

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 [J]. 大气科学, 38 (5): 965–973, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228. Yang Hao, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu, 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 Huaibei rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 965–973.

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

杨浩¹ 江志红¹ 刘征宇^{1,2} 张强³

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 威斯康辛大学麦迪逊分校大气与海洋科学系, 麦迪逊市 53706

3 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用基于拉格朗日方法的轨迹模式 (HYSPLIT_4.9), 结合海量气块追踪分析法, 对比了江淮梅雨和淮北雨季平均水汽输送特征, 从水汽来源及源地贡献方面探讨二者的相对独立性, 对比两雨季降水异常年水汽输送特征。结果表明, 气候态上, 江淮梅雨的水汽输送主要来自印度洋、太平洋、孟加拉湾—南海, 其中来自印度洋的水汽输送贡献最大, 超过 50%; 淮北雨季来自印度洋、欧亚大陆、孟加拉湾—南海、太平洋的水汽贡献差异不大, 但与江淮梅雨的水汽源地对比, 淮北雨季来自印度洋的水汽输送贡献少 20%, 而欧亚大陆偏多 19%。对比降水异常年发现, 来自印度洋、孟加拉湾—南海以及欧亚大陆水汽贡献的变化对江淮梅雨和淮北雨季降水异常有重要影响。江淮梅雨偏多年, 印度洋的水汽输送贡献比梅雨偏少年减少 17%, 孟加拉湾—南海则增加了 11%。在淮北雨季偏多年, 印度洋的水汽输送贡献比偏少年多 19%, 孟加拉湾—南海和欧亚大陆的水汽输送则分别减少 6% 和 17%。

关键词 拉格朗日气块追踪法 水汽输送 江淮梅雨 淮北雨季

文章编号 1006-9895(2014)05-0965-09

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13228

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 Huaibei Rainy Season

YANG Hao¹, JIANG Zhihong¹, LIU Zhengyu^{1,2}, and ZHANG Qiang³

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Center for Climatic Research and Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706

3 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Using an airflow trajectory model based on the Lagrangian method (HYSPLIT_4.9), combined with the massive gas block tracking method, the moisture transport characteristics of Meiyu in the Yangtze–Huaihe River region (YHMY) and Huaibei rainy season (HRS) are discussed and compared quantitatively in this study. The YHMY and HRS are shown to be two independent rainy seasons. The moisture in YHMY mainly comes from the Indian Ocean, the Pacific Ocean, and the Bay of Bengal–the South China Sea. Water vapor from the Indian Ocean accounts for more than 50% of

收稿日期 2013-07-29, 2014-02-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41230528, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955204、2010CB950401, 江苏省研究生培养创新计划 N0782002156, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD, 江苏省高校“青蓝工程”创新团队项目

作者简介 杨浩, 男, 1986 年出生, 博士生, 研究方向: 区域气候变化。E-mail: yanghao0202@126.com

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

the moisture in YHMY. For HRS, there is little difference between the Indian Ocean, the Pacific Ocean, the Bay of Bengal—the South China Sea, and the Eurasian continent. Compared to YHMY, the moisture from Indian Ocean decreases 20%, while the moisture from the Eurasian continent increases 19% during HRS. The water vapor from the Indian Ocean, the Pacific Ocean, and the Eurasian continent has a significant influence on the differences between YHMY and HRS in abnormal years. In wet YHMY years, the water vapor from Indian Ocean is 17% less than that in dry YHMY years, while the water vapor from Bay of Bengal—the South China Sea is 20% higher than in dry YHMY years. In wet HRS years, the moisture from the Indian Ocean is 19% higher than in dry HRS years.

Keywords Lagrangian gas block tracking method, Water vapor transportation, Meiyu in the Yangtze–Huaihe River region, Huaibei Rainy season

1 引言

关于我国东部降水的水汽来源问题前人做了大量的研究 (Simmonds et al., 1999; Ninowiya, 1999; 周天军等, 2001; 谢安等, 2002; 徐祥德等, 2003; 丁一汇和胡国权, 2003; 苗秋菊等, 2005; Zhou and Yu, 2005), 其中大多数工作都是从欧拉观点出发, 如计算水汽通量的流函数、势函数以及辐合辐散等变量, 以此分析水汽输送特征。由于欧拉方法着眼于空间的某些确定点, 在固定点上观察流体的运动, 因此无法定量区分各水汽来源贡献。而流体力学中在研究流体运动时, 还存在另一种方法——拉格朗日法, 它可以通过计算空气块的运行轨迹, 即拉格朗日轨迹, 定量统计出各源地的水汽输送贡献, 以克服欧拉方法的不足。近些年来, 研究者陆续开发了一些由较高分辨率资料驱动的拉格朗日轨迹模式。例如, 挪威大气研究院和维也纳联合开发的拉格朗日轨迹模式 FLEXPART (Stohl et al., 1998), 美国国家海洋和大气管理局 NOAA 开发的拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT (Draxler and Hess, 1998), 近期已经开始逐步应用到水汽输送的研究中 (Brimelow and Reuter, 2005; Perry et al., 2007; 马京津等, 2008; Sodemann and Stohl, 2009; Drumond et al., 2011; 陈斌等, 2011; 江志红等, 2011)。研究表明, 拉格朗日气流轨迹模拟的优势在于能够模拟气团在一定时间内的三维运动轨迹, 确定气流的源地, 并且定量计算出水汽源地的输送贡献。

然而, 前面基于拉格朗日方法的研究大多是针对某个降水事件或短期降水过程。对于较长时间尺度 (几十年) 降水, 由于轨迹模式模拟得到的轨迹数量非常大, 常规的聚类方法无法计算, 对这些轨迹的分析尚缺乏客观定量的研究方法。最近江志红等 (2013) 提出一种用于海量轨迹分析的气块追踪分析方法 (简称海量气块追踪法), 探讨了长江中

下游地区近 30 年来夏季梅雨期的水汽输送特征。利用该方法可以客观定量地计算出不同源地的气候态水汽输送贡献。

众所周知, 华南汛期降水、江淮梅雨和华北雨季作为东亚夏季风核心成员, 也是中国东部夏季降水的最重要的组成部分 (周玉淑等, 2005; 陈隆勋等, 2006; 江志红等, 2006; 吴志伟等, 2006; Jiang et al., 2008)。近年来, 随着人们对东亚季风区降水特征分析的深入, 不少研究提出江淮梅雨和华北雨季之间存在一个过渡期, 称之为淮北雨季 (吴增福等, 1985; 吕军, 2012)。Lü et al. (2012) 研究指出淮河以北地区是介于江淮梅雨和华北雨季之间的一个过渡地区, 并且由于每年季风强度、副高位置的不同, 使得淮北地区和江淮以及华北地区有着不同的降水特点。江苏省气象局从业务需求出发, 提出了江淮梅雨和淮北雨季起止日期的定义方法, 给出了历年江淮梅雨和淮北雨季起止日期。

无论是江淮梅雨还是淮北雨季, 充沛的水汽输送是降水形成的必要条件, 分析水汽来源及输送状况对于进一步认识该两雨季的特征, 特别对理清淮北雨季的独立性, 更好进行该区域夏季降水预测, 具有重要意义 (徐祥德等, 2003; 马音等, 2011)。因此, 本文利用拉格朗日轨迹模式 (HYSPLIT_4.9), 结合海量气块追踪分析法, 定量分析江淮梅雨和淮北雨季水汽输送及其来源情况, 对比两雨季降水异常年水汽输送特征, 为该区域的夏季降水预测提供科学依据。

2 资料和方法

2.1 资料及轨迹模式介绍

本文使用的资料有: 1961 年至 2009 年中国 753 个测站逐日观测降水数据; 同期驱动轨迹模式的 NCEP 再分析资料, 时间分辨率为 6 小时一次, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 变量包括 1000~10 hPa 共 17 层上的位势高度 (h)、温度 (t)、纬向风 (u)

和经向风 (v), 1000~300 hPa 各层比湿 (q) 及 1000~100 hPa 的各层垂直速度 (ω)。

假设空气中的粒子随风飘动, 根据 HYSPLIT_4.9 模式 (Draxler and Hess, 1998), 气流的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分。模式利用 NCEP 再分析资料, 对每一时次空气粒子所在位置的物理量进行插值计算, 最终的位置由初始位置 (P) 和第一猜测位置 (P') 的平均速率计算得到:

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

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 \times [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t, \quad (2)$$

式中, Δt 为时间步长, 其时间步长是可变的, 要求 $\Delta t < 0.75 U_{\max}$, $U_{\max}$ 为最大风速, 也即一个时间步长内气团的移动长度不超过 0.75 个格距。本文时间步长 Δt 选取为 6 小时。由于模式输入的 NCEP 资料是等压面数据, 而 HYSPLIT_4.9 模式采用的是地形坐标, 故在输入气象数据时, 垂直方向上要内插到地形追随坐标系统。

2.2 轨迹模拟方案

根据江苏省气象台 (周曾奎, 2006; 吕军, 2012) 给出的江淮梅雨和淮北雨季各年的起迄日期, 选择模拟区域: 江淮梅雨区 $5^\circ \times 6^\circ$ ($28^\circ\text{N} \sim 32^\circ\text{N}$, $115^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$), 淮北雨季区 $5^\circ \times 6^\circ$ ($33^\circ\text{N} \sim 37^\circ\text{N}$, $115^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) (图 1), 初始场水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (模拟轨迹初始点为 30 个)。模拟时间为上述给出的 1961~2009 年每年江淮梅雨和淮北雨季的起止日期。由于水汽输送多集中在对流层中低层, 因此

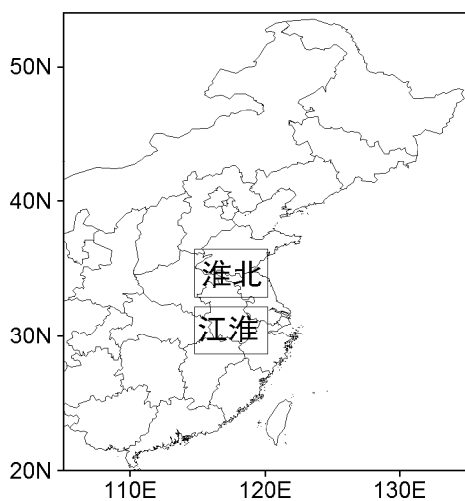


图 1 江淮梅雨与淮北雨季模拟目标区域

Fig. 1 The simulation areas of Meiyu in the Yangtze-Huaihe River region (YHMY) and North Huaihe River rainy season (HRS)

垂直高度上我们选取 850 hPa (1500 m) 作为模拟的初始高度。模拟空气块后向追踪 11 d 的三维运动轨迹, 每 6 小时输出一次轨迹点的位置, 并插值得到相应位置上空气块的物理属性 (如相对湿度、温度等), 每隔 6 小时所有轨迹初始点重新后向追踪模拟 11 d (江志红等, 2013)。

利用轨迹模式计算得到每年江淮梅雨和淮北雨季期间空气块后向追踪的位置, 再对所有年份进行累积合成分析。具体根据文献 (江志红等, 2013) 中提出的海量气块追踪分析法, 首先确定后向追踪的空气块到达目标区域前某一时刻所处位置, 然后统计并绘制出该时刻空气块个数及其物理属性的空间分布图, 最后可以得到不同区域空气块及其携带水汽的气候态输送贡献。

2.3 源地水汽输送贡献率

定义某一源地水汽输送贡献率为

$$Q_s = \left(\sum_i^m q_{\text{last}} / \sum_i^n q_{\text{last}} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

其中, q_{last} 表示空气粒子 (模式模拟中以空气块表示) 到达最终位置的比湿, m 表示该源地所包含的空气粒子数 (空气块个数), n 表示所有源地空气粒子总数 (江志红等, 2013)。

3 江淮梅雨与淮北雨季低层水汽输送气候特征分析

3.1 江淮梅雨与淮北雨季水汽来源的追踪

通过对轨迹模式后向追踪输出结果进行处理, 结合气块追踪分析法, 得到 1961~2009 年江淮梅雨和淮北雨季期间水汽输送的气候态特征。图 2 给出了 49 年江淮梅雨和淮北雨季期间空气块携带的水汽到达目标地区前 1 d (-1 d)、6 d (-6 d)、11 d (-11 d) 的空间分布。由图可知, 1 d 前 (图 2a) 大部分水汽主要位于目标地区及其周围一带, 外围的大值区向西南和西北方向倾斜, 东南部可以延伸到琉球群岛以东洋面。其中江淮梅雨 (红色等值线) 的水汽大值中心位于我国西南地区的广西一带, 而淮北雨季 (蓝色等值线) 的水汽来源整体偏北, 并且大值中心离目标区域的距离相对较近。从后向追踪 -6 d 水汽来源的空间分布 (图 2b) 来看, 江淮梅雨及淮北雨季的水汽向南可以追踪到南海、孟加拉湾一带, 向东可以追踪到西太平洋, 向北可以追踪到北西伯利亚, 向西可以追踪到东欧大陆。此时水汽的大值区主要位于南海、孟湾一带, 西太

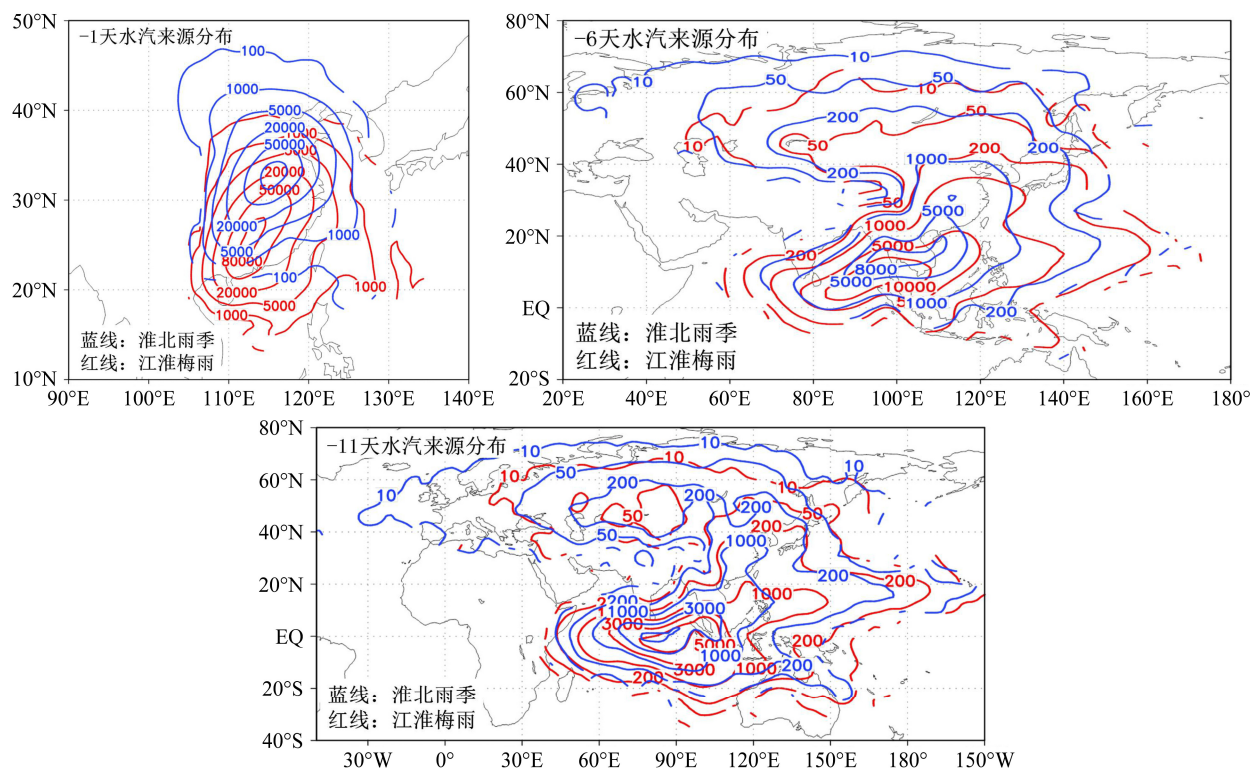


图2 1961~2009年江淮梅雨(红线)、淮北雨季(蓝线)空气块携带水汽到达目标区域:(a)前第1天(-1 d)、(b)前第6天(-6 d)、(c)前第11天(-11 d)的空间分布(单位: g kg^{-1})

Fig. 2 The spatial distribution of water vapor on the (a) first day, (b) 6th day, and (c) 11th day before reaching the target areas of YHMY (red contour) and HRS (blue contour) from 1961 to 2009 (contour lines stand for specific humidity, unit: g kg^{-1})

平洋上的次之,西伯利亚和东欧大陆上空的最少,这也表明在西伯利亚和东欧大陆上空的空气块的湿度较小,空气比较干燥。图2c为-11 d的情况,11 d前水汽基本可以追踪到源地附近(江志红等,2013),其中南方的水汽来源推进到了印度洋和澳大利亚北部一带,北方的水汽则追踪到了极地附近。东部的水汽越过 180°E 推进到了太平洋中部地区,向西则到达北大西洋区域。此时江淮梅雨和淮北雨季的水汽来源极大值区主要位于印度洋和苏门答腊岛一带。从-11 d的水汽源地分布来看,淮北雨季的水汽源地分布较江淮梅雨相对偏北。尤其在欧亚大陆北部,大约偏北10个纬度左右,而在南半球,江淮梅雨的水汽源地分布比淮北雨季稍偏南一些。

由于江淮梅雨与淮北雨季的地理区域存在南北差异,因此需要确认在-11 d的时候,江淮梅雨与淮北雨季的气块运动是否都到达了源地并处于一种稳定状态,即到达源地的气块数量不再发生变化。验证方法如下:选取印度洋的一个区域($20^\circ\text{S} \sim$

0°S , $70^\circ\text{E} \sim 90^\circ\text{E}$)作为目标区(该目标区是水汽输送的主要源地之一),分别统计江淮梅雨与淮北雨季在气块后向追踪过程中各时次到达该区域的空气块个数(图3)。在-4 d的时候,江淮梅雨的气块首先到达目标区,此后几天到达目标区的气块迅速增加。在-10 d的时候数量达到18000左右,其后气块数量几乎不变,说明气块已经追踪到了源地附近。淮北雨季的气块在-5 d的时候开始到达目标区,在-11 d的时候数量达到13000左右,此后数量处于稳定状态。也就是说,到达江淮梅雨与淮北雨季的水汽气块基本来自11 d前的源地。

为直观深入地分析水汽来源差异,我们进一步计算了江淮梅雨与淮北雨季-11 d时气块携带水汽的差值场(图4)。类似于文献(江志红等,2013),我们以空气块携带水汽的异常超过 ± 3 倍标准差为显著异常。由图可知,江淮梅雨的水汽主要源于赤道印度洋及以南地区和西太平洋地区,淮北雨季则主要来自孟加拉湾—南海以及本地的水汽输送,同时整个欧亚大陆对于淮北雨季的水汽输送贡献也

相对较大。结合前述验证(图3),这种水汽源地差异与雨季地理位置的南北差异无关。

3.2 江淮梅雨与淮北雨季水汽输送源地的贡献对比

通过以上分析,大致了解了江淮梅雨和淮北雨季期的水汽输送分布情况,为进一步定量区分不同区域的水汽输送贡献,将区域划分为欧亚大陆、局地(目标区域及其周围)、太平洋、孟加拉湾—南海(简称孟湾—南海)、印度洋五个部分(见图5a)。图5b给出了两个雨季期间各区域空气块携带的水汽输送贡献率。由图可知,江淮梅雨超过50%的水汽输送贡献来自印度洋,其次是太平洋和孟湾—南海,分别占22%和18%。欧亚大陆仅有6%。鉴于本文江淮梅雨的起止日期是逐年变化的,且区域选择有所差异,故江淮梅雨气候态的水汽输送贡献与

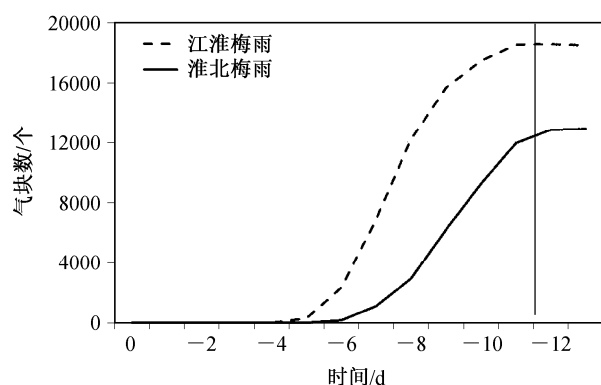


图3 江淮梅雨(虚线)和淮北雨季(实线)的气块后向追踪各时次(单位: d)到达印度洋地区的个数

Fig. 3 The number of gas blocks in YHMY (dotted line) and HRS (solid line) which are back-tracked day by day (unit: d) and arrive at the Indian Ocean area

江志红等(2013)得到的结论略有不同。淮北雨季来自印度洋、孟湾—南海、太平洋、欧亚大陆的水汽输送贡献差异则不大,分别为33%、22%、16%和26%。可见,江淮梅雨和淮北雨季的水汽源地输送贡献差异最大的区域主要体现在印度洋和欧亚大陆两个地区。

由以上定量计算不同源地的水汽输送贡献发现,江淮梅雨的水汽输送主要来自印度洋、太平洋、孟湾—南海,其中来自印度洋的水汽输送贡献最大,超过50%;淮北雨季来自印度洋、欧亚大陆、孟湾—南海、太平洋的水汽贡献差异不大,但与江淮梅雨的水汽源地对比,淮北雨季来自印度洋的水汽输送贡献少20%,而欧亚大陆偏多19%。进一步分析江淮梅雨与淮北雨季的500 hPa平均环流差值场(图6),可以看出,淮北雨季时,西太平洋副高位置偏东偏北,西伸脊点东移,脊线位置北跳,乌拉尔山阻高和鄂霍次克海阻高强度减弱,东亚槽强度偏弱,淮北地区为弱的偏西风,江南地区为显著的偏东风,表明在淮北雨季阶段,偏南风输送强度已明显减弱,而来自北方的偏西气流加强。周天军等(1999)、Zhou and Yu (2005)从欧拉观点的角度出发,通过计算水汽通量的辐合辐散,分析了中国东部长江中下游雨带和淮河流域雨带水汽输送特征,指出这两类雨带水汽输送的差异是由西太副高和东亚高空急流的南北摆动造成的。而本文的研究进一步表明江淮梅雨与淮北雨季期间环流系统的差异也直接导致了其水汽源地的不同。这从水汽来源的侧面也表明江淮梅雨和淮北雨季具有相对独立性。

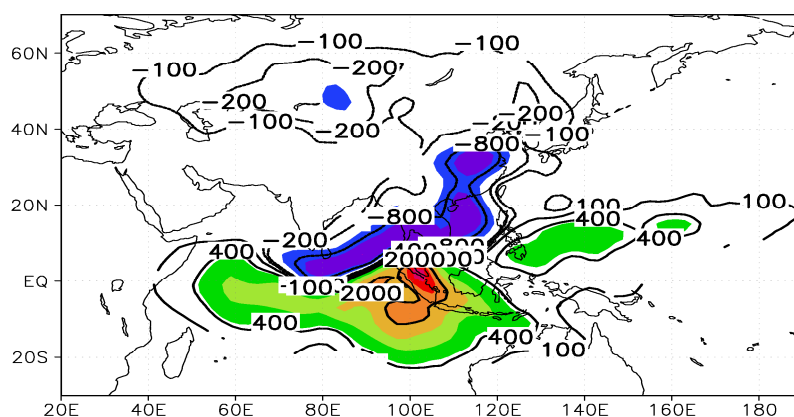


图4 1961~2009年江淮梅雨与淮北雨季空气块携带水汽到达目标区域前第11天(-11 d)的差值分布(江淮梅雨减淮北雨季,单位: g kg^{-1} , 阴影区为差值超过3倍标准差)

Fig. 4 The differences of water vapor between YHMY and HRS on 11th day before reaching the target areas from 1961 to 2009 (YHMY minus HRS, shading are exceed 3 times standard deviation, unit: g kg^{-1})

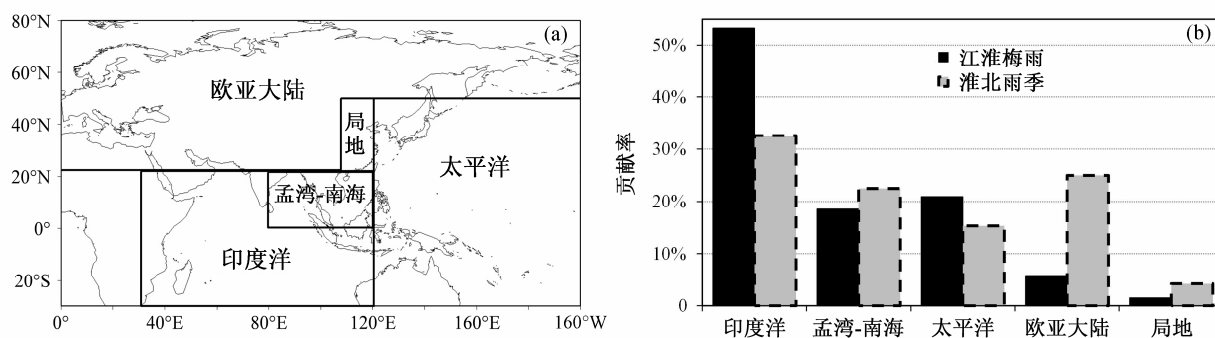


图 5 江淮梅雨和淮北雨季 (a) 水汽源地分布的区域划分及 (b) 各源地水汽输送贡献率

Fig. 5 (a) The area dividing of water vapor sources of YHMY and HRS and (b) their contribution rates to water vapor transport

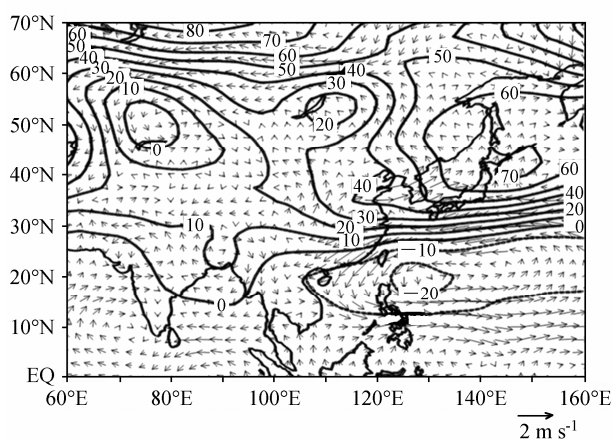


图 6 江淮梅雨与淮北雨季 500 hPa 高度场 (单位: gpm) 与 850 hPa 风场的差值场 (单位: m s^{-1})

Fig. 6 The differences of 500-hPa geopotential height (units: gpm) and 850-hPa wind (units: m s^{-1}) between YHMY and HRS

3.3 江淮梅雨与淮北雨季异常年水汽输送差异对比

利用江苏省气象台 (周曾奎, 2006) 和吕军 (2012) 对江淮梅雨和淮北雨季起止日期及其降水区域的规定, 选取区域降水距平大于 1.5 倍标准差为降水异常多年, 区域降水距平小于 -1.5 倍标准差为降水异常少年 (图略)。得到江淮梅雨降水偏多年为 1979、1991、1996、1998 年, 偏少年为 1961、1978、1985、1990、1994 年; 淮北雨季降水偏多年为 1970、1974、1996、2003、2007 年, 偏少年为 1966、1981、1999、2002 年。进一步分析二者降水异常年的水汽输送特征。图 7 为江淮梅雨和淮北雨季降水异常年的合成与多年平均的差值。从江淮梅雨—11 d (图 7a、b) 的水汽源地分布差异来看, 江淮梅雨降水偏多年, 水汽主要来自孟加拉湾、中南半岛以及菲律宾群岛附近, 印度洋赤道以南地区的水汽偏少; 降水偏少年, 印度洋附近地区的水汽输送较多。而淮北雨季降水偏多年 (图 7c) 则来自印

度洋、太平洋的水汽较多, 孟湾—中南半岛的水汽偏少; 淮北雨季降水偏少年 (图 7d), 来自北方陆地、中南半岛—南海的水汽输送较强。可见, 在江淮梅雨偏多年, 孟湾—南海的水汽输送贡献较大, 而在淮北雨季偏多年, 印度洋的水汽输送贡献相对偏多。

根据前面的分区, 图 8 进一步定量给出了江淮梅雨和淮北雨季降水偏多年、偏少年各源地水汽输送贡献所占的比例。可见, 二者在降水异常年的水汽输送同样存在很大差异。江淮梅雨偏多年, 来自印度洋、孟湾—南海和太平洋的水汽输送贡献分别为 36%、33%、22%; 梅雨偏少年时, 印度洋的水汽输送贡献达到 53%, 而孟湾—南海仅有 12%, 太平洋略有增加。来自印度洋和孟湾南海的水汽输送对江淮梅雨的异常有重要影响, 这与江志红等 (2013) 得到的平均梅雨期异常年的水汽输送结论一致。在淮北雨季偏多年, 印度洋、欧亚大陆和孟湾—南海的水汽输送贡献分别占到 37%、23%和 19%, 太平洋的贡献相对较小, 为 16%; 在降水偏少年, 印度洋和太平洋的水汽输送贡献比偏多年分别少 19%和 7%, 孟湾—南海和欧亚大陆的水汽输送贡献增加了 6%和 17%。

综上所述, 来自印度洋、孟湾—南海以及欧亚大陆水汽贡献的变化对江淮梅雨和淮北雨季异常有重要影响。在江淮梅雨偏多年, 孟湾—南海水汽输送贡献达到 33%, 比梅雨偏少年增加了 11%, 印度洋的水汽输送则仅有 36%, 比梅雨偏少年减少 17%, 太平洋略有减小, 比梅雨偏少年少 4%。在淮北雨季偏多年, 来自印度洋、太平洋的水汽输送贡献有所增加, 其中印度洋水汽输送贡献增加显著, 比偏少年多 19%, 欧亚大陆的水汽输送则明显减少, 比偏少年少 17%。可见, 当孟湾—南海水汽输送增强, 印度洋水汽输送偏弱时, 江淮梅雨偏多;

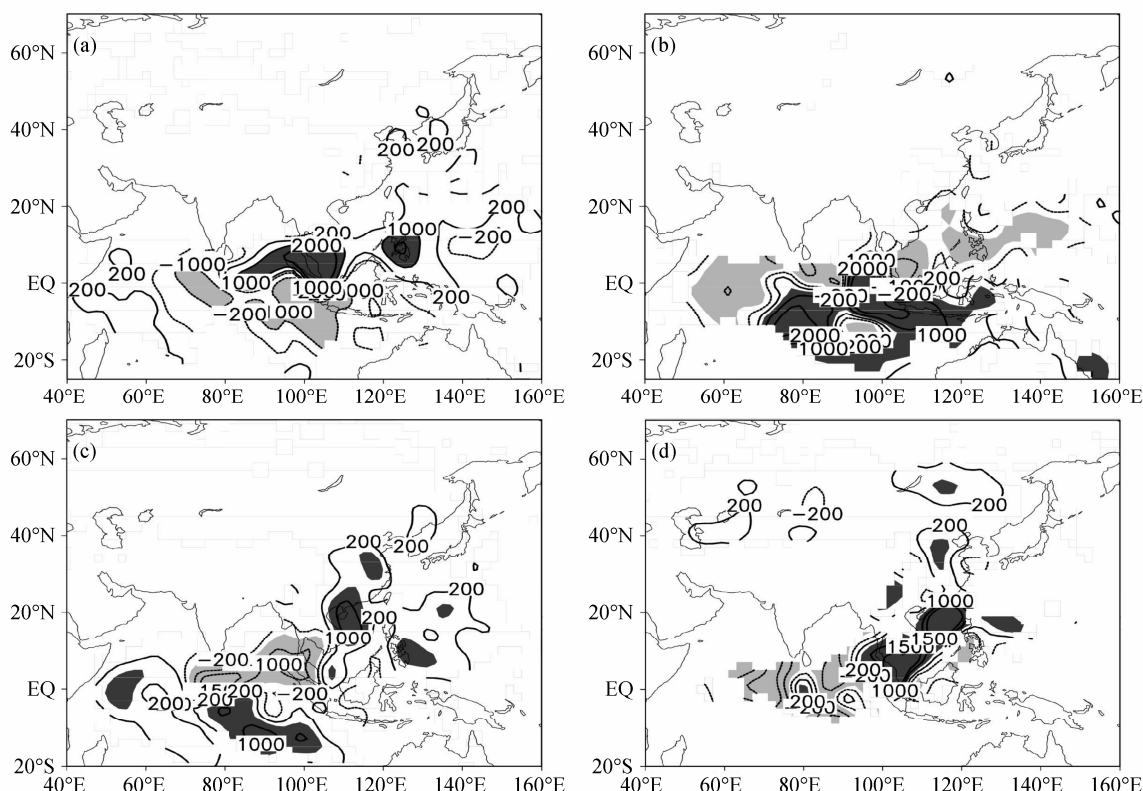


图7 (a、b)江淮梅雨和(c、d)淮北雨季降水偏多年(左列)、偏少年(右列)空气块携带水汽到达目标区域前第11天(−11 d)的距平分布(单位: g kg^{-1} ; 阴影区为差值超过3倍标准差, 深色阴影表示正值, 浅色阴影表示负值)

Fig. 7 The differences of water vapor between abnormal years and climate average in (a, b) YHMY and (c, d) HRS on 11th day before reaching the target areas during wet years (left) and dry years (right). Unit: g kg^{-1} ; shadings are the differences which exceed 3 times standard deviation, dark shading indicates positive, light shading indicates negative

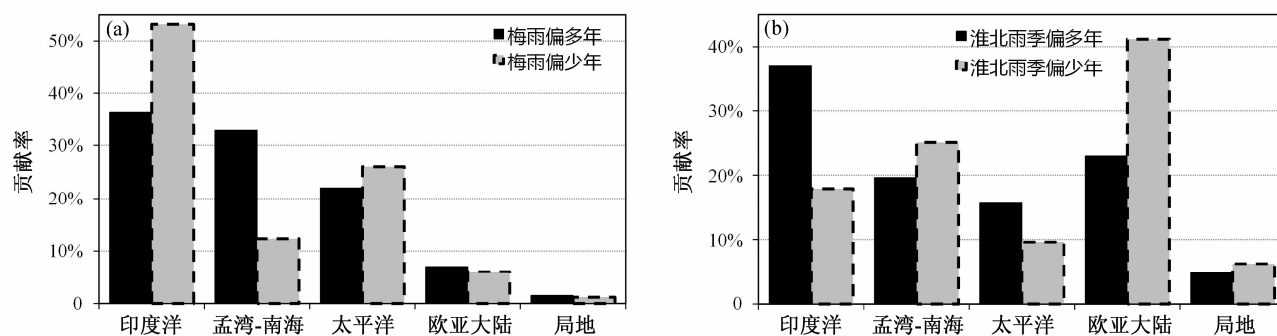


图8 (a)江淮梅雨和(b)淮北雨季降水异常年不同源地水汽输送贡献率

Fig. 8 Contribution rates of water vapor from the various regions in the abnormal years of (a) YHMY and (b) HRS

而印度洋水汽输送加强, 孟湾—南海水汽输送减少, 欧亚大陆的水汽输送明显减少时, 淮北雨季降水偏多。

4 结论与讨论

本文利用拉格朗日轨迹模式 (HYSPLIT_4.9)

并结合海量气块追踪法等统计手段, 对江淮梅雨和淮北雨季气候态及降水异常年的水汽输送特征进行了定量对比讨论, 从水汽来源的侧面表明, 江淮梅雨和淮北雨季具有相对独立性, 主要结论如下:

(1) 气候平均态上, 江淮梅雨的水汽输送主要来自印度洋、太平洋、孟湾—南海, 其中来自印度洋的水汽输送贡献最大, 超过 50%; 淮北雨季来自

印度洋、欧亚大陆、孟湾—南海、太平洋的水汽贡献差异不大,但与江淮梅雨的水汽源地对比,淮北雨季来自印度洋的水汽输送贡献少 20%,而来自欧亚大陆偏多 19%。从水汽来源的侧面也表明江淮梅雨和淮北雨季具有相对独立性。

(2) 来自印度洋、孟湾—南海以及欧亚大陆水汽贡献的变化对江淮梅雨和淮北雨季降水异常有重要影响。江淮梅雨偏多年,印度洋的水汽输送贡献比梅雨偏少年减少 17%,孟湾—南海则增加了 11%。在淮北雨季偏多年,印度洋的水汽输送贡献比偏少年多 19%,孟湾—南海和欧亚大陆的水汽输送则分别减少 6%和 17%。总之,当孟湾—南海水汽输送增强,印度洋水汽输送偏弱时,江淮梅雨偏多;而印度洋水汽输送加强,孟湾—南海水汽输送减少,欧亚大陆的水汽输送明显减少时,淮北雨季降水偏多。

必须注意的是,文中驱动 HYSPLIT_4.9 模式的资料采用的是 NCEP 再分析数据, Zhou et al (2005), Lei and Zhou (2012) 的研究表明,用不同资料(如 NCEP、ERA40 等)计算得到的水汽输送结果,存在一定的差异。本文同样利用 ERA40 资料进行了对比模拟试验(图略),其结果虽然与 NCEP 结果存在一定的差异,但不影响最终结论。

参考文献 (References)

- Brimelow C J, Reuter W G. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 6 (4): 23–440.
- 陈斌, 徐祥德, 施晓晖. 2011. 拉格朗日方法诊断 2007 年 7 月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区 [J]. *气象学报*, 69 (5): 810–818.
- Chen 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.
- 陈隆勋, 张博, 张瑛. 2006. 东亚季风研究的进展 [J]. *应用气象学报*, 17 (6): 711–712.
- Chen Longxun, Zhang Bo, Zhang Ying. 2006. Progress in research on the East Asian monsoon [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 17 (6): 711–712.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition [J]. *Aust. Meteor. Mag.*, 47: 295–308.
- Drumond A, Nieto R, Gimeno L. 2011. On the contribution of the tropical western hemisphere warm pool source of moisture to the Northern Hemisphere precipitation through a Lagrangian approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D00Q04, doi:10.1029/2010JD015397.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. *气象学报*, 61 (2): 129–145.
- Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (2): 129–145.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. *地理学报*, 61 (7): 675–686.
- Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 61 (7): 675–686.
- 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 [J]. *大气科学*, 35 (2): 361–371.
- 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.
- 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 [J]. *气象学报*, 71 (2): 295–304.
- Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis on water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze–Huaihe valley using the Lagrangian method [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71 (2): 295–304.
- Jiang Z, Yang S, He J, et al. 2008. Interdecadal variations of East Asian summer monsoon northward propagation and influences on summer precipitation over East China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100 (1–4): 101–119, doi:10.1007/s00703-008-0298-3.
- Lei Feng, Zhou Tianjun. 2012. Water vapor transport for summer precipitation over the Tibetan Plateau: Multi-dataset analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D20114, doi:10.1029/2011JD017012.
- 吕军. 2012. 淮北雨季的确定及其气候特征研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Lü Jun. 2012. Definition for north Huabei river rainy season and its climatic characteristics (in Chinese) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing University of Information Science & Technology.
- Lü Jun, Jiang Zhihong, Peng Huaqing. 2012. New definition for north Huaihe River rainy season and atmospheric circulation characteristics in precipitation anomaly years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 18 (4): 521–527.
- 马京津, 于波, 高晓清, 等. 2008. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响 [J]. *高原气象*, 27 (3): 517–523.
- Ma Jingjin, Yu Bo, Gao Xiaqing, et al. 2008. Change of large scale circulation and its impact on the water vapor over North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 517–523.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. *气象学报*, 2011, 69 (2): 334–343.
- Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (2): 334–343.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征 [J]. *气象学报*, 63 (1): 93–99.
- Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. 2005. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key

- areas of the plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (1): 93–99.
- Ninowiya K. 1999. Moisture balance over China and the South China Sea during the summer monsoon in relation to the intense rainfalls over China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77 (3): 737–751.
- Perry L B, Konrad C E, Schmidlin T W. 2007. Antecedent upstream air trajectories associated with northwest flow snowfall in the southern Appalachians [J]. *Wea. Forecasting*, 22 (2): 334–351.
- Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux audits association with rainfall over China in summer [J]. *J. Climate*, 12 (5): 1353–1367.
- Sodemann H, Stohl A. 2009. Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L22803, doi:10.1029/2009GL040242.
- 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.
- 吴增福, 徐子风, 韩长春, 等. 1985. 淮北雨季的中长期预报[J]. *气象科学*, (3): 79–84. Wu Zengfu, Xu Zifeng, Han Changchun, et al. 1985. The study on the long and medium range forecast of rainy season over Huai-bei area[J]. *Scintia Meteorologica Sinica* (in Chinese), (3): 79–84.
- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析 [J]. *大气科学*, 30 (3): 392–401. Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, He Jinhai. 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (3): 392–401.
- 谢安, 毛江玉, 宋焱云, 等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征 [J]. *应用气象学报*, 13 (1): 68–77. Xie An, Mao Jiangyu, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (1): 67–77.
- 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 2003. 长江流域梅雨带水汽输送源—汇结构 [J]. *科学通报*, 48 (21): 2288–2294. Xu Xiangde, Chen Liangshou, Wang Xiurong, et al. 2003. The structure of moisture sources–sink over Yangtze basin in Meiyu period [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 48 (21): 2288–2294.
- 周天军, 张学洪, 王绍武. 1999. 全球水循环的海洋分量研究[J]. *气象学报*, 57 (3): 264–282. Zhou Tianjun, Zhang, Xuehong, Wang Shaowu. 1999. The air–sea freshwater exchange derived from NCEP/NCAR reanalysis data [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (3): 264–282.
- 周天军, 宇如聪, 张学洪, 等. 2001. 海气耦合气候模式对大气中水汽输送、辐散辐合与海气间水通量交换的模拟 [J]. *大气科学*, 25 (5): 596–608. Zhou Tianjun, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. 2011. Features of atmospheric moisture transport, convergence and air–sea freshwater flux simulated by the coupled climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (5): 596–608.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D08104, doi:10.1029/2004JD005413.
- 周曾奎. 2006. 江淮梅雨的分析 and 预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1–184. Zhou Zengkui. 2006. *The Analysis and Forecast of Jianghuai Meiyu* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. *大气科学*, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Dong Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (2): 195–204.