

薛一迪, 崔晓鹏. 2020. “威马逊”(1409)降水水汽来源和源区定量贡献分析[J]. 大气科学, 44(2): 341–355. XUE Yidi, CUI Xiaopeng. 2020. Moisture Sources and Quantitative Analyses of Source Contributions of Precipitation Associated with Rammasun (1409) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 341–355. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18245

“威马逊”(1409)降水水汽来源和源区 定量贡献分析

薛一迪^{1,3} 崔晓鹏^{1,2,3}

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

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用拉格朗日轨迹追踪模式 FLEXPART (the Flexible Particle Model) 和水汽源区定量贡献分析方法, 研究了超强台风“威马逊”登陆期间(2014 年 7 月 17 日 06:00 至 19 日 06:00, 协调世界时)强降水的水汽来源和源区定量贡献。结果表明, 大量目标气块源自目标降水区西南侧和东侧, 西南侧气块可追溯到阿拉伯海和孟加拉湾等地区, 且大部分气块来自相对较低层大气, 高度在输送途中变化不大, 来自东侧的气块可追溯到西太平洋海域, 气块初始位置相对较高, 在输送途中逐渐降低; 源区定量贡献分析显示: 南海区域(C)贡献最大, 目标降水区域(T)局地贡献次之, 孟加拉湾(B)和西太平洋南部区域(D)贡献相当且均低于区域 T; 区域 C 和 T 对“威马逊”登陆期间降水贡献较大源于其较高的源区水汽摄取率(尤其是区域 C)和较低的沿途损耗率(尤其是区域 T); 区域 B 源地水汽摄取量高于区域 D, 但从前者摄取的水汽到达目标降水区域而未被释放的比例明显高于后者, 同时, 两者沿途损耗率相当, 造成两者对目标降水区域的最终贡献也相当; 尽管阿拉伯海区域(A)水汽摄取亦较明显, 但由于沿途的显著消耗, 导致其对目标降水区域的最终贡献显著降低。FLEXPART 轨迹追踪模式和水汽源区定量贡献分析方法, 与以往常用的环流和水汽通量进行定性分析相比, 可更为清晰和定量地揭示热带气旋降水的水汽来源特征。

关键词 热带气旋降水 水汽来源 源区定量贡献 FLEXPART 模式

文章编号 1006-9895(2020)02-0341-15

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18245

Moisture Sources and Quantitative Analyses of Source Contributions of Precipitation Associated with Rammasun (1409)

XUE Yidi^{1,3} and CUI Xiaopeng^{1,2,3}

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

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Using the Flexible Particle (FLEXPART) model, a Lagrangian particle dispersion model, and the areal source-

收稿日期 2018-10-30; 网络预出版日期 2019-06-20

作者简介 薛一迪, 女, 1992 年出生, 博士研究生, 主要从事热带气旋暴雨过程研究。E-mail: xueyidi@mail.iap.ac.cn

通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 973 项目 2015CB452804, 国家自然科学基金项目 41175056

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grant 41175056)

receptor attribution method, the moisture sources for super typhoon Rammasun (landfalling from 0600 UTC July 17, 2014 to 0600 UTC July 19, 2014) were studied, and the contributions from these moisture sources were quantified. Results indicated that the vast majority of the target particles were from southwest and east of the target precipitation region. The former originated from the relatively lower layers of the atmosphere and could be traced back to regions such as the Arabian Sea and the Bay of Bengal, and particle height did not change much in transit. The latter could be traced back to the Western Pacific Ocean, and the particles were relatively higher at their source, descending during transportation. The South China Sea region (C) made the largest contribution, followed by the target precipitation region (T), while the Bay of Bengal (B) and the southern Western Pacific region (D) both contributed similar amounts that were less than those from region T. The greater contributions of regions C and T to the precipitation during Rammasun landfall were attributed to their higher uptake by the storm (especially from region C) and reduced loss in transit (especially from region T). The uptake from region B was higher than that from region D, but the unreleased proportion from the former was significantly higher than that from the latter. Meanwhile, the moisture loss in transit to the storm from both regions B and D was equivalent, resulting in roughly equal contributions to the target precipitation area. Although uptake from the Arabian Sea region (A) was also substantial, its ultimate contribution to the target precipitation region was dramatically reduced due to evaporation in the air parcels. Our study demonstrated that the FLEXPART model and areal source to receptor attribution method can reveal relative moisture source contributions to tropical cyclone precipitation more clearly and quantitatively than the qualitative commonly-used circulation and water vapor flux analysis.

Keywords Tropical cyclone precipitation, Moisture sources, The areal source-receptor attribution method, Flexible Particle (FLEXPART) model

1 引言

我国海岸线绵长, 受热带气旋 (尤其是登陆热带气旋) 影响十分严重, 登陆热带气旋可带来大风、暴雨和风暴潮等恶劣天气, 造成重大人员伤亡和经济损失 (陈联寿和丁一汇, 1979), 气象学者们从多个角度针对登陆热带气旋开展了大量深入的研究工作 (陈联寿和孟智勇, 2001; 雷小途和陈联寿, 2001; 陈联寿等, 2004; Cui and Xu, 2009; Khain et al., 2010; Kim et al., 2011; Hua and Liu, 2013; Ming et al., 2014; 端义宏等, 2014; Guo and Tan, 2017; Qu et al., 2017), 取得了显著进展; 登陆热带气旋带来的众多灾害中, 以暴雨灾害最为普遍, 相关机理研究和预报一直是国内、外学者关注的重点和业务预报的难点 (丁治英和陈久康, 1995; Wu et al., 2002; 程正泉等, 2005; Cui and Li, 2006; Atallah et al., 2007; 程正泉等, 2009; 崔晓鹏, 2009; Chen et al., 2010; 丛春华等, 2011; Meng and Wang, 2016a, 2016b; Wang et al., 2016; Xu et al., 2016; Liu et al., 2018)。暴雨的发生离不开充足的水汽供应, 持续的水汽来源对于热带气旋暴雨十分关键 (陈联寿和丁一汇, 1979; 程正泉等, 2009; 戴竹君等, 2015; Wang et al., 2017), 但是, 水汽源地输送来的水汽并不都能够到达暴雨区

(Huang and Cui, 2015a, 2015b), 同时, 到达暴雨区的水汽也并不都会全部用于区域的降水, 为深入认识热带气旋暴雨水汽来源特征, 需要定量分析水汽来源及源区水汽的定量贡献。

拉格朗日轨迹追踪模式 FLEXPART (the Flexible Particle Model) 是一个适用于模拟大范围大气传输过程的模式, 可以用来追踪大气中各种成分的输送, 常被应用于环境、气候以及污染事件的追踪 (Stohl et al., 1998; Stohl et al., 2002; Stohl et al., 2005), 该模式同样可用于大气水循环相关研究 (Stohl and James, 2004, 2005; Stohl et al., 2008)。Sun and Wang (2014) 利用该模式研究了我国半干旱草原地区冬半年和夏半年不同尺度降水的水汽来源, 定量分析了西太平洋、印度洋、欧亚大陆等水汽源区对我国华北、长江中下游、华南区域降水的贡献 (Sun and Wang, 2015); Huang and Cui (2015a) 利用该模式揭示了 2013 年 7 月四川盆地西部一次暴雨过程的水汽来源特征, 并定量计算了不同水汽源区对强降水的贡献比; 进一步, 利用该模式和相关定量分析方法, 开展了四川盆地多年暴雨个例的水汽来源及源区水汽定量贡献的合成分析 (Huang and Cui, 2015b), 所得结论对于四川盆地夏季暴雨预测预报有一定参考价值。FLEXPART 模式及相关水汽源区贡献定量分析方

法同样可作为热带气旋暴雨水汽来源定量分析的有力工具,徐洪雄等(2013)利用 FLEXPART 模式和 WRF 模式,对 2009 年热带气旋“天鹅”、“莫拉克”影响期间引发的暴雨过程的水汽来源开展了研究,然而到目前为止,FLEXPART 模式及源区贡献定量分析方法用于热带气旋暴雨分析的研究工作还很少。

2014 年,超强台风“威马逊”(1409)先后登陆我国海南、广东和广西,造成华南大范围农作物受灾,基础设施严重损坏,约 1100 万人受灾,数十人死亡或失踪。郑艳等(2014)和陈见等(2014)利用常规观测资料和再分析资料分析认为,低层辐合与高层辐散、弱的环境风垂直切变、适宜的海面温度、深厚的暖涡等是“威马逊”近海突然加强的有利条件;邓琳等(2016)利用中尺度数值模式 WRF,分析了雨滴谱特征及不同云微物理方案下微物理源、汇项对云中雨滴含量的影响。“威马逊”带来了强降水,引发严重灾害,为深入揭示其强降水形成机制,需定量分析降水过程中的水汽来源和输送特征以及水汽源区对降水的定量贡献。本文利用 FLEXPART 模式及水汽源区贡献定量分析方法,分析“威马逊”登陆期间强降水的水汽输送特征,识别主要水汽源区以及定量估计各源区对强降水的贡献,提高对热带气旋强降水形成机制的认识水平。

本文第二部分简要介绍分析所用资料、模拟方案设置及分析方法;第三部分回顾“威马逊”登陆期间降水特征、环流形势、水汽通量及其演变;第四部分借助 FLEXPART 模式开展目标气块轨迹追踪;第五部分借助水汽源区贡献定量分析方法,开展源区定量贡献诊断分析;最后给出论文主要结论和讨论。

2 资料、模拟方案设置及分析方法

本文所用资料主要包括:(1)美国 NCEP/FNL(the final version of the National Centers for Environmental Prediction Operational Global Analysis data)再分析数据,时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直 26 层(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>[2014-11-13]);(2)中国地面观测站降水资料融合 CMORPH 卫星反演降水产品得到的逐时降水量数据集,空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (潘昶等,2012;沈艳等,2013);(3)中国气象局上海台风

研究所提供的热带气旋最佳路径数据(http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html [2018-01-11])。本文中所提及的时间均为协调世界时。

本文使用 NCEP/FNL 再分析数据驱动 FLEXPART 模式,对“威马逊”登陆期间的强降水进行模拟。模拟区域为($10^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$),区域三维大气初始气块数目为 1.2×10^6 个,积分时间为 2014 年 7 月 9 日 09:00 至 19 日 06:00(协调世界时,下同),模式输出结果包括:气块识别号、三维空间位置(经度、纬度、高度)、位势涡度、温度、比湿、气块所在位置的大气边界层高度、对流层顶高度等,模拟结果每 3 h 输出一次。

利用上述模拟结果,使用拉格朗日轨迹追踪分析方法,追踪对降水有重要贡献的气块(目标气块),识别目标气块水汽含量增加的位置,确定水汽源区。目标气块识别方法参考了陈斌等(2011)和 Huang and Cui(2015a)的方法,主要包括以下几个步骤:

(1) 根据重点关注的降水区空间分布特征,确定目标降水区域($15^{\circ}\text{N} \sim 23^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 115^{\circ}\text{E}$);

(2) 根据重点关注的降水发生时段,确定选取目标气块的时间段:2014 年 7 月 9 日 09:00~19 日 06:00;

(3) 在上述区域和时段中,选择网格降水量大于 40 mm 的气块;

(4) 从第(3)步得到的气块中,选取气块 3 h 比湿变化 $\Delta q < -1 \text{ g kg}^{-1}$ 的气块,作为最终确定的目标气块。

通过以上步骤,得到对降水有重要贡献的目标气块,用于后续拉格朗日轨迹追踪分析(需要指出的是,由于上述筛选过程中忽略了一些降水量较小的网格区域以及一些对降水影响较小的气块,所以所选目标气块的降水总量比实际降水量小)。本研究中,对选取的目标气块,从目标降水区域出发,向前追踪 10 d,这里使用 10 d,是因为以往研究(Numaguti, 1999; Trenberth, 1999)发现,水汽在大气中的平均滞留时间约为 10 d。此外,为了分析水汽从源区到目标降水区域的总体输送轨迹特征,采用 Dorling et al.(1992)提出的轨迹聚类分析方法,得到聚类后的轨迹。

在上述拉格朗日分析方法中,沿着一个气块的

运动轨迹, 气块内所含水汽随时间的变化可以表示为

$$e - p = m \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

其中, e 和 p 分别表示气块内水汽含量的增长率和减少率, m 为气块质量, q 为比湿, t 为时间。若在表面积为 A 的区域上空大气柱内存在 N 个气块, 将所有气块水汽变化累加, 再除以区域表面积 A , 可得到:

$$E - P \approx \frac{\sum_{i=1}^N (e_i - p_i)}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \frac{dq_i}{dt}}{A}, \quad (2)$$

其中, $E - P$ 代表地表水通量, E 和 P 分别表示单位面积的海面/陆面蒸发率和降水率 (Stohl and James, 2004, 2005; Sun and Wang, 2014, 2015; Huang and Cui, 2015a)。

为了定量识别气块从源区到目标降水区域行进过程中水汽的摄取和释放, 目标气块沿其轨迹到达目标降水区域过程中, 气块从各源区摄取的水汽 (Uptake) 被分成三部分 (Sun and Wang, 2015): 在到达目标降水区域之前的输送途中损失的部分 (Loss), 到达目标区域后形成降水的部分 (Released), 以及到达目标区域后没有形成降水的部分 (Unreleased), 即

$$\text{Uptake} = \text{Loss} + \text{Released} + \text{Unreleased}. \quad (3)$$

各水汽源区的 Uptake、Loss 和 Released 都采用“面源贡献定量估计”方法估算 (Sun and Wang, 2014), 而 Unreleased 的估算方法 (Sun and Wang, 2015) 为

$$\text{Unreleased} = \text{Uptake} - \text{Loss} - \text{Released}. \quad (4)$$

计算得到目标降水区域内释放的总水汽 (Released_{total}), 将其作为目标区域内的降水量, 进而可得到每个考察的水汽源区的水汽对目标区域内降水的贡献率 C (Huang and Cui, 2015a), 即

$$C = \frac{\text{Released}}{\text{Released}_{\text{total}}} \times 100\%. \quad (5)$$

同样, 可估算其他部分与目标区域内释放的总水汽 (Released_{total}) 的比率, 即 $\frac{\text{Uptake}}{\text{Released}_{\text{total}}} \times 100\%$, $\frac{\text{Loss}}{\text{Released}_{\text{total}}} \times 100\%$, $\frac{\text{Unreleased}}{\text{Released}_{\text{total}}} \times 100\%$, 定量对比分析各水汽源区水汽的相对贡献。

3 “威马逊”登陆期间的降水分布、环流形势和水汽通量特征

“威马逊” (1409) 于西北太平洋生成后, 向偏西方向移动, 登陆菲律宾后路径转为西北行, 进入我国南海后维持西北行路径, 登陆我国华南沿海前, 快速增强为超强台风级, 18 日 06:00 左右, 中心附近近地面最大风速达 72 m s^{-1} , 中心最低海平面气压达 888 hPa 。本文重点关注“威马逊”临岸迅速发展为超强台风并登陆我国华南沿海这一时段的强降水 (图 1a), 这一时段, 150 mm 以上的较强降水主要分布在“威马逊”路径左侧, 沿路径方向呈现 3 个主要降水区域, 最强降水位于海南岛西部及其沿海, 达 400 mm 以上 (图 1a)。依据上述降水分布特征, 选取目标降水区域为 ($15^\circ\text{N} \sim 23^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 115^\circ\text{E}$) (图 1a 中黑色矩形标注区域), 同时将目标降水区域平均小时降水量大于 1 mm 的时段 (图 1b) 作为目标降水时段 (2014 年 7 月 17 日 06:00~19 日 06:00)。

环流场 (图 2) 上看, 超强台风“浣熊” (1408) 影响我国华东沿海期间, 低空西南水汽输送通道明显 (图 2a), 并与“浣熊”环流相连接, 为后者注入充足水汽, 当“浣熊”进入中纬度西风带并东移之后, 850 hPa 高度上来自西南的水汽输送通道较明显减弱 (图 2b), 而在“威马逊” (1409) 进入南海并西北行登陆我国华南期间, 强西南水汽输送通道再次出现, 并与“威马逊”环流相衔接 (图 2c), 为“威马逊”登陆我国华南期间的强降水提供充足水汽 (图 2c、d)。

从 850 hPa 水汽通量及垂直积分大气可降水量 (图 3) 可以更加清晰地看到上述特征, 7 月 9 日 00:00 (图 3a1、a2), “浣熊”影响我国华东沿海期间, 源于索马里越赤道气流、 90°E 附近越赤道气流以及南海南部 105°E 附近的越赤道气流共同支撑强大的西南水汽输送通道, 源源不断地将充足的水汽输送进入“浣熊”环流 (图 3a1), 造成“浣熊”环流区域显著的垂直积分大气可降水量 (图 3a2)。

7 月 11 日 06:00 (图 3b1、b2), 伴随“浣熊”进入中纬度西风带并东移, 90°E 越赤道气流西退, 105°E 越赤道气流消失, 上述强水汽输送通道明显断裂 (图 3b1), 而此时, 我国黄河以南陆地上较明显的可降水量主要与副高边缘的东南水汽输送、副高西侧南海水汽输送以及少部分进入南海后北折的西南水汽输送 (图 3b1、b2) 有关; 值得注意的是, 可能由于上述强水汽输送通道的断裂,

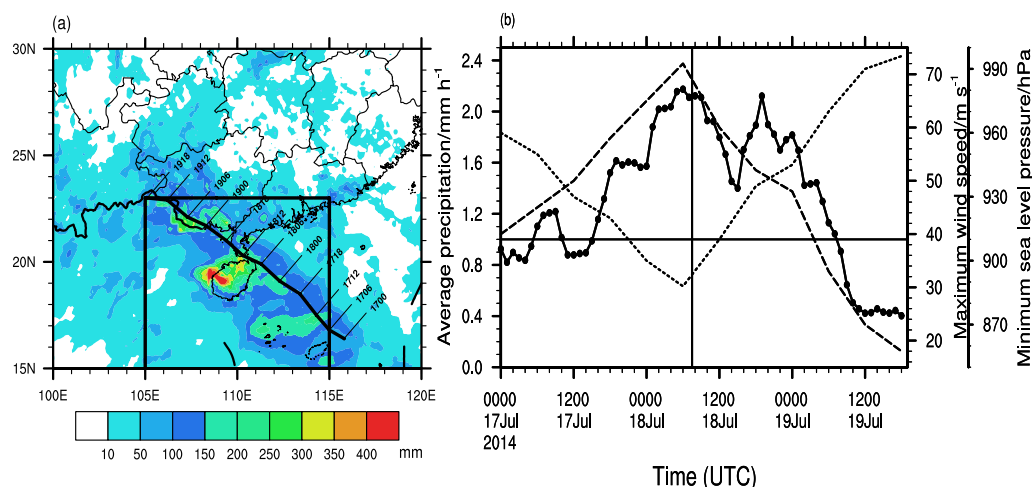


图1 (a) 2014年7月17日00:00至19日18:00(协调世界时,下同)“威马逊”实况路径(黑色折线)以及7月17日01:00至20日00:00观测的累积降水量(填色,单位: mm),黑色矩形为选取的目标降水区域;(b) 2014年7月17日00:00至19日18:00目标降水区域平均小时降水量(带黑色点的折线,单位: mm h⁻¹)、“威马逊”中心附近地面最大风速(长虚线,单位: m s⁻¹)及最低海平面气压(MSLP,虚线,单位: hPa)的时间演变图,图中横直线为1 mm降水量,竖直线为“威马逊”登陆海南的时刻

Fig. 1 (a) The observed track of Rammasun (black line) from 0000 UTC 17 July to 1800 UTC 19 July, 2014 and the observed accumulated precipitation (color shading, units: mm) from 0100 UTC July 17 to 0000 UTC July 20, 2014. The black rectangle indicates the selected target precipitation area. (b) Temporal evolution of hourly area-averaged accumulated precipitation (dotted solid line, units: mm h⁻¹) in the target precipitation area, maximum wind speed (long dashed line, units: m s⁻¹), and minimum sea level pressure (short dashed line, units: hPa) of Rammasun from 0000 UTC July 17 to 1800 UTC July 19, 2014. The horizontal line is for 1 mm of precipitation and the vertical line is for the moment of Rammasun landfall in Hainan

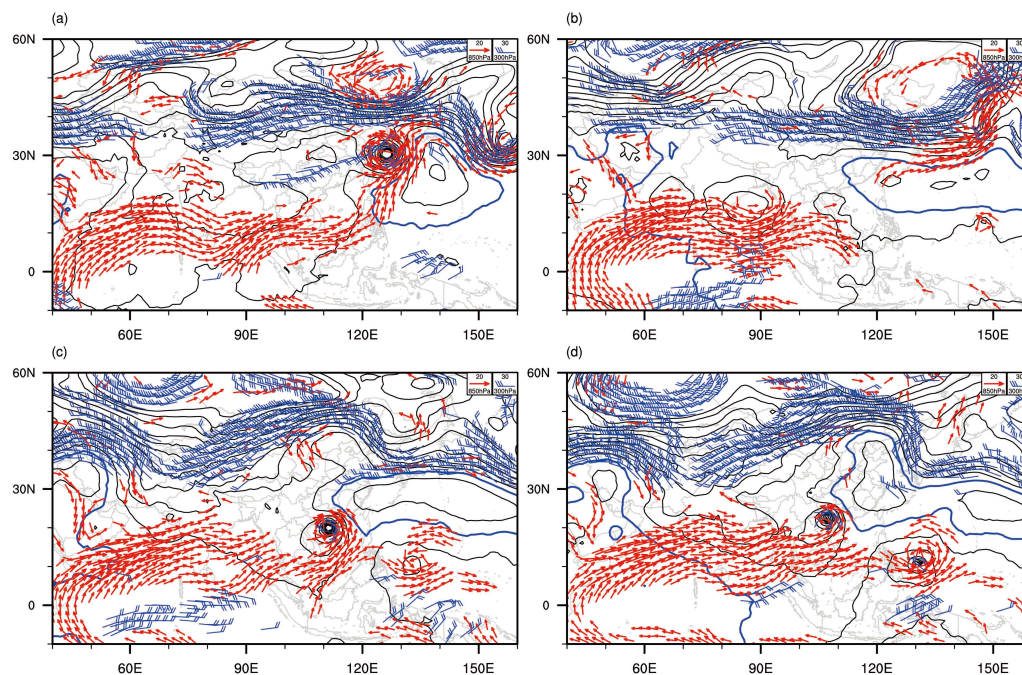


图2 NCEP/FNL资料的500 hPa位势高度场(黑色等值线,蓝色粗实线代表5880,单位: gpm,等值线间隔为20 gpm),大于10 m s⁻¹的850 hPa风矢量场(红色箭头)以及大于20 m s⁻¹的300 hPa风矢量场(蓝色风羽):(a) 2014年7月9日00:00;(b) 2014年7月11日06:00;(c) 2014年7月18日06:00;(d) 2014年7月19日06:00

Fig. 2 500-hPa geopotential height (black contours, thick blue line indicates 5880 gpm, contour interval: 20 gpm), 850-hPa wind field (> 10 m s⁻¹, red vector, units: m s⁻¹), and 300-hPa wind field (> 20 m s⁻¹, blue wind bar, units: m s⁻¹) from the National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data (NCEP FNL) at (a) 0000 UTC July 9, (b) 0600 UTC 11 July, (c) 0600 UTC 18 July, and (d) 0600 UTC 19 July, 2014

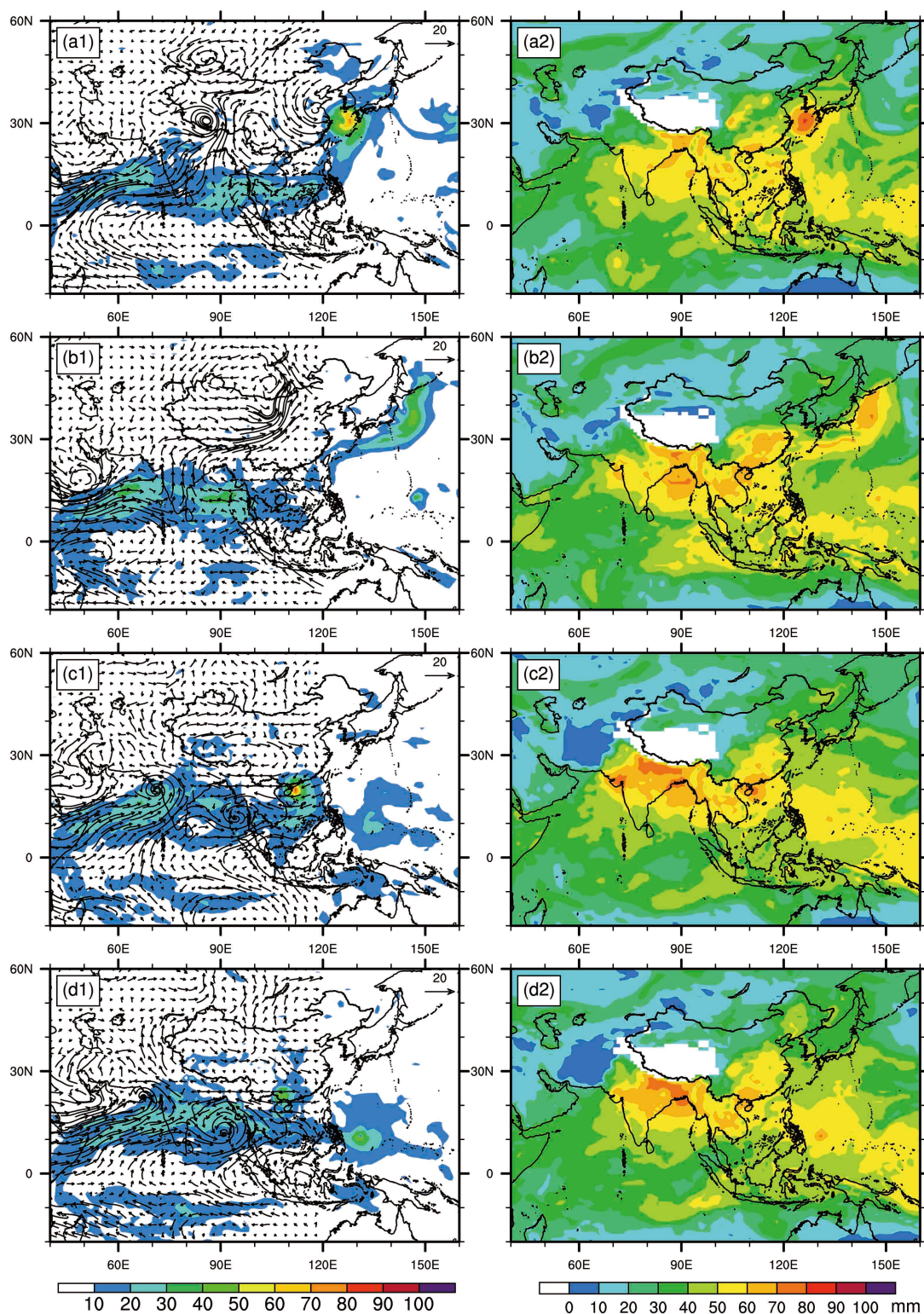


图3 NCEP/FNL 数据计算的 850 hPa 水汽通量 (左列; 矢量为水汽通量矢量, 填色为水汽通量大小, 单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和 1000~300 hPa 垂直积分大气可降水量 (右列; 填色, 单位: mm): (a1、a2) 2014 年 7 月 9 日 00:00; (b1、b2) 2014 年 7 月 11 日 06:00; (c1、c2) 2014 年 7 月 18 日 06:00; (d1、d2) 2014 年 7 月 19 日 06:00

Fig. 3 850-hPa moisture fluxes (left column, vector, color shading indicates the value of the moisture flux, units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) and vertically integrated atmospheric precipitable water (right column, shaded, units: mm) from 1000 hPa to 300 hPa calculated from NCEP FNL at (a1, a2) 0000 UTC July 9, (b1, b2) 0600 UTC July 11, (c1, c2) 0600 UTC July 18, and (d1, d2) 0600 UTC July 19, 2014

西退的原 90°E 越赤道气流,在依然强盛的索马里越赤道气流配合下,于孟加拉湾北部形成明显气旋性环流(图 3b1),造成孟加拉湾北部及其北侧陆地上大气可降水量显著增加(图 3b2);由于水汽输送通道断裂,同时在南海附近也没有新热带气旋存在,导致南海区域上空水汽通量较之前显著减小,可见,南海地区局地的水汽特征变化是与更大范围内的大气环流特征紧密联系在一起的;7月11日 06:00 之后(图略),上述状态一直维持,在持续强盛的索马里越赤道气流和孟加拉湾北部气旋性环流持续影响下,配合青藏高原大地形的阻挡,高原南侧陆地及其近海一直维持较高的可降水量。

当“威马逊”西移进入南海后(图 3c1、c2),上述特征有所改变,从索马里越赤道经阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中南半岛,一直到中国南海的强水汽输送通道再次强盛(图 3c1),为“威马逊”输送充足水汽,此时,与 90°E 附近逐渐恢复的越赤道气流相比,由于主体位于南海区域强大的“威马逊”环流影响, 105°E 附近南海南部的越赤道气流重新建立并更为强盛(图 3c1),“威马逊”的水汽可能主要来自于西南水汽输送以及这一支越赤道气流输送;受孟加拉湾气旋性环流残余势力的影响及其北侧高原大地形的阻挡,高原南侧仍维持很高的大气可降水量(图 3c2、d2);7月

19日 06:00(图 3d1、d2),伴随“威马逊”西北行登陆以及强台风“麦德姆”加强西进(图 3d1), 110°E 以东,强西南水汽输送通道被分为两支,一支向东北注入“威马逊”环流,另一支向东流入“麦德姆”环流(图 3d1)。

将目标降水区域(图 1a 中黑色矩形区域)、目标降水时段(2014 年 7 月 17 日 06:00 至 19 日 06:00)观测和 FLEXPART 模式输出的累积降水量(图 4)进行对比发现, FLEXPART 模式较好地再现了此时段“威马逊”伴随的总体降水量分布,大于 40 mm 的降水落区(图 4b)与观测(图 4a)较为一致,但强降水中心与观测有较大差距,尤其是海南岛西部的局地强降水中心没有在 FLEXPART 模式模拟中出现,这些局地强降水中心往往与局地热力条件(如局地下垫面和地形等)和局地中小尺度环流特征密切相关,同时也与台风环流动力学有关(例如,环境垂直风切变影响台风环流内降水的非对称分布等),由于 FLEXPART 模式是由 NCEP/FNL 再分析资料等大尺度资料驱动下的轨迹追踪诊断模式,缺乏局地中小尺度水汽输送和集中信息,并且, FLEXPART 模式也不能够较好重现上述台风相关动力学过程,因此无法再现上述局地强降水中心;但由于 FLEXPART 模式较好地再现了目标降水时段“威马逊”伴随的总体降水量分

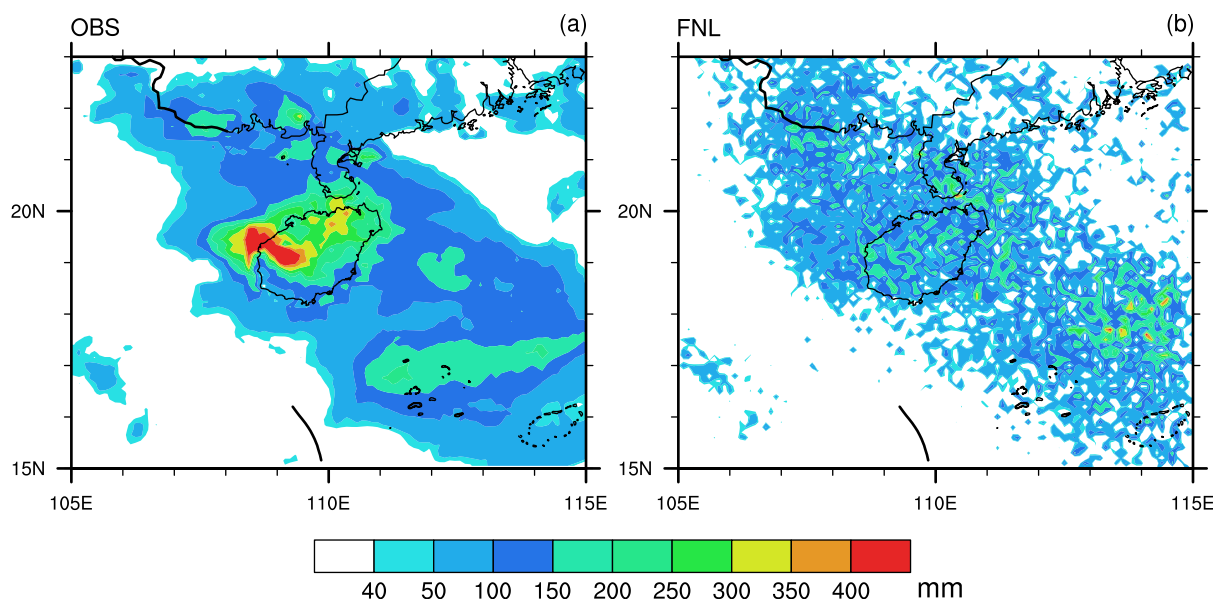


图 4 2014 年 7 月 17 日 06:00 至 19 日 06:00 目标降水区累积降水量(填色,单位: mm)分布:(a) 观测降水量结果;(b) FLEXPART 模式输出的降水量结果

Fig. 4 Accumulated precipitation in the target precipitation area from 0600 UTC July 17 to 0600 UTC July 19, 2014 (color shading, units: mm): (a) Observed precipitation, (b) diagnoses based on output from the FLEXPART model driven by NCEP FNL data

布特征,其模拟结果仍可用于本文目标降水区域、目标降水时段大尺度水汽输送特征和源区贡献的定量分析。

4 水汽源地拉格朗日轨迹追踪

利用 FLEXPART 模式输出结果,将所选目标气块向前追踪,得到 2014 年 7 月 09 日 09:00 至 19 日 06:00 目标气块的运动轨迹(图 5a),利用聚类方法(Dorling et al., 1992),对所得运动轨迹进行聚类,得到 10 条聚类后的轨迹(图 5b)。结果显示,目标气块主要源自区域西南侧和东侧(图 5a),来自西南侧的目标气块能够追溯到阿拉伯海和孟加拉湾(尤其是阿拉伯海),且绝大多数气块来自相对较低的层次(高度低于 4000 m),气块高度在向目标降水区域运动过程中变化不大;来自东侧的目标气块可追溯到 150°E 附近的西太平洋海域,可分为两部分,一部分源自相对较高纬度,顺时针移动到较低纬度后,再转而西行进入目标降水区域(这部分气块初始高度一般较高,到达较低纬度后高度降低),另外一部分则源自较低纬度(这部分气块初始高度相对较低)。目标气块轨迹聚类分析(图 5b)进一步发现,来自阿拉伯海和西太平洋源区的气块所占比例最多,分别占 35.97% 和 43.68%,且来自西太平洋的气块主要集中在 140°E 以东,此外,少量气块来自孟加拉湾东南部、南海南部和 140°E 以西的西太平洋区域。

分析 300 和 850 hPa 风场和 500 hPa 位势高度场(图略)发现,12 日 06:00 开始,西太平洋上 150°E 附近,300 hPa 风场存在显著偏北分量,风场呈反气旋式旋转,并在 20°N 附近,转为显著偏东风,与图 5a 中该区域目标气块运动轨迹相符,且偏东风一直持续至目标时段;同时,850 hPa 风场上,阿拉伯海、印度半岛以及孟加拉湾上空盛行偏西风,与图 5a 中该区域上空目标气块运动轨迹一致。

综上所述,目标气块主要来自目标降水区西南侧和东侧,其携带的水汽可能对“威马逊”登陆期间的强降水起重要作用,但不同水汽源区的贡献大小还需进一步定量分析。

5 水汽源区对目标区域降水贡献的定量估算

由 FLEXPART 模式模拟结果诊断得到的 $E-P$ 分布(图 6a)可见(图中蓝色区域表示水汽汇,即经过该处时气块净释放水汽,红色区域表示水汽源,即经过该处时气块净摄取水汽),目标气块在到达目标降水区前经历了多次蒸发和降水过程(图 6a),其中,气块途经海面时,以净摄取为主,气块水汽含量增加,而经过陆地时,受到地表摩擦和地形影响,气块水汽含量以净释放(降水)为主。在目标降水区域,气块水汽得到充分释放,出现显著和集中的降水。可见,由于目标气块于各源区摄取的水汽在向目标降水区域输送过程中,会受到降水影响产生损耗,因此,即使气块在源区摄取很大的水汽也不意味着它将对目标降水区域的降水形成重要贡献,需要定量分析源区水汽贡献。根据图 5 目标气块轨迹、聚类平均轨迹分布以及图 6a 中的 $E-P$ 分布特征,选取确定了 5 个主要的水汽源/汇区(图 6a 和图 5b 中黑色矩形标注),分别定义为:阿拉伯海区域(A),孟加拉湾区域(B)、中国南海区域(C)以及西太平洋区域(D和E),利用“面源贡献定量估计”方法(Sun and Wang, 2014),定量估算各水汽源区的水汽对目标降水区总水汽释放(降水)的贡献(图 6b),除上述区域之外,也估算了目标降水区局地水汽对降水的贡献(图 6b 中的 T),并分别估算了各源区边界层内和整个大气的水汽贡献。图 6b 显示,区域 C(中国南海区域)是对降水贡献最大的水汽源区,该区域整层大气和边界层内水汽对目标区域降水的贡献分别达到 30.58% 和 17.56%;目标降水区域 T 的相应水汽贡献排在第二位,分别为 26.21% 和 16.51%;区域 B(孟加拉湾区域)和区域 D(西太平洋区域南侧部分)整层大气的水汽贡献相当(区域 D 略大),但区域 B 边界层内的贡献(8.02%)明显大于区域 D(3.99%),这与两者的目标气块轨迹高度(图 5a)有关;水汽贡献明显小的是区域 A(阿拉伯海区域)和区域 E(尤其是西太平洋区域北侧区域 E),阿拉伯海区域的较低贡献可能主要与该区域距离目标降水区较远(图 6a),气块在该区域摄取的水汽在沿途被大量消耗(降水),而区域 E 的低贡献还源于该区域普遍较高的目标气块初始高度(图 5a)。

总体上看,目标气块经过上述考察的所有水汽源区摄取的总水汽对目标区域降水的贡献在整层大

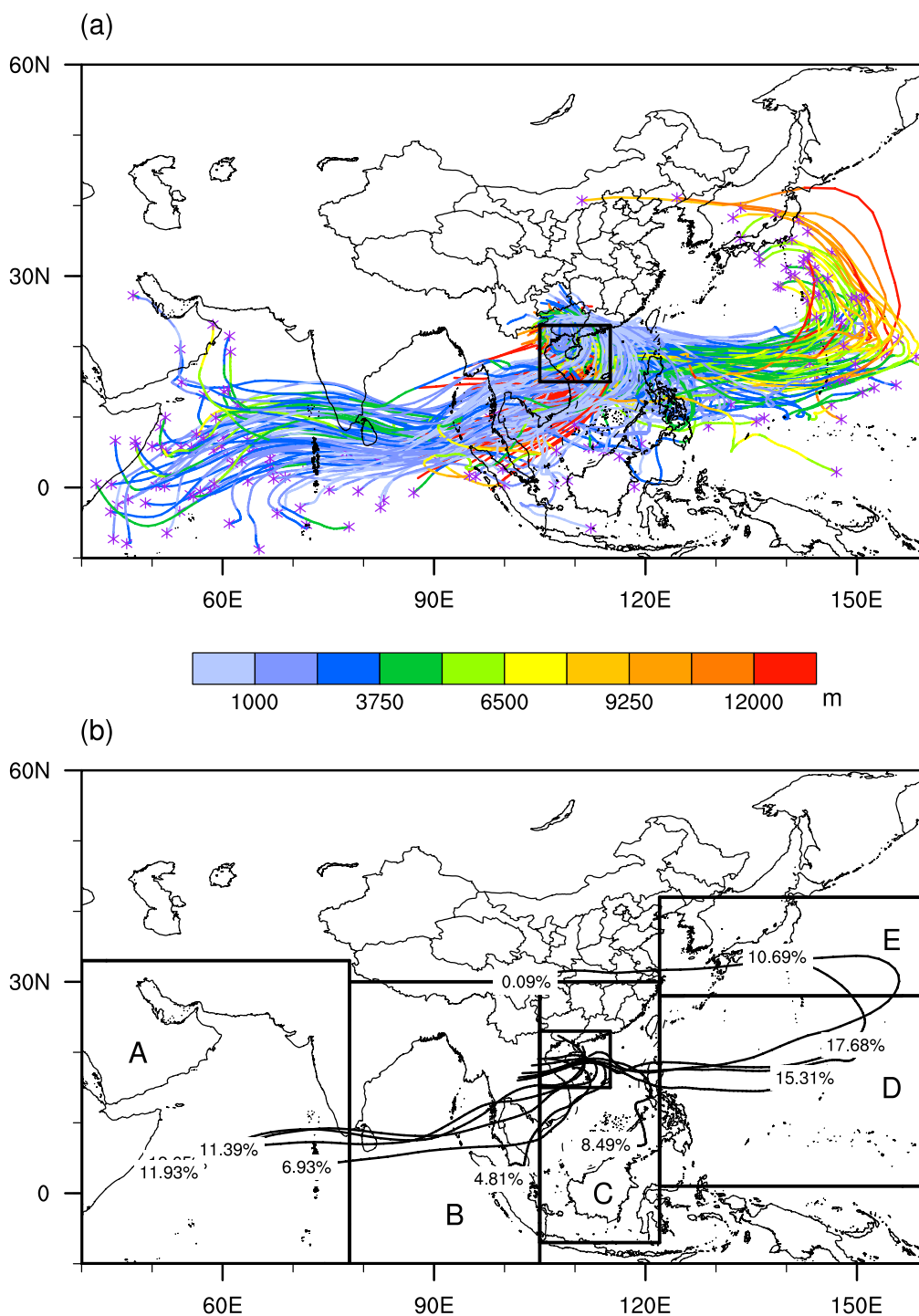


图5 2014年7月09日09:00至19日06:00 (a) 目标气块运动轨迹以及 (b) 目标气块轨迹聚类 (聚类数: 10)。(a) 中轨迹颜色代表气块距离地表的高度 (简称 AGL, 单位: m), 紫色星号 “*” 表示气块轨迹起点 [为了清晰显示, 每50个气块随机选取1个气块轨迹绘制于 (a) 中], 黑色矩形为目标降水区域。(b) 中黑色数字表示每一类轨迹数所占比例, 数字所在位置为聚类轨迹的起点 A、B 和 C 分别表示阿拉伯海区域、孟加拉湾及中国南海附近区域, 以 28°N 为界, 西太平洋区域分为 D 和 E, 下同

Fig. 5 (a) Trajectories of the target particles from 0900 UTC July 9 to 0600 UTC July 19, 2014, and (b) cluster mean trajectories (cluster number: 10). (a) Trajectory segments are color to coded according to the associated altitudes AGL (Above Ground Level) (units: m). Purple star marks indicate the beginning of the trajectories. Only one trajectory is selected randomly for every 50 target particles for clarity. The black rectangle indicates the target precipitation area. (b) Numbers located at the beginning of the cluster mean trajectories indicate the percentage of each cluster relative to the total trajectories of the target particles reaching the target precipitation area; A, B, and C indicate the Arabian Sea region, the Bay of Bengal, and the South China Sea region, respectively. D and E are bounded by 28°N in the western Pacific ocean

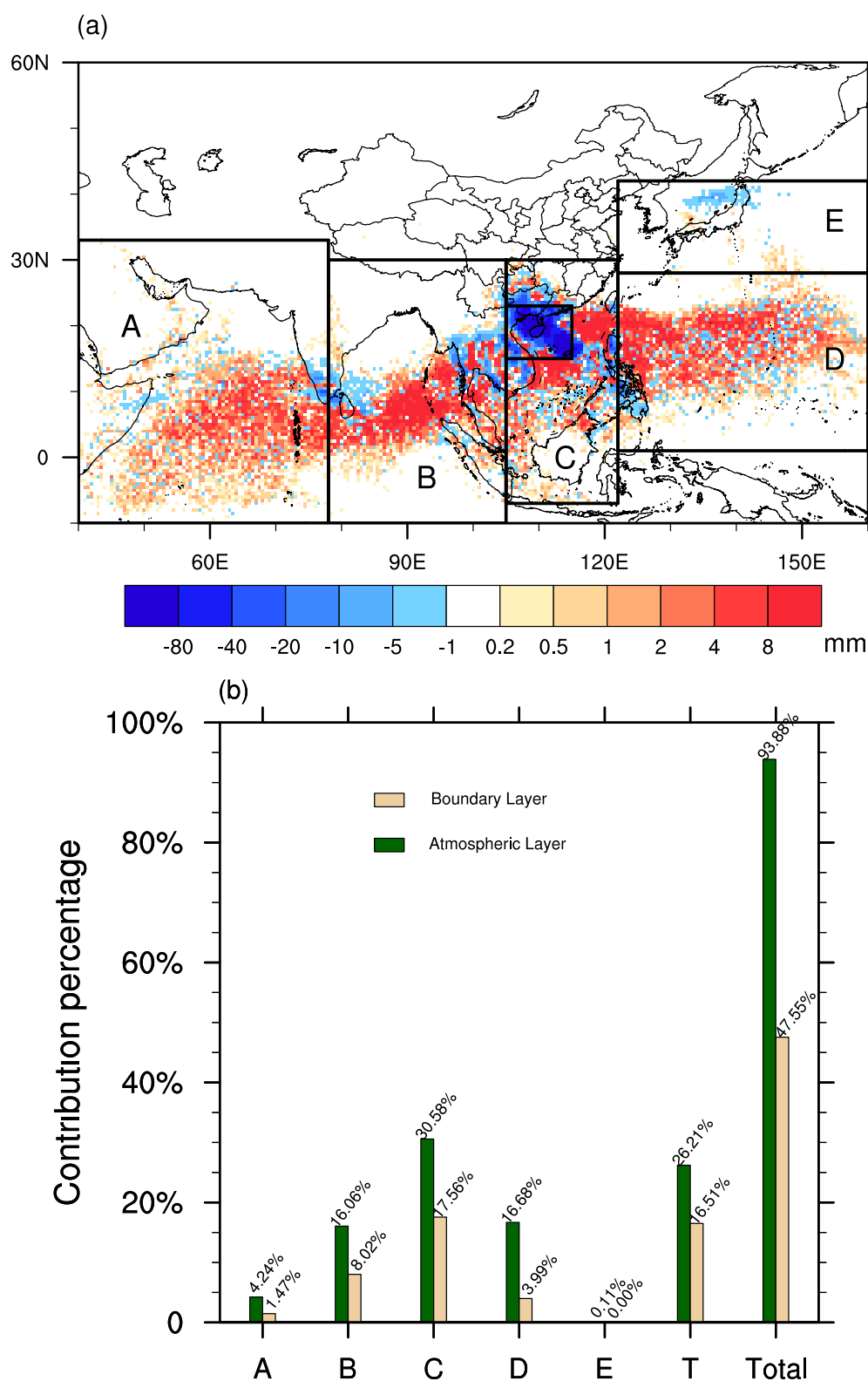


图6 (a) FLEXPART 模式模拟结果诊断得到的 $E-P$ (填色, 单位: mm) 和 (b) 各水汽源区对目标降水区域的贡献率。T 表示目标降水区域, Total 为所有考察的区域贡献之和; (b) 中绿色直方图为整层大气积分结果, 黄色直方图为边界层积分结果

Fig. 6 (a) Values of $E-P$ diagnosed based on output from the FLEXPART model (color shading, units: mm) and (b) the contribution of each examined moisture source region marked with black rectangles shown in (a) to the total moisture released in the target region. T indicates the local target precipitation region. Total is the sum of the results from all examined moisture source regions. (b) Green histogram is the integrated result of the entire atmospheric layer, while the yellow histogram is the integrated result of the boundary layer

气和边界层内分别可达 93.88% 和 47.55%，可见，本文中选取的水汽源区已经基本解释了目标区域降水的绝大部分水汽来源；而其余 6.12% 未被识别出来的水汽可能存在于本文轨迹追踪之前（即 2014 年 7 月 09 日 09:00 之前）气块中的水汽，以及来自于本文分析中没有包括的其他可能水汽源区。

目标气块由源区摄取水汽并向目标降水区域输送过程中，源区摄取的水汽（Uptake）会被分成三部分：输送沿途损失部分（Loss），目标降水区域释放部分（Released），以及到达目标降水区域但没有被释放的部分（Unreleased）。为了进一步深入定量认识气块从源区到目标降水区域的水汽输送特征，参照 Sun and Wang（2014、2015）“面源贡献定量估计”方法进行估算，其中，Unreleased 的估算方法为：Unreleased = Uptake - Loss - Released（Sun and Wang, 2015）。图 7 和表 1 中，目标气块在每个水汽源区整层大气（AL）内摄取的水汽（Uptake_{AL}）和大气边界层（BL）内摄取的水汽（Uptake_{BL}）对目标降水区域内释放的总水汽量（Released_{total}）的比值分别为，Uptake_{AL}/Released_{total}×100% 和 Uptake_{BL}/Released_{total}×100%，两者均包含三部分：沿途损失部分（Loss/Released_{total}×100%），目标降水区域释放部分（Released/

Released_{total}×100%），以及到达目标区域但未被释放部分（Unreleased/Released_{total}×100%）。

由图 7 和表 1 可见，目标气块在南海区域（C）和孟加拉湾区域（B）摄取的水汽是所有考察的水汽源区中最多的（分别占目标降水区域总释放水汽量的 62% 和 61.86%），其次是西太平洋南部的 D 区（47.71%），紧随其后的是目标降水区域的 T 区（39.76%）以及阿拉伯海区域 A（36.31%），西太平洋北部的 E 区最少（0.51%）；边界层内的特征与整层大气相似，只是西太平洋南部 D 区的相对贡献明显减小（15.54%），这可能主要源于该区域目标气块较高的初始高度（图 5a）。源区摄取的水汽（Uptake）在向目标降水区域输送过程中被不同程度地释放（降水），造成源区摄取水汽的明显损耗（Loss）；尽管气块在阿拉伯海区域 A 摄取了较多的水汽，但由于其距离目标降水区域很远，造成沿途损耗率高达 80% 以上，绝大部分水汽未能到达目标降水区；尽管气块在孟加拉湾（B）和南海区域（C）摄取的水汽量相当，但孟加拉湾摄取水汽的沿途损耗率（57.37%）明显高于南海区域（36.53%），同时，区域 B 摄取的水汽到达目标降水区域但未被释放的比例（10.31%）也略高于后者（8.77%），

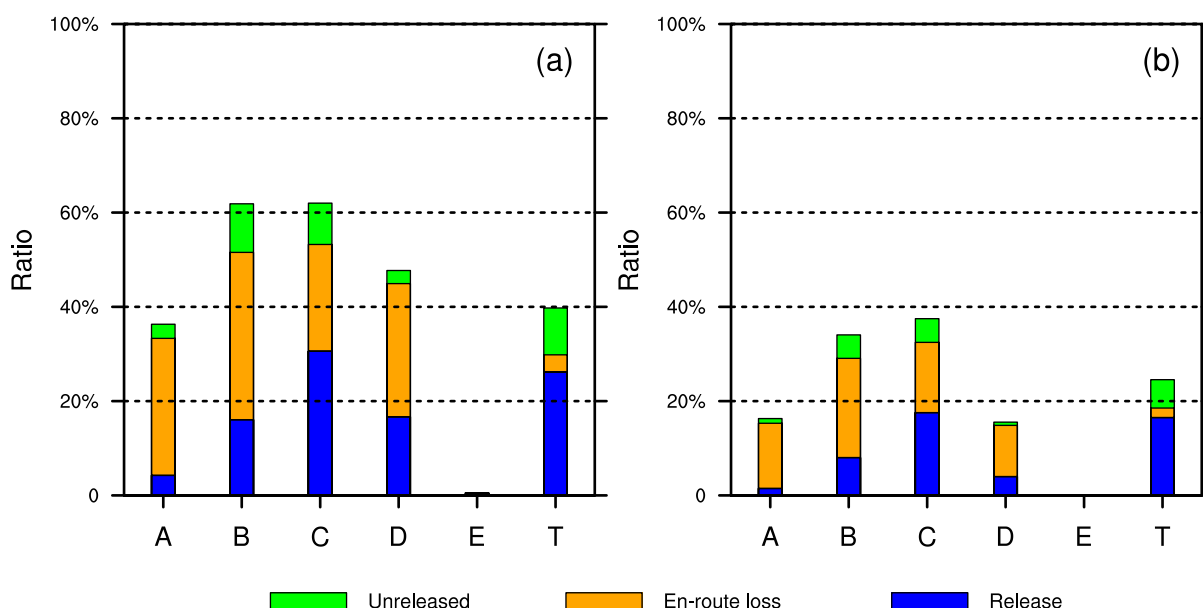


图 7 各水汽源区 (a) 整层大气和 (b) 边界层内水汽总摄取量占目标降水区域内水汽总释放量的百分比。包含三部分：输送沿途损失部分（橙色矩形），目标降水区域释放部分（蓝色矩形），以及到达目标降水区域但没有被释放的部分（绿色矩形）

Fig. 7 Ratios of the moisture uptake from the examined moisture source regions (a) across the entire atmospheric layer and (b) in the boundary layer to the total moisture release within the target precipitation area. These consist of three parts: the part lost in transit (orange), the part released over the target precipitation area (blue), and the part that reached the target precipitation area but did not fall as precipitation (green)

表 1 各水汽源区 (A、B、C、D、E、T) 整层大气 (AL) 和边界层 (BL) 内水汽总摄取量占目标降水区域水汽总释放量的百分比

Table 1 Ratios of the moisture uptake from the examined moisture source regions (A, B, C, D, E, T) across the entire atmospheric layer (AL) and in the boundary layer (BL) to the total moisture release within the target precipitation area

水汽源区	Uptake		Loss		Released		Unreleased	
	AL	BL	AL	BL	AL	BL	AL	BL
A	36.31%	16.30%	29.07%(80.06%)	13.83%(84.85%)	4.24%(11.68%)	1.47%(9.02%)	3.00%(8.26%)	1.00%(6.13%)
B	61.86%	34.05%	35.49%(57.37%)	21.05%(61.82%)	16.06%(25.96%)	8.02%(23.55%)	10.31%(16.67%)	4.98%(14.63%)
C	62.00%	37.49%	22.65%(36.53%)	14.90%(39.74%)	30.58%(49.32%)	17.56%(46.84%)	8.77%(14.15%)	5.03%(13.42%)
D	47.71%	15.54%	28.25%(59.21%)	10.86%(69.88%)	16.68%(34.96%)	3.99%(25.68%)	2.78%(5.83%)	0.69%(4.44%)
E	0.51%	0.01%	0.39%(76.47%)	0.01%(100.00%)	0.11%(21.57%)	0.00%(0.00%)	0.01%(1.96%)	0.00%(0.00%)
T	39.76%	24.55%	3.61%(9.08%)	2.02%(8.23%)	26.21%(65.92%)	16.51%(67.25%)	9.94%(25.00%)	6.02%(24.52%)

注: 括号中数值为对应各项占该层次该水汽源区总摄取的百分比。

这两者共同造成南海区域 (C) 较孟加拉湾区域 (B) 更大的水汽贡献 (30.58%, 图 6b), 孟加拉湾区域较高的沿途损耗率可能源于中南半岛显著的降水 (图 6a); 气块在西太平洋南部 D 区域的水汽摄取量 (图 7、表 1) 仅次于孟加拉湾 (B) 和南海区域 (C), 但其沿途损耗率 (59.21%) 明显大于南海区域 (36.53%), 与孟加拉湾损耗率 (57.37%) 相当, 虽然区域 D 源区摄取量 (47.71%) 低于 B 区域 (61.86%), 但 D 区域摄取的水汽到达目标区域而未被释放的水汽 (2.78%) 显著小于 B 区域 (10.31%), 导致 D 区域 (16.68%) 和 B 区域 (16.06%) 摄取的水汽对目标降水区贡献相当; 目标降水区域局地水汽摄取量 (39.76%) 略低于西太平洋南部 D 区域 (47.71%), 而高于阿拉伯海区域 (A, 36.31%), 但由于其已经位于目标降水区, 沿途损耗率 (9.08%) 在所有考察的区域中最小, 导致其对目标降水区域的降水水汽贡献 (26.21%) 仅次于南海区域的 30.58%。

可见, 南海区域 (C) 和目标降水区域 (T) 对“威马逊”登陆期间降水贡献较大源于其较高的源区水汽摄取率 (尤其是南海地区 C) 和较低的沿途损耗率 (尤其是目标降水区域 T); 孟加拉湾区域 (B) 水汽摄取量高于西太平洋南部 D 区域, 但前者到达目标降水区域而未被释放的比例明显高于后者, 同时, 两者沿途损耗率相当, 造成两者对目标降水区域的最终贡献也相当; 尽管阿拉伯海区域 (A) 水汽摄取亦较明显, 但由于沿途的显著消耗, 导致其对目标降水区域的最终贡献显著降低。利用 FLEXPART 轨迹追踪和相应水汽源区定量贡

献分析方法, 可以更为清晰和定量地揭示热带气旋降水的水汽来源特征。

6 结论与讨论

本文借助拉格朗日轨迹追踪模式 FLEXPART 和相应的水汽源区定量贡献分析方法, 考察了 2014 年超强台风“威马逊”登陆期间 (2014 年 7 月 17 日 06:00 至 19 日 06:00) 强降水的水汽源地、输送特征和源区定量贡献。与以往常用的环流和水汽通量分析相比, 上述模式和方法可以更为清晰地揭示热带气旋降水相关水汽源地特征。得到的主要结论如下:

(1) 追踪的大量目标气块源自目标降水区的西南侧和东侧, 西南侧气块可追溯到阿拉伯海和孟加拉湾等地区, 且大部分气块来自相对较低层次大气, 高度在输送途中变化不大; 而来自东侧的气块可追溯到 140°E 以东的西太平洋海域, 不同于来自西南侧的目标气块, 来自东侧的气块初始位置位于相对较高层大气, 其高度在输送途中逐渐降低。

(2) 根据目标气块轨迹、聚类平均轨迹以及 $E-P$ 分布特征, 确定出 5 个主要的气块源区, 利用“面源贡献定量估计”方法, 定量估算各水汽源区对目标降水区总水汽释放的贡献, 发现, 区域 C (南海区域) 贡献最大, 目标降水区域 (T) 局地贡献次之, 孟加拉湾 (B) 和西太平洋南部区域 (D) 贡献相当且均低于 T 区域。

(3) 南海区域 (C) 和目标降水区域 (T) 对“威马逊”登陆期间降水贡献较大源于其较高的源区水汽摄取率 (尤其是南海地区 C) 和较低的沿途损耗率 (尤其是目标降水区域 T); 孟加拉湾区域

(B) 水汽摄取量高于西太平洋南部 D 区域, 但前者到达目标降水区域而未被释放的比例明显高于后者, 同时, 两者沿途损耗率相当, 造成两者对目标降水区域的最终贡献也相当; 尽管阿拉伯海区域 (A) 水汽摄取亦较明显, 但由于沿途的显著消耗, 导致其对目标降水区域的最终贡献显著降低。

本文使用的 FLEXPART 轨迹追踪模式和相应水汽源区定量贡献分析方法, 与以往常用的环流和水汽通量分析相比, 可以更为清晰和定量地揭示包括热带气旋在内的各种天气系统降水的水汽来源特征, 相关研究不仅可以加强机理认识, 同时可为相关预测预报提供理论依据 (Huang and Cui, 2015a, 2015b)。以往将上述模式和方法用于热带气旋降水的研究工作相对较少, 本文对“威马逊”登陆期间降水的研究获得了一些有益的结论, 未来应该选取更多热带气旋个例或者不同区域登陆热带气旋个例开展更广泛的分析, 以便加深机理认识; 同时, 未来可以采用不同再分析资料驱动模式或者不同拉格朗日轨迹追踪模式进行分析, 以便进一步增加结论的可靠性; 另外, 本文依据大多数前人研究 (Numaguti, 1999; Trenberth, 1999), 选取了向前追踪时间为 10 天, 而针对追踪时间, 以往工作中也提出了不同看法 (Sun and Wang, 2014), 具体选择几天作为追踪时间, 可能与不同天气系统有关, 这方面未来也可开展相关研究, 以便确定针对热带气旋最为合适的追踪时间。

参考文献 (References)

- Atallah E H, Bosart L F, Ayyer A. 2007. Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern United States [J]. *Monthly Weather Review*, 135(6): 2185–2206. doi:10.1175/MWR3382.1
- 陈斌, 徐祥德, 施晓晖. 2011. 拉格朗日方法诊断 2007 年 7 月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区 [J]. *气象学报*, 69(5): 810–818. Chen Bin, Xu Xiangde, Shi Xiaohui. 2011. Estimating the water vapor transport pathways and associated sources of water vapor for the extreme rainfall event over east of China in July 2007 using the Lagrangian method [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 69(5): 810–818. doi:10.11676/qxb2011.071
- 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]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 27(2): 264–270. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.02.016
- 陈见, 孙红梅, 高安宁, 等. 2014. 超强台风“威马逊”与“达维”进入北部湾强度变化对比分析 [J]. *暴雨灾害*, 33(4): 392–400.
- Chen Jian, Sun Hongmei, Gao Anning, et al. 2014. Comparative analysis of intensity changes between super typhoons Rammasun (1409) and Damrey (0518) during the period of entering the Beibu Gulf [J]. *Torrential Rain Disasters (in Chinese)*, 33(4): 392–400. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.012
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1–3. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoon (in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 1–3.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25(3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25(3): 420–432. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.11
- 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 Meteor. Sin. (in Chinese)*, 62(5): 541–549. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.003
- Chen Lianshou, Li Ying, Cheng Zhengquan. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(5): 967–976. doi:10.1007/s00376-010-8171-y
- 崔晓鹏. 2009. 地面降水诊断方程对降水过程的定量诊断 [J]. *大气科学*, 33(2): 375–387. Cui Xiaopeng. 2009. Quantitative diagnostic analysis of surface rainfall processes by surface rainfall equation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(2): 375–387. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.15
- Cui X P, Li X F. 2006. Role of surface evaporation in surface rainfall processes [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111: D17112. doi:10.1029/2005JD006876
- Cui X P, Xu F W. 2009. A cloud-resolving modeling study of surface rainfall processes associated with landfalling typhoon Kaemi(2006) [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 15(2): 181–191. doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2009.02.007
- 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]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 31(12): 3–9. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2005.12.001
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. *气象学报*, 67(5): 840–850. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Li Ying. 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 67(5): 840–850. doi:10.11676/qxb2009.082
- 邓琳, 端义宏, 高文华, 等. 2016. 超强台风“威马逊”(2014)云微物理特征的模拟与对比分析 [J]. *气象学报*, 74(5): 697–714. Deng Lin, Duan Yihong, Gao Wenhua, et al. 2016. Numerical simulation and comparison of cloud microphysical features of super typhoon

- Rammasun (2014) [J]. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 74(5): 697–714.
- Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. 1992. Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Results from Eskdalemuir, South Scotland [J]. *Atmos. Environ. Part A. General Topics.*, 26(14): 2583–2602. doi:10.1016/0960-1686(92)90111-W
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展 [J]. *气象学报*, 72(5): 969–986. Duan Yihong, Chen Lianshou, Liang Jianyin, et al. 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 72(5): 969–986. doi:10.11676/qxxb2014.085
- 丁治英, 陈久康. 1995. 有效位能和冷空气活动与台风暴雨增幅的研究 [J]. *热带气象学报*, 11(1): 80–85. Ding Zhiying, Chen Jiukang. 1995. A study of relationship between enhancement of typhoon rain and available potential energy and cold air [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 11(1): 80–85. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1995.01.011
- 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 2015. 热带风暴“Bilis” (0604) 暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟 [J]. *大气科学*, 39(2): 422–432. Dai Zhujun, Wang Lijuan, Guan Zhaoyong, et al. 2015. Simulation of water vapor transport paths before and after increased rainstorms from tropical storm Bilis (0604) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(2): 422–432. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13340
- Guo X, Tan Z M. 2017. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm intensity [J]. *Geophysical Research Letters*, 44(9): 4324–4331. doi:10.1002/2017GL073680
- Hua Cong, Liu Qijun. 2013. Numerical simulation of cloud microphysical characteristics of landfall typhoon Krosa [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 19(3): 284–296. doi:10.16555/j.1006-8775.2013.03.009
- Huang Y J, Cui X P. 2015a. Moisture sources of an extreme precipitation event in Sichuan, China, based on the Lagrangian method [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 16(2): 177–183. doi:10.1002/asl2.562
- Huang Y J, Cui X P. 2015b. Moisture sources of torrential rainfall events in the Sichuan Basin of China during summers of 2009–13 [J]. *J. Hydrometeorol.*, 16(4): 1906–1917. doi:10.1175/jhm-d-14-0220.1
- Khain A, Lynn B, Dudhia J. 2010. Aerosol effects on intensity of landfalling hurricanes as seen from simulations with the WRF model with spectral Bin microphysics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(2): 365–384. doi:10.1175/2009JAS3210.1
- Kim H S, Kim J H, Ho C H, et al. 2011. Pattern classification of typhoon tracks using the fuzzy *c*-means clustering method [J]. *Journal of Climate*, 24(2): 488–508. doi:10.1175/2010JCLI3751.1
- Liu M F, Vecchi G A, Smith J A, et al. 2018. Projection of landfalling-tropical cyclone rainfall in the eastern United States under anthropogenic warming [J]. *J. Climate*, 31(18): 7269–7286. doi:10.1175/jcli-d-17-0747.1
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究 [J]. *气象学报*, 59(5): 602–615. Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 59(5): 602–615. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.05.010
- Meng W G, Wang Y Q. 2016a. A diagnostic study on heavy rainfall induced by typhoon Utor (2013) in South China. Part I. Rainfall asymmetry at landfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(21): 12781–12802. doi:10.1002/2015JD024646
- Meng W G, Wang Y Q. 2016b. A diagnostic study on heavy rainfall induced by landfalling typhoon Utor (2013) in South China. Part II. Postlandfall rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(21): 12803–12819. doi:10.1002/2015JD024647
- Ming J, Zhang J A, Rogers R F, et al. 2014. Multiplatform observations of boundary layer structure in the outer rainbands of landfalling typhoons [J]. *J. Geophys. Res.*, 119(13): 7799–7814. doi:10.1002/2014jd021637
- Numaguti A. 1999. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian Continent: Experiments using an atmospheric general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 104(D2): 1957–1972. doi:10.1029/1998jd200026
- 潘旻, 沈艳, 字婧婧, 等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [J]. *气象学报*, 70(6): 1381–1389. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 70(6): 1381–1389. doi:10.11676/qxxb2012.116
- Qu Y, Chen B J, Ming J, et al. 2017. Aerosol impacts on the structure, intensity, and precipitation of the landfalling typhoon Saomai (2006) [J]. *J. Geophys. Res.*, 122(21): 11,825–11,842. doi:10.1002/2017JD027151
- Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G. 1998. Validation of the lagrangian particle dispersion model flexpart against large-scale tracer experiment data [J]. *Atmos. Environ.*, 32(24): 4245–4264. doi:10.1016/s1352-2310(98)00184-8
- Stohl A, Eckhardt S, Forster C, et al. 2002. On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport [J]. *J. Geophys. Res.*, 107, D23: 4684. doi:10.1029/2001JD001396
- Stohl A, James P. 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. *J. Hydrometeorol.*, 5(4): 656–678. doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0656:alaota>2.0.co;2
- Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(9): 2461–2474. doi:10.5194/acp-5-2461-2005
- Stohl A, James P. 2005. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part II: Moisture transports between earth's ocean basins and river catchments [J]. *J. Hydrometeorol.*, 6(6): 961–984. doi:10.1175/jhm470.1
- Stohl A, Forster C, Sodemann H. 2008. Remote sources of water vapor forming precipitation on the norwegian west coast at 60°N A tale of hurricanes and an atmospheric river [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D05102. doi:10.1029/2007JD009006
- Sun B, Wang H J. 2014. Moisture sources of semiarid grassland in China using the Lagrangian particle model FLEXPART [J]. *Journal*

- of *Climate*, 27(6): 2457–2474. doi:10.1175/JCLI-D-13-00517.1
- Sun B, Wang H J. 2015. Analysis of the major atmospheric moisture sources affecting three sub-regions of East China [J]. *Int. J. Climatol.*, 35(9): 2243–2257. doi:10.1002/joc.4145
- 沈艳, 潘昶, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 [J]. *大气科学学报*, 36(1): 37–46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. *J. Nanjing Inst. Meteorol. (in Chinese)*, 36(1): 37–46. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.005
- Trenberth K E. 1999. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation [J]. *J. Climate*, 12(5): 1368–1381. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1368:amrroa>2.0.co;2
- Wang L J, Dai Z J, He J L. 2017. Numerical simulation of the relationship between the maintenance and increase in heavy rainfall of the landing tropical storm Bilis and moisture transport from lower latitudes [J]. *J. Trop. Meteorol.*, 23(1): 47–57.
- Wang M J, Zhao K, Xue M, et al. 2016. Precipitation microphysics characteristics of a typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(20): 12415–12433. doi:10.1002/2016JD025307
- 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(5): 1001–1015. doi:10.1175/1520-0434(2003)017<1001:RSAWTH>2.0.CO;2
- 徐洪雄, 徐祥德, 陈斌, 等. 2013. 双台风生消过程涡旋能量、水汽输送相互影响的三维物理图像 [J]. *气象学报*, 71(5): 825–838. Xu Hongxiong, Xu Xiangde, Chen Bin, et al. 2013. The structure change and energy moisture transport physical image in the development and decay processes of binary typhoon vortices [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 71(5): 825–838. doi:10.11676/qxxb2013.069
- Xu Huiyan, Liu Rui, Zhai Guoqing, et al. 2016. Torrential rainfall responses of typhoon Fitow (2013) to radiative processes: A three-dimensional WRF modeling study [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(23): 14,127–14,136. doi:10.1002/2016jd025479
- 郑艳, 蔡亲波, 程守长, 等. 2014. 超强台风“威马逊”(1409)强度和降水特征及其近海急剧加强原因 [J]. *暴雨灾害*, 33(4): 333–341. Zheng Yan, Cai Qinbo, Cheng Shouchang, et al. 2014. Characteristics on intensity and precipitation of super typhoon Rammasun (1409) and reason why it rapidly intensified offshore [J]. *Torrential Rain Disasters (in Chinese)*, 33(4): 333–341. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.005