



台风“利奇马”(1909)活动期间不同强降水区域的水汽路径及源地贡献对比分析

赵荷珏 陈光华 饶晨泓

Comparative analysis of the water vapor paths and sources for different heavy rainfall regions during Typhoon Lekima (1909)

ZHAO Hejue, CHEN Guanghua, RAO Chenhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-025>

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

上海台风强降水水汽来源的定量化研究

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

暴雨灾害. 2025, 44(6): 723–732 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-209>

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>

“利奇马”(2019)台前飑线过程演变和异常特征分析

Analysis of evolution and abnormal characteristics on the pre-TC squall line of typhoon Lekima (2019)

暴雨灾害. 2022, 41(2): 192–203 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.010>

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 rainstorm event in Tongren of Guizhou Province

暴雨灾害. 2023, 42(6): 648–658 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-064>

湖南一次持续性暴雨过程的水汽输送与收支特征

Analysis on transport and budget characteristics of water vapor in a sustained heavy rain event in Hunan Province

暴雨灾害. 2021, 40(5): 513–522 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.008>

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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵荷珏,陈光华,饶晨泓.2026.台风“利奇马”(1909)活动期间不同强降水区域的水汽路径及源地贡献对比分析[J].暴雨灾害,45(3): 340–348. ZHAO Hejue, CHEN Guanghua, RAO Chenhong. 2026. Comparative analysis of the water vapor paths and sources for different heavy rainfall regions during Typhoon Lekima (1909) [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(3):340–348 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–025

台风“利奇马”(1909)活动期间不同强降水区域的水汽路径及源地贡献对比分析

赵荷珏^{1, 2, 3}, 陈光华^{1, 2, 3}, 饶晨泓^{1, 2, 3}

(1. 全国暴雨研究中心, 武汉 430074; 2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 水汽是台风暴雨发生的必要条件之一, 探究水汽来源对认识台风暴雨过程具有重要意义。利用欧洲中期天气 ERA5 再分析资料驱动混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), 采用面源贡献定量估计方法, 分析台风“利奇马”(1909)活动期间浙江和山东降水大值区的环流形势、水汽路径和源地贡献的差异及其成因。结果表明: (1) 浙江和江苏南部降水区水汽主要由西南水汽通道和台风“罗莎”北侧的偏东气流共同输送; 随着西南气流的减弱, 山东降水区水汽主要由太平洋的水汽经台风北侧的偏东气流输送。(2) 浙江和江苏南部降水区水汽路径主要有 4 条, 分别来自东太平洋、澳大利亚、西太平洋和印度洋, 而山东降水区水汽路径有 3 条, 分别来自东太平洋、印度洋和西太平洋, 其中东太平洋路径占比升至 51.7%, 该差异的主要原因是山东降水中西南气流减弱, 使得来自印度洋和澳大利亚的轨迹减少, 而两个台风北侧的偏东气流输送太平洋的水汽路径占比增加。(3) 浙江和江苏南部降水区主要水汽贡献源地是太平洋和澳大利亚, 分别占 33.1% 和 15.3%, 与这两个源地轨迹占比大且水汽转换率高密切相关; 山东降水区水汽贡献主要来自太平洋 (73.8%), 这是由于来自此区域的轨迹占比高且这些气块吸收的水汽比高达 80.8%。因此, 对于同一台风不同降水过程, 其水汽路径和贡献率有所区别, 这一研究结果可为进一步理解台风降水水汽来源和台风暴雨落区预测提供参考。

关键词: 水汽路径; 水汽源地; 利奇马; HYSPLIT 模式

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–025

Comparative analysis of the water vapor paths and sources for different heavy rainfall regions during Typhoon Lekima (1909)

ZHAO Hejue^{1, 2, 3}, CHEN Guanghua^{1, 2, 3}, RAO Chenhong^{1, 2, 3}

(1. Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430074; 2. Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: As water vapor is essential for typhoon precipitation, exploring its origins is important for understanding the evolution of these precipitation events. This study uses Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) which is driven by the data from the fifth generation atmospheric reanalysis data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasting, and the areal source receptor attribution method. The differences and their causes of atmospheric circulations, water vapor paths and contribution of two centers of precipitation in Zhejiang and southern Jiangsu, as well as Shandong during Typhoon Lekima (1909) are analyzed. The results are as follows. (1) From the perspective of atmospheric circulation, water vapor of the precipitation in Zhejiang and southern Jiangsu is mainly transported by the southwesterly water vapor channel and the easterly airflow to the north of Typhoon Krosa. As the southwesterly airflow weakens, the water vapor for the precipitation in Shandong is primarily supplied by Pacific water vapor via the easterly airflow to

收稿日期: 2025–02–14; 定稿日期: 2026–01–03

资助项目: 国家自然科学基金气象联合基金项目 (U2342202); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Z03)

第一作者: 赵荷珏, 主要从事云降水物理学研究。E-mail: zhaohejue22@mailsucas.ac.cn

通信作者: 陈光华, 主要从事热带气旋研究。E-mail: cgh@mail.iap.ac.cn

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

the north of two typhoons. (2) There are four main moisture paths responsible for precipitation in Zhejiang and southern Jiangsu, respectively from the eastern Pacific Ocean, Australia, the western Pacific Ocean and the Indian Ocean, while there are three main moisture paths for precipitation in Shandong, respectively from the eastern Pacific Ocean, the Indian Ocean and the western Pacific Ocean, with the proportion of the eastern Pacific path increasing to 51.7%. The main reason for the difference of the water vapor path is the weakening of the southwesterly wind, which led to a reduction in trajectories from the Indian Ocean and Australia, while the easterly wind to the north of the two typhoons increased the proportion of Pacific transport pathways. (3) Regarding water vapor contribution, the primary source regions for Zhejiang and southern Jiangsu are the Pacific (33.1%) and Australia (15.3%), mainly due to the high trajectory frequency and high moisture conversion rates from these regions. The water vapor contribution from the Pacific Ocean is the highest for the precipitation in Shandong, at 73.8%, attributed to a high trajectory frequency and a high moisture uptake ratio of 80.8% among air parcels originating over the Pacific Ocean. Therefore, water vapor pathways and sources vary across different stages of the same typhoon. These findings can enhance the understanding of water vapor sources and provide valuable references for predicting precipitation locations during typhoon events.

Key words: moisture paths; moisture sources; typhoon Lekima; the HYSPLIT model

引言

台风带来的狂风、暴雨、风暴潮、泥石流等事件,往往会造成严重灾害,甚至导致生命财产巨大损失。台风暴雨是造成台风灾害的主要因素(李江南等, 2003),而充足的水汽供应是暴雨发生的必要条件之一,因此,研究暴雨区水汽路径和源地将有助于预防和减轻台风灾害带来的影响。

前人对降水的水汽输送已有较多研究。中国夏季有4类常见的水汽通道:西南、东南、南海、西北水汽通道,分别体现在南亚季风、副热带季风、南海季风和中纬度西风带对我国夏季降水的影响(何跃, 2008)。我国登陆台风产生强降水的主要水汽来自西北太平洋、南海、印度洋(孟加拉湾),台风区域水汽的输入主要来自于区域南边界,其次是区域东边界(许福星, 2009)。上述研究中均使用欧拉方法对水汽进行分析,但是由于风场和水汽通量具有瞬时性的特征(Stohl and James, 2004; 陈斌等, 2011),欧拉方法不能对水汽贡献进行定量分析(陆婷婷, 2021)。除欧拉方法外,常用的水汽分析方法还有拉格朗日方法。拉格朗日方法着眼于流体中某一物质体积元,不仅可以得到质点的运动轨迹,还可以得到沿轨迹水汽的蒸发及降水(Wernli, 1997)。Stohl和James(2004, 2005)提出了蒸发-降水诊断方法,虽然在后向轨迹追踪时会带来插值等误差,使得降水和蒸发分别高估,但通过追踪大量轨迹,能在使蒸发-降水整体上误差抵消,从而用于确定水汽源汇特征。Sodemann等(2008)考虑了沿轨迹的水汽变化(蒸发和降水),从而得到水汽源点至目标点的水汽贡献率。由于水汽源地、目标降水区和其他区域(既不是水汽源地也不是目标降水区)的蒸发和降水对目标降水区的作用并不相同, Sun和Wang(2014)提出了面源贡献定量估计方法,定量评估了水汽源地对目标降水区域

的水汽贡献率。以上研究均说明,通过拉格朗日方法进行水汽路径和源地的分析已经被广泛应用(王佳津等, 2015; Shi et al., 2020; Nie and Sun, 2022)。

混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model, HYSPLIT)是一种常用的拉格朗日轨迹模式。王佳津等(2015)通过HYSPLIT模式分析得出2013年7月四川盆地夏季暴雨中700 hPa的水汽多为过路水汽,950 hPa和850 hPa的水汽是本次暴雨过程的主要来源,且轨迹并不相同。Shi等(2020)使用HYSPLIT模式模拟东亚夏季风由南向北季节性移动的四个不同阶段中国东部降水气块的拉格朗日轨迹,进一步计算表明中国东部地区的局部水汽循环是最大的水汽源地,在季风末期对华北降水的贡献率甚至达到了55%。Nie和Sun(2022)通过HYSPLIT模式研究发现受西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)和台风影响的2021年7月河南暴雨过程的水汽输送有3条水汽通道,中国南方对此过程水汽的贡献最大(38.1%)。Kimo等(2024)利用HYSPLIT模式识别了埃塞俄比亚南部盆地不同季节的水汽来源,在不同的季节(3—5月和6—9月)具有不同的水汽来源。Guo等(2025)使用HYSPLIT研究了青藏高原水汽源的空间分布和时间变化,西风带、印度夏季风西支(the western arm of Indian summer monsoon, ISM1)、印度夏季风东支(the eastern arm of Indian summer monsoon, ISM2)和高原本地水汽是主要来源;在1951—2020年间,西北部西风水汽增加、西南部ISM1增加、东南部ISM2减少、中部本地水汽增加。边茜等(2024)针对凉山“8.21”暴雨的水汽来源使用HYSPLIT进行分析,发现700 hPa水汽主要来源于东南气流,600 hPa水汽主要来源于西南或偏南气流,500 hPa水汽主要来源于北方,这样“上冷下暖”的不稳定层结,有利于触发对流天气。张林梅等(2025)

使用 HYSPLIT 模式分析表明新疆中天山北坡暴雨过程 700 hPa 及以下水汽主要来自欧洲和中亚地区, 700 hPa 以上的水汽主要来自地中海和黑海附近、大西洋及其沿岸。Chen 等 (2025) 通过 HYSPLIT 研究发现甘南高原中亚大陆水汽在春季占主导地位, 印度洋水汽在夏季占主导, 大西洋水汽在秋季占主导, 大西洋和地中海水汽在冬季占主导。高悦等 (2025) 利用 HYSPLIT 模型分析了近 20 a 影响上海三类台风暴雨事件的水汽路径, 发现登陆型台风的水汽主要源于西北太平洋, 而近海北上型和西北型台风则表现出多路径输送特征。

2019 年 9 号台风“利奇马”于 8 月 9 日 18 时登陆浙江, 此后移入黄海, 于 11 日 13 时再次登陆山东, 具有登陆强度强、陆地滞留时间长、降雨强度大且极端性显著的特征。其中浙江、山东等地共 35 个气象观测站日降雨量突破当地 8 月历史极值, 24 个站点突破当地日降雨量的历史极值。根据台风灾害风险评估模型统计, “利奇马”风雨综合强度指数为 1961 年以来最大 (何立富等, 2020)。此次台风暴雨过程造成 1 402.4 万人受灾, 直接经济损失 537.2 亿元人民币, 给人民生命财产安全带来了重大威胁。基于这次台风过程, 研究人员通过分析水汽通量、水汽通量散度等物理量表明, 台风“利奇马”活动期间, 强大的西南急流和东风急流向暴雨区输送了充沛的水汽, 有利于暴雨的发生 (郭云谦等, 2020; 郑铮等, 2021)。但是, 这些只是定性地了解水汽输送状况, 台风“利奇马”降水期间主要暴雨区的水汽来自哪里? 各水汽源地对台风“利奇马”活动期间降水的贡献有多大? 背景环流场变化后, 水汽路径和源地是否会有所变化? 因此, 本文利用 ERA5 再分析资料分析了台风“利奇马”活动期间环流形势的演变, 而后驱动 HYSPLIT 追踪水汽路径, 并通过面源贡献定量估计方法定量得到水汽源地贡献率, 首次对台风“利奇马”暴雨过程中不同降水区域的水汽路径和源地贡献及其差异产生的原因进行分析, 探究台风不同降水阶段复杂的水汽来源, 以期增加对台风暴雨形成的认识, 提高台风暴雨预报能力。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文使用的数据包括: (1) 美国海洋和大气管理局气候预测中心反演的 2019 年 8 月 7 日 06 时—8 月 13 日 06 时 (世界时, 下同) 的卫星降水数据, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率是 24 h, 其降水量起止时间是当日的 06 时—次日 06 时, 用于分析台风“利奇马”活动期间降水情况。(2) 中国气象局上海

台风研究所的热带气旋最佳路径数据 (Lu et al., 2021), 用于分析台风路径和强度。(3) 欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料 (ERA5), 空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率 1 h, 包括的物理量有气压、温度、风场、降水、比湿、位势高度, 用于轨迹计算和分析环流形势。

1.2 研究方法

1.2.1 HYSPLIT 模式

本文中使用的美国国家海洋和大气管理局开发的混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT, 对气块进行后向追踪, 计算气块的运动轨迹, 并通过插值得到沿轨迹的气象要素。由于水汽在大气中的平均停留时间是 10 d, 且该时段内轨迹计算相对准确 (Stohl and James, 2005), 因此本文将对起始点后向追踪 10 d, 得到气块的运动轨迹。起始点选取研究区域垂直方向上 1 000~5 500 m 每隔 500 m, 水平方向上间隔 1° 的位置, 这主要与水汽集中在对流层中下层 (Nie and Sun, 2022) 有关。起始点时间为研究时段内每天 8 个时次 (00、03、06、09、12、15、18、21 时)。但是这些起始点并非对目标区的降水都有作用, 为了进一步选取对目标区降水有贡献的气块, 将按照以下条件筛选目标气块 (陈斌等, 2011): (1) 气块所在网格降水大于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; (2) 降水需要空气中水汽充沛, 因此气块在后向追踪的起始时刻要满足相对湿度大于 80%; (3) 假设气块只有比湿降低时才会发生降水, 因此气块要在后向追踪的起始时刻降水需要满足气块 6 h 比湿 (q) 变化 $q(t_0) - q(t_{0-6\text{h}})$ 小于 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 t_0 指轨迹后向追踪的起始时刻。

1.2.2 面源贡献定量估计方法

通过面源贡献定量估计方法 (Sun and Wang, 2014) 并将每个网格视为水汽源地, 可以定量计算每一网格源地 i 对于目标降水区域的水汽贡献率, 其主要思路为: 将从源地 i 吸收的水汽 $Q_u(i)$ 分为 3 个部分, 分别是在沿途损耗的水汽 $Q_l(i)$, 达到目标降水区并释放的水汽 $Q_r(i)$, 达到目标降水区但未释放的水汽 $Q_{ur}(i)$ 。其中能够达到目标降水区域并释放的水汽 $Q_r(i)$ 与所有目标气块在研究区域释放的总水汽 Q_r 之比, 就是该源地的水汽贡献率 C_i , 计算公式如下

$$C_i = \frac{Q_r(i)}{Q_r} \quad (1)$$

2 降水概况和环流形势

2.1 降水概况

台风“利奇马”8 月 4 日生成于太平洋上, 8 月 6 日 15 时达到超强台风级别。9 日 18 时, “利奇马”

登陆浙江,北移经过浙江和江苏后,再次入海,11日12时登陆山东,停留了36 h后,于13日06时停止编号。“利奇马”活动期间给我国带来大范围降水,造成严重影响。

台风“利奇马”活动期间24 h累积降水分布见图1,从中可见降水大值主要集中在9日06时—12日06时(图1c—e)的沿海地区,其中9日06时—11日06时“利奇马”的登陆给浙江和江苏南部带来较大降水

(图1c和图1d的目标区域1),随着台风北移,降水区向北扩展,使得10日06时—12日06时山东地区发生强降水(图1d和图1e的目标区域2)。根据降水大值区域和时段确定两个研究对象,其中研究对象1是8月9日06时—11日06时浙江及江苏南部地区(119°—122°E, 28°—33°N)的降水,研究对象2是8月10日06时—12日06时山东地区(116°—120°E, 35°—38°N)的降水。

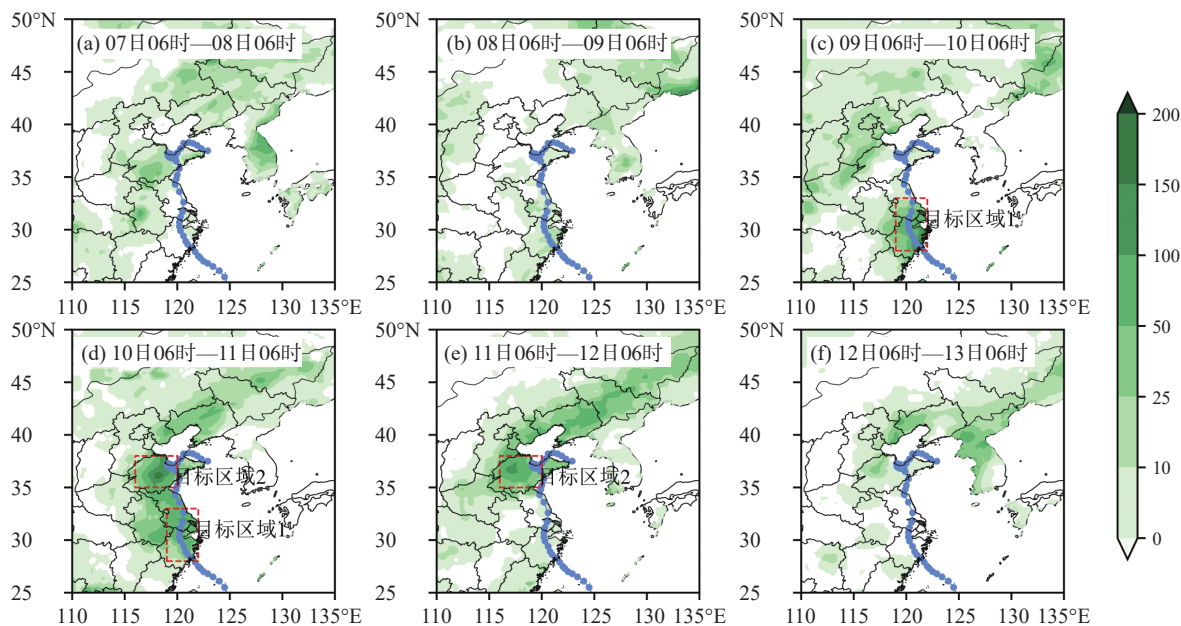


图1 2019年8月7日06时—13日06时逐24 h(a—f)累积降水量(填色,单位:mm)分布(图中蓝色圆点代表台风路径)

Fig. 1 (a—f) 24 h accumulated precipitation (shaded, unit: mm) from 06:00 UTC 7 August to 06:00 UTC 13 August 2019 (The blue dots denote the tropical cyclone track)

2.2 环流形势

台风“利奇马”活动期间(图2),500 hPa西太副高稳定维持在40°N以南,125°E以东的区域。9日06时(图2a),受西太副高南侧偏东引导气流的影响,台风“利奇马”的中心靠近浙江地区,其螺旋雨带处有水汽通量大值区,500 hPa水汽通量超过了 $0.5 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,较强的水汽输送有助于产生充沛的降水,从而有利于浙江强降水的发生。此外,南半球越赤道而来的西南气流和台风“罗莎”北侧的偏东气流,共同通过西太副高与台风“利奇马”之间的偏东气流向降水区输送大量水汽,水汽通量在 $0.1 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,形成水汽输送带,加之该地区位于中纬度西风槽(110°E附近)前,动、热力因素共同促进了强降水的发生发展。10日06时(图2b),台风“利奇马”已在浙江登陆,中高纬地区西风槽靠近台风倒槽,“利奇马”中心最低气压降至975 hPa,环流形势变化不大,西南急流和台风“罗莎”北侧偏东气流依然同时通过“利奇马”输送水汽。11日06时(图2c),“利奇马”受西太副高

西侧偏南气流影响,北移至浙江北部,其环流与西风槽合并,强度进一步减弱,槽后偏北风携带干冷空气南下,干冷空气入侵与暖空气交汇于山东地区,使得大气不稳定性增加,导致山东地区强降水。由于“利奇马”中心气压减弱至980 hPa,“罗莎”较强的气旋式风场分流越赤道的西南气流,使得向“利奇马”输送水汽的西南通道水汽通量进一步变弱,已降至 $0.4 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,且范围大幅缩小。12日06时(图2d),自南半球越赤道而来的西南气流几乎都被“罗莎”分流,原西南水汽通量进一步减弱至 $0.2 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,两个台风北侧的偏东气流继续向降水区输送水汽。

3 水汽路径差异

为探究气块的运动轨迹,根据研究方法中的条件筛选出对研究对象有贡献的目标气块,通过HYSPLIT后向追踪10 d得到气块轨迹,然后使用K-Means方法(Likas et al., 2003),根据误差平方和确定

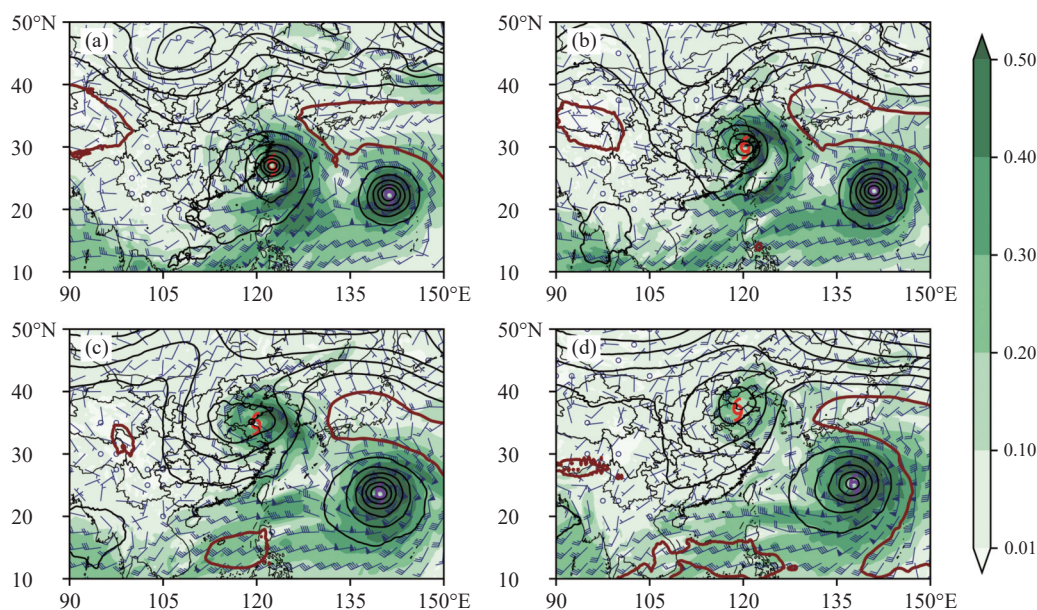


图 2 2019 年 8 月 9 日 06 时 (a), 10 日 06 时 (b), 11 日 06 时 (c) 和 12 日 06 时 (d) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、925 hPa 风场 (风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 925 hPa 水汽通量 (填色, 单位: $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) (红色等值线代表 588 dagpm, 红色和紫色台风符号分别代表“利奇马”和“罗莎”台风中心)

Fig. 2 500 hPa height field (contours, unit: dagpm), 925 hPa wind field (barbs, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and 925 hPa vapor flux (shading, unit: $\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at (a) 06:00 UTC August 9, (b) 00:06 UTC August 10, (c) 00:06 UTC August 11, (d) 00:06 UTC August 12, 2019 (The red contours represent 588 dagpm. The red and violet typhoon symbols represent the center locations of typhoon Lekima and Krosa, respectively)

轨迹聚类数, 如图 3 所示。下文将后向追踪 240 h 后的气块称为初始气块, 沿轨迹运动至研究区域 (即追踪 0 h) 称为终点。图 3a、b 是研究对象 1 的聚类结果: 研究对象 1 的水汽主要来自太平洋 (第一和第二类轨迹) 和南半球的澳大利亚 (第三类轨迹)、印度洋 (第四类轨迹)。从太平洋来的气块分成了第一和第三

二类轨迹, 第一类轨迹主要受到西太副高南部偏东气流的影响, 水汽主要来自东太平洋, 轨迹占比 31.5%。这类气块起始位置高度低, 水汽充足, 在运动过程中气块高度持续降低, 有利于从洋面吸收水汽, 因此它是四类轨迹中平均比湿最高 ($16.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的一类轨迹 (图 3b)。第二类轨迹占总轨迹的 23.4%,

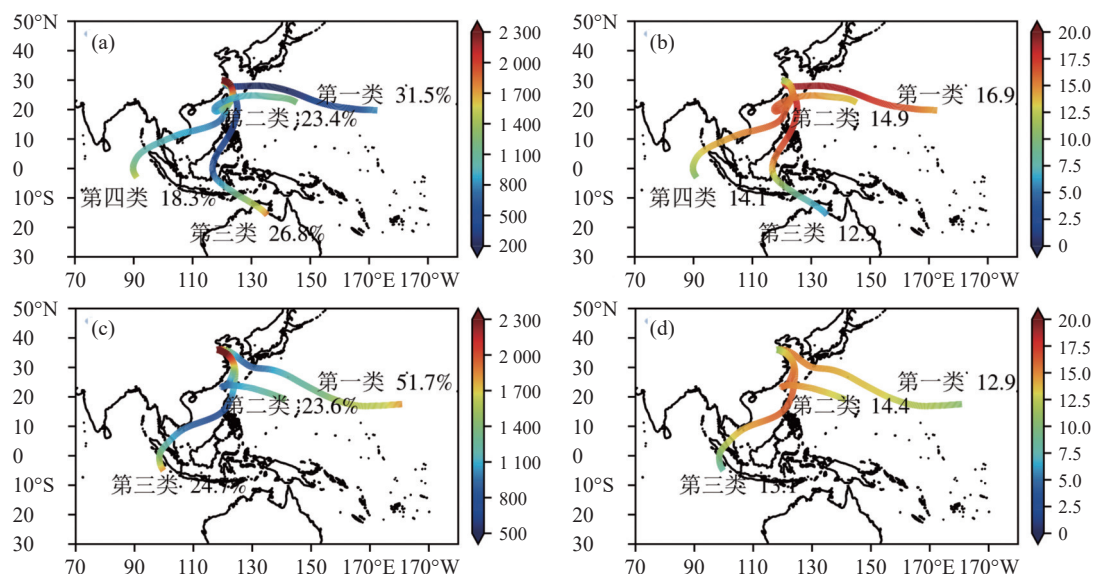


图 3 台风“利奇马” (1909) 活动期间研究对象 1 (a、b) 和研究对象 2 (c、d) 气块轨迹聚类后气块距离地表的距离 (单位: m, 图 a、c 中数字表示该类轨迹占该研究对象总轨迹的百分比) 和气块比湿 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 图 b、d 中数字表示该类轨迹的平均比湿) 随轨迹变化

Fig. 3 (a, c) Height (unit: m) above the surface along trajectories (The numbers indicate the percentage of each cluster in the total trajectories of the target area in Fig. 3a, 3c) and (b, d) the specific humidity (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) along trajectories (The numbers indicate the average specific humidity of each cluster in Fig. 3b, 3d) of air parcels from target (a, b) area 1 and (c, d) area 2 after clustering during Typhoon Lekima (1909)

其起始点位于相对于第一类轨迹偏北偏西的西太平洋,水汽含量偏低,高度偏高。该类轨迹受到台风“利奇马”风场影响,从西太平洋向西出发,在东南沿海地区逆时针旋转后,向西北运动,进入降水区。第三和第四类轨迹在南海北部逐渐接近,自西南向终点运动,与西南气流带来的水汽通量大值(图2)相对应。第三类轨迹主要来自澳大利亚,受东亚夏季风影响,经越赤道气流到达研究区域,占总轨迹的比例仅次于第一类轨迹,为26.8%。这类轨迹初始点水汽含量低的原因除气块高度较高外,还与下垫面靠近沙漠地区有关,因此其平均比湿最低,仅 $12.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。第四类运动轨迹占比最低,仅18.3%,与南亚季风相联系,起始点普遍落在印度洋。该类轨迹上的气块在运动过程中高度始终较高,整条轨迹的平均湿度也较低,仅为 $14.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图3c、d是对研究对象2有贡献的目标气块后向追踪10 d后的轨迹经过聚类后的结果,共聚类为三种轨迹。三类轨迹分别来自东太平洋(第一类轨迹)、西北太平洋(第二类轨迹)和印度洋(第三类轨迹)。与研究对象1一致,气块的高度和比湿有着较好的负相关关系,即高度越高,比湿越低,这是因为大气中的水汽主要集中在中低层,气块高度越低,越容易从环境吸收水汽。与研究对象1相比,研究对象2中来自太平洋的轨迹占比大幅增加(图3c),与水汽通量在西南通道不断减小,在台风“罗莎”附近逐渐增强(图2)相对应,这是因为“罗莎”的气旋式风场增强,从而分流水汽,而西南水汽通道不断减弱,其水汽供应只能依靠台风北侧的偏东风(图2c、d),从而有利于太平洋地区的水汽向研究区域2输送,此时来自太平洋的气块高度整体明显比研究对象1中来自太平洋的轨迹高度高。来自东太平洋的第一类轨迹在三类轨迹中占比最高,达51.7%。由于该类轨迹上的气块高度高(图3c),不利于从洋面吸收水汽,因此其平均比湿($12.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)大幅下降(图3d),相对于研究对象1的第一类轨迹($16.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,图3b)减少 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,成为平均比湿最低的一类轨迹。来自西北太平洋的轨迹(第二类)的平均水汽含量($14.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,图3d)相对于研究对象1的第一类轨迹($14.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,图3b)的降幅仅有 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这比来自东太平洋轨迹的水汽减少幅度小,是研究对象2中三类轨迹里平均比湿最高的一类轨迹。第三类轨迹来自印度洋,占总轨迹的24.7%(图3c),该类轨迹在南海存在明显的高度下降,有利于从洋面摄取水汽,但由于其初始高度比研究对象1中来自印度洋的初始气块高,使得相比于研究对象1中来自印度洋的轨迹平均比湿

($14.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,图3b)仍然略有下降。

综上,两个研究对象的水汽路径存在差异,浙江和江苏南部降水的水汽路径主要有4条,分别来自东太平洋、澳大利亚、西太平洋和印度洋,轨迹占比分别为31.5%、26.8%、23.4%、18.3%。但是山东降水中西南气流减弱,使得来自印度洋和澳大利亚的轨迹减少,而两个台风北侧的偏东气流输送太平洋的水汽路径占比过半。山东降水的水汽路径有3条,分别来自东太平洋、印度洋和西太平洋,轨迹占比分别为51.7%、24.7%、23.6%。

4 源地定量水汽贡献率对比及成因

气块在到达目标降水区前会经历复杂的水汽演变过程,气块在源区吸收的水汽,可能在途中损耗,难以全部到达目标降水区。气块不仅在初始位置吸收水汽,沿途不断吸收的水汽更是研究对象降水贡献的重要组成部分。因此,为进一步探究各地对目标降水区的水汽贡献率,本文应用面源贡献定量估计的方法,并将每个网格视为水汽源地,定量计算每个网格对目标降水区的贡献。根据前文对水汽的分析,划分了5个主要的水汽源地,分别是降水局地区域($110^{\circ}\text{--}123^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{--}25^{\circ}\text{N}$)、太平洋($123^{\circ}\text{E}\text{--}160^{\circ}\text{W}$, $0^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{N}$)、中南半岛-南海-菲律宾($100^{\circ}\text{--}123^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$)、印度洋($50^{\circ}\text{--}100^{\circ}\text{E}$, $25^{\circ}\text{S}\text{--}25^{\circ}\text{N}$)和澳大利亚区域($100^{\circ}\text{--}170^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{S}\text{--}0^{\circ}$),通过累加各水汽源地范围内网格点的水汽贡献率,得到5个水汽源地对目标降水区的水汽贡献率。

单位网格对研究对象1降水的水汽贡献率分布如图4a所示,图4b中进一步量化了5个主要水汽源地的水汽贡献率。太平洋地区存在一条水汽贡献大值带,来自该地区轨迹上的气块沿着西太副高边缘的低层气流自东向西移动,一方面持续吸收海洋上的水汽,另一方面途中耗损较少,因此该区域的水汽贡献率最大,约为33.1%。澳大利亚地区存在一条水汽贡献大值带,虽然来自该地区的轨迹占比为26.8%(图3a),但由于气块初始点高度较高且靠近沙漠(图3a),气块难以从环境中吸收水汽,因此澳大利亚地区的水汽贡献率小于太平洋,仅占15.3%。南海贡献了近8.6%的水汽,这主要是由于来自澳大利亚、印度洋以及西北太平洋的轨迹途经南海南部和东部时,气块从环境中吸收了水汽。降水局地区域也贡献了5.8%的水汽,且单位网格的水汽贡献率很大,这主要是因为气块在此吸收的水汽到达目标降水区的距离短,水汽损耗较少。印度洋贡献了18.3%的轨迹(图3a),但是其水汽贡献率仅有1.9%,这主要是由

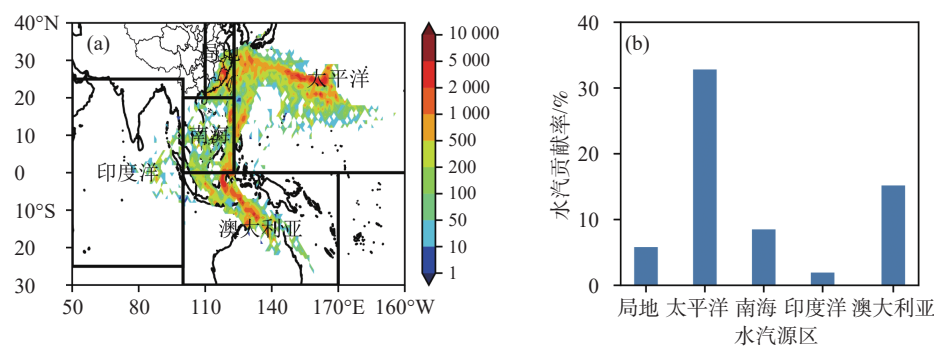


图 4 台风“利奇马”(1909)活动期间单位网格水汽对研究对象 1 降水的水汽贡献率(单位: 10^{-6}) 分布 (a) 及不同水汽源地对研究对象 1 的水汽贡献率 (b)

Fig. 4 (a) Water vapor contribution (unit: 10^{-6}) to precipitation in target area 1 for per unit grid and (b) water vapor contribution for different moisture source areas in target area 1 during Typhoon Lekima (1909)

于在该区域的水汽吸收较少,且途中存在较多的水汽释放。研究对象 1 太平洋的水汽贡献率高与图 2a、b 中台风北侧的水汽输送有关,而来自西南的水汽通量大值,与澳大利亚、南海、印度洋的水汽贡献均有关。

为定量了解各源地的水汽贡献率的成因,即水汽的吸收、损耗等过程,表 1 给出了在不同源地吸收的水汽占总水汽吸收量的比率,以及各区域三种不同去向的水汽占比。由于局地 and 太平洋靠近降水区,因此水汽损失率相对较低。在局地、太平洋和南海吸收的水汽超过 50% 没有释放,这部分未释放的水汽可能将在其他降水(如图 1 中山东地区的降水)中释放。太平洋区域的轨迹最多,来自该区域的气块吸收的水汽最多,并且在太平洋吸收的水汽转换为降水的效率也是最高的,其水汽转换率达 14.7%,这主要是因为气块持续从海洋上吸收水汽,且在途中的水汽损失率也最少。在印度洋初始时刻吸收的水汽最少,并且在印度洋吸收的水汽转换为降水的效率是最低的,仅有 4.4%,因此其水汽贡献率也最低(图 4b)。澳大利亚初始时刻吸收的水汽占了近五分之一,且未释放的水汽较少,使得水汽转换率也相对较高,因此贡献率是第二高(图 4b)。

下面分析各地对研究对象 2 的水汽贡献率(图 5),与研究对象 1 中相比,其空间分布范围更窄、

表 1 台风“利奇马”(1909)活动期间对研究对象 1 降水有贡献的气块从不同源地吸收的水汽占总水汽吸收量的比率(单位: %)

Table 1 Ratio (unit: %) of moisture uptake from different source areas to total moisture uptake for air parcels contributing to precipitation in target area 1 during Typhoon Lekima (1909)

水汽源地	总吸收水汽比 ($Q_u(i)/Q_u$)	水汽损失率 ($Q_l(i)/Q_u(i)$)	水汽转换率 ($Q_r(i)/Q_u(i)$)	未释放水汽 ($Q_{ur}(i)/Q_u(i)$)
局地	12.5	37.1	8.1	54.8
太平洋	38.7	34.4	14.7	50.9
南海	20.3	41.0	7.2	51.8
印度洋	7.6	48.6	4.4	47.0
澳大利亚	20.9	42.9	12.5	44.5

更集中在自研究区域向东的太平洋上,这与来自太平洋的气块最多有关。从图 5b 中 5 个主要源地的水汽贡献率来看,太平洋的水汽贡献率最高,达 73.8%,远高于研究对象 1 的 33.1%。这主要有两个原因:一是随着台风“罗莎”的加强,台风“罗莎”北侧和西太副高南侧之间的气流加强有利于将西北太平洋丰沛的水汽向西向北输送;二是在研究对象 2 的研究时段内,西南水汽通道不断减弱,降水的水汽只能依靠台风北侧的偏东风输送,也即目标气块主要来自太平洋(图 2c、d),使得来自太平洋的水汽占据主要贡

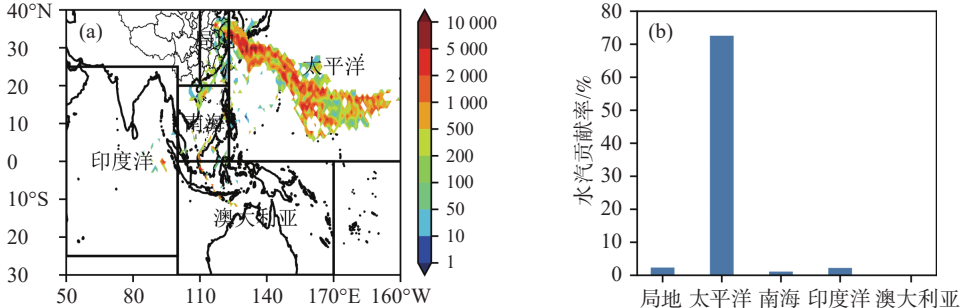


图 5 同图 4, 但为研究对象 2 的水汽贡献率分布 (a) 和不同源地的水汽贡献率 (b)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the (a) water vapor contribution and (b) contribution for different source areas in target area 2

献。其余四个源地的水汽贡献率都极小,在3%以下,这与减弱的西南气流(图2c、d)有关,来自这些源地的气块减少,水汽吸收减少,水汽贡献率随之减少。研究对象2的水汽贡献率集中于太平洋地区,与图2c、d中来自西南的水汽通量减弱,主要依赖台风北侧来自太平洋的水汽通量有较好的对应关系。较高的未释放率意味着气块后续仍有降水潜力,可为后续浙江等地的降水提供水汽补给。

由表2可知,对于研究对象2而言,气块从源地吸收的水汽能够转换为研究区域降水的效率非常低,大部分都在途中损耗,或者到达研究区域后仍未释放。在太平洋吸收的水汽是最多的,高达80.8%(研究对象1的太平洋总水汽吸收比仅38.7%),虽然转换成目标降水的效率也是五个区域中最高的,但仅有5.9%,远低于研究对象1中14.7%的太平洋水汽转换率,这主要是在研究时段2中,气块在达到研究对象2中山东降水区之前已经经过了浙江等地区(图1c、d),并释放了相当一部分水汽,且气块留存了一部分水汽在其余降水(如图1e东北地区)中释放。

表2 同表1,但为对研究对象2的比率(单位:%)

Table 2 Same as Table 1, but for ratio (unit: %) in target area 2

水汽源地	总吸收水汽比 ($Q_a(i)/Q_u$)	水汽损失率 ($Q_l(i)/Q_u(i)$)	水汽转换率 ($Q_r(i)/Q_u(i)$)	未释放水汽率 ($Q_{ur}(i)/Q_u(i)$)
局地	9.1	47.6	1.7	50.7
太平洋	80.8	45.7	5.9	48.4
南海	2.1	56.7	3.5	39.8
印度洋	7.6	62.3	1.9	35.8
澳大利亚	0.5	62.5	1.4	36.1

5 结论和讨论

本文利用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料分析了台风“利奇马”活动期间环流形势的演变,并使用混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式HYSPLIT,对台风“利奇马”期间对浙江和山东暴雨有影响的气块后向追踪,并采用面源贡献定量估计方法,计算了不同源地的水汽贡献率,并分析了各源地水汽贡献成因,对比其差异产生的原因,主要得到以下结论:

(1) 从环流形势来看,浙江和山东降水区的水汽主要由自南半球越赤道而来的西南气流和台风“罗莎”北侧的偏东气流汇合后通过“利奇马”的东南气流供应。西南气流的逐渐减弱,使得山东降水的水汽主要由太平洋的水汽经台风“罗莎”和“利奇马”北侧的偏东气流输送。

(2) 从水汽路径来看,浙江和江苏南部降水的水汽路径主要有4条,分别来自东太平洋、澳大利亚、西太平洋和印度洋,轨迹占比分别为31.5%、26.8%、23.4%、18.3%。山东降水的水汽路径有3条,分别来自东太平洋、印度洋和西太平洋,轨迹占比分别为51.7%、24.7%、23.6%。该差异的主要原因是山东降水中西南气流减弱,使得来自印度洋和澳大利亚的轨迹减少,而两个台风北侧的偏东气流输送太平洋的水汽路径占比过半。

(3) 从水汽贡献率来看,浙江和江苏南部降水的主要水汽贡献源地是太平洋和澳大利亚,分别占33.1%和15.3%,主要原因有两点:一方面是由于这两个源地的轨迹占比高,从这两个源地吸收水汽的气块基数大;另一方面这两个源地的水汽转换率较高(14.7%和12.5%),沿途水汽损耗和保留的未释放水汽相对少。山东降水的水汽贡献主要来自太平洋(73.8%),来自此区域的轨迹共占总轨迹数的75.3%,这些气块吸收的水汽达80.8%。山东降水太平洋区域的水汽转换率相较于浙江和江苏南部降水大幅降低,主要原因为气块在达到山东降水区之前先经过浙江和江苏南部降水区,使得水汽在浙江和江苏南部释放,从而产生了大幅度的损失。两个研究对象的水汽贡献率存在差异的主要原因是西南气流减弱,减少了来自印度洋和澳大利亚的轨迹,在这些区域能够吸收水汽的初始气块少,使其贡献率降低,从而突出了太平洋的水汽贡献。

本文基于拉格朗日观点讨论了台风“利奇马”期间不同强降水区域的水汽路径和源地,针对台风“利奇马”活动期间不同强降水区域的水汽路径和源地贡献进行定量分析,对比不同降水区域的水汽路径和源地贡献随着环流场改变后的差异。对于同一台风,不同降水过程水汽路径和贡献率也有所区别,这一结果有利于进一步理解台风降水中水汽来源的复杂性,且有助于对台风暴雨区域的预报预警。但在探究各地水汽贡献率时使用的面源贡献定量估计方法,假设初始气块水汽含量为零,由于忽略了气块的初始水汽对于降水的贡献,导致整体低估贡献率,这对于初始水汽含量高的气块影响更大,有待进一步优化气块初始水汽赋值方案。未来工作需通过对比更多不同路径与强度的台风个例,进一步检验本研究的结论。

参考文献 (References):

- 边茜,李春忱,唐毓玲,等.2024.基于HYSPLIT模式的凉山“8.21”致洪暴雨水汽特征分析[J].高原山地气象研究,44(S1):52-58. Bian Q, Li C

- Z, Tang Y L, et al. 2024. Analysis of water vapor characteristics of "8.21" flood-causing rainstorm in Liangshan based on HYSPLIT Model [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(S1): 52–58 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.Z1.007
- 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 B, Xu X D, Shi X H. 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 Meteorologica Sinica*,69(5):810–818 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2011.071
- 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 Y, Yue C J, Chen S Q, 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
- 郭云谦,王毅,沈越婷,等.2020.台风“利奇马”不同区域降水极端性特征及成因分析[J].*气象科学*,40(1):65–77. Guo Y Q, Wang Y, Shen Y T, et al. 2020. Analysis on characteristics of the extreme precipitation of typhoon “Lekima” [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 40(1):65–77 (in Chinese). doi:10.3969/2019jms.0081
- 何立富,陈双,郭云谦.2020.台风利奇马 (1909) 极端强降雨观测特征及成因[J].*应用气象学报*,31(5):513–526. He L F, Chen S, Guo Y Q. 2020. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,31(5):513–526 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20200501
- 何跃.2008.东亚强弱夏季风年水汽输送特征及其影响机制研究[D].南京:南京信息工程大学. He Y. 2008. Characteristics of the water vapor transport in both strong and weak summer monsoon year and physical mechanisms of vapor transportation [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 李江南,王安宇,杨兆礼,等.2003.台风暴雨的研究进展[J].*热带气象学报*,19(S1):152–159. Li J N, Wang A Y, Yang Z L, et al. 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,19(S1):152–159 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2003.s1.017
- 陆婷婷.2021.北京暴雨水汽来源统计及降水物理过程模拟研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所. Lu T T. 2021. Statistics of water vapor sources and simulation of precipitation physical process in Beijing rainstorm [D]. Beijing:Institute of Atmospheric Physics,Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- 王佳津,王春学,陈朝平,等.2015.基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].*气象*,41(11):1315–1327. Wang J J, Wang C X, Chen C P, et al. 2015. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan Basin based on HYSPLIT4 model [J]. *Meteorological Monthly*,41(11):1315–1327 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.11.002
- 许福星.2009.登陆台风水汽输送的诊断研究[D].浙江:浙江大学. Xu F X. 2009. The diagnostic study on the water vapor transport of the landing typhoon [D]. Zhejiang: Zhejiang University (in Chinese)
- 张林梅,芮建文,李璐,等.2025.新疆中天山北坡暴雪过程水汽特征[J].*沙漠与绿洲气象*,19(3):69–78. Zhang L M, Rui J W, Li L, et al. 2025. Water vapor characteristics during blizzard processes on the Northern Slope of the Central Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,19(3):69–78 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2310.16001
- 郑铮,潘灵杰,钱燕珍,等.2021.台风“利奇马”造成浙江沿海极端强降水的演变特征[J].*干旱气象*,39(2):269–278. Zheng Z, Pan L J, Qian Y Z, et al. 2021. Evolution characteristics of extreme heavy precipitation in coast of Zhejiang province caused by typhoon Lekima [J]. *Journal of Arid Meteorology*,39(2):269–278 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2021)-02-0269
- Chen F L, Kang N, Wang S J, et al. 2025. Response of precipitation isotopes and water vapor sources to regional climate change on the Gannan Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*,17(4):440–456. doi:10.1007/s40333-025-0077-8
- Guo X Y, Wang L, Tian L D, et al. 2025. Quantitative identification of moisture sources over the tibetan plateau: Spatial distributions and temporal variabilities [J]. *Journal of Climate*,38(1):263–276. doi:10.1175/JCLI-D-24-0093.1
- Kimo I G, Cholo B E, Lohani T K. 2024. Identifying the moisture sources in different seasons for Abaya-Chamo Basin of Southern Ethiopia using Lagrangian Particle Dispersion Model [J]. *Advances in Meteorology*,2024(1):4421766. doi:10.1155/2024/4421766
- Likas A, Vlassis N, J. Verbeek J. 2003. The global k-means clustering algorithm [J]. *Pattern Recognition*,36(2):451–461. doi:10.1016/s0031-3203(02)00060-2
- Lu 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 B, Sun J Q. 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over henan in july 2021 [J]. *Geophysical Research Letters*, 49(4):e2021GL097446. doi:10.1029/2021GL097446
- Shi Y, Jiang Z H, Liu Z Y, et al. 2020. A lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitation in East China in different stages of the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 33(3):977–992. doi:10.1175/JCLI-D-19-0089.1
- Sodemann H, Schwieler 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):1–17. doi:10.1029/2007JD008503
- 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%3C0656:ALAOTA%3E2.0.CO;2
- 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]. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6):961–984. doi:10.1175/JHM470.1
- 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
- Wernli H. 1997. A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. II: A detailed case-study [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,123(542):1677–1706. doi:10.1256/smsqj.54210