

江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征^{*}

孙建华^{1,2} 汪汇洁^{1,3,4} 卫 捷¹ 齐琳琳⁴
 SUN Jianhua^{1,2} WANG Huijie^{1,3,4} WEI Jie¹ Qi Linlin⁴

1. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京,100029

2. 中国科学院大学,北京,100049

3. 95968 部队气象台,北京,100097

4. 空军装备研究院航空气象防化研究所,北京,100085

1. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Science, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

3. Meteorological Observatory, Unit 95968, Beijing 100097, China

4. Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085, China

2015-11-06 收稿,2016-04-30 改回.

孙建华,汪汇洁,卫捷,齐琳琳. 2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征. 气象学报, 74(4):542-555

Sun Jianhua, Wang Huijie, Wei Jie, Qi Linlin. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River Valley. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4):542-555

Abstract The HYSPLIT model and NCEP/NCAR reanalysis data were used to analyze the sources and transportation of water vapor and dry air during periods of persistent heavy rainfall events (PHREs) over the Yangtze-Huaihe River Valley (YHRV). Main results are as follows. There are two dry air invasion paths during PHREs to the south of the YHRV. One is the northwesterly path from Mediterranean-European plain, and the other one is northeasterly path from Mongolia plateau. But during PHREs in the north of the YHRV, the dry air invasion path is mainly from the northwesterly path. Dry air is transported to the YHRV through the activities of trough, ridge and jet on the middle-upper troposphere. There are two moisture transportation paths in PHREs to the south of the YHRV. One is the southwesterly path originating from the tropical India Ocean, and the other one is the southerly path originating from Indonesia and the South China Sea. There are three moisture transportation paths during PHREs to the north of the YHRV. Two paths out of the three are similar to those to the south of YHRV during PHREs, and are the major water vapor transport paths. The third path is the southeasterly path from the western Pacific Ocean. During the PHREs of YHRV, the water vapor transport is controlled by the Somali cross-equatorial jet and cross-equatorial flow near the Bay of Bengal and Indonesian archipelago, and affected by the western Pacific subtropical high pressure.

Key words Persistent Heavy Rainfall Events (PHREs), HYSPLIT model, Water vapor source, Water vapor transportation

摘要 采用 HYSPLIT 模式和 NCEP/NCAR 再分析资料,对中国江淮流域持续性暴雨过程(PHREs)的江南型和江北型过程的水汽源地、输送路径以及干空气路径进行分析。主要结果如下:江南型 PHREs 的干空气主要通过 2 条路径进入江淮地区,即源自地中海—欧洲平原的西北路径和来自蒙古高原的东北路径,而江北型 PHREs 干空气主要有 1 条路径,即西北路径。干空气是通过对流层中高层的槽脊活动和急流输送至江淮区域。江南型水汽主要由源自印度半岛以南的热带印度洋的西南路径和来自印度尼西亚与中国南海的偏南路径这 2 条路径输送到江淮流域。江北型的水汽路径有 3 条,前 2 条路径与江南型类似,且为主要水汽来源,还有来自西太平洋的东南路径水汽输送。江淮流域的持续性降雨过程中,来自南方的水汽输

* 资助课题:国家重点基础研究规划项目(2012CB417201)、国家自然科学基金项目(41375053)。

作者简介:孙建华,主要从事中尺度气象学研究。E-mail:sjh@mail.iap.ac.cn.

送主要受索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印度尼西亚群岛附近越赤道气流,以及受西太平洋副热带高压这些系统的影响。

关键词 持续性降雨过程, HYSPLIT 模式, 水汽源地, 水汽输送

中图法分类号 P458

1 引言

中国是世界上暴雨灾害最多的国家之一,持续性暴雨事件 (Persistent Heavy Rainfall Events, PHREs) 降雨量大、持续期长,因而经常引发洪涝灾害,对经济和生命财产造成的损失较大。Kunkel 等(2013)指出,1895—2010 年美国的持续极端降水事件显著增多,同时,中国东部和西北地区以及印度、马来西亚、菲律宾、韩国等亚洲国家的极端降水事件也有所增多(Duan, et al, 2015)。在此气候背景下,PHREs 受到越来越多的中外学者的关注。THORPEX 国际合作计划将提高 2 周以内的中期时间尺度上的高影响天气过程的预报作为其主要目标(Shapiro, et al, 2004)。中国是经常遭受持续性强降雨影响的国家之一,尤其近年来频繁发生的特大洪水均是由 PHREs 引起的,如 1998 和 1999 年的长江流域洪涝(陶诗言等, 2001, 2004; 赵思雄等, 2004),1991、2003 和 2007 年的淮河流域洪涝(丁一汇, 1993; 张庆云等, 2004; 赵思雄等, 2007),2013 年夏季中国四川地区也出现了持续强降水,均造成了严重的洪涝灾害(孙建华等, 2015)。

PHREs 作为一种高影响的强降水事件,其降水强度大、持续时间长且落区稳定,形成此类过程必然需要有充沛且持续稳定的水汽输送和相应的冷空气配合。谢义炳等(1959)和 Murakami(1959)指出,中国夏季降水主要有太平洋南部和印度低压东南部两个水汽源地。之后,有很多研究也针对中国南方降雨的水汽源地进行了分析,都认为孟加拉湾和中国南海的西南风水汽输送是中国夏季强降水发生的重要条件(Tao, et al, 1987; Simmonds, et al, 1999; Ninomiya, et al, 1999; 丁一汇等, 2003; 苗长明等, 2015)。上述有关水汽输送及来源的研究大多基于欧拉方法,而欧拉方法无法定量区分各水汽来源对降水的贡献。江志红等(2013)利用 HYSPLIT 拉格朗日轨迹模式对 1980—2009 年江淮梅雨水汽输送特征进行定量分析,认为梅雨偏多年来自孟加拉

湾—中国南海的水汽输送较多,而梅雨偏少年来自太平洋和印度洋的水汽输送较多。杨浩等(2014)探讨了江淮梅雨和淮北雨季平均水汽来源及源地贡献的相对独立性。陈斌等(2011)通过 FLEXPART 模式对 2007 年 7 月中下旬中国东部极端降水做分析,指出阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中南半岛的缅甸以及中国西南部的川滇地区是极端降水的主要水汽蒸发源区,其中陆地蒸发对水汽贡献相对重要。以上的研究都是针对月、季尺度强降水的水汽输送进行研究,目前还没有从持续性的天气过程出发,对 PHREs 水汽输送的合成特征开展研究。此外,对于冷空气源地和移动路径的分析研究也需要借助于拉格朗日方法。

汪汇洁等(2014)利用中国站点日降水资料对 1981—2011 年中国南方地区区域 PHREs 进行了分类研究,该研究把站点日降水资料插值到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬度网格,将江淮区域 PHREs 定义为:连续不少于 5 d 不小于 10 个格点出现 ≥ 50 mm 的降水,且相邻 2 d 雨带重合率 $C_{RB} \geq 20\%$ (中间允许 1 d 中断)。最后,将非台风影响的江淮区域 (26° — $35^\circ N, 112^\circ$ — $122.5^\circ E$) PHREs 分为江南型(主雨带在长江以南)、江北型(主雨带在长江以北)和沿江型(主雨带在长江沿江地区)。江南型和江北型个例发生时间见表 1,发生位置见图 1。由于沿江型个例环流的共同特征不显著(汪汇洁等, 2014),文中将采用 HYSPLIT 轨迹模式对江淮流域 PHREs 的江南型和江北型的水汽源地、输送路径以及干空气源地展开分析。

2 资料和方法

在对水汽源地和水汽通道的分析中,采用美国 NOAA 空气资源实验室开发的轨迹模式 HYSPLIT V4. 9 (Draxler, et al, 1998),该模式平流和扩散计算采用拉格朗日方法,通常用于跟踪气流所携带粒子的运动轨迹。最终的位置 $P(t + \Delta t)$ 由初始位置 $P(t)$ 和第一猜测位置 $P'(t + \Delta t)$ 插值的平均速

表 1 1981—2010 年江淮区域江南型和江北型持续性强降雨过程

Table 1 The PHREs over the Yangtze-Huai River Basin during the period of 1981–2010

	年份	开始日	结束日
江南型	1989	6月28日	7月4日
	1992	7月3日	7月7日
	2000	6月6日	6月12日
	2006	6月4日	6月8日
	1989	6月28日	7月4日
	2010	6月17日	6月25日
	1997	7月6日	7月12日
	1998	6月12日	6月27日
	1994	6月9日	6月21日
	1991	6月12日	6月16日
江北型	1987	7月2日	7月6日
	1982	7月18日	7月24日
	1983	6月23日	7月1日
	1991	6月29日	7月12日
	2000	6月19日	6月28日
	2002	6月19日	6月23日
	2007	6月30日	7月14日
	1996	6月28日	7月4日

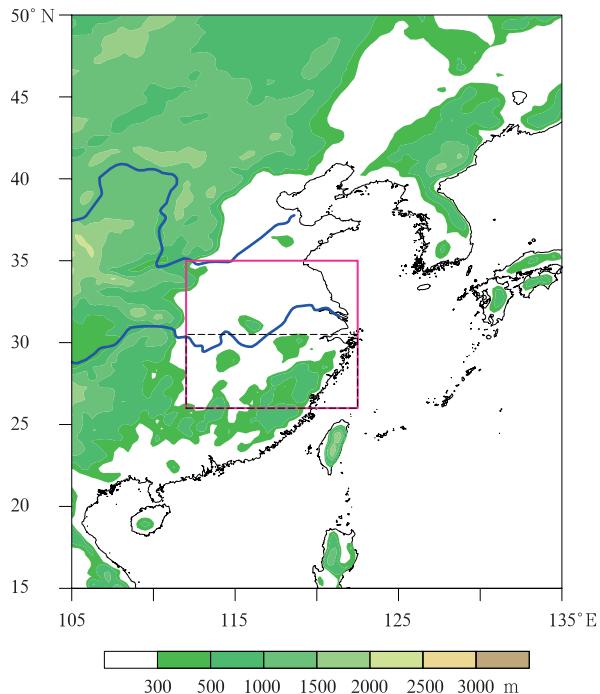


图 1 东亚地形高度分布
(红色框为本文选取的江淮区域,其中的黑线
将江淮流域分成江南和江北部分)

Fig. 1 The distribution of topography (The red rectangle represents the YHRB, and the black dashed line divide it into the northern and southern parts)

率经式(1)和(2)计算得到。

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t \quad (1)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + \frac{V(P, t) + V(P', t + \Delta t)}{2}\Delta t \quad (2)$$

式中, Δt 为时间步长。模式资料采用时间分辨率为 6 h 的 NCEP/NCAR 再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向 18 层。文中的模拟区域选取江淮流域($27.5^\circ - 35^\circ\text{N}, 112.5^\circ - 122.5^\circ\text{E}$)的 $7.5^\circ \times 10^\circ$ 区域, 垂直方向上选取 500、1500 和 3000 m 3 个高度作为模拟的初始高度。在最初的研究中, 曾选取 5000 m 作为模拟的初始高度, 发现 5000 m 高度的模拟结果与 3000 m 的结果相似, 而 500、1500 和 3000 m 3 个高度层的模拟结果可以反映水汽和干空气的输送过程。整个模拟空间的轨迹初始点为 60 个, 模式在每例 PHRE 持续期间每隔 6 h 对 60 个初始点进行为期 10 d 的后向追踪, 并输出逐时的轨迹点位置及相应的物理量场。虽然模拟的起始高度是固定的, 但每一条轨迹都是在拉格朗日空间进行模拟, 其高度是随环流演变的, 即随地点和时间变化的。由于轨迹很多, 文中给出的分析图是某一类轨迹(相似路径的轨迹)的聚类结果, 反映的是聚类后每一类轨迹的平均结果。

由于模拟输出的轨迹数量巨大, 为更直观地分析轨迹分布特征, 文中还按照轨迹路径最接近的原则对多条轨迹进行聚类, 即先定义每个聚类簇的空间方差为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和, 并将每条轨迹视为一簇, 算出所有可能组合的两个簇的空间方差, 任选两个簇合并为一个新簇, 以使得合并后所有簇的空间方差之和(Total spatial variance, TSV)比合并前增加最小, 一直进行到所有轨迹合并为一个簇。开始 TSV 迅速增长, 然后增长缓慢, 但当分成一定数量的簇后再进一步合并时, TSV 又迅速增大, 说明此时将要合并的两个簇已经很不相似。将 TSV 即将再次迅速增大的点作为聚类运算的结束点, 此时分出的各个簇即为聚类得到的最终簇, 再结合天气形势对最终簇进行机理分析。文中的所有个例通过 TSV 分析得到的聚类簇一般为 4 簇, 个别个例为 3 或 5 簇。本研究针对江淮流

域江南型和江北型 PHREs 各 9 例(表 1),按照以上介绍的方法进行轨迹分布模拟,然后分别对江南型和江北型的 9 例的模拟轨迹进行聚类,利用轨迹的模拟和聚类结果分析两类个例的水汽源地、输送路径和干空气路径的异同。此外,为了分析不同通道的水汽贡献大小,还引入通道水汽贡献率 Q_{all} 对水汽贡献进行度量。

$$Q_{\text{all}} = \left(\sum_1^m \sum_{i=1}^{240} q_i / \sum_1^n \sum_{i=1}^{240} q_i \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, q_i 为气团在模拟各时次的比湿, m 为该簇中所含的轨迹条数, n 为轨迹总数。陈斌等(2011)的研究认为源于热带和副热带低纬度地区的气块在到达降水区域之前,经历了多次的降水和蒸发过程,其中,阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中南半岛的缅甸以及中国西南部的川、滇等地区都是水汽的蒸发源区,上述所有源区为极端降水事件贡献了约 80% 的水汽。由于水汽在输送的过程中有凝结和蒸发过程,而江志红等(2011, 2013)定义的源地水汽贡献率无法考虑输送过程的变化,所以文中定义了通道水汽贡献率 Q_{all} , 该定义是在整个输送路径上每条轨迹在每个时间步长的比湿变化的积分。

此外,由于聚类的各条轨迹所对应的个例持续时间长短不一,在研究中引入归一化时间的概念,即将子簇中各条轨迹到达江淮区域的时刻与相应事件的起始时刻相减,求得该轨迹相对事件起始时刻的滞后时长,再除以整个事件的持续时长,从而得到该轨迹在到达江淮区域时相对于整个事件的归一化时间。这一参量的引入,消除了个例持续时长不一的问题,便于对不同个例和不同子簇进行横向比较。在图 7 和 11 的分析中用的是归一化时间。

3 江南型和江北型 PHREs 的合成环流特征

江南型 9 个 PHREs 的合成环流图(图 2)上清楚地显示了该类型个例的主要环流特征。对流层高层 200 hPa 上(图 2a), 在中纬度(40° — 60° N)从北大西洋东部(不列颠群岛)的脊开始, 向东为地中海上空的槽、高加索山至里海附近的脊、伊朗高原至巴尔喀什湖上空的槽、青藏高原至贝加尔湖上空的脊, 江淮流域至日本海附近的槽, 相对气候态, 对应这些

槽、脊分别为高度场的负距平和正距平, 表明槽脊较活跃。500 hPa 合成天气图(图 2b)中的槽脊分布也与 200 hPa 类似(图 2a), 通过与多年气候平均西太平洋副热带高压 5880 gpm 等值线的比较(图 2b), PHREs 发生期间西太平洋副热带高压西段位于中国南海, 位置比气候平均偏南偏西, 其范围比气候平均的范围偏大, 强度偏强。沿西太平洋副热带高压西北侧边缘的中国华南—江南地区的对流活动异常活跃, 江南区域为射出长波辐射负距平中心(图 2b); 与之相反, 长江以北区域、中国南海及热带西太平洋地区射出长波辐射为显著正异常, 对应印度洋至中南半岛附近热带对流相对活跃且稳定(MJO 处于 1—3 位相)。低层西太平洋副热带高压也比气候平均的范围大, 强度强(图 2c), 而南半球马斯克林高压增强使得东非沿岸的越赤道气流增强(图略), 可使江南地区降雨增强(薛峰等, 2003; Xue, et al., 2004)。

江北型 9 个个例的合成环流在对流层高层 200 hPa(图 3a)和中层 500 hPa(图 3b), 高纬度分别在乌拉尔山至喀拉海、中国东北至西伯利亚东岸为高脊, 贝加尔湖为宽广的浅槽, 高空急流和中纬度气流平直使得干空气只能到达江淮流域的北部, 不利于干空气南下至长江以南。500 hPa 上西太平洋副热带高压异常偏西, 其西段比气候态偏西约 15 个经度, 控制中国华南和南海中北部区域。虽然江南型和江北型 PHREs 的西太平洋副热带高压都异常偏西, 且西伸脊点均位于 112° E 附近, 但江南型的西太平洋副热带高压脊线大约位于 18° N(图 2b), 而江北型 PHREs 的西太平洋副热带高压脊线大致位于 23° N(图 3b), 比江南型偏北约 5 个纬度。西太平洋副热带高压的北抬, 与印缅槽前的西南气流(图 3b)相配合, 使得西太平洋副热带高压西侧的西南气流增强, 来自孟加拉湾和中国南海的水汽得以到达江淮区域的北部, 并在梅雨锋系统的影响下, 使得长江以北的对流显著发展, 形成持续性降雨过程。与江南型相反, 江北型个例发生时, 赤道印度洋中东部的对流受到抑制, 印度尼西亚群岛至太平洋中西部有东传加强的热带对流活动(图 3b), MJO 处于 4—7 位相。

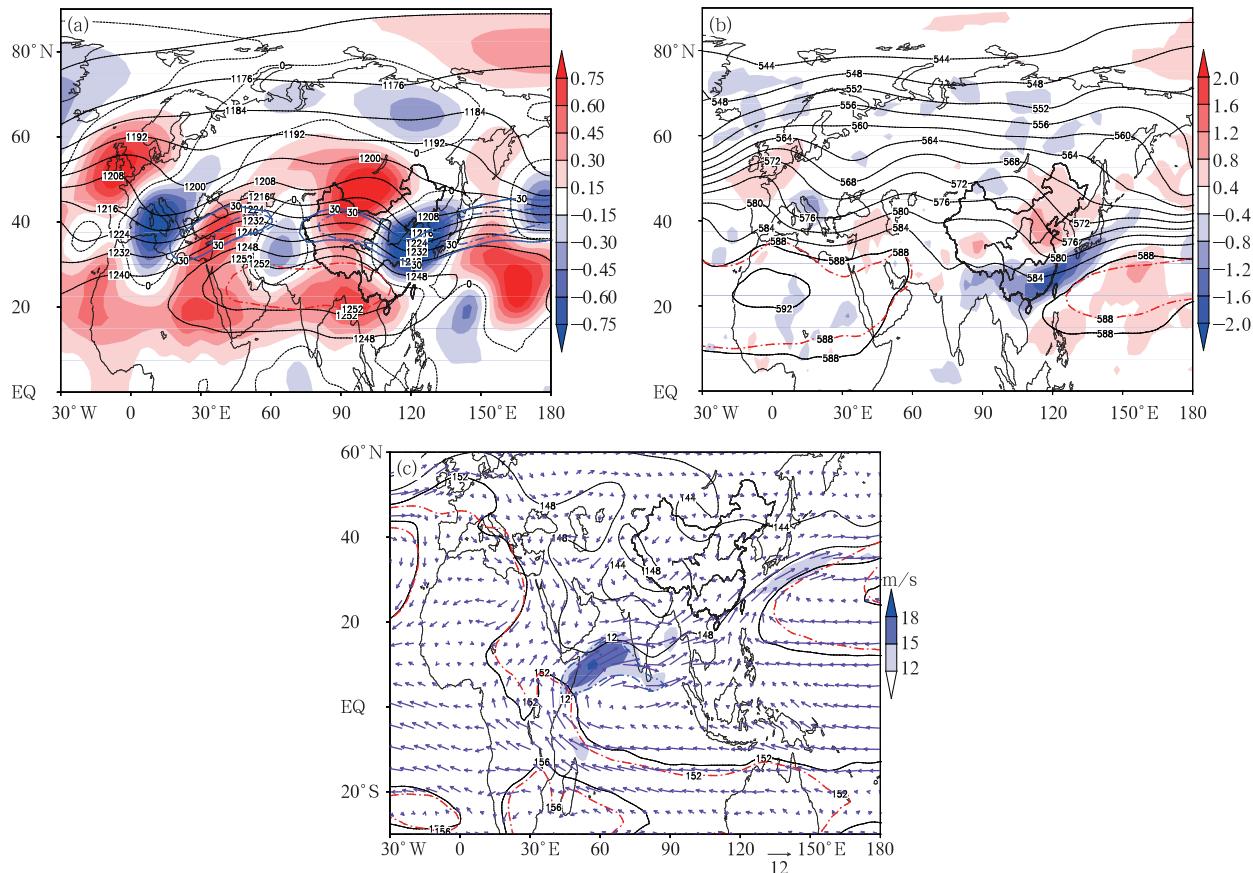


图2 江南型个例的合成天气图 (a. 200 hPa 的位势高度场, 黑色细实线,dagpm, 黑色粗实线为 1252 和 1256 dagpm 等值线, 红色点虚线为 1981—2010 年多年平均的 1252 和 1256 dagpm 等值线; 及其距平(阴影区, 黑色点线为距平 0 线); 水平风速 ≥ 30 m/s 的高空急流区(蓝色实线, 蓝色点虚线为 1981—2010 年多年平均的 30 m/s 等值线); b. 500 hPa 的位势高度场(黑色细实线,dagpm; 红色点虚线为 1981—2010 年多年平均的 588 dagpm 等值线), 射出长波辐射标准化距平场(阴影区); c. 850 hPa 的位势高度场(黑色细实线,dagpm; 黑色粗实线, 152 和 156 dagpm; 红色点虚线为 1981—2010 年多年平均的 152 和 156 dagpm); 风场(蓝色箭头, m/s, 蓝色点虚线为 1981—2010 年多年平均的 12 m/s 等值线, 阴影区风速不小于 12 m/s)

Fig. 2 Composite weather patterns for PHREs in the southern Yangtze-Huaihe River Valley (a) 200 hPa: geopotential height (black solid lines, unit: dagpm; bold black solid lines are isolines of 1252 and 1256 dagpm) and its anomaly (shaded; the black dotted lines are zero lines), and high level jet with wind speed ≥ 30 m/s (blue lines; the blue dotted lines show the mean of 1981–2010); (b) 500 hPa: geopotential height (black solid lines, unit: dagpm; red lines are isolines of 588 and 592 dagpm; blue dotted line are isolines of mean 588 dagpm during 1981–2010), and anomalies of OLR (shaded, W/m^2); (c) 850 hPa: geopotential height (black solid lines, dagpm; the bold black solid line is isoline of 152 dagpm; shaded: $V \geq 12$ m/s; the red dotted line is the isoline of mean 152 dagpm during 1981–2010); blue arrows: wind vectors, m/s. The blue dotted dash lines are isolines of the mean 12 m/s during 1981–2010

通过以上分析表明,江南型和江北型个例环流特征的主要差异包括:江南型个例发生时 MJO 活动多位于 1—3 位相,印度洋至中南半岛附近热带对流相对活跃且稳定;江北型发生时 MJO 一般位于 4—7 位相,对应印度尼西亚群岛至太平洋中西部有

东传增强的热带对流活动。江南型在对流层中高层的中高纬度地区呈现显著的纬向波列,该波列的活动影响高度场上的槽脊位置和强度的异常,青藏高原至贝加尔湖上空为脊,江淮流域至日本海附近是槽。南亚高压和西太平洋副热带高压均明显偏强,

西太平洋副热带高压位置偏南偏西。而江北型在高纬度分别在乌拉尔山至喀拉海、中国东北至西伯利亚东岸为高脊,贝加尔湖为宽广的低槽,高空急流和中纬度气流平直有利于干空气南下到江淮地区,副

热带地区南亚高压和西太平洋副热带高压相向而行,使得西南暖湿气流得以北上与干空气交汇于长江以北地区。

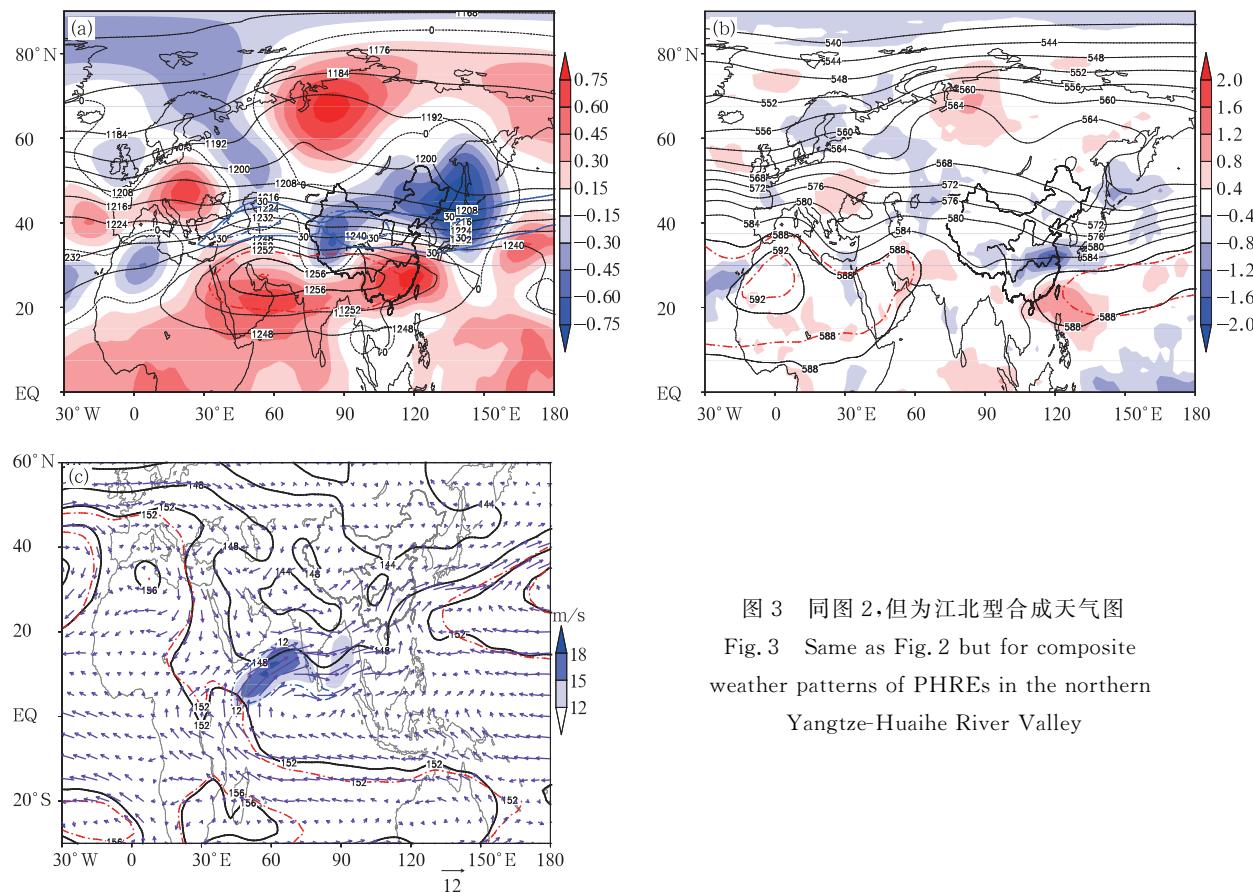


图 3 同图 2,但为江北型合成天气图

Fig. 3 Same as Fig. 2 but for composite weather patterns of PHREs in the northern Yangtze-Huaihe River Valley

4 江南型和江北型 PHREs 的水汽源地和输送路径

4.1 江南型 PHREs 的水汽源地和输送路径

从 9 例江南型 PHREs 的聚类轨迹分布(图 4a, 表 2)可见其空气质点运动的共同特征:在南北方向各有两条主要轨迹,它们分别是源自印度半岛以南热带印度洋的西南路径轨迹簇(CT-A-SW)、来自印度尼西亚和中国南海的偏南路径轨迹簇(CT-A-SS),以及来自地中海—欧洲平原的西北路径轨迹簇(CT-A-NW)和来自蒙古高原的东北路径轨迹簇(CT-A-NE)。从 4 条轨迹的空间分布可见,偏西路经的轨迹高度和质点起始高度均比来自偏东路径的高(图 4b),相应的水汽含量也偏低(图 4c);而来自偏东路径的轨迹水平移动距离相对偏西路经的短,

位温相对守恒(图 4d),说明气团的热力性质相对稳定。

CT-A-NW 中的空气质点大多起源于对流层中层 500—600 hPa(图 4b),受西风气流的影响,质点以近似纬向的轨迹移动,在 -4—-3 天到达贝加尔湖地区,并在此转向东南移动,移动过程中高度逐渐下降,在大约 -2 天时从蒙古高原南部进入中国。当质点高度下降至 600 hPa 以下,比湿由 2 g/kg 逐渐升高,当质点到达江淮区域 750 hPa 上空时,比湿进一步上升至 5 g/kg。由于气团的比湿上升过程对应位温逐渐降低,说明可能存在非绝热冷却过程,同时局地的上升运动把低层的水汽带到中层,造成了湿度的升高(图 4c,d)。西北路径的位温先升后降,不守恒,形成的原因可能主要与地形的影响有关,位温升高发生在位于欧洲平原与阿尔泰、天山山

脉交界处附近,地形的强迫抬升,使得气块出现非绝热加热,而当气块越过黄土高原—太行山区后,由于地形高度的下降,下沉运动伴有明显的非绝热冷却,位温降低。该路径的通道水汽贡献率仅为 7.1%,明显低于合成的另 3 条路径(表 2)。为了更详细地了解西北路径空气的来源,对合成前 CT-A-NW 中的轨迹展开分析(图略),发现其中空气质点的源地最远可追溯至北大西洋西部约 300 hPa 高空,最北可追溯至格陵兰岛中低空,最南则可至青藏高原南侧,主要的源地有 3 个:北大西洋及北美洲、北大西洋东岸和地中海区域。其中以源自北大西洋东岸上空的轨迹数目最多,占轨迹簇 CT-A-NW 轨迹数目的 74.4%,因而其特征与 CT-A-NW 的合成特征基本一致,此外,该簇轨迹中有一部分轨迹可与源自北大西洋及北美洲的空气质点轨迹在 -7—0 天部分

重合,这从另一个侧面反映出 PHREs 发生期间欧亚中高纬度的稳定环流形势的影响,空气质点自江南型事件发生前 10 天起从北大西洋及其下游地区一路东传至江淮区域。来自轨迹簇 CT-A-NE(图 4)中的空气质点大多发源于蒙古高原 800—700 hPa 低空,先向东移动,在 -7 天前后沿蒙古高原东麓向南经渤海和山东半岛到达江淮区域 1000—1500 m 低空,轨迹运动过程中高度变化不显著。质点在 -5 天前后到达渤海上空,在经过充沛水汽的洋面后,比湿升高大约 2 g/kg。该轨迹簇的输送高度主要集中于 2000 m 附近,蒙古高原上空水汽较少,但经过渤海和黄海上空后,水汽增长显著,因而通道水汽贡献率仍可达 20.9%,远大于 CT-A-NW 的 7.1% 通道水汽贡献率,可见渤海和黄海区域也是江南型 PHREs 的重要水汽源地之一。

表 2 江南型 PHREs 的轨迹聚类

Table 2 Trajectory clusters of PHREs in the southern YHRV

子簇名	轨迹条数	-10 天源点位置和高度		0 天各高度轨迹条数			通道水汽贡献率(%)
		位置	高度(m)	500 m	1500 m	3000 m	
CT-A-NW	360	北大西洋/北美	5000—7000	56	131	173	7.1
CT-A-NE	288	西伯利亚/蒙古高原/ 鄂霍次克海/日本群岛	≤5000	156	90	42	20.9
CT-A-SW-1	140	南印度洋东部	≤1500	21	67	52	15.0
CT-A-SW-2	130	南印度洋	≤2000	0	35	95	12.2
CT-A-SS-1	108	菲律宾群岛	≤2000	55	43	10	15.0
CT-A-SS-2	188	苏门答腊岛	≤2000	106	58	24	15.9
CT-A-SS-3	50	赤道西太平洋	≤2000	27	15	8	13.9

CT-A-SW 合成后的轨迹簇可追溯至水汽充沛的热带印度洋洋面,源区空气质点高度均在 900 hPa 以下,比湿在 10—15 g/kg。然而质点在 -5 天前后到达中南半岛北部,随着地形高度的升高,质点的比湿逐渐降低,位温逐渐升高。说明在输送过程中空气质点受地形抬升产生凝结,并释放出潜热,因而,其通道水汽贡献率只有 27.2%。虽然聚类轨迹与赤道相交于 70°—80°E,但通过查看合成前的两股子簇可以看到,该聚类轨迹分别对应了 90°E 附近孟加拉湾西部的低空越赤道气流(子簇 CT-A-SW-1, 图 5a)和 45°—60°E 附近的东非/索马里越赤道急流(子簇 CT-A-SW-2, 图 5b),两股子簇均发源于南印度洋,受地转偏向力作用均在越过赤道后发生顺时针偏转,于 -4 天前后在中南半岛汇合,再经青藏高原南侧后转为西南路径到达江淮区域。从 850 hPa 的合成风场(图 2c)中也可以看到这两支越赤道气

流,其中索马里越赤道急流不仅强度和输送高度均明显大于 90°E 的另一支。输送途中 CT-A-SW-2 子簇中的气团在 -3—4 天时受中南半岛北部地形抬升至 850—700 hPa,由于凝结降水导致水汽减少,而 CT-A-SW-1 中的气团从中南半岛东南部地势相对较低处经过,直至江淮区域上空才出现抬升,两支子簇到达江淮区域的高度均为 850—700 hPa,其比湿维持在 10 g/kg 附近。

CT-A-SS 源于 950 hPa 附近的印度尼西亚群岛(图 4a),一路北上到达江淮区域,对应 105°E 附近的低空越赤道气流(图 2c),其源地空气质点的初始高度比 CT-A-SW 中的更低,水汽含量更高,在输送途中位温基本守恒,在 -2 天到达华南之前都位于热带洋面或中国南海,有利于将充沛的水汽向江淮区域输送。3 股子簇的源地略有差别,其中 CT-A-SS-1 多起源于菲律宾群岛附近(图 6a),CT-A-SS-2

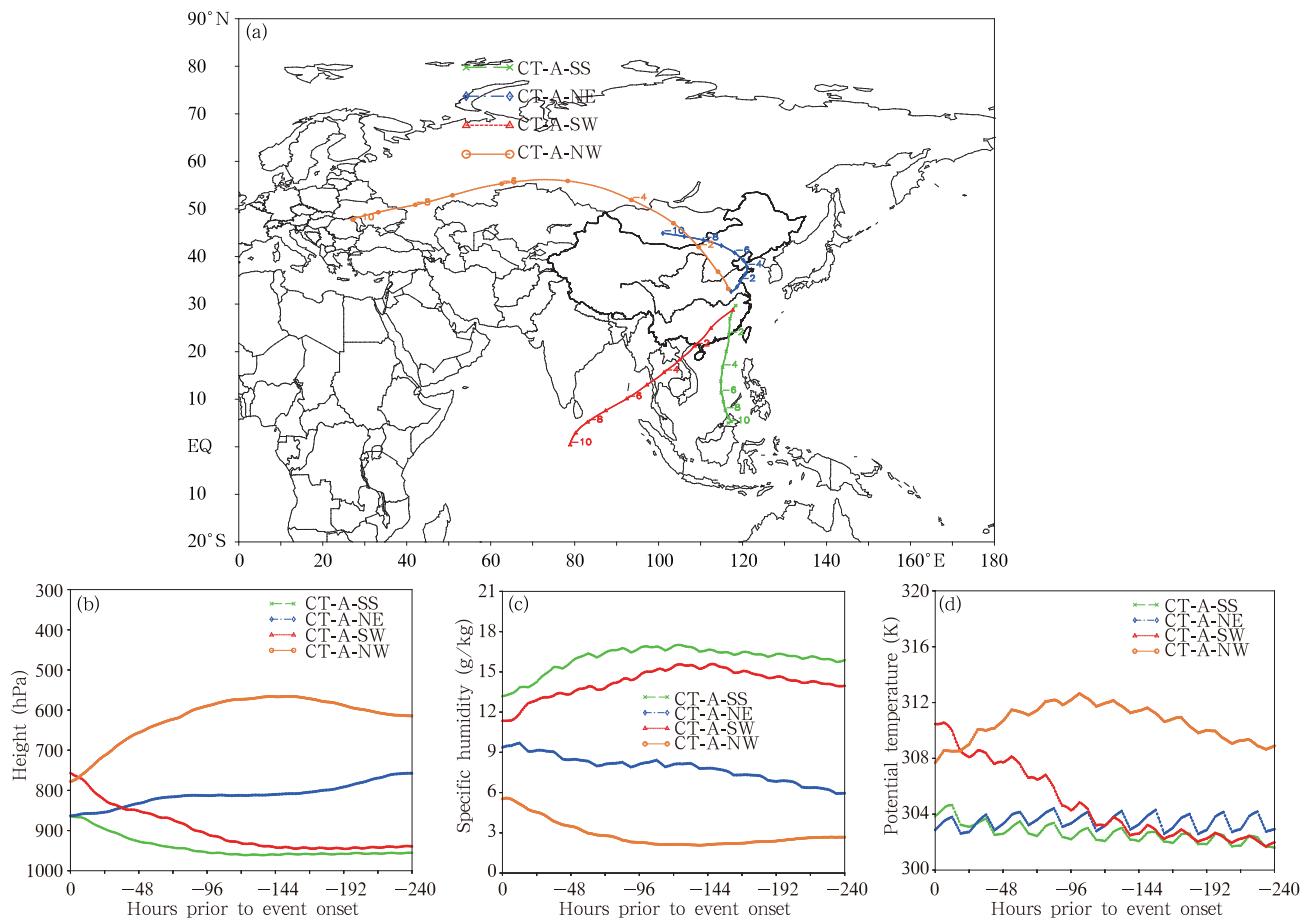


图4 江南型 PHREs 的聚类轨迹

(a. 水平分布, b. 垂直分布, c. 比湿分布(单位:g/kg),d. 位温分布(单位:K))

Fig. 4 Trajectory clusters of PHREs in the southern YHRV (a. horizontal distribution, b. vertical distribution, c. specific humidity (unit: g/kg), d. potential temperature (unit: K))

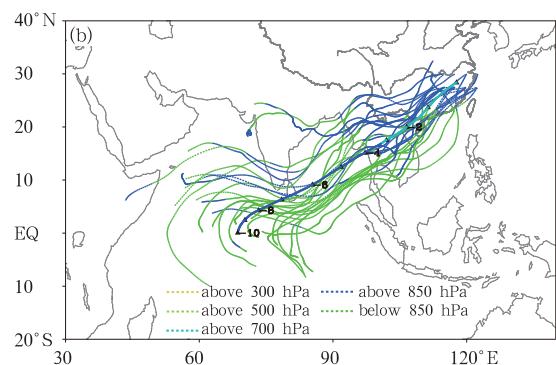
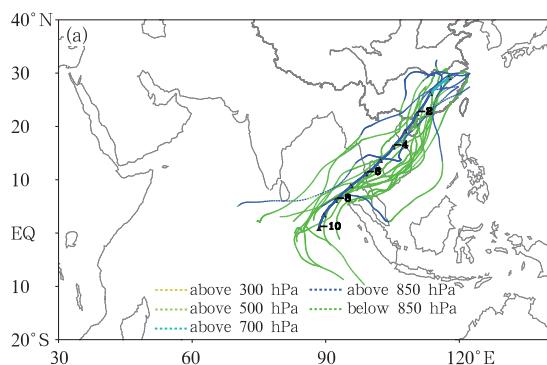


图5 CT-A-SW 的两个子簇中的轨迹

(a. CT-A-SW-1, b. CT-A-SW-2)

Fig. 5 Trajectories of two sub-clusters in CT-A-SW (a. CT-A-SW-1, b. CT-A-SW-2)

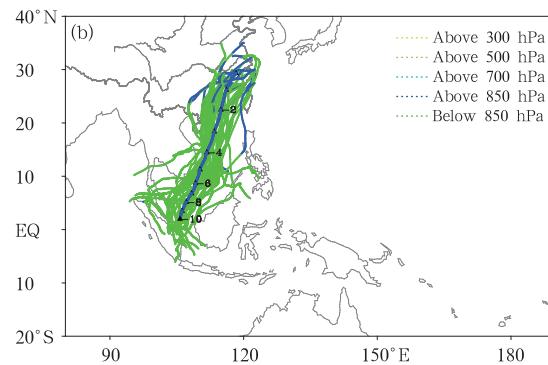
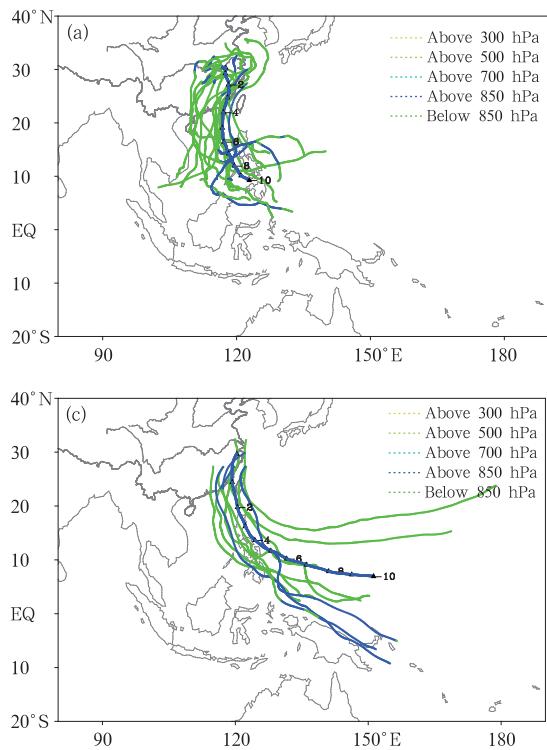


图 6 CT-A-SS 的 3 个子簇中的轨迹
 (a) CT-A-SS-1, (b) CT-A-SS-2, (c) CT-A-SS-3

Fig. 6 Trajectories of three sub-clusters in CT-A-SS
 (a) CT-A-SS-1, b. CT-A-SS-2, c. CT-A-SS-3

多起源于苏门答腊地区(图 6b),源地较之 CT-A-SS-1 略偏西南,二者的空气质点以经向输送为主,而 CT-A-SS-3 以纬向输送为主(图 6c),空气质点多发源于赤道西太平洋,受低层西太平洋副热带高压南侧偏东气流的影响,先向西移动并于 -4 天到达菲律宾上空,随后受西太平洋副热带高压西侧偏北气流的影响转向北输送。此外,通过 CT-A-SS 和 CT-A-SW 中各条子簇到达江淮区域时相对于整个事件的归一化时间对比(图 7),可以看出在事件发生的前期以西南路径的水汽输送为主,而在事件发生中后期主要以偏南路径的水汽输送为主。

根据以上的分析,在江南型 PHREs 发生前期,通过拉格朗日轨迹追踪表明,源自北大西洋及其东岸的对流层中高层的气团在西风带中随槽脊系统的运动,将干空气输送至江淮区域。同时西伯利亚地区对流层中高层的阻塞形势及东北亚地区的低槽也为 PHREs 的发生提供小股干空气和部分水汽,并经渤海—黄海区域得到水汽补充,然后输送至江淮区域。热带地区,尤其是赤道印度洋至热带海洋性大陆区域为 PHREs 提供了充沛的水汽,水汽通过对流层低层的越赤道气流、季风低压和西太平洋副热带高压西侧的东南气流源源不断地向江淮区域输送。偏北气流的通道水汽贡献率为 28.0%,西南和

偏南气流通道的水汽贡献率分别为 27.2% 和 44.8%,即热带海洋性大陆是江南型 PHREs 的最大水汽来源。

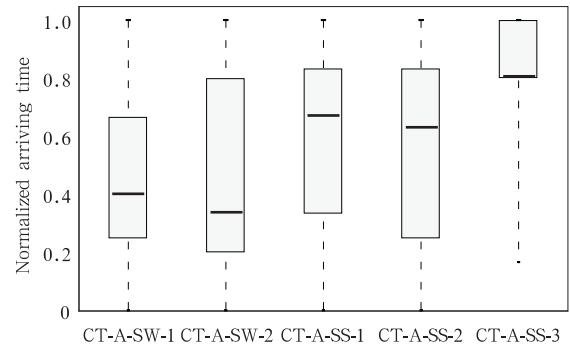


图 7 江南型 PHREs 的聚类轨迹分析中偏南各子簇到达江淮区域的归一化时间分布特征

Fig. 7 The normalized arriving time of sub-clusters from southern areas in cluster analysis for PHREs in the southern YHRV

4.2 江北型 PHREs 的水汽源地和输送路径

从 9 例江北型 PHREs 的聚类轨迹分布(图 8a,表 3)可见,其空气质点运动的共同特征与江南型 PHREs 的两条干空气路径显著不同,江北型 PHREs 只有一条来自北方的干空气路径,即来自地中海—欧洲平原的西北路径轨迹簇(CT-B-NW),而

南方的水汽路径除了源自热带印度洋的西南路径轨迹簇(CT-B-SW)和源自印度尼西亚—中国南海的偏南路径轨迹簇(CT-B-SS)外,比江南型PHREs还多出一条来自西太平洋的东南路径轨迹簇(CT-B-SE),虽然江南型中也出现来自西太平洋的子簇CT-A-SS-3(表3),但该子簇仅占江南型所有轨迹数

目的3.96%,而CT-B-SE在江北型所有轨迹中占比达10.5%。从江北型4条轨迹的空间分布(图8a-d)可见,西北路径的轨迹高度最高,路径最长,水汽含量最低,而来自南方的3条轨迹簇均源于925—800 hPa的洋面上空,水汽含量始终维持在10—15 g/kg,其中CT-B-SE中空气质点相对其余

表3 江北型PHREs的轨迹聚类

Table 3 Trajectory clusters of PHREs in the northern YHRV

子簇名	轨迹条数	-10天源点位置和高度		0天各高度轨迹条数			通道水汽贡献率(%)
		位置	高度(m)	500 m	1500 m	3000 m	
CT-B-NW	146	地中海/欧洲/巴尔喀什湖	2000—8000	14	43	89	8.6
CT-B-SW-1	350	赤道中西印度洋	≤1500	21	140	189	14.2
CT-B-SW-2	294	南印度洋东部	≤2000	97	127	70	17.3
CT-B-SS-1	214	印度尼西亚群岛	≤2000	150	48	16	17.6
CT-B-SS-2	77	中国南海	≤2000	46	21	10	17.7
CT-B-SE-1	139	赤道中西太平洋	1500—5000	57	36	46	13.1
CT-B-SE-2	100	华东局地	≤5000	55	26	19	11.5

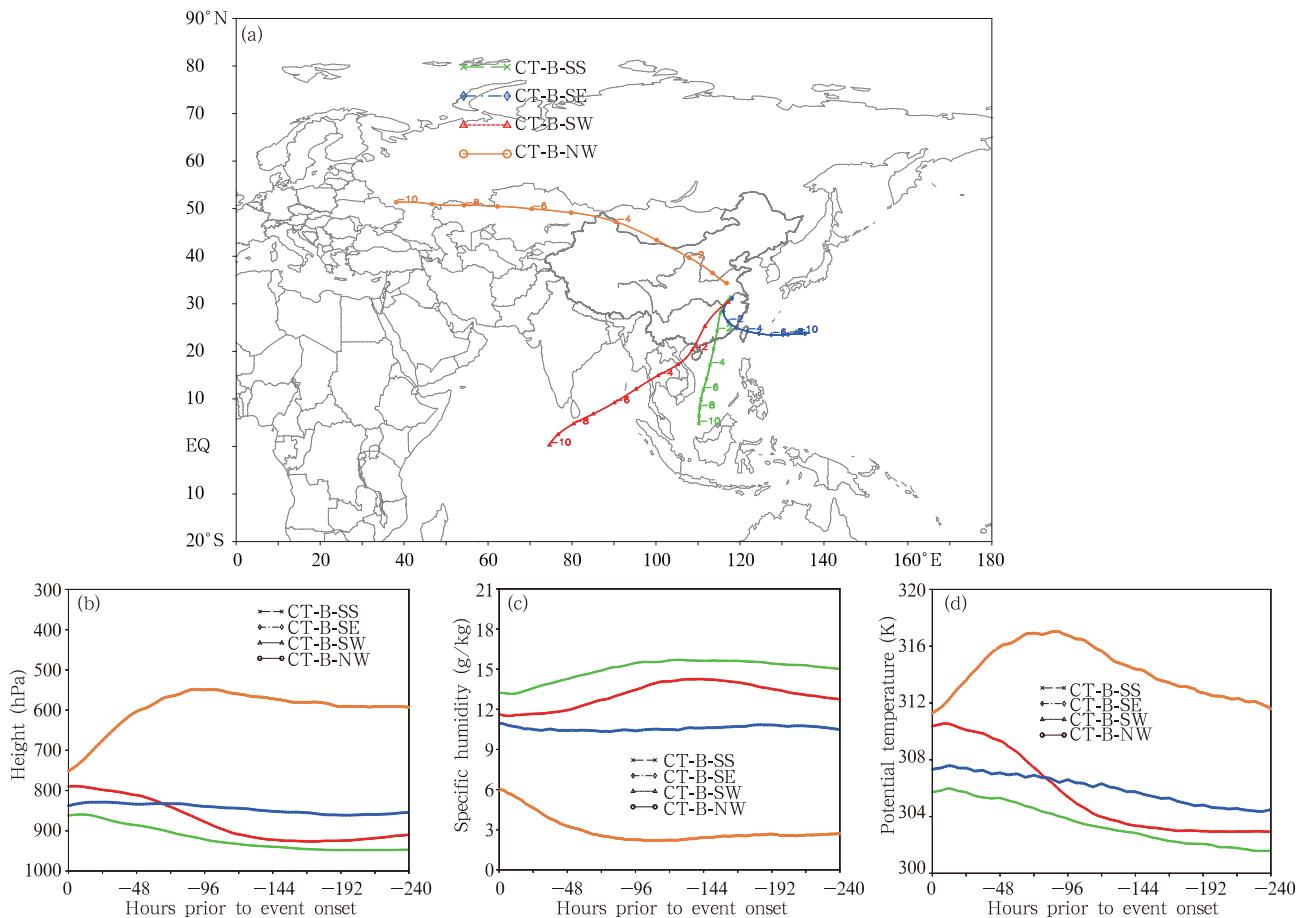


图8 江北型PHREs的聚类轨迹(a. 水平分布, b. 垂直分布, c. 比湿分布, d. 位温分布)

Fig. 8 Trajectory clusters of PHREs in the northern YHRV: (a) horizontal distribution, (b) vertical distribution, (c) specific humidity, (d) potential temperature

两簇起始高度略高,水汽含量略低,而与江南型类似的是,西南路径(CT-B-SW)比偏南路径(CT-B-SS)中质点高度略高,水汽含量略低。CT-B-SS 和 CT-B-SE 轨迹簇中空气质点的位温变化相对较小,说明这两条路径的气团热力性质相对稳定。

CT-B-NW 中的空气质点大多起源于对流层中层 600—500 hPa,水汽含量低。受对流层中层西风气流的引导,质点以近似纬向的轨迹移动,在 -4—-3 天到达蒙古高原并转向东南移动,移动过程中高度逐渐下降,在大约 -2 天时经河套到达江淮北部。当质点高度下降至 600 hPa 以下时,比湿开始逐渐升高,当质点到达江淮区域 800—700 hPa 上空时,比湿进一步上升至 6 g/kg。由于气团的比湿上升过程对应位温逐渐降低,说明可能存在非绝热冷却过程,同时局地的上升运动把低层的水汽带到中层,造成了湿度的升高。该路径的通道水汽贡献率仅为 8.6%,明显低于另 3 条路径。与江南型 PHREs 的西北路径干空气输送相比,江北型干空气的源地略近,层次稍低。

来自轨迹簇 CT-B-SW(图 8)中的空气质点大多起源于赤道印度洋 900 hPa 低空,比湿可达 11—14 g/kg。然而质点在 -4 天前后到达中南半岛中部,空气质点受地形抬升产生凝结,并释放出潜热,使得位温升高,伴随湿度降低,通道水汽贡献率为 31.5%(表 3)。虽然聚类的 CT-B-SW 轨迹与赤道相交于 70°—80°E,但通过分析合成前的两股子簇(图 9),发现该轨迹分别对应了 45°—60°E 附近的东非/索马里越赤道急流(子簇 CT-B-SW-1)和 90°E 附近孟加拉湾南部的低空越赤道气流(子簇 CT-B-SW-2)。虽然两股子簇均发源于赤道南印度洋,均

于 -4 天前后在中南半岛汇合后经青藏高原南侧向北到达江淮区域,但 CT-B-SW-1 在 -4 天到达中南半岛时就出现抬升,而 CT-B-SW-2 直至 -2 天到达青藏高原/云贵高原南侧才出现抬升。从 850 hPa 合成风场(图 3c)上也可以看到这两支越赤道气流,其中索马里越赤道急流与气候同期相比略有减弱,而 90°E 附近的越赤道气流比气候态稍强。这两支越赤道气流的强度与江南型 PHREs 的情况相反,可能与南半球中纬度马斯克林高压偏弱有关。

轨迹簇 CT-B-SS 源于 950 hPa 附近的印度尼西亚群岛(图 10),一路北上到达江淮区域,对应 105°E 附近的低空越赤道气流(图 3c),该轨迹簇的轨迹高度最低,在 950—850 hPa,水汽含量最充沛,在 13—15 g/kg,输送途中位温变化较小。该轨迹簇在 -2 天到达华南之前都位于热带洋面或中国南海,有利于将充沛的水汽向江淮区域输送。两股子簇的源地略有差别,其中 CT-B-SS-1 多起源于赤道附近的印度尼西亚群岛(图 10a),CT-B-SS-2 多起源于中国南海海域(图 10b),源地较之 CT-B-SS-1 略偏北,该聚类簇的通道水汽贡献率为 35.3%,两支子簇的通道水汽贡献率基本相当(表 3)。

来自轨迹簇 CT-B-SE(图 10)中的空气质点大多源于西太平洋 850 hPa 低空(图 10c、d),输送过程中位温相对守恒,比湿也始终维持在 10—11 g/kg。该路径中包含了两支存在显著差异的子簇,其中子簇 CT-B-SE-1 的特征(图 10c)与 CT-B-SE 基本一致,受控制华南区域的西太平洋副热带高压(图 3b、c)影响,气团先沿西太平洋副热带高压南侧向西运动,在其西侧转为经向运动,并于 -2 天前后到达广东—福建一带。一方面受到 MJO 活跃位相处于

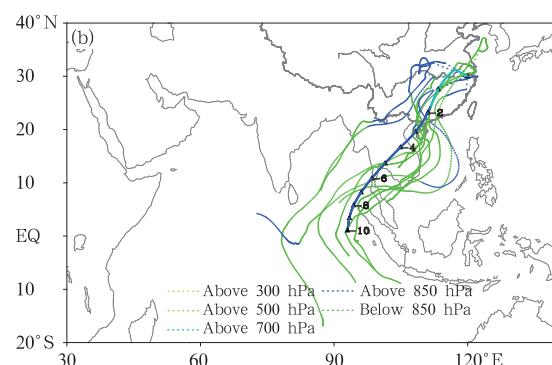
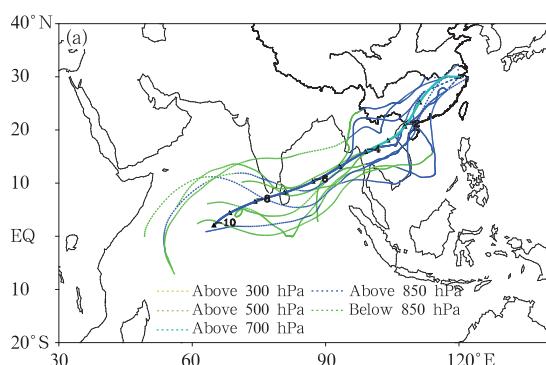


图 9 CT-B-SW 的两个子簇中的轨迹 (a. CT-B-SW-1, b. CT-B-SW-2)

Fig. 9 Trajectories of two sub-clusters in CT-B-SW (a. CT-B-SW-1, b. CT-B-SW-2)

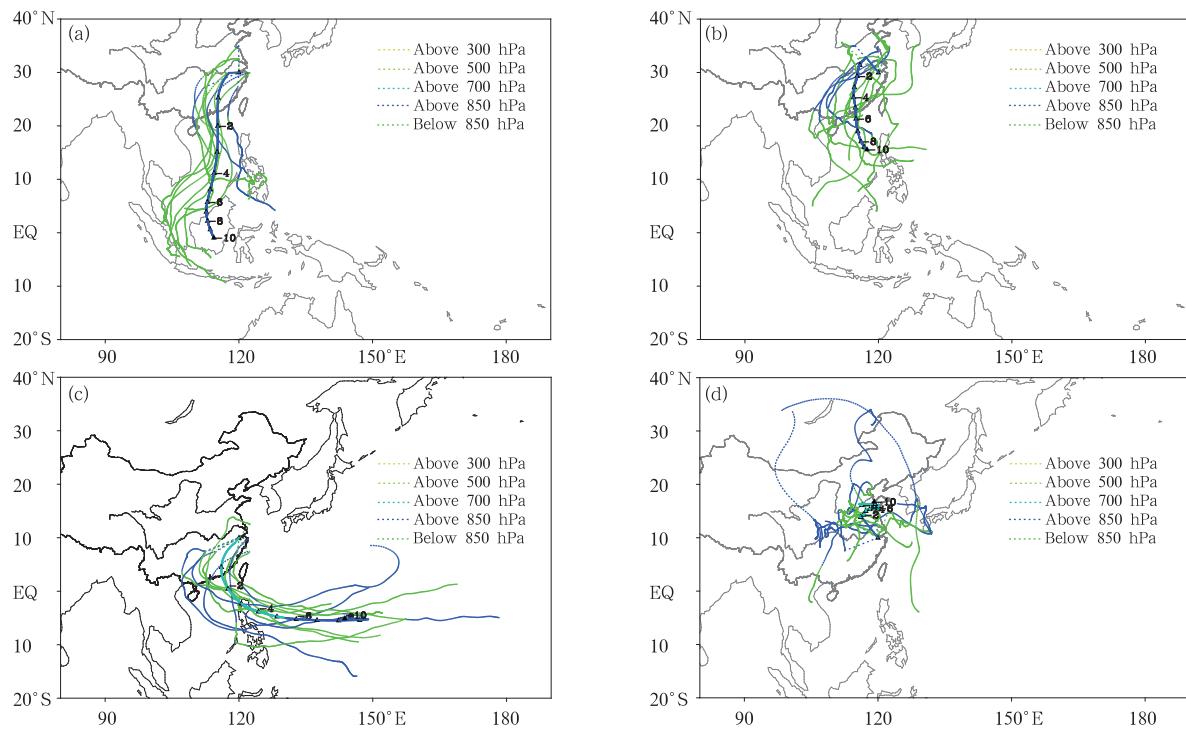


图 10 CT-B-SS(a,b) 和 CT-B-SE(c,d) 各子簇中的轨迹

(a. CT-B-SS-1, b. CT-B-SS-2, c. CT-B-SE-1, d. CT-B-SE-2)

Fig. 10 Trajectories of sub-clusters in CT-B-SS (a, b) and CT-B-SE (c, d)

(a. CT-B-SS-1, b. CT-B-SS-2, c. CT-B-SE-1, d. CT-B-SE-2)

4—7位相的影响,热带西太平洋上空热带对流活跃,水汽含量充沛,另一方面由于西太平洋副热带高压的异常偏强(图3b、c),使得CT-B-SE-1的轨迹数目明显多于江南型中的CT-A-SS-3。而子簇CT-B-SE-2中的轨迹杂乱,且聚集在江淮区域附近低空,可能为受局地扰动引起的运动,有一半的轨迹在事件初期就到达江淮区域(图11),这也许说明华东局地扰动系统对江北型PHREs的发生有触发作用,两支子簇在整个事件中的贡献变化不大。

根据以上的分析,江北型PHREs只有一条来自北方的干空气路径,即来自地中海—欧洲平原的西北路径轨迹簇,欧洲平原和巴尔喀什湖区的干空气通过对流层中高层的槽、脊活动和急流输送至江淮区域;南方的水汽路径除了源自热带印度洋的西南路径和源自印度尼西亚—中国南海的偏南路径外,比江南型PHREs还多出一条来自西太平洋的东南路径,但前2条路径为主要水汽来源。印度尼西亚群岛至热带西太平洋海域稳定且偏强的MJO对流活动,使得洋面上空水汽含量增大,充沛的水汽通过对流层低层的越赤道气流、季风低压和西太平

洋副热带高压西侧和南侧的气流源源不断地向江淮区域输送。其中受南半球马斯克林高压减弱的影响(图略),索马里越赤道急流及其引导的事件前期的水汽经向输送略有减弱,而西太平洋副热带高压的显著偏强,使得热带海洋性大陆和西太平洋海域的水汽输送增强,成为最大的水汽源地。

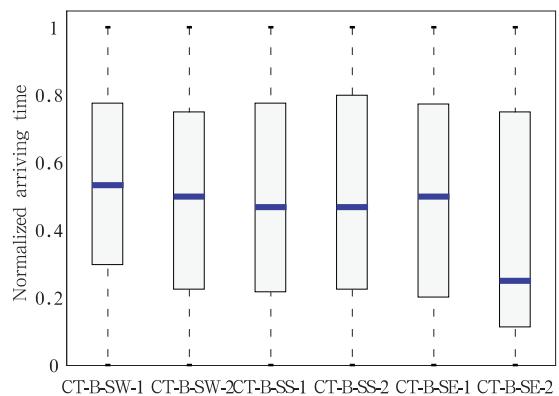


图 11 江北型 PHREs 的聚类轨迹分析中偏南各子簇到达江淮区域的归一化时间分布特征

Fig. 11 The normalized arriving time of sub-clusters from southern areas in cluster analysis for PHREs in the northern YHRV

5 结论和讨论

在汪汇洁等(2014)对中国南方 PHREs 分类研究的基础上,针对江淮流域的江南型和江北型 PHREs 过程的水汽源地、输送路径以及干空气路径,利用 HYSPLIT 模式进行了模拟和定量分析。研究的主要结果如下:

(1) 干空气源地和输送路径:江南型 PHREs 干空气主要通过 2 条路径进入江淮地区,地中海—欧洲平原的西北路径和来自蒙古高原的东北路径,东北路径的气流经渤海—黄海区域得到水汽补充,然后输送至江淮区域。江北型 PHREs 干空气主要有 1 条路径,从西北路径进入江淮地区,欧洲平原和巴尔喀什湖区的干空气通过对流层中高层的槽脊活动和急流输送至江淮区域。

(2) 水汽源地和路径:江南型 PHREs 水汽主要由 2 条路径输送到江淮流域,虽然 MJO 活动总体偏弱,但印度洋至中南半岛附近热带对流相对活跃且稳定,源自印度半岛以南热带印度洋的西南路径、来自印度尼西亚和中国南海的偏南路径。来自南方的两条路径主要受索马里越赤道急流、孟加拉湾南部和印度尼西亚群岛附近越赤道气流,以及西太平洋副热带高压这些系统的影响。事件发生期间索马里越赤道急流和水汽经向输送加强,但由于输送距离较远,热带海洋性大陆作为江南型 PHREs 的最大水汽来源,在事件发生的中后期对江淮区域的水汽贡献较大。江北型的水汽路径有 3 条:源自热带印度洋的西南路径、源自印度尼西亚—中国南海的偏南路径和来自西太平洋的东南路径,前 2 条路径为主要水汽来源,且与江南型相似。事件发生期间索马里越赤道急流及其引导的事件前期的水汽经向输送略有减弱,而西太平洋副热带高压显著偏强,东半球的热带地区尤其是印度尼西亚群岛至热带西太平洋海域稳定的 MJO 活动,因此,热带海洋性大陆至西太平洋海域是最大的水汽源地。

江志红等(2013)的研究指出,气候态下江淮梅雨的水汽主要来自印度洋、孟加拉湾—中国南海、太平洋和欧亚大陆等区域,其对江淮梅雨的水汽输送贡献分别为 35%、19%、22% 和 19%。本研究中水汽源地也是以上 4 个区域,但江北型 PHREs 事件中偏北路径气流的水汽贡献较小,在江南型 PHREs 事件中东北路径有超过 20% 的水汽贡献率。本研

究中江南和江北型 PHREs 事件中不同路径的水汽贡献比例不同,江南型 PHREs 过程中水汽主要来自印度洋、孟加拉湾和中国南海,西太平洋的贡献较小,而江北型 PHREs 事件中,西太平洋地区的水汽贡献比江南型 PHREs 事件大。本研究只针对江淮区域非台风系统影响的两类个例(各 9 个例子),样本数目相对较少,只能反映在这些持续性强降雨过程的输送特征,不代表一般降雨过程的水汽输送特征,更不能反映气候特征。本研究表明,江淮流域 PHREs 过程的水汽输送过程与气候态的统计结果基本相似,但也存在明显差异,这种差异主要是由于不同类型的持续性过程的环流异常特征不同造成,应深入研究环流的异常以及形成机理。

参考文献

- 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. 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. Acta Meteor Sinica, 69(5): 810-818 (in Chinese)
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 254-255. Ding Y H. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991. Beijing: China Meteorological Press, 254-255 (in Chinese)
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 61(2): 129-145. Ding Y H, Hu G Q. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. Acta Meteor Sinica, 61(2): 129-145 (in Chinese)
- 江志红, 梁卓然, 刘征宇等. 2011. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析. 大气科学, 35(2): 361-372. Jiang Z H, Liang Z R, Liu Z Y, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007. Chin J Atmos Sci, 35(2): 361-372 (in Chinese)
- 江志红, 任伟, 刘征宇等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析. 气象学报, 71(2): 295-304. Jiang Z H, Ren W, Liu Z Y, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method. Acta Meteor Sinica, 71(2): 295-304 (in Chinese)
- 苗长明, 丁一汇, 郭品文等. 2015. 水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系. 气象学报, 73(1): 72-83. Miao C M, Ding Y H, Guo P W, et al. 2015. Linkage of the water vapor transport distribution with the rainy season and its precipitation in

- the southern regions south of the Yangtze River during the early summer. *Acta Meteor Sinica*, 73(1): 72-83 (in Chinese)
- 孙建华, 李娟, 沈新勇等. 2015. 2013年7月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统的演变特征. *气象*, 41(5): 533-543. Sun J H, Li J, Shen X Y, et al. 2015. Mesoscale system study of extreme rainfall over Sichuan Basin in July 2013. *Meteor Mon*, 41 (5): 533-543 (in Chinese)
- 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄等. 2001. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 183-184. Tao S Y, Ni Y Q, Zhao S X, et al. 2001. The Study on Formation Mechanism and Forecasting of Heavy Rainfall in the Summer 1998. Beijing: China Meteorological Press, 183-184 (in Chinese)
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 北京: 气象出版社, 1-192. Tao S Y, Zhang X L, Zhang S L. 2004. A Study on the Disaster of Heavy Rainfalls over the Yangtze River Basin in the Meiyu Period. Beijing: China Meteorological Press, 1-192 (in Chinese)
- 汪汇洁, 孙建华, 卫捷等. 2014. 近30年我国南方区域持续性暴雨过程的分类研究. *气候与环境研究*, 19(6): 713-725. Wang H J, Sun J H, Wei J, et al. 2014. Classification of persistent heavy rainfall events over southern China during recent 30 years. *Climatic Environ Res*, 19(6): 713-725 (in Chinese)
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. *气象学报*, 30(2): 173-185. Xie Y B, Dai W J. 1959. Certain computational results of water vapour transport over Eastern China for a selected synoptic case. *Acta Meteor Sinica*, 30(2): 173-185 (in Chinese)
- 薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响. *科学通报*, 48(3): 287-291. Xue F, Wang H J, He J H. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia. *Chin Sci Bull*, 48(5): 492-497
- 杨浩, 江志红, 刘征宇等. 2014. 基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比. *大气科学*, 38(5): 965-973. Yang H, Jiang Z H, Liu Z Y, et al. 2014. Analysis of climatic characteristics of water vapor transport based on the Lagrangian method: A comparison between Meiyu in the Yangtze-Huaihe River region and the Huabei rainy season. *Chin J Atmos Sci*, 38(5): 965-973 (in Chinese)
- 张庆云, 王会军, 林朝晖等. 2004. 中国天气气候异常成因研究. 北京: 气象出版社, 166-170. Zhang Q Y, Wang H J, Lin Z H, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China. Beijing: China Meteorological Press, 166-170 (in Chinese)
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社, 281-282. Zhao S X, Tao Z Y, Sun J H, et al. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River. Beijing: China Meteorological Press, 281-282 (in Chinese)
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析. *气候与环境研究*, 12(6): 713-727. Zhao S X, Zhang L S, Sun J H. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe river basin during the summer of 2007. *Climatic Environ Res*, 12(6): 713-727 (in Chinese)
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Aust Meteor Mag*, 47(4): 295-308
- Duan W L, He B, Takara K, et al. 2015. Changes of precipitation amounts and extremes over Japan between 1901 and 2012 and their connection to climate indices. *Climate Dyn*, 45 (7-8): 2273-2292
- Kunkel K E, Karl T R, Brooks H, et al. 2013. Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(4): 499-514
- Murakami T. 1959. The general circulation and water vapor balance over the far East during the rainy season. *Geophys Mag*, 29 (2): 137-171
- Ninomiya K, Kobayashi C. 1999. Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991. Part II: Moisture transport and moisture balance. *J Meteor Soc Japan*, 1999, 77 (1): 77-99
- Shapiro M A, Thorpe A J. 2004. THORPEX: A global atmospheric research programme for the beginning of the 21st century. *WMO Bull*, 53(3): 222-226
- Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J Climate*, 12(5): 1353-1367
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China// Chang C P, Krishnamutti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 60-92
- Xue F, Wang H J, He J H. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian Summer Monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 82(4): 1173-1186