

投稿信

我国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一，热带气旋（尤其是登陆热带气旋）引发的大风、暴雨和风暴潮可造成严重灾害，与大风和风暴潮相比，热带气旋暴雨及其次生灾害影响范围更大，更为普遍，相关机理研究和预警、预报一直是国内、外学者关注的重点和相关业务预报的难点，尽管已取得了众多可喜的进展，但热带气旋暴雨的预报水平距离需求仍存在很大差距，根本原因在于，目前对此类降水形成的物理过程和机制仍然缺乏全面的理解和认识。基于 WRF 模式的三维降水诊断方程全面考虑了三维水汽辐散/辐合、地面（海面）蒸发等宏观水汽收支相关过程，以及云尺度动力过程和云微物理过程与地面降水强度的联系，是定量研究实际大气降水物理过程和机制的一个十分有力的工具。

本文利用 WRF 模式，对 1409 号超强台风“威马逊”发展演变及登陆过程开展了高分辨率数值模拟，结合三维降水诊断方程和降水效率定义，重点针对“威马逊”临岸迅速加强为超强台风并登陆我国华南沿海这一时段的强降水物理过程开展了模拟诊断研究。模拟验证显示，WRF 模式较好地模拟再现了“威马逊”的西北向移动路径、强度和演变、高低空环流特征和演变以及强降水，积分时段内，绝大多数时段的路径差保持在 60 公里内，模拟的“威马逊”在我国华南沿海的三次登陆时间和地点与实况十分接近。进一步针对其主体环流圈（以“威马逊”海平面最低气压为中心，以近地面 10 米高度上 17 ms^{-1} 大风圈平均半径为半径所围成的圆形区域定义为“威马逊”的主体环流和降水区域）内的强降水物理过程和机制开展了深入细致的模拟诊断研究。结果表明，“威马逊”主体环流区域内一直维持很强的平均降水强度（ P_s ），陆地和海洋格点 P_s 的相对贡献基本呈反向变化，登陆期间陆面摩擦辐合的增强，有利于水汽更多地向陆地区域辐合（正值水汽通量辐散/辐合率 Q_{WVA} ），造成登陆前短时段内陆地格点上空局地大气增湿（水汽局地变化率 Q_{WVL} 为负值），借助云微物理过程快速转化为液相和固相云水凝物，促使陆地上空降水云系快速发展和降水强度增强，而当环流中心位于北部湾洋面时，海洋格点 Q_{WVA} 的相对贡献显著增强，登陆期间下垫面的变化导致水汽相关物理过程的明显变化，造成降水云系和强降水中心的显著变化；与陆地格点的表面蒸发率 Q_{WVE} 相比，海洋下垫面 Q_{WVE} 的作用更强，变化更明显；“威马逊”主体环流区域内一直维持高降水效率，从主体环流圈接触陆地开始，陆地格点降水效率迅速升高，而海洋格点降水效率在绝大多数积分时段内维持较高数值，只在第二和第三次登陆后有所降低。

以往将上述模式和方法用于热带气旋主体环流圈降水，并分别探讨其中陆地和海洋相对贡献的研究工作相对较少，本文对“威马逊”强降水物理过程的模拟诊断研究获得了一些有益的结论，有助于加深了对热带气旋登陆期间强降水物理过程的深入理解和认识。

薛一迪，崔晓鹏

2019 年 10 月 10 日星期四

“威马逊”(1409)强降水物理过程模拟诊断研究

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院重点实验室, 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 WRF 模式, 结合三维降水诊断方程和降水效率定义, 针对 1409 号超强台风“威马逊”临岸迅速加强为超强台风并登陆我国华南沿海这一时段的强降水物理过程开展了高分辨率数值模拟诊断研究。结果表明, “威马逊”主体环流区域内一直维持很强的平均降水强度 (P_s), 陆地和海洋 P_s 的相对贡献基本呈反向变化, 登陆期间陆面摩擦辐合增强, 有利于水汽更多地向陆地区域辐合 (正值水汽通量辐散/辐合率 Q_{WVA}), 造成登陆前短时段内陆地上空局地大气增湿 (水汽局地变化率的负值 Q_{WVL} , 为负值), 借助云微物理过程快速转化为液相和固相云水凝物 (液相和固相云水凝物局地变率的负值 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} , 为负值), 促使陆地上空降水云系快速发展和降水强度增强, 而当环流中心位于北部湾洋面时, 海洋 Q_{WVA} 的相对贡献显著增强, 登陆期间下垫面的变化导致水汽相关物理过程明显变化, 进而造成降水云系和强降水中心的显著变化; 与陆地相比, 海洋 Q_{WVE} (表面蒸发率) 的作用更强, 变化更明显; “威马逊”影响华南沿海期间, 主体环流圈内平均的 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} 均基本呈现“正-负-正”的变化特征, 当环流中心位于北部湾洋面 (三次登陆时期) 时水凝物含量以增加 (减少) 为主; “威马逊”主体环流区域内一直维持高降水效率, 从主体环流圈接触陆地开始, 陆地降水效率迅速升高, 而海洋降水效率在绝大多数积分时段内维持较高数值, 只在第二和第三次登陆后有所降低。

关键词 登陆热带气旋 主体环流圈 强降水物理过程 降水效率 三维降水诊断方程

文章编号 2019224A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19224

Diagnostic and Numerical Study on Physical Process of Strong Rainfall Associated with Rammasun (1409)

XUE Yidi^{1,3*}, 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, China

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The development evolution and landfall process of supertyphoon Rammasun (1409) was investigated using high-resolution simulation data produced by the Weather Research and

收稿日期 2019-10-10 **网络预出版日期**

资助项目 国家重点基础研究发展计划973项目2015CB452804

Funded by National Basic Research Program of China (2015CB452804)

***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

Forecasting (WRF) model. The diagnostic and numerical study on physical process of strong rainfall was focusing on the period of the rapid enhancement and the landfall on South China Sea of Rammasun, using the three-dimensional surface precipitation equations and the definition of precipitation efficiency. The results showed that the strong average precipitation intensity (P_s) had been maintained in the main circulation area of Rammasun, and the relative contribution of P_s over the land and ocean was basically reversed. The enhancement of land surface friction was conducive to more water vapor convergence to the land (positive value of moisture advection Q_{WVA}), resulting in local atmospheric humidification over the land within a short period before the landfall (negative value of local change rate of water vapor Q_{WVL} is negative). Water vapor was rapidly transformed into liquid-phase and ice-phase hydrometeors by means of cloud-related microphysical processes (negative value of local change rate of liquid-phase and ice-phase hydrometeors, is negative), which promoted the rapid development of clouds and the intensification of precipitation intensity over the land. When the center of the circulation was located in the Beibu Gulf, the relative contribution of Q_{WVA} over the ocean was significantly enhanced. The change of the underlying surface during the landfall period led to remarkable changes in the moisture-related microphysical processes, causing significant changes in the cloud system and the strong precipitation center. The surface evaporation (Q_{WVE}) over the ocean made more effect and more obvious changes, compared with the one over the land. The average Q_{CLL} and Q_{CIL} in the main circulation were basically “positive – negative - positive” within the period of Rammasun moving to the coastal region of South China. The content of hydrometeors was mainly increased (decreased) when the center of the circulation was located in the Beibu Gulf (during the landfall). The high precipitation efficiency had been maintained in the main circulation area of Rammasun. From the contact of the main circulation to the land, the precipitation efficiency over the land rapidly increased, while the precipitation efficiency over the ocean maintained a high value during most of the integration period, but reduced only after the second and third landfall.

Key Words Landfalling tropical cyclone, Main circulation ring, The physical process of strong precipitation, Precipitation efficiency, Three-dimensional WRF-based surface precipitation equation

1 引言

我国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一，热带气旋（尤其是登陆热带气旋）引发的大风、暴雨和风暴潮可造成严重灾害，与大风和风暴潮相比，热带气旋暴雨及其次生灾害影响范围更大，更为普遍，相关机理研究和预警、预报一直是国内、外学者关注的重点和相关业务预报的难点(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; 崔晓鹏, 2009; 程正泉等, 2009; Chen et al., 2010; 丛春华等, 2011; Meng et al., 2016a, 2016b; Wang et al., 2016; Xu et al., 2016; Wang et al., 2017; Liu et al., 2018)，尽管已取得了众多可喜的进展，但热带气旋暴雨的预报水平距离需求仍存在很大差距，根本原因在于，目前对此类降水形成的物理过程和机制仍然缺乏全面的理解和认识。降水是大气宏观动、热力过程和微观云物理过程复杂相互作用的结果。Gao et al. (2005) 基于二维云尺度模式，将大气水汽收支与云中水凝物收支相结合，并与地面降水强度建立联系，推导出二维地面降水诊断方程，该方程将与降水直接相关的宏观水汽收支过程以及微观云中水凝物收支过程结合起来，可对降水物理过程进行更加全面和细致的诊断研

究, 已被广泛应用于各种类型降水过程的机理分析中 (Cui and Li, 2006, 2009, 2011; 崔晓鹏, 2009)。Huang et al. (2016) 在以上研究的基础上, 重新推导并建立了基于 WRF 模式的三维降水诊断方程, 并对四川暴雨过程中地面蒸发作用的影响开展了机理研究, 指出, 宏观水汽相关过程对降水起着主导作用, 云尺度动力和微观云物理过程亦有重要贡献, 而地面蒸发的变化对上述两者均有显著影响。该三维方程 (Huang et al., 2016) 从 WRF 模式原始方程组中的水汽和水凝物变化方程出发, 全面考虑了三维水汽辐散/辐合、地面(海面)蒸发等宏观水汽收支相关过程, 以及云尺度动力过程和云微物理过程与地面降水强度的联系, 是定量研究实际大气降水物理过程和机制的一个十分有力的工具 (刘圣楠和崔晓鹏, 2018)。

2014 年第九号超强台风“威马逊”令人印象深刻, 其带来的强风和暴雨造成华南大范围农作物受灾, 基础设施严重损毁, 约 1100 万人受灾, 数十人死亡和失踪 (薛一迪和崔晓鹏, 2019)。“威马逊”登陆我国华南沿海前快速增强为超强台风, 7 月 18 日 06 时, 中心附近地面最大风速达 72 m/s, 中心最低海平面气压达 888 hPa, 并先后在海南文昌 (约 18 日 7 时 30 分)、广东徐闻 (约 18 日 11 时 30 分) 和广西防城港 (约 18 日 23 时) 三次登陆 (薛一迪和崔晓鹏, 2019)。鉴于“威马逊”的显著影响, 气象学者迅速展开研究, 有学者指出“威马逊”近海突然加强的有利条件涉及多个方面, 比如, 适宜的海面温度、弱的环境风垂直切变、深厚的暖涡、低层辐合与高层辐散等 (郑艳等, 2014; 陈见等, 2014); 由于下垫面的变化, 摩擦耗散小同样是“威马逊”进入北部湾后强度下降幅度减小的重要原因之一 (陈见等, 2014); 邓琳等 (2016) 利用中尺度数值模式 WRF, 模拟分析了“威马逊”雨滴谱型的演变特征以及不同云微物理方案下云物理源、汇项对云中雨滴含量及其垂直分布的重要贡献。

本文将在前人研究基础上, 利用 WRF 模式 (Skamarock et al., 2008) 和三维降水诊断方程 (Huang et al., 2016), 重点针对“威马逊”临岸迅速加强为超强台风并登陆我国华南沿海这一时段的强降水物理过程开展高分辨率模拟诊断研究。本文第二部分简要介绍所用资料、数值模拟方案和三维降水诊断方程 (Huang et al., 2016); 第三部分利用观测资料对高分辨率模拟结果进行验证; 第四部分利用三维降水诊断方程结合模拟资料, 对“威马逊”强降水物理过程展开诊断分析; 最后一部分是结论与讨论。

2 资料、数值模拟方案和三维降水诊断方程简介

2.1 资料

本文所用资料主要包括: (1) 美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 的 FNL 全球分析资料 (Final Operational Global Analysis), 时间分辨率为 6 小时, 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 垂直 26 层; (2) NCEP 实时全球高分辨率日平均海温资料 (RTG_SST_HR), 空间分辨率为 $1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$; (3) 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, 空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (潘旸等, 2012; 沈艳等, 2013); (4) 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。

此外, 文中所提及的时间均为世界时。

2.2 数值模拟方案

本文利用中尺度数值模式 WRF (V3.5.1) (Skamarock et al., 2008), 模拟使用 3 重嵌套网格 (图 1), 水平分辨率分别为 54, 18 和 3 km, 格点数分别为 280×175 , 256×256 和 925×805 , 其中, 最外两层 (d01 和 d02) 采用双向嵌套, d03 采用单向嵌套 (ndown), 最外层模拟区域的初始场和边界条件由 FNL 全球分析资料计算得到, 模式海温资料由 NCEP 实时

全球高分辨率日平均海温资料 (RTG_SST_HR) 提供, 第二层 (d02) 网格模拟结果为最内层 (d03) 提供初始场和边界条件; 模式垂直层次为 50 层, 模式顶为 50 hPa; 模拟采用如下主要物理过程参数化方案: Goddard 微物理参数化方案、YSU (Yonsei University) 边界层参数化方案、KF (Kain-Fritsch) 积云对流参数化方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案等, 其中, 最内层 (d03) 未使用积云对流参数化方案; d01 和 d02 从 2014 年 7 月 16 日 00 时启动, 积分至 7 月 19 日 06 时结束, 共积分 78 小时, 而最内层 (d03) 从 7 月 16 日 06 时启动, 积分至 7 月 19 日 06 时结束, 共积分 72 小时。

需要指出的是, “威马逊” 登陆期间 (2014 年 7 月 17 日 06 时-19 日 06 时) 强降水水汽来源和源区定量贡献的分析研究 (薛一迪和崔晓鹏, 2019) 表明, “威马逊” 降水区的目标气块主要来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海和西北太平洋等地区, 因此, 在模拟区域设置时, 将最外层区域 (d01) 尽量扩大, 基本覆盖了可能影响 “威马逊” 发展演变的主要环流系统所在区域, 以尽可能保证模式对热带气旋移动路径和强度等的模拟效果, 而内层区域 (d03) 则主要覆盖了 “威马逊” 西北向移动至我国华南沿海, 并先后在海南省、广东省和广西省登陆所经过的区域; 同时, d03 区域除 WRF 模式常规输出之外, 还增加输出了三维降水诊断方程相关项, 且输出时间分辨率为 1 小时, 以满足本文研究需要。

图 1 模拟区域设置

Fig.1 Model domain configuration

2.3 三维降水诊断方程

Huang et al. (2016) 利用 WRF 模式中的水物质 (水汽和水凝物) 预报方程 (Skamarock et al., 2008), 推导得到了三维降水诊断方程。该方程可简单表示为:

$$Ps = Q_{wv} + Q_{cm}, \quad (1)$$

由上述方程可知, 地面降水率或降水强度 (Ps) 由水汽相关过程变率 (Q_{wv}) 和水凝物相关过程变率 (Q_{cm}) 共同决定。其中, 水汽相关过程变率表示为:

$$Q_{wv} = Q_{wvl} + Q_{wva} + Q_{wvd} + Q_{wve}, \quad (2)$$

而水凝物 (云滴、雨滴、冰晶、雪、霰等) 相关过程变率表示为:

$$Q_{cm} = Q_{cLL} + Q_{cLA} + Q_{cLD} + Q_{cIL} + Q_{cIA} + Q_{cID}, \quad (3)$$

上述方程 (1) - (3) 各项的具体表达式和物理意义详见 Huang et al. (2016) 和王晓慧等 (2019)。

3 模拟验证

利用中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋 “威马逊” 最佳路径数据与 d03 区域模拟的 “威马逊” 移动路径对比 (图 2a) 显示, 模式总体上较好地模拟出了此时段 “威马逊” 西北向移动路径, d03 积分时段内, 路径偏差控制在 90 公里以内, 绝大多数时次的路径差控制在 60 公里以内, 尤其是积分后半段, 路径差基本维持在 40 公里以内 (图 2b); 观测路径显示, “威马逊” 西北行逼近华南沿海, 并先后三次在我国登陆, 模拟的 “威马逊” 三次登陆时刻和地点与实况十分接近 (图 2)。

从强度对比 (图 2c) 来看, 模式积分时段内, 观测和模拟的 “威马逊” 中心附近最低海平面气压均呈现先迅速降低、后迅速升高的变化特征, “威马逊” 登陆我国前快速增强过程以及登陆后减弱过程得到了较好的模拟再现, 但可能由于模拟最高水平分辨率 (3km) 仍然较粗等原因, 积分时段内绝大多数情况下, 模拟的 “威马逊” 中心附近最低海平面气压高

于实况（模拟的热带气旋强度偏弱），而登陆后最低海平面气压升高速度低于实况（模拟的热带气旋登陆后衰减偏慢），模拟与实况的海平面气压均在 18 日 06 时左右达到最低，分别达 910 hPa 和 888 hPa。从“威马逊”近地面最大风速时间演变特征对比（图 2c）也可以看出，模拟的“威马逊”近地面最大风速变化也与实况具有较好的一致性，积分时段内，风速先增大后减小，模拟的风速总体上低于实况（模拟的“威马逊”强度偏弱），最大值均出现在 18 日 06 时左右（模拟值为 61 m/s，实况值为 72 m/s）。尽管模拟与实况“威马逊”强度量值存在一些差异，但两者均达到了超强台风级别，且均维持了较长时间（模拟的“威马逊”在超强台风级维持了 20 小时左右，而实况“威马逊”维持了近 30 小时）。

图 2 2014 年 7 月 16 日 06 时-19 日 06 时(a)实况（实线）与模拟（虚线，分辨率 3 km）的“威马逊”移动路径，(b)观测与模拟的路径偏差（单位：km）以及 (c)观测（实线）与模拟（虚线）的热带气旋中心附近最低海平面气压（实心点线，单位：hPa）和近地面最大风速（空心点线，单位：m s⁻¹）

Fig.2 (a) The observed (solid lines) and simulated (dashed lines, 3 km horizontal resolution) tracks of Rammasun. (b) Distance deviation of observed and simulated tracks (units: km). (c) Time series of minimum sea level pressure (units: hPa) and maximum wind speed (units: m s⁻¹) of observed (solid lines) and simulated (dashed lines) at 6 h intervals from 0600 UTC 16 July to 0600 UTC 19 July 2014

图 3 FNL 分析资料（a1-a4，分辨率为 1°）与模拟（b1-b4，分辨率为 54 km）的 500 hPa 位势高度场（黑色等值线，单位：gpm，加粗黑线代表 5880 gpm）、850 hPa 风矢量（红色箭头，大于等于 10 m s⁻¹）和 200 hPa 风矢量（蓝色风羽，大于等于 30 m s⁻¹）。（a1, b1）2014 年 7 月 16 日 06 时，（a2, b2）2014 年 7 月 17 日 06 时，（a3, b3）2014 年 7 月 18 日 06 时，（a4, b4）2014 年 7 月 19 日 06 时

Fig.3 500-hPa geopotential height (black contour, the thick line indicates 5880 gpm, units: gpm), 850-hPa wind field (red vector, $\geq 10 \text{ m s}^{-1}$, units: m s⁻¹) and 200-hPa wind field (blue wind bar, $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$, units: m s⁻¹) from the National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data (NCEP FNL, a1-a4) and numerical simulation data with horizontal resolution of 54 km (b1-b4) at (a1,b1) 0600 UTC 16 July 2014, (a2, b2) 0600 UTC 17 July 2014, (a3, b3) 0600 UTC 18 July 2014, (a4, b4) 0600 UTC 19 July 2014

利用 NCEP/FNL 分析资料和 d01 模拟结果（分辨率 54 km）进行高低空环流对比（图 3），积分时段内，副热带高压主体基本稳定在我国华东东面的西北太平洋洋面上，模式积分初期（2014 年 7 月 16 日 06 时，图 3 a1），“威马逊”刚刚越过菲律宾，进入南海，中高纬地区多西风槽活动，一个西风槽从我国东北地区向西南伸展，槽底位于我国西南地区，此时刻，副高西侧部分夹在“威马逊”和北部西风槽之间，与两者之间存在明显相互作用，相对稳定的引导“威马逊”向西北偏西方向移动，索马里越赤道气流经过阿拉伯海、印度半岛，进入孟加拉湾，其北侧部分受到孟加拉湾气旋影响转而向北，影响印度等地，而南侧少部分西南气流继续向东进入南海，汇入“威马逊”环流，并在其环流东北侧，副高和“威马逊”之间向西北侧的广东省和海南省附近输送，模式很好地再现了上述环流特征（图 3 b1），FNL 数据和模拟结果（图 3 a1、b1）在副高主体南侧的 5880 位势米等值线均呈现出明显的向北凹陷特征，1410 号热带气旋“麦德姆”便在此处发生、发展；17 日 06 时（图 3 a2、b2），“威

“威马逊”进入南海中北部，即将进入快速增强时段（图 2c），伴随孟加拉湾气旋逐渐减弱，引导更多西南暖湿气流进入南海并向西北方向输送，副高依然相对稳定，引导“威马逊”稳定西北行，但同期副高北侧西风槽明显减弱并东移；18 日 06 时（图 3 a3、b3），模拟和实况“威马逊”均发展到最强阶段（图 2c），并携强风暴雨即将在海南省东北部登陆（图 2a），副高主体依然强大稳定，但受到超强台风“威马逊”环流影响，其西脊点略有北抬，副高北侧西风槽已明显东移，其西侧高压脊即将与强大的副热带高压在我国陆地上部分贯通，源自索马里越赤道气流的西南暖湿空气显著向东汇入南海上的“威马逊”环流中，同期，105E 附近出现少量越赤道气流也加入其中，共同向“威马逊”环流输送水汽，支撑其强降水，而此时，热带气旋“麦德姆”也在不断发展、加强和西移；19 日 06 时（图 3 a4、b4），“威马逊”已完成在我国的三次登陆，环流中心位于广西南部边界附近（图 2a），强度明显减弱（图 2c），副高依然强大，其在我国陆地上的部分与北侧高压脊径向贯通，南北向分布控制我国大陆中东部地区，伴随“威马逊”的登陆减弱以及东侧“麦德姆”的发展加强，西南暖湿气流更多地向东输送进入“麦德姆”环流，为其强降水提供水汽。需要指出的是，尽管从环流形势（图 3）上看，暖湿气流可以一直追踪到南半球经索马里的越赤道气流，以及南海南部的越赤道气流和西太平洋等地的水汽源区，但源区定量贡献分析显示（薛一迪和崔晓鹏，2019），由于水汽输送过程中的沿途损耗（降水）等原因，对“威马逊”强降水最主要的水汽贡献主要来自于南海区域、孟加拉湾和西太平洋南部海域。在分析研判降水水汽来源时，应更多从拉格朗日轨迹追踪角度，结合源区定量贡献分析方法进行分析（Huang and Cui, 2015a, 2015b; 薛一迪和崔晓鹏，2019）。

从环流形势及其演变的对比分析来看（图 3），在 3 天多的积分过程中，模式较好地模拟再现了影响“威马逊”移动、发展和登陆的主要高、低空环流系统的演变特征，从而使得模拟的“威马逊”移动路径与实况差异较小（图 2a、b），尤其是登陆后期，模拟与实况的三次登陆点和登陆时刻十分接近。

图 4 实况（a1-a6）与模拟（b1-b6，分辨率 3km）的 6 小时累积降水量分布（单位：mm）。（a1, b1）2014 年 7 月 16 日 12-18 时，（a2, b2）2014 年 7 月 17 日 00-06 时，（a3, b3）2014 年 7 月 17 日 12-18 时，（a4, b4）2014 年 7 月 18 日 00-06 时，（a5, b5）2014 年 7 月 18 日 12-18 时，（a6, b6）2014 年 7 月 19 日 00-06 时

Fig.4 Six-hours accumulated precipitation (units: mm) from observed (a1-a6) and simulated data with horizontal resolution of 3 km (b1-b6). (a1, b1) 1200 UTC 16 July to 1800 UTC 16 July, (a2, b2) 0000 UTC 17 July to 0600 UTC 17 July, (a3, b3) 1200 UTC 17 July to 1800 UTC 17 July, (a4, b4) 0000 UTC 18 July to 0600 UTC 18 July, (a5, b5) 1200 UTC 18 July to 1800 UTC 18 July, (a6, b6) 0000 UTC 19 July to 0600 UTC 19 July

从实况与模拟的 6 小时累积降水量分布与演变（图 4）对比来看，模式整体上很好地模拟再现了“威马逊”偏西北向移动及登陆期间降水的总体分布和演变特征。2014 年 7 月 16 日 12-18 时（图 4 a1、b1），“威马逊”刚刚进入南海不久（图 2a），强降水主要位于其环流中心附近，北侧存在较明显的螺旋雨带，我国西南云贵地区存在较明显的带状降水区（图 4 a1），模式很好地再现了上述主要特征，对云贵附近的中尺度雨带发展与演变也展现出较好的模拟能力（图 4 b1）；随后，“威马逊”继续西北行，而伴随其强度逐渐增强（图 2c），降水区范围有所收缩，环流中心附近强降水非对称分布特征明显，我国西南云贵区域的中尺度雨带明显瓦解和消散（图 4 a2、a3），模拟的降水分布特征（图 4 b2、b3）与实况（图 4 a2、a3）较为一致；接近第一次登陆时段（18 日 00-06 时，图 4 a4、b4），“威马逊”即将发展

到登陆我国前的最强时段（图 2c），实况强降水中心位于海南岛东侧洋面（图 4 a4），模拟强降水中心位置与实况较为一致，而强度明显更强（图 4 b4），此外，实况（图 4 a4）中，位于广东沿海和海南岛南侧以及北部湾附近的外围螺旋雨带降水也得到了较好的模拟再现（图 4 b4）；之后，“威马逊”开始了在我国的三次登陆过程，18 日 12-18 时（图 4 a5、b5），“威马逊”环流中心越过雷州半岛进入北部湾（图 2a），强度较明显减弱，但随后短暂时段（18 日 18-19 日 00 时，图 2c）内，可能由于进入北部湾（图 2a）摩擦减弱等因素影响（陈见等, 2014），强度衰减变缓，之后，伴随第三次登陆，强度又快速衰减（图 2），三次登陆期间，“威马逊”在广东、海南和广西等地带来了局地强降水（图 4 a5、a6），而模式对“威马逊”登陆期间的主要降水落区和局地强降水中心位置亦给出了很好的模拟再现（图 4 b5、b6）。需要指出的是，模拟（图 4 b1-b6）的降水中心强度（尤其是海上的降水）在绝大多数情况下均明显强于实况（图 4 a1-a6），这可能是由于，本文所用实况降水资料来自中国地面自动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，而该数据集在海上的部分主要源自 CMORPH 卫星反演降水；以往研究指出，CMORPH 卫星降水产品能够较为合理地描述热带气旋降水总体空间分布及其演变特征，但降水中心量值普遍偏低（潘旸等, 2011），降水强度存在明显低估（Sapiano and Arkin, 2009），尤其对于强降水（Yu et al., 2009）。因此，总体而言，模式很好地模拟再现了“威马逊”西北行及在我国三次登陆期间降水的总体分布特征和演变以及强降水中心的分布与变化，而海上降水极值中心强度与实况相比偏强，可能源于卫星反演降水产品固有的不足之处。

综合前述“威马逊”路径、强度、高低空环流和降水的对比验证可见，模式较好的模拟再现了此次热带气旋发展、演变和登陆过程及其降水特征，高分辨率模拟资料可用于进一步的降水过程诊断与机理分析。

4 “威马逊”强降水物理过程模拟诊断分析

4.1 研究区域选取

为了分析“威马逊”的强降水物理过程，首先需要定义热带气旋的环流区域。关于热带气旋环流区域有多种定义方法，一些研究将距离热带气旋中心固定半径的圆形区域范围内的降水定义为热带气旋降水（Lau et al, 2008；王晓慧等, 2019a, 2019b），还有研究将 850 hPa 切向风涡度为零的闭合等值线所围区域定义为热带气旋的外围环流尺度（吴联要和雷小途, 2012），或将 17 m s^{-1} 风速半径所围区域作为热带气旋主体环流区域（Chan and Chan, 2016），亦有研究根据热带气旋海上移动时段不同高度的雷达反射率因子分布，定义热带气旋环流和降水区（Yang et al, 2011），本文将采用与 Chan and Chan（2016）相类似的方法，定义“威马逊”的主体环流与降水区域。

图 5 模拟的近地面 10 米风速为 17 ms^{-1} 的格点与“威马逊”中心距离（单位：km）的盒须图，蓝点代表平均值，矩形中间的横线为中位数，矩形上（下）边代表 75（25）百分位

Fig.5 The box plot of the radius of gale-force (17 m s^{-1}) 10-m winds from the TC center. The blue point represents the average. The horizontal line in the middle of the rectangle denotes the median, and the upper (lower) side of the rectangle represents the 75 (25) percentile

D03 区域模拟的近地面 10 米风速为 17 ms^{-1} 的格点与“威马逊”中心距离的盒须图（图 5）显示，整个积分时段内（2014 年 7 月 16 日 06 时-19 日 06 时），各时刻近地面 10 米风速为 17 ms^{-1} 的各个格点与该时刻“威马逊”中心距离（R）的分布相对集中，显示出积分时段

内“威马逊”较为对称的结构特征；由图 5 还可以看到，各时刻平均值与中位数相近；本文将近地面 10 米风速为 17 ms^{-1} 的格点与热带气旋中心距离的平均值取为各时刻“威马逊”环流大风圈半径，进而确定出“威马逊”的主体环流与降水区域，即，以“威马逊”海平面最低气压为中心，以上述大风圈半径为半径所围成的圆形区域，定义为“威马逊”的主体环流和降水区域，积分时段内（图 5），大风圈半径先增大，而当“威马逊”主体环流圈开始接触陆地时（17 日 20 时左右，见图 6），该半径开始减小，主体环流圈开始收缩；大风圈半径变化范围在 120-269 公里之间。下面利用模式最内层（水平分辨率 3 km，时间分辨率 1 小时）的输出资料，结合三维降水诊断方程，对“威马逊”主体环流圈内的强降水物理过程进行诊断分析。

4.2 降水方程收支

图 6 2014 年 7 月 16 日 18 时至 19 日 06 时大风圈区域平均的地面降水率 (P_s)、水汽收支相关变率 (Q_{wv})、云水凝物收支相关变率 (Q_{cm}) (单位: mm h^{-1})，以及“威马逊”大风圈环流区域内陆地/海洋格点占比 (单位: %) 的时间演变。红色粗实线：“威马逊”大风圈环流区域平均值；绿色短划线：“威马逊”大风圈环流区域内陆地格点的相对贡献；蓝色短划线：“威马逊”大风圈环流区域内海洋格点的相对贡献；图中第一条黑色竖实线代表“威马逊”大风圈环流区域开始接触陆地的时刻，其他三条黑色竖实线分别对应“威马逊”三次登陆我国的时刻

Fig.6 Time series of area averaged (in the R17 domain) surface precipitation rate (P_s), the rates of moisture-related processes (Q_{wv}), cloud-related processes (Q_{cm}) (units: mm h^{-1}) and the ratios of land (green dashed line), sea (blue dashed line) grid number to all grid number in the R17 domain (units:%) from 1800 UTC 16 July 2014 to 0600 UTC 19 July 2014. The red solid lines represent the area averaged values in the R17 domain, while the green (blue) dashed lines denote the relative contribution of land (sea) grid in the R17 domain. The first black vertical solid line represents the moment when the land grid appeared in the R17 domain and the other three black vertical solid lines correspond to the moment of the landfall in China of Rammasun for three times

图 6 给出了 2014 年 7 月 16 日 18 时至 19 日 06 时 D03 区域模拟的大风圈区域平均的降水率 (P_s)、水汽相关过程变率 (Q_{wv})、云水凝物相关过程变率 (Q_{cm}) 以及大风圈内陆地/海洋格点的相对贡献。由图 6 可以看出，积分时段内，“威马逊”主体环流区域内一直维持着很强的平均降水强度 P_s (图 6)，且随着热带气旋强度逐渐增强和登陆 (图 2c)，平均 P_s 一直维持增强态势 (图 6)，直到 18 日 21 时左右 (第三次登陆之前)，平均 P_s 达到最大值，随后略有减弱；17 日 20 时左右 (登陆前 11 小时左右)，“威马逊”大风圈开始接触陆地，陆地格点 P_s 的相对贡献 (大风圈内陆地格点 P_s 之和除以大风圈内总格点数) 开始缓慢增强，第一次登陆之前，开始迅速增强，同时，海洋格点 P_s 相对贡献 (大风圈内海洋格点 P_s 之和除以大风圈内总格点数) 逐渐减小；第二次登陆期间，陆地格点 (海洋格点) P_s 相对贡献的增强 (减弱) 趋势短暂变缓和停滞，其后，可能受到北部湾水体下垫面的影响，陆地格点 (海洋格点) P_s 相对贡献开始减弱 (增强)，随后，在第三次登陆之前，两者的变化趋势又反转过来，陆地格点 P_s 相对贡献逐渐增强，直到登陆之后模拟结束；值得指出的是，陆地格点和海洋格点 P_s 相对贡献的变化与陆地和海洋格点数占比的变化并不完全一致，尤其是 18 日 12 时-19 日 00 时之间，大风圈内陆地和海洋格点数基本相当，但两类格点 P_s 相对贡献的变化趋势明显不同 (图 6)，两类格点平均 P_s (海洋格点 P_s 之和除以大风圈内海洋总格点数，

陆地格点 P_S 之和除以大风圈内陆地总格点数，图略）的差异更为显著，这种差异源自两者降水物理过程（水汽收支相关过程变率 Q_{WV} 和云水凝物收支相关过程变率 Q_{CM} ）相对贡献的明显差异（图 6-8），其中， Q_{WV} 的量级和变化趋势与 P_S 相当，而 Q_{CM} 约小一个量级且变化趋势总体相反。

4.3 水汽收支

图 7 与图 6 类似，但为水汽收支相关过程各项变率（ Q_{WVL} 、 Q_{WVA} 、 Q_{WVD} 和 Q_{WVE} ，单位： mm h^{-1} ）

Fig.7 As in Fig.6, but for Q_{WVL} , Q_{WVA} , Q_{WVD} and Q_{WVE} (units: mm h^{-1})

水汽收支相关过程各项变率（ Q_{WVL} 、 Q_{WVA} 、 Q_{WVD} 和 Q_{WVE} ）的时间演变分析显示（图 7）， Q_{WVA} （正值/负值分别表示垂直积分的三维水汽通量辐合率/辐散率）的量级和变化趋势与 Q_{WV} 以及 P_S 相当（图 6，图 7），是 Q_{WV} 最主要的贡献项， Q_{WVL} （垂直积分负的水汽局地变化率，其中，正值/负值分别表示局地大气水汽含量减少/增加）和 Q_{WVE} （地面或海面蒸发率，始终为正值）量级相当，但均比 Q_{WVA} 小约一个量级，而 Q_{WVD} 量级明显偏小，可以忽略。积分时段内， Q_{WVA} 随时间的变化与 P_S 大体相似；大风圈内陆地格点 Q_{WVA} 的相对贡献伴随前两次登陆过程显著增大（图 7），当环流中心进入北部湾洋面时（图 2a），又迅速减小，之后，伴随第三次登陆，陆地格点 Q_{WVA} 的相对贡献又显著增加（图 7），而海洋格点 Q_{WVA} 相对贡献的变化与陆地格点正好相反；可见，登陆期间陆面摩擦辐合的增强，有利于水汽更多地向陆地区域辐合，支撑陆地上降水云系的快速发展以及降水强度的增强（图 6），而当环流中心进入（北部湾）洋面时，海洋水体下垫面有利于热带气旋强度（图 2c）和主体环流圈大小（图 5）的维持，加之陆面强降水系统的衰减（图 6），更多的水汽在洋面格点上辐合，海洋格点 Q_{WVA} 的相对贡献显著增强（图 7）；虽然与 Q_{WVA} 相比，大风圈内平均的 Q_{WVL} 和 Q_{WVE} 约小一个量级，但对降水过程亦有重要贡献，其中，平均 Q_{WVL} 的时间变化更为显著，总体上看，积分时段内，“威马逊”主体环流区域内的平均 Q_{WVL} 基本上维持正值，伴随旺盛的云系发展和强降水，大风圈内上空局地大气水汽含量持续减少，但“威马逊”环流中心登陆过程前期的短时段内，陆地格点 Q_{WVL} 的相对贡献基本为负值（图 7），陆地格点平均的 Q_{WVL} （绝对值）亦是如此（图略），可见，登陆期间陆地摩擦辐合的增强，造成水汽更多地在陆地格点上空辐合（ Q_{WVA} ，图 7），短时间内造成陆地格点上空局地大气增湿（负的 Q_{WVL} ），伴随陆面强降水云系的快速发展，大量水汽转化成云水凝物以及降水，之后，陆地格点 Q_{WVL} 的相对贡献（图 7）和绝对值（图略）又迅速变为正值（局地大气变干），而与之相比，海洋格点 Q_{WVL} 的变化正好相反；登陆期间下垫面的变化导致水汽相关物理过程的明显变化，造成热带气旋主体环流圈内降水云系和强降水中心的显著变化，陆地和海洋区域之间，通过辐散/辐合物理过程存在着明显的相互作用；与 Q_{WVA} 和 Q_{WVL} 相比，大风圈内平均的 Q_{WVE} 的变化相对平缓（图 7），热带气旋环流中心位于海面上时， Q_{WVE} 量值相对较大，而登陆期间（尤其是第三次登陆后），下垫面的显著变化（海洋到陆地），导致其量值降低，18 日 18 时左右的大风圈内平均 Q_{WVE} 的极大值清晰地体现出了海洋（水体）下垫面蒸发的重要作用（图 7），这种作用在海洋格点 Q_{WVE} 绝对贡献（图略）的变化上也有清晰的体现，相对而言，陆地格点 Q_{WVE} 相对贡献量值小（图 7），随着大风圈陆地格点数量的不断增加（图 6）而缓慢增大（陆地格点的地面蒸发主要来自登陆点附近的河流等水体以及前期降水的再蒸发等）。

4.4 云水凝物收支

图 8 与图 6 类似, 但为云水凝物收支相关过程各项变率 (Q_{CL} 、 Q_{CLL} 、 Q_{CLA} 、 Q_{CLD} 、 Q_{CI} 、 Q_{CIL} 、 Q_{CIA} 和 Q_{CID} , 单位: mm h^{-1})

Fig.8 As in Fig.6, but for Q_{CL} , Q_{CLL} , Q_{CLA} , Q_{CLD} , Q_{CI} , Q_{CIL} , Q_{CIA} and Q_{CID} (units: mm h^{-1})

云中的水凝物可分为液相(云滴和雨滴)和固相(冰晶、雪和霰等)两类, 相应地, 云水凝物相关过程总体变率(Q_{CM})可分为液相云水凝物相关过程总体变率(Q_{CL})和固相云水凝物相关过程总体变率(Q_{CI})两部分, 而液相(固相)云水凝物相关过程总体变率 Q_{CL} (Q_{CI})主要来源于垂直积分负的液相(固相)云水凝物局地变率 Q_{CLL} (Q_{CIL})和三维液相(固相)云水凝物通量辐合/辐散率 Q_{CLA} (Q_{CIA}), Q_{CLD} 和 Q_{CID} 量级较小, 可以忽略(图 8)。积分时段内, 大风圈内区域大气中, 液相和固相云水凝物均呈现出显著的时间变化, 体现出“威马逊”主体环流圈内旺盛和快速的云系演变特征(图 8)。“威马逊”主体环流圈影响华南沿海时段(图 8), 大风圈内平均的 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} 均基本呈现“正-负-正”变化特征, 当环流中心位于北部湾洋面时, 以负值为主(主体环流圈内的云水凝物含量总体上以增加为主), 但在三次登陆时期, 以正值为主(主体环流圈内的云水凝物含量总体上以减少为主), Q_{CLA} (Q_{CIA})呈现较明显的正(负)值, 说明, 此时段主体环流圈内液(固)相水凝物的增长(减少)主要来源于环流圈外(内)向环流圈内(外)的辐合(辐散)以及微物理转化。上述主体环流内的整体变化源自环流圈内陆地和海洋格点的不同贡献, 三次登陆期间, 陆地格点的 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} 均基本呈现“先负后正”的变化特征, 而相应时段的 Q_{CLA} 和 Q_{CIA} 均基本为负值, 上文提到, 登陆前期陆面摩擦导致水汽辐合快速增强(图 7), 辐合的水汽通过云微物理过程快速转化为液相和固相云水凝物, 促使陆地上空降水云系快速发展; 海洋格点的上述物理量与陆地格点大体上呈现相反的变化特征, 尤其是 Q_{CLA} 和 Q_{CIA} (图 8), 这种陆地和海洋格点之间相反的变化特征在水汽收支相关过程中亦有体现(图 7), 但更为复杂, 相关机理的揭示需要利用更高时空分辨率的数据进一步深入研究。

4.5 降水效率分析

降水效率是降水过程研究中除降水强度(率)之外的另一个非常重要的物理参数(Braham, 1952; Auer and Marwitz, 1968; Heymsfield and Schotz, 1985; Chong and Hauser, 1989; Ferrier et al., 1996; Doswell et al., 1996; Li et al., 2002; Tao et al., 2004; Sui et al., 2005; Sui et al., 2007)。降水效率被广泛应用于积云参数化方案闭合假定(Grell, 1993)、暴雨洪水预报(Doswell et al., 1996)、云-气候反馈过程研究(Lau and Wu, 2003)、以及降水过程诊断分析中(Li et al., 2002; Sui et al., 2005; Sui et al., 2007)。降水效率一般指降水强度与降水所有来源的比值, 有些研究将降水率与水汽辐合量和地表(海表)蒸发量之和的比值称为大尺度降水效率(large-scale precipitation efficiency, 简称 LSPE), 亦有研究将地面降水率与云凝结率和凝华率之和的比值称为云微物理降水效率(cloud-microphysical precipitation efficiency, 简称 CMPE), 但上述定义的降水效率对降水来源考虑不充分, 导致具体诊断时常出现降水效率大于 100%或者小于零等不合理的情形; Sui et al. (2007)对之前提出的降水效率公式(Sui et al., 2005)重新做了修正; 参考 Sui et al. (2007)的工作, 并借助三维降水诊断方程(Huang et al., 2016), 大尺度降水效率(LSPE)可以写为:

$$LSPE = \frac{P_s}{\sum_{i=0}^{10} \text{sgn}(Q_i) Q_i} \quad (4)$$

其中, P_s 为地面降水率, $Q_i = (Q_{WVL}, Q_{WVA}, Q_{WVD}, Q_{WVE}, Q_{CLL}, Q_{CLA}, Q_{CLD}, Q_{CIL}, Q_{CIA}, Q_{CID})$, 符号函数 $\text{sgn}(Q_i) = \begin{cases} 1, Q_i > 0 \\ 0, Q_i \leq 0 \end{cases}$

下面利用“威马逊”在南海活动和登陆华南期间高分辨率数值模拟资料，结合三维降水诊断方程，对其主体环流圈内以及陆地和海洋区域的平均降水效率做简要分析。

图 9 与图 6 类似，但为大尺度降水效率（LSPE，单位：%）

Fig.9 As in Fig.6, but for LSPE (units: %)

总体上看，“威马逊”主体环流区域内一直维持着非常高的降水效率（图 9），积分时段内，环流区域平均的 LSPE 达 85%以上，个别时刻甚至接近和达到 100%，体现出热带气旋作为地球上最强造雨系统的强大的降水能力。值得注意的是，热带气旋主体环流区域内平均 LSPE 的时间变化与热带气旋强度（图 2c）及其降水强度（图 6）的时间变化无明显关系，从降水效率定义（公式 4）可以看出，降水效率除了与降水强度有关，还与降水来源（公式 1-3）有关；自主体环流圈开始接触陆地开始，陆地格点区域平均的降水效率迅速提高到 60%以上，前两次登陆后又快速提升到接近 100%，之后略有下降，然后又再次提高；海洋格点的降水效率在绝大多数积分时间段内均维持较高数值，二次登陆之后，海洋格点降水效率的短暂降低可能与海洋格点降水强度再次增强之前（图 6），海洋格点上空降水云系的重新组织化发展（图 8）有关，第三次登陆之后，海洋格点降水效率的迅速减小可能与海洋格点区域显著缩小、降水系统显著衰退以及陆地格点降水系统发展（图 6、8）等有关。

5 总结与讨论

本文利用 WRF 模式，首先对 2014 年超强台风“威马逊”（1409）发展、演变及登陆过程开展了高分辨率数值模拟，模拟验证显示，WRF 模式较好地模拟再现了“威马逊”的西北向移动路径、强度及其演变、高低空环流及其演变以及强降水等特征，积分时段内，绝大多数时段的路径差保持在 60 公里内，模拟的“威马逊”在我国华南沿海的三次登陆时刻和地点与实况十分接近。进一步，利用高分辨率模拟数据，结合三维降水诊断方程和降水效率公式，重点针对“威马逊”临岸迅速加强为超强台风并登陆我国华南沿海这一时段，其主体环流圈（以“威马逊”海平面最低气压为中心，以近地面 10 米高度上 17 m/s 大风圈平均半径为半径所围成的圆形区域定义为“威马逊”的主体环流和降水区域）内的强降水物理过程和机制开展了深入细致的模拟诊断研究，得到的主要结论如下：

（1）“威马逊”主体环流和降水区域内一直维持着很强的平均降水强度（ P_s ），伴随热带气旋强度增强和登陆，平均降水强度也逐渐增强，直至第三次登陆前达到最强；17 日 20 时左右，“威马逊”主体环流圈开始接触陆地，陆地和海洋格点 P_s 的相对贡献基本呈反向变化，但与两者格点数占比的变化并不完全一致；两者 P_s 变化的差异主要源自降水物理过程（水汽收支相关过程变率 Q_{wv} 和云水凝物收支相关过程变率 Q_{cm} ）相对贡献的明显差异，其中， Q_{wv} 的量级和变化趋势与 P_s 相当，而 Q_{cm} 约小一个量级且变化趋势总体相反。

（2）水汽通量辐散/辐合率（ Q_{wva} ）的量级和变化趋势与 Q_{wv} 以及 P_s 相当，是 Q_{wv} 最主要的贡献项，水汽局地变化率（ Q_{wvl} ）和海面/地面蒸发率（ Q_{wve} ）量级相当，且均比 Q_{wva} 小约一个量级，但对降水过程亦有重要贡献。登陆期间陆面摩擦辐合增强（正的 Q_{wva} ），有利于水汽更多地向陆地区域辐合，造成登陆前短时段内陆地上空局地大气明显增湿（负的 Q_{wvl} ），支撑陆地上空降水云系的快速发展以及降水强度的增强，而当环流中心位于（北部湾）洋面时，海洋格点 Q_{wva} 的相对贡献显著增强，登陆期间下垫面的变化导致水汽相关物理过程的明显变化，造成主体环流圈内降水云系和强降水中心的显著变化，陆地和海洋格点区域之间通过辐散/辐合物理过程可能存在着明显的相互作用；与陆地相比，海洋（水体）

下垫面蒸发的作用更强，且变化更为明显。

(3) 液相(固相)云水凝物相关过程变率 Q_{CL} (Q_{CI}) 主要来源于液相(固相)云水凝物局地变率 Q_{CLL} (Q_{CIL}) 和云水凝物通量辐合/辐散率 Q_{CLA} (Q_{CIA})，大风圈内区域大气中，液相(固相)云水凝物呈现出显著的时间变化，体现出“威马逊”主体环流圈内旺盛和快速的云系演变特征。“威马逊”主体环流圈影响华南沿海时段，大风圈内平均的 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} 均基本呈现“正-负-正”的变化特征，环流中心位于北部湾洋面(三次登陆时期)时，主体环流圈内的云水凝物含量总体上以增加(减少)为主。三次登陆期间，陆地格点的 Q_{CLL} 和 Q_{CIL} 均基本呈现“先负后正”的变化特征，登陆前期陆面摩擦导致水汽辐合快速增强，通过云微物理过程快速转化为液相和固相云水凝物，促使陆地上空降水云系快速发展。

(4) 积分时段内，“威马逊”主体环流区域内一直维持着很高的降水效率(LSPE)，平均的 LSPE 达 85% 以上，体现出“威马逊”强盛的降水能力；从主体环流圈接触陆地开始，陆地格点区域平均的降水效率迅速升高，而海洋格点的降水效率在绝大多数积分时间段内均维持较高数值，只在第二次和第三次登陆后有所降低。

本文借助 2014 年超强台风“威马逊”登陆期间强降水物理过程的模拟和诊断分析，较为深入地揭示了其主体环流圈内降水强度变化及其与宏微观物理过程的联系，初步诊断分析了降水效率的演变特征，并探讨了主体环流圈内陆地和海洋格点的不同相对贡献，所得结论有助于加深对热带气旋登陆期间强降水物理过程的深入理解和认识，未来工作可延续本文思路，选取更多个例，继续利用高分辨率数值模式，结合三维降水诊断方程诊断和降水效率分析，开展相关研究验证本文结论；同时，如前文所述，针对热带气旋主体环流和降水区域有很多不同的定义方法，未来也有必要采用这些不同定义方法开展类似研究，进一步验证本文主要结论；而模式不同物理过程参数化方案对本文所得结论的可能影响也需要通过选取更多个例和不同方案开展深入研究和揭示；本文重点研究了主体环流圈内陆地和海洋格点降水物理过程的相对贡献，而针对热带气旋环流区域还有其他分区方法(例如，内核区和外核区等)，未来也应考虑不同分区方法，以便进一步深入认识热带气旋环流不同区域精细化的降水物理过程和差异，为理论认知的深化和降水落区的精细预报提供理论依据；此外，热带气旋环流区域内降水强度分布不均，研究揭示不同强度降水区域降水物理过程(尤其是云微物理过程)的差异和可能成因，对于深入理解热带气旋强降水的可能成因以及降水强度的预报也具有十分重要的意义。

参考文献(References)

- Atallah E, Bosart L F, Aiyyer A R. 2007. Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern united states [J]. Mon. Wea. Rev., 135(6): 2185-2206.
- Auer, A. H., J. D. Marwitz, 1968. Estimates of air and moisture flux into hailstorms on the high plains. J. Appl Meteor., 7, 196-198.
- Braham R R. 1952. The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development [J]. Journal of Meteorology, 9(4): 227-242.
- 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.
- Chan K T F, Chan J C L. 2016. Sensitivity of the simulation of tropical cyclone size to microphysics schemes [J]. Adv. Atmos. Sci., 33(9): 1024-1035.
- 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 and Disasters* (in Chinese), 33(4): 392-400.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27(5): 967-976.
- Chong M, Hauser D. 1989. A tropical squall line observed during the copt 81 experiment in west-africa .2. Water-budget [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(4): 728-744.
- 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.
- Cui X P, Li X F. 2006. Role of surface evaporation in surface rainfall processes [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111(D17).
- Cui X P, Li X F. 2009. Diurnal responses of tropical convective and stratiform rainfall to diurnally varying sea surface temperature [J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 104(1-2): 53-61.
- Cui X P, Li X F. 2011. A cloud-resolving modeling study of short-term surface rainfall processes [J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 111(1-2): 1-11.
- 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.
- 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67(5): 840-850.
- Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. *Wea. Forecasting.*, 11(4): 560-581.
- 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 74(5): 697-714.
- 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]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 11(1): 80-85.
- Ferrier B S, Simpson J, Tao W K. 1996. Factors responsible for precipitation efficiencies in midlatitude and tropical squall simulations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124(10): 2100-2125.
- Gao S. 2005. Surface rainfall processes as simulated in a cloud-resolving model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(D10).
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121(3): 764-787.
- Heymsfield G M, Schotz S. 1985. Structure and evolution of a severe squall line over oklahoma [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113(9): 1563-1589.
- Huang Y J, Cui X P. 2015a. Moisture sources of torrential rainfall events in the sichuan basin of china during summers of 2009-13 [J]. *J. Hydrometeorol.*, 16(4): 1906-1917.

- Huang Y J, Cui X P. 2015b. Moisture sources of an extreme precipitation event in sichuan, china, based on the lagrangian method [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 16(2): 177-183.
- Huang Y J, Cui X P, Li X F. 2016. A three-dimensional wrf-based precipitation equation and its application in the analysis of roles of surface evaporation in a torrential rainfall event [J]. *Atmos. Res.*, 169: 54-64.
- Lau K M, Wu H T. 2003. Warm rain processes over tropical oceans and climate implications [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(24).
- Lau K M, Zhou Y P, Wu H T. 2008. Have tropical cyclones been feeding more extreme rainfall? [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 113(D23).
- Li X F, Sui C H, Lau K M. 2002. Precipitation efficiency in the tropical deep convective regime: A 2-d cloud resolving modeling study [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80(2): 205-212.
- 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. Clim.*, 31(18): 7269-7286.
- 刘圣楠, 崔晓鹏. 2018. “碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析 [J]. *大气科学*, 42 (1): 192-208. Liu Shengnan, Cui Xiaopeng. 2018. Diagnostic analysis of rate and efficiency of torrential rainfall associated with Bilis (2006) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (1): 192-208.
- Meng W G, Wang Y Q. 2016a. A diagnostic study on heavy rainfall induced by landfalling typhoon utor (2013) in south china: 2. Postlandfall rainfall [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121(21): 12803-12819.
- Meng W G, Wang Y Q. 2016b. A diagnostic study on heavy rainfall induced by typhoon utor (2013) in south china: 1. Rainfall asymmetry at landfall [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121(21): 12781-12802.
- 潘昉, 沈艳, 宇婧婧, 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 Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70(6):1381-1389.
- 潘昉, 宇婧婧, 廖捷, 等. 2011. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析 [J]. *气象*, 37(05): 564-570. Pan Yang, Yu JingJing, Liao Jie, et al. 2011. Assessment on the rainfall monitoring of typhoon Morakot by ground-gauged and satellite precipitation products [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37(05): 564-570.
- Sapiano M R P, Arkin P A. 2009. An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data [J]. *J. Hydrometeorol.*, 10(1): 149-166.
- Sui C H, Li X F, Yang M J, et al. 2005. Estimation of oceanic precipitation efficiency in cloud models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(12): 4358-4370.
- Sui C H, Li X F, Yang M J. 2007. On the definition of precipitation efficiency [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64(12): 4506-4513.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3[R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR.
- 沈艳, 潘昉, 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]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(1):37-46.

- Tao W K, Johnson D, Shie C L. 2004. The atmospheric energy budget and large-scale precipitation efficiency of convective systems during toga coare, gate, scsmex, and arm: Cloud-resolving model simulations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61(20): 2405-2423.
- 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.-Atmos.*, 121(20): 12415-12433.
- 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.
- 吴联要, 雷小途. 2012. 内核及外围尺度与热带气旋强度关系的初步研究 [J]. *热带气象学报*, 28(05): 719-725. Wu LianYao, Lei XiaoTu. 2012. Preliminary research on the size of inner core and periphery and their relationship with the intensity of tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28(05): 719-725.
- 王晓慧, 崔晓鹏, 郝世峰, 等. 2019a. 热带气旋“苏迪罗”(2015)海上活动时段降水物理过程模拟诊断研究 [J]. *大气科学*, 43(2): 417-436. Wang Xiaohui, Cui Xiaopeng, Hao Shifeng, et al. 2019. Diagnostic and Numerical Study on Surface Rainfall Processes Associated with Tropical Cyclone Soudelor (2015) over the Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(2): 417-436.
- 王晓慧, 崔晓鹏, 郝世峰, 等. 2019b. 热带气旋“苏迪罗”(2015)海上活动时段降水物理过程模拟诊断研究—海表温度敏感性试验 [J]. *大气科学*, 43(5):1125-1142. Wang Xiaohui, Cui Xiaopeng, Hao Shifeng, et al. 2019. A Diagnostic and Numerical Study on Surface Rainfall Process of Tropical Cyclone Soudelor (2015) over the Ocean: Sensitivity Experiments on Precipitation Response to Sea Surface Temperature Change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(5):1125-1142.
- Xu H Y, Liu R, Zhai G Q, et al. 2016. Torrential rainfall responses of typhoon fitow (2013) to radiative processes: A three-dimensional wrf modeling study [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121(23): 14127-14136.
- 薛一迪, 崔晓鹏. 2019. “威马逊”(1409)降水水汽来源和源区定量贡献分析 [J]. *大气科学*, 接收待刊, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18245. Xue Yidi, Cui XiaoPeng. 2019. Moisture sources and quantitative analyses of source contributions of precipitation associated with Rammasun (1409) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*.
- Yang M J, Braun S A, Chen D S. 2011. Water budget of typhoon nari (2001) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139(12): 3809-3828.
- Yu Z, Yu H, Chen P, et al. 2009. Verification of tropical cyclone-related satellite precipitation estimates in mainland china [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(11): 2227-2241.
- 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 and Disasters (in Chinese)*, 33(4): 333-341.

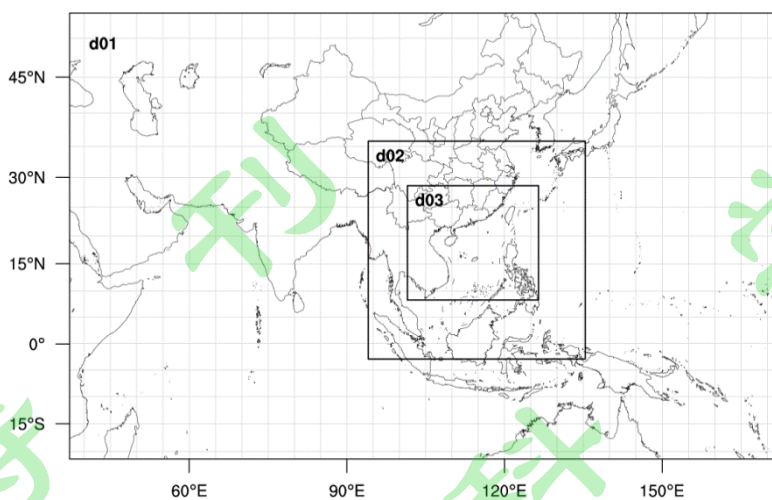


图 1 模拟区域设置
Fig.1 Model domain configuration

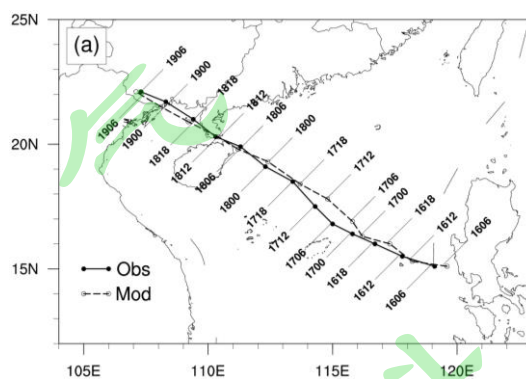


图 2 2014 年 7 月 16 日 06 时-19 日 06 时 (a) 实况 (实线) 与模拟 (虚线, 分辨率 3 km) 的“威马逊”移动路径, (b) 观测与模拟的路径偏差 (单位: km) 以及 (c) 观测 (实线) 与模拟 (虚线) 的热带气旋中心附近最低海平面气压 (实心点线, 单位: hPa) 和近地面最大风速 (空心点线, 单位: m s^{-1})

Fig.2 (a) The observed (solid lines) and simulated (dashed lines, 3 km horizontal resolution) tracks of Rammasun. (b) Distance deviation of observed and simulated tracks (units: km). (c) Time series of minimum sea level pressure (units: hPa) and maximum wind speed (units: m s^{-1}) of observed (solid lines) and simulated (dashed lines) at 6 h intervals from 0600 UTC 16 July to 0600 UTC 19 July 2014

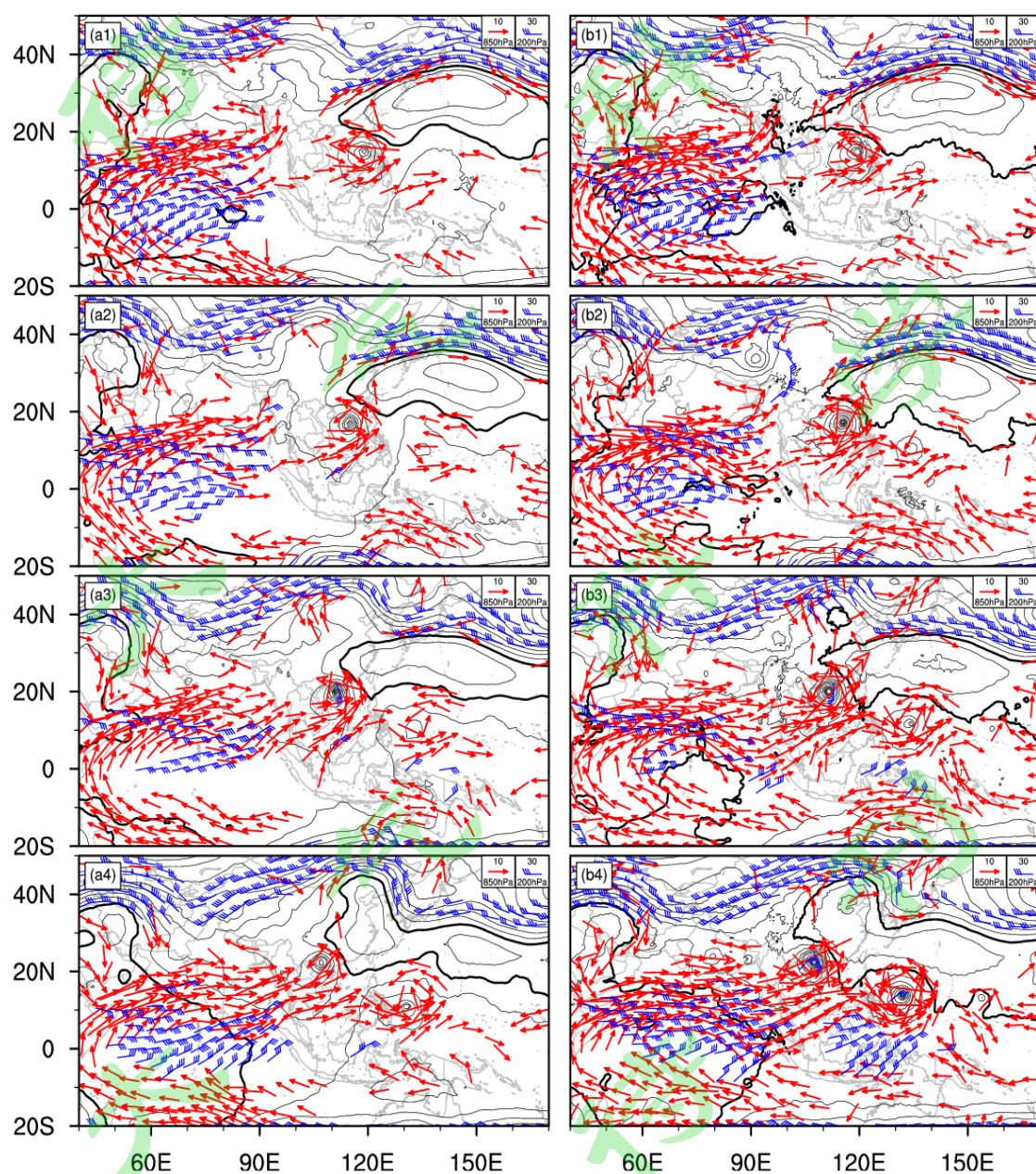


图 3 FNL 分析资料 (a1-a4, 分辨率为 1°) 与模拟 (b1-b4, 分辨率为 54 km) 的 500 hPa 位势高度场 (黑色等值线, 单位: gpm, 加粗黑线代表 5880 gpm)、850 hPa 风矢量 (红色箭头, 大于等于 10 m s^{-1}) 和 200 hPa 风矢量 (蓝色风羽, 大于等于 30 m s^{-1})。 (a1, b1) 2014

年 7 月 16 日 06 时, (a2, b2) 2014 年 7 月 17 日 06 时, (a3, b3) 2014 年 7 月 18 日 06 时, (a4, b4) 2014 年 7 月 19 日 06 时

Fig.3 500-hPa geopotential height (black contour, the thick line indicates 5880 gpm, units: gpm), 850-hPa wind field (red vector, $\geq 10 \text{ m s}^{-1}$, units: m s^{-1}) and 200-hPa wind field (blue wind bar, $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$, units: m s^{-1}) from the National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data (NCEP FNL, a1-a4) and numerical simulation data with horizontal resolution of 54 km (b1-b4) at (a1,b1) 0600 UTC 16 July 2014, (a2, b2) 0600 UTC 17 July 2014, (a3, b3) 0600 UTC 18 July 2014, (a4, b4) 0600 UTC 19 July 2014

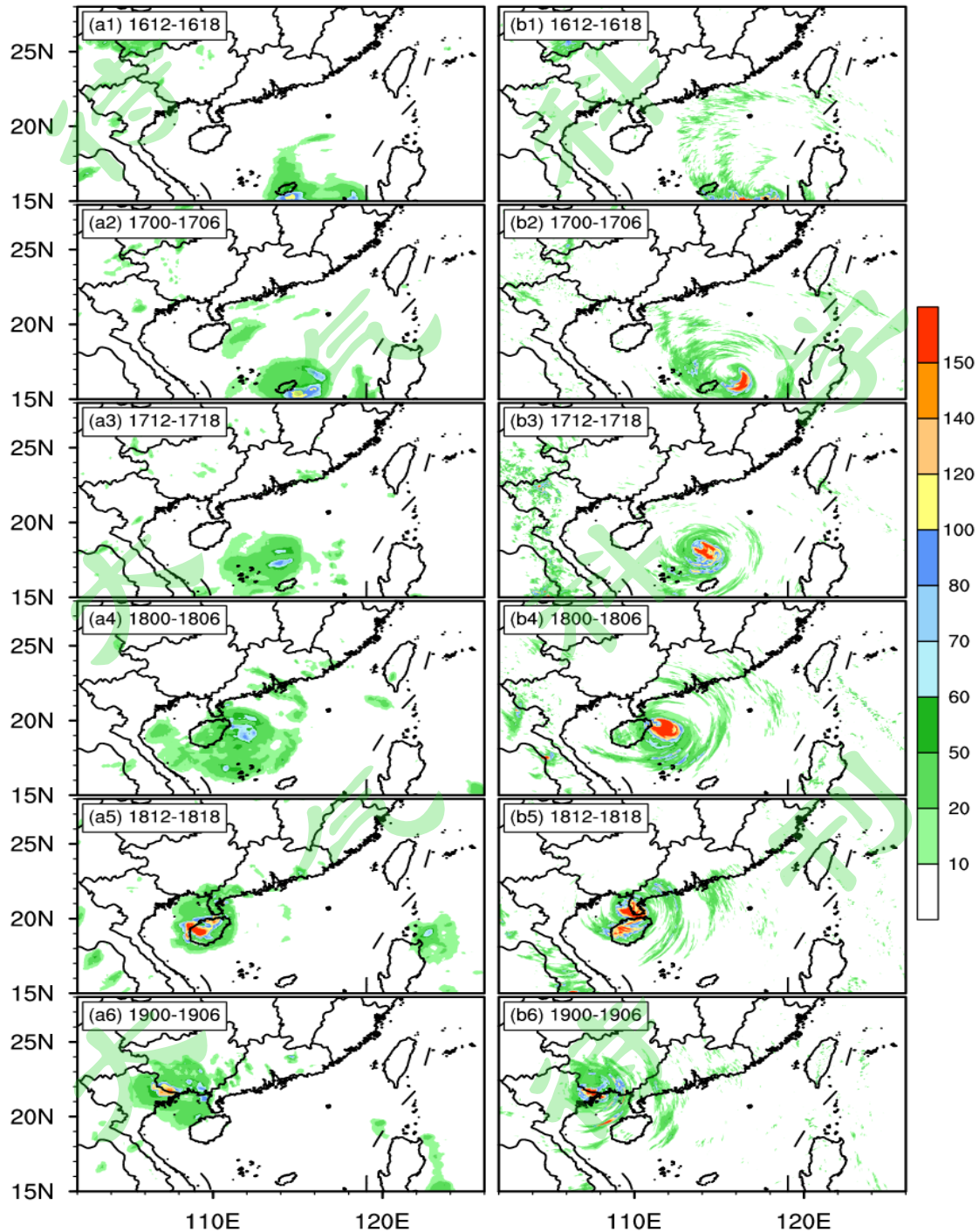


图 4 实况 (a1-a6) 与模拟 (b1-b6, 分辨率 3km) 的 6 小时累积降水量分布 (单位: mm)。

(a1, b1) 2014 年 7 月 16 日 12-18 时, (a2, b2) 2014 年 7 月 17 日 00-06 时, (a3, b3) 2014 年 7 月 17 日 12-18 时, (a4, b4) 2014 年 7 月 18 日 00-06 时, (a5, b5) 2014 年 7 月 18 日 12-18 时, (a6, b6) 2014 年 7 月 19 日 00-06 时

Fig.4 Six-hours accumulated precipitation (units: mm) from observed (a1-a6) and simulated data with horizontal resolution of 3 km (b1-b6). (a1, b1) 1200 UTC 16 July to 1800 UTC 16 July, (a2, b2) 0000 UTC 17 July to 0600 UTC 17 July, (a3, b3) 1200 UTC 17 July to 1800 UTC 17 July, (a4, b4) 0000 UTC 18 July to 0600 UTC 18 July, (a5, b5) 1200 UTC 18 July to 1800 UTC 18 July, (a6, b6) 0000 UTC 19 July to 0600 UTC 19 July

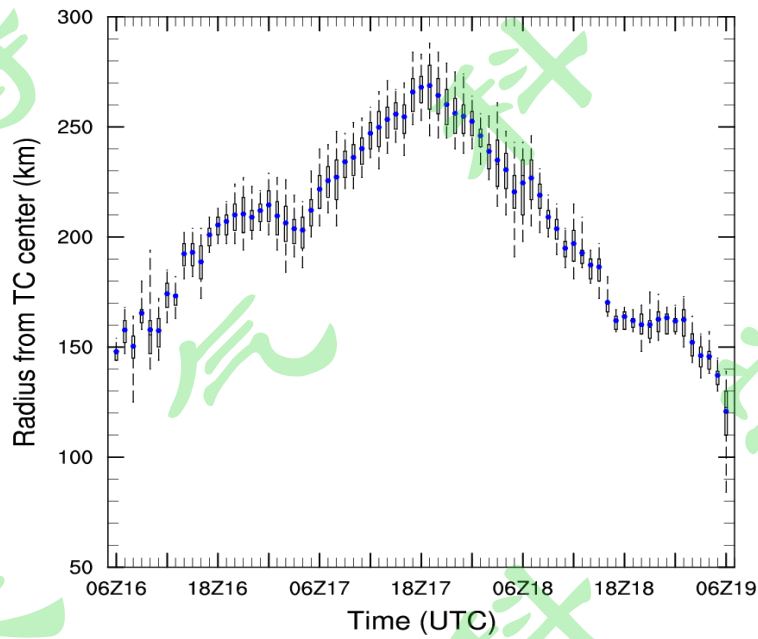


图 5 模拟的近地面 10 米风速为 17 ms^{-1} 的格点与“威马逊”中心距离 (单位: km) 的盒须图, 蓝点代表平均值, 矩形中间的横线为中位数, 矩形上 (下) 边代表 75 (25) 百分位

Fig.5 The box plot of the radius of gale-force (17 m s^{-1}) 10-m winds from the TC center. The blue point represents the average. The horizontal line in the middle of the rectangle denotes the median, and the upper (lower) side of the rectangle represents the 75 (25) percentile

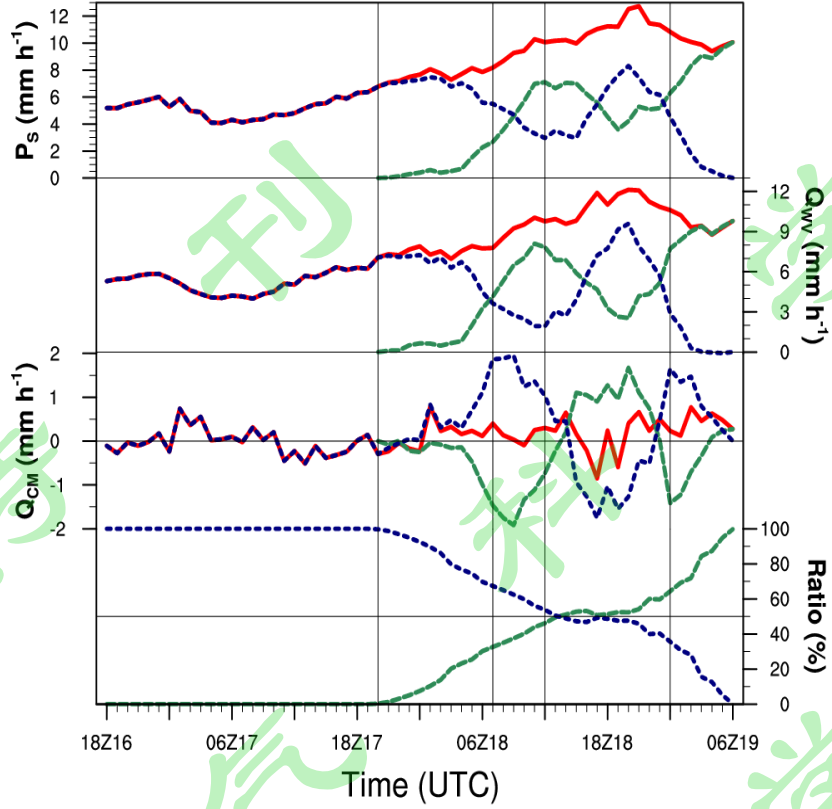


图 6 2014 年 7 月 16 日 18 时至 19 日 06 时大风圈区域平均的地面降水率 (P_s)、水汽收支相关变率 (Q_{wv})、云水凝物收支相关变率 (Q_{cm}) (单位: mm h^{-1}), 以及“威马逊”大风圈环流区域内陆地/海洋格点占比 (单位: %) 的时间演变。红色粗实线: “威马逊”大风圈环流区域平均值; 绿色短划线: “威马逊”大风圈环流区域内陆地格点的相对贡献; 蓝色短划线: “威马逊”大风圈环流区域内海洋格点的相对贡献; 图中第一条黑色竖实线代表“威马逊”大风圈环流区域开始接触陆地的时刻, 其他三条黑色竖实线分别对应“威马逊”三次登陆我国的时刻

Fig.6 Time series of area averaged (in the R17 domain) surface precipitation rate (P_s), the rates of moisture-related processes (Q_{wv}), cloud-related processes (Q_{cm}) (units: mm h^{-1}) and the ratios of land (green dashed line), sea (blue dashed line) grid number to all grid number in the R17 domain (units:%) from 1800 UTC 16 July 2014 to 0600 UTC 19 July 2014. The red solid lines represent the area averaged values in the R17 domain, while the green (blue) dashed lines denote the relative contribution of land (sea) grid in the R17 domain. The first black vertical solid line represents the moment when the land grid appeared in the R17 domain and the other three black vertical solid lines correspond to the moment of the landfall in China of Rammasun for three times

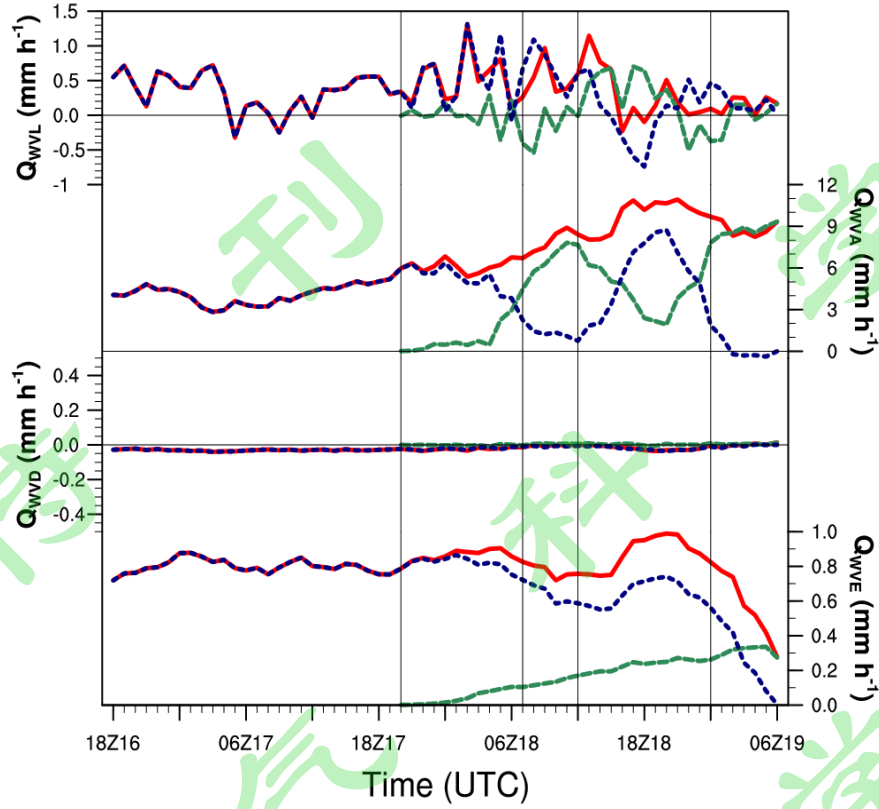


图 7 与图 6 类似, 但为水汽收支相关过程各项变率 (Q_{WVL} 、 Q_{WVA} 、 Q_{WVD} 和 Q_{WVE} , 单位: mm h^{-1})

Fig.7 As in Fig.6, but for Q_{WVL} , Q_{WVA} , Q_{WVD} and Q_{WVE} (units: mm h^{-1})

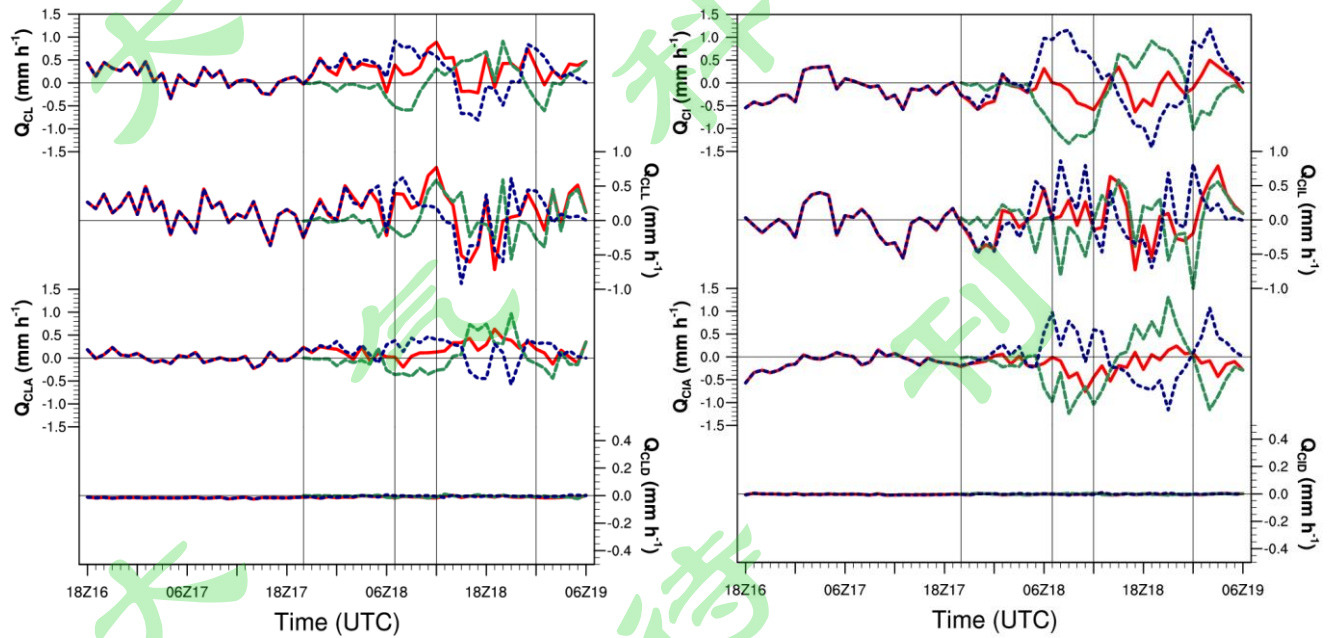


图 8 与图 6 类似, 但为云水凝物收支相关过程各项变率 (Q_{CL} 、 Q_{CLL} 、 Q_{CLA} 、 Q_{CLD} 、 Q_{CI} 、 Q_{CIL} 、 Q_{CIA} 和 Q_{CID} , 单位: mm h^{-1})

Fig.8 As in Fig.6, but for Q_{CL} , Q_{CLL} , Q_{CLA} , Q_{CLD} , Q_{CI} , Q_{CIL} , Q_{CIA} and Q_{CID} (units: mm h^{-1})

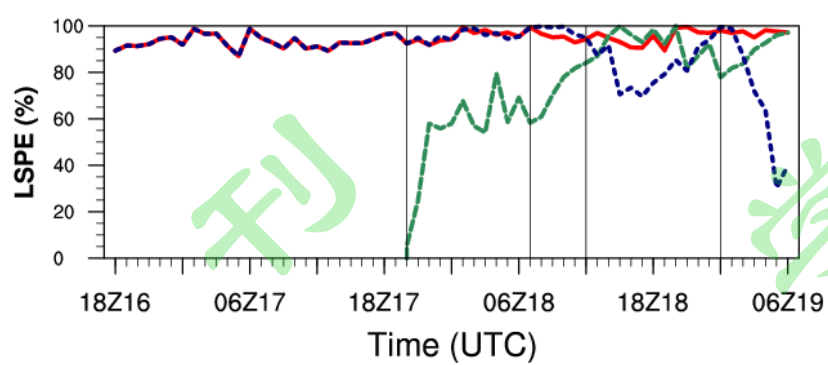


图 9 与图 6 类似，但为大尺度降水效率（LSPE，单位：%）

Fig.9 As in Fig.6, but for LSPE (units: %)