

“21·7” 河南暴雨水汽源地追踪和定量贡献分析

崔晓鹏^{*1,2,3,4} 杨玉婷^{1,4}

- 1 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
- 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081
- 3 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
- 4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 2021年7月19~22日, 河南省部分地区出现极端暴雨(简称“21·7”河南暴雨), 造成严重城市内涝和人员伤亡。本文借助降水观测资料和再分析数据, 分析了此次暴雨过程的大尺度环流形势, 并利用拉格朗日轨迹追踪模式 FLEXPART 及水汽源区定量贡献分析方法, 考察了暴雨过程的水汽源地、输送路径和源区水汽定量贡献。结果表明: 此次暴雨期间以及暴雨发生前数天, 东亚地区 500 hPa 环流形势极为稳定, 西太平洋副热带高压(简称副高)异常偏北, 与北侧高压脊连通、位置少动, 欧亚大陆高空槽偏西, 东亚中高纬环流显著平直, 暴雨过程期间, 热带气旋“烟花”和“查帕卡”与副高等持续协同影响, 建立明显水汽输送通道, 提供充足水汽, 河南暴雨区维持显著近地面湿区和高可降水量; 向前追踪数天发现, 暴雨区目标气块主要来自西北太平洋和中国南海等地, 且所处大气高度较低, 此外, 还有少量气块来自日本附近和欧亚大陆中部(所处高度相对较高); 定量贡献分析显示, 水汽主要来自河南南侧中国中东部大陆(D)和西北太平洋(F), 前者水汽贡献率(52.59%)达后者(25.51%)2倍以上, 此外, 河南暴雨区(T, 3.68%)、中南半岛-中国南海(E, 3.32%)和暴雨区北侧亚洲大陆(B, 2.28%)也有一定贡献; 目标气块在D区域水汽摄取量最大, 略高于F区域, 但前者沿途损耗率较明显低于后者, 造成D区域水汽贡献显著高于后者; B区域水汽摄取量略高于E区域, 但其沿途损耗和未释放部分占比之和高于后者, 导致后者水汽贡献相比略高; 此外, T区域也有不可忽视的降水再循环率; 延长向前追踪天数后, 目标气块轨迹和各源区水汽摄取与贡献率相对变化不大, 但所有源区水汽总贡献明显提升, 可见, 对于类似此次河南极端特大暴雨的强降水过程的水汽来源追踪而言, 适当延长追踪天数十分必要。

关键词 河南暴雨 FLEXPART 水汽源区 定量贡献

资助项目 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A13)

Funded by The Open Grants of the State Key Laboratory of Severe Weather (2021LASW-A13)

*作者简介 崔晓鹏, 男, 1973年出生, 研究员, 主要从事灾害性天气机理和预报方法研究, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

Tracking and Quantitative Contribution Analyses of Moisture Sources of "21•7" Rainstorm in Henan Province

CUI Xiaopeng^{1, 2, 3, 4} and YANG Yuting^{1, 4}

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

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

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

4 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Extreme rainstorms occurred in some regions of Henan Province from July 19 to 22, 2021 (referred to as "21•7" Henan rainstorm), causing severe urban waterlogging and casualties. With the help of precipitation observation data and reanalysis data, the large-scale circulation situations of this heavy rainfall were analyzed. Using the Lagrangian trajectory tracking model (FLEXPART) and the areal source-receptor attribution method, we also examined the moisture sources, transport paths, and quantitative contribution of each source area. The results showed that the 500-hPa circulation in East Asia was extremely stable during the rainstorm and several days before the rainstorm. Connected with the northern high-pressure ridge, the western Pacific subtropical high pressure (referred to as the sub-high) was unusually northward, less moving. Meanwhile, the Eurasian high trough was westward, as well as the circulation in the middle and high latitudes of East Asia was significantly flat. During the rainstorm process, tropical cyclones "In-Fa" and "Cempaka" continued to have synergistic effects with sub-high, establishing obvious water vapor transport channels and providing sufficient moisture. The rainstorm areas in Henan province retained considerable near-surface wet regions and high precipitable water. Tracking forward for several days, it was found that the target particles in the rainstorm area mainly came from the northwest Pacific Ocean, the South China Sea and other places, and were located at relatively low atmospheric levels. Additionally, a few particles which could be traced back to the vicinity of the Sea of Japan and central Eurasia were at relatively high altitudes. The quantitative contribution analyses indicated that the moisture

primarily originated from the continent of east-central China south of Henan (D) and the northwest Pacific Ocean (F), with the contribution of the former (52.59%) more than twice that of the latter (25.51%). In addition, the moisture from Henan storm area (T, 3.68%), the Indo-China Peninsula–South China Sea (E, 3.32%), and the Asian continent north of storm area (B, 2.28%) also played a role. The water vapor uptake of the target particles was the largest in region D, which was slightly higher than that in region F, but the rate of moisture loss along the former was clearly lower than that of the latter, resulting in significantly higher moisture contribution in region D than region F. Although the moisture intake in region B was somewhat higher than in region E, the sum of the moisture loss along the way and the unreleased part was higher than the latter, leading to a greater moisture contribution in region E. Moreover, region T had a non-negligible precipitation recycling rate. When extending the number of days of forward tracking, the trajectories of target particles, water vapor uptake and contribution rate of each source had relatively little change, but the total contribution of moisture from all source areas significantly increased. Thus, it is of vital importance to extend the number of days for the tracking of moisture sources for heavy precipitation events like this extreme rainfall in Henan.

Keywords Heavy rainfall in Henan, FLEXPART, Moisture source areas, Quantitative contributions

1 引言

亚洲夏季风爆发和盛行时期是中国主要的暴雨季（陶诗言，1980；丁一汇和张建云，2009），暴雨过程形成机理认识欠缺、预报难度大，常造成严重洪涝灾害和人民生命与财产重大损失，例如，1975年8月河南特大暴雨、1998年夏季松嫩流域持续性暴雨和2021年7月河南郑州极端特大暴雨等。随着全球变暖，大气含水量增加，水循环加剧，极端降水（暴雨）事件将愈发频繁（Vázquez et al., 2020; Myhre et al., 2019）。陈晓晨等（2015）利用CMIP5模拟数据预估发现，在不同升温阈值下，中国强降水事件的发生频率和强度均明显增加。强降水（暴雨）机理研究和预报方法研发极为紧迫和重要。

充沛的水汽供应是暴雨发生、发展和维持的基本条件。暴雨发生时，不仅暴雨区大气柱内水汽含量高，更为重要的是，在环流系统影响下，存在源源不断的外围水汽输送和局地辐合（陶诗言，1980），这一点对于华北、华中和东北等相对远离热带和洋面等主要水汽源地的我国中高纬度地区的暴雨过程尤为关键；例

如, 罗亚丽等 (2020) 指出, 中、低纬度天气系统相互作用是华北暴雨的重要特征之一, 而其相互作用造成的持续水汽输送是关键, 青藏高原南支槽与西南暖湿气流相配合, 向华北暴雨区的西南水汽输送, 以及热带气旋与西太平洋副热带高压相配合, 向华北地区的偏南或东南水汽输送等 (孙建华等, 2013), 均可以对华北暴雨的发生起到重要的作用; 丁一汇等 (2020) 指出, 东亚夏季强降水过程中, 常常存在与“大气河”相似的强水汽输送通道 (傅刚等, 2019)。可见, 对于水汽来源的准确把握是暴雨过程形成机理认识和预报方法研发的关键之一。目前, 关于水汽来源的识别与分析方法主要包括: 同位素分析方法 (Bonne et al., 2014; Pfahl and Wernli, 2008; Weyhenmeyer et al., 2002)、欧拉分析方法 (Munday et al., 2021; 丁一汇等, 2020) 和拉格朗日分析方法 (陈斌等, 2011; Huang and Cui, 2015a, 2015b; Zhang et al., 2021; Vázquez et al., 2020; Sodemann et al., 2008; 薛一迪和崔晓鹏, 2020; Zhao et al., 2021; 梁卓然等, 2011; 王美月等, 2021), 其中, 同位素方法受限于有效样本的获取难度 (Gustafsson et al., 2010), 应用有限; 传统欧拉方法 (即利用垂直积分的水汽通量来反映水汽输送特征及主要水汽通道) 较难准确识别出暴雨过程的主要水汽源区以及源区水汽定量贡献 (Sun and Wang, 2014), 针对这一不足, Jiang et al. (2020) 采用 CAM5 中的欧拉源标记方法, 定量识别中亚地区降水的水汽源区, 但仍一定程度依赖于模式再现水文循环的性能; 而拉格朗日方法利用 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) 或 FLEXPART (Flexible Particle Dispersion Model) 等气块轨迹追踪模式, 不仅可以客观地识别出水汽源区, 同时可以定量确定源区的水汽贡献。近年来, 拉格朗日方法已逐渐在暴雨研究领域得到较广泛的应用 (陈斌等, 2011; Huang and Cui, 2015a, 2015b; 薛一迪和崔晓鹏, 2020)。

2021 年 7 月 17~22 日, 河南省出现大范围强降水 (简称“21·7”河南暴雨), 其中, 20 日, 河南郑州发生极端强降水, 24 h 累积降水量超过 600 mm, 而 20 日 16~17 时的 1 h 累积降水量更是高达破纪录的 201.9 mm, 暴雨引发的洪涝造成重大人员伤亡和巨大经济损失, 引发社会广泛关注。如此极端的强降水必然存在显著的水汽输送, 对其主要水汽源地和源区定量贡献的分析将有助于对此类极端暴雨形成机理的深入认识, 进而把握极端暴雨发生的前兆因子 (Huang and Cui, 2015b), 为提升相关预报能力提供有益的参考。本文借助 FLEXPART 气块轨迹追踪模式和水汽源区定量贡献分析方法 (Huang and Cui, 2015b), 分析“21·7”河南暴雨期间水汽来源和输送以及沿途水汽摄取与释放等特征, 并定量揭示各源区的水汽贡献, 从水汽来源角度探索此次极端暴雨的形成机理, 为相关理论研究和预报提供参考。本文第二部分简要介绍研究所用数据、FLEXPART 模式和相关分析方法; 第三部分重点分析“21·7”河南暴雨的降水特征和大尺度环流背景;

第四部分详细探讨水汽来源追踪和定量贡献分析结果；最后一部分给出本文的主要结论，并开展讨论。

2 所用数据、模式及分析方法简介

2.1 研究所用数据

本文研究使用的数据主要包括：

- (1) 中国气象局 Micaps 系统国家站和区域站实况降水观测数据；
- (2) NCEP-CFSv2 (NCEP Climate Forecast System Version 2) 空间分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的 6 h 间隔分析场数据 (Saha et al., 2014)，垂直方向共 37 层 (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/> [2021-09-15])；用于环流形势分析、近地面比湿和整层大气可降水量分析、水汽通量分析，以及驱动 FLEXPART 气块轨迹追踪模式等；
- (3) NOAA 分辨率为 1 弧分钟的 ETOPO1 地形高程数据 (https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/data/bedrock/cell_registered/netcdf/ [2020-12-13])。

2.2 FLEXPART 模式及模拟方案

本文使用挪威大气研究所开发的拉格朗日粒子传输模式 FLEXPART，该模式可以模拟从点、线、区域或体积源释放的示踪剂的长距离和中尺度传输、扩散、干湿沉降以及放射性衰变过程 (Stohl and James, 2004)，在国际范围内已得到广泛应用。FLEXPART 模式常被用来模拟大气污染物的远距离传输和扩散，以及大气传输过程等，例如，对流层与平流层之间的物质交换和全球水循环；该模式采取零加速度方案来确定粒子的轨迹位置 (Stohl et al., 1998)，进而根据气块所处位置，将再分析资料空间插值，得到气块在运动过程中的其他物理量，例如，位涡、比湿、温度、气块质量等 (陈斌等, 2011)。

本文中，为深入分析“21·7”河南暴雨发生前、后相关区域大气的整体输送特征，将模拟区域设置为 $40^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{ E}$ ， $10^{\circ} \text{ S} \sim 60^{\circ} \text{ N}$ ；利用“区域填塞”技术 (Stohl and James, 2004)，将模拟区域上空的三维大气划分为足够多的、质量相等的空气块 (其数密度与空气密度成正比)，共释放 120 万个空气块粒子；模式采取前向模拟方式，从 2021 年 7 月 10 日 00:00 开始积分至 7 月 23 日 00:00 (世界时，除特殊说明外，下文出现的时间均为世界时)，每三小时输出一次模拟结果，包括：浓度场数据和气块轨迹数据等。以往研究 (Nieto and Gimeno, 2019；

Numaguti, 1999; Trenberth, 1998)发现,水汽在大气中的平均滞留时间约为 10 天,因此,本文首先对气块运动轨迹向前追踪 10 天;此外,考虑到不同区域和季节可能由于天气环流背景等的差异,水汽在大气中的平均滞留时间可能有所不同(Wang et al., 2018),例如, van der Ent and Tuinenburg (2017) 研究指出,在东亚和印度等地区,水汽滞留时间约为 12~14 天,为了更为全面地考察水汽来源,在上述追踪 10 天基础上,对气块运动轨迹进一步向前追踪 12 天,并与 10 天追踪结果进行对比分析。

2.3 确定目标气块

利用 FLEXPART 模式模拟输出结果,采用拉格朗日分析方法来追踪对“21·7”河南暴雨有重要贡献的气块(称为目标气块),分析目标气块在向河南暴雨区输送过程中水汽增加的位置,进而确定暴雨过程的主要水汽源区。参考前人研究方法(陈斌等, 2011; Huang and Cui, 2015a, 2015b; 薛一迪和崔晓鹏, 2020),借助如下步骤,确定目标气块:

(1) 依据此次极端暴雨主要降水时段,确定目标气块的选择时段,即,2021 年 7 月 19 日 00:00~22 日 00:00;

(2) 依据降水分布,确定目标区域范围: $33^{\circ} \sim 37.1^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ} \sim 115^{\circ}\text{E}$;

(3) 在上述步骤选取的区域内的气块中,提取出网格降水大于 40 mm 的气块;

(4) 在第三步选取的气块中,进一步提取出 3 h 比湿变化小于 -1 g/kg 的气块。

通过以上步骤,提取出对“21·7”河南暴雨有重要贡献的目标气块。需要指出的是,由于在上述选取过程中,忽略了一些对“21·7”河南暴雨贡献相对较小的气块(气块所在区域的降水量较小、比湿变化量级相对较小),因此,所选目标气块对应的降水量会略小于实际降水量。

2.4 水汽源区定量贡献分析方法

本文参考前人相关研究方法,开展水汽源区定量贡献分析,为保证论文连贯性和可读性,对相关方法做简要介绍,方法的详细内容和步骤参见前人论文(陈斌等, 2011; Huang and Cui, 2015a, 2015b; 薛一迪和崔晓鹏, 2020)。

目标气块运动过程中,其水汽含量的变化可表述为(Stohl and James, 2004, 2005):

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

其中, e 和 p 分别表示水汽增加率和减少率, 而 m 、 q 和 t 分别代表气块质量、比湿和时间。对于底面积为 A 的大气柱内的 N 个目标气块, 其累积水汽变化率可表述为:

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

其中, E 和 P 分别代表单位面积的海面/陆面蒸发率和降水率, 而 $E - P$ 则代表表面水通量。本文利用 FLEXPART 模式模拟结果, 通过目标气块比湿变化来诊断计算得到 $E - P$, 若某区域 $E - P > 0$, 说明该区域存在水汽净摄取(水汽源区), 反之则为降水区。

为了量化分析目标气块沿其运动轨迹从水汽源区移动到目标降水区过程中的水汽摄取与释放特征, 本文利用 Sun and Wang (2014) 提出的“面源贡献定量估计方法”, 估算水汽源区对目标区域降水的水汽贡献。参考 Sun and Wang (2014), 将目标气块从源区摄取的水汽(记为 Uptake)分成三个部分, 即, 输送途中损失(记为 Loss)、目标降水区释放(记为 Released)和到达目标区但未释放(记为 Unreleased)三部分, $Unreleased = Uptake - Loss - Released$ 。此外, 参考前人研究 (Huang and Cui, 2015a, 2015b; 薛一迪和崔晓鹏, 2020), 计算所有源区在目标降水区的水汽释放总量(记为 $Released_{total}$, 在分析中视为目标区降水量), 相应得到源区水汽摄取量占目标降水区释放总量的比例 ($Uptake/Released_{total} \times 100\%$)、沿途水汽损耗占比 ($Loss/Released_{total} \times 100\%$)、在目标降水区水汽释放占比 ($Released/Released_{total} \times 100\%$, 即为相应源区对暴雨区的水汽贡献率), 以及到达目标降水区但未释放的部分水汽占比 ($Unreleased/Released_{total} \times 100\%$)。上述分析结果用于细化考察不同水汽源区对“21·7”河南暴雨的定量化水汽贡献特征等。

3 “21·7”河南暴雨降水特征和大尺度环流背景

由图 1 可见, 2021 年 7 月 18 日, 河南省北部开始出现较强降水, 19 日, 强降水范围扩张、强度明显增强、中心南移, 主要大值中心位于郑州西部, 20 日, 强降水范围进一步扩张、强度进一步增强, 郑州降水强度达峰值, 20 日 08 时至 21 日 08 时 (北京时间, BJT), 郑州站 24 h 累积降水量高达 624.1 mm, 21 日, 降水大值区北移至河南北部的鹤壁、新乡一带, 22 日, 强降水范围明显收缩、降水强度显著减弱, “21·7”河南暴雨基本结束。此次极端暴雨过程持续时间长, 降水极值大, 极端性和致灾性强, 最强降水时段集中在 19 日 08 时~22 日 08 时

(BJT, 对应的世界时为 19 日 00 时~22 日 00 时)。

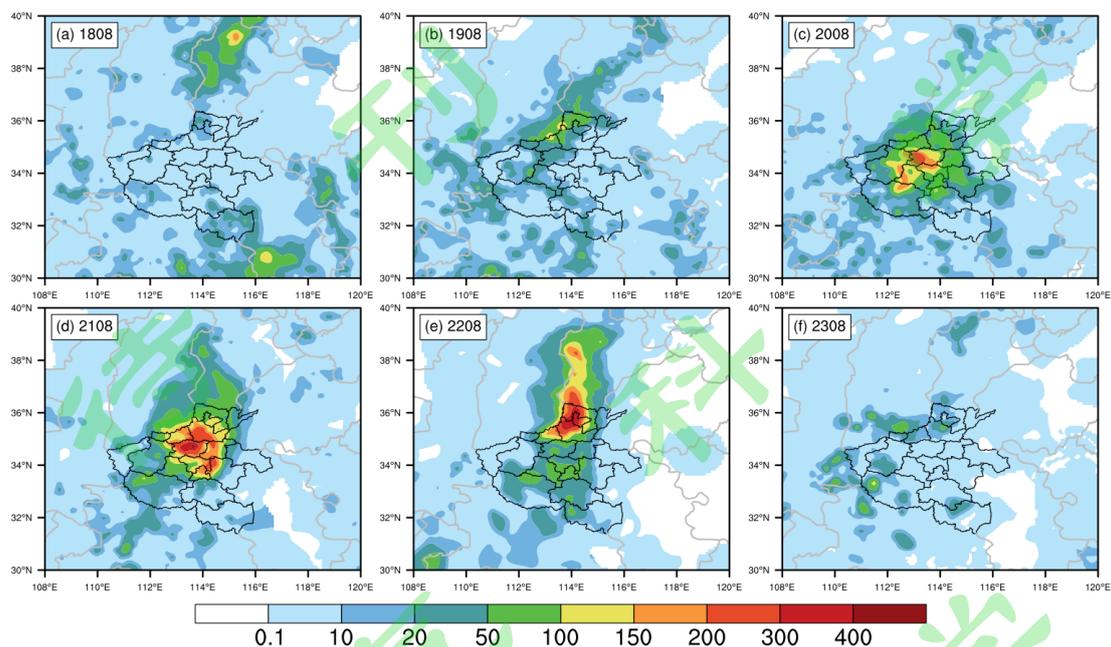


图 1 2021 年 7 月 17 ~ 22 日, 河南附近区域实况日降水量分布 (彩色填色, 单位: mm)。其中, 各小图中左上角数字日降水累积的截止时间 (北京时间), 例如, (a) 中“1808”代表 7 月 17 日 08:00~18 日 08:00 (BJT)。黑色粗实线指示河南省及其市界, 灰色实线指示绘图区域内其他省界

Fig. 1 The distribution of daily precipitation in the region around Henan from July 17 to 22, 2021 (color shading, units: mm). In the upper left corner of each panel, the number represents the deadline of accumulated daily precipitation (Beijing time). For example, "1808" in (a) represents 0800 BJT 17 July to 0800 BJT 18 July, 2021. The thick black solid line indicates Henan Province and its municipal boundaries, while the solid gray line indicates other provincial boundaries in the mapped area

“21·7”河南暴雨最强降水时段 (7 月 19 日 00:00~22 日 00:00, 图 2b) 以及 7 月 12 日 00:00~22 日 00:00 (图 2a) 平均的高、低空环流形势分布显示, “21·7”河南暴雨期间 (图 2b) 及其之前数天内 (图 2a), 东亚区域环流极为稳定, 500 hPa 高度场上, 中高纬度地区稳定维持“两槽两脊”形势, 两个高压脊分别位于里海附近和我国东北区域, 西部高空槽位于巴尔喀什湖附近, 槽底区域对应高空急流; 西太平洋副热带高压 (简称副高) 位置显著偏北, 与其北侧的东部高压脊连通, 稳定控制日本海和朝鲜半岛等区域, 而其南侧, 西北太平洋上空存在低压环流 (对应热带气旋“烟花”), 其与副高之间建立一支偏东低空急流,

将西北太平洋的暖湿空气源源不断地输送至河南以及我国北方地区；此外，亦有来自华南及南海区域的暖湿空气向北输送至河南区域；河南区域上空无明显天气尺度系统影响，但在显著的水汽输送和局地地形影响下，有利于局地扰动的发生、发展。“21·7”河南暴雨最强降水时段平均的高、低空环流形势（图 2b）与 10 天（7 月 12 日 00:00~22 日 00:00）平均的环流形势（图 2a）分布整体上极为相近，两者小的差别在于：最强降水时段（图 2b），巴尔喀什湖附近的低压槽略有加深发展，副高南侧西北太平洋洋面上的“烟花”气旋性环流特征更为显著，而我国华南沿海亦存在明显的气旋性环流，对应热带气旋“查帕卡”；受“烟花”和“查帕卡”环流串接作用的影响，自索马里越赤道，经阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛、南海，一直到西北太平洋，形成一支绵长的低空输送通道，借助“烟花”与副高之间的偏东气流，以及“查帕卡”东侧的偏南气流，有利于暖湿空气源源不断地向我国北部地区输送。

进一步分析上述两时段平均的水汽通量和水汽通量散度（图 2c、d）可以看到，10 天平均场（图 2c）上，河南上空存在相对弱的水汽通量辐合，而最强降水时段（图 2d），受“烟花”和“查帕卡”环流串接作用影响，索马里越赤道-阿拉伯海-孟加拉湾-中南半岛-南海-西北太平洋一线形成绵长水汽输送通道，借助强大的“烟花”环流与副高南侧偏东气流，可为河南暴雨区提供充沛水汽，此时段，河南区域的水汽通量辐合显著加强。近地面 2 m 比湿和整层大气可降水量（图 2e-h）分布显示，无论是 10 天平均，还是最强降水时段平均，河南区域均存在明显的近地面湿区，近地面 2 m 比湿达 18 g/kg 以上，大气低层湿度状况良好（图 2e、f）；此外，河南区域存在较高的整层大气可降水量（图 2g、h），最强降水时段平均的可降水量高达 65 kg/m²，而“烟花”和“查帕卡”环流区域的大气整层可降水量相对更高（达 70 kg/m² 以上）；尽管如此，河南暴雨区大气整层可降水量仍远低于实况降水量，可见，由暴雨区域外向暴雨区的显著和持续水汽输送对“21·7”河南暴雨的发生至关重要，而较长时间相对稳定大尺度环流形势（图 2a、b）为持续水汽输送提供了可能。

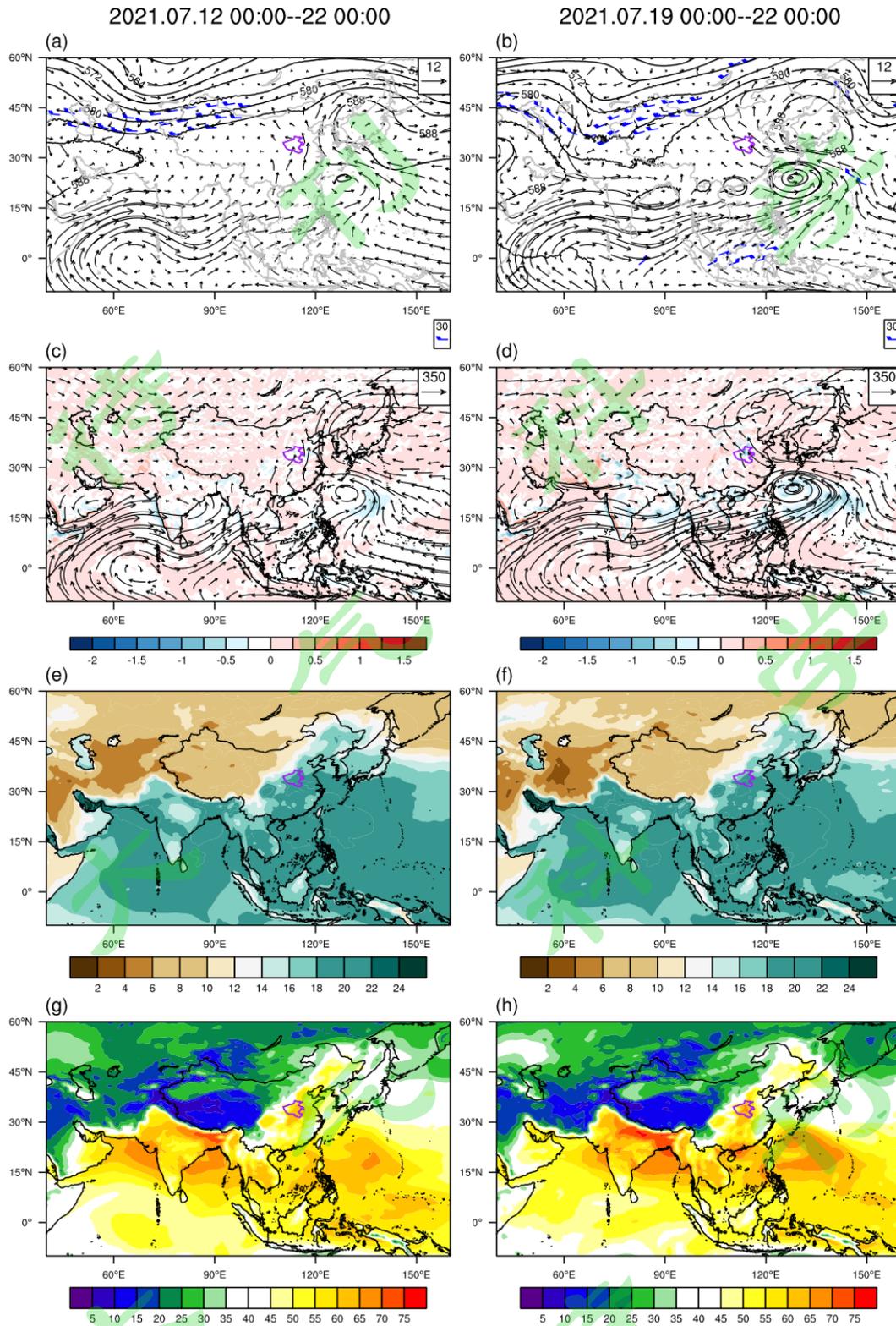


图 2 10 天（左列，2021 年 7 月 12 日 00:00~22 日 00:00）和最强降水时段（右列，2021 年 7 月 19 日 00:00~22 日 00:00）平均的 (a、b) 高低空环流形势（黑色实线表示 500 hPa 位势高度，单位：dagpm；矢量箭头表示 850 hPa 风场，单位：m/s；蓝色风向杆表示 200 hPa 风速大于等于 30 m/s 的风矢量），(c、d) 自地面积分到 300 hPa 的水汽通量（矢量，单位：kg

$\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 与水汽通量散度 (彩色阴影, 单位: $10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), (e、f) 近地面 2 m 比湿 (彩色阴影, 单位: g/kg), 以及 (g、h) 整层大气可降水量 (彩色阴影, 单位: kg/m^2)。紫色轮廓线指示河南省界

Fig. 2 10 days (left column, 0000 UTC July 12 to 0000 UTC July 22, 2021) and the strongest precipitation period (right column, 0000 UTC July 19 to 0000 July 22, 2021) averaged (a, b) high- and low-levels circulation situation (black solid line represents 500-hPa geopotential height, units: dagpm; vector arrow represents 850-hPa wind field, units: m/s ; blue wind bar represents 200-hPa wind speed greater than or equal to 30 wind vector in m/s), (c, d) water vapor flux (vector, units: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (color shading, units: $10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) integrated from the ground to 300 hPa, (e, f) 2 m specific humidity near the ground (color shading, units: g/kg), (g, h) the precipitable water in the entire atmosphere (color shading, units: kg/m^2). The purple outline indicates the boundary of Henan Province

最强降水时段 (7 月 19 日 00:00~22 日 00:00) 的累积降水量分布 (图 3a) 显示, 大值区位于河南北部, 中心位于郑州及其北部鹤壁、新乡一带, 最大累积降水量达 600 mm 以上; 依据累积降水量分布 (图 3a), 选择降水量大于 200 mm 区域对应的长方形区域作为后续水汽追踪的目标区域 (图 3a 中的黑色方框区域)。由地形分布 (图 3b) 可见, 累积降水量大值区与局地地形具有较好的对应关系, 而 850 hPa 风场分布 (图 3b) 显示, 气流速度在豫东平原地区相对较大, 遇山脉地形 (太行山、伏牛山、嵩山等) 阻挡, 风速减小, 易形成对流层低层辐合, 有利于强降水在地形附近发生。值得注意的是, 从我国东部沿海, 一直到河南省中东部 (包括河南南侧和东北侧), 地形高度显著较低 (地形平坦), 而上述区域西侧, 则存在明显的多尺度地形 (图 3b), 这样的地形分布特征, 加之水汽输送沿途无明显降水系统截留的共同影响 (图 2a、b), 极其有利于偏东和偏南暖湿气流的长驱直入, 进而在河南西部和北部的明显地形区域辐合与集中, 形成强降水 (图 3a)。

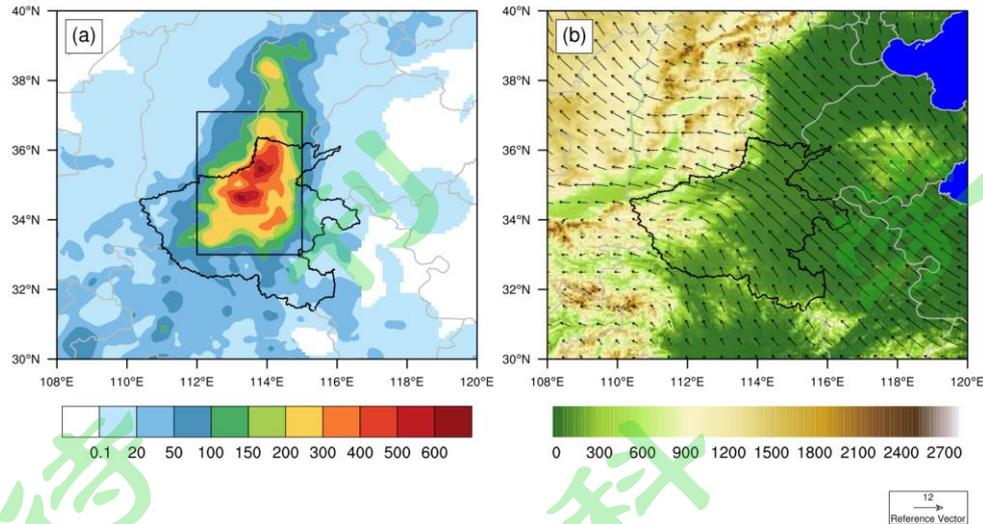


图3 (a)最强降水时段(2021年7月19日00:00~22日00:00)累积降水量(彩色阴影, 单位: mm; 黑色方框指示目标降水区域)和(b)地形(彩色阴影, 单位: m)与850 hPa流场(矢量箭头, 单位: m/s)。黑色轮廓线指示河南省界

Fig. 3 (a) Accumulated precipitation (color shading, units: mm; black box indicates the target precipitation area) of the strongest precipitation period (0000 UTC July 19 to 0000 July 22, 2021) and (b) topography (color shading, units: m) and 850-hPa flow field (vector arrow, units: m/s). Black outlines indicate the boundary of Henan Province

4 水汽来源追踪和源区定量贡献分析

利用 FLEXPART 模式输出结果, 对在目标降水区内识别出的目标气块向前追踪数天(2021年7月12日03:00~22日00:00), 得到3264条目标气块运动轨迹, 根据 Dorling et al. (1992) 提出的聚类分析方法, 对上述目标气块的运动轨迹进行聚类, 共得到9条聚类后运动轨迹(图4a)。由图4a可见, 对“21·7”河南暴雨有重要贡献的目标气块主要来自西北太平洋和中国南海, 分别约占所有轨迹数的47.46%和30.7%, 且气块初始高度基本均位于较低的大气高度上(低于4000 m), 在向目标降水区域行进过程中, 气块轨迹高度变化不大; 此外, 还有13.69%(8.15%)的目标气块来自日本海附近(欧亚大陆中部和中国西北地区), 气块初始高度相对较高, 在行进途中高度有所降低。将图4a与传统欧拉方法(即水汽通量, 图2c)分析的水汽输送路径对比可见, 两者均较好地识别出来自西北太平洋和中国南海的两条主要水汽输送路径, 但亦有明显差异: 除了上述主要水汽输送路径之外, 水汽通量矢量分析结果(图2c)还清晰给出了自索马里越赤道、经阿拉伯海-孟加拉湾向东的水汽输送通道, 但由于路途较远, 这部分通道输送的水汽对河南暴雨区并没有明显贡献, 而拉格朗日方法则更为清晰和准确地

抓住了对河南暴雨贡献显著的目标气块及其运动轨迹,可准确识别河南暴雨的主要水汽输送通道。

由 $E-P$ 分布 (图 4b) 可见, 目标气块在到达目标降水区域 (河南暴雨区) 之前, 经历了多次水汽摄取 (图 4b 中红色部分, $E-P > 0$, 表明存在水汽净摄取) 和释放过程 (图 4b 中蓝色部分, $E-P < 0$, 表明存在水汽净释放)。在洋面 (西北太平洋、中国南海等) 和华东、华南等地以水汽摄取为主, 而在河南及其周边区域 (尤其是河南暴雨区) 则因显著强降水, 呈现明显的水汽释放特征, 其中, 河南暴雨区的局地释放最为显著, 形成强降水。依据目标气块的运动轨迹 (图 4a) 和 $E-P$ 分布 (图 4b), 划分出 7 个对河南暴雨有贡献的水汽源区 (图 4b 中黑色方框区域), 包括: 欧亚大陆中部地区 (A)、河南暴雨区北侧亚洲大陆区域 (B)、黄海-日本海-东北亚大陆区域 (C)、河南南侧中国中东部大陆区域 (D)、中南半岛-中国南海区域 (E)、西北太平洋区域 (F) 和河南暴雨区 (T)。下面将针对这些水汽源区, 借助水汽来源定量贡献分析方法, 定量考察目标气块在不同源区的水汽摄取与释放特征, 以及不同源区摄取的水汽对“21·7”河南暴雨的水汽贡献。

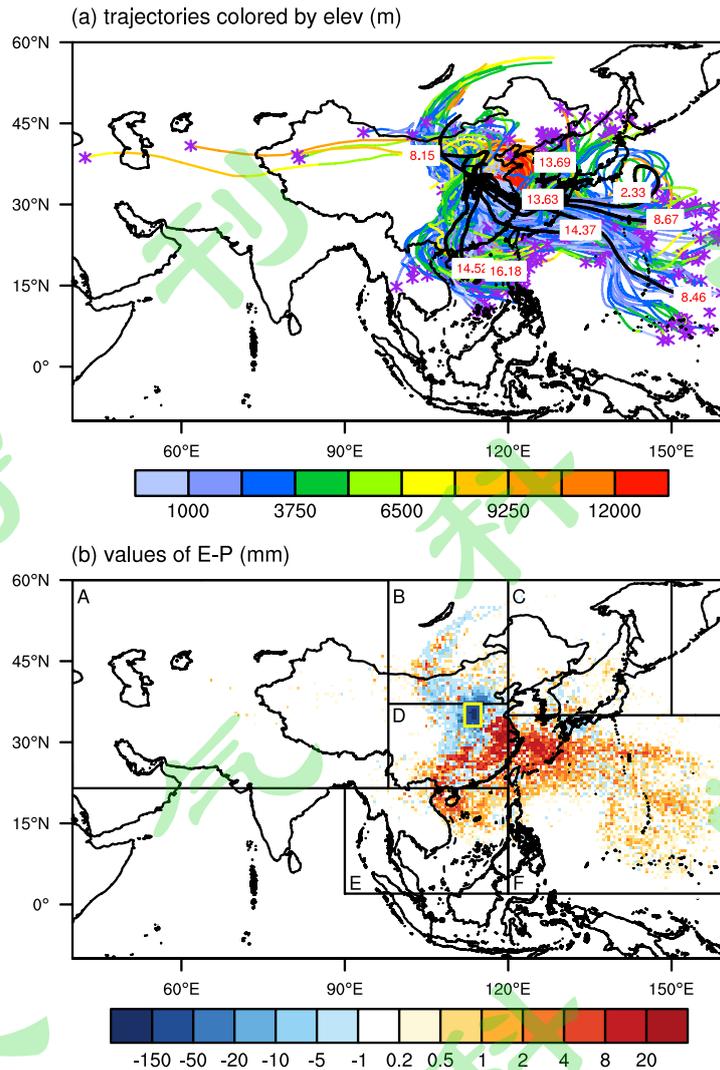


图 4 2021 年 7 月 12 日 03:00 ~ 22 日 00:00 的 (a) 目标气块运动轨迹 (轨迹颜色代表气块距离地面的高度, 单位: m; 紫色星号 “*” 表示气块轨迹起点, 为了清晰显示, 气块轨迹间隔 10 条绘制; 黑色方框为目标区域; 黑色粗实线为聚类后的轨迹, 红色数字代表每类聚类轨迹所占的比例), 以及 (b) $E-P$ 分布 (填色, 单位: mm); 黑色方框表示划分的不同水汽源区, 其中 A-F 分别表示欧亚大陆中部地区 (A)、河南暴雨区北侧亚洲大陆区域 (B)、黄海-日本海-东北亚大陆区域 (C)、河南南侧中国中东部大陆区域 (D)、中南半岛-中国南海区域 (E)、西北太平洋区域 (F), 黄色方框指示河南暴雨区 (T)

Fig. 4 (a) Trajectories of the target particles from 0300 UTC July 12 to 0000 UTC July 22, 2021 (The color of the trajectories represents the height of particles from the ground, units: m. The purple asterisks "*" indicate the starting point of the trajectories. The particles' trajectories are drawn at 10 intervals to clearly display. The black box is the target area. The black thick solid lines are the clustered trajectories, and the red numbers represent the proportion of each type of clustered trajectories), and (b) $E-P$ distribution (color shading, units: mm). The black boxes represent different moisture source regions, where A-F represent the central Eurasian continent (A), the Asian

continental region to the north of the Henan heavy rainfall region (B), the Yellow Sea–Sea of Japan–Northeast Asia continental region (C), the central and eastern continental area of China on the south side of Henan (D), the Indo-China Peninsula–South China Sea area (E), the Northwest Pacific area (F), respectively. The yellow box indicates the heavy rainfall area of Henan (T)

目标气块在向目标降水区域行进过程中，会沿途释放一部分水汽，因此，源区摄取的水汽不一定对目标区域的降水有重要贡献，需要定量分析各源区的水汽贡献占比。利用“面源贡献定量估计方法”（Sun and Wang, 2014），定量估算了各水汽源区对于河南暴雨区的水汽贡献率（图 5a）；由图 5a 可见，7 个水汽源区对河南暴雨的发生均具有不同程度的水汽贡献，贡献率总和达 88.47%；其中，河南南侧中国中东部大陆区域（D）水汽贡献最大，贡献率达 52.59%，该区域与目标气块 2 条主要运动轨迹途径的区域（图 4a）重叠，低高度行进的大量目标气块可以在 D 区域摄取大量水汽（图 4b），由于其后续行进路径所经区域地形相对平坦（图 3b），且无明显天气系统影响和截留（图 2a），这些水汽可以很好地留存在目标气块中，随气块长驱直入输送到河南暴雨区，支撑河南极端暴雨（图 3a）；西北太平洋区域（F）对目标降水区域的水汽贡献率排在第二位（图 5a，达 25.51%），约为 D 区域的一半，该区域主要为洋面，行进在该区域的目标气块可摄取大量水汽（图 4），在热带气旋“烟花”和副高环流（图 2）以及华东区域相对平坦地形（图 3b）的共同作用下，摄取的水汽被大量输送到河南暴雨区；中南半岛–中国南海区域（E 区域，贡献率为 3.32%）和河南暴雨区（T 区域，贡献率为 3.68%）的水汽贡献率相当（图 5a），E 区域主要表现为中国南海北部洋面摄取水汽的向北输送，但沿途会经过华南丘陵地形造成水汽释放（图 4b），而 T 区域（河南暴雨区）局地的水汽对强降水也有不可忽视的作用；此外，目标气块在河南暴雨区北侧亚洲大陆区域（B）摄取的水汽对河南暴雨也有一定贡献（2.28%），而由于距离河南暴雨区相对较远或区域环流等影响，A 和 C 区的水汽贡献很小。整体来看，在整层大气中，所有考察的水汽源区对目标降水区域的水汽贡献之和可达 88.47%，基本上解释了本次极端强降水的绝大部分水汽来源，但仍存在约 11.53% 的水汽源未被识别出来，这些水汽可能存在于向前追踪天数之前（即 2021 年 7 月 12 日 03:00 之前），或者来自于未划分的可能水汽源区（图 4b）。

进一步分析各源区水汽摄取特征（图 5b）发现，目标气块在 D 区（河南南侧中国中东部大陆区域）和 F 区（西北太平洋区域）摄取的水汽量远多于其他区域，其中，D 区摄取量最大，F 区仅略低于 D 区，但 D 区水汽输送沿途损耗率（58.23%）明显低于 F 区（73.46%），而在河南暴雨区水汽释放率（28.71%）却明显高于 F 区（16.19%），造成 D 区对河南暴雨的水汽贡献率达 F 区的 2 倍以上

(图 5a); F 区可能由于距目标区域相对较远以及“烟花”环流和降水截留等的影响, 导致大量 (73.46%) 水汽在输送途中释放, 最终供应河南暴雨的水汽量 (16.19%) 低于 D 区 (图 5b); 除了上述两个主要水汽源区, 目标气块在其他源区的水汽摄取量明显偏少 (图 5b), 其中, B 区 (河南暴雨区北侧亚洲大陆区域) 摄取量略大于 E 区 (中南半岛-中国南海区域), 但 B 区受环流影响 (图 2), 摄取量的近一半 (42.54%) 尽管到达目标区域但未被释放, 加上 49.85% 的沿途释放损耗, 造成其对河南暴雨的水汽贡献低于 E 区 (图 5); 目标气块在 C 区 (黄海-日本海-东北亚大陆区域) 和 T 区 (河南暴雨区) 的水汽摄取量相当, 但由于 C 区沿途损耗率 (78.05%) 显著高于后者 (48.13%), 造成 C 区对河南暴雨的水汽贡献小于 T 区; A 区 (欧亚大陆中部地区) 水汽摄取量最小, 沿途损耗率又最高 (94.53%), 导致其水汽贡献最小 (图 5a)。

可见, D 区最高的水汽贡献率 (图 5a) 源于其高水汽摄取量和低沿途释放量, 得益于其距离目标区域较近、位于主要水汽输送通道 (图 4) 且无明显沿途降水系统 (图 2a) 和地形 (图 3b) 截留; F 区和 E 区分别存在热带气旋“烟花”和“查帕卡”环流, 热带气旋的强烈对流活动和降水显著消耗水汽, 且两区域距离河南暴雨区相对较远, 导致沿途损耗率均较高; 但 F 区洋面宽阔, 且受益于庞大“烟花”环流显著的水汽摄取能力与副高环流的协同影响, 水汽摄取量显著高于 E 区 (仅次于 D 区), 导致其水汽贡献率相对更高; 此外, T 区在目标降水区相对最高的水汽释放占比 (图 5b, 29.69%) 一定程度上得益于其显著的降水再循环率 (Eltahir and Bras, 1996)。

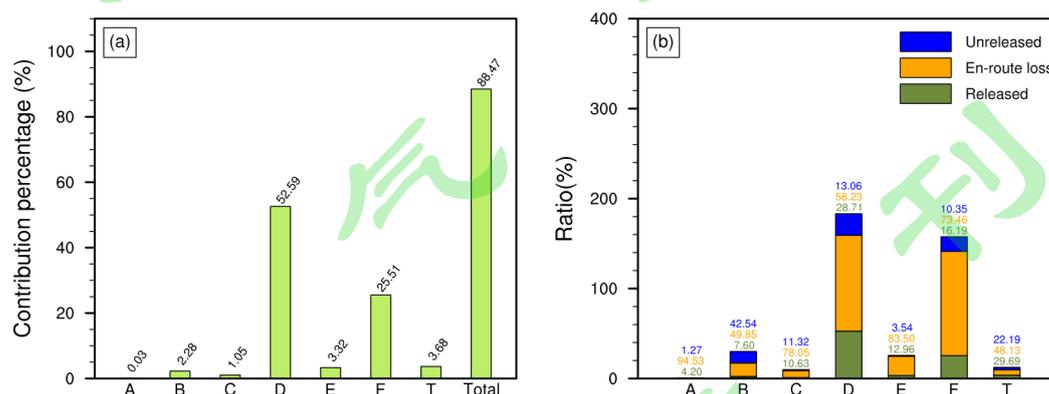


图 5 2021 年 7 月 12 日 03:00 ~ 22 日 00:00 各源区 (a) 对目标降水区的水汽贡献率 (单位: %, 横坐标大写字母含义同图 4, Total 为所有考察的区域贡献率之和) 和 (b) 水汽总摄取量占目标区域水汽总释放量的百分比 (直方图上的数字分别对应各源区三部分水汽占该源区水汽摄取总量的百分比), 图 5b 中, 绿色、橙色和蓝色直方图分别对应目标区域释放、沿途损耗和到达目标区域但未释放部分

Fig. 5 From 0300 UTC July 12 to 0000 UTC July 22, 2021, (a) the moisture contribution rate of each source to the target precipitation area (units: %, the uppercase letters on the abscissa have the same meaning as in Fig. 4, and (b) the percentage of total moisture uptake of each source to total moisture release in the target area (the numbers on the histogram are the percentages of the three parts of moisture to the total moisture intake of source region), in Fig. 5b, the green, orange and blue histograms correspond to the release in target area, loss along the way, and the part reaching the target area but not released, respectively

为了揭示除上述识别出的 88.47% (图 5a) 水汽之外的剩余部分 (11.53%) 水汽来源, 依据前人相关研究 (van der Ent and Tuinenburg, 2017), 延长向前水汽追踪时间 2 天 (图 6、7)。由图 6a 可见, 2021 年 7 月 10 日 03:00~22 日 00:00, 目标气块运动轨迹分布与图 4a 整体相似, 但轨迹相对更长, 其中, 51.40% 的目标气块源自西北太平洋, 27.21% 的气块来自中国南海或菲律宾沿岸, 12.51% 的气块来自中国东北, 7.50% 的气块来自欧亚大陆中部和中国西北部, 与图 4a 大体相近; $E-P$ 分布 (图 6b) 与图 4b 基本相似, 但水汽摄取范围 (图 6b 中红色部分) 相对更广。依据目标气块运动轨迹和 $E-P$ 分布 (图 6) 同样划分 7 个水汽源区 (图 6b), 其中, 除 E 区西边界范围扩大至阿拉伯海东侧外, 其余与图 4b 一致。

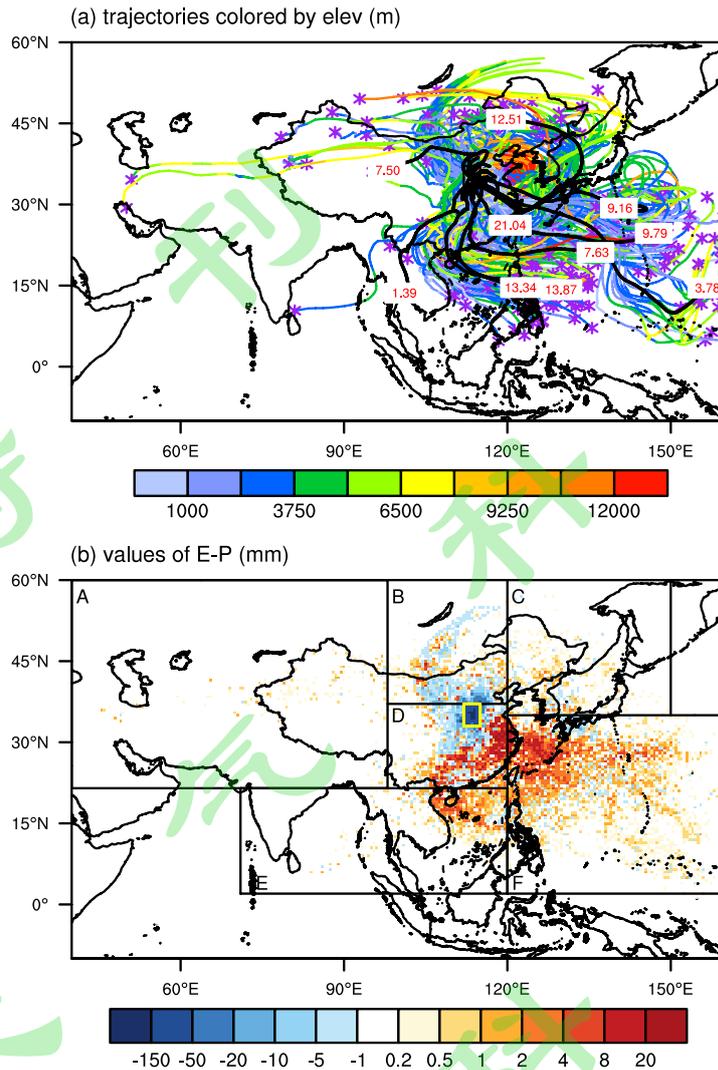


图6 同图4, 但为延长向前追踪天数(2021年7月10日03:00~22日00:00)的结果
 Fig. 6 Same as Fig. 4, but the results of extending the forward tracking days (0300 UTC July 10 to 0000 UTC July 22, 2021)

延长追踪天数后, 各源区摄取的水汽对河南暴雨的相对贡献率(图7a)和各源区水汽摄取特征(图7b)与原追踪天数分析结果(图5)相比基本相似, 但具体数值略有变化, 所有源区对河南暴雨的水汽贡献率之和呈现较为明显的提升, 由88.47%增加至93.28%(提升近5%), 适当延长追踪天数后, 此次河南特大暴雨水汽来源得以更为全面的体现。可见, 对于类似此次河南极端特大暴雨而言, 由于其较长时间极为稳定的有利大气环流形势(图2a)影响, 适当延长目标气块追踪天数对于全面识别水汽来源十分必要。

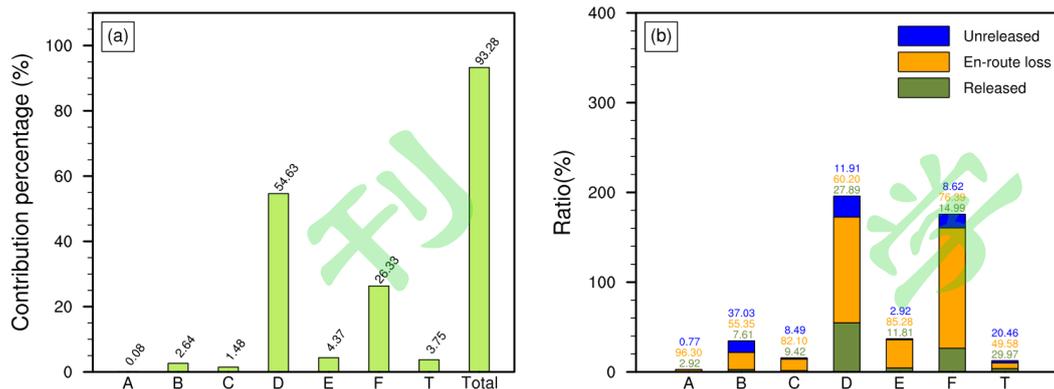


图 7 同图 5，但为延长向前追踪天数（2021 年 7 年 10 日 03:00 ~ 22 日 00:00）的结果
 Fig. 7 Same as Fig. 5, but the results of extending the forward tracking days (0300 UTC July 10 to 0000 UTC July 22, 2021)

综合上述分析，给出“21·7”河南暴雨的大气环流形势和主要水汽来源概念图（图 8）。由图 8 可知，此次特大暴雨过程是在极为有利且较长时间持续稳定的大气环流形势下酝酿形成的：500 hPa 高度场上，副高位置异常偏北，与北侧中高纬度高压脊连通，形成强大高压坝，中高纬度地区较长时间内相对稳定维持“两槽两脊”形势，其中，西侧的巴尔喀什湖高空槽与东部高压坝和鄂霍茨克海高空槽距离较远，其与后两者之间的中高纬度环流平直；上述环流形势从河南暴雨前数天一直维持到暴雨过程期间，河南暴雨区处于上述高空系统之间的“开阔地带”，无明显大尺度系统影响，但易在水汽输送和局地地形影响下形成局地中小尺度降水系统；河南暴雨期间，热带气旋“烟花”正处于副高南侧的西北太平洋洋面上，环流范围大、强度强，与副高相互作用，加强了二者之间向西的水汽输送，形成第一支主要水汽输送通道，而“查帕卡”位于华南沿海，其东侧环流形成第二支向北的水汽输送通道，不仅有利于将来自其南侧和东侧的水汽向北输送，同时有利于目标气块将其北侧中国中东部大陆区域的水汽向北输送；此外，中国东部地区地形相对平坦，且在河南暴雨期间无明显降水系统，而河南西侧存在明显地形分布，这些特征有利于上述两支水汽输送通道上的丰沛水汽向河南暴雨区大量输送和局地集中，从而引发此次河南特大暴雨过程。

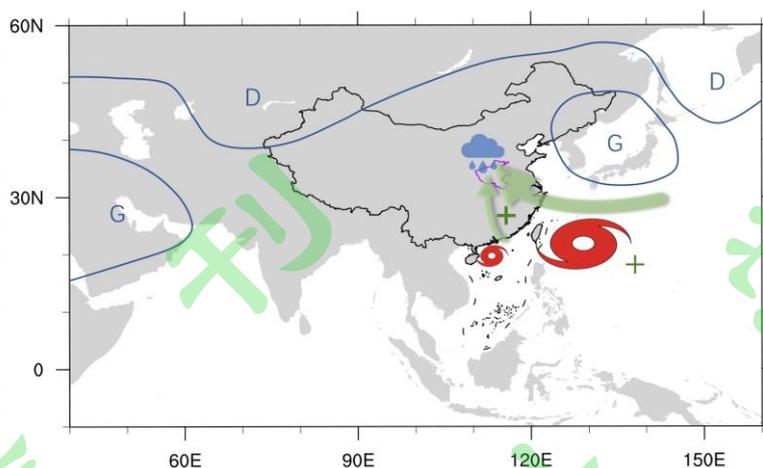


图 8 “21·7”河南暴雨的大气环流和主要水汽来源概念模型。字母“G”和“D”分别代表 500 hPa 上的高、低压环流；大和小红色热带气旋符号分别代表“烟花”和“查帕卡”；绿色箭头指示主要水汽输送路径，箭头粗细指示轨迹数目多少（即水汽输送通道大小）；绿色“+”代表主要水汽源区，其线段粗细表示水汽贡献的相对大小；紫色轮廓指示河南省

Fig. 8 Schematic diagram of atmospheric circulation and main moisture sources for the "21·7" rainstorm in Henan. Letters "G" and "D" represent high- and low-pressure circulation at 500 hPa, respectively. Large and small red tropical cyclone symbols represent "In-Fa" and "Cempaka", correspondingly. Green arrows indicate the main water vapor transport paths, and the thickness of the arrows indicates the number of trajectories (that is, the size of the water vapor transport channel). The green "+" represents the main moisture source, and its thickness represents the relative magnitude of the water vapor contribution. The purple outline indicates Henan Province

5 结论与讨论

本文利用降水观测数据、再分析资料和地形数据，借助拉格朗日轨迹追踪和水汽源区定量贡献分析方法，重点探讨了“21·7”河南暴雨期间及之前数天的大尺度环流形势，揭示了河南暴雨过程的主要水汽源地、输送路径和源区水汽的定量贡献等。得到的主要结论如下：

(1) 河南暴雨期间及之前数天，东亚区域环流极为稳定，500 hPa 中高纬地区稳定维持“两槽两脊”形势，副高异常偏北与北侧高压脊连通，稳定控制日本海和朝鲜半岛等地，其与西侧高空槽距离较远，两者之间中高纬度环流平直；副高南侧洋面上，热带气旋“烟花”与副高之间形成一支向东的水汽输送通道，另一支向北的水汽输送通道则与暴雨期间位于华南沿海的热带气旋“查帕卡”有关；上述环流系统之间的我国中东部大陆地区无明显天气系统影响，而其相对平坦的地形也有利于水汽长距离输送，进而在河南西部和北部集中；河南区域上空无明显

天气尺度系统控制，但在显著水汽输送和其西部、北部局地地形影响下，利于局地降水系统的发生、发展。暴雨期间，河南存在显著的近地面湿区和高可降水量。

(2) 河南暴雨区目标气块主要来自西北太平洋和中国南海等地区，且位于较低的大气高度上，此外，少量目标气块来自于欧亚大陆中部和日本海附近（所处大气高度较高）；河南暴雨所需水汽来自于多个源区，但不同源区摄取的水汽在随目标气块向河南暴雨区行进途中，会经历多次释放过程，造成各源区最终到达河南暴雨区的水汽量不同；此外，各源区到达目标降水区的水汽亦有部分未被释放。此次河南暴雨所需水汽主要来自河南南侧中国中东部大陆地区（52.59%）以及西北太平洋洋面上（25.51%），除此之外，中国南海、暴雨区北侧大陆以及河南暴雨区本地的水汽也有一定贡献。

(3) 此次河南暴雨过程期间及其之前数天内，大尺度环流极为稳定，尽管对目标气块向前追踪数天后，识别出了绝大多数（88.47%）水汽来源，但仍有相当部分水汽未被识别出来；延长向前追踪天数 2 天后，识别出的总水汽源较明显提升，对河南暴雨区强降水的水汽总贡献率达到 93.28%。可见，对于此次特大暴雨过程而言，适当延长目标气块追踪天数，有利于更为全面的揭示其水汽来源。

本研究揭示出河南南侧中国中东部大陆地区是此次河南暴雨过程最主要的水汽源地，强降水过程一半以上的水汽来自于这一地区，比西北太平洋洋面水汽源区贡献率多出 1 倍。Cheng and Lu (2020) 指出，对于长江和黄河流域中下游、朝鲜半岛以及中国北方等地区而言，陆地水汽源与海洋水汽源同等重要，甚至贡献更大；而 Hu et al. (2018) 利用 FLEXPART 追踪 1979~2009 年中国黄土高原降水的水汽源发现，无论夏季还是冬季，中国中东部和西北部-中亚东部地区都是黄土高原降水的主要水汽源。可见，就相对远离洋面和热带地区的陆地降水过程而言，临近目标降水区的陆地区域可为降水提供丰富水汽来源。

本文重点从水汽来源的角度，研究揭示了“21·7”河南暴雨的可能形成机理。众所周知，大气中的降水过程是水汽辐合等宏观热动力过程与微观云物理过程复杂相互作用的结果 (Huang et al., 2016)，因此，对于此次特大暴雨过程形成机理的深入认识，需要进一步从宏、微观相结合的角度，展开深入探讨和揭示。本文后续工作，将借助 WRF 模式高分辨率数值模拟，结合三维降水诊断方程 (Huang et al., 2016)，从宏、微观角度，对“21·7”河南暴雨的形成机理，进行深入分析和揭示，以便进一步加深对此类暴雨过程机理的认识，为相关预报提供有益的参考。

参考文献 (References)

- Bonne J L, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. 2014. The isotopic composition of water vapour and precipitation in Ivittuut, southern Greenland [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14:4419–2014. doi:10.5194/acp-14-4419-2014
- 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(05): 810–818. Chen Bin, Xu Xiangde, Shi Xiaohui. 2011. Estimating the water vapor transport pathways and associated sources of water vapor for the extreme rainfall event over east of China in July 2007 using the Lagrangian method [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69(5): 810–818. doi:10.11676/qxxb2011.071
- 陈晓晨, 徐影, 姚遥. 2015. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估 [J]. *大气科学*, 39 (6): 1123–1135. Chen Xiaochen, Xu Ying, Yao Yao. 2015. Changes in climate extremes over China in a 2° C, 3° C, and 4° C warmer world [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (6): 1123–1135, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224
- Cheng T F, Lu M. 2020. Moisture source–receptor network of the East Asian summer monsoon land regions and the associated atmospheric steerings [J]. *Journal of Climate*, 33(21): 9213–9231. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0868.1
- 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 2020. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响 [J]. *水科学进展*, 31(05): 629–643. Ding Yihu, Liu Yanju, Song Yafang. 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 31(05): 629–643. doi: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.001
- 丁一汇, 张建云. 2009. 暴雨洪涝 [M]. 北京: 气象出版社, 16–23. Ding Yihui, Zhang JianYun. 2009. Heavy Rainfalls and Floods (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press, 16–23.
- Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. 1992. Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Method and applications [J]. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 26(14): 2575–2581. doi:10.1016/0960-1686(92)90110-7
- Eltahir E A B, Bras R L. 1996. Precipitation recycling [J]. *Reviews of Geophysics*, 34(3): 367–378. doi: 10.1029/96RG01927
- 傅刚, 刘珊, 李晓东, 等. 2019. “大气河”研究进展回顾 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 49(10): 10–17. Fu Gang, Liu Shan, Li Xiaodong, et al. 2019. Review on atmospheric river research [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 49(10): 10–17. doi: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190251
- Gustafsson M, Rayner D, Chen D. 2010. Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture come from? [J]. *Tellus A*, 62(5): 605–616. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00456.x
- Hu Q, Jiang D B, Lang X M, et al. 2018. Moisture sources of the Chinese Loess Plateau during 1979–2009 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 509: 156–163. doi: 10.1016/j.palaeo.2016.12.030

- Huang Y J, Cui X P. 2015a. Moisture sources of an extreme precipitation event in Sichuan, China, based on the Lagrangian method [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 16(2): 177–183. doi: 10.1002/asl2.562
- Huang Y J, Cui X P. 2015b. Moisture sources of torrential rainfall events in the Sichuan Basin of China during summers of 2009–13 [J]. *J. Hydrometeorol.*, 16(4): 1906–1917. doi: 10.1175/JHM-D-14-0220.1
- 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]. *Atmospheric Research*, 169 (Pt. A): 54–64. doi:10.1016/j.atmosres.2015.09.026
- Jiang J, Zhou T J, Wang H L, et al. 2020. Tracking moisture sources of precipitation over Central Asia: A study based on the water source-tagging method [J]. *Journal of Climate*, 33(23): 10339–10355. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0169.1
- 梁卓然, 江志红, 刘征宇, 等. 2011. 基于拉格朗日方法的气流轨迹模式在判定南海夏季风爆发时间中的应用分析 [J]. *热带气象学报*, 27(3): 357–364. Liang Zhuoran, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu, et al. 2011. Analysis on application of an airflow trajectory model based on Lagrangian method in determination of the onset date of the South China Sea summer monsoon [J], *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27(3): 357–364. doi:10.3969/j.issn.1004.4965.2011.03.008
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果 [J]. *气象学报*, 78(03): 419–450. Luo Yali, Sun Jisong, Li Ying, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78(03): 419–450. doi:10.11676/qxxb2020.057
- Munday C, Washington R, Hart N. 2021. African low-level jets and their importance for water vapor transport and rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 48(1): 1–11. doi: 10.1029/2020GL090999
- Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, et al. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming [J]. *Scientific Reports*, 9(1): 16063. doi: 10.1038/s41598-019-52277-4
- Nieto R, Gimeno L. 2019. A database of optimal integration times for Lagrangian studies of atmospheric moisture sources and sinks [J]. *Scientific Data*, 6(1): 59. doi: 10.1038/s41597-019-0068-8
- Numaguti A. 1999. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 04(D2): 1957–1972. doi: 10.1029/1998JD200026
- Pfahl S, Wernli H. 2008. Air parcel trajectory analysis of stable isotopes in water vapor in the eastern Mediterranean [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113: D20104. doi:10.1029/2008JD009839
- Saha S, Moorthi S, Wu X, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *Journal of Climate*, 27(6): 2185–2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
- 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, 113: D03107, doi:10.1029/2007JD008503.
- Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G. 1998. Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data [J]. *Atmos. Environ.*, 32(24): 4245–4264. doi:10.1016/s1352-2310(98)00184-8
- Stohl A, James P. 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. *J. Hydrometeorol.*, 5(4): 656–678. doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0656:alaota>2.0.co;2
- Stohl A, 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
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. *大气科学*, 37 (3): 705–718. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 705–718. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12202
- 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
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1–225. Tao Shiyan. 1980. *Heavy Rainfalls in China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 1–225.
- Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change [J]. *Climatic Change*, 39(4): 667–694. doi: 10.1023/A:1005319109110
- van der Ent R J, Tuinenburg O A. 2017. The residence time of water in the atmosphere revisited [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21(2): 779–790. doi:10.5194/hess-21-779-2017
- Vázquez M, Nieto R, Liberato M L, et al. 2020. Atmospheric moisture sources associated with extreme precipitation during the peak precipitation month [J]. *Weather Clim. Extr.*, 30: 100289. doi: 10.1016/j.wace.2020.100289
- 王美月, 王磊, 李谢辉, 等. 2021. 三江源地区暴雨的水汽输送源地及路径研究 [J]. *高原气象*: 1–11. Wang Meiyue, Wang lei, LI Xiehui, et al, 2021. Study on water vapor transport source and path of rainstorm in Sanjiangyuan area [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*: 1–11. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00097
- Wang N, Zeng X M, Zheng Y, et al. 2018. The atmospheric moisture residence time and reference time for moisture tracking over China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 19(7): 1131–1147. doi: 10.1175/JHM-D-17-0204.1
- Weyhenmeyer C E, Burns S J, Waber H N, et al. 2002. Isotope study of moisture sources, recharge areas, and groundwater flow paths within the eastern Batinah coastal plain, Sultanate of Oman [J]. *Water Resources Research*, 38(10): 2-1–2-22. doi:10.1029/2000WR000149
- 薛一迪, 崔晓鹏. 2020. “威马逊” (1409) 降水水汽来源和源区定量贡献分析 [J]. *大气科学*, 44(2): 341–355. Xue Yidi, Cui Xiaopeng. 2020. Moisture sources and quantitative analyses of source contributions of precipitation associated with Rammasun (1409) [J].

Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 341–355.
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18245

Zhang L X, Zhao D, Zhou T J, et al. 2021. Moisture origins and transport processes for the 2020 Yangtze River Valley record-breaking mei-yu rainfall [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(12): 2125–2136, doi: 10.1007/s00376-021-1097-8.

Zhao N, Manda A, Guo X, et al. 2021. A Lagrangian view of moisture transport related to the heavy rainfall of July 2020 in Japan: Importance of the moistening over the subtropical regions [J]. Geophysical Research Letters. 48(5): e2020GL091441. doi: 10.1029/2020GL091441

