

基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析^{*1}

江志红¹ 任伟¹ 刘征宇^{1,2} 杨浩¹

JIANG Zhihong¹ REN Wei¹ LIU Zhengyu^{1,2} YANG Hao¹

1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京信息工程大学,南京,210044

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

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

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

2012-04-01 收稿,2012-06-04 改回.

江志红,任伟,刘征宇,杨浩. 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 Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, Yang Hao. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze—Huaihe River valley using the Lagrangian method. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(2): 295-304

Abstract Using the NCEP reanalysis data and the airflow trajectory model based on the Lagrangian method (HYSPLIT_4. 9), the climatological characteristics of water vapor transport associated with the Meiyu and its differences in the abnormal years have been discussed in this paper. The results showed that the water vapor of the Meiyu mainly come from the Bay of Bengal—South China Sea, the Indian Ocean, the Pacific region and the Eurasian continent, accounting for 19%, 35%, 22% and 19% of the total moisture transport, respectively. Among of them, the water vapor over the Indian Ocean, the Bay of Bengal—South China Sea and the Pacific Ocean are from the lower troposphere under the 850 hPa, while the water vapor over the Eurasian continent comes from the middle troposphere. Besides, by comparing with the differences in the abnormal years, we found that water vapors from the Bay of Bengal—South China Sea, the India ocean, and the Pacific region have import influences on the Meiyu anomalies. In wet Meiyu years, water vapor coming from the Bay of Bengal—South China Sea is more by 13% than that in dry Meiyu years, reaching to 24%, but for the areas of the Pacific and India Oceans in dry years, the contribution rates of water vapor are 40% and 30% respectively.

Key words The Meiyu over the Yangtze—Huaihe River valley, Water vapor transportation, Lagrangian trajectory

摘要 利用 NCEP 再分析资料,引入基于拉格朗日方法的气流轨迹模式(HYSPLITv4.9),结合用于海量轨迹分析的气块追踪分析方法,探讨了江淮梅雨气候平均的水汽输送特征以及梅雨异常年水汽输送的差异。结果表明,在气候态下,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 4 个区域,其对江淮梅雨的水汽输送贡献分别为 35%、19%、22%和 19%。其中,印度洋、孟加拉湾—中国南海和太平洋上的输送气流主要来自 850 hPa 以下的对流层低层,而欧亚大陆的输送气流主要来自 600 hPa 左右的对流层中层。进一步对比梅雨异常年水汽输送的差异,发现孟加拉湾—中国南海、太平洋和印度洋的水汽输送对江淮梅雨的异常有重要影响,梅雨偏多年来自孟加拉湾—中国南海的水汽输送较多,其对江淮梅雨的水汽输送贡献为 24%,比梅雨偏少年约增加了 13%,梅雨偏少年则是来自太平洋和印度洋的水汽输送较多,对江淮梅雨的水汽输送贡献分别达到了 40%和 30%,比梅雨偏多年约增加了 5%和 10%。

关键词 江淮梅雨,水汽输送,拉格朗日轨迹

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906016)、国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950401)、国家科技支撑计划(2009BAC51B01)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介:江志红,主要从事气候学研究。E-mail:zhjiang@nuist.edu.cn

中图法分类号 P426 P434+.5

1 引言

大气中的水汽输送是地-气系统水循环的重要组成部分,水汽输送及其来源作为影响中国夏季降水的重要因子,一直受到中外气象界的高度关注。谢义炳等(1959)和 Murakami(1959)指出,中国夏季降水的两个水汽来源,一是从太平洋高压南部以东南风及南风的形式输送到中国内陆,二是从印度低压的东南方以西南风的形式输送到中国西南部。陆渝蓉等(1984)认为,夏季中国大陆上空的水汽主要来自孟加拉湾、中国南海及中国东海的西南和东南气流输送。Tao 等(1987)发现来自中国南海和孟加拉湾的西南风水汽输送是中国夏季强降水发生的重要条件。沈如桂等(1980)和高国栋等(1999)分别研究了长江中下游和淮河流域多年平均的水汽输送特征。谢安等(2002)讨论了夏季长江中下游地区水汽输送的气候特征,发现来自孟加拉湾经中南半岛的水汽输入和来自华南的水汽输入是长江中下游地区水汽的主要来源。值得注意的是,上述有关水汽输送及来源的研究大多基于欧拉方法,由于大气风场往往具有瞬时变化特征,导致欧拉方法给出的水汽通量随时间变化往往也具有瞬变特征,最终只能给出简单的水汽输送路径(James, et al, 2004; 陈斌等, 2011),无法定量给出水汽源-汇关系,也无法区分各水汽源地对降水贡献的大小。

近年来,基于拉格朗日框架下发展的轨迹分析方法为水汽输送过程研究及其源-汇研究提供了一个很好的技术途径。拉格朗日方法通过计算气块的三维运动轨迹,可以比较清晰地确定气块的输送源地。因此,中外不少学者开始应用拉格朗日方法研究区域降水的水汽输送过程。如: Brimelow 等(2005)利用气流轨迹模式 HYSPLIT 研究了马更些河流域的 3 次极端降水,通过对强降水流域内气流轨迹空间位置和物理属性的诊断,指出低层水汽的主要来源为墨西哥湾。Perry 等(2007)使用拉格朗日方法分析了阿巴拉契亚山脉南麓降雪的水汽来源,研究发现对流层低层来自北美五大湖的水汽输送对高海拔迎风坡的降雪有重要影响。Sodemann 等(2009)利用拉格朗日轨迹模式诊断了南极降水的水汽来源,发现南极的地形、海冰的季节变化以及南

半球中纬度的海-陆分布对南极降水的水汽输送有重要影响。Gimeno 等(2010)使用轨迹模式(FLEXPART)研究了印度半岛的水汽输送状况,发现来自副热带北大西洋的水汽输送明显比来自南印度洋和北太平洋的水汽输送强。Drumond 等(2011)通过分析气团的运动轨迹发现,热带西半球暖池的水汽输送对北美夏季降水有重要贡献。江志红等(2011)利用拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT 分析了 2007 年淮河暴雨期的水汽来源,通过定量对比各通道的水汽贡献,发现此次淮河暴雨 3 个阶段的主要水汽来源各不相同。但是,以上基于拉格朗日方法的研究大多是针对单个降水事件和降水过程,对于较长时间尺度水汽输送及其源-汇的气候特征,由于分析涉及到大量的轨迹,并且,对这些轨迹的分析缺乏客观定量的方法,因此,目前尚未见到这方面的研究。

江淮梅雨是东亚夏季风降水的典型代表,梅雨期降水的年际变率很大,降水多寡将直接导致江淮洪涝和干旱的形成。充沛的水汽输送是梅雨形成的必要条件,因此,分析梅雨的水汽来源及输送状况对于研究梅雨成因和机理有重要意义。关于江淮梅雨的水汽输送及来源已有大量研究(陈隆勋等, 2006; 徐祥德等, 2003; 周玉淑等, 2005; 竺夏英等, 2007; Jiang, et al, 2008; 张雪梅等, 2009),并得到了很多有意义的结果,然而其研究大都是基于欧拉方法,无法定量给出梅雨期各个源地的水汽输送贡献。特别是缺乏对梅雨异常年水汽源地差异的分析。

针对上述问题,本文利用美国 NOAA 空气资源实验室开发的拉格朗日轨迹模式(HYSPLIT),根据 1980—2009 年 NCEP 再分析资料,模拟计算江淮梅雨期干、湿气块运动及其变化的状况,结合气块追踪分析法,得到江淮梅雨期水汽输送及其来源的气候特征,并进一步定量对比江淮梅雨异常年水汽输送的差异。以期加深对江淮梅雨水汽输送特征的认识,为江淮流域的旱涝预测提供参考依据。

2 资料与计算方法

2.1 资料

使用的资料为 1980—2009 年 NCEP 的 6 h 一次、水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的大气环流资料,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); 同期中国 754 个测站逐日降水量资料。

2.2 轨迹模式简介

本文采用由 Draxler 等(1997, 1998)开发的供质点轨迹、扩散及沉降分析用的综合模式 HYSPLIT_4.9。HYSPLIT_4.9 分析气流轨迹的思路是假设气块随风飘动, 以气块一个时间步长的运动为例, 气块的最终位置由其初始位置(P)和第一猜测位置(P')之间的平均速度计算得到。

气块的第一猜测位置

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

气块的最终位置

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

式中, Δt 为时间步长, 要求一个时间步长内气块的移动距离不超过 0.75 个格距, 即 $\Delta t < 0.75u_{\max}$, u_{\max} 为最大风速, 本文选取的时间步长 Δt 为 6 h。

需要指出的是 HYSPLIT 模式采用的是地形坐标, 因此, 输入的气象数据在垂直方向上需要内插到地形追随坐标系, 水平方向则保持其原来格式

$$\sigma = \frac{Z_{\text{top}} - Z_{\text{mst}}}{Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}} \quad (3)$$

式中, Z_{top} 为轨迹模式坐标系统的顶部, Z_{gl} 为地形高度, Z_{mst} 为坐标下边界高度。

2.3 轨迹模拟方案

模拟区域选取江淮流域 (28° — 34° N, 110° — 120° E) $6^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的区域, 水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。由于江淮梅雨每年的起讫时间存在一定的年际变化(陈兴芳等, 2000; 胡娅敏等, 2008; 梁萍等, 2010), 结合本文的研究区域, 选取 1980—2009 年逐年 6 月 10 日—7 月 15 日为江淮梅雨期, 模拟时间也相应取这个时段, 因为水汽输送多集中在对流层中低层, 所以, 垂直方向上选取 850 和 700 hPa 两个层次作为模拟的初始高度(由于 700 hPa 层的结果与 850 hPa 的非常相似, 因此, 后面的分析只给出了 850 hPa 的结果)。整个模拟空间的轨迹初始点为 48 个(每层均按照 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的分辨率均匀选取了 24 个初始点, 两层共 48 个初始点), 模拟其后向追踪 11 d 的三维运动轨迹, 6 h 输出一次轨迹点的位置, 并插值得到相应位置上气块的物理属性(如相对湿度、温度等), 每

隔 6 h 所有轨迹初始点重新后向追踪模拟 11 d。

2.4 气块追踪分析法

由于轨迹模式模拟长时间尺度(几十年)得到的轨迹数量非常大, 对这些轨迹的分析缺乏客观定量的研究方法, 为此提出了气块追踪分析方法, 其基本思路是: (1) 利用 HYSPLIT_4.9 模式, 计算得到 1980—2009 年逐年 6 月 10 日—7 月 15 日气块后向追踪过程中每隔 6 h 的位置, 并插值得到相应位置上气块的物理属性; (2) 确定后向追踪的气块到达江淮流域前某一时刻(如前 1 天)所处位置, 并统计 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的网格内气块的个数; (3) 绘制到达江淮流域前某一时刻气块个数及其物理属性的空间分布。主要通过分析气块到达江淮流域前 1 天(-1 d)至前 11 天(-11 d)的情况来了解江淮梅雨的水汽输送情况。

分辨率误差: 考虑到驱动轨迹模式的 NCEP 资料时空分辨率较低, 为了分析模式的分辨率误差, 采用类似于样本误差分析的方法, 即对轨迹初始点的位置做多次(最少 10 次)随机平移(10、30、50 km), 并重新模拟气块后向运动轨迹(平移初始点的位置并重新模拟轨迹相当于随机抽样), 计算每个时刻多次平移 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格内气块个数的平均值及标准差, 通过标准差与均值的比值, 即变差系数来评估模式的分辨率误差。图 1a 给出了气块到达江淮流域前 1 天(-1 d)各个网格气块个数 10 次平移变差系数的空间分布。可以看出 10 次平移引起的变差系数都低于 0.1, 即标准差远小于均值, 这表明气块后向追踪 1 d 模式的分辨率误差很小。但随着后向追踪时间的增长, 模式分辨率误差会逐渐增加, 如图 1b 气块后向追踪 12 d, 变差系数明显增大, 尤其是在西北欧亚大陆和太平洋上的部分区域变差系数已经超过 0.7, 表明此时模式在这些地方的分辨率误差已经较大, 因此, 将气块后向追踪的时间定为 11 d 以内。

2.5 不同区域空气块及其水汽输送贡献率的计算

$$Q_{s1} = \frac{\sum_1^m i}{\sum_1^n i} \times 100\% \quad (4)$$

$$Q_{s2} = \frac{\sum_1^m q_{\text{last}}}{\sum_1^n q_{\text{last}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, Q_{s1} 和 Q_{s2} 分别为某一区域输送的空气块及其

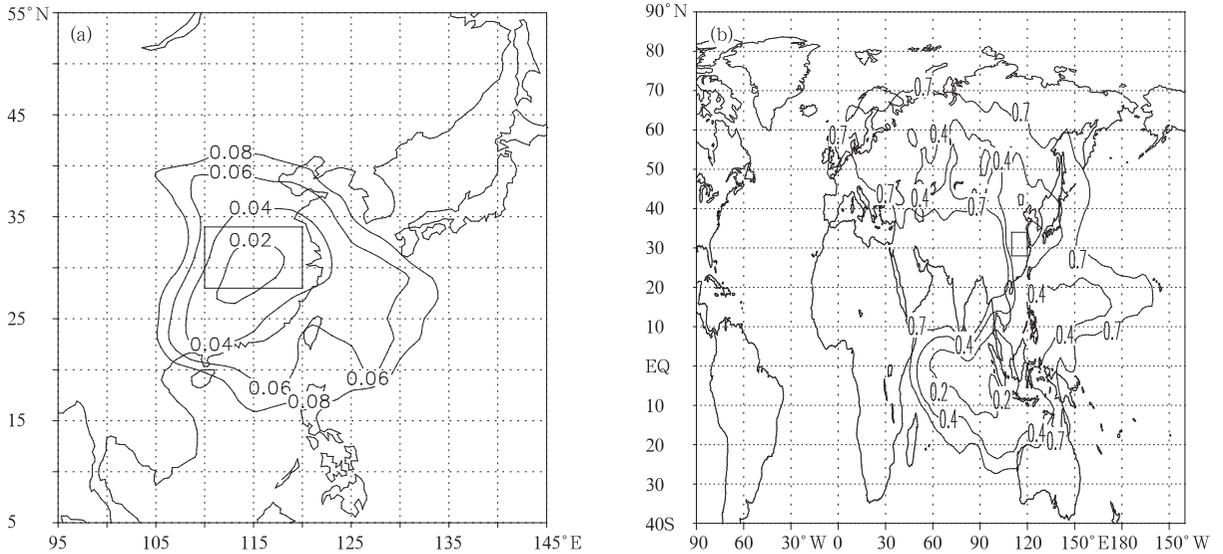


图 1 10 次平移实验的标准差与平均值之比

(a. 1 天前, b. 12 天前)

Fig. 1 Ratio of the standard deviation average to the average of 10 translation experiments

(a) 1 day ago, and (b) 12 days ago

水汽的贡献率, q_{last} 为空气块最终位置的比湿, m 为该地区所包含空气块的个数, n 为空气块的总数。

3 江淮流域梅雨期低层水汽输送的气候特征

3.1 江淮梅雨期水汽来源的追踪

利用拉格朗日轨迹模式对江淮梅雨空气块后向运动轨迹的模拟, 通过气块追踪分析方法, 可以较清晰地确定江淮梅雨的水汽来源。图 2 给出了近 30 a (1980—2009 年) 梅雨期 (6 月 10 日—7 月 15 日) 的空气块及其携带的水汽到达江淮流域前 1 天 (-1 d) 的空间分布, 图 2a 为气块的空间分布, 图 2b 为气块携带水汽的空间分布。可以看到 1 天前 (-1 d) 空气块及其携带的水汽主要位于江淮流域及其周围一带, 空气块及其湿度的大值区都向西南方向倾斜。由于从南侧输送来的空气块的湿度较北侧的大一些, 所以, 空气块湿度的等值线比空气块的等值线普遍偏南些。从阴影图上可以看到, 1 天 (-1 d) 前空气块的高度和温度主要呈东南—西北走向, 从东南向西北空气块的高度逐渐升高, 温度逐渐降低。6 天 (-6 d) 前 (图 3), 空气块向南可以追踪到孟加拉湾—中国南海, 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。此时空气块及其湿度的大值区主要位于孟加拉湾—中国南海一带, 西太平洋上的次之, 西伯利亚和东欧大陆上空的最少。此时气块的高度和温度分布仍呈东南—西北走向, 东南洋面为低空暖湿气团, 西北大陆为高空干冷气团。图 4 为 11 天 (-11 d) 前的情况, 11 天前向南的空气块追踪到了印度洋和澳大利亚一带, 向北的空气块则追踪到了北极圈附近。向东的空气块越过了 180° 推进到了东太平洋, 向西的空气块则越过了北大西洋伸展到了北美, 此时空气块及其湿度的极大值区主要位于印度洋。从气块的高度和温度分布来看, 印度洋、孟加拉湾—中国南海和太平洋附近的空气块大都位于 850 hPa 低空, 气块温度较高, 基本都在 10°C 以上, 而欧亚大陆和北大西洋附近的空气块则主要位于 700 hPa 以上的高空, 气块温度较低, 基本都在 0°C 以下。

通过对空气块及其携带水汽后向追踪情况的分析, 可以发现江淮梅雨水汽源地大致有 3 个: (1) 西南方向的印度洋和孟加拉湾—中国南海; (2) 东南方向的太平洋; (3) 西北方向的欧亚大陆。其中, 印度洋、孟加拉湾—中国南海和太平洋上的输送气块主

要来自低空,气块的起始温度高,而欧亚大陆上的输送气块主要位于 700 hPa 以上的高空,气块的起始

温度低。

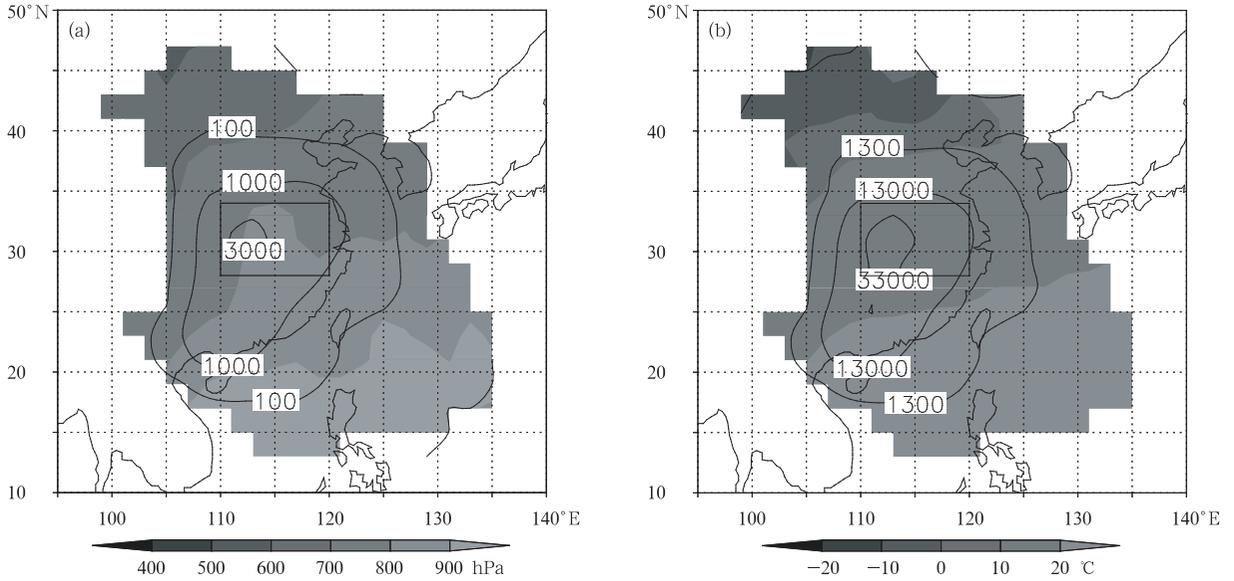


图 2 气候平均(1980—2009 年)梅雨期的空气块到达江淮流域前 1 天的空间分布
 (a. 空气块(等值线为空气块的个数,阴影为空气块的高度),b. 空气块携带水汽(等值线为空气块个数×比湿(g/kg),
 阴影为空气块的温度,方框为江淮流域)

Fig. 2 Spatial distribution of the air parcels reaching the Yangtze - Huaihe valley 1 day ago during the Meiyu period from 1980 to 2009

((a) the air parcels (contour line stands for the number of dry air parcel, shaded for its height), and (b) the moisture by air parcels (contour line stands for specific humidity, unit: g/kg; shaded for its temperature; box stands for the Yangtze - Huaihe valley)

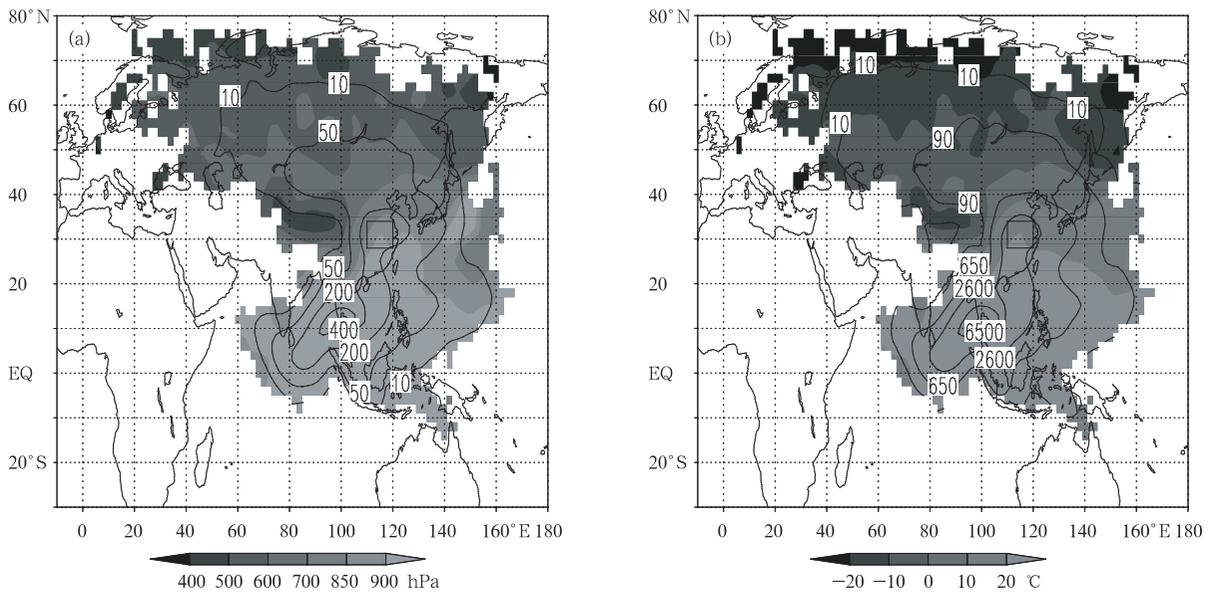


图 3 同图 2,但为 6 天前的情况
 Fig. 3 As in Fig. 2 but for 6 days ago

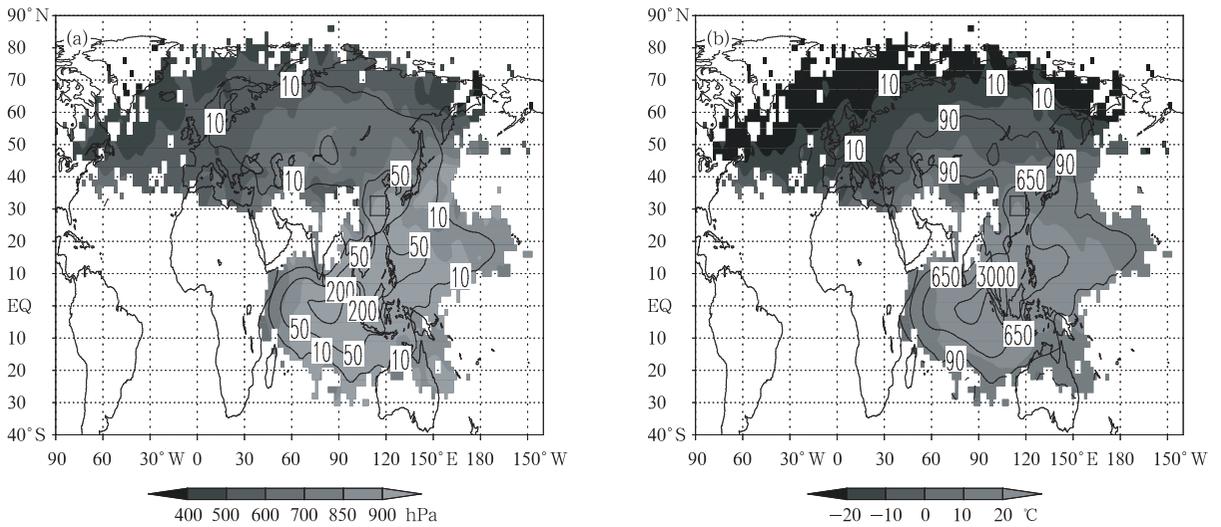


图4 同图2, 但为11天前的情况
Fig. 4 As in Fig. 2 but for 11 days ago

3.2 不同源地水汽输送贡献

为了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(江淮流域及其周围)、太平洋、孟加拉湾—中国南海、印度洋5个部分(图5a), 并由式(4)、(5)计算不同区域空气块及其水汽的输送贡献。图5b给出了各区域空气块及其携带水汽的输送贡献, 可以看出, 江淮梅雨期印度洋的输送贡献最大, 向江淮流域输送的空气块占整个输送气流的30%, 空气块携带的水汽对江淮梅雨的水汽输送贡献达到35%左右。其次是太平洋, 其向江淮流域输送的空气块占整个输送气流的20%左右, 空气块携带的水汽对江淮梅雨的水汽输送贡献也为20%左右。孟加拉湾—中国南海对江淮梅雨的水汽输送贡献略小于太平洋, 约为19%。来自欧亚大陆的空气块虽然较多(占整个输送气流的25%以上), 但由于欧亚大陆上空的空气比较干燥, 空气块携带的水汽并不多, 其对江淮梅雨的水汽输送贡献仅为19%。此外, 来自局地的空气块并不多, 其对江淮梅雨的水汽输送贡献只有5%。

图6a、b给出了不同源地气块输送过程中高度、湿度和温度的演变, 可以看出, 源自欧亚大陆的气块主要来自600 hPa左右的对流层中层, 气块的初始湿度和温度较低, 在输送过程中沿途下沉侵入江淮流域上空。印度洋和孟加拉湾—中国南海的气块主要来自900 hPa以下贴近中低纬度海平面的高度, 由于热带洋面蒸发旺盛, 因此, 气块携带的水汽较

多, 在登陆的过程中由于下垫面地形的变化致使气块的高度急剧抬升, 气块的比湿和温度显著减少和降低。太平洋气块的输送过程与孟加拉湾—中国南海的类似, 但由于太平洋气块输送过程中途经的地形较为平缓, 其高度、湿度和温度的变化并不像孟加拉湾—中国南海的那么剧烈。局地气块的高度、湿度和温度在整个输送过程中基本没有什么变化。

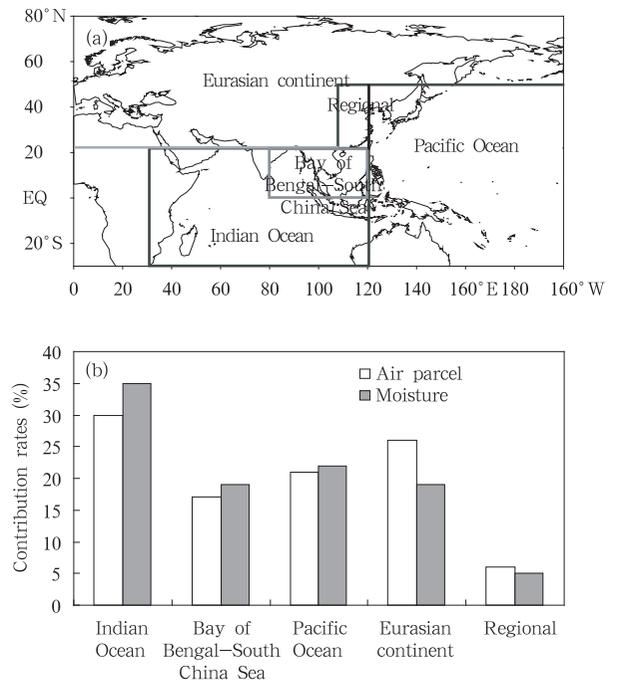


图5 不同区域(a)输送的空气块及(b)其水汽的贡献率
Fig. 5 Contribution rates of the air parcels and its moisture (b) from the various regions (a)

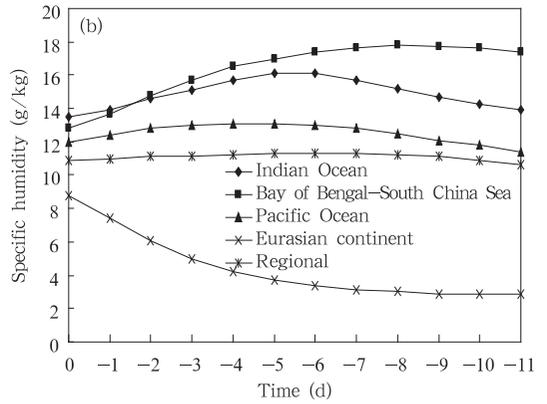
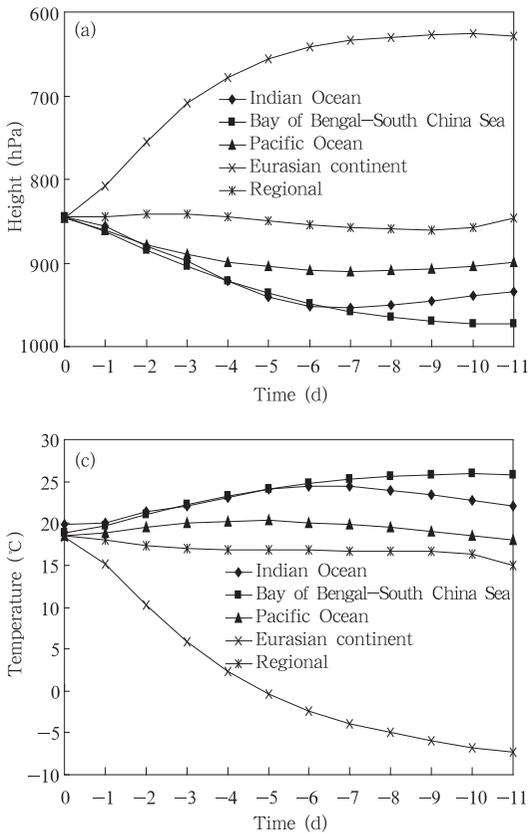


图6 气块输送过程中气块
(a)高度、(b)比湿、(c)温度变化
Fig. 6 Changes in the (a) height,
(b) specific humidity and (c) temperature
of air parcel in the process of transmission

综合分析,可以发现江淮梅雨的水汽有 35% 来自印度洋的输送,22% 来自太平洋,孟加拉湾—中国南海和欧亚大陆的水汽输送贡献各占总体的 19%, 局地的水汽输送贡献非常小(5% 以下)。印度洋、孟加拉湾—中国南海和太平洋 3 个区域的输送气流主要来自 850 hPa 以下的对流层低层,气流在输送过程中由于下垫面地形的变化会出现不同程度的抬升,气流的比湿和温度有一定的减小和降低。欧亚大陆上的输送气流主要来自 600 hPa 左右的对流层中层,在输送过程中气块温度上升,并下沉侵入江淮流域上空。

4 江淮梅雨异常年水汽输送的差异

4.1 江淮梅雨异常年的选取

利用全中国 754 站日降水量,计算江淮流域(28°—34°N, 110°—120°E)1980—2009 年梅雨期平均降水的距平,选取区域降水距平大于 1.5 倍标准差为梅雨异常多年,区域降水距平小于 -1.25 倍标准差为梅雨异常少年,并对比已有的研究(吴志伟等,2006;胡娅敏等,2008;竺夏英等,2007),选取了 3 个梅雨异常多年(1983、1991、1996 年)和 2 个梅雨异常少年(1985、1994 年)进行合成分析。

4.2 梅雨异常年水汽输送的差异

考虑到空气块本身对梅雨异常的影响很小,因此,下面主要讨论梅雨异常年空气块携带水汽的差异,图 7 为气块携带的水汽到达江淮流域 1 天(-1 d)前江淮梅雨异常年的合成与 30 a 气候平均的差值,根据前述模式分辨率误差中所计算出的标准差,定义空气块携带水汽的异常超过 ± 3 倍标准差为显著异常,并用阴影表示,图 7a 为梅雨偏多年,图 7b 为梅雨偏少年。可以看出 1 天前江淮梅雨异常年空气块携带的水汽主要表现为东西向差异,梅雨偏多年江淮流域西部的空气块携带的水汽较多,而江淮流域东部的空气块携带的水汽较少;梅雨偏少年的情况与此相反,表现为江淮流域东部的空气块携带的水汽较多,而来自江淮流域西部的空气块携带的水汽较少。图 8 为 6 天(-6 d)前的情况,梅雨偏多年位于孟加拉湾—中国南海的空气块携带的水汽较多,而位于太平洋的空气块携带的水汽则较少,梅雨偏少年则表现为来自太平洋的空气块输送的水汽较多,而来自孟加拉湾—中国南海的空气块输送的水汽明显偏弱。11 天(-11 d)前梅雨异常年空气块携带水汽的差异并不像前面几天那么规律,梅雨偏少年表现为来自孟加拉湾—中国南海附近的空气块

输送的水汽较常年偏少,而来自太平洋和澳大利亚附近洋面的空气块输送的水汽较常年偏多。梅雨偏多年则表现为从苏门达腊岛到南海的一个水汽输送的正异常带。

根据前面的分区,图 10 定量给出了梅雨异常年各区域空气块的水汽输送贡献,可以看到梅雨偏少年,孟加拉湾—中国南海的空气块携带的水汽明显偏少,其对江淮梅雨的水汽输送贡献只有 11%,比梅雨偏多年减少了 13%左右,而印度洋和太平洋的空气块携带的水汽则较多,对江淮梅雨的水汽输送

贡献分别达到了 40%和 30%,比梅雨偏多年增加了 5%和 10%左右。梅雨偏多年则主要是孟加拉湾—中国南海的空气块输送的水汽较多,其对江淮梅雨的水汽输送贡献为 24%,比梅雨偏少年增多了 13%左右,而来自印度洋和太平洋的空气块携带的水汽要比梅雨偏少年弱,对江淮梅雨的水汽贡献分别为 35%和 20%,比梅雨偏少年少了 5%和 10%左右。欧亚大陆和局地的空气块携带的水汽在梅雨异常年并没有明显的差异。

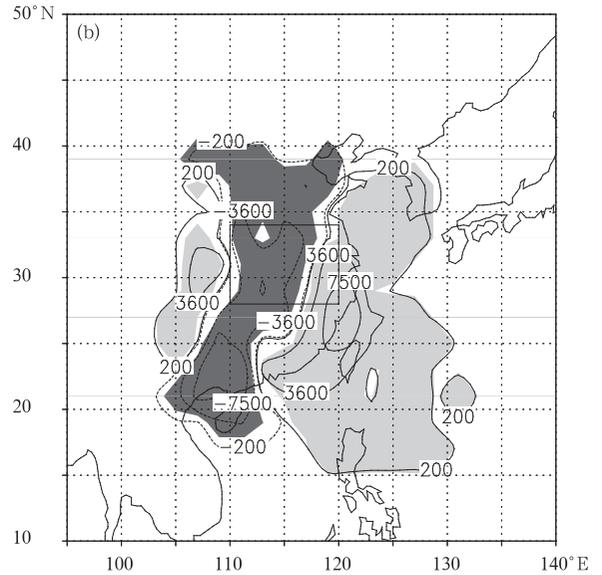
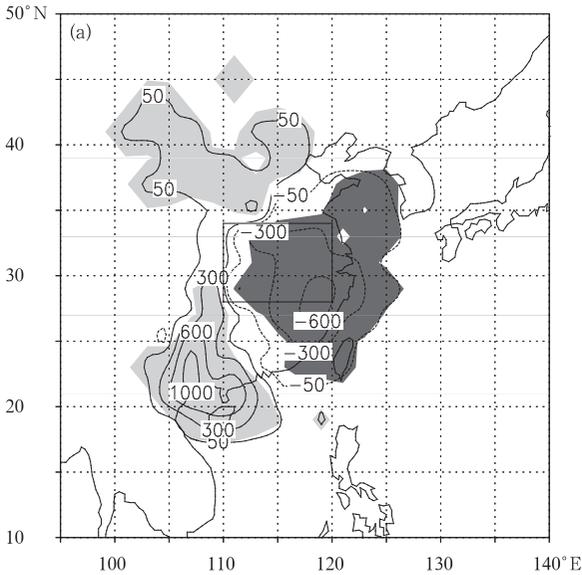


图 7 1 天前梅雨偏多年(a)、偏少年(b)与气候平均梅雨期空气块携带水汽的差值(阴影为差值超过±3 倍标准差)

Fig. 7 Differences of the moisture by air parcel between abnormal years and the climate average Meiyu for 1 day ago

((a) Wet Meiyu years, and (b) Dry Meiyu years; shaded for the differences which exceed 3 times the standard deviation)

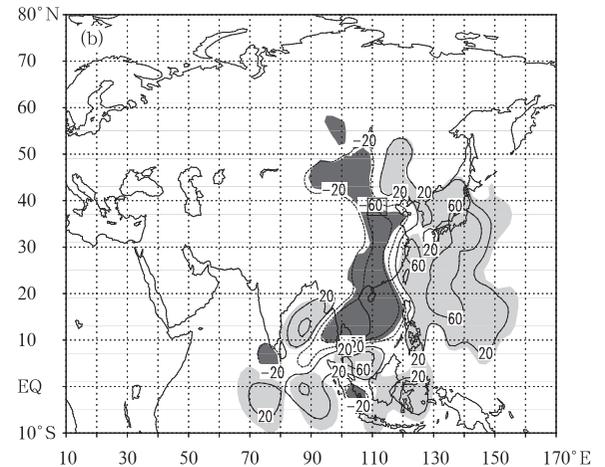
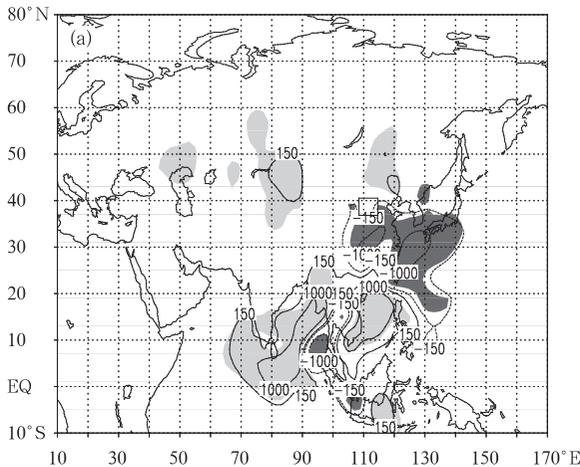


图 8 同图 7, 但为 6 天前的情况

Fig. 8 As in Fig. 7 but for 6 days ago

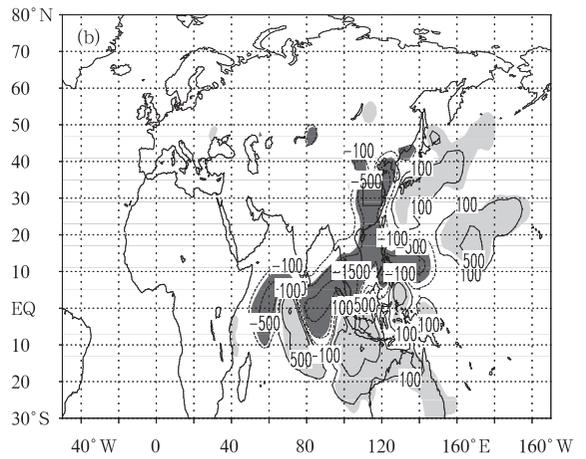
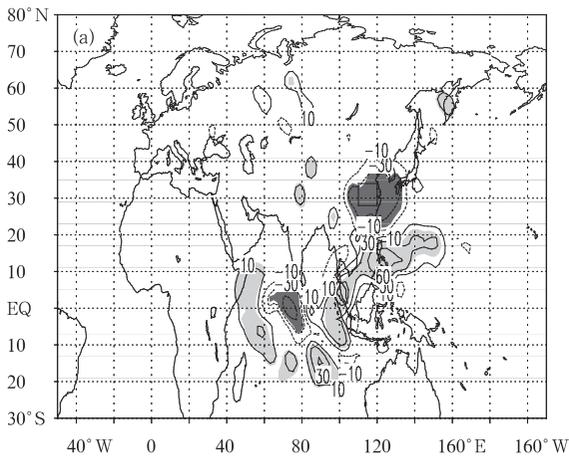


图9 同图7,但为11天前的情况
Fig.9 As in Fig.7 but for 11 days ago

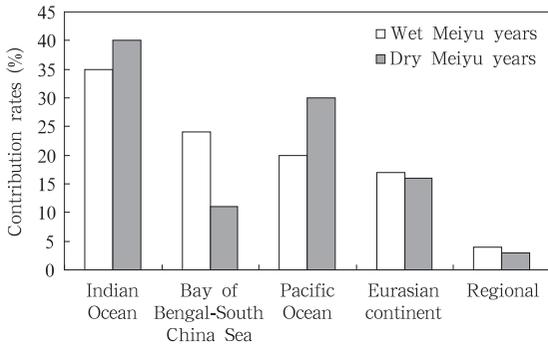


图10 梅雨异常年不同区域空气块的水汽输送贡献率

Fig.10 Contribution rates of the moisture transfer by air parcel from the various regions in the Meiyu abnormal years

综上所述,可以发现来自孟加拉湾—中国南海、太平洋和印度洋上的水汽输送对江淮梅雨的异常有重要影响,梅雨偏多年来来自孟加拉湾—中国南海的水汽输送较多,对江淮梅雨的水汽输送贡献为24%,比梅雨偏少年增加了13%左右;梅雨偏少年则是来自太平洋和印度洋的水汽输送较多,对江淮梅雨的水汽输送贡献分别达到了40%和30%,比梅雨偏多年增加了5%和10%左右。

众所周知,水汽输送异常往往与一定的环流形势(图略)相联系,不少研究(胡娅敏等,2010;汪靖等,2009)表明,梅雨偏少年西太平洋副热带高压位置往往偏东、偏北,印度季风低压较常年偏强,不利于中国南海和孟加拉湾东侧向北的水汽输送,前述研究则进一步表明梅雨偏少年来自孟加拉湾—中国

南海的水汽输送贡献只有11%,比梅雨偏多年减小了13%左右。梅雨偏多年,由于副热带高压的西伸南压以及印度季风低压的减弱,有利于中国南海和孟加拉湾东侧向北的水汽输送,定量分析的研究表明,梅雨偏多年来自孟加拉湾—中国南海的水汽输送贡献为24%,比梅雨偏少年增加了13%左右;显然本文工作从定量的角度给出了梅雨异常年水汽源地输送贡献的差异。

5 讨论与结论

利用拉格朗日轨迹模式(HYSPLIT),模拟了1980—2009年江淮梅雨期空气块运动及其变化的状况,结合气块追踪分析法,研究江淮梅雨期水汽输送及其来源的气候特征,并定量分析江淮梅雨异常年水汽输送的差异。得到了以下结论:

(1)气候平均态中,江淮梅雨的水汽主要来源于印度洋、孟加拉湾—中国南海、太平洋和欧亚大陆,对江淮梅雨的水汽输送贡献分别为35%、19%、22%和19%。其中,印度洋、孟加拉湾—中国南海和太平洋上的输送气流主要来自850 hPa以下的对流层低层,气流在输送过程中由于下垫面地形的变化会出现不同程度的抬升过程,欧亚大陆上的输送气流主要来自600 hPa左右的对流层中层,在输送过程中沿途下沉侵入江淮流域上空。

(2)来自孟加拉湾—中国南海、太平洋和印度洋的水汽输送对江淮梅雨的异常有重要影响,梅雨偏多年来自孟加拉湾—中国南海的水汽输送较多,其对江淮梅雨的水汽输送贡献为24%,比梅雨偏少年

增加 13%，而梅雨偏少年则是来自太平洋和印度洋的水汽输送较多，对江淮梅雨的水汽输送贡献分别为 40% 和 30%，比梅雨偏多年增加了 5% 和 10% 左右。

与已有研究相比，本文提出气块追踪分析法将拉格朗日方法用于几十年时间尺度水汽输送气候特征的分析，为处理气候尺度数量庞大的气流轨迹提供了一种简单易行的分析方法。但由于本文使用的轨迹模式 HYSPLIT_4.9 中尚未考虑气流输送过程中气块水汽含量的变化，在垂直方向上仅分析了 850 和 700 hPa 的水汽输送情况，由此得到的水汽输送贡献与真实情况可能存在一定的偏差。值得注意的是，近期基于轨迹模式 FLEXPART 的研究考虑了气块输送过程中水汽的变化，有可能为区域水汽源-汇的研究提供更有效的工具，这也是未来要进一步改善、探讨的问题。

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
- 陈隆勋, 张博, 张瑛. 2006. 东亚季风研究的进展. 应用气象学报, 17(6): 711-712
- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 142-145
- 高国栋, 陆渝蓉, 翟盘茂等. 1999. 淮河流域能量与水分循环研究. 北京: 气象出版社, 75-81
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征. 大气科学, 32(1): 101-112
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2010. 近 52 年江淮梅雨的降水分型. 气象学报, 68(2): 236-247
- 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): 361-371
- 梁萍, 丁一汇, 何金海等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究. 大气科学, 34(2): 418-428
- 陆渝蓉, 高国栋. 1984. 我国大气中平均水汽含量与水分平衡的特征. 气象学报, 42(3): 301-310
- 沈如桂, 罗绍华, 陈隆勋. 1980. 盛夏季风环流与我国降水的关系 // 热带天气会议文集. 北京: 科学出版社, 102-111
- 汪靖, 何金海, 刘宣飞等. 2009. 江淮梅雨建立的年际变化及其前期强影响信号分析. 科学通报, 54(1): 85-92
- 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. 大气科学, 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. 应用气象学报, 13(1): 68-77
- 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): 171-185
- 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. 科学通报, 48(21): 2288-2294
- 张雪梅, 江志红, 刘晓东等. 2009. 东亚地区水汽输送强、弱年水汽输送的异同. 气象学报, 67(4): 561-568
- 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. 大气科学, 29(2): 195-204
- 竺筮英, 何金海, 吴志伟. 2007. 江淮梅雨期降水经向非均匀分布及异常年特征分析. 科学通报, 52(8): 951-957
- Brimelow C J, Reuter W G. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin. J Hydrometeor, 6(4): 23-440
- Draxler R R, Hess G D. 1997. Description of the HYSPLIT_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition. 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 Geophys Res, 116: D00Q04, doi: 10.1029/2010JD015397
- Gimeno L, Drumond A, Nieto R, et al. 2010. On the origin of continental precipitation. Geophys Res Lett, 37(13): L13804, doi: 10.1029/2010GL043712
- James P, Stohl A, Spichtinger N, et al. 2004. Climatological aspects of the extreme European rainfall of August 2002 and a trajectory method for estimating the associated evaporative source regions. Nat Hazards Earth Sys Sci, 4(5-6): 733-746
- Jiang Z H, Yang S, He J, et al. 2008. Interdecadal variations of East Asian summer monsoon northward propagation and influences on summer precipitation over East China. Meteor Atmos Phys, 100: 101-119
- Murakami T. 1959. The general circulation and water vapor balance over the far East during the rainy season. J Geophys Mag, 29(2): 137-171
- Perry L B, Konrad C E, Schmidlin T, et al. 2007. Antecedent upstream air trajectories associated with Northwest flow snowfall in the Southern Appalachians. Wea Forecasting, 22(2): 334-351
- Sodemann H, Stohl A. 2009. Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation. Geophys Res Lett, 36(22): L22803, doi: 10.1029/2009GL040242
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research of East Asian summer monsoon in China. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60-92