南气流向暴雨区的水汽输送明显增强, 从而印证了上述西南季风气流—台风涡旋—暴雨环流三个系统之间水汽的“转运”效应。以上结果表明远距离暴雨的发生是一个复杂的过程, 不仅反映了中低纬度系统的相互作用, 而且揭示出夏季季风水汽流对台风涡旋的水汽输送持续供应也可能是台风远距离异常暴雨发生的关键因素之一。

关键词 台风远距离 暴雨 水汽输送 季风

文章编号 1006-9895(2014)03-0537-14

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13173

Long-Range Moisture Alteration of a Typhoon and Its Impact on Beijing Extreme Rainfall

XU Hongxiong¹, XU Xiangde¹, ZHANG Shengjun¹, and FU Zhikang²

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074

Abstract Extreme rainfall that occurred in Beijing on July 21, 2012, was the most severe rain event of a 61-year history in that region and caused significant damages. National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data shows that interaction among Typhoon Vicente, the subtropical high (SH), and the southwesterly monsoonal flow (SMF) played an important role in this rainfall event. In a process known as the moisture alteration effect of a typhoon, Vicente received moisture from the SMF, which was transported to the Beijing region through the southeasterly flow. To verify this effect, the rainfall event is simulated in this study by using the Weather Research and Forecast (WRF) model with

收稿日期 2013-05-10, 2013-09-09 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划项目 2012BAK10B04, 国家自然科学基金重点项目 41130960, 国家自然科学基金面上项目 41075037, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421504

作者简介 徐洪雄, 男, 1984 年出生, 助理研究员, 主要从事热带气旋与暴雨研究。E-mail: dorn1984@163.com

three nested domains and a finest resolution of 3.33 km. The control experiments effectively reproduce the distribution and intensity of the rainfall and moisture transport. The results of a sensitivity experiment excluding typhoon Vicente, which is conducted to determine its impact on the extreme rainfall, reveals that approximately 50% of the rainfall can be attributed to the storm. Further analyses of column moisture flux from the sensitivity experiment suggest that more moisture was transported to Beijing through southwest flow than from the southeast. This transport from the southwest to typhoon Vicente and then to Beijing disappeared, which corroborates the moisture alteration effect of the typhoon.

Keywords Typhoon remote precipitation, Extreme rainfall, Moisture transport, Monsoonal flow

1 引言

降水尤其是特大暴雨会给人民生命与财产造成巨大损失,而台风涡旋能够引发范围广、强度大的异常降水(Ren et al., 2002; Wang et al., 2008)。大部分台风涡旋通过自身的眼墙以及周边螺旋雨带产生大范围降水,即台风直接降水(Takahashi and Kawano, 1998),然而部分台风涡旋能够引发距离其中心达上千公里区域异常暴雨,即台风远距离降水(Ross and Kurihara, 1995)。人们常常关注台风产生的直接暴雨,而台风远距离诱发的暴雨由于其发生频率较低而被忽视,但是其产生的异常灾害往往超过台风直接产生的暴雨造成的灾害(Wang et al., 2009)。

关于台风远距离降水,陈联寿等(2007)给出了其宏观定义:(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。台风与中纬度环流系统的相互作用对登陆台风暴雨的突然增幅有重要作用,不少著名的特大暴雨中都有台风的间接作用(张经珍等, 2000; 李江南等, 2003; 丛春华等, 2011)。孙建华等(2005, 2013)认为东亚地区台风远距离暴雨大致可分为2类:登陆台风北上与西风槽结合;台风与西风带系统发生远距离相互作用输送水汽到北方。在中低纬度系统相互作用过程中,水汽输送的作用十分明显。蒋尚城等(1981, 1983)指出台风与相距较远的西风槽的相互作用,主要通过台风与太平洋副热带高压之间的东南低空急流来实现。丁治英和陈久康(1995)则揭示了台风中心右侧水汽通道区的水汽输送对8407号台风降水的重要性。朱洪岩等(2000)通过数值研究表明,台风可通过水汽和能量输送直接影响台风远距离降水的分布。西风槽可为远距离降水提供低层辐合、高层辐散、以及槽前正涡度平流的大尺度背景,这将有利于垂直运动的发展和降雨的维持,台风东侧的水汽向中纬度槽前输送可直接影响槽前降水的强度。

以往关于远距离暴雨的研究多集中于台风与暴雨区及其周边中纬度系统之间的相互作用以及台风向暴雨区的水汽输送,而低纬地区环境场中季风水汽流向台风涡旋的水汽输送过程中,对远距离暴雨系统的水汽贡献作用,尤其是低纬系统之间相互作用与特大暴雨的关联仍是值得探讨的难题。本文选取北京“7·21”特大暴雨为个例,重点研究低纬地区夏季季风水汽输送通道、台风涡旋以及暴雨系统三者间的关联机制。

2012年7月21日北京地区遭受了61年以来最严重的暴雨灾害,造成77人丧生以及巨大的财产损失。研究表明这次特大暴雨是一次极端性降水过程,具有持续时间长、雨量大、范围广的特点(谌芸等, 2012; 孙军等, 2012),且北京周边水汽亦有异常现象(赵洋洋等, 2013)。众所周知,充沛的水汽是暴雨发生的关键因素之一,那么北京特大暴雨灾害异常丰富的水汽源在何处?为何有大量的水汽迅速“聚集”在北京上空?与暴雨区相距2000公里以外的台风韦森特对此次异常暴雨是否有影响?盛夏西南季风水汽流与台风涡旋间的相互作用是否亦对北京暴雨有特殊的贡献?为了回答以上问题,本文通过再分析资料水汽源追踪结合数值模拟综合分析了台风韦森特对于此次异常暴雨的影响,重点探讨了北京异常暴雨过程中台风涡旋、季风水汽流与暴雨区水汽源的相互关联特征。

2 资料与方法

2.1 资料

采用 National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/ NCAR) 再分析资料(时间分辨率为6小时,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向从1000 hPa到10 hPa共26层)。

2.2 整层水汽

由于单层的水汽通量无法清楚描述水汽输送三维结构,为了追踪水汽源,本文采用NCAR/NCEP

再分析 $1^\circ \times 1^\circ$ 资料, 分析陆面或海面到 300 hPa 高度整层大气的水汽及其输送特征。整层纬向水汽输送 Q_λ 和经向水汽输送 Q_ϕ 的计算方法如下:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300} uq dp, \quad (1)$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300} vq dp, \quad (2)$$

其中, u 、 v 分别为纬向风和经向风分量, q 是比湿, p_s 是地面气压。

2.3 整层水汽相关矢量

为进一步认识台风远距离输送引发暴雨过程, 本文采用相关矢量方法, 以追踪北京周边地区水汽源, 相关矢量数学模型如下:

$$\mathbf{R}(x, y) = R_x(x, y)\mathbf{i} + R_y(x, y)\mathbf{j}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为追踪区域整层水汽与 Q_λ 与 Q_ϕ 分量的相关合成矢量, R_x 、 R_y 分别为整层水汽与 Q_λ 、 Q_ϕ 分量相关场。

3 天气形势

图 1 为 7 月 21 日 24 小时累积降水。此次暴雨过程中, 全市平均降雨量 170 mm, 86% 地区降水量达 100 mm 以上, 房山、城近郊区、平谷和顺义平均雨量均在 200 mm 以上, 其中房山最大值达到 460 mm。分析形势场 (图 2) 发现, 副高西伸北进, 并与台风韦森特的靠近共同作用, 使副高系统与台风涡旋之间的对流层低层呈较强偏东气流, 且在暴雨区西南方向亦存在从孟加拉湾至北京区域的偏南气流。西南季风气流、台风涡旋、副热带高压等系统共同作用下导致北京及其周边地区上空的水汽量存在极端性特征 (图 3), 为异常暴雨发生提供有利条件, 并与中纬度高空槽的相互作用下, 在北京及其周边地区造成极强的对流不稳定条件, 配合地面辐合线、地形以及 MCS 等多种因素共同触发了这次特大降水的发生 (俞小鼎, 2012)。

4 水汽输送

综合分析表明, 在暴雨发生期间, 北京与其周边区域的水汽供应主要来自两条水汽输送通道。在暴雨发生前期水汽主要来自孟加拉湾的西南水汽向北的输送通道 (图 4a); 暴雨发生中后期韦森特台风与其东侧副高之间的偏南气流则是向异常暴雨区输送水汽的另一支重要通道。西南季风强盛时

往往形成一股进入台风的低空急流, 向台风输送充足的水汽 (陶诗言, 1980)。在本次暴雨过程中, 随着位于台湾南部的台风韦森特向西移动, 且伴随着季风与台风涡旋之间的相互作用加强过程, 以及暴雨区高空槽的东移等背景因素 (图 4b), 一方面由台风韦森特向降水区域的水汽输送通道得到加强, 另一方面自孟加拉湾向华北的西南水汽输送有所减弱 (图 4c、d), 而季风水汽流向台风涡旋的水汽输送通道得到加强。图 5 为 (2012 年 7 月 12 日至 22 日) 北京 7·21 异常暴雨前期强水汽输送区域 (图 4 中矩形区域) 整层水汽与整层水汽输送通量相关矢量。图 5 亦描述出了上述两条水汽输送通道特征及其演变过程。

俞小鼎 (2012) 指出虽然此次暴雨天气形势属于典型的高空槽伴冷锋的强降水型配置, 但这样有利的流型配置并不意味着如此极端的降水, 因此台风韦森特是否对此次暴雨有重要的作用是值得研究的重要问题。Xu et al. (2011) 通过研究双台风相互作用发现在主体水汽流的作用下, 其中一个台风能够通过强水汽输送通道 (作为双台风相互作用的判据被命名为“连体”通道) 将水汽输送至另一台风。而本次暴雨发生过程中, 台风韦森特水汽源主要来自季风的水汽输送, 在台风自身得到发展的同时, 是否能够产生双台风相互作用过程中相似的“转运”效应, 将一部分水汽“转运”至暴雨产生地区?

5 模拟结果

为了定量研究台风韦森特对于水汽输送以及暴雨的影响效应, 本文使用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式对此次暴雨过程进行模拟, 模拟时间为 2012 年 7 月 20 日 00 时~7 月 22 日 00 时 (协调世界时, 下同), 使用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction, 2000) /GDAS (Global Data Assimilation System) FNL (Final) 分析资料作为模式初始场与侧边界。网格选取三重嵌套 (30/10/3.3 km), 区域中心为 (30°N, 116.5°E), 水平格点数分别为 375×246 、 238×160 、 394×286 , 垂直分层为 28 层, 模式顶为 50 hPa, 时间步长为 60 s, 输出时间间隔为 1 小时。长波辐射和短波辐射均分别采用 RRTM 方案 (Mlawer et al., 1997)、Dudhia 方案 (Dudhia, 1989), 微物理过程采用 WSM5 方案 (Hong and Lim, 2006), 积云对流方案采用

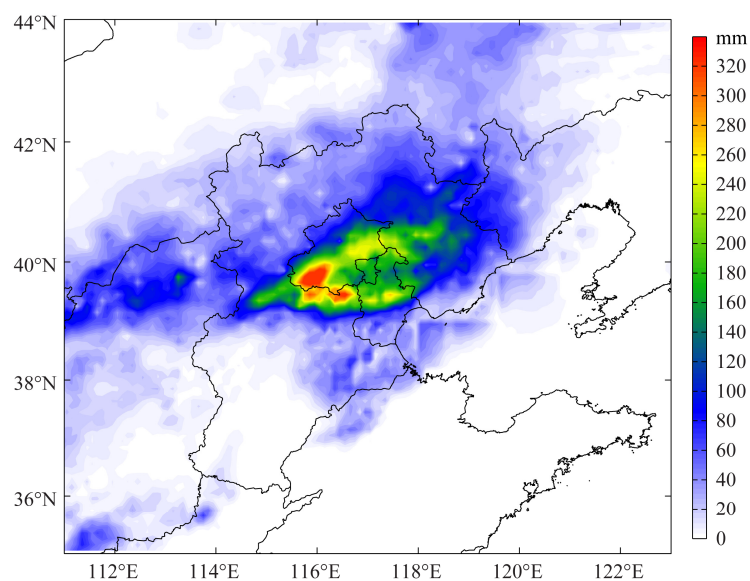


图1 2012年7月21日观测24小时累积降水(单位: mm)

Fig. 1 Observed 24-h accumulated rainfall distribution from 0000 UTC 21 to 0000 UTC 22 Jul 2012

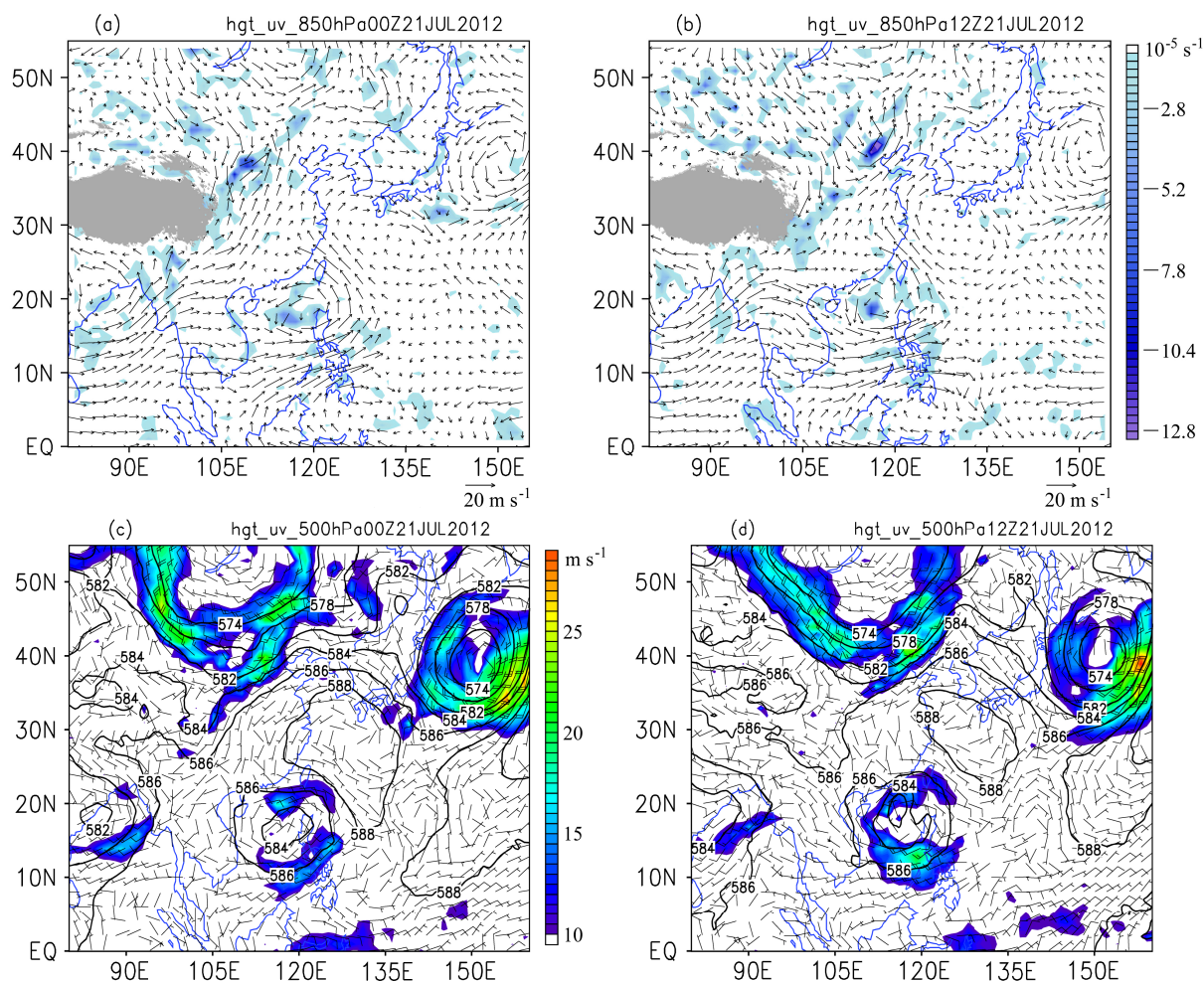


图2 2012年7月21日00时 (a) 700 hPa 风场以及850 hPa 散度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}), (c) 500 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm)、风场以及风速(阴影, 大于 10 m s^{-1}), 灰色阴影为高原区域; (b)、(d) 同 (a)、(c), 但为2012年7月21日12时

Fig. 2 (a) 700-hPa wind (vector) and 850-hPa divergence (color-shaded), (c) 500-hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), wind (vector), and wind velocity (color shading, greater than 10 m s^{-1}) at 0000 UTC on 21 Jul 2012, the grey shaded regions denote Tibetan Plateau in (a); (b), (d) same as (a), (c), but for 1200 UTC on 21 Jul 2012

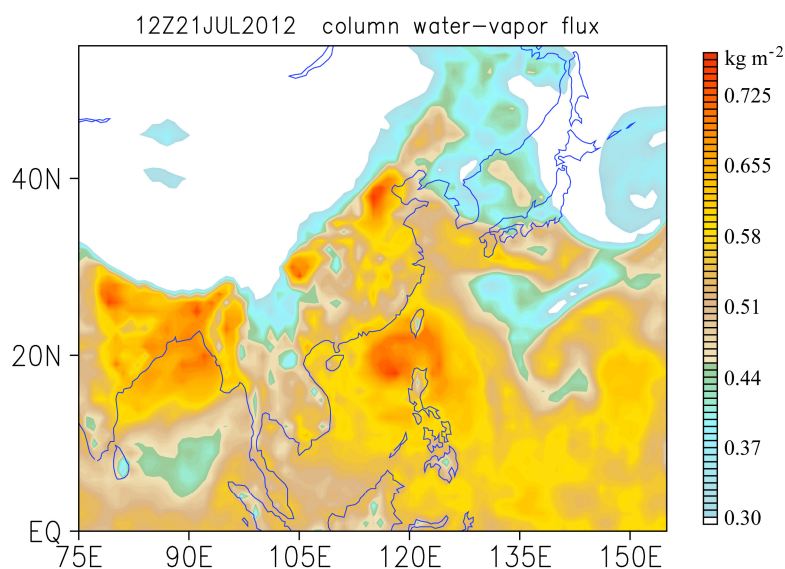


图3 NCEP FNL 资料计算得到 2012 年 7 月 21 日 12 时整层水汽含量 (单位: kg m^{-2})

Fig. 3 Column moisture content (unit: kg m^{-2}) calculated from the NCEP FNL data at 0000 UTC on 21 Jul 2012

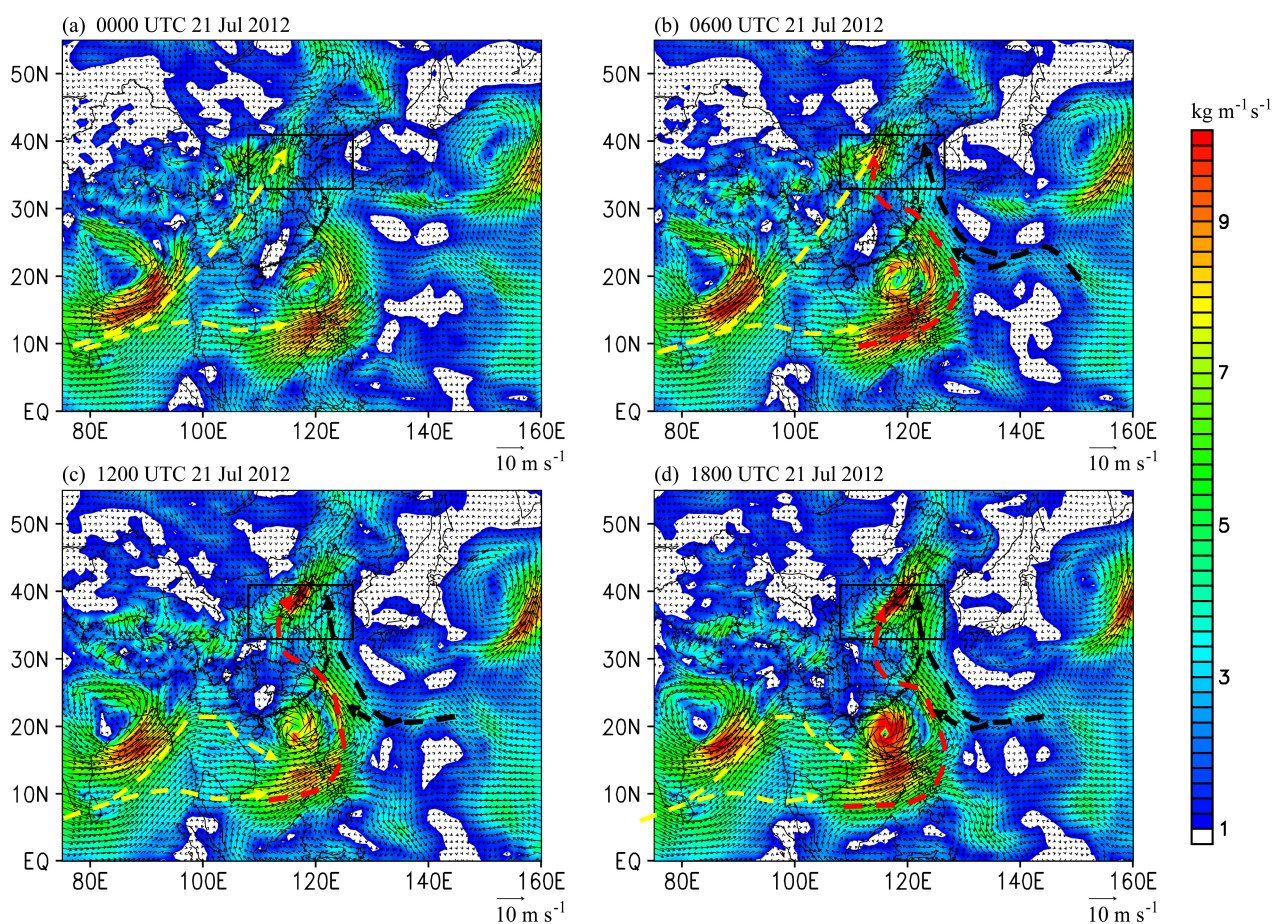


图4 NCEP FNL 资料计算整层水汽通量 (矢量) 以及通量值 (阴影, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (a-d) 分别为 2012 年 7 月 21 日 00 时至 18 时 6 小时间隔。黄色虚线箭头为自孟加拉湾西南水汽通道, 红色为台风韦森特水汽通道, 黑色为东南水汽通道

Fig. 4 Column moisture flux (vectors) and their magnitudes (color shading, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) with 6-h interval calculated from the NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data for 0000 UTC–1800 UTC 21 Jul 2012, the dashed arrows denote monsoon (yellow), typhoon Vicente (red), and southeast (black) moisture transport channels

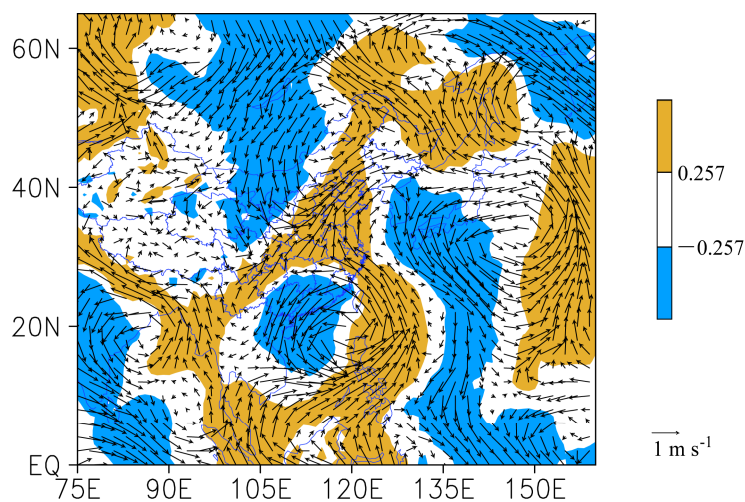


图5 河北及其周边区域整层水汽含量与整层水汽通量相关矢量，阴影为纬向相关系数超过90%信度区域

Fig. 5 Correlation vector field between the averaged column moisture content and vertically integrated moisture fluxes around Hebei Province and its peripheral areas in the period from 12 to 22 July 2012, regions of zonal correlation coefficient ($\geq 90\%$ confidence) are shaded

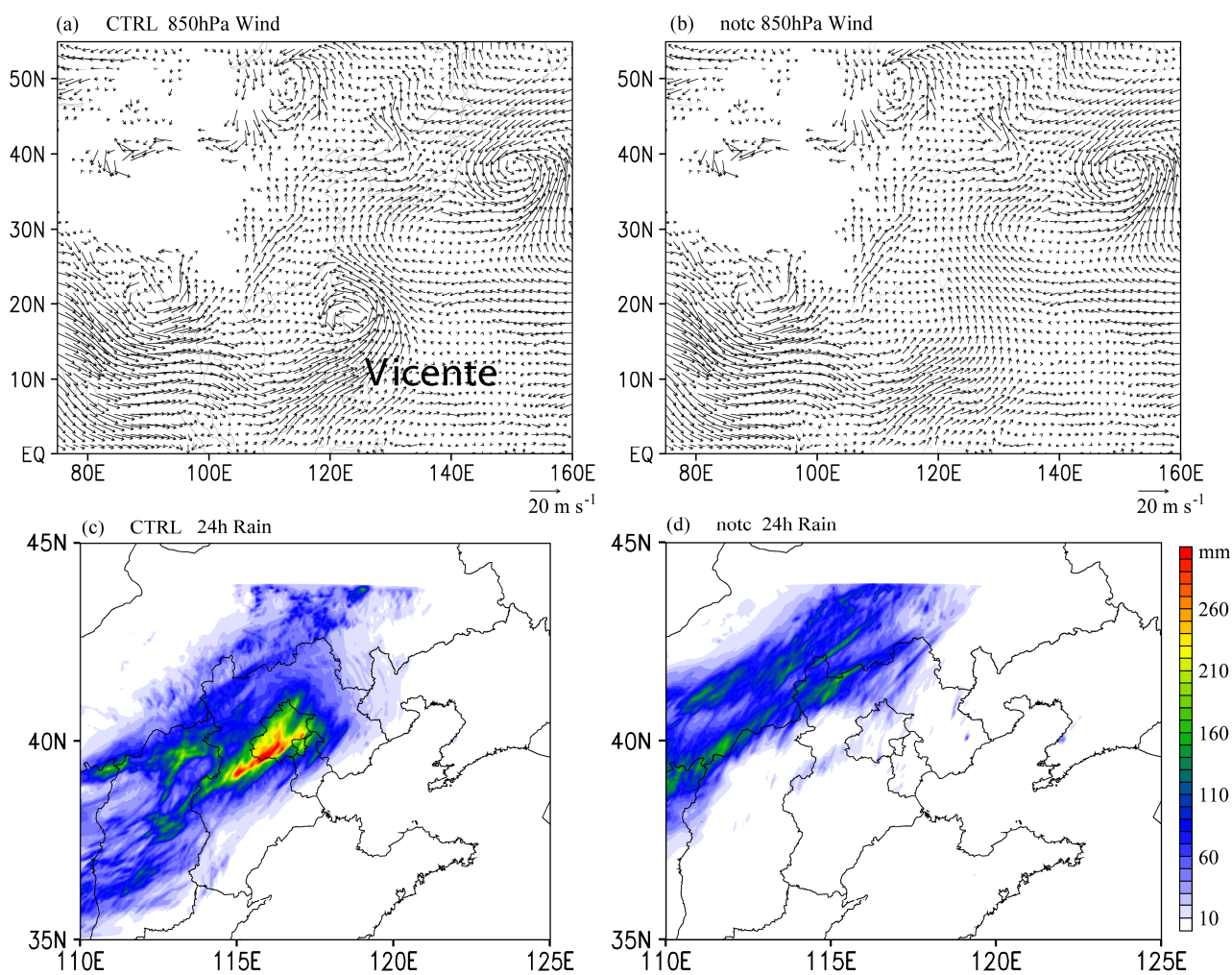


图6 (a) 控制试验初始场 850 hPa 风场, (c) 2012 年 7 月 21 日控制试验模拟 24 小时累积降水; (b)、(d) 与 (a)、(c) 相同但是为剔除台风韦森特试验

Fig. 6 (a) Initial 850-hPa wind and (c) simulated 24-h accumulated rainfall distributions during 0000 UTC 21–0000 UTC 22 Jul 2012 in the CTRL (Control) run; (b), (d) same as (a), (c), but for NOTC (No typhoon Vicente) run

Kain-Fritsch 对流参数化方案 (Kain, 1993; Kain and Fritsch, 2004), 且仅对 30 km、10 km 网格使用, 而 3.3 km 网格则不使用积云对流参数化, 需要指出的是虽然 10 km 与积云本身的尺度接近, 但是根据一些暴雨的研究 (Hong and Lee, 2009; Zhang and Zhang, 2011), 在 10 km 的分辨率使用积云对流参数化能够有较好的模拟, 因此本文在 10 km 的网格仍使用积云对流参数化方案。为了分析台风韦森特对季风以及偏东气流的水汽输送的影响, 本文在控制试验的基础上采用 WRF-TC 模块 (Fredrick et al., 2010) 剔除台风韦森特 (敏感性试验: NOTC)。

图 6c 为控制试验模拟 2012 年 7 月 21 日 24 小时累积降水, 与观测 (图 1) 对比表明, 控制试验模拟雨带的位置、走向与实况基本一致, 尤其是能够表现出由于线状中尺度对流系统引起的线性降水分布 (Zhang et al., 2013), 并且准确模拟出强降水中心。另一方面此次模拟结果亦能较好的模拟出降水强度, 北京地区最大降水达到 320 mm 与观测较为接近。总体上, 控制试验对此次异常暴雨的模拟比较成功, 降水分布与强度都与观测基本一致, 因此下面将利用控制试验模拟结果结合剔除台风韦森特的敏感性试验探讨台风韦森特对于北京 7·21 异常暴雨以及在此过程中水汽输送的影响。

图 6a、b 为控制试验与剔除台风试验模式初始场 850 hPa 风场, 控制试验 (图 6a) 中的韦森特台风涡旋明显存在于台湾以南菲律宾以东区域, 而在剔除台风的敏感性试验中韦森特台风则完全消失 (图 6b)。进一步对比控制试验与剔除台风试验降水发现, 剔除韦森特台风之后, 雨带明显发生变化, 其位置与控制试验相比明显向北移动, 降水强度亦大幅度减弱, 降水最大值约为 150 mm, 与控制试验相比减少达 50%, 这表明台风韦森特对于北京 7·21 异常暴雨的发生有显著的作用。

图 7 为控制试验模拟的整层水汽输送通量, 与 NCEP FNL 再分析资料计算 (图 2) 对比发现, 控制试验模拟的整层水汽通量亦存在三个阶段: 第一个阶段华北及其周边地区水汽主要来自孟加拉湾西南水汽通道 (图 7a, 黄色虚线); 第二个阶段随着台风韦森特的靠近以及西风槽的东移, 台风韦森特 (红色虚线) 与东南气流 (黑色虚线) 组成的水汽通道亦开始向暴雨区域输送水汽 (图 7c)。在此阶段中随着韦森特、西风槽继续相互靠近, 西南气流向北的水汽输送开始减弱, 而来自韦森特以及东

南气流的水汽通道得到增强 (图 7d); 到第三阶段, 西南气流向暴雨区水汽输送通道基本上消失, 华北及其周边地区的水汽主要来自台风韦森特与东南气流组成的水汽输送通道 (图 7e)。以上对控制试验的水汽场分析表明模式在水汽分布以及暴雨区的水汽源时间演变都有较好模拟, 因此下面结合敏感性试验进一步分析, 以探究台风韦森特对于暴雨区水汽源的影响。

图 8 为剔除台风韦森特敏感性试验的整层水汽通量, 与控制试验相比, 水汽通道发生明显的变化。环境中持续存在两支向北的水汽输送通道, 一支为孟加拉湾西南水汽输送通道, 在暴雨发生期间一直存在, 且有一定程度上的增强。另一支为东南水汽输送通道, 其位置与强度在整个暴雨发生过程中并没有发生太大的变化。随着西风槽的东移, 西南水汽输送通道亦向东偏移, 在西南、东南两支水汽流汇合时, 亦能够形成强水汽输送区域, 但强度明显弱于控制试验, 位置与控制试验相比也相对偏北, 而这也可能是造成上述敏感性试验雨带偏北的原因之一。

进一步分析模式模拟的水汽通道发现, 在控制试验中孟加拉湾的水汽通道分为两支, 一支为上述西南—东北走向水汽输送通道, 另一支为由西向东向韦森特台风涡旋输送水汽的通道。当韦森特台风存在时, 西南—东北走向的水汽输送通道逐步减弱, 最后消失, 自西向东的水汽输送通道会得到加强, 这过程亦揭示出台风与环境场的相互作用及其对水汽输送结构的影响, 在此过程会生成从台风向暴雨区域的水汽输送通道。而当台风不存在或者台风距离较远时, 这两支水汽会一直保持, 西南—东北走向的水汽输送通道甚至会有所加强。以上分析印证了韦森特台风涡旋对季风水汽流“转运”作用的假设, 即通过西南水汽输送通道向华北及其周边区域输送的水汽由于台风韦森特的靠近, 转而向台风输送, 导致了西南—东北水汽输送通道的减弱以及消失, 产生了西南气流向台风韦森特, 并“转运”至暴雨区域的新的水汽输送通道, 进而影响异常暴雨的产生。许多研究 (濮梅娟等, 1989; 赵平和孙淑清, 1991; 陈栋等, 2007) 表明西南地区复杂地形对水汽输送具有很强的阻挡作用, 而通过沿海台风“转运”作用自东南向华北的水汽输送由于“西高东低”大地形特征, “相对平坦”地区上空的水汽通道有利于水汽向北的输送为北方

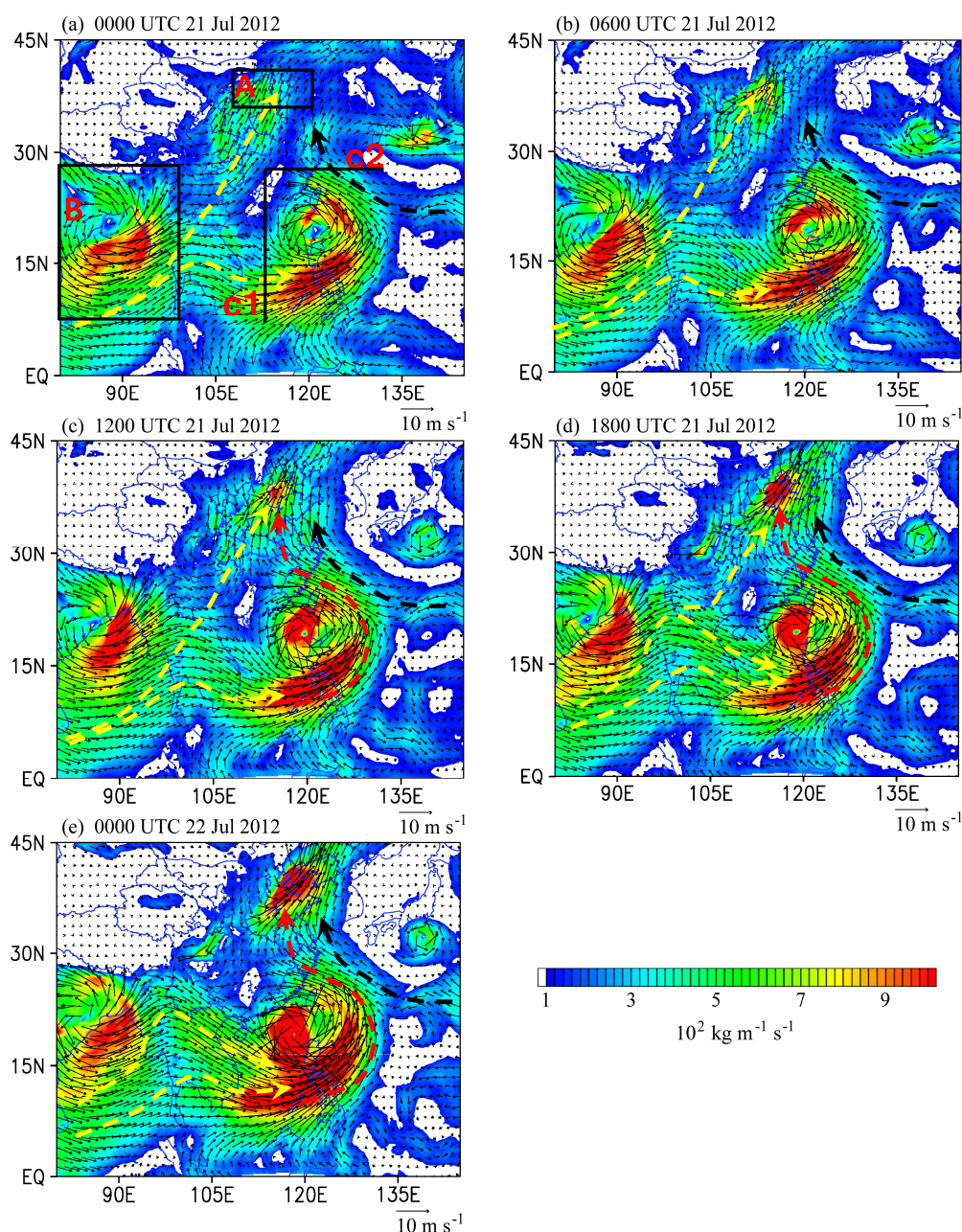


图7 控制试验整层水汽通量(矢量)以及通量值(阴影, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (a-e) 分别为2012年7月21日00时至2012年7月22日00时6小时时间隔时刻。黄色虚线箭头为自季风水汽通道, 红色为台风韦森特水汽通道, 黑色为东南水汽通道; 图7a中A区域为暴雨区, B区域为季风区, C1、C2分别为台风韦森特的西边界与北边界

Fig. 7 CTRL simulated column moisture fluxes (vectors) and their magnitudes (color shading, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) with 6-h intervals during (a-e) 0000 UTC 21–0000 UTC 22 Jul 2012. The dashed arrows denote monsoon (yellow), typhoon Vicente (red), and southeast (black) moisture transport channels; A, B, C1 and C2 illustrate the extreme rainfall area, monsoon area, and western and northern boundaries of typhoon Vicente

暴雨提供了更有利的降水条件。下面将进一步分析“转运”效应对于水汽收支及其引起暴雨区的水汽辐合和垂直结构的影响。

对比控制试验与敏感性发现相关区域水汽收支(图9)发现:(1)季风区域(图7a中B区)水汽支出大量增加(水汽支出从78.7增加至211.3

$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); (2)台风西边界(图7a中C1)、南边界的水汽通量增加, 这表明台风韦森特的存在使季风水汽流从台风西边界的水汽以及台风向暴雨区的远距离水汽输送加强; (3)暴雨区的水汽收入从156.5增加至208.3 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。在西南季风与台风相互作用过程中, 往往有一股低空急流进入台风, 向

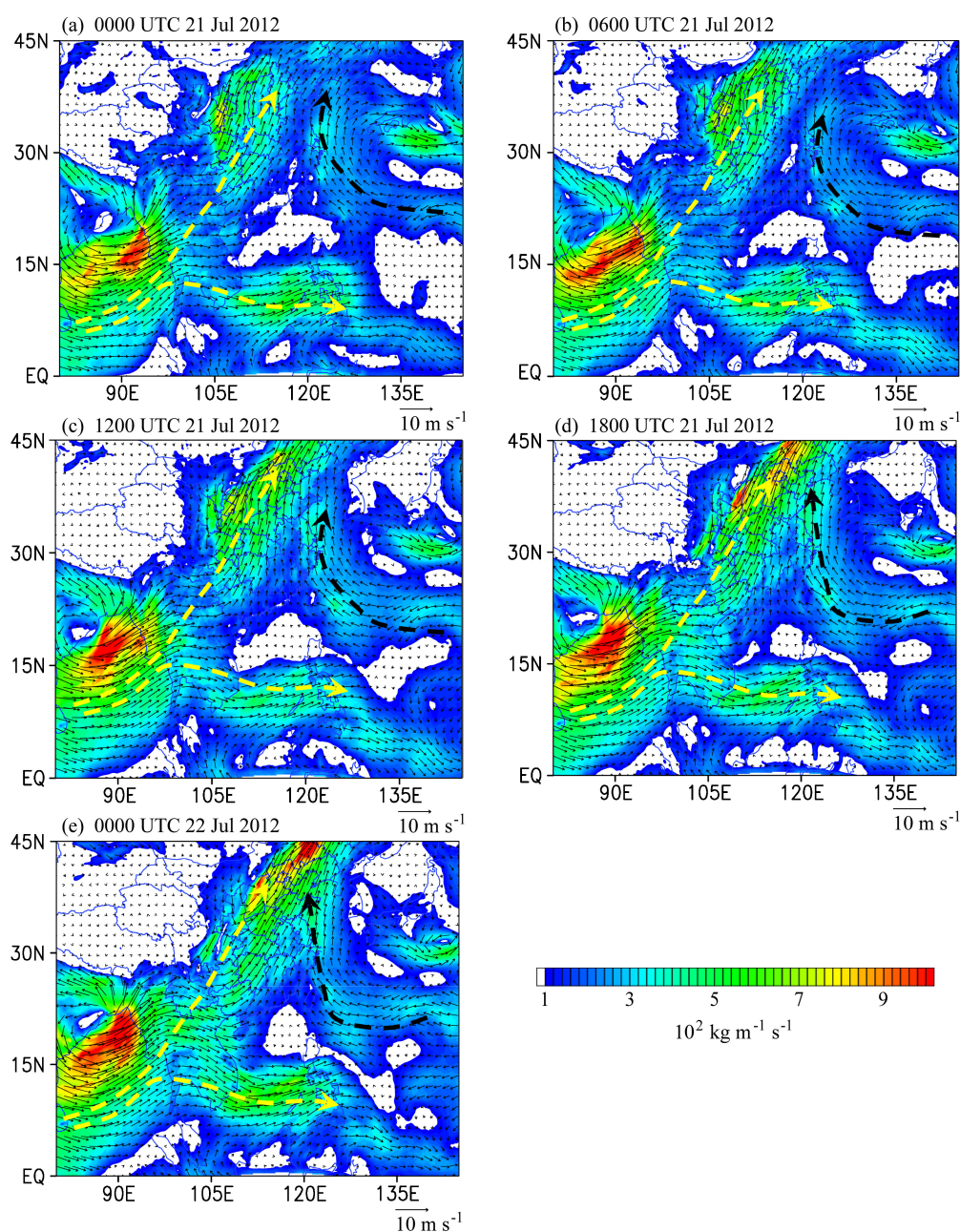


图8 与图7相同,但是为剔除台风韦森特试验

Fig. 8 The same as Fig. 7, but for NOTC experiment

台风输送充足的水汽(陶诗言, 1980)。此次过程中台风韦森特与季风“波流”相互作用, 加大了西侧季风向台风的水汽输送, 同时其北侧台风向暴雨区的水汽输送亦得到加强, 最终导致了暴雨区的正水汽收支增加。

图10为21日12时模拟整层水汽通量散度, 在控制试验中(图10a)北京与河北区域有一条类似“线状”的降水强整层水汽辐合区, 其最大值处于北京南部与河北交界处。而在剔除台风试验中(图10b), 在北京与河北区域“线状”强水汽辐合区消

失。进一步分析20日12时至22日00时经向平均整层水汽散度分布(图11)表明, 20日06时控制试验中呈现为一条宽度约为2个纬度的整层水汽辐合带, 20日06时至20日12时整层水汽强辐合带向南扩展至38°N, 向北扩展至约41.6°N, 宽度约达3.6个纬度。21日12时至22日00时整层水汽辐合带向北移动且宽度略有扩大。在此过程中控制试验的整层水汽辐合带在21日18时附近纬度39°~40°N之间形成一个极值, 其值超过 $5.7 \times 10^{-5} \text{ gm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。而剔除了韦森特台风的敏感性试验中这条

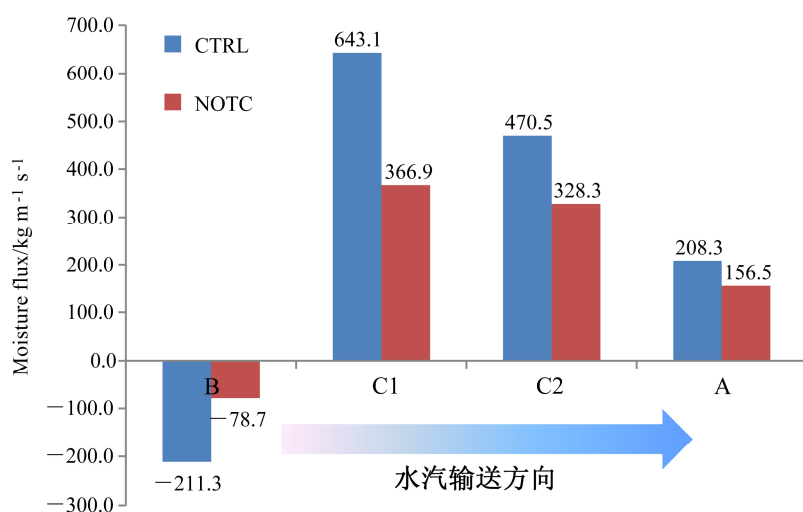


图 9 2012 年 7 月 21 日平均整层水汽收支 (A 对应图 7a 中 A 区暴雨区、B 对应图 7a 中 B 区季风区) 以及台风区西边界 (C1 对应图 7a 中 C1)、北边界 (C2 对应图 7a 中 C2) 的整层水汽通量值

Fig. 9 The daily average column moisture budget in heavy rainfall region (A) and monsoon region (B), and total moisture fluxes on western (C1) and northern (C2) boundaries (showing in Fig.7a) on 21 Jul 2012

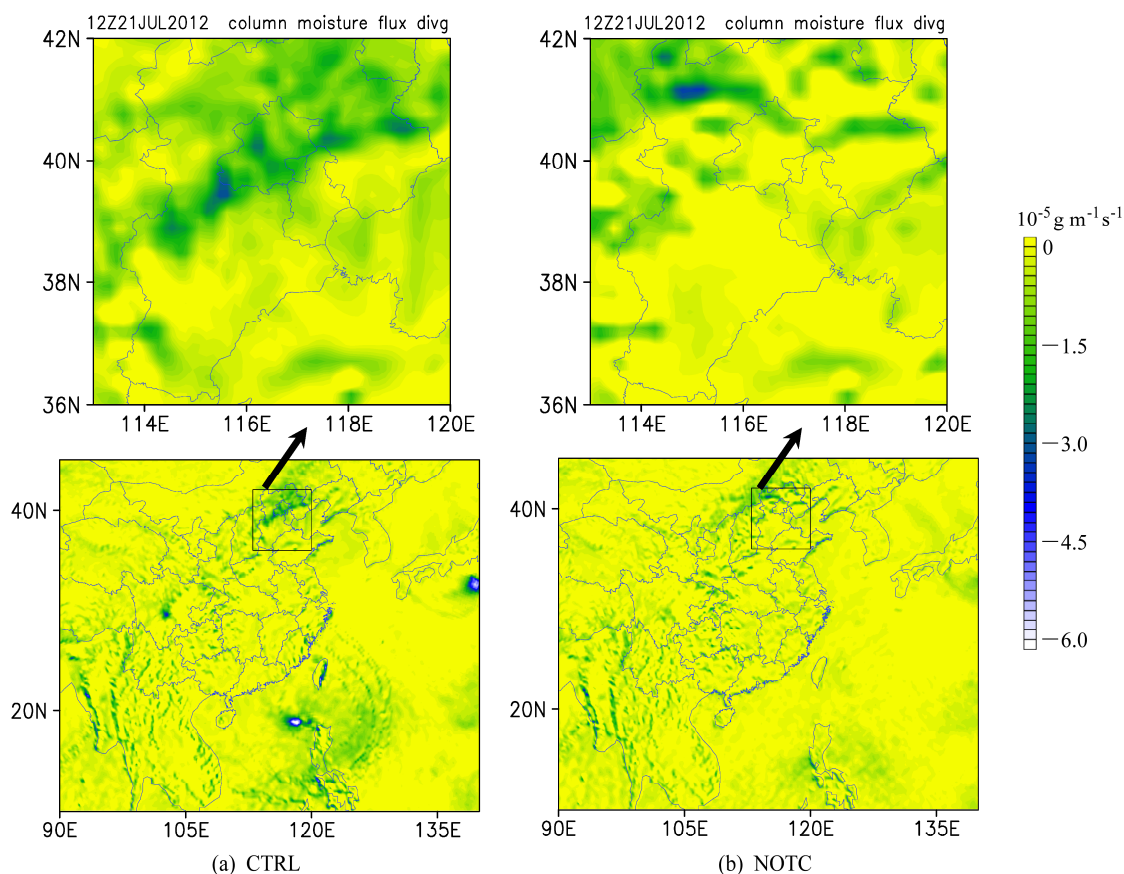


图 10 模式模拟 2012 年 7 月 21 日 12 时整层水汽通量散度 (单位: $10^{-5} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1}$): (a) 控制试验; (b) 剔除台风韦森特试验

Fig. 10 Column moisture flux divergence (unit: $10^{-5} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) at 1200 UTC on 21 Jul 2012: (a) CTRL; (b) NOTC experiment

强辐合带宽度明显减小在暴雨发生期间始终保持 1 个纬度的宽度, 最大也仅扩展至 2 个纬度。在此过程中亦没有呈现控制试验中的极值区, 最大不超过 $2.7 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。以上相关区域的水汽收支以及整

层水汽散度的分析表明上述台风韦森特“转运”作用对于北京“7·21”暴雨区域的水汽辐合亦有重要作用。

合适的高、低空系统配置, 有利于降水天气

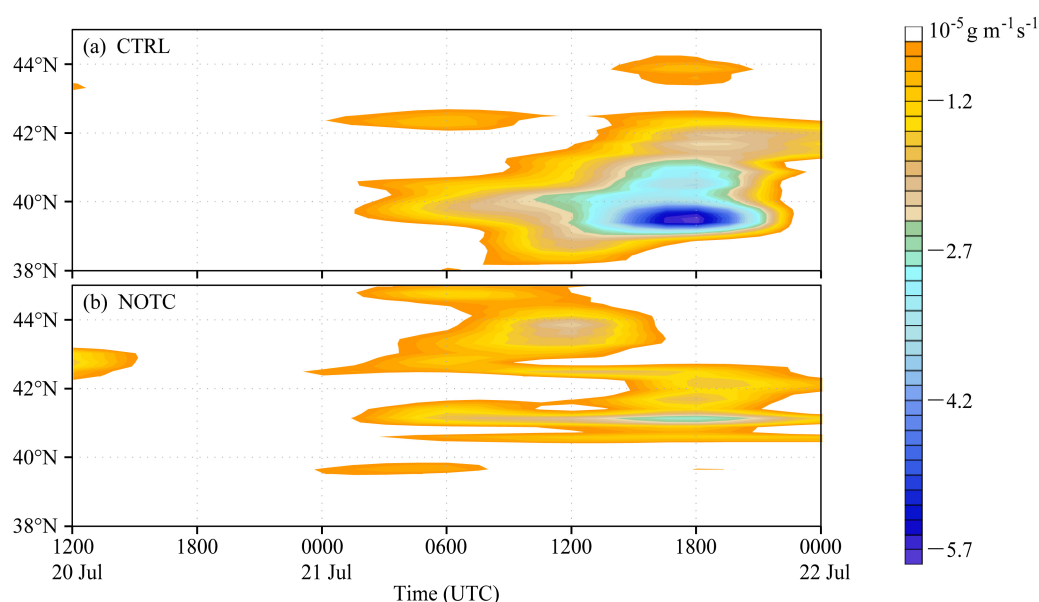


图 11 模拟 2012 年 7 月 20 日 12 时至 22 日 00 时纬向平均 ($115^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 整层水汽通量散度分布: (a) 控制试验; (b) 敏感性试验

Fig. 11 Temporal variation of simulated column moisture flux divergence averaged over $115^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ from 1200 UTC 20 to 0000 UTC 22 Jul 2012: (a) CTRL; (b) NOTC experiment

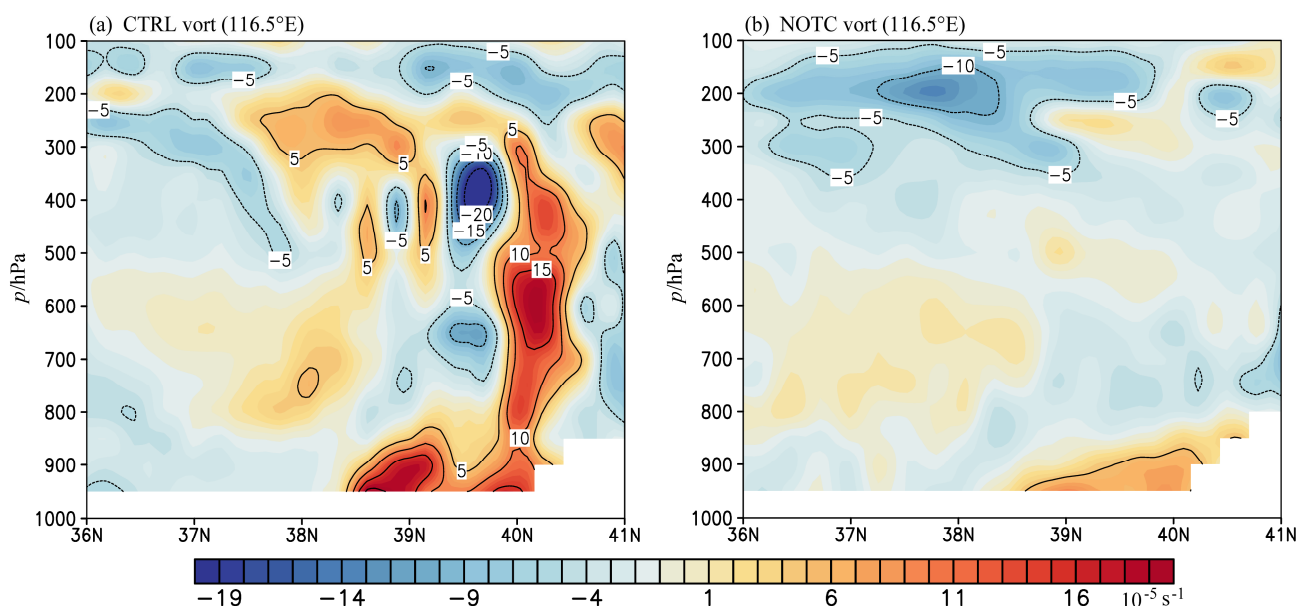


图 12 2012 年 7 月 21 日 12 时模拟涡度沿 116.5°E 剖面: (a) 控制试验; (b) 敏感性试验

Fig. 12 The cross sections of simulated vorticity along 116.5°E at 1200 UTC on 21 Jul 2012: (a) CTRL; (b) NOTC experiment

的发生、发展与持续 (秦华锋和金荣花, 2008), 对控制试验中的涡度剖面分析表明 (图 12a), 在北京南部有一个强涡度中心存在于地面至 800 hPa (最大值超过 $15\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$), 在北京上空则存在一个从地面延伸至中空涡度柱, 且在 500~300 hPa 存在负涡度中心。对应散度垂直结构亦存在有利于暴雨发生的配置, 北京以南存在一个强辐合中心, 而在北京上空存在沿着地形从地面延伸至 400 hPa 倾斜的辐合与中空辐散的一对“耦合”带 (图 13a)。在

剔除韦森特台风的敏感性试验中以上有利于暴雨发生的高、低空配置都已消失 (图 12b、图 13b), 表明韦森特台风“转运”效应不仅影响着暴雨区水汽辐合, 而且对于暴雨区高、低空流场动力结构的配置亦能够产生明显变化。

6 结论

2012 年 7 月 21 日台风韦森特的远距离作用是造成北京“7·21”的重要原因之一。本文利用 NCEP

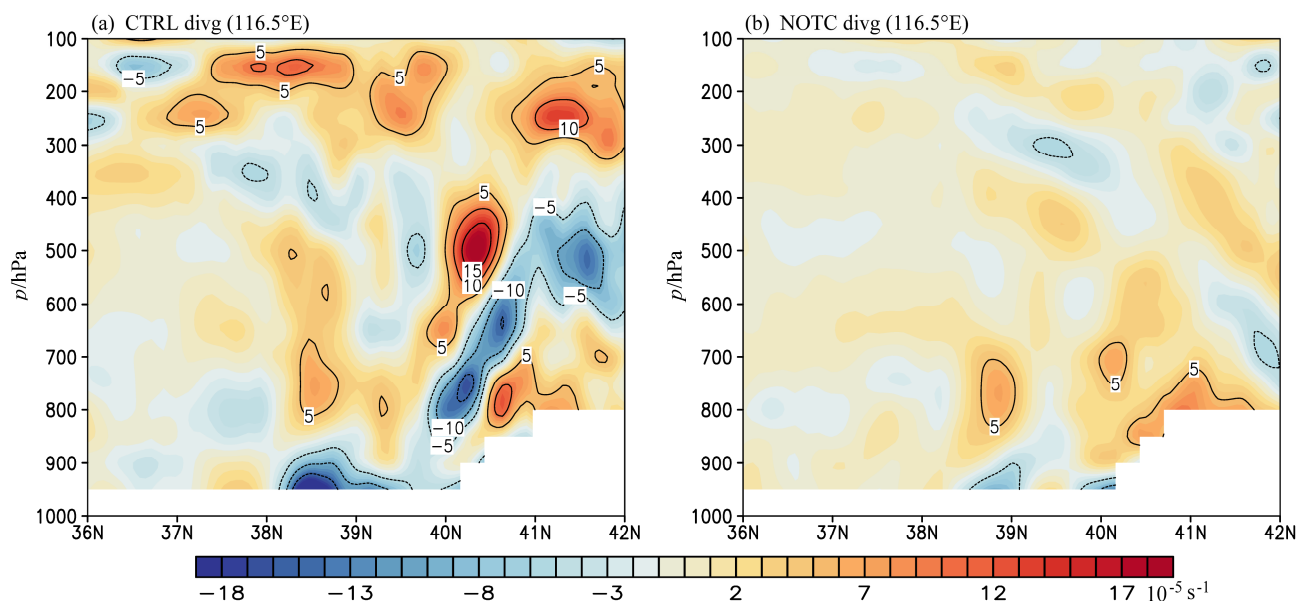


图 13 与图 12 相同, 但是为散度

Fig. 13 The same as Fig. 12, but for divergence

再分析资料以及 WRF 模式对北京异常暴雨的水汽源进行综合分析, 初步得出以下结论:

(1) 暴雨区水汽输送存在三个阶段特征: 第一个阶段, 华北及其周边地区水汽主要来自孟加拉湾西南水汽通道; 第二个阶段, 上述水汽通道与韦森特台风涡旋偏南水汽流共同构成的两支向暴雨区域输送水汽的水汽通道。在此阶段中随着韦森特、西风槽继续相互靠近, 西南气流开始减弱, 而来自韦森特以及东南气流的水汽通道得到增强; 第三阶段, 华北及其周边地区的水汽主要来自台风韦森特涡旋与东南气流组成的水汽输送通道。

(2) 通过以上三个阶段水汽通道的分析发现, 远距离台风在北京异常暴雨过程中的水汽输送起到了“转运”的“枢纽”作用。一方面韦森特台风涡旋与西南季风水气流相互作用, 导致西南气流转而向台风韦森特输送水汽; 另一方面台风韦森特的存在会加强台风与西太平洋副热带高压之间的偏南水汽输送。在此过程中台风分别与季风、中纬度系统产生相互作用。台风涡旋与季风水气流的相互作用加强了低纬向暴雨区域的水汽输送能力。因此我们将此水汽输送过程称为台风韦森特的“转运”效应。

(3) 为了印证台风韦森特的“转运”效应, 本文利用 WRF 模式进行数值模拟与剔除台风敏感性试验, 结果表明控制试验能够较为准确的模拟出此次异常降水的分布以及强度; 且其结果亦能够较好

的再现整个暴雨过程的水汽输送各阶段。利用剔除韦森特台风的敏感性试验对上述“转运”效应进行验证。结果表明剔除台风韦森特敏感性试验中, 西南气流向华北区域的水汽输送加强, 且副高西部的偏南气流由于缺少“转运”机制的支持而减弱, 从而验证台风韦森特对西南季风气流的“转运”作用。

(4) 对暴雨区的进一步分析表明, 台风韦森特的存在及其产生的“转运”效应, 其强水汽流亦为暴雨强水汽辐合结构提供持续支持, 并为暴雨系统高空辐散、低空辐合以及涡度结构构建了有利动力、热力条件, 对比分析亦发现剔除台风韦森特以后暴雨强度减少达 50%。

最后需要指出的是, “7·21”北京暴雨过程是高低空、中低纬系统共同作用的结果, 是在“东高西低”的环流形势下, 低涡、切变线、低槽冷锋和低空急流等复杂天气系统相互配合下形成的(孙建华等, 2013)。而本文所研究的台风韦森特对西南季风水汽的“转运”效应则是暴雨发生的一个重要环节之一。

参考文献 (References)

- 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 2007. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用 [J]. 大气科学, 31 (2): 185–201. Chen Dong, Li Yueqing, Huang Ronghui. 2007. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern

- background of large-scale circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 185–201.
- 陈联寿. 2007. 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, 3–7. Chen Lianshou. 2007. The studies and predictions of heavy rainfall related to the landing tropical cyclones [C]// The Abstracts of Papers on the Fourteenth Symposium on the Tropical Cyclones (in Chinese), 3–7.
- 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考 [J]. 气象, 38 (10): 1255–1266. Chen Yun, Sun Jun, Xu Jun, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part I: Observation and thinking [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (10): 1255–1266.
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 2011. 台风远距离暴雨的研究进展 [J]. 热带气象学报, 27 (2): 264–270. Cong Chunhua, Chen Lianshou, Lei Xiaotu, et al. 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27 (2): 264–270.
- 丁治英, 陈久康. 1995. 台风暴雨与环境水汽场的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 18 (1): 33–38. Ding Zhiying, Chen Jiukang. 1995. Numerical simulation of typhoon rainstorm in relation to its environmental vapor regime [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18 (1): 33–38.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107.
- Fredrick S, Davis C, Gill D, et al. 2010. Bogussing of Tropical Cyclones in WRF Version 3.1 [M]. Colorado: Nam National Center for Atmospheric Research Boulder.
- 濮梅娟, 刘富明, 沈如金. 1989. 一次夏季西南低涡形成机理的数值试验 [J]. 高原气象, 8 (4): 321–330. Fu Meijuan, Liu Fuming, Shen Rujin. 1989. Numerical experiment on the formation mechanism of a SW vortex in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 8 (4): 321–330.
- Hong S J, Lim J W. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. J. Korean Meteor. Soc., 42 (2): 129–151.
- Hong S Y, Lee J W. 2009. Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea [J]. Atmospheric Research, 93 (4): 818–831.
- 蒋尚城, 张镔, 周鸣盛, 等. 1981. 登陆北上减弱的台风所导致的暴雨——半热带系统暴雨 [J]. 气象学报, 39 (1): 18–27. Jiang Shangcheng, Zhang Tan, Zhou Mingsheng, et al. 1981. The hard rainstorms in North China induced by a landed northward moving and decaying typhoon—Hard rainstorms of semi-tropical systems [J]. Acta Meteorologica Sinica, 39 (1): 18–27.
- 蒋尚城. 1983. 远距离台风影响西风带特大暴雨的过程模式 [J]. 气象学报, 41 (2): 147–158. Jiang Shangcheng. 1983. A synoptic model of the hard rainstorm in westerly belt affected by the far distant typhoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 41 (2): 147–158.
- Kain J S. 2004. The kain-fritsch convective parameterization: An update [J]. J. Appl. Meteor., 43 (1): 170–181.
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme [C]// The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Amer. Meteor. Soc., 165–170.
- 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 (S1): 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 (S1): 152–159.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16663–16682.
- National Centers for Environmental Prediction, N. W. S., NOAA, U. S. Department of Commerce, 2000. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999 [C]// Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Boulder, CO.
- 秦华锋, 金荣花. 2008. “0703” 东北暴雪成因的数值模拟研究 [J]. 气象, 34 (4): 30–38. Qin Huafeng, Jin Ronghua. 2008. Numerical simulation study of the cause of snowstorm process in northeast of China on March 3–5 of 2007 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (4): 30–38.
- Ren F M, Gleason B, Easterling D. 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957–1996 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (5): 943–952.
- Ross R J, Kurihara Y. 1995. A numerical study on influences of Hurricane Gloria (1985) on the environment [J]. Mon. Wea. Rev., 123 (2): 332–346.
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 492–506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 492–506.
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. 大气科学, 37 (3): 705–718. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 705–718.
- 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) 极端性降水成因初探及思考 [J]. 气象, 38 (10): 1267–1277. Sun Jun, Chen Yun, Yang Shu'nan, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part II: Preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (10): 1267–1277.
- Takahashi T, Kawano T. 1998. Numerical sensitivity study of rainband precipitation and evolution [J]. J. Atmos. Sci., 55 (1): 57–87.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1–225. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–225.
- Wang Y M, Ren F M, Li W J, et al. 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 14 (2): 125–128.
- Wang Y Q, Wang Y Q, Fudeyasu H. 2009. The role of typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan [J]. Mon. Wea. Rev., 137 (11): 3699–3716.
- Xu X D, Lu C, Xu H X, et al. 2011. A possible mechanism responsible for exceptional rainfall over Taiwan from typhoon Morakot [J]. Atmos. Sci. Lett., 12 (3): 294–299.

- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析 [J]. 气象, 38 (11): 1313–1329. Yu Xiaoding. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (11): 1313–1329.
- Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, et al. 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “Right Results” but for wrong reasons [J]. Geophys. Res. Lett., 40 (7): 1426–1431.
- 张经珍, 侯淑梅, 张洪卫, 等. 2000. 中低纬度系统相互作用对山东 “99.8” 大暴雨的影响 [J]. 气象, 26 (5): 36–39. Zhang Jingzhen, Hou Shumei, Zhang Hongwei, et al. 2000. The effect of the interaction between mid and low latitude systems on a heavy rain in Shandong [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (5): 36–39.
- Zhang M, Zhang D L. 2011. Subkilometer simulation of a torrential-rain-producing mesoscale convective system in East China. Part I: Model verification and convective organization [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (1): 184–201.
- 赵平, 孙淑清. 1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 (一)——地形动力作用和潜热作用对西南低涡影响的数值试验对比分析 [J]. 大气科学, 15 (6): 46–52. Zhao Ping, Sun Shuqing. 1991. Numerical simulation and diagnosis of the formation of SW vortex. Part I: An analysis of numerical simulation of the effects of topography and latent heat on SW vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 15 (6): 46–52.
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等. 2013. 北京 “7·21” 特大暴雨环流形势极端性客观分析 [J]. 气象学报, 71 (5): 817–824. Zhao Yangyang, Zhang Qinghong, Du Yu, et al. 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (5): 817–824.
- 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 Xingde, et al. 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.