暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

上海台风强降水水汽来源的定量化研究

高悦 岳彩军 陈诗祺 邓立平

Quantitative study of water vapor sources for heavy precipitation in Shanghai produced by typhoons

GAO Yue，YUE Caijun，CHEN Shiqi，DENG Liping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-209

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

南疆西部暴雨过程水汽来源及输送特征
Characteristics of water vapor source and transport during rainstorm in western southern Xinjiang
暴雨灾害. 2022, 41(5): 544-555 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-142

贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析
Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstrom event in Tongren of Guizhou Province
暴雨灾害. 2023, 42(6): 648-658 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-064

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析
Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province
暴雨灾害. 2024, 43(5): 532-541 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-116

四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析
Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes in northeastern Sichuan basin
暴雨灾害. 2020, 39(3): 234-240 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.003

青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析
Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai
暴雨灾害. 2025, 44(1): 41-51 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-240

2020年7月5—6日武汉江夏特大暴雨水汽源地和输送特征分析
Analyses of moisture sources and transport characteristics in a rainstorm event in Jiangxia, Wuhan during July 5-6, 2020
暴雨灾害. 2022, 41(4): 375-383 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

高悦,岳彩军,陈诗祺,等.2025.上海台风强降水水汽来源的定量化研究[J].暴雨灾害,44(6):723−732. GAO Yue, YUE Caijun, CHEN Shiqi, et al. 2025. Quantitative study of water vapor sources for heavy precipitation in Shanghai produced by typhoons [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):723−732 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−209

上海台风强降水水汽来源的定量化研究

高悦[1], 岳彩军[1], 陈诗祺[1], 邓立平[2]

(1. 上海海洋中心气象台, 上海 200030; 2. 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088)

摘　要: 水汽是影响台风降水强度的重要因素, 探究水汽的来源对理解台风强降水过程的形成具有重要的物理意义。为揭示影响上海台风强降水 (过程降水量≥50 mm) 的水汽来源, 针对 2005—2023 近 20 a 造成上海强降水的登陆上海型、近海北上型、西北型 3 类台风路径, 利用逐小时的 ERA5 再分析资料驱动 HYSPLIT 轨迹模式, 定量化获得降水过程的精细化水汽源地。结果表明, 登陆上海型台风强降水有 1 条来自东侧的主要水汽输送路径, 路径上主要的水汽源区为西北太平洋西部, 水汽贡献率达 39.6%; 近海北上型 (西北型) 台风强降水有来自东侧、南侧的 2 条 (东侧、南侧、北侧的 3 条) 主要水汽输送路径, 西北太平洋西部、南海及菲律宾以东洋面、我国东南沿海为该路径上主要的水汽源区, 水汽贡献率分别为 29.8% (18%)、18.5% (17.3%)、23% (23.1%)。此外, 进一步确定了各水汽源区对降水贡献最明显的高度层及时段, 强降水发生前 15—168 h、9—129 h、3—48 h, 位于西北太平洋西部上空 950—925 hPa 高度层、925—850 hPa 高度层、我国东南沿海上空 950—850 hPa 高度层的水汽, 分别对登陆上海型、近海北上型、西北型台风造成的上海强降水贡献最大, 可为影响上海不同路径台风的降水预报提供参考。

关键词: 台风降水; 拉格朗日方法; HYSPLIT 模式; 水汽轨迹追踪; 水汽源区

中图法分类号: P426.62+1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−209

Quantitative study of water vapor sources for heavy precipitation in Shanghai produced by typhoons

GAO Yue[1], YUE Caijun[1], CHEN Shiqi[1], DENG Liping[2]

(1. *Shanghai Marine Meteorological Center*, *Shanghai* 200030; 2. *College of Ocean and Meteorology*, *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088)

Abstract: Water vapor is an important factor influencing the intensity of typhoon precipitation, and therefore finding the sources of water vapor is physically important in understanding the formation of heavy precipitation processes produced by typhoons. To investigate the water vapor sources for heavy precipitation in Shanghai (process precipitation≥50 mm) produced by typhoons, the hourly ERA5 reanalysis data is used to drive the HYSPLIT trajectory model to quantitatively explore refined source areas during the process. Three types of typhoons that have caused heavy precipitation in Shanghai over the past 20 years with different paths are analyzed, including: landfall type, nearshore-northward type, and Northwestern type. The results show that heavy precipitation produced by landfall typhoons has one major water vapor trajectory from the east. The major source area on the trajectory is the west of the Northwestern Pacific Ocean, with a water vapor contribution of 39.6%. Heavy precipitation produced by nearshore-northward (northwestern) typhoons has two (three) major water vapor trajectories from the east and the south (the east, the south, and the north). The major source areas on the trajectories are the west of the Northwestern Pacific Ocean, the South China Sea and the ocean east to the Philippines, and the southeastern coast of China, with water vapor contributions of 29.8% (18%), 18.5% (17.3%), and 23% (23.1%), respectively. We further identify the altitude layer and time period of each water vapor source area that contributes most significantly to the precipitation. The water vapor located at 950-925 hPa, 925-850 hPa over the west of Northwestern Pacific Ocean, 950-850 hPa over the southeastern coast of China during 15-168 h, 9-129 h, 3-48 h before the occurrence of heavy precipitation, contribute most significantly to the heavy precipitation in Shanghai produced by landfall, nearshore-northward, and northwestern typhoons, respectively. The study can provide valuable references for precipitation

收稿日期: 2024−11−28; **定稿日期**: 2025−01−13

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41875059, 41875071); 上海市气象局启明星项目 (QM202414)

第一作者: 高悦, 主要从事台风强降水研究。E-mail: gaoyue0222@163.com

通信作者: 岳彩军, 主要从事中尺度天气动力学、灾害性天气研究。E-mail: yuecaijun2000@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

intensity forecasts of typhoons with different paths influencing Shanghai.

Key words: typhoon precipitation; Lagrangian method; HYSPLIT model; water vapor trajectories; water vapor source areas

引　言

我国是世界上台风登陆数量最多、受影响最严重的国家之一。台风带来的灾害主要有大风、暴雨和风暴潮这三种形式。其中，台风暴雨是影响最为严重、发生最为频繁的灾害，每年都给我国造成严重的人员伤亡和财产损失 (Zhang et al., 2013)。到目前为止，准确预报台风降水落区及强度仍是实际天气业务工作中的重点和难点之一。水汽是产生降水的必要条件之一，源地的水汽通过大规模的空气运动被输送到降水区，在一定的环流形势配合下，上升冷却成云致雨，台风降水的多少与水汽的多寡关系密切 (钮学新等, 2010; 任福民和杨慧, 2019; 康邵钧等, 2023)。Zhao 等 (2021) 利用 NCEP/NCAR 再分析资料对造成强、弱降水的登陆中国的台风个例进行了对比分析，结果表明强降水发生时往往有一条强的水汽输送通道，而弱降水时则没有。Akihiko (2006) 通过数值试验，减少了数值模式初始条件中的水汽，模拟出的台风降水强度随之减弱，可见水汽变化对降水强度影响很大。上述研究表明水汽对于降水有重要影响，因此，在研究台风强降水过程时，开展水汽方面的研究是十分必要的。

Trenberth (1999) 提出，相对于局地的蒸发效应，降水的水汽更多来自于周围的水汽输送。因此，开展水汽来源的分析，找到外部的水汽输送路径，对于台风降水研究具有十分重要的意义。中外学者开展降水水汽输送特征及来源方面的研究，采用的方法主要有两种：欧拉方法和拉格朗日方法。欧拉方法着眼于空间固定点，通过描述流场中每一个空间点的水汽通量，来研究整个流体的水汽输送特征。饶晨泓等 (2022) 根据 WRF 模式移除台风后整层水汽通量的变化，得出台风“烟花”(2021) 相较于台风“查帕卡”(2021) 对河南暴雨的影响更大。刘汉华等 (2010) 利用 NCEP/NCAR 逐 6 h 的再分析资料对整层水汽通量进行了分解，发现台风“凤凰”(2008) 登陆福建之前，东边界的水汽输入起主导作用；登陆福建后，南边界的水汽输入逐渐起主导作用。尽管欧拉方法在表现水汽输送方面比较直观，但计算出的水汽通量往往具有瞬变性，对于水汽源地也无法准确地描述出来。拉格朗日方法着眼于流体质点，通过计算每个质点的三维运动轨迹，可以比较清楚地确定质点的运动路径，再确定水汽的源或汇，并定量评估各源区对降水的水汽贡献时，比欧拉方法更具优势。支持拉格朗日方法的计算模式主要包括 FLEXPART (Stohl et al., 2005)、LAGRANTO (Sprenger and Wernli, 2015) 和 HYSPLIT (Stein et al., 2015)。Pérez-Alarcón 等 (2023) 用 ECMWF 提供的 6 h 间隔的 ERA-Interim 再分析资料驱动 FLEXPART 模式，对印度洋地区与台风有关的强降水开展了水汽来源分析，发现台风生成、发展、消亡 3 个阶段，各源地的水汽贡献存在显著差异。针对一些有代表性的极端降水个例，Chen 等 (2017) 用 6 h 间隔的 JRA-55 再分析资料驱动 HYSPLIT 模式，得出台湾地区强降水的水汽大部分来自南海和孟加拉湾的西南季风。任伟等 (2022) 将逐 6 h 的 NCEP/NCAR 资料输入 HYSPLIT 模式进行后向轨迹追踪，找出了台风“温比亚” (2018) 影响期间山东极端降水过程的主要水汽输送路径，并对各水汽源区的贡献进行了定量分析。

从上述的研究成果可知，各类再分析资料如 NCEP/NCAR、ERA-Interim、JRA-55 与欧拉方法、拉格朗日方法相结合，被广泛应用于台风降水水汽输送特征及来源方面的研究。随着 ECMWF 提供的最新一代高时空分辨率再分析资料 ERA5 的发布，许多学者对它进行了评估，发现在国内外台风及降水研究方面，ERA5 相对于其他再分析资料有一定优势 (Bian et al., 2021; Xu and Liu, 2023)。杨萌和廖朝霞 (2024) 研究认为，利用 ERA5 资料计算得到的低层水汽通量辐合区与强降雨区吻合较好。已有研究将 1 h 时间分辨率的 ERA5 资料用于拉格朗日后向水汽轨迹追踪 (布和朝鲁等, 2022; Nie and Sun, 2022; Pérez et al., 2023)，但将二者结合应用到台风强降水的研究工作仍相对较少。

本文以上海为代表，使用逐小时的 ERA5 再分析资料驱动 HYSPLIT 模型进行后向水汽轨迹追踪，识别不同路径台风造成上海强降水 (过程降水量 ≥ 50 mm) 期间的主要水汽输送路径和水汽源区。以期深入理解和全面认识水汽输送与台风强降水存在的内在联系，为上海及我国沿海城市台风降水强度预报提供一些有价值的参考，并进一步提升城市安全的气象服务保障能力。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文使用的资料包括：(1) ERA5 再分析资料，时间分辨率为 1 h，空间分辨率为 0.25°×0.25° (Hersbach et al., 2020)，用于驱动轨迹追踪模型 HYSPLIT；(2) 上

海区域地面自动站的逐小时降水资料, 用于分析台风影响期间的降水情况; (3) 上海台风研究所整编的中国气象局热带气旋最佳路径数据集, 该数据集提供了 1949 年以来西北太平洋海域热带气旋各时刻的位置和强度 (Liu et al., 2021), 用于反映台风概况; (4) 风云二号系列气象卫星 FY-2C、FY-2E、FY-2G 和风云四号系列气象卫星 FY-4A 资料, 这 4 颗业务型地球静止气象卫星接替提供了自 2005 年 5 月 31 日以来的白天可见光云图、昼夜红外云图和水气分布图等气象监测数据, 用于帮助识别台风过程降水量。

基于风云二号以来系列卫星资料, 本文对 2005 年以来的台风个例进行研究。根据中国气象局《热带气旋年鉴》设定的影响标准: 过程降水量≥50 mm; 或平均风速≥7 级或阵风≥8 级; 或过程降水量≥30 mm 且平均风速≥6 级或阵风≥7 级, 满足其中任一条件即为受台风影响。本文拟研究台风强降水过程的水汽来源, 因此, 仅选取造成上海市域内自动站达到上述第一个影响标准的台风个例作为研究样本, 其中过程降水量为卫星云图上受台风螺旋雨带影响期间的降水。

根据最佳路径数据集, 进一步将上述台风研究样本按照路径分为 3 种类型: (1) 直接登陆上海的归为登陆上海型; (2) 北上过程中, 与上海同纬度时位于上海以东的归为近海北上型; (3) 北上过程中, 与上海同纬度时位于上海以西的归为西北型。经统计, 2005—2023 年造成上海强降水的台风共 20 个, 其中, 登陆上海型 5 个、近海北上型 6 个、西北型 9 个, 台风及降水相关信息见表 1, 具体台风路径见图 1。

表 1 2005—2023 年造成上海强降水的台风概况

Table 1 Overview of typhoons producing heavy precipitation in Shanghai during 2005-2023

路径类型	中央台编号	中/英文名称	影响时段/(世界时)	上海单站最大过程降水量/mm
登陆上海型	1416	凤凰/Fung-Wong	9月22日16时—9月23日05时	77.6
	1810	安比/Ampil	7月21日19时—7月22日13时	92.2
	1812	云雀/Jongdari	8月2日14时—8月3日03时	96.1
	1818	温比亚/Rumbia	8月16日09时—8月17日08时	149.6
	2212	梅花/Muifa	9月12日05时—9月14日22时	233.4
近海北上型	0601	珍珠/Chanchu	5月17日21时—5月18日20时	76.4
	0716	罗莎/Krosa	10月7日11时—10月8日17时	231.2
	1007	圆规/Kompasu	9月1日05时—9月1日14时	138.9
	1509	灿鸿/Chan-Hom	7月10日15时—7月11日20时	113.7
	1918	米娜/Mitag	10月1日00时—10月1日23时	228.3
	2114	灿都/Chanthu	9月12日02时—9月14日02时	144.9
西北型	0509	麦莎/Matsa	8月5日10时—8月6日21时	285.9
	0515	卡努/Khanum	9月11日09时—9月12日00时	149.2
	0713	韦帕/Wipha	9月17日17时—9月19日11时	138.9
	0908	莫拉克/Morakot	8月9日14时—8月10日00时	168.6
	1614	莫兰蒂/Meranti	9月14日20时—9月16日02时	357.6
	1814	摩羯/Yagi	8月12日01时—8月12日20时	125.0
	1909	利奇马/Lekima	8月9日06时—8月10日23时	276.0
	2004	黑格比/Hagupit	8月4日12时—8月5日03时	328.6
	2106	烟花/In-Fa	7月24日15时—7月28日00时	392.7

1.2 HYSPLIT 模型与后向水汽轨迹追踪方案

HYSPLIT 是 NOAA 开发的一种用于计算和分析气块输送、扩散过程的专业模型。对台风影响时段内水汽的后向轨迹进行追踪时, 将 ERA5 资料转化为 HYSPLIT 可识别的格式输入模型, 每隔 1 h 追踪一次。水平方向上分别选取不同路径台风造成的上海强降水区中心为追踪点, 即图 2 中降水量较大的红色和橙色散点区域的几何中心。由于水汽主要集中于对流层低层 (Ralph et al., 2018), 垂直方向上选取 800 m、1 500 m、3 000 m 作为追踪点的初始高度, 后向追踪 10 d。以往的研究表明, 水汽在大气中的平均滞留时间约为 10 d (Van and Tuinenburg, 2017)。追踪期间, 每 1 h 输出一次气块的三维空间位置及物理属性 (比湿、相对湿度等), 得到多条气块运动轨迹。

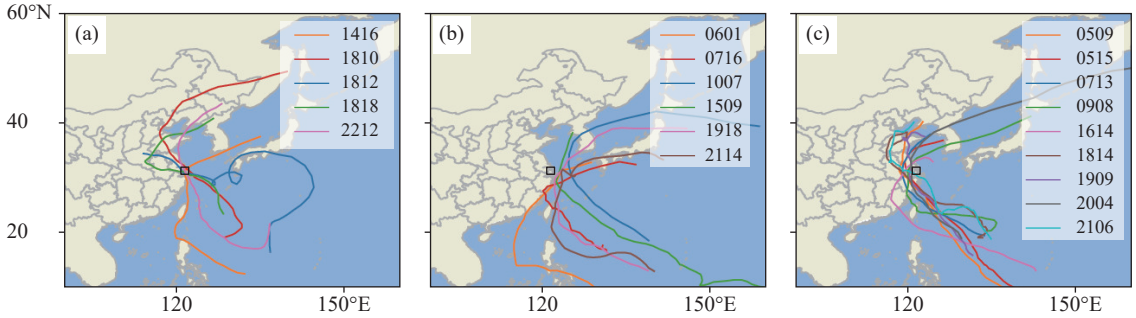


图 1 2005—2023 年造成上海强降水的登陆上海型 (a)、近海北上型 (b) 和西北型 (c) 三种台风路径 (黑色线框标注上海区域位置, 不同颜色的线条代表表 1 中不同编号的台风路径)

Fig. 1 Paths of (a) the landfall, (b) nearshore-northward, and (c) northwestern typhoons producing heavy precipitation in Shanghai during 2005-2023 (The black square denotes the position of Shanghai, and the lines of different colors represent the paths of typhoons with different numbers in Table 1)

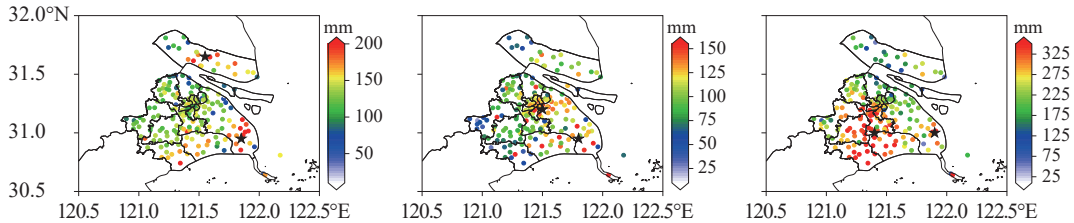


图 2 登陆上海型 (a)、近海北上型 (b) 与西北型 (c) 台风强降水期间上海自动站最大过程降水量 (彩色圆点) 分布 (黑色星号为轨迹追踪起点水平位置)

Fig. 2 Maximum process precipitation at automatic stations in Shanghai during heavy precipitation produced by (a) landfall, (b) nearshore-northward, and (c) northwestern typhoons (colored dots) (The black asterisks denote horizontal positions of the starting points of backward trajectories)

为了进一步得到对降水有贡献的气块轨迹, 参考 Nie 和 Sun (2022) 中的方法, 在上海区域内 (30.6°—31.9°N, 120.8°—122.2°E) 采用以下两条筛选标准: (1) 相对湿度超过 80%; (2) 比湿降低超过 0.2 g·kg^{-1}。最终, 对于登陆上海型、近海北上型、西北型台风, 分别得到 408 条、443 条、700 条水汽轨迹。

1.3 水汽轨迹聚类

为了更好地分析水汽输送路径, 对水汽轨迹进行聚类。通过 k-means 算法 (Likas et al., 2003), 根据总体方差最小同时分类具备代表性的原则, 将具有相似特征的水汽轨迹进行聚类。对每一类别中各条轨迹上气块的经度、纬度、高度、比湿进行合成平均, 可得到三维水汽输送路径及路径上湿度的变化, 该水汽路径对降水的水汽贡献率 (C) 可通过如下公式计算得到 (Chen and Luo, 2018)

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{m} \Delta q_i}{\sum_{j=1}^{n} \Delta q_j} \tag{1}$$

其中, Δq 为气块沿轨迹到达追踪点前 1 h 内, 即在上海强降水区比湿的减少量, m 为该类别包含的轨迹数, n 为所有轨迹数。

1.4 水汽源区识别

为确定水汽输送过程中源汇区的分布, Stohl 和 James (2004) 提出“蒸发—降水”(E-R) 诊断法, 通过分析空气块湿度的变化来判定水汽源汇。沿着气块的运动轨迹, 若比湿升高则净获得了下垫面中液态水转化为的气态水汽, 该处以蒸发过程为主, 为水汽源; 若比湿降低则净失去了水汽, 凝结转化为液态水滴降落, 该处以降水过程为主, 为水汽汇。液态水滴增长到足够大才能降落至地面, 因此降水过程需要充足的水汽凝结, 水汽凝结量越多, 降水越强。

基于在降水区凝结的水汽量, 可以得到主要的水汽源区。Sun 和 Wang (2015) 给出定量计算不同源区水汽贡献率 (C) 的方法

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{k} R_i}{\sum_{j=1}^{l} R_j} \tag{2}$$

$$R = T - L - U \tag{3}$$

其中, R 为气块沿轨迹在上海强降水区凝结为水滴的水汽量, T 为气块从源区获得的水汽量, L 为气块沿途损耗的水汽量, U 为到达强降水区但未凝结的水汽量, k 为该源区上空的气块数量, l 为所有区域上空

的气块数量。Sodemann 等 (2008) 提供了该算法的详细介绍与应用实例。

2 水汽输送路径分析

利用 HYSPLIT 模式对台风影响期间 (表 1), 上海强降水区中心上空的水汽进行后向轨迹追踪后, 进行水汽轨迹的筛选与聚类, 最终得到登陆上海型台风有 3 条水汽输送路径, 近海北上型、西北型台风有 4 条水汽输送路径 (图 3)。路径 1 (图中标识为 Group1, 下同) 由南侧向强降水区输送, 源于印度尼西亚, 向北途经菲律宾以东, 从我国东南沿海进入降水区; 路径 2 (图中标识为 Group2, 下同) 由东侧向强降水区输送, 源于西北太平洋, 向西经我国东南沿海进入降水区; 路径 3 (图中标识为 Group3, 下同) 由北侧向强降水区输送, 对于登陆上海型和近海北上型 (西北型) 台风, 源于渤海 (日本岛南部), 途径我国东北沿海, 到达东南沿海后再向北进入降水区。近海北上型和西北型台风还有一条由西南侧向强降水区输送的水汽路径 4 (图中标识为 Group4, 下同), 源于印度洋, 向东北移动途经南海, 从我国东南沿海进入降水区。

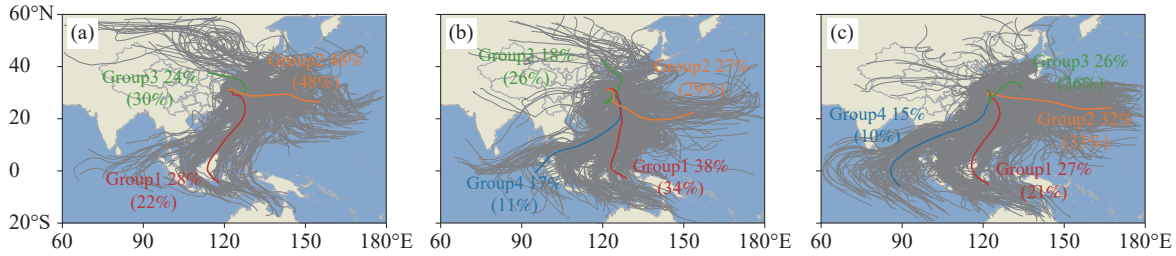


图 3 登陆上海型 (a)、近海北上型 (b)、西北型 (c) 台风造成上海强降水的水汽后向轨迹 (灰色实线) 与聚类平均后的水汽输送路径 (彩色实线)。括号外 (内) 的百分数分别表示该路径包含的水汽轨迹数量所占比例 (对降水的水汽贡献)

Fig. 3 Backward trajectories (gray lines) and group mean paths (colored lines) of water vapor for heavy precipitation in Shanghai produced by (a) landfall, (b) nearshore-northward, and (c) northwestern typhoons. Percentages outside (inside) the brackets indicate fractions of the trajectory number (moisture contributions to precipitation) of the water vapor paths

从轨迹数量看, 登陆上海型台风强降水的水汽主要源于东侧的水汽路径 2 (占比 48%), 近海北上型台风强降水的水汽主要源于南侧的水汽路径 1 (占比 38%) 和东侧的水汽路径 2 (占比 27%), 而对于西北型台风, 源于上海东侧的水汽路径 2 (占比 32%)、南侧的水汽路径 1 (占比 27%) 和北侧的水汽路径 3 (占比 26%) 都较为重要。对于不同的水汽路径, 分别计算对上海降水的水汽贡献, 得出一般情况下, 水汽路径包含的轨迹数量越多, 对降水的贡献越大。但值得注意的是, 尽管水汽路径 3 包含的轨迹数量相对偏少, 但水汽贡献仍较为显著, 可能与平均每条轨迹在上海强降水区内凝结的水汽量较多有关。

进一步研究不同水汽输送路径的比湿 (图 4a、c、e) 及高度 (图 4b、d、f) 随时间的变化发现, 尽管气块在到达强降水区之前, 经历了多次小的波动即蒸发、降水过程, 但总体而言先高度降低、获得水汽、比湿增加, 再高度迅速升高、抬升凝结、比湿减少。其中, 水汽路径 3 迅速抬升凝结的时间最晚, 产生的降水几乎全部落在上海强降水区内, 而其余水汽路径在到达上海之前已经产生了一部分降水, 可能与它们的比湿较高、更易凝结产生降水有关, 这也解释了为何水汽路径 3 能在包含的轨迹数量较少的情况下仍有较大的降水贡献。水汽路径 3 由于源于北部海域, 下垫面水汽蒸发较少, 且高度较高, 相较于源于中南部海域的水汽路径 1、2 和 4, 比湿明显偏低。

具体研究水汽获得的过程发现, 对于登陆上海型台风强降水, 主要的水汽输送路径 2 在到达强降水区前的 2~3 d (−48~−72 h) 比湿增加较快 (图 4a), 可能与西北太平洋西部的水汽蒸发较强有关 (图 3a)。近海北上型台风强降水有 2 条主要的水汽输送路径, 路径 1、路径 2 分别在到达强降水区前的 2~5 d (−48~−120 h)、3.5~4.5 d (−84~−108 h) 和 0.5~1 d (−12~−24 h) 比湿增加较快 (图 4c), 菲律宾以东洋面、西北太平洋西部和我国东南沿海分别可能是主要的水汽源区 (图 3b)。西北型台风强降水主要的水汽输送路径中, 路径 1 的比湿在到达强降水区前的 2~10 d (−48~−240 h) 持续增加, 路径 2、3 的比湿分别在到达强降水区前的 0.5~4 d (−12~−96 h)、2~8 d (−48~−192 h) 增加较快 (图 4e), 印度尼西亚附近海域、南海、菲律宾以东洋面、西北太平洋西部、我国东南和东北沿海均可能起到了较大的水汽贡献 (图 3c)。

该部分通过后向水汽轨迹追踪及聚类分析, 得到了影响上海不同路径台风强降水主要的三维水汽输送路径。虽然水汽轨迹聚类后的湿度变化可以反映出气块输送过程中的一些蒸发和降水信息, 大致推断出对强降水贡献较大的区域, 但这仅仅局限于

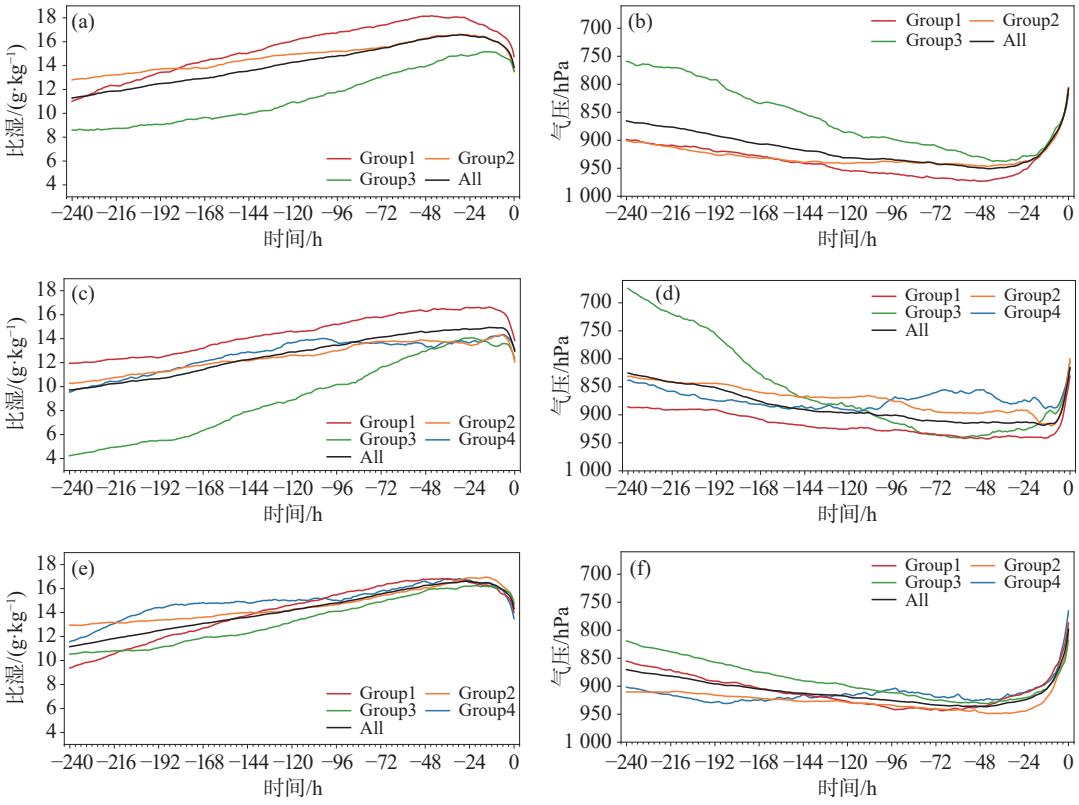


图 4 登陆上海型 (a、b)、近海北上型 (c、d)、西北型 (e、f) 台风造成上海强降水期间, 由气块到达追踪点 (图 2) 的时刻 (0 h) 向后追踪 10 d (-240 h) 得到的轨迹上的比湿 (a、c、e, 单位: g·kg^{-1}) 和气压 (b、d、f, 单位: hPa) 随时间的变化 (彩色实线为 Group1—4 各水汽路径平均, 黑色实线为总体 All 平均)

Fig. 4 Specific (a, c, e) humidity (unit: g·kg^{-1}) and (b, d, f) air pressure (unit: hPa) along the backward trajectories from 10 d prior (-240 h) to the moment that the air particles reach starting points (Fig. 2) (0 h) during heavy precipitation in Shanghai produced by (a, b) landfall, (c, d) nearshore-northward and (e, f) northwestern typhoons (Colored lines are group averages of different water vapor paths, and black lines are overall averages)

对问题的定性描述, 具体的水汽贡献大小还需要做进一步的定量分析。

3 水汽源区分析

Sun 和 Wang (2015) 提出的水汽贡献分析方法 (详见 1.4 小节), 可为定量研究水汽输送过程中的蒸发、降水过程提供一定的理论和参考依据。图 5 展示了水汽输送路径上比湿变化的空间分布, 从图中可见, 路径上蓝色的部分比湿降低、红色的部分比湿升高, 依据 Stohl 和 James (2004) 提出的“蒸发–降水分析法”, 经过上述区域时气块分别净失去、净获得水汽。总体看, 水汽输送路径上蓝色的部分与红色

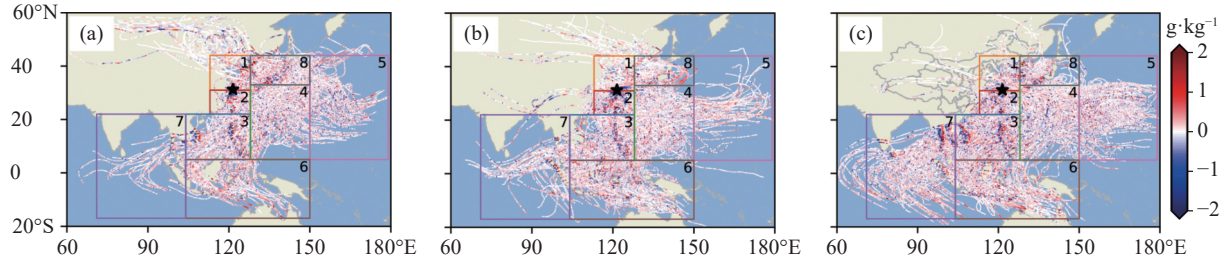


图 5 登陆上海型 (a)、近海北上型 (b)、西北型 (c) 台风造成上海强降水期间水汽轨迹上比湿 (填色) 的变化 (黑色星号标注上海区域位置。黑色数字表示源区, 其中, 1 代表我国东北沿海, 2 代表我国东南沿海, 3 代表南海及菲律宾以东洋面, 4 代表西北太平洋西部, 5 代表西北太平洋东部, 6 代表印度尼西亚附近海域, 7 代表印度洋, 8 代表日本岛附近海域)

Fig. 5 Specific humidity changes (shaded) along water vapor trajectories during heavy precipitation in Shanghai produced by (a) landfall, (b) nearshore-northward, and (c) northwestern typhoons (The black star denotes the position of Shanghai. Source area 1 indicates the northeastern coast of China, 2 indicates the southeastern coast of China, 3 indicates the South China Sea and the ocean east to Philippines, 4 indicates the west of Northwestern Pacific Ocean, 5 indicates the east of Northwestern Pacific Ocean, 6 indicates the sea around Indonesia, 7 indicates the Indian Ocean, and 8 indicates the sea around Japan)

的部分交错分布, 表明气块从源区获得的水汽在输送过程中会因凝结为水滴而失去一部分, 从而产生损耗, 因此即使气块在某个区域获得了很多的水汽, 也并不意味着该区域一定会对最终的降水产生重要贡献。除了沿途的损耗 (Loss), Sun 和 Wang (2015) 还考虑到一部分水汽到达目标区域但未凝结转化为降水 (Unreleased), 气块从源区获得的水汽 (Uptake), 除去这两部分, 才能得到在上海强降水区凝结的水汽 (Released)。

依据水汽轨迹聚类后的比湿变化及蒸发、降水的空间分布特征, 划分出 8 个可能的主要水汽源区 (图 5), 其中 1—8 分别代表我国东北沿海、我国东南沿海、南海及菲律宾以东洋面、西北太平洋西部、西北太平洋东部、印度尼西亚附近海域、印度洋、日本岛附近海域, 进而对不同源区水汽的输送过程进行了定量分析, 其结果见表 2。从中可见, 气块从源区获得的水汽只有不到 10% 会凝结转化为水滴, 有很大一部分在输送过程中被损耗, 到达强降水区后也有很大一部分未凝结, 最终在上海强降水区内凝结水汽量较多的源区, 相对而言凝结的比例也较高。水汽输送的路径越长, 沿途可能经历的损失越多, 经历了长距离输送, 源区 5、6、7 损耗的水汽比例较高, 而距离上海较近的水汽源区 1 和 2, 损耗的水汽比例相对偏低。然而, 源区 1 和 2 的水汽到达上海强降水区后未凝结的比例相对偏高, 损耗与未凝结部分的相互抵消下, 气块从源区获得的水汽多少, 仍对最终在强降水区凝结的水汽多少起到了决定性作用。

基于在上海强降水区内凝结的水汽 (Released), 计算得到不同源区 (图中标识为 Source1—8, 下同) 对上海台风强降水的水汽贡献 (图 6)。对于登陆上海型台风, 源区 4 对上海强降水的水汽贡献最高 (39.6%), 达其余各源区水汽贡献的 2 倍以上, 对降水起到了决定性的作用。对于近海北上型台风, 源区 4 仍为最主要的水汽源区, 对上海强降水的水汽贡献达 29.8%, 但此时源区 2、源区 3 的水汽贡献也不可忽略, 分别为 23%、18.5%。而对于西北型台风, 源区 2 对降水的水汽贡献最高 (23.1%), 其次是水汽源区 4 和源区 3, 二者的贡献基本相当, 分别为 18% 和 17.3%, 其余源区的水汽贡献相对较小, 可以忽略。

图 7 展示了不同时刻从水汽源区获得的水汽最

表 2 不同路径台风造成上海强降水期间, 气块从图 5 中各源区获得的水汽量 (Uptake)、沿途损耗的水汽量 (Loss)、到达目标区域但未凝结转化为水滴的水汽量 (Unreleased)、在上海强降水区凝结的水汽量 (Released) 以及各项与 Uptake 的百分比

Table 2 The amount of water vapor absorbed from each source area in Fig. 5 (Uptake), lost along the way (Loss), reaching the target area without converting to water (Unreleased), released in heavy precipitation area in Shanghai (Released) , and the percentage ratio of each item to Uptake during heavy precipitation in Shanghai produced by typhoons with different paths

水汽源区	登陆上海型				近海北上型				西北型			
	Uptake/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Loss/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Unreleased/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Released/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Uptake/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Loss/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Unreleased/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Released/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Uptake/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Loss/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Unreleased/ ($g\cdot kg^{-1}$)	Released/ ($g\cdot kg^{-1}$)
1	795.7	282.5 (35.5%)	464.2 (58.3%)	49.0 (6.2%)	609.6	240.5 (39.5%)	333.1 (54.6%)	36.0 (5.9%)	1 558.6	616.7 (39.6%)	879.4 (56.4%)	62.5 (4%)
2	1 263.5	373.5 (29.6%)	819.0 (64.8%)	71.0 (5.6%)	1 786.6	512.4 (28.7%)	1 161.2 (65%)	113.0 (6.3%)	3 081.8	958.7 (31.1%)	1 992.3 (64.6%)	130.8 (4.3%)
3	1 100.9	575.7 (52.3%)	487.1 (44.2%)	38.1 (3.5%)	2 118.8	1 016.0 (48%)	1 012.0 (47.7%)	90.8 (4.3%)	2 966.7	1 374.7 (46.3%)	1 494.5 (50.4%)	97.5 (3.3%)
4	3 206	1 388.9 (43.3%)	1 612.6 (50.3%)	204.5 (6.4%)	2 840.3	1 377.2 (48.5%)	1 316.7 (46.4%)	146.4 (5.1%)	2 933.7	1 319 (45%)	1 512.9 (51.5%)	101.8 (3.5%)
5	1 042.4	678.4 (65.1%)	319.5 (30.7%)	44.5 (4.2%)	455.4	285.6 (62.7%)	151.3 (33.2%)	18.5 (4.1%)	2 411.8	1 512.8 (62.7%)	843.0 (35%)	56.0 (2.3%)
6	1 192.9	769.1 (64.5%)	392.1 (32.9%)	31.7 (2.6%)	2 200.4	1 465.0 (66.6%)	680.0 (30.9%)	55.4 (2.5%)	2 472.1	1 597.3 (64.6%)	827.6 (33.5%)	47.2 (1.9%)
7	232.4	161.2 (69.3%)	67.8 (29.2%)	3.4 (1.5%)	497.4	358.3 (72%)	130.9 (26.3%)	8.2 (1.7%)	1 720.1	1 193.5 (69.4%)	496.6 (28.9%)	30.0 (1.7%)
8	1 276.7	633.1 (49.6%)	570.1 (44.7%)	73.5 (5.7%)	546.4	281.4 (51.5%)	242.2 (44.3%)	22.8 (4.2%)	1 465.5	856.3 (58.4%)	570.0 (38.9%)	39.2 (2.7%)

注: ( )里面的值对应各项与Uptake的百分比

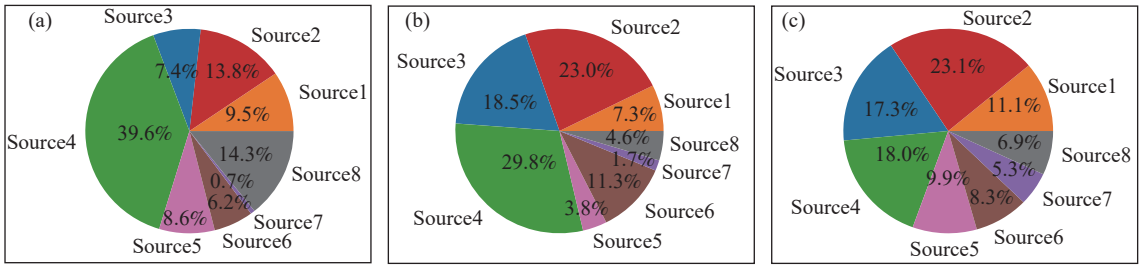


图 6 各源区 (Source) 对登陆上海型 (a)、近海北上型 (b)、西北型 (c) 台风造成的上海强降水的水汽贡献

Fig. 6 Water vapor contribution of each source area to heavy precipitation in Shanghai produced by (a) landfall, (b) nearshore-northward, and (c) northwestern typhoons

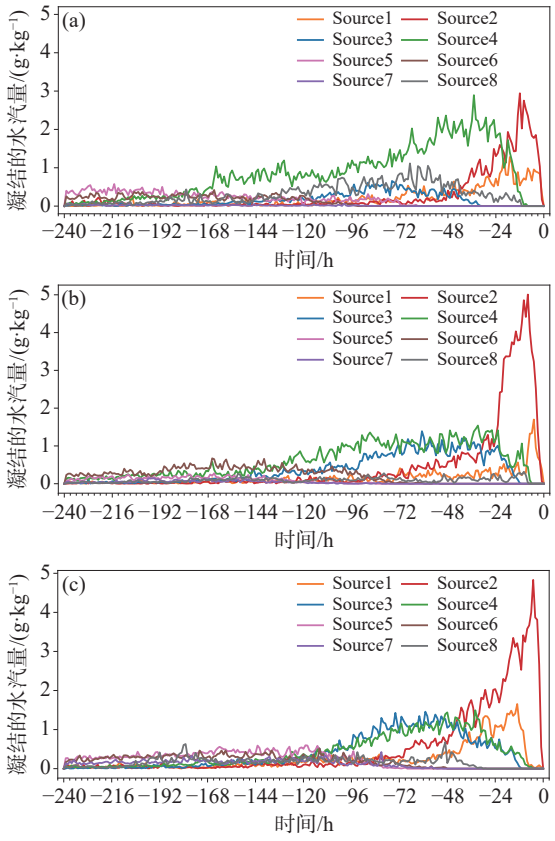


图 7 登陆上海型 (a)、近海北上型 (b)、西北型 (c) 台风造成上海强降水期间, 气块从后向轨迹上各水汽源区 (Source) 获得的水汽最终在上海强降水区内凝结的水汽量 (0 h 为气块到达追踪点的时刻)

Fig. 7 The amount of water vapor released in heavy precipitation area in Shanghai (unit: g·kg^{-1}) which is absorbed from each source area along the backward trajectories (Fig. 5) during heavy precipitation produced by (a) landfall, (b) nearshore-northward, (c) northwestern typhoons (and 0 h is the time when air particles reach starting points)

终能在上海强降水区内凝结的量。登陆上海型台风强降水主要的水汽源区为西北太平洋西部 (水汽源区 4) (图 6a), 由图 7a 可知气块在到达目标区域前的 15—168 h 从该源区获得的水汽在上海强降水区凝结较多, 考虑到只有水汽路径 2 经过该源区 (图 3a), 结合图 4b, 此时段水汽来源于 950—925 hPa 高度层。同理, 对于近海北上型台风强降水 (图 6b、图 7b、图 3b、图 4d), 各水汽路径于到达目标区域前的 3—24 h 从我国东南沿海 (水汽源区 2) 925—875 hPa 高度层、水汽路径 1 和 4 于到达目标区域前的 18—96 h 从南海及菲律宾以东洋面 (水汽源区 3) 950—850 hPa 高度层、水汽路径 2 于到达目标区域前的 9—129 h 从西北太平洋西部 (水汽源区 4) 925—850 hPa 高度层获得的水汽, 对上海强降水区内的降水贡献较大。而对于西北型台风 (图 6c、图 7c、图 3c、图 4f), 各水汽路径于到达目标区域前的 3—48 h 从我国东南沿海 (水汽源区 2) 950—850 hPa 高度层、水汽路径 1 和 4 于到达目标区域前的 15—120 h 从南海及菲律宾以东洋面 (水汽源区 3) 950—900 hPa 高度层、水汽路径 2 于到达目标区域前的 12—120 h 从西北太平洋西部 (水汽源区 4) 950—925 hPa 高度层获得的水汽, 对上海强降水区内的降水贡献较大。

4 结论与讨论

本文利用逐小时的 ERA5 再分析资料驱动拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT, 对近 20 a 登陆上海型、近海北上型、西北型 3 类台风路径造成上海强降水期间的后向水汽轨迹进行追踪, 并对其通过相关定量分析, 得到如下结论:

(1) 对上海强降水区后向水汽轨迹的聚类分析表明, 登陆上海型台风降水只有 1 条主要的水汽输送路径, 近海北上型台风降水有 2 条主要的水汽输送路径, 而西北型台风降水有 3 条主要的水汽输送路径。

(2) 登陆上海型台风强降水的水汽路径来自东侧 (占比 48%), 近海北上型台风强降水的水汽路径来自东侧 (占比 27%) 和南侧 (占比 38%), 西北型台风强降水的水汽路径来自东侧 (占比 32%)、南侧 (占比 27%) 和北侧 (占比 26%)。

(3) 通过计算各源区对降水的水汽贡献, 进一步确定了主要水汽输送路径上的主要水汽源区。登陆

上海型台风强降水的水汽主要源自西北太平洋西部(源区 4), 水汽贡献为 39.6%; 而近海北上型和西北型台风强降水的水汽主要源自西北太平洋西部 (源区 4)、南海及菲律宾以东洋面 (源区 3)、我国东南沿海(源区 2), 水汽贡献分别为 29.8%、18.5%、23% 和 18%、17.3%、23.1%。

(4) 登陆上海型台风强降水发生前 15—168 h 位于源区 4 上空 950—925 hPa 高度层的水汽, 近海北上型台风强降水发生前 9—129 h 位于源区 4 上空 925—850 hPa 高度层的水汽, 西北型台风强降水发生前 3—48 h 位于源区 2 上空 950—850 hPa 高度层的水汽, 对上海强降水的贡献最大。

本文借助定量分析方法, 通过比较各源区对降水的水汽贡献, 确定了 3 类路径台风造成上海强降水主要水汽输送路径上的主要水汽源区, 并进一步得到各源区对上海降水贡献较大的高度层, 这是今后在上海台风强降水预报中需要重点关注的三维区域。尽管有沿途的损耗与到达目标区域后未凝结的水汽, 在上海强降水区凝结转化为水滴的水汽量很大程度上仍取决于从源区获得的水汽量。因此, 水汽源区的湿度对未来上海台风降水强度有一定的指示意义。需要指出的是, 本文仅粗略地划分了 8 个水汽源区, 今后的研究中, 可以基于现有成果, 对其中主要的水汽源区进一步细分, 得到不同路径台风导致的上海强降水更为精细的水汽来源。

参考文献 (References):

布和朝鲁,诸葛安然,谢作威,等.2022. 2021 年“7.20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J].大气科学,46(3):725−744. Buhe C L, Zhuge A R, Xie Z W, et al. 2022. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the “7.20” Rainstorm in Henan Province in 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(3):725−744 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2202.21226

康邵钧,康庄,朱蒙.2023. 2018 年台风“温比亚”引发豫东极端降水的特征与成因分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):36−43. Kang S J, Kang Z, Zhu M. 2023. Characteristics and causes of extreme precipitation in east Henan caused by Typhoon “Rumbia” in 2018 [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):36−43 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.005

刘汉华,唐伟民,赵利刚.2010. 2008 年“凤凰”台风暴雨的水汽和螺旋度分析[J].气象科学,30(3):344−350. Liu H H, Tang W M, Zhao L G. 2010. Analysis of helicity and moisture during a rainstorm effected by 0808 typhoon [J]. Journal of the Meteorological Sciences,30(3):344−350. (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1009−0827.2010.03.009

钮学新,杜惠良,滕代高,等.2010.影响登陆台风降水量的主要因素分析[J].暴雨灾害,29(1):78−82. Niu X X, Du H L, Teng D G, et al. 2010. Main factors affecting the rainfall caused by landing typhoons [J]. Torrential Rain and Disasters,29(1):78−82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2010.01.013

饶晨泓,毕鑫鑫,陈光华,等.2022.近海台风对“21·7”河南极端暴雨过程水汽通量和动、热力条件影响的模拟[J].大气科学,46(6):1577−1594. Rao C H, Bi X X, Chen G H, et al. 2022. A numerical simulation on the impacts of the offshore typhoons on water vapor flux, dynamic and thermal conditions of the extreme rainstorm event in Henan Province in July 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 46(6):1577−1594 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2204.21255

任福民,杨慧.2019. 1949 年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J].暴雨灾害,38(5):526−540. Ren F M, Yang H. 2019. An overview of advances in typhoon rainfall and its forecasting researches in China during the past 70 years and future prospects [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):526−540 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.014

任伟,任燕,张庆.2022.台风“温比亚”影响期间山东极端降水过程水汽来源及源区贡献定量分析[J].气象科技,50(1):94−102. Ren W, Ren Y, Zhang Q. 2022. Moisture sources and quantitative analysis of source contributions of extreme precipitation in Shandong Province affected by Rumbia [J]. Meteorological Science and Technology,50(1):94−102 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20210218

杨萌,廖朝霞.2024. 2023 年宜宾市“5.31”区域性暴雨特征及其成因[J].高原山地气象研究,44(S1):59−64. Yang M, Liao Z X. 2024. Characteristics and causes of "5.31" regional rainstorm in Yibin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(S1):59−64 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.Z1.008

Akihiko M. 2006. A cloud-resolving numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari (2004) [C]// Team Member Report on Topic 0.3 of Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclone (IWTC-VI). WMO/OMM:36–43

Bian G F, Nie G Z, Qiu X. 2021. How well is outer tropical cyclone size represented in the ERA5 reanalysis dataset? [J]. Atmospheric Research,249:105339. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105339

Chen Y H, Kuo H C, Wang C C, et al. 2017. Influence of southwest monsoon flow and typhoon track on Taiwan rainfall during the exit phase: modelling study of typhoon Morakot (2009) [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,143(709):3014−3024. doi:10.1002/qj.3156

Chen Y R X, Luo Y L. 2018. Analysis of paths and sources of moisture for the South China rainfall during the presummer rainy season of 1979–2014 [J]. Journal of Meteorological Research,32(5):744−757. doi:10.1007/s13351−018−8069−7

Hersbach H, Bill B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146(730):1999−2049. doi:10.1002/qj.3803

Likas A, Vlassis N, Verbeek J J. 2003. The global k-means clustering algorithm [J]. Pattern Recognition,36(2):451−461. doi:10.1016/S0031−3203(02)00060−2

Liu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(4):690−699. doi:10.1007/s00376−020−0211−7

Nie Y, Sun J. 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021 [J]. Geophysical Research Letters,49(4): e2021GL097446. doi:10.1029/2021GL097446

Pérez A, Fernández J C, Sorí R, et al. 2023. Moisture source identification for precipitation associated with tropical cyclone development over the Indian Ocean: a Lagrangian approach [J]. Climate Dynamics, 60(9):2735−2758. doi:10.1007/s00382−022−06429−4

Ralph F M, Dettinger M D, Cairns M M, et al. 2018. Defining “atmospheric river”: How the glossary of meteorology helped resolve a debate [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,99(4):837−839. doi:10.1175/BAMS−D−17−0157.1

Sodemann H, Schwierz C, Wernli H. 2008. Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,113(3):D03107. doi:10.1029/2007JD008503

Sprenger M, Wernli H. 2015. The LAGRANTO Lagrangian analysis tool–version 2.0 [J]. Geoscientific Model Development,8(8):2569−2586. doi:10.5194/gmd−8−2569−2015

Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,96(12):2059−2077. doi:10.1175/BAMS−D−14−00110.1

Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,5(9):2461−2474. doi:10.5194/acp−5−2461−2005

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]. Journal of Hydrometeorology,5(4):656−678. doi:10.1175/1525−7541(2004)005<0656:ALAOTA>2.0.CO;2

Sun B, Wang H. 2015. Analysis of the major atmospheric moisture sources affecting three sub-regions of East China [J]. International Journal of Climatology,35(9):2243−2257. doi:10.1002/joc.4145

Trenberth K E. 1999. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation [J]. Journal of Climate,12(5):1368−1381. doi:10.1175/1520−0442(1999)012<1368:AMRROA>2.0.CO;2

Vanderent R J, Tuinenburg O A. 2017. The residence time of water in the atmosphere revisited [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 21(2):779−790. doi:10.5194/hess−21−779−2017

Xu J, Liu Z. 2023. Water vapor products from ERA5, MERSI-II/FY-3D, OLCI/Sentinel-3A, OLCI/Sentinel-3B, MODIS/Aqua, and MODIS/Terra in Australia: a comparison against in-situ GPS water vapor data [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 149(753):1435−1458. doi:10.1002/qj.4467

Zhang J Y, Wu L G, Ren F M, et al. 2013. Changes in tropical cyclone rainfall in China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,91(5):585−595. doi:10.2151/jmsj.2013−502

Zhao D, Yu Y, Chen L. 2021. Impact of the monsoonal surge on extreme rainfall of landfalling tropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(5):771−784. doi:10.1007/s00376−021−0281−1

(责任编辑 闵爱荣)