孙力,马梁臣, 沈柏竹, 等. 2016. 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 40 (3): 630-646. Sun Li, Ma Liangchen, Shen Baizhu, et al. 2016. A diagnostic study of water vapor transport and budget of heavy rainfall over Northeast China during July to August 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 630-646, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15101.

# 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程的水汽 输送特征分析

孙力<sup>1,2</sup> 马梁臣<sup>1</sup> 沈柏竹<sup>2</sup> 董伟<sup>1</sup> 隋波<sup>2</sup>

1 长春市气象局,长春 130051
 2 吉林省气象科学研究所,长春 130062

**摘 要**本文根据影响天气系统和雨带位置的不同将 2010 年 7~8 月东北地区出现的 22 个暴雨日划分成了三类 暴雨,在以欧拉方法分析了各类暴雨的水汽输送和收支的基础上,利用基于拉格朗日方法的轨迹模式(HYSPLIT v4.9),模拟计算了各类暴雨的水汽输送轨迹、主要通道以及不同源地的水汽贡献。结果表明,影响暴雨的水汽输 送通道有三支,一支是沿西太平洋副高边缘东南气流的水汽输送,另一支是起源于南海北部向北偏东气流的水汽 输送,第三支是西风带西北气流的水汽输送。第一类暴雨中,来自于西太平洋通道和南海通道的水汽输送大体相 当,均很重要,两者可以占总水汽输送的 87.4%。第二类暴雨中,水汽输送路径偏东,西太平洋通道的水汽输送 贡献可达近 70%。第三类暴雨中,虽然西太平洋通道水汽输送仍占主导地位,但北方通道的水汽输送也变得不可 忽视。西太平洋通道的水汽沿途损失较小,并主要被输送到东北地区 850 hPa 及以下的大气之中,而南海通道的 水汽沿途损失较多,与北方通道的水汽一样,主要被输送到东北地区 850 hPa 以上的大气之中。 关键词 东北地区 暴雨过程 水汽输送 水汽收支 拉格朗日轨迹

 文章编号
 1006-9895(2016)03-0630-17
 中图分类号
 P426
 文献标识码
 A

 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15101

 A

 A

# A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget of Heavy Rainfall over Northeast China during July to August 2010

SUN Li<sup>1,2</sup>, MA Liangchen<sup>1</sup>, SHEN Baizhu<sup>2</sup>, DONG Wei<sup>1</sup>, and SUI Bo<sup>2</sup>

Meteorological Bureau of Changchun, Changchun 130051
 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

**Abstract** The 22 heavy rain days that occurred over Northeast China during July–August 2010 were divided into three types according to their differences in synoptic system and precipitation area. Based on an analysis of the water vapor transport and budget using a Eulerian method, the characteristics of the major water vapor passages and their contribution ratios to water vapor transportation were studied using NCEP/NCAR reanalysis data and the HYSPLIT v4.9 model. The results showed that there are three major water vapor passages that act to affect heavy rain over Northeast China. One is the water vapor transport of the southeast moisture current along the edge of the western Pacific subtropical high. Another is the water vapor transport of the southwest moisture current that originates from the north of the South China Sea. And

收稿日期 2015-01-02; 网络预出版日期 2015-07-22

作者简介 孙力,男,1960年出生,研究员,主要从事天气、气候分析和预报。E-mail: sunl@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 40633016、41275096,公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006006

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 40633016 and 41275096), Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Grant GYHY201006006)

the third is the water vapor transport of the northwest flow, which originates from the westerlies. During the first type of heavy rain, there is little difference in value between the transportation coming from the western Pacific Ocean passage and that from the South China Sea passage; they are both important, and can each account for up to 87.4% of the total moisture transport. During the second type of heavy rain, the moisture transport path is shifted slightly to the east compared with that of the other types of heavy rain. The water vapor transport of the western Pacific Ocean passage can account for close to 70% of the total transportation. During the third type of heavy rain, the water vapor transport of the northern passage becomes prominent, although the moisture transport of the western Pacific Ocean passage also plays a leading role in the total transportation. The moisture of the western Pacific Ocean passage has smaller losses during transportation and is mainly transported to levels beneath 850 hPa. The moisture of the South China Sea passage has larger losses during transportation and is mainly transported to levels above 850 hPa, as is the moisture of the northern passage.

Keywords Northeast China, Heavy rainfall, Water vapor transport, Water vapor budget, Lagrange trajectory

# 1 引言

暴雨是东北地区最主要的灾害性天气,往往由 此造成严重的人员伤亡并带来巨大的财产损失,近 十几年来,有关东北暴雨的研究工作逐渐增多,一 些学者针对 1998 年松嫩流域大暴雨成因(张庆云 等, 2001; 孙力和安刚, 2001; Zhao and Sun, 2007)、 东北地区典型的强对流暴雨系统(许秀红等,2000; 寿亦菅和许建民,2007;袁美英等,2010)以及东 北冷涡暴雨过程(陈力强等,2005;乔枫雪等,2007; 王东海等, 2009; 刘英等, 2012; 王培等, 2012) 做了很多天气分析、动力诊断和数值试验方面的研 究,这些工作无疑加深了人们对东北暴雨的认识。 但至今在有关东北暴雨过程的水汽输送和收支方 面的分析工作还不多见,事实上这也是东北暴雨成 因研究中一个不可缺少的重要方向。众所周知,水 汽是形成降水的基本条件之一,任何一场大范围暴 雨过程,如果没有源源不断的水汽输送和辐合都是 不可能发生的。东北地区处于中高纬度,该地区降 水的发生背景与我国南方地区的降水有所不同,南 方地区降水往往发生在水汽供应比较充分的西南 季风气流当中,有时动力辐合不是很强就可能出现 暴雨,而东北地区一般主要受相对较干的大陆性气 团控制,水汽供应并不是经常地能够得到满足,有 时尽管动力辐合很强,但也不一定发生暴雨,因此 探讨引发东北暴雨的水汽源地在哪里,他们是怎样 远距离输送和集中的可能显得更为重要。

关于水汽输送和收支的研究已经有过不少分 析工作,樊增全和刘春蓁(1992),高国栋等(1999) 和谢安等(2002)分别研究了华北地区、淮河流域 和长江中下游地区的水汽输送气候特征。徐祥德等 (2002)探讨了青藏高原和季风水汽输送影响域的

主要特征。黄荣辉等(1998)的研究认为,东亚季 风区的水汽辐合主要由平流过程引起,并且其经向 输送非常重要。Simmonds et al. (1999)指出,中 国东南部的水汽主要来自南海和孟加拉湾,而对中 国东北地区而言,中高纬度的西风水汽输送起主导 作用。Zhou and Yu (2005)讨论了与中国夏季降水 典型异常型相对应的水汽输送变化,发现与降水异 常相对应的水汽输送的源头为西太平洋。丁一汇和 胡国权(2003)以及胡国权和丁一汇(2003)还全 面分析了 1998 年和 1991 年长江流域和淮河流域大 洪水时期的水汽收支状况,指出南海地区的水汽输 送对这两场大洪水的出现是十分重要的。申乐琳等 (2010)研究了近 50 年来中国夏季降水的水汽输 送特征,认为对于中国东部降水异常而言,东南季 风的水汽输送和北方冷槽的水汽输送是至关重要 的。

上述有关水汽输送和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 有瞬时特征,因此最终只能给出简单的水汽输送路 径,而无法定量确定水汽的源汇关系和各水汽源地 对降水贡献的大小(James, et al., 2004; 陈斌等, 2011; 江志红等, 2013)。近些年来, 基于拉格朗 日框架下发展的轨迹分析方法为水汽输送及其源 汇分析提供了一个很好的技术途径,利用拉格朗日 方法研究区域降水的水汽输送过程也取得了很多 有价值的研究成果, Brimelow and Reuter (2005) 利用拉格朗日轨迹模式HYSPLIT研究了Mackenzie 河流域的三次极端降水,并指出低层的水汽主要来 源于墨西哥湾。Gimeno et al. (2010)利用轨迹模式 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。陈斌等(2011)同 样利用 FLEXPART 模式研究了 2007 年 7 月中国中 东部地区一次极端降水过程的水汽输送特征,指出 此次极端降水事件的水汽输送源地可以追溯到副 热带和热带的低纬度海洋地区。江志红等(2011) 利用 HYSPLIT 模式分析了 2007 年淮河流域强降水 期间的水汽来源,发现此次淮河流域强降水三个阶 段的主要水汽来源各不相同。江志红等(2013)还 基于该模式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,给出了气候 平均态下不同水汽源地对梅雨水汽输送的相对贡 献。

2010年7~8月,东北地区持续出现强降水, 暴雨过程之频繁,降雨量之大和降水落区之重复在 历史上都是罕见的, 吉林中东部, 辽宁大部降水偏 多 6~8 成, 部分地方偏多 1 倍以上(王文东, 2010; 赵伟, 2010)。持续性强降水造成了吉林中东部和 辽宁中东部发生了严重的洪涝灾害,并带来了重大 人员伤亡和财产损失。孙军等(2011)曾对此次暴 雨洪涝过程的雨情、水情和影响天气系统及预报着 眼点进行过分析探讨。本文则利用东北三省地面观 测网提供的降水资料和 NCEP 逐日再分析资料,首 先以欧拉方法分析了 2010 年 7~8 月东北地区暴雨 过程的水汽输送和收支特征,然后利用 NOAA 空气 资源实验室开发的拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT v4.9 模拟计算了暴雨期间气团的运动轨迹,得出了 影响暴雨过程的主要水汽输送通道以及不同水汽 通道对水汽输送的贡献,并与传统的欧拉方法得到 的结果进行了对比,希望能加深人们对东北地区暴 雨过程水汽输送特征的认识,为该地区暴雨分析和 预报提供参考依据。

## 2 资料与方法

#### 2.1 资料

本文所使用的资料为 2010 年 7 月 19 日至 8 月 30 日的 NCEP/NCAR 再分析资料,时间分辨率为每 6 小时一次,水平分辨率为 2.5°×2.5°,变量包括 1000~10 hPa 共 17 层上的位势高度(*h*)、温度(*T*)、 纬向风(*u*)、经向风(*v*),1000~300 hPa 各层比湿

(q)以及1000~100 hPa 各层垂直速度(w)。其他 资料还有东北三省地面观测网提供的降水资料。

#### 2.2 轨迹模式简介

假设空气中的粒子随风飘动,根据 HYSPLIT

v4.9 (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。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:

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

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

其中, Δt 为时间步长,本文 Δt 选取为 6 小时, V 为三维风矢量的大小。由于模式输入的 NCEP/ NCAR 资料是等压面数据,而 HYSPLIT v4.9 模式 采用的是地形坐标,故在输入气象数据时,在垂直 方向上将其内插到了地形追随坐标系统。

#### 2.3 轨迹模拟方案

模拟区域选择了暴雨过程最集中的吉林中东 部和辽宁大部(40°N~45°N,120°E~130°E)区域, 水平分辨率为 2.5°×2.5°,垂直方向选取 500 m, 1500 m,3000 m 三个高度层次作为模拟的初始高 度。整个模拟空间的轨迹初始点为 45 个,模拟其 后向追踪 10 天的三维运动轨迹,每 6 小时输出一 次轨迹点的位置,并插值得到相应位置上的物理量 (如温度、高度、气压和相对湿度等),每隔 6 小 时所有的轨迹初始点重新后向追踪模拟 10 天。由 于模拟出的轨迹数量较大,为更加直观地看出轨迹 分布,本文利用簇分析方法对所有轨迹进行了聚 类,其基本思想和做法江志红等(2011)曾进行过 详细的描述。

#### 2.4 不同通道水汽输送贡献率

定义某一通道水汽输送的贡献率为

$$Q_{\rm s} = \frac{\sum_{\rm l}^{m} q_{\rm last}}{\sum_{\rm l}^{n} q_{\rm last}} \times 100\%, \qquad (3)$$

其中, Q<sub>s</sub>为通道水汽输送贡献率, q<sub>last</sub> 表示通道上 最终位置的比湿, m 表示该通道所包含轨迹的条数, n 表示所有轨迹的总条数。

2.5 欧拉方法的水汽收支计算

通过某个边界的水汽输送为

$$F_{v} = \frac{1}{g\sigma} \int_{p_{s}}^{p_{t}} \int_{l} v_{n} q dl dp, \qquad (4)$$

其中, q 为比湿, g 为重力加速度,  $p_s$  为表面气压,  $p_t$  为顶部气压,这里取 300 hPa, l 为水平边界,  $v_n$ 为垂直于边界的法向速度,  $\sigma$  为区域面积,  $F_v$  为正 值表示流出,负值表示流入。

## 3 2010 年 7~8 月东北地区的强降水 过程及暴雨分类

从 2010 年 7 月 19 日开始一直到 8 月 30 日, 辽宁省和吉林省连续出现强降水过程,这期间总共 出现了 10 次较强降水过程,共 22 个暴雨日,辽宁 的中部、北部和东部,吉林的中部和南部的部分地 方降水量都达到了历史同期的第 1 位(孙军等, 2011),从这 22 个暴雨日(具体日期见表 1)的累 积降水分布(图 1a)中可以看出,大于 300 mm 的 范围主要出现在辽宁的中东部和吉林的中东部,影 响范围覆盖了辽河中下游、辽河上游的东辽河支 流、浑河、太子河、第二松花江上游及下游的饮马 河以及浑江等流域,强降水导致了辽河、第二松花 江、鸭绿江和太子河出现流域性洪涝灾害。最大降 水中心出现在辽宁东北部和吉林南部,达 600 mm 以上,辽宁东部的部分地方超过 900 mm。

孙军等(2011)曾对这 22 个暴雨日的影响天 气系统和暴雨覆盖范围进行过确定和划分,在此基 础上,本文根据影响天气系统和雨带位置的不同进 一步将这 22 个暴雨日划分成了三类暴雨(表 1)。

#### 表 1 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程及其分类

Table 1The heavy rain events and their classification overNortheast China during July-August 2010

暴雨类		主要影响		暴雨覆盖流域				
别	出现日期	天气系统	降水概述	范围				
第一类	7月19、20、	500 hPa	辽宁大部和吉林	辽河中下游、				
暴雨	21 日和 8 月	高空槽	中部 150 mm 以	浑河、太子河、				
	4, 5, 19, 20		上,辽宁中北部和	东辽河, 第二				
	日共7个暴雨		东部部分地方	松花江下游和				
	日		300~450 mm	上游辉发河				
第二类	8月8、9、21、	850 hPa	辽宁东部和吉林南	浑河、太子河、				
暴雨	22、27、28、	低涡切变	部150mm以上,辽	第二松花江上				
	29日共7个暴		宁东部部分地方	游及浑江				
	雨日		300~450 mm					
第三类	7月25、26、	东北冷涡	吉林中东部和辽	第二松花江下				
暴雨	27、28、29、		宁东北部 100 mm	游饮马河及上				
	30、31日和8		以上, 吉林中东部	游浑江				
	月 14 日共 8		部分地方 200~					
	个暴雨日		300 mm					

第一类暴雨:共7个暴雨日,主要受 500 hPa 高空槽影响,暴雨分布范围最广(图 1b),累积雨 量最大,主要出现在辽宁大部及吉林中部和南部, 辽宁北部和东部的部分地方可达 300~450 mm,影 响流域包括辽河中下游、浑河、太子河、东辽河、 第二松花江下游和上游辉发河。 第二类暴雨:共7个暴雨日,主要受850 hPa 低涡切变影响,暴雨位置偏东偏南(图1c),局部 降水较强,主要出现在辽宁东部和吉林南部,辽宁 东部的部分地方累积降水可达300~450 mm,影响 流域包括浑河、太子河、第二松花江上游及浑江。

第三类暴雨:共8个暴雨日,主要受东北冷涡 影响,暴雨位置相对偏北(图 1d),强降水范围相 对较小,主要出现在吉林中东部和辽宁北部,吉林中 东部的部分地方降水达 200~300 mm,影响流域包 括第二松花江下游饮马河和上游辉发河及浑江。

## 4 暴雨期间欧拉方法的水汽输送和 收支分析

图 2 给出了 22 个暴雨日从地面积分到 300 hPa 的水汽通量分布。可以看到,暴雨期间东北地区的 东南部是整个东亚地区水汽通量最显著的大值区, 影响该地区的水汽流(水汽通量矢量)向南可以追 溯到低纬西太平洋、南海和孟加拉湾,向西北可以 追溯至贝加尔湖附近,有三支不同源地的水汽流在 我国东北地区交汇,从而对该地区暴雨产生影响,

一支是源自低纬西太平洋的水汽流,向西传播后向 北伸展,一支是源自孟加拉湾的水汽流,向东传播 至南海后再向北输送进入中国大陆,这两支水汽流 在我国东部沿海汇聚加强后继续向北输送,与另一 支源自贝加尔湖附近并一直向东传播的水汽流在 东北地区汇合。相比之下,东北地区暴雨与源自西 太平洋的水汽流关系更为密切,这支水汽流也明显 强于其他两支水汽流。

由此看出,影响 2010 年 7~8 月东北地区暴雨 的水汽主要来源于亚洲季风区,这其中包括了东亚 副热带季风区,南海季风区,特别是热带东南季风 区,中国东部大陆及其附近海域是这些季风水汽流 (尤其是西太平洋东南水汽流)的聚集地和水汽继 续向北输送的"转运站",虽然影响该地区暴雨的 天气系统主要为北方天气系统(东北冷涡和高空槽 等),但实际上季风水汽输送是联系中低纬系统相 互作用的主要桥梁和纽带,是实现亚洲季风对该地 区影响的重要形式和媒介。上述分析清晰地描述了 2010 年 7~8 月东北地区暴雨期间水汽输送的敏感 区及水汽远距离输送的结构特征。

从 22 个暴雨日水汽通量距平和水汽通量散度 距平(图略)分布中可以看出,亚洲季风区水汽通 量距平分布有两个突出特点,一是从热带西太平洋



图 1 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程累积降水量(单位: mm)分布: (a) 22 个暴雨日; (b) 第一类暴雨; (c) 第二类暴雨; (d) 第三类暴雨 Fig. 1 The total precipitation (units: mm) of heavy rainfall over Northeast China during July–August 2010: (a) The 22 heavy rain days; (b) the first type of heavy rain; (c) the second type of heavy rain; (d) the third type of heavy rain

一直到南海、孟加拉湾和印度半岛均为一致的偏东 水汽输送距平气流,说明其间东南季风水汽输送偏 强,而西南季风水汽输送偏弱。二是在东南季风偏 强的背景下有两支偏北的距平水汽流在我国东部 及其附近海域汇合后,并继续向北伸展至东北地区 的东南部,进而对暴雨产生影响,一支源自西北太 平洋,向西传播后向北伸展,另一支源自热带西太 平洋,向西传播至南海后,继续向北偏东方向传播。 总之,西太平洋东南季风区水汽向西和向北输送的 异常可能是 2010 年 7~8 月东北地区暴雨产生的关 键。

水汽通量散度距平的分布(图略)特点是,暴 雨期间东北地区的中东部,长江以北的我国东部地 区及其附近海域以及朝鲜半岛是明显的水汽通量 散度负距平区,即这些区域的水汽辐合要明显强于 常年,因此是水汽"汇区",而日本东南部及其以 东的西北太平洋,菲律宾以东的热带西太平洋,南 海北部一直到华南和江南地区,以及贝加尔湖东南 一直到东北西部地区是明显的水汽通量散度正距 平区,即这些地区的水汽辐散要强于常年,因此是 水汽的"源区"。这可能意味着 2010 年 7~8 月东 北暴雨虽然只是区域性的暴雨过程,但也需要从更 大的范围得到水汽供应,特别是广大的西太平洋地 区。

三类暴雨虽然均与亚洲季风水汽输送密切相 关,但他们之间也存在明显差异(图3),第一类暴 雨中,源自西北太平洋途经黄、渤海到达东北地区 的水汽流最为显著,源自南海北部向北偏东方向输 送的水汽流次之,源自贝加尔湖以东的西北方向水 汽流不明显,即此类暴雨中东南季风水汽输送最为 重要。第二类暴雨中,源自孟加拉湾南部,途经中 南半岛、菲律宾北部一直向北输送到东北地区的水 汽流最为显著,源自西太平洋的水汽流次之,源自 中高纬度的西风水汽输送不明显,即此类暴雨中西 南季风水汽输送最为重要。第三类暴雨中,源自贝 加尔湖并向东偏南方向输送到东北地区的水汽流



图 2 2010 年 7~8 月东北地区 22 个暴雨日平均的地面到 300 hPa 积分的水汽通量(单位: kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)。阴影:水汽通量>100 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> Fig. 2 Integrated water vapor flux (units: kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) from the surface to 300 hPa on the 22 heavy rain days over Northeast China during July–August 2010. Shaded: water vapor flux more than 100 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>

最为显著,源自西太平洋的水汽流次之,而西南季 风的水汽输送不明显,即此类暴雨中,中高纬度的 西风水汽输送最为重要。

图 4 表示的是 2010 年 7~8 月东北地区暴雨期 间亚洲季风区各区域边界的水汽收支状况,其中 I 区代表孟加拉湾,II 区代表中南半岛(I 区和 II 区 反映了西南季风的水汽输送状况),III 区代表南海 北部(反映了南海季风的水汽输送状况),IV 区代 表菲律宾以东洋面(反映了东南季风的水汽输送状 况),V 区代表中国东部大陆,VI 区代表中国东部 沿海(V 区和 VI 区反映了东亚副热带季风的水汽 输送状况),VII 区代表贝加尔湖东南至华北东北部 地区(反映了中高纬西风水汽输送状况),VIII 区 代表东北地区。

从图 4 中可以看到,东北地区暴雨期间,与常 年平均相比(图 5),西南季风向东的水汽输送较弱, 而东南季风向西和向北的水汽输送明显偏强,通过 IV 区东边界进入菲律宾以东洋面的水汽通量较常 年平均值高 20 倍以上,通过 IV 区北边界输送我国 东部海域的水汽通量也明显增加(约比常年平均高 出 1.5 倍),而通过南海北部输送到中国内地的水汽 与常年平均基本相当。在东亚副热带季风区(V 区 和 VI 区),水汽的经向输送也非常活跃,其中以通 过 VI 区北边界输送到东北地区的水汽增加最为显 著,大约是常年平均值的 3 倍,通过 V 区北边界输 送至西风水汽输送敏感区(VII 区)的水汽也比常 年高出 60%。在 VII 区纬向水汽输送非常活跃,通 过其东边界输入到东北地区的水汽大约是常年值 的 1.7 倍。在东北地区(VIII 区),来自其南边界的 水汽输入最强,可以占到该区域水汽总输入的 63%,而来自其西边界的水汽输入占 37%。东边界 的水汽输出远远大于北边界,说明暴雨期间东北地 区存在着明显的经向水汽辐合,区域水汽通量之和 可达 24.4×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>,是整个东亚地区最显著的水 汽汇。

因此,对2010年7~8月东北地区暴雨过程而 言,热带东南季风活跃,且向西和向北的水汽输送 明显增强是基础,而东亚副热带季风区能否将主要 由热带季风区输送来的水汽继续高效率地"转 运"至东北地区是关键。不仅如此,东亚副热带季 风区(也包括西风输送敏感区)在将他们南边界输 入的水汽中的大部分"转运"至东北地区的同时, 自身还产生了水汽亏损,例如 VI 区的水汽亏损值 大约可以占到该区域向北水汽输送的 1/4 左右,所



图 3 2010 年 7~8 月东北地区各类暴雨期间地面到 300 hPa 积分的水汽通量(单位: kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>): (a) 第一类暴雨; (b) 第二类暴雨; (c) 第三类 暴雨

Fig. 3 Integrated water vapor fluxes (units: kg  $m^{-1} s^{-1}$ ) from the surface to 300 hPa for the three types of heavy rain over Northeast China during July–August 2010: (a) The first type of heavy rain; (b) the second type of heavy rain; (c) the third type of heavy rain



图 4 2010 年 7~8 月东北地区 22 个暴雨日亚洲季风区各区域边界的水汽通量(单位: 10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>)和收支状况(括号内数值,单位: 10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>)。I 区、II 区、IV、V 区、VI 区、VII 区和 VIII 区分别代表孟加拉湾、中南半岛、南海北部、菲律宾以东洋面、中国东部大陆、中国东部沿海、贝加尔湖东南至华北东北部地区和东北地区

Fig. 4 Water vapor flux (units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) across each border and the regional water vapor budget (numbers in brackets, units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) over various areas of the Asian monsoon region on 22 heavy rain days over Northeast China during July–August 2010. Areas I, II, III, IV, V, VI, VII, and VIII represent the bay of Bengal, the Indo China Peninsula, north of the South China Sea, east ocean of the Philippines, the east of China, the east coast of China, southeast of Lake Baikal to northeast of the North China, and the Northeast China, respectively



图 5 1980~2010 年 7 月 19 至 8 月 30 日亚洲季风区各区域边界气候平均的水汽通量(单位:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ )和收支状况(单位:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) Fig. 5 Average water vapor flux (units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) across each border and the regional water vapor budget (units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) over various areas of the Asian monsoon region during the period from 19 July to 30 August 1980–2010

以,东亚副热带季风区不仅仅是"转运站",也是 东北地区暴雨的水汽源。即暴雨可以从更大的范围 获得更多的水汽供应。

不同影响天气系统和不同影响范围的暴雨,他 们的水汽收支特征也存在着一定差异(图 6),第一 类暴雨过程中通过副热带季风区(VI 区和 V 区) 北边界输送到东北地区和西风输送敏感区(VII 区) 的水汽在三类暴雨中是最为显著的,分别是气候平 均值的 4.2 倍和 2.7 倍,通过 VII 区东边界输送到东 北地区的水汽也比较强,且其主要来源于 VII 区南

40卷 Vol. 40



图 6 2010 年 7~8 月东北地区各类暴雨期间亚洲季风区各区域边界的水汽通量(单位: 10<sup>7</sup>kg s<sup>-1</sup>)和收支状况(单位: 10<sup>7</sup>kg s<sup>-1</sup>): (a) 一类暴雨; (b) 二类暴雨; (c) 三类暴雨

Fig. 6 Water vapor flux (units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) across each border and the regional water vapor budget (units:  $10^7 \text{ kg s}^{-1}$ ) over various areas of the Asian monsoon region for the three types of heavy rain over Northeast China during the period July–August 2010: (a) The first type of heavy rain; (b) the second type of heavy rain; (c) the third type of heavy rain

3 期 孙力等: 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析 No. 3 SUN Li et al. A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget of Heavy Rainfall over Northeast China ... 639

边界的水汽输入而非西边界,东北地区水汽的净收入也最大,这可能是一类暴雨分布最广雨量最大的原因之一。第二类暴雨过程中,水汽输送路径偏东,东北地区主要从 VI 区北边界得到水汽供应,通过 V 区北边界向北的水汽输送和通过 VII 区东边界向东的水汽输送均不太突出,这可能也是第二类暴雨雨带最为偏东的原因之一。第三类暴雨过程中,以通过西风水汽输送敏感区东边界输送到东北地区的水汽最为显著,可以占到该区域水汽总输入的63%,且其主要来源于 VII 区西边界的水汽输入,即西风水汽输送在三类暴雨中是最强的,这可能也是此类暴雨雨带位置偏北的重要原因之一。

从以上水汽输送和收支的分析中得知,2010年 7~8 月东北地区暴雨过程可以从热带和副热带季 风区获得大量的水汽供应,但水汽究竟是通过何种 途径被输送至东北地区,以及从不同水汽源地输送 到东北地区的水汽占总水汽输送的相对贡献等还 是无法确定的,这些问题将通过下面的气团拉格朗 日轨迹追踪方法加以探讨。

## 5 暴雨期间水汽来源的拉格朗日轨 迹分析

#### 5.1 轨迹模式计算误差分析

轨迹模式的计算误差分为两类,即积分误差和 分辨率误差。积分误差主要是由气象数据在模式中 的截断而产生的,分辨率误差是由格点气象数据有 限的时空分辨率产生的。积分误差可以通过用后向 轨迹的终点计算同样时间长度的前向轨迹进行估 计。误差的大小等于后向轨迹起点与前向轨迹终点 之间距离的 1/2。选取模拟区域的中心点[(42.5°N, 125°E),1500 m],按照需要模拟的轨迹时间长度 240 小时进行后向追踪模拟,将模拟最终位置的三维坐 标输入模式,进行相同时间长度的前向模拟,比较 前后向模拟的两条轨迹的一致程度。如图 7 可知轨 迹的水平空间位置和垂直高度位置,可以看到后向 轨迹无论是从水平尺度上还是垂直尺度上与前向 轨迹均非常吻合。说明在轨迹模式的模拟中积分误 差是非常小的。

分辨率误差可以通过初始点的水平和垂直方向上偏移所模拟出的轨迹进行估计。取模拟区域中 心点[(42.5°N, 125°E), 1500 m],将该点的气象数据 在经向和纬向上偏移 0.5 个格距,竖直方向上偏移 0.01 (σ值),进行 240 小时的后向模拟。比较这些



图 7 轨迹模式 HYSPLIT 的积分误差

Fig. 7 Integration error of the HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model



图 8 轨迹模式 HYSPLIT 的分辨率误差。图中线条为 27 条 240 小时的 后向轨迹

Fig. 8 Resolution errors of the HYSPLIT model. The lines are 27 backward trajectories for 240 hours

轨迹的一致性,如图8所示,可以看出分辨率误差 要明显大于积分误差,无论是水平还是垂直方向上 轨迹间的偏离随模拟时间的延长都有所增大,但轨 迹间的发散程度并不十分明显,仍可以较为一致地 表征气流的来向和高度变化。

#### 5.2 暴雨水汽来源的轨迹簇分析

对东北地区暴雨期间(共 22 个暴雨日)的拉格朗日模拟共得到 1980 条轨迹(每天选取 0800 和 2000 两个时次),根据簇分析方法对所有轨迹进行 聚类,通过分析空间方差增长率(图略),可见轨 迹在聚类过程中的方差增长率在聚类结果小于 6 条 以后迅速增长,故确定模拟出的轨迹最终聚类为 6 条。图 9a 给出了东北地区暴雨期间水汽输送的 6 条通道,他们是,南海通道(通道 3)起源于南海 北部,途经华南、华中,华北并向北偏东方向进入 东北地区。西太平洋通道分为两条(通道 5 和通道 2),通道 5 起源于西北太平洋,向西输送至日本岛 南部,然后向北偏西方向途经黄、渤海到达东北地 区,通道 2 相比通道 5 位置偏南,起源于低纬西太 平洋,向西北方向输送,经过我国东部沿海进入东 北地区,西太平洋的两条水汽通道主要体现了西太 平洋副高边缘东南气流的水汽输送,并与西太平洋 副高位置的逐渐北抬密切相关。北方输送通道分为 三条(通道 1、6、4),分别是源自巴尔喀什湖附近、 北大西洋和内蒙古东北部的冷空气输送。

由图 9b 和图 9c 可知,西太平洋偏南通道(通

道 2)和南海通道(通道 3)的气流均来自于 800 m 左右近地面层的低纬地区,输送至东北地区后分别 被抬升至 1300 m 和 1800 m 左右的高度,两支气流 初始水汽含量较高,但由于通道 3 气流主要途经我 国大陆进入东北地区,因此其水汽含量出现了比较 明显的损失,而通道 2 由于主要途径西太平洋,可 能受洋面蒸发影响通道比湿逐渐增加(类似情况也 包括通道 5),登陆东北地区后才开始降低。来自于 1800 m 左右高度的西太平洋偏北通道(通道 5)气 流的初始比湿明显不如前面的两个通道高,但其在 向西偏北方向输送过程中高度有所下降,比湿有明 显增加,特别是在途经黄海、渤海时(到达东北地 区前 1~2 天),通道比湿达到最大,到达东北地区 后又被抬升至 1500 m 左右的高度,说明我国东部 沿海也是此次东北暴雨过程重要的水汽源。北方通



图 9 2010 年 7~8 月东北地区 22 个暴雨日的(a) 水汽输送通道空间分布、(b) 水汽输送通道的高度变化和(c) 水汽输送通道的比湿变化 Fig. 9 The (a) spatial distribution of water vapor passages, (b) change in height of water vapor passages, and (c) change in specific humidity of water vapor passages, on the 22 heavy rain days over Northeast China during July–August 2010

道中,气流比湿明显偏小,其中源自北大西洋的冷空气来自于 5000 m 左右的对流层中层,沿途下降至 2000 m 左右的东北地区上空,另一只源自巴尔

喀什湖 2000 m 左右高度的冷空气,沿途高度变化不大。

对比不同通道的水汽输送贡献(表 2)可以看



图 10 同图 9, 但为第一类暴雨

Fig. 10 As in Fig. 9, but for the first type of heavy rain

表 2 2010 年 7~8 月东北地区泰雨期间各水汽输送通道的水汽贡献	
--------------------------------------	--

	南海通道		西太平洋通道		北方通道					
	水汽贡献百分比			水汽贡献百分比			水汽贡献百分比		南海通道+西太平洋通道	
暴雨类别	所在通道	分量	合计	所在通道	分量	合计	所在通道	分量	合计	的水汽贡献百分比之和
东北暴雨(22个暴雨日)	通道3	21.5%	21.5%	通道 2	36.9%	52%	通道1	12.1%	26.5%	73.5%
				通道5	15.1%		通道4	8.1%		
							通道6	6.3%		
第一类暴雨	通道 2	21.2%	43%	通道3	19.8%	44.3%	通道1	11.0%	12.6%	87.3%
	通道4	21.8%		通道6	24.5%		通道5	1.6%		
第二类暴雨	通道3	5.1%	5.1%	通道1	27.3%	69.2%	通道4	16.5%	25.7%	74.3%
				通道2	41.9%		通道5	6.9%		
							通道6	2.3%		
第三类暴雨				通道1	43.3%	62.6%	通道2	17.3%	37.4%	62.6%
				通道3	19.3%		通道4	10.7%		
							通道 5	9.4%		

出,东北暴雨期间,以西太平洋通道的水汽输送最为强盛,可以占水汽输送总量的52%,北方通道和 南海通道相差不大,分别占水汽输送总量的26.5% 和21.5%,南方水汽输送(西太平洋通道和南海通 道之和)可以占水汽总输送的73.5%。

不同类型暴雨的水汽输送轨迹和各源地的水 汽输送贡献存在着明显差异。第一类暴雨的模拟共 得到 1260 条轨迹,通过簇分析方法,并分析空间 方差增长率(图略),最终聚类得到6条轨迹簇(图 10),他们是,南海通道分为两条(通道4和通道2), 通道4起源于孟加拉湾,途经中南半岛,南海并向 北偏东方向进入东北地区,通道2起源于华南地区, 途经华中,华北进入东北地区,两条通道的水汽均 来自于 1000 m 左右的近地面层,向北输送中逐渐 抬升至 1800~2000 m 左右的高度,两条通道的初 始水汽含量较高,但由于主要途经我国东部大陆, 所以到达东北地区以后,水汽含量出现了比较明显 的损失, 南海通道的水汽输送占水汽总输送的 43%。西太平洋通道也分为两条(通道6和通道3), 通道6起源于西北太平洋,通道3起源于菲律宾以 东的低纬西太平洋, 西太平洋的两条通道与西太平 洋副热带高压位置的逐渐北抬密切相关。两支通道 的水汽同样来自于 1000 m 左右的近地面层,到达 东北地区后也被抬升至1300~1500m左右的高度, 由于他们主要途经洋面,因此输送过程中水汽含量 逐渐增加,到达东北地区前 1~2 天,水汽含量达 到最大。西太平洋通道的水汽输送占水汽总输送量 的 44.3%。北方通道的两支(通道 5 和通道 1)分 别是来自于北大西洋 5000 m 左右高度和西西伯利 亚 3000 m 左右高度的冷空气,到达东北地区后下 降至 2000~2500 m 左右。北方通道的水汽输送只 占水汽输送总量的 12.6%。



Fig. 11 As in Fig 10, but for the second type of heavy rain

第二类暴雨的模拟总共得到 1260 条轨迹,最 终聚类得到了 6 条水汽输送通道(图 11),他们是, 南海通道(通道 3)起源于 1000 m 左右的南海地区, 初始水汽含量较高,沿途水汽损失较多,水汽输送 只占总水汽输送的 5.1%。西太平洋通道分为两条 (通道 1 和通道 2),通道 1 起源于 1000 m 左右高 度的低纬西太平洋,通道 2 起源于 2000 m 左右高 度的西北太平洋,与第一类暴雨相似,西太平洋通 道水汽在输送过程中比湿逐渐增加,到达东北地区 前 1~2 天,水汽含量达到最大,水汽输送占总水 汽输送的 69.2%,具有主导作用。北方通道也分为 三条(通道 4、5、6),分别是源自贝加尔湖以东 1000 m 左右高度,西西伯利亚 2300 m 左右高度和 北大西洋 5000 m 左右高度的冷空气,北方通道水 汽输送占总水汽输送的大约 1/4 (25.7%) 左右。

第三类暴雨的模拟总共得到 1440 条轨迹, 最

终聚类得到5条水汽输送通道(图12),他们是, 西太平洋通道分为两条(通道1和通道3),一支起 源于 1500 m 左右高度的西太平洋, 输送过程中高 度降低,水汽含量增加,即将到达东北地区时,高 度又被抬升,通道位置较第一和第二类暴雨北支西 太平洋通道偏南,而较南支西太平洋通道偏北,这 与第三类暴雨过程中西太平洋副高稳定且位置相 比第一和第二类暴雨偏南是一致的。另一条起源于 600 m 左右高度的台湾以东洋面,途经我国东部大 陆后进入东北地区。西太平洋通道的水汽输送占总 水汽输送的 62.6%,具有主导作用,并主要被输送 至东北地区 1000~1500 m 左右的高度。北方通道 分为三条(通道5、4、2),分别是源自北大西洋、 西西伯利亚和蒙古国中部的冷空气,水汽输送占总 水汽输送的 37.4%,并主要被输送至东北地区 2000~2500 m 左右的高度。



Fig. 12 As in Fig. 11, but for the third type of heavy rain

从以上分析中可以看出,东北地区暴雨期间, 主要的水汽输送通道有三支,一支是沿西太平洋副 高边缘东南气流的水汽输送,可能受洋面蒸发影 响,沿途水汽含量逐渐增加,到达东北地区前1~2 天比湿达到最大,进入东北地区后才有所减少,主 要被输送到东北地区 850 hPa 及以下的低层大气之 中,水汽输送占总水汽输送的50%以上,起主导作 用。另一支是起源于南海北部向北偏东方向气流的 水汽输送,沿途水汽含量损失较多,主要被输送到 东北地区 850 hPa 以上的大气之中,水汽输送大约 占总水汽输送的 1/5。第三支是西风带西北或偏北 气流的水汽输送,也主要被输送到东北地区 850 hPa 以上的大气之中,水汽输送大约占总水汽输送的 1/4。不同类型暴雨的水汽输送通道和各源地的水汽 贡献存在着明显差异。第一类暴雨可以从东南和西 南两个方向在更大的范围内获得水汽供应,来自于 西太平洋通道和南海通道的水汽输送大致相当,均 很重要,两者可以占总水汽输送的 87.3%,南方通 道水汽输送的贡献在三类暴雨中是最显著的, 而北 方通道水汽输送的贡献在三类暴雨中最小,只有 12.6%,因此,这可能是第一类暴雨范围最广,雨 量最大的主要原因之一。第二类暴雨过程中,南方 通道水汽输送的贡献可达 74.3%, 但水汽输送路径 偏东,来自东南方向西太平洋通道水汽输送的贡献 达到 70%左右, 是三类暴雨中最高的, 占有主导地 位,而南海通道水汽输送的贡献很小(只有大约 5%),因此,第二类暴雨位置偏东,局部雨量较大。 第三类暴雨的水汽输送只有西太平洋通道和北方 通道,其中西太平洋通道仍然占有主导地位,水汽 输送贡献率可达 62.6%, 说明即使是东北冷涡这样 的中高纬度天气系统造成的暴雨,其水汽仍然主要 来自于东南季风区,但北方通道的水汽输送也变得 不可忽视,其贡献率可达 37.4%,在三类暴雨中最 高。这可能与第三类暴雨位置偏北和雨量相对偏小 有一定的联系。以上分析似乎表明,南方通道水汽 输送的贡献越大,降水量也就最大,影响降水的南 方水汽输送通道越多,强降水的范围也就越广。

#### 5.3 拉格朗日与欧拉水汽输送分析方法的对比

针对三类暴雨过程,我们对欧拉方法和拉格朗 日方法得到的水汽输送结果进行了对比分析,在第 一类暴雨的欧拉流场中,东北地区主要受东南季风 水汽输送的影响(图 3a),一条明显的水汽流起源 于西太平洋,向西偏北方向输送至东北地区,来自

南海从西南方向进入东北地区的水汽输送相比之 下并不显著。然而,拉格朗日轨迹分析的结果却表 明,由南海通道输送到东北地区的水汽与西太平洋 通道相比大致相当,具有同等的重要性。第二类暴 雨的欧拉流场中,一条明显的水汽流源自阿拉伯 海、孟加拉湾,向东偏北方向输送至我国东部沿海, 再向北偏东方向进入东北地区(图 3b),而来自西 太平洋的东南水汽输送是次要的。然而,拉格朗日 轨迹分析的结果却显示出,西太平洋通道的水汽输 送占有主导作用,水汽输送贡献率可达近70%。对 第三类暴雨而言,在欧拉流场上,东北地区最显著 的水汽输送是起源于贝加尔湖东南部向东偏南方 向伸展的水汽流(图 3c),东北地区水汽的多少主 要受西风带水汽输送的影响。然而,在所对应的拉 格朗日水汽输送通道分布图上却可以看出(图 12a),虽然北方通道的水汽输送在三类暴雨中是最 显著的,但水汽输送的贡献率也只有 1/3 强,而来 自于西太平洋通道的水汽输送仍然是最主要。由此 可见,由于欧拉方法给出的二维流场水汽输送随时 间变化往往具有瞬时特征,因此无法真实和准确定 量地反映水汽输送的三维变化和水汽的源汇关系 以及各水汽源地对降水贡献的大小, 而拉格朗日后 向轨迹追踪方法可以克服这些缺点,能更加客观和 定量地分析出三维水汽输送路径和不同水汽通道 的相对重要性。

## 6 结论

本文首先以欧拉方法分析了 2010 年 7~8 月东北 地区暴雨过程的水汽输送和收支特征,然后利用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 空气资源实验室开发的拉格朗日轨迹模式 (HYSPLIT v4.9),模拟计算了影响暴雨的主要水汽 输送通道以及不同通道对水汽输送的贡献,并与欧拉 方法的计算结果进行了对比,得到如下一些结论:

(1)影响2010年7~8月东北地区暴雨的水汽 主要来源于亚洲季风区,包括热带东南季风区,南 海季风区和东亚副热带季风区,中国东部大陆及其 附近海域是这些季风水汽流的聚集地和水汽继续 向北输送的"转运站",这其中尤其以西太平洋东 南季风水汽输送最为显著,在季风水汽的向北输送 中起主导作用,虽然影响该地区暴雨的天气系统主 要是北方天气系统(东北冷涡和高空槽等),但实 际上在暴雨期间,季风水汽的向北输送是联系中低 纬系统相互作用的主要桥梁和纽带。

(2)影响2010年7~8月东北地区暴雨的水汽 输送通道主要有三支,一支是起源于西太平洋,并 沿西太平洋副高边缘先向西偏北方向输送至我国 东部海域,再向北偏东方向进入东北地区的水汽输 送,此通道占总水汽输送的52.0%,起主导作用。 另一支是起源于南海北部,途经华南、华中和华北 并向北偏东方向进入东北地区的水汽输送,此通道 占总水汽输送的21.5%。第三支是西风带上西北或 偏北气流的水汽输送,此通道占总水汽输送的 26.5%。来自南方通道(西太平洋通道和南海通道 之和)的水汽输送贡献率可达73.5%,将近3/4。

(3) 不同类型暴雨的水汽输送存在着明显差 异,第一类暴雨可以从东南和西南两个方向在更大的 范围内获得水汽供应,来自西太平洋通道和南海通道 的水汽输送大体相当(水汽输送贡献率分别为44.3% 和 43.0%),均很重要,两者占总水汽输送的 87.3%, 在三类暴雨中最大,而北方通道水汽输送的贡献在三 类暴雨中最小,这可能是第一类暴雨范围最广、雨量 最大的重要原因。第二类暴雨水汽输送路径偏东,西 太平洋通道水汽输送的贡献率可达 70%左右, 是三 类暴雨中最高的,南海通道水汽输送的贡献率很小 (只有大约 5%),这可能是第二类暴雨位置偏东偏 南的原因之一。第三类暴雨的水汽输送只有西太平洋 和北方两个通道,西太平洋通道的水汽输送仍然占有 主导地位 (贡献率达 62.6%), 但北方通道的水汽输 送也变得不可忽视,其水汽输送的贡献率可达 37.4%,在三类暴雨中最高,这可能与第三类暴雨位 置相对偏北和雨量相对偏小有一定的联系。

(4) 西太平洋通道的水汽输送在途经洋面时, 水汽含量逐渐增加,在到达东北地区前 1~2 天, 比湿达到最大,登陆以后才有所减小,并主要被输 送到东北地区 850 hPa 及以下的低层大气之中,来 自南海通道的水汽流在途经我国东部大陆并向北 偏东方向输送过程中被逐渐抬升,尽管初始阶段比 湿较高,但沿途水汽含量损失较多,并主要被输送 到东北地区 850 hPa 以上的大气之中,北方通道的 水汽输送,水汽含量相对较低,也主要被输送到东 北地区 850 hPa 以上的大气之中。

#### 参考文献(References)

Brimelow J C, Reuter G W. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin [J]. J.

Hydrometeor., 6 (4): 423-440, doi:10.1175/JHM430.1.

- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (5): 810-818, doi:10.11676/qxxb2011.071.
- 陈力强, 陈受钧, 周小珊, 等. 2005. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特 征数值模拟 [J]. 气象学报, 63 (2): 173–183. Chen Liqiang, Chen Shoujun, Zhou Xiaoshan, et al. 2005. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63 (2): 173–183, doi:10.11676/qxxb2005.017.
- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (2): 129–145, doi:10.11676/ qxxb2003.014.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Aust. Meteor. Mag., 47: 295–308.
- 樊增全,刘春蓁. 1992. 1980~1987 年华北地区上空水汽输送特征 [J]. 大气科学, 16 (5): 548-555. Fan Zengquan, Liu Chunzhen. 1992. Analysis on the processed of water vapor transfer over North China during 1980-1987 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (5): 548-555, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.05.05.
- 高国栋, 陆瑜蓉, 翟盘茂, 等. 1999. 淮河流域大气水汽输送特征及其对 早涝形成的影响 [M]// 淮河流域能量与水分循环研究. 北京: 气象出 版社, 75-81. Gao Guodong, Lu Yurong, Zhai Panmao, et al. 1999. The features of water vapor transport in atmosphere and their effects on flood/drought over the Huaihe River valley [M]// Study on Energy and Water Cycle over Huaihe Basin (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 75-81.
- Gimeno L, Drumond A, Nieto R, et al. 2010. On the origin of continental precipitation [J]. Geophys. Res. Lett., 37 (13): L13804, doi:10.1029/2010GL043712.
- 胡国权, 丁一汇. 2003. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 146–163. Hu Guoquan, Ding Yihui. 2003. A study on the energy and water cycles over Changjiang-Huaihe River basins during the 1991 heavy rain periods [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (2): 146–163, doi:10.11676/qxxb2003.015.
- 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, doi:10.3878/j. issn.1006-9895.1998.04.08.
- 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 [J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 4: 733–746, doi:10.5194/nhess-4-733-2004.

- 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 Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71 (2): 295–304, doi:10.11676/qxxb2013.017.
- 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): 361–372. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.14.
- 乔枫雪,赵思雄,孙建华. 2007. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水 汽收支分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 397-412. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 397-412, doi:10.3969/j.issn. 1006-9585.2007.03.021.
- 刘英, 王东海, 张中锋, 等. 2012. 东北冷涡的结构及其演变特征的个例 综合分析 [J]. 气象学报, 70 (3): 354–370. Liu Ying, Wang Donghai, Zhang Zhongfeng, et al. 2012. A comprehensive analysis of the structure of a northeast China-cold-vortex and its characteristics of evolution [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (3): 345–370, doi:10.11676/ qxxb2012.032.
- 申乐琳,何金海,周秀骥,等. 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. 气象学报, 68 (6): 918–931. Shen Yuelin, He Jinhai, Zhou Xiuji, et al. 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (6): 918–931, doi:10.11676/qxxb2010.087.
- 寿亦萱, 许健民. 2007. "05.6" 东北暴雨中尺度对流系统研究 I: 常规 资料和卫星资料分析 [J]. 气象学报, 65 (2): 160–170. Shou Yixuan and Xu Jianmin. 2007. The rainstorm and mesoscale convective systems over Northeast China in June 2005. I: A synthetic analysis of MCS by conventional observations and satellite data [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (2): 160–170, doi:10.11676/qxxb2007.016.
- Simmonds I, Bi D H, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. J. Climate, 12 (5): 1353–1367, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1353:AWVFAI>2.0.CO;2.
- 孙军,代刊,樊利强. 2011. 2010 年 7~8 月东北地区强降雨过程分析和预 报技术探讨 [J]. 气象, 37 (7): 785–794. Sun Jun, Dai Kan, Fan Liqiang. 2011. Analysis and forecasting technology on the heavy rainfall processes in the Northeast China during July to August 2010 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37 (7): 785–794, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.7.002.
- 孙力, 安刚. 2001. 1998 年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析 [J]. 大气科学, 25 (3): 342–354. Sun Li, An Gang. 2001. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang–Nenjiang River basin in the summer of 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 342–354, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2001.03.05.
- 王东海, 杨帅, 钟水新, 等. 2009. 切变风螺旋度和热成风螺旋度在东北 冷涡暴雨中的应用 [J]. 大气科学, 33 (6): 1238–1246. Wang Donghai,

Yang Shuai, Zhong Shuixin, et al. 2009. The application of shearing wind helicity and thermal wind helicity in northeastern cold vortex rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1238–1246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.10.

- 王培, 沈新勇, 高守亭. 2012. 一次东北冷涡过程的数值模拟与降水分 析 [J]. 大气科学, 36 (1): 130–144. Wang Pei, Shen Xinyong, Gao Shouting. 2012. A numerical study and rainfall analysis of a cold vortex process over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 130–144, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2012.01.11.
- 王文东. 2010. 2010 年 7 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 36 (10): 122– 127. Wang Wendong. 2010. Analysis of the July 2010 atmospheric general circulation and weather [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36 (10): 122–127, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.10.021.
- 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): 67–77. Xie An, Mao Jiangyu, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (1): 67–77, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.008.
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送"大三角 扇型"影响域特征与中国区域旱涝异常的关系 [J]. 气象学报, 60 (3): 257-266. Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-monsoon "Large Triangle" affecting region and drought-flood abnormality of China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (3): 257-266, doi:10.11676/qxxb2002.032.
- 许秀红, 王承伟, 石定朴, 等. 2000. 1998 年盛夏嫩江、松花江流域暴雨 过程中尺度雨团特征 [J]. 气象, 26 (10): 35-40. Xu Xiuhong, Wang Chengwei, Shi Dingpu, et al. 2000. The features of meso-scale rain clusters over Nenjiang and Songhuajiang in 1998 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26 (10): 35-40, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2000.10.007.
- 袁美英, 李泽椿, 张小玲. 2010. 东北地区一次短时大暴雨 β 中尺度对流 系统分析 [J]. 气象学报, 6 8(1): 125–136. Yuan Meiying, Li Zechun, Zhang Xiaoling. 2010. Analysis of a meso-scale convective system during a brief torrential rain event in Northeast China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (1): 125–136, doi:10.11676/qxxb2010.013.
- 张庆云,陶诗言,张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的 环流条件 [J]. 大气科学, 25 (4): 567–576. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang–Nenjiang River valley in 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 567–576, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2001.04.13.
- 赵伟. 2010. 2010 年 8 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 36 (11): 109–114. Zhao Wei. 2010. Analysis of the August 2010 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36 (11): 109–114, doi:10.7519/j. issn.1000-0526.2010.11.017.
- Zhao S X, Sun J H. 2007. Study on cut-off low-pressure systems with floods over in Northeast Asia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 96 (1): 159–180, doi:10.1007/s00703-006-0226-3.
- 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(D8): D08104, doi:10.1029/2004 JD005413.