

施逸, 江志红, 李肇新, 2021. 基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征[J]. 大气科学. SHI Yi, JIANG Zhihong, LI Laurent, 2021. Vertical characteristics of water vapor transport in rainy season in eastern China based on Lagrangian method[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20236

基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征

施逸^{1, 2}, 江志红², 李肇新³

1 南京市气象局, 南京 210019

2 南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044

3 法国巴黎索邦大学, 气象动力学实验室, 法国巴黎

摘要: 利用基于拉格朗日轨迹追踪模式 (HYSPLIT), 结合区域源汇归属法, 追踪 1961-2010 年中国东部地区雨带推进过程中各雨季后向轨迹, 定量确定各雨季不同垂直层上的水汽输送路径与水汽贡献。结果表明在南海夏季风爆发前的华南前汛期, 低层最主要水汽通道为太平洋通道, 轨迹占比达到 52.3%, 中高层最主要的水汽通道为印度洋通道, 占比超过 37%; 水汽主要源自低层的西太平洋和中国东部地区, 水汽贡献均在 20% 以上。南海季风爆发后的华南前汛期, 低层到高层最强水汽通道均为印度洋通道, 特别是中层, 轨迹数量达到了 65.6%; 印度洋源地的贡献明显增加, 中高层水汽主要源自印度洋, 低层最主要的水汽源地为中国东部和南海。江淮梅雨时低层最主要通道为太平洋通道, 中高层最主要通道为印度洋通道, 相比华南前汛期, 在中高层印度洋通道减弱, 而西风通道增强。华北雨季中, 低层最主要水汽通道为太平洋通道, 而中高层最主要的水汽通道为欧亚大陆中纬西风通道。江淮梅雨和华北雨季中, 最主要的源地为中低层的中国东部地区和西太平洋地区, 特别是华北雨季中, 来自中国东部局地低层的水汽达到了 43.1%, 表明低层局地蒸发对华北雨季降水起到至关重要的作用。

关键词: 拉格朗日轨迹追踪, HYSPLIT, 水汽输送, 垂直结构

收稿日期: 2020-11-27; 网络预出版日期:

作者简介 施逸, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事区域气候模拟和水汽输送方面的研究。E-mail: sy11235@126.com

通讯作者 江志红, E-mail: zhjiang@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2017YFA0603804, 国家自然科学基金面上项目 41675081, 江苏省气象局青年基金 KQ202121, 江苏省气象科学研究所北极阁基金 BJG201905

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0603804), National Natural Science Foundation of China (41675081), Jiangsu Meteorological Bureau Youth Fund (KQ202121) and BEIJIGE foundation of Jiangsu Institute of Meteorological Sciences BJG201905

Vertical characteristics of water vapor transport in rainy season in eastern China based on Lagrangian method

SHI Yi^{1, 2}, JIANG Zhihong², LI Laurent³

1 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, Sorbonne Université, Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique, Paris, France

Abstract: The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) platform, enhanced with the areal source–receptor attribution method, is used to simulate Lagrangian trajectories of air parcels in East China during the summer monsoon from 1961 to 2010 in different vertical levels. Water vapor transport pathways and moisture contribution at different vertical layers in each rainy season are determined quantitatively. During the pre-monsoon season in South China (SC), the dominant water vapor transport channel in lower level (under 1500m) is the West Pacific Ocean channel, with the proportion of trajectories reaching 52.3%, while in middle level (1500m to 5000m) the Indian Ocean channel is dominant, with the proportion of trajectories larger than 37%. The most important moisture source is, however, the land area of East China and the West Pacific Ocean in the lower level, their contribution rate for each of the two sources is higher than 20%. After the onset of the South China Sea summer monsoon, and during the whole monsoon season in SC, the Indian Ocean channel is the strongest moisture channel for lower level, middle level and upper level (higher than 5000m), and the proportion of trajectories in middle level is 65.6%. Meanwhile, the moisture contribution from the Indian Ocean also has a great increase, it is the most important moisture source in middle level and upper level. But the most important moisture source in lower level is East China and the South China Sea. During the Meiyu season, the West Pacific channel is the dominant channel in lower layer, and the Indian Ocean channel is dominant in middle and upper levels. Compared with the monsoon season in SC,

the Indian Ocean channel is weaker in middle and upper levels, while the mid-latitude westerly channel is stronger. During the rainy season in North China, the dominant water vapor channel is the West Pacific channel in lower layer, while the dominant channel is the mid-latitude westerly channel in middle and upper layers. During the Meiyu and North China rainy season, the main source areas are eastern China and the West Pacific region. Especially in the rainy season in North China, the water vapor from East China in the lower level reaches 43.1%, which indicates that local evaporation at the low level plays a crucial role in the rainy season precipitation in North China.

Keywords: Lagrange trajectory, HYSPLIT, Moisture transport, Vertical structure,

一、引言

我国东部地区位于东亚季风区, 季风区水汽的源汇、输送路径及其变化直接影响着中国东部雨季的爆发、雨带的进退及早涝变化, 相关研究一直受到气象学家的高度关注。早在 20 世纪 80 年代, 就有大量研究指出中国东部夏季降水的水汽来源主要有孟加拉湾, 南海和西太平洋三条水汽通道 (Tao, 1987; 陈隆勋等, 1991)。其后, 众多学者开展了一系列的研究。He et al. (2007) 系统分析了中国东部季风区在东亚季风推进过程中水汽输送的变化特征, 并指出 3 至 5 月的水汽输送最主要的影响区域分别为中南半岛, 斯里兰卡地区以及南海区域。谢坤和任雪娟 (2008) 指出华北地区夏季降水的水汽主要来自孟加拉湾、南海、西太平洋以及中高纬西风带的输送。沈如桂和黄更生 (1980) 认为长江中下游降水的水汽大部分来自于南海和太平洋, 少部分来自孟加拉湾, 蒋兴文和李跃清 (2009) 却认为长江流域夏季降水的水汽主要来自南半球、南印度洋、东非沿岸和阿拉伯海, 还特别指出南海并不是水汽源地, 而是水汽输入中国大陆的一个重要通道。而在华南雨季, 陈世训等 (1983) 研究发现华南前汛期的水汽主要来自南海, 而林爱兰等 (2014) 发现华南前汛期水汽输送来源主要有孟加拉湾的西南支输送、热带西太平洋的东南支输送和青藏高原西南侧的西支输送, 常越等 (2006) 则指出 4 月之前、4-6 月和 6 月之后的水汽输送特征存在明显差异, 此外西太平洋的水汽输送变化和来自中国北方的水汽输送变化对华南降水异常有重要作用。

需要注意的是以上研究基于传统欧拉方法, 通过计算水汽通量以及大尺度环

流, 确定水汽输送特征, 但该方法无法给出远距离的水汽贡献特征, 且不能定量确定各源地的水汽贡献特征。鉴于拉格朗日方法能够提供水汽输送轨迹及沿水汽轨迹的变化细节, 近年来拉格朗日方法在全球及区域水循环研究中得到高度重视 (Stohl and James, 2004, 2005; Dominguez et al. 2006; Dirmeyer et al. 2009)。该方法通过大气中气块三维位置进行后向追踪, 确定每个时次气块的三维位置以及温压风湿等物理量, 可以确定水汽输送过程中轨迹与源地水汽贡献。目前该方法在全球尺度上 (Gimeno et al., 2010), 以及各个子区域 (美国地区: Brubaker et al. 2001, Diem and Brown, 2006; 欧洲地区: Bertò et al. 2004, Perry et al. 2007, Sodemann et al. 2009, Bottyan E. et al. 2014; 拉丁美洲: Drumond et al. 2014; 非洲: Salih et al. 2015) 得到广泛运用。

在国内, 苏继峰 (2010), 江志红 (2011), 孙妍 (2011)、孙建华 (2013)、吴凡 (2014) 等先后使用拉格朗日方法, 对降水个例进行水汽源地的分析, 确定了多次降水过程的水汽源地。而在气候态特征上, Drumond et al. (2011) 研究了 2000~2004 年中国各区域降水的水汽来源, 确定了中国不同地区主要水汽源地。Li L. et al. (2016) 使用拉格朗日轨迹追踪的方法, 对东亚季风区进行水汽轨迹追踪, 结果表明, 冬季降水水汽主要来自于热带洋面上; 夏季降水水汽的主要源地是西南季风区, 西南季风向东亚季风区提供了超过 40% 的水分。而 Sun and Wang (2014, 2015) 研究了中国东部以及半干旱区降水水汽来源, 定量的分析了主要源地水汽贡献特征。近期 (Shi et al. 2020) 我们基于拉格朗日方法 蒸发降水诊断法和区域源汇归属法等多种方法, 对季风推进过程中的水汽输送特征进行了深入系统的研究, 发现季风推进过程中中国东部各雨季最主要的水汽源地为中国东部局地, 局地的水汽循环对季风降水起到了至关重要的作用, 特别是华北雨季有超过一半的水汽来源于局地蒸发; 此外太平洋源地和南海、印度洋源地分别是南海夏季风爆发前、后的华南前汛期重要的水汽源地。但是以上研究中缺乏水汽输送垂直结构及其不同高度上源地特征的分析, 而不同垂直层次的水汽输送与源地特征同样会对季风降水有着显著的影响。

以往有关水汽垂直输送垂直结构的研究多基于不同层次环流结构以及水汽通量的垂直剖面图, 确定各层次水汽输送对雨季降水的影响。黄荣辉等 (1998, 2008) 详细分析了东亚季风与亚澳季风的差异, 并指出正是由于东亚季风系统风

场的垂直结构不同于南亚和北澳季风系统,造成了东亚夏季风降水云系不同于南亚和北澳季风系统。邱金晶等(2013)指出正是由于索马里急流垂直结构的年代际变化差异,对中国东部华北与华南降水产生重要影响。但是这些研究均主要使用欧拉方法,仅能确定目标区域不同垂直层次的水汽收支,无法将降水与源地联系,确定各垂直层的源地水汽贡献特征。结合我们之前的研究,拉格朗日方法很好的提供了认识水汽输送垂直结构的工具,能较好的解决欧拉方法存在的问题。

因此本文通过对不同高度上的气块进行后向追踪,得到不同层次上气块后向追踪的三维位置,通过计算平均轨迹、区域源汇归属等方法,系统分析不同高度层上的水汽输送特征,全面了解水汽输送三维结构特征,以帮助我们对雨带推进过程中不同雨季的水汽特征有全面认识,深化理解各雨季降水的特征的变化与差异。

二、数据和方法

2.1 资料与方法

本文使用再分析资料为 1961-2010 年 NCEP/NCAR 再分析资料,共 17 个垂直层次,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间分辨率为 6 小时。

研究时段选取国家气候中心每年发布的《国家气候公报》以及中央气象台发布雨季监测信息(<http://cmdp.ncc-cma.net/cn/monitoring.htm#>)中华南前汛期、江淮梅雨以及华北雨季三个主要雨季发生时间,并确定了各雨季主要区域作为本文研究区域(图 1,华南: $20^{\circ}\text{N}-26^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\text{E}-120^{\circ}\text{E}$ 、江淮: $28^{\circ}\text{N}-34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}-123^{\circ}\text{E}$ 、华北: $35^{\circ}\text{N}-43^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}-120^{\circ}\text{E}$)。此外依据 Bin Wang et al. (2004) 提出的南海夏季风爆发判据,确定每年南海夏季风爆发时间,将华南前汛期分为南海夏季风爆发前的华南前汛期和南海夏季风爆发后的华南前汛期两个阶段。最终将中国东部季风雨季分为四个阶段,分别为南海夏季风爆发前的华南前汛期,南海夏季风爆发后的华南前汛期,江淮梅雨以及华北雨季。每年详细研究时间参考 Shi et al.(2020)。

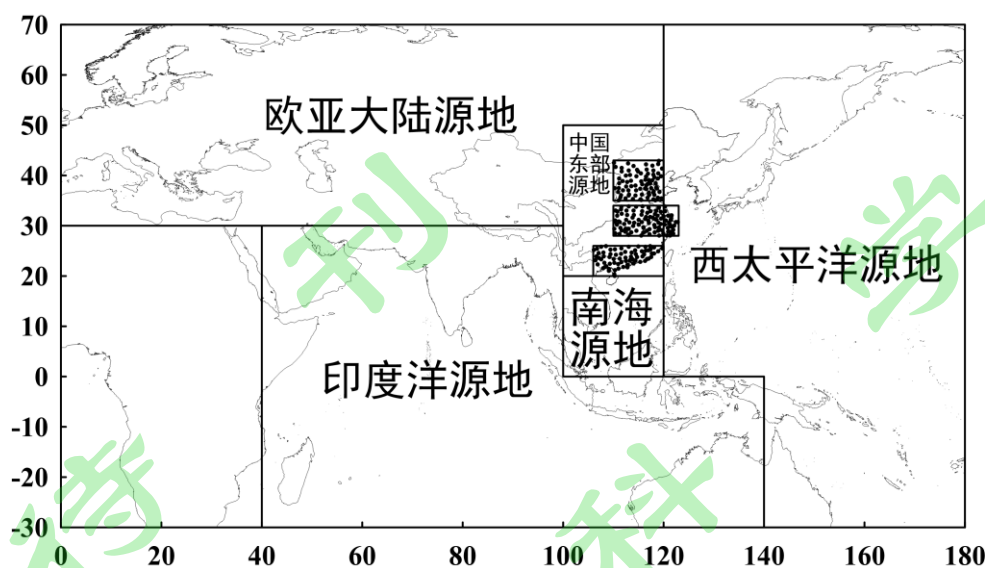


图 1. 中国东部雨季水汽源地分布的区域划分，分别为中国东部，南海，印度洋，西太平洋和欧亚大陆。华南（ 20°N - 26°N ， 106°E - 120°E ）、江淮（ 28°N - 34°N ， 110°E - 123°E ）与华北（ 35°N - 43°N ， 110°E - 120°E ）研究区域及站点分布。华南地区 70 个站点，江淮流域 99 个站点，华北地区 78 个站点。

Figure 1. The division of geographic sectors (black boxes: East China, South China Sea, Indian Ocean, West Pacific Ocean, and Eurasia) used to account the trajectories and moisture contributions. Location of the three rectangular target domains in East China, South China region (20° - 26°N , 106° - 120°E), Yangtze-Huaihe River basin region (28° - 34°N , 110° - 123°E), and the North China region (35° - 43°N , 110° - 120°E) from south to north. Dots indicate locations of the observational stations in these three regions, 70 stations in South China region, 99 stations in Yangtze-Huaihe River basin region and 78 station in North China region.

本文使用美国国家海洋和大气管理局（NOAA）空气资源实验室开发的 HYSPLITv4.9 轨迹模式（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory, NOAA ARL, 2011）。轨迹追踪初始位置选择华南、江淮以及华北，三个主要研究区域内站点位置（图 1）。轨迹追踪起始高度选取海平面上 100m, 500m, 1500m, 3000m, 5000m 和 9000m 共 6 个层次作为模拟的初始高度，分别代表近地面层，925hPa, 850hPa, 700hPa, 500hPa 和 300hPa，并进一步将气块初始位置以高度分为三个部分，1500m 以下为对流层低层（低层），1500m-5000m 为对流层中低层（中层），超过 5000m 以上为对流层中高层（高层）。轨迹追踪初始时间选取

每年各雨季起止时间，每日四次（00 时、06 时、12 时、18 时）。分别对气块进行后向追踪 10 天，每隔 6 小时输出气块的三维位置以及温压风湿等物理特征，以得到每个气块的输送轨迹，对各雨季不同区域内的轨迹进行平均，从而定量确定不同层次的主要水汽输送通道（江志红等，2011；Shi et al., 2020）。

在此基础上，我们引入改进的区域源汇归属法定量确定了不同层次各源地的相对贡献 CDF。该方法主要考虑对于每一条轨迹，气块从源地输送到目标区域形成降水时，其比湿会随着轨迹移动而变化。当气块比湿增加时，吸收的水汽其源地为当前粒子所在位置，并且吸收的水汽与大气中原有水汽完全混合；当比湿减少时，大气中来自各源地的水汽按相同比例损失。最终气块到达目标区域形成降水。通过计算大气中比湿的变化，可以定量确定该轨迹上每个源地对目标区域降水的贡献以及在目标区域释放的水汽总量。对每一条轨迹进行累加，因此我们引入如下公式：

$$CDF(i) = \frac{\sum_{j=1}^n R_j(i)}{R_{total}}$$

其中 n 表示区域 i 内的轨迹数量， $R_j(i)$ 表示轨迹 j 在源地 i 吸收的水汽到目标区域释放水汽量，而 R_{total} 表示所有轨迹在目标区总水汽释放量，可以近似代表目标区域的降水量。通过该方法，我们可以全面了解水汽贡献的垂直结构特征。具体研究方案以及方法介绍详见 Shi et al.(2020)，Sun and Wang (2014,2015)。

三、各雨季中水汽输送的三维特征及其对比

3.1 季风爆发前的华南前汛期

图 2 第一行给出了南海夏季季风爆发前的华南前汛期低、中、高层主要的水汽通道。在低层（图 2a），最主要的水汽通道为太平洋通道，其轨迹数量达到了低层总轨迹数量的 52.3%，低层有超过一半的轨迹来自西太平洋地区，因此低层最主要的通道为太平洋通道。图中轨迹的颜色表示其比湿变化，也可以看到轨迹的平均比湿从源地的 10g/kg 增加至目标区域（华南）附近的 15g/kg，表明低层中大量轨迹携带水汽从西太平洋地区进入华南，对华南降水产生重要影响。低层其余通道相对较弱，中纬西风通道和局地通道的轨迹占比分别为 22.2%和 13.5%，而印度洋通道和南海通道轨迹占比仅为 3.1%和 5.2%，通道强度很弱。到了对流

层中低层(图 2b),印度洋通道明显加强,轨迹数量达到中层总轨迹数量的 37.6%,成为对流层中低层最重要的水汽通道;与之相反,太平洋通道强度迅速减弱,其轨迹占比由低层的 52.3%迅速减少至中层的 29%。对流层高层(图 2c)的最主要通道与中层一致,为印度洋通道,其轨迹占比为该层的 38.4%。但是必须要指出,高层水汽含量低,印度洋通道的平均比湿仅为 5g/kg,中纬度西风通道的平均比湿更是小于 3g/kg,因此对降水影响相对不大。

总体上在南海夏季风爆发前的华南前汛期,低层最主要的水汽通道为太平洋通道,有一半以上的轨迹来自该通道。而中高层最主要的水汽通道为印度洋通道。此外由于气块比湿随着高度增加而减少,因此相比高层轨迹,低层轨迹对降水的影响相对更为显著。

类似于我们之前的研究(Shi et al. 2020),本文进一步使用区域源汇归属法定量给出了不同层次的水汽贡献分布结果。并且为了与水汽通道的结果进行对比,我们将中国东部降水的主要源地分为中国东部局地源地、西太平洋源地、南海源地、印度洋源地以及欧亚大陆源地五个源地(图 1),分别代表五条主要的水汽通道,计算得到了五个源地各自的水汽贡献率。图 2 第二行给出了南海季风爆发前的华南前汛期低中高三个垂直层上的各源地水汽贡献率。而各图中右上角分别给出了低层、中层和高层各层总贡献率。可以看到,在该雨季,对流层低层(1500m 以下)的水汽贡献率较大,其总贡献率达到了 57.8%,主要水汽源地位于华南地区局地和东侧太平洋地区。进一步计算发现,中国东部局地和西太平洋源地是该雨季低层最主要的水汽源地,其贡献率分别达到了 23.1%和 24.2%,为雨季降水提供了接近一半的水汽;而其余源地的水汽贡献则较小,南海源地水汽贡献率为 9.9%,而印度洋源地和欧亚大陆源地水汽贡献率仅不足 0.5%。

对流层中层,由于大气平均比湿有所降低,各源地水汽大多明显减少,因此来自对流层中层的水汽总量减少,可以看到来自中层的水汽占总水汽的 35.8%。各子源地贡献中,南海源地和中国东部局地的水汽贡献率分别为 10.8%和 9.8%,仍为最主要的水汽源地,印度洋源地水汽贡献明显提高,其水汽贡献率达到了 6.3%。而到了对流层高层,由于气块比湿很小,其水汽贡献也很小。对流层高层各源地水汽总贡献仅为 6.4%,其中贡献率最大的印度洋源地水汽贡献率也仅为 2.6%。总体上,对流层高层的水汽对降水的影响相对较小。

为了全面进一步得到水汽输送的全面特征,图 2 第三行进一步给出了基于欧拉方法的各层水汽输送特征。可以看到在季风爆发前的华南前汛期(图 2g),低层太平洋地区水汽通量较大,且水汽直接输送至华南地区对华南前汛期降水产生影响;此时,印度洋通道较弱。前文也指出该雨季低层最主要的水汽通道和源地均为西太平洋源地,因此无论从拉格朗日方法还是欧拉方法均可以明确该雨季最主要的水汽通道,而拉格朗日方法能进一步量化这种通道的强弱与水汽贡献大小。在中层(图 2h),印度洋水汽通道有所增强,中纬西风带通过绕青藏高原南支气流将印度洋水汽输送至华南,对降水产生影响。到了高层,青藏高原阻挡作用较弱,因此主要受到西风影响,但是由于 500hPa 以上比湿较低,因此其水汽通量也很弱,对降水影响也相对较小。而拉格朗日方法中也可以看到季风爆发前的华南前汛期高层的水汽贡献较低,两者结果也是一致的。

综上所述,南海夏季风爆发前的华南前汛期,低层最重要的水汽通道为主要为太平洋通道,而在中层和高层则主要为印度洋通道;但其降水的水汽主要来源于低层,而无论中层还是低层,其最主要的水汽源地均为西太平洋源地和中国东部局地。

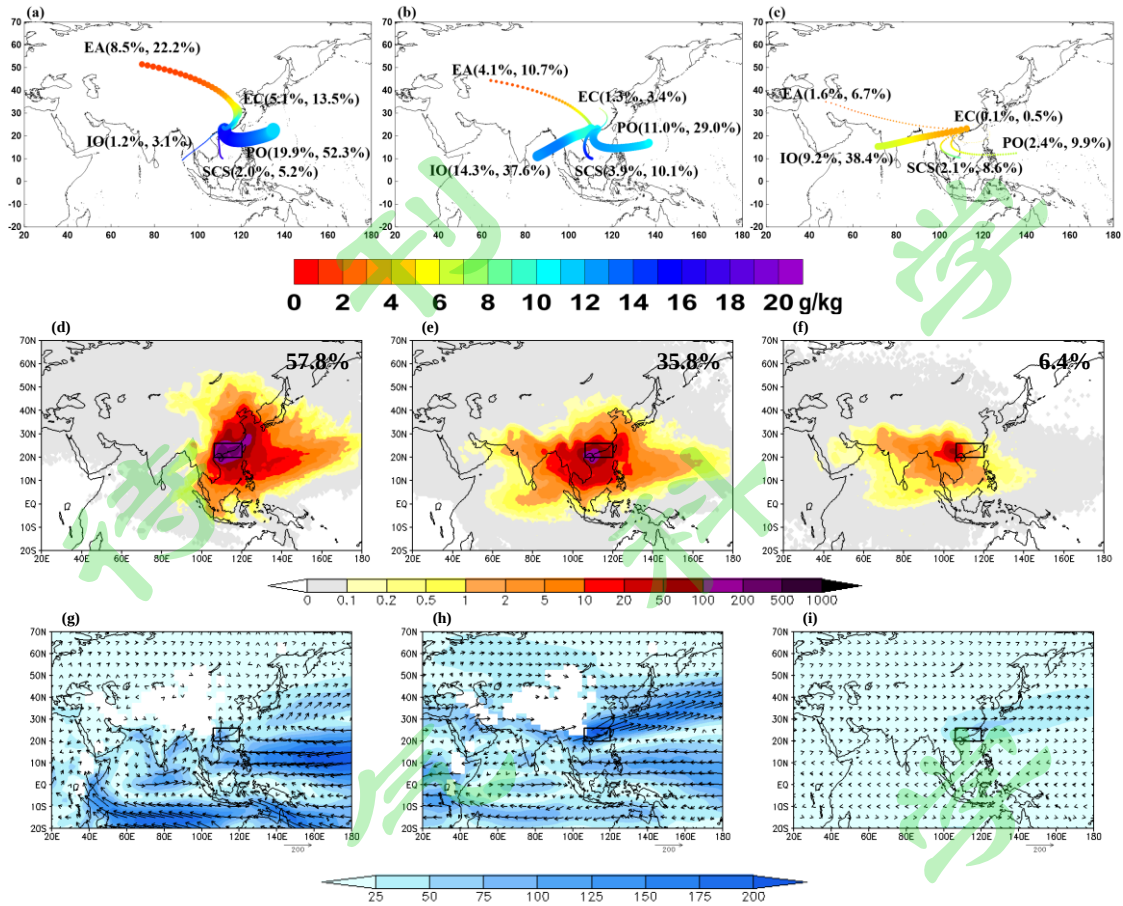


图 2. 季风爆发前的华南前汛期 (a) 低层 (1500m 以下)、(b) 中层 (1500m-5000m) 和 (c) 高层 (5000m 及以上) 的主要水汽通道的轨迹特征, 主要有西太平洋水汽输送通道 (PO), 南海水汽通道 (SCS), 印度洋水汽通道 (IO), 欧亚大陆西风带水汽通道 (EA) 和中国东部水汽通道 (EC), 轨迹的颜色表示比湿 (单位 g/kg), 轨迹的粗细表示轨迹数量, 轨迹占比也在轨迹旁标出, 其中第一个数字为通道的轨迹数量在雨季内所有轨迹的占比, 第二个数字表示通道轨迹数量在该层轨迹中的占比。第二行为低层 (1500m 以下, 图 d)、中层 (1500m-5000m, 图 e) 和高层 (5000m 及以上, 图 f) 水汽源地的贡献率 (CDF) 分布 (单位: 10^{-5})。第三行为低层 (1500m 以下, 图 g)、中层 (1500m-5000m, 图 h) 和高层 (5000m 及以上, 图 i) 水汽通量 (矢量图) 和水汽通量值 (阴影图) 空间分布 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)。

Figure 2. Characteristics of moisture transport, moisture source and water vapor flux for the pre-monsoon in South China (SC). The first row shows moisture transport channels based on average trajectories. Five transport channels are identified, from East China (EC), the West Pacific Ocean (PO), the South China Sea (SCS), the Indian Ocean (IO) and the Eurasian westerly (EA), respectively. Colors on the pathways indicate the average specific humidity of air parcels along the trajectories (units: g/kg).

The thickness of the pathways represents the percentage of trajectories, also marked in numbers. The second row shows the water vapor Contribution Density Function (CDF) showing the contribution of water vapor source regions (unit: 10^{-5} , areas of 1 by 1 in latitude/longitude) to the precipitation in the target region of South China. The third row shows the climatology of vertically integrated atmospheric water vapor transport (vectors, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) under the Eulerian view and shadings represent amount of the water vapor transport. The first column is the result of lower level (under 1500m), the second column is the result of middle level (1500m to 5000m) and the third column is the result of upper level (higher than 5000m).

3.2 季风爆发后的华南前汛期

南海夏季风爆发后，华南前汛期水汽输送发生明显变化。其最主要特征为该雨季印度洋水汽通道迅速增强，在低、中、高三层均为最主要水汽通道（图 3）。图 3a 给出了南海夏季风爆发后的华南前汛期低层的水汽通道，我们发现低层最主要的水汽通道为印度洋通道和太平洋通道，通道轨迹占比分别为 35.9% 和 33.5%，印度洋通道轨迹数量稍多。对比南海夏季风爆发前的华南前汛期，太平洋通道轨迹数量明显减少而印度洋通道轨迹占比则增加了 3 倍，此时，印度洋通道的平均比湿也达到了 17g/kg ，为该雨季降水提供了大量的水汽。此外，相比南海季风爆发前的华南前汛期，低层印度洋通道的位置也有一定的变化，轨迹有所向南移动。其余三条主要水汽通道中，南海通道轨迹数量明显增加，轨迹占比由 5.2% 增加至 14.9%，而局地通道和中纬西风通道的轨迹占比则有所减少。

对流层中层（图 3b），印度洋通道明显增强，其轨迹数量达到该层的轨迹数量的 65.6%，表明对流层中层有接近 2/3 的轨迹通过印度洋通道到达华南地区。其余通道的强度相对较弱，其中太平洋通道的轨迹相对占比为 16.0%，其余通道轨迹相对占比均未达到 7%。我们同时注意到，相对于对流层低层，对流层中层通道轨迹位置也存在明显的变化，与低层相比，印度洋通道整体向西移动了大约 10 个经度。在高层（图 3c），印度洋通道仍为最强通道，轨迹占比达到 61.9%，其余通道的轨迹占比均不足 15%。此外，与季风爆发前的华南前汛期一样，高层通道比湿较低，含水量也较低，因此对季风爆发后的华南前汛期降水的影响相对

较小。

总体上，对比季风爆发前的华南前汛期，南海夏季风爆发后，太平洋通道强度明显减弱，而印度洋通道强度则显著增强，特别是对流层中高层，印度洋通道的轨迹数量均超过 60%，对该雨季降水产生重大影响。

图 3d-3e 则给出了南海夏季风爆发后的华南前汛期三个垂直层次的水汽贡献空间分布，相对于季风爆发前，各源地的水汽贡献率也发生了显著的变化。在低层，各源地水汽贡献率总和为 49.9%，虽然仍有一半的水汽来源于低层，但是相比季风爆发前的华南前汛期，低层水汽总贡献有所减少。而各个子源地中，西太平洋源地水汽贡献明显减少，其水汽贡献率由季风爆发前的 24.2%减小到季风爆发后的 10.9%；与之相反，印度洋源地和南海源地水汽贡献率则明显增加，其中低层南海源地水汽贡献率达到了 15.3%，成为该雨季低层最主要的水汽源地之一，印度洋源地水汽贡献率为 6.9%；该雨季低层最主要的水汽源地为中国东部局地，其贡献率为 16.8%。

随着高度的升高，西太平洋源地和南海源地水汽贡献率明显减弱，而印度洋源地的贡献率则明显增强。在中层，印度洋源地水汽贡献率增加至 12.7%，为中层最主要的水汽源地，南海源地和中国东部局地源地水汽贡献次之，分别为 8.1%和 7.7%。对流层高层，水汽总贡献率相对中层和低层有所降低，但是相比季风爆发前的华南前汛期，来自高层的水汽明显增加，其水汽贡献率达到了 17.2%，其中印度洋源地的贡献为 8.8%，表明高层有超过一半的水汽来自印度洋源地。总体上，南海夏季风爆发后的华南前汛期，低层最主要的水汽源地为中国东部和南海地区，而在中高层，最主要的水汽源地为印度洋源地。

从水汽通量的角度，季风爆发后，印度洋地区的水汽通量迅速增强，而西太平洋水汽通量则有所减弱。可以看到，在低层（图 3g）印度洋水汽通过中南半岛，进入南海地区，与西太平洋地区输送的水汽共同影响华南地区的降水。而到了中层（图 3h），受印度洋季风和中纬度西风绕青藏高原南支气流的共同影响，印度洋水汽通量非常强，直接由印度洋经中南半岛，影响华南地区，并进一步向东北输送，经日本以南地区进入太平洋。而在前文分析轨迹占比结果，可以看到印度洋通道的轨迹数量在中层占比达到了 60%以上。到了高层（图 3i），可以相比季风爆发前，西风带水汽通量大值区有所北移，但西风带轨迹数量仍然很小，

对华南地区降水影响也很弱。

综上所述，从低层到高层，印度洋通道均为季风爆发后的华南前汛期最重要的水汽输送通道，其中中层和高层印度洋通道轨迹占比超过 60%。低层最主要的水汽源地为中国东部地区和南海地区，中高层水汽则主要源自印度洋地区。

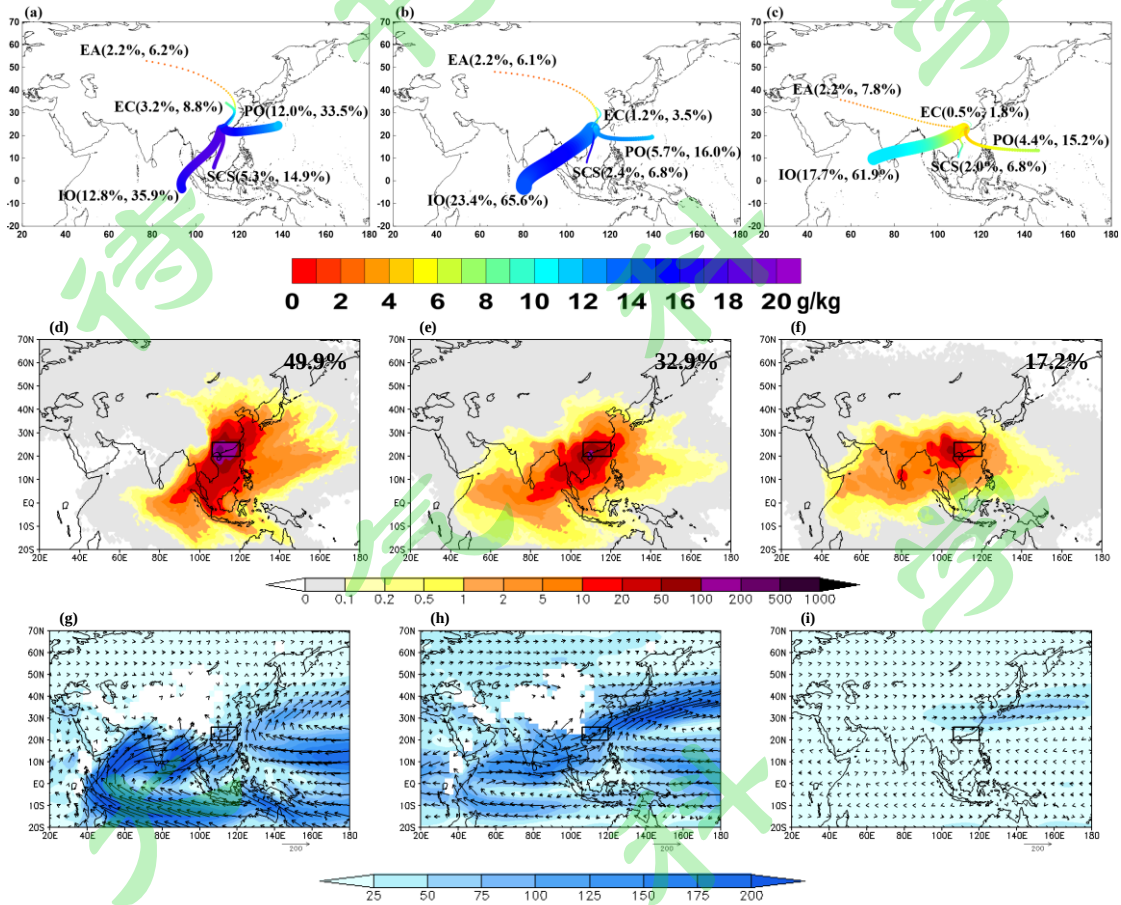


图 3. 同图 2，但为季风爆发后的华南前汛期的结果。

Figure 3. Same as in Figure 2 but for the starting phase of the monsoon in South China.

3.3 江淮梅雨

随着雨带推进至江淮地区，各层水汽输送路径明显北移。在低层（图 4a），太平洋通道重新成为最重要的水汽通道，轨迹占比接近 40%，印度洋通道轨迹占比则下降至 25.9%，此时南海通道的轨迹数量明显增加，轨迹总占比达到了 19.8%。在中层（图 4b），印度洋通道重新成为最强水汽通道，轨迹占比达到了 49.6%，此时，欧亚大陆西风通道为次强水汽通道，轨迹数量占该层轨迹的 17.8%。对比季风爆发后的华南前汛期，太平洋通道，南海通道和局地通道强度变化不大，而印度洋通道则有所减弱，中纬西风通道有所加强。这主要是由于雨带北移造成

水汽输送通道整体北移造成的。到了高层（图 4c），印度洋通道仍为最主要的通道，轨迹占比超过 50%，中纬度西风通道次之，轨迹占比为 18.3%。

从水汽源地角度（图 4d-4f），由于雨带和主要水汽通道的北移，印度洋源地和南海源地水汽贡献率均有所减少，而中国东部局地水汽贡献率则明显增加。在对流层低层，局地贡献率达到了 28.7%，为低层最重要水汽源地；其余源地中，太平洋、南海源地的贡献分别为 18.6%和 9.7%。在对流层中层，局地仍为最主要的水汽源地，其贡献率为 10.5%，印度洋源地次之，贡献率为 7.3%。到了高层，局地和印度洋源地贡献率相对较大，其水汽贡献率分别为 5.2%和 4.4%。总体上，该雨季中从低层到高层，中国东部局地均为该雨季最主要的水汽源地，局地蒸发为江淮梅雨提供了大量的水汽；其他源地中，仅有低层西太平洋源地的贡献率达到了 18.6%，其余各层次源地贡献率均不足 10%。

进一步分析水汽通量，在低层（图 4g），虽然印度洋地区水汽通量仍然很强，但是值得注意的是由于受地形和海陆差异的影响，印度洋地区呈明显偏南风，因此大量阿拉伯海水汽进入印度半岛，大量孟加拉湾水汽进入中南半岛，直接影响江淮地区水汽主要来自南海地区；南海地区水汽与西太平洋地区水汽在南海北部至华南地区汇合，向北输送至江淮地区形成降水。中层（图 4h）的水汽通量与季风爆发后的华南前汛期相似，印度洋季风与青藏高原南支气流共同导致印度洋通道较强，影响华南和江淮地区的降水，并进一步向东北输送至太平洋。到了高层（图 4i），由于雨带的北移，江淮梅雨区位于水汽通量大值区，西风通道对雨季降水影响有所加强。

综上，太平洋通道是江淮梅雨时期低层最主要的水汽通道，而中层和高层最强水汽通道为印度洋通道；从水汽源地角度指出，该雨季最主要的水汽源地为低层与中层的中国东部局地以及低层的西太平洋地区。

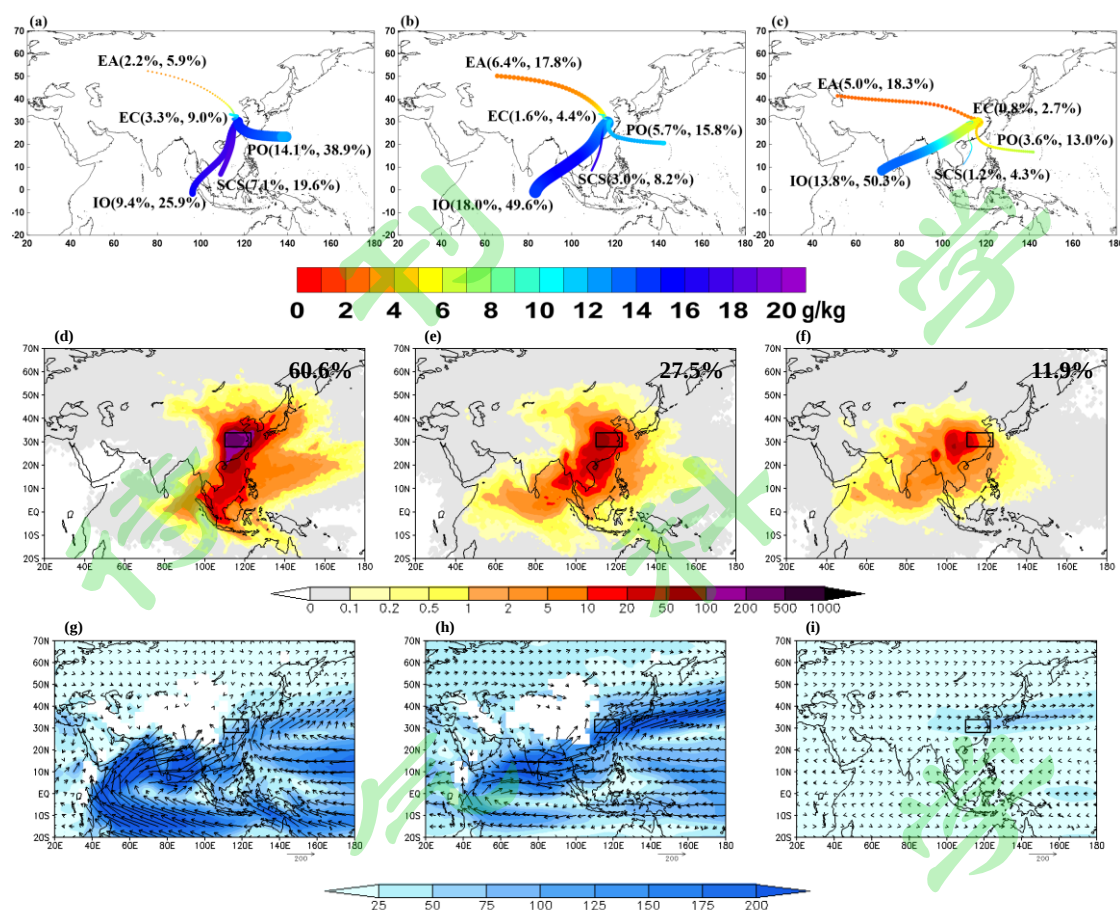


图4 同图2，但为江淮梅雨的结果。

Figure 4. Same as in Figure 2, but for the phase of the monsoon (Meiyu) in the Yangtze-Huaihe River Basin

3.4 华北雨季

华北雨季中，降水集中在华北地区，此时水汽通道进一步向北移动。在对流层低层（图 5a），太平洋通道进一步加强，轨迹占比达到了该层轨迹数量的 45%，有接近一半的轨迹通过太平洋通道进入华北，同时中纬西风通道迅速增强，成为次重要通道，西风通道、南海通道和中国东部局地的轨迹占比分别为 16.2%，14.7%和 14.8%，印度洋通道迅速减弱，轨迹占比仅为 7.3%。对流层中层（图 5b），中纬西风通道迅速增强，成为该雨季最强水汽通道，其轨迹占比达到 38.6%，而印度洋通道的轨迹占比仅为 19.7%；此外，中层太平洋通道的轨迹占比相比前几个雨季则略有加强，其轨迹占比达到 18.6%。而在对流层高层（图 5c），中纬度西风通道轨迹占比进一步提高至 39.3%，为高层最强水汽通道。印度洋的轨迹占

比也提高至 22.1%，我们之前的研究(Shi et al. 2020)也指出在华北雨季，太平洋通道和中纬西风通道为最主要的水汽通道，但中纬西风通道相对比湿较低，因此对华北地区降水影响相对较弱，与本文的结论也是一致的。

同样，我们给出了华北雨季各层水汽源地空间分布的结果（图 5d-5f）。可以看到，低层各源地的水汽贡献之和达到了 71.8%，表明有接近 3/4 的水汽来源于对流层低层，同时，来自高层的水汽仅为 5.1%，是四个雨季中高层水汽贡献最少的。这表明华北雨季中水汽较难输送至较高层次，雨季水汽主要来源于低层局地蒸发与水汽循环。而从各子源地的水汽贡献结果中，可以看到在华北雨季中，中国东部局地低层的水汽贡献达到了 43.1%，中层的水汽贡献为 12.0%，而太平洋低层的贡献为 21.6%，上述三个主要源地的贡献之和超过了 75%，其余层次各源地的贡献率均未超过 5%。因此，华北雨季最重要的水汽源地为中低层的中国东部局地、低层西太平洋源地，其中低层中国东部局地是最为关键的水汽源地，该源地为华北雨季降水贡献了超过 40%的水汽。

而水汽通量的结果表明该雨季低层主要受到太平洋地区水汽输送的影响；此时印度洋季风水汽主要对印度半岛和中南半岛降水产生影响，对华北降水影响相对较弱。在中层（图 5h）由于目标区域的北移，华北雨季除了太平洋和南海外，还受到中纬西风带的重要影响。到了高层，华北地区完全位于水汽通量相对大值区内，西风通道影响最强，但是其比湿仍然很小。

综上所述，由于雨带的整体北移，水汽通道也整体北移，华北雨季中，低层最主要的水汽通道为太平洋通道，中高层为中纬西风通道；从水汽贡献角度，该雨季中最主要的水汽源地为低层中国东部局地，其贡献率超过 40%。

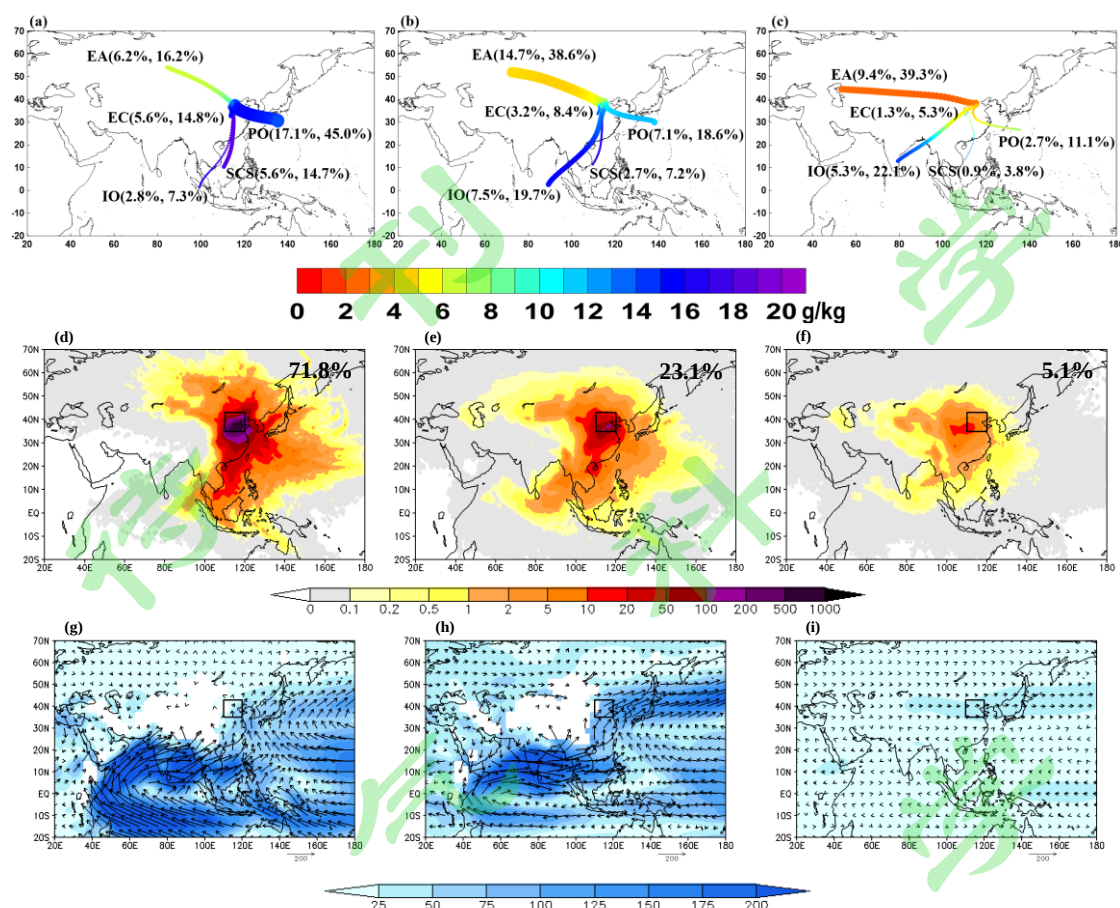


图5 同图2，但为华北雨季的结果。

Figure 5. Same as in Figure 2, but for the terminal stage of the monsoon in North China

综合四个雨季水汽输送通道与不同源地贡献率特征的结果，表1给出了四个雨季，低、中、高三层最重要的水汽通道以及水汽源地。在南海季风爆发前的华南前汛期，关键的水汽通道为低层至中层的太平洋通道以及中层至高层的印度洋通道，其中最强水汽通道为低层的太平洋通道。而在各层次的水汽来源看，低层的西太平洋源地和中国东部局地的水汽贡献均在20%以上，为该雨季最主要的水汽源地。

南海夏季风爆发后，印度洋源地水汽贡献以及印度洋通道轨迹数量均明显加强，特别是对流层中高层。而从水汽源地的特征上，则可以看到低层最主要的水汽源地为中国东部局地和南海地区；从中层起，印度洋源地的贡献明显较大，为该雨季贡献了大量的水汽。

而在江淮梅雨时，低层最主要的通道为西太平洋源地，中高层最主要通道为

印度洋通道而水汽源地的贡献特征中，中国东部局地开始成为最主要的水汽源地，特别是低层，局地水汽贡献率达到了 28.7%。

到了华北雨季，低层最强水汽通道为太平洋通道，中高层最强水汽通道则从印度洋通道变为中纬西风通道。而在水汽来源上，低层中国东部局地的贡献率达到 43.1%，华北雨季中有接近一半的水汽来源于中国东部低层的局地蒸发，表明局地的蒸发对华北雨季降水起到至关重要的作用。

表 1 四个雨季各层关键的水汽通道以及关键水汽源地。水汽通道中括号中的数字表示该通道轨迹数量占比，其中轨迹占比超过 15%的通道用粗体表示。水汽贡献中括号中的数字表示该层次该源地的水汽贡献率，其中贡献率超过 20%的源地用粗体表示。

Table 1. The main moisture transport channels and main moisture sources during four period of East China rainy season. The number in the first three rows show the proportions of trajectories in each level and rainy season, and the proportions more than 15% are marked in bold. The number in last three rows show the CDF for each level and rainy season, the number more than 20% are marked in bold.

雨季		PSC	MSC	YHR	NC
水汽通道	高层	IO (9.2%)	IO (17.7%)	IO (13.8%)	EA (9.4%)
	中层	IO (14.3%) PO (11.0%)	IO (23.4%)	IO (18.0%)	EA (14.7%)
	低层	PO (19.9%)	IO (12.8%) PO (12.0%)	PO (14.1%)	PO (17.1%)
水汽贡献	高层	IO (2.6%)	IO (8.8%)	EC (5.2%)	EC (2.6%)
	中层	SCS (10.8%)	IO (12.7%)	EC (10.5%)	EC (12.0%)
	低层	PO (24.2%) EC (23.1%)	EC (16.8%) SCS (15.3%)	EC (28.7%) PO (18.6%)	EC (43.1%) PO (21.6%)

四、结论

本文将中国东部四个雨季的水汽输送特征分为低层（1500m 以下）、中层（1500m-5000m）和高层（5000m 以上）三个垂直层次，分别对水汽输送过程中的水汽输送通道以及水汽源地贡献进行分析，得到雨带推进过程中的四个雨季的

水汽输送的垂直结构，主要结论如下：

(1) 季风爆发前的华南前汛期，低层最主要水汽通道为太平洋通道，轨迹占比为 52.3%，中高层最主要的水汽通道为印度洋通道，轨迹占比超过 37%；季风爆发后的华南前汛期印度洋通道迅速增强，从低层到高层均为最强水汽通道，在中层其轨迹占比达到了 65.6%。随着雨带北移，印度洋通道强度减弱，西风通道强度增强。华北雨季低层最主要的水汽通道为太平洋水汽通道，轨迹占比达到 45%，中高层最主要的水汽通道为中纬西风通道，轨迹占比超过 38%。总体上，低层最主要的水汽通道为太平洋通道，中高层主要受西风气流影响，在华南前汛期和江淮梅雨，最主要的水汽通道为印度洋通道，而在华北雨季，最主要的水汽通道为中纬度西风通道。

(2) 四个雨季低层水汽总贡献均超过 50%，特别是华北雨季，低层总贡献超过 70%，表明雨季降水的水汽主要来自低层。各雨季中，南海夏季风爆发前的华南前汛期，低层西太平洋源地和中国东部局地为该雨季最主要的源地，水汽贡献率分别为 24.2%和 23.1%；南海夏季风爆发后，印度洋源地的贡献迅速增强，该雨季低层最主要的水汽源地为中国东部源地和南海源地，而中高层最主要的水汽源地为印度洋源地。江淮梅雨和华北雨季中，最主要的源地为中低层的中国东部地区和低层西太平洋地区，特别是华北雨季中，中国东部局地低层的水汽贡献达到了 43.1%，表明低层局地蒸发对华北雨季降水起到至关重要的作用。

参考文献：

Bertò A, Buzzi A, and Zardi D, 2004, Back-tracking water vapour contributing to a precipitation event over Trentino: a case study[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, **13**, 189-200.

Bottyán E, Czuppon G, Kármán K, et al. 2014, Moisture source diagnostic for Hungary based on trajectory analysis and stable isotopic composition of precipitation[C]. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. **16**.

Brubaker K L, Dirmeyer P A, Sudrajat A, et al. 2001, A 36-yr climatological description of the evaporative of warm-season precipitation in the Mississippi

river basin[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2, 537-557.

常越,何金海,刘芸芸,等. 2006. 华南旱、涝年前汛期水汽输送特征的对比分析[J].

高原气象, 25(06):1064-1070. Chang Yue, He Jinhai, Liu Yunyun et al. 2006. Features of Moisture Transport of in Pre-Summer Flood Season of Drought and Flood Years over South China[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25(06):1064-1070.

陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等. 1991, 东亚季风[M]. 气象出版社, 362pp. Chen Longxun, Zhu Qiangeng, Luo Huibang et al. 1991, East Asian Monsoon[M]. China Meteorological Press, 362pp.

陈世训,高绍风,杨裕. 1982, 5-6 月我国南方降水的水汽来源及其异常[C].全国热带夏季风学术会议文集.昆明:云南人民出版社, 97-100. Chen Shixun, Gao Shaofeng, Yang Yu, 1982, The moisture source of the rainy in South China and its anomaly during May and June[C]. Collected Works of National Academic Conference on Tropical Summer Monsoon (in Chinese). Kunming: Yunnan People's Press, 97-100.

Diem J E, Brown D P, 2006, Tropospheric moisture and monsoonal rainfall over the southwestern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111(D16):

Dirmeier P A, Schlosser C A, Brubaker K L. 2009, Precipitation, recycling, and land memory: An integrated analysis[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1): 278-288.

Dominguez F, Kumar P, Liang X, et al., 2006 Impact of atmospheric moisture storage on precipitation recycling[J]. *Journal of Climate*, 19, 1513–1530,

Drumond A, Nieto R, and Gimeno L, 2011, Sources of moisture for China and their variations during drier and wetter conditions in 2000–2004: A Lagrangian approach[J]. *Climate Research*, 50, 215–225.

- Drumond A, Marengo J, Ambrizzi T, et al. 2014, The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18,2577-2598.
- Gimeno L, Drumond A, Nieto R, et al. 2010, On the origin of continental precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(13), L13804.
- He J, Sun C, Liu Y, et al. 2007. Seasonal Transition Features of Large-Scale Moisture Transport in the Asian-Australian Monsoon Region[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(1):1-14.
- 黄荣辉,张振洲,黄刚,等. 1998, 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. *大气科学*, 22(4): 460-469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998, Characteristics of the Water Vapor Transport in East Asian Monsoon Region and Its Difference from that in South Asian Monsoon Region in Summer[J], *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22(4): 460-469.
- 黄荣辉,顾雷,陈际龙,等. 2008, 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. *大气科学*, 04:691-719. Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008, Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the east Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 32(2):691-719
- 蒋兴文,李跃清. 2009, 长江流域地区水汽输送及其对旱涝影响研究综述[J]. *气象科学*,29(01):138-142. Jiang Xingwen, Li Yueqing, 2009, The review of water vapor transportation and its effects on drought and flood over China[J]. *Scientia Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 29(01):138-142.
- 江志红,梁卓然,刘征宇. 2011, 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析 [J]. *大气科学*, 35(2): 361-372. Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al.

2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(2):361-372.
- Li L, Dolman A J, Xu Z. 2016, Atmospheric Moisture Sources, Paths, and the Quantitative Importance to the Eastern Asian Monsoon Region[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 17(2): 637-649.
- 林爱兰,谷德军,郑彬,等. 2014, 广东前汛期暴雨水汽输送异常变化特征[J]. *热带气象学报*, 30(6): 1001-1010. Lin Ailan, Gu De-jun, Zheng Bin, et al. 2014. Anomalous Transport of Water Vapor for Sustained Torrential Rain and Its Variation[J]. *J Trop Meteor* (in Chinese), 30(6):1001-1010.
- NOAA ARL, 2011, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). National Oceanic and Atmospheric Administration, Air Resources Laboratory, <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> [March 5, 2021].
- Perry L B, Konrad C E, Schmidlin T W. 2007, Antecedent upstream air trajectories associated with northwest flow snowfall in the southern Appalachians[J]. *Weather and Forecasting*, 22(2): 334-352.
- 邱金晶,孙照渤. 2013, 夏季索马里越赤道气流垂直结构的变化特征及其与东亚夏季季风活动的关系[J]. *大气科学*, 37(05):1129-1142. Qiu Jinjing, Sun Zhaobo. 2013, Variation Characteristics of the Vertical Structure of the Summer Somali Cross-Equatorial Flow and Its Relationship with East Asia Summer Monsoon Activity[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(5): 1129-1142. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12174
- Salih A A M, Zhang Q, and Tjernström M, 2015, Lagrangian tracing of Sahelian Sudan moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120, 6793–6808.

- 沈如桂,黄更生. 1981, 1980 年夏季热带季风环流与我国南方降水水汽输送关系 [C]. 全国热带夏季风学术会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 116-128. Shen Rugui, Huang gengsheng, 1981, The relationship between Summer tropical monsoon circulation and Water vapor transport of precipitation in South China in 1980[C] Collected Works of National Academic Conference on Tropical Summer Monsoon (in Chinese). Kunming: Yunnan People's Press, 116-128.
- Shi Y, Jiang Z, Liu Z, et al. 2020. A Lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitations in East China in different stages of the East Asian summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 33(3): 977-992.
- Sodemann H, Stohl A. 2009, Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 36(22).
- Stohl A, and 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 Hydrometeorol.*, 5, 656-678.
- Stohl A, and 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 catciunents[J]. *Journal of Hydrometeorol*, 6, 961-984.
- 苏继峰,周韬,朱彬,等. 2010, 2009 年 6 月皖南梅雨暴雨诊断分析和水汽后向轨迹模拟[J]. *气象与环境学报*, 26(3): 34-38. Sun Jifeng, Zhou Tao, Zhu Bin, et al. 2010, Diagnostic analysis on Meiyu rain storm and its simulation based on backward trajectory analysis method during June 2009 in the south of Anhui province[J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 26(3): 34-38.
- Sun B and Wang H, 2014, Moisture sources of semi-arid grassland in China using the Lagrangian Particle Model FLEXPART[J]. *Journal of Climate*, 27, 2457-2474.

Sun B and Wang H, 2015, Analysis of the major atmospheric moisture sources affecting three sub-regions of east China[J]. *International Journal of Climatology*, 35, 2243-2257.

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, 27(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.

孙妍,栾猛,蒋立,等. 2011, 2010 年 7 月吉林省暴雨诊断分析和水汽后向轨迹模拟[J]. 安徽农业科学, 39(28): 17502-17503. Sun Yan, Luan Meng, Jiang Li, et al. 2011, Diagnostic Analysis of Rainstorm and Backward Trajectory Simulation of Water Vapor in Jilin Province in July, 2010[J], *Journal of Anhui Agri. Sci.* 39(28):17502-17503,17513

Tao S Y, Chen L X. 1987, A review of recent research of East Asian summer monsoon in China[M]. *Monsoon Meteorology. Oxford University Press*,60-92.

Wang B, Lin H, Zhang Y, et al. 2004, Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 17, 699-710.

吴凡,阙志萍,龙余良. 2014, 2014 年 5 月中旬江西地区暴雨天气过程水汽输送特征分析[J]. 气象与减灾研究, 37(3):17-22. Wu Fan, Que Zhiping, Long Yuliang, 2014, The Characteristics of Water Vapor Transportation During a Rainstorm Process in Jiangxi Province in May 2014[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (in Chinese), 37(3):17-22.

谢坤,任雪娟. 2008, 华北夏季大气水汽输送特征及其与夏季旱涝的关系[J]. 气象科学, 28(05):5508-5514. Xie Kun, Ren Xuejuan, 2008, *Climatological*

characteristics of atmospheric water vapor transport and its relation with rainfall
over north China in summer[J]. Scientia Meteorologica Sinica(in Chinese).
28(05):5508-5514.

刊

第

卷

科

风

第

十

科

风

刊

十

卷