

杨柳, 赵俊虎, 封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异 [J]. 大气科学, 42 (1): 81–95. Yang Liu, Zhao Junhu, Feng Guolin. 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 81–95, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16273.

中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送 特征及差异

杨柳^{1,2} 赵俊虎² 封国林^{1,2}

¹ 扬州大学物理科学与技术学院, 江苏扬州 225002

² 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 利用 1951~2015 年 NCEP/NCAR 再分析逐日资料和中国 160 站月降水观测资料, 及中国东部季风区夏季四类雨型 (北方型、中间型、长江型和华南型) 的划分结果, 分析了东亚水汽输送与中国东部季风区夏季降水的关系, 比较了四类雨型的水汽输送、收支特征及其差异, 结果表明: (1) 夏季影响中国东部季风区的水汽通道主要有以下 6 条: 印度洋通道, 表征印度季风区偏南的西风水汽输送; 高原南侧通道, 表征印度季风区偏北的西风水汽输送; 太平洋通道, 表征由西太平洋副热带高压 (副高) 带来的西太平洋的水汽; 西风带通道, 表征西风带的水汽输送; 孟加拉湾通道, 表征来自孟加拉湾向北的水汽输送; 南海通道, 表征来自印度洋和孟加拉湾在中南半岛转向及来自南海的水汽; 与中国东部不同地区降水异常相联系的水汽通道存在明显的差异, 且同一条水汽通道在夏季不同阶段与降水的关系也不尽相同。 (2) 四类雨型的水汽输送和收支特征有明显的差异, 华北盛夏降水主要受亚洲季风水汽输送的影响, 其次是西风带水汽输送, 北方型年二者往往偏强, 尤其是季风水汽输送增加一倍以上, 贡献也明显增加, 20 世纪 70 年代中期之后, 季风水汽输送显著减弱, 西风带水汽输送的重要性相对增大; 淮河流域夏季降水异常主要受太平洋通道水汽输送异常的主导, 其次是高原南侧通道水汽输送, 二者偏强并在淮河流域辐合时, 淮河流域降水偏多形成中间型年; 长江中下游地区夏季降水主要受太平洋通道水汽输送异常的主导, 长江型年, 副高西北侧的西南水汽输送异常加强, 并与北方冷空气异常在长江中下游地区辐合, 区域为正的水汽净收支; 华南地区夏季降水则受印度洋通道、太平洋通道及南海通道的共同影响, 当三条通道异常偏强, 水汽与北方冷空气在华南地区辐合, 形成华南型年。本研究所得结论加深了我们对四类雨型形成机理的认识, 并为汛期主雨带的预测提供了参考。

关键词 中国东部季风区 夏季雨型 水汽输送

文章编号 1006-9895(2018)01-0081-15

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16273

Characteristics and Differences of Summertime Moisture Transport Associated with Four Rainfall Patterns over Eastern China Monsoon Region

YANG Liu^{1,2}, ZHAO Junhu², and FENG Guolin^{1,2}

¹ Department of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Jiangsu Province, Yangzhou 225002

收稿日期 2016-11-26; 网络预出版日期 2017-06-06

作者简介 杨柳, 男, 硕士, 1991 年出生, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: 917729440@qq.com

通讯作者 赵俊虎, E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41505061、41530531、41405092, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306021, 公益性行业 (气象) 科研专项 (重大专项) GYHY201506001

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41505061, 41530531, 41405092), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306021), Key Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201506001)

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081

Abstract Using the reanalysis data from National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and the classification result of FRP (four summer rainfall patterns) (NCP: the northern China rainfall pattern; IRP: the intermediate rainfall pattern; YRP: the Yangtze River rainfall pattern; SCP: the southern China rainfall pattern) over eastern China monsoon region based on monthly rainfall data collected at 160 weather stations in China, climatological characteristics and differences of moisture transport over eastern China monsoon region and their relationships with summer precipitation of the FRP are investigated. The results are as follows. (1) There exist six MTC (Moisture Transport Channel) that affect the summer rainfall over eastern China. The first one is IOMTC (the Indian Ocean Moisture Transport Channel), which represents the northern moisture transport path from Indian monsoon region. The second one is TPMTC (the Tibetan Plateau Southern Side Moisture Transport Channel), which is the southern moisture transport path from Indian monsoon region. The third one is POMTC (the Pacific Ocean Moisture Transport Channel), which is the moisture transport path from the Western Pacific to eastern China under the influence of WPSH (the Western Pacific Subtropical High). The fourth one is WMTC (the Westerly Moisture Transport Channel), which indicates moisture transport from westerly circulations. The fifth one is BBMTC (the Bay of Bengal Moisture Transport Channel), which indicates the northerly moisture transport from the Bay of Bengal. The last one is SCSMTC (the South China Sea Moisture Transport Channel), which is the path of moisture that comes from the Indian Ocean and the Bay of Bengal and turns to the Indo-China Peninsula and the moisture that is originated from the South China Sea and merges into the crossing equator flow. The moisture transport paths associated with precipitation anomalies over different areas in eastern China are obviously different. Furthermore, the relationship between the same moisture transport path and precipitation in different summer stages is not entirely the same. (2) There are obvious differences in moisture transport and budget corresponding to the FRP. The midsummer (July and August) precipitation anomaly in the North China is most influenced by the Asian monsoon moisture transport, followed by that of the westerly moisture transport. In NCP years, the above two types of moisture transport both tend to be much stronger, especially the former whose strength can be more than doubled and its contribution to NCP also increases significantly. However, the moisture transport by Asian monsoon circulation underwent an abrupt weakening at the end of the 1970s, while the contribution of westerly moisture transport to NCP increased. The anomalous summer precipitation over Huaihe River Basin is significantly correlated primarily with the POMTC and secondarily with the TPMTC. The precipitation over the Huaihe River Basin increases when the moisture transport of the two types of MTC enhance and converge over Huaihe River Basin, leading to the formation of the IRP. The summer precipitation over MLYRB (the middle and lower reaches of Yangtze River Basin) is dominated by anomalous moisture transport of POMTC. As for the YRP years, the moisture transport from the northwestern side of the WPSH strengthens and the warm moist air interacts with cold air from the north over the MLYRB. The summer precipitation over South China is affected by the IOMTC, POMTC and SCSMTC. When the moisture transported from the above three MTCs are stronger and converges with cold air from the north over South China, the SCP forms. The results of this study can enhance our understanding of the formation mechanisms of the FRP, and provide a reference for the prediction of the main rain belt during rainy season.

Keyword East China monsoon region, Rainfall pattern in summer, Moisture transport

1 引言

中国地处东亚季风区, 受东亚夏季风异常的影响, 夏季降水的年际变率非常大, 容易发生旱涝灾害 (Ding, 1994, 2007; 施能等, 1996; Wu et al., 2010; 封国林等, 2015; 李维京等, 2015), 通过揭示中国东部季风区夏季旱涝的形成机制和预测信号, 进而做出准确的预测, 可以为国家防灾、减灾提供重要的依据 (施能等, 1999, 2001; Wang et al., 2009; 丁一汇, 2011; 赵俊虎等, 2012, 2014; Feng et al.,

2013; 封国林等, 2013; Gong et al., 2015)。从全国大范围看, 夏季主汛期降水主要预报雨带的南北位置, 即对雨型的预报 (王绍武等, 1998; Zhao and Feng, 2014; Gong et al., 2016)。正常情况下, 夏季雨带从华南向华北推进, 但是受多种因素的复杂影响, 雨带推进的速度加快或者长时间滞留在某区域, 形成了不同的雨型 (魏凤英等, 2012)。其中, 水汽输送的强弱和路径是影响雨带和雨型的重要因素之一, 因为水汽是形成降水的必要条件之一。大气中水汽输送和收支是研究全球大气环流持续

和变化的一个重要方面（周天军等，2001；黄荣辉等，2011；江志红等，2011）。早在 20 世纪 30 年代，竺可桢（1934）就提出中国降水与东亚季风水汽输送的关系。涂长望和黄仕松（1944）指出了中国雨带北进和南撤与东亚夏季风水汽输送的进退密切相关。因此研究东亚季风区水汽输送的特征及其与中国夏季降水的关系，对于了解水分循环和预测主雨带的位置有重要的实际意义。

国内外学者们在水汽输送的源和汇、水汽输送路径、水汽输送的年际和年代际变化，及水汽输送与降水的关系等方面开展了大量的研究。谢义炳和戴武杰（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沿以南风及东南风的形式进入中国内陆，二是印度低压的东南方以西南风的形式进入中国西南部。Simmonds et al.（1999）讨论了中国夏季水汽输送和收支，指出东南亚和印度季风环流分别从南海和孟加拉湾为中国东南部提供水汽，而对于东北及华北的部分地区，中纬度的西风水汽输送起主导作用。徐祥德等（2002）分析了南亚季风水汽输送关键区“大三角扇型”区域（以青藏高原地区为顶端，南海季风与印度季风涉及的低纬活动源区为底边）特征，指出夏季青藏高原地区是中国东部地区夏季长江流域梅雨带西边界重要水汽源或“转运站”，大三角区域热源强信号源区域的水分循环时空演变、遥相关特征及其对亚洲季风爆发的综合影响等均是认识中国及东亚旱涝异常成因的重要科学问题。Zhang（2001）指出，当印度季风水汽输送偏强（弱），东亚季风水汽输送偏弱（强）时，对应长江中下游地区降水偏少（多）。谢安等（2002）研究了夏季风期间长江中下游地区水汽输送的气候特征，指出来自孟加拉湾经中南半岛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，孟加拉湾地区及南海地区对长江中下游地区水汽输送的长时间维持是造成 1998 年长江流域洪涝的主要原因。黄荣辉和陈际龙（2010）分析了我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异，指出两者水汽输送特征明显不同，东部夏季水汽输送经向输送要大于纬向输送，西部则相反。叶敏和封国林（2015）研究了长江中下游地区夏季降水的水汽路径并给出了客观定量化的定义，通过各水汽通量指标与前期海温关系的分析，发现前冬东太平洋发生 El Niño 时，有利于夏季西太平洋水汽输送增强，进而有利于长江中下游地区夏季

降水偏多。周晓霞等（2008）研究指出中国大陆的水汽主要经南海北边界输入，水汽输送的北进与雨带的北推相一致，并分析了华北汛期水汽输送的时空特征及其与降水的关系，发现不同水汽通道对华北降水的影响区域不同，华北汛期水汽主要来自亚洲季风区水汽输送，其次是西风带的水汽输送。Sun et al.（2010）利用 NCEP/NCAR 再分析资料研究了东北地区夏季水汽输送与暴雨的关系，结果表明当东北夏季发生大范围的强降水时，东亚夏季风异常活跃，季风向北的水汽输送也明显加强，而局地强降水主要是由西风带的水汽辐合所致。

对于水汽输送和中国雨带关系的研究还不是很。田红等（2002）分析了夏季水汽输送的特征，并讨论了中国夏季三类雨型与异常水汽输送的关系。Zhou and Yu（2005）分析了长江型降水和淮河型降水的水汽输送差异，发现长江流域的异常降水对应一支东北风和一支西南风水汽输送在该地辐合，而淮河流域的异常降水带为中纬度西风和副热带西南风携带的水汽在此汇合所致。夏季主雨带的分型妥当与否直接影响到预报水平（王绍武，1998）。廖荃荪等（1981）将中国东部夏季降水雨带从北向南划分为三类雨型：I 类，北方型，主要多雨带位于黄河流域及其以北，江淮流域大范围少雨；II 类，中间型，主要多雨带位于黄河至长江之间，雨区中心一般在淮河流域一带；III 类，南方型，主要多雨带位于长江流域或江南，淮河以北大范围地区及东南沿海地区少雨。这种划分雨型类数不多，有利于分析规律和进行预测。但将主要多雨带位于长江流域及其以南地区合为一类范围太广，例如 1954 年长江流域大水为 III 类，1997 年华南至江南多雨也是 III 类，这两年的降水分布和成因差别很大，这显然对寻找每一类的预报指标不利（王绍武等，1998）。孙林海等（2005）利用经验正交函数（EOF）分解、主成分分析等数理统计方法，对 1880~2002 年中国东部季风区夏季降水进行了客观分型，将三类雨型中的南方型细化为长江型和华南—江南南部型，但对 2002 年以后的雨型没有进行划分。王绍武和黄建斌（2006）根据 1951~2005 年每年夏季中国东部最大降水距平百分率所处位置，也将雨带划分为了四类雨型（即北方型、黄淮型、长江型和江南型）。但这两种划分方法，很多年份的雨型不一致。近来，Yang et al.（2016）在前人研究的基础上，利用相似度量法对 1951~2015

年中国东部季风区夏季四类雨型进行了客观划分,并分析了各类雨型与东亚夏季风的关系;Zhao et al. (2017) 通过分析四类雨型对应的东亚大气环流系统配置的特点及其差异,研究了不同雨型形成的环流配置特征。那么每一类雨型是由哪一条水汽通道异常主导而形成? 对应怎样的水汽输送、收支特征? 不同雨型之间有何差异? 本文将对这些问题进行讨论,进一步从水汽输送差异的角度认识四类雨型形成的机理。

2 资料和方法

本文所用资料主要包括: 1951~2015 年 NCEP/NCAR 全球再分析资料的风场 (u 、 v)、比湿 q 的日平均资料 (Kalnay et al., 1996), 水平空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向从 1000 hPa~300 hPa 共 8 层等压面; 中国气象局国家气候中心提供的 160 站月平均降水量资料。气候态为 1981~2010 年 30 年平均值。

(1) 水汽输送通量: 本文通过计算水汽通量来进行水汽特征分析。其中水汽通量的计算方法参照丁一汇 (2005) 计算水汽的输送和收支的方法, 具体如下:

对于单位面积空气柱而言, 总的大气水汽输送通量矢量 $\mathbf{Q}$ 可通过如下进行计算:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp, \quad (1)$$

纬向和经向水汽输送通量分别为

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} u q dp, \quad (2)$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} v q dp, \quad (3)$$

边界积分的水汽输送表示为

$$F_u = \int Q_\lambda a d\phi, \quad (4)$$

$$F_v = \int Q_\phi a \cos \phi d\lambda, \quad (5)$$

区域的总水汽收支为

$$D_s = \sum (F_u, F_v) = F_1 - F_0. \quad (6)$$

其中, 公式 (1) 到 (6) 中, g 是重力加速度, $\mathbf{V}$ 是该单位气柱各层大气的风速矢量, u 、 v 分别为表征纬向风速和经向风速, p_s 表征地表面气压值。 F_1 为水汽流入总量, F_0 为水汽流出总量, a 为地球半径。

(2) 合成分析及其信度检验: 采用合成分析 (施能和古文保, 1993), 对各类雨型及其对应的水汽

输送特征进行分析, 并进行了信度检验。

$$t = \frac{\bar{x}_{1i} - \bar{x}_{2i}}{\sqrt{\frac{n_1 \sigma_{1i} + n_2 \sigma_{2i}}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}, \quad (7)$$

其中, n_1 和 n_2 为两组样本的时间长度, $\bar{x}_{1i}$ 和 $\bar{x}_{2i}$ 是分别为两组样本第 i 站 (格) 点的平均值, σ_{1i} 和 σ_{2i} 分别是两组样本第 i 站 (格) 点的均方差。计算出 $|t|$ 值与自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的临界值比较, 进行信度检验。

3 中国东部季风区夏季雨型划分

Yang et al. (2016) 利用相似度量法对 1951~2015 年中国东部季风区夏季四类雨型进行了客观划分。由图 1 可见, 北方型年 (简称 NCP; 图 1a), 中国东部主要多雨区位于黄河流域及其以北地区, 降水中心一般在河套地区至渤海湾, 而淮河流域及其以南大范围少雨, 偏少中心在江淮地区; 中间型年 (简称 IRP; 图 1b), 主要多雨区位于黄河下游至长江下游之间地区, 及东北中、东部, 降水中心在淮河流域, 而西北至华北西部、及长江以南大部分地区降水偏少, 偏少中心在河套地区和江南西部地区; 长江型年 (简称 YRP; 图 1c), 主要多雨区位于长江流域, 东北西部及内蒙中东部降水也偏多, 而西北东部、华北和华南以少雨为主; 华南型年 (简称 SCP; 图 1d), 主要多雨区位于华南至江南南部, 而长江流域及其以北地区以少雨为主。

由 1951~2015 年的中国东部季风区夏季雨型年份可见 (表 1), 典型的北方型有 23 年, 占总年份的 35.4%, 主要发生在 20 世纪 50 年代末至 90 年代初; 典型的中间型有 18 年, 占总年份的 27.7%,

表 1 1951~2015 年中国东部季风区夏季四类雨型年份表
Table 1 Classification of four typical rainfall patterns in the summer over the East China monsoon region during 1951~2015

雨型类型	年份	年数	频率
北方型 (NCP)	1953, 1958, 1959, 1961, 1964, 1966, 1967, 1970, 1973, 1976, 1977, 1978, 1979, 1981, 1985, 1986, 1988, 1990, 1992, 1995, 2004, 2012, 2013	23	35.4%
中间型 (IRP)	1951, 1956, 1957, 1960, 1962, 1963, 1965, 1971, 1972, 1974, 1982, 1984, 1989, 2000, 2003, 2005, 2007, 2009	18	27.7%
长江型 (YRP)	1954, 1969, 1980, 1983, 1987, 1991, 1993, 1996, 1998, 2010, 2011, 2015	12	18.5%
华南型 (SCP)	1952, 1968, 1994, 1997, 1999, 2001, 2002, 2006, 2014	9	13.8%

主要发生在 20 世纪 50 年代末至 70 年代初和 21 世纪 00 年代两个阶段；典型的长江型有 12 年，占总年份的 18.5%，主要发生在 20 世纪 80 年代至 90 年代；典型的华南型有 9 年，占总年份的 13.8%，主要发生在 20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初；另有 3 年雨型不典型（1955 年，1975 年，2008 年），占总年份的 4.6%。由此可见，四类雨型出现的时段

具有显著的年代际特征。

4 东亚水汽输送通道及其与中国东部季风区夏季降水的关系

图 2 是东亚季风区 1951~2015 年夏季（6~8 月）平均的整层水汽输送空间分布。图 2a 是夏季东亚季风区多年平均的水汽输送矢量场。总体来

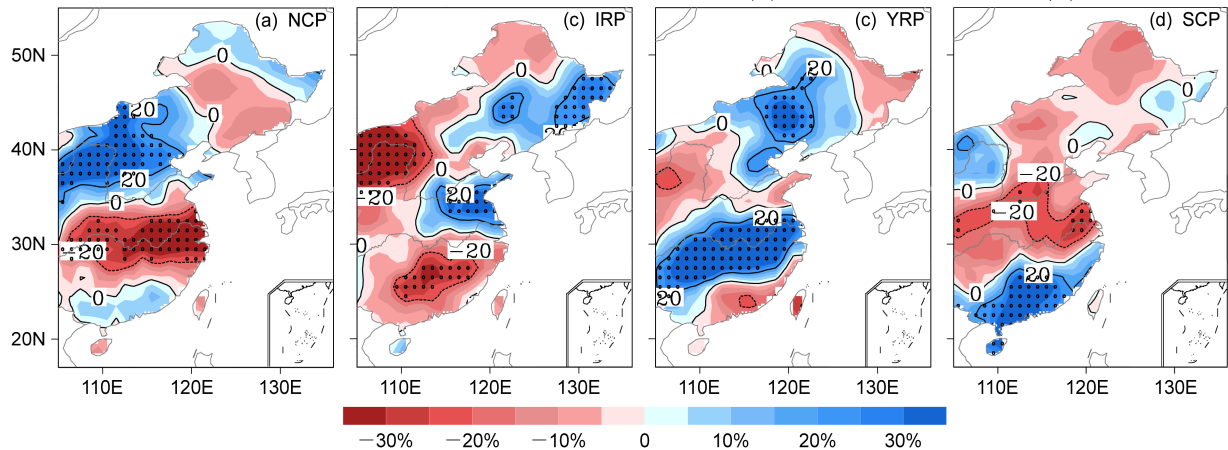


图 1 中国东部季风区四类雨型典型年份降水距平百分率合成

Fig. 1 Composite percentage summer precipitation anomalies in typical years of (a) NCP (the northern China rainfall pattern), (b) IRP (the intermediate rainfall pattern), (c) YRP (the Yangtze River rainfall pattern), and (d) SCP (the southern China rainfall pattern) in East China

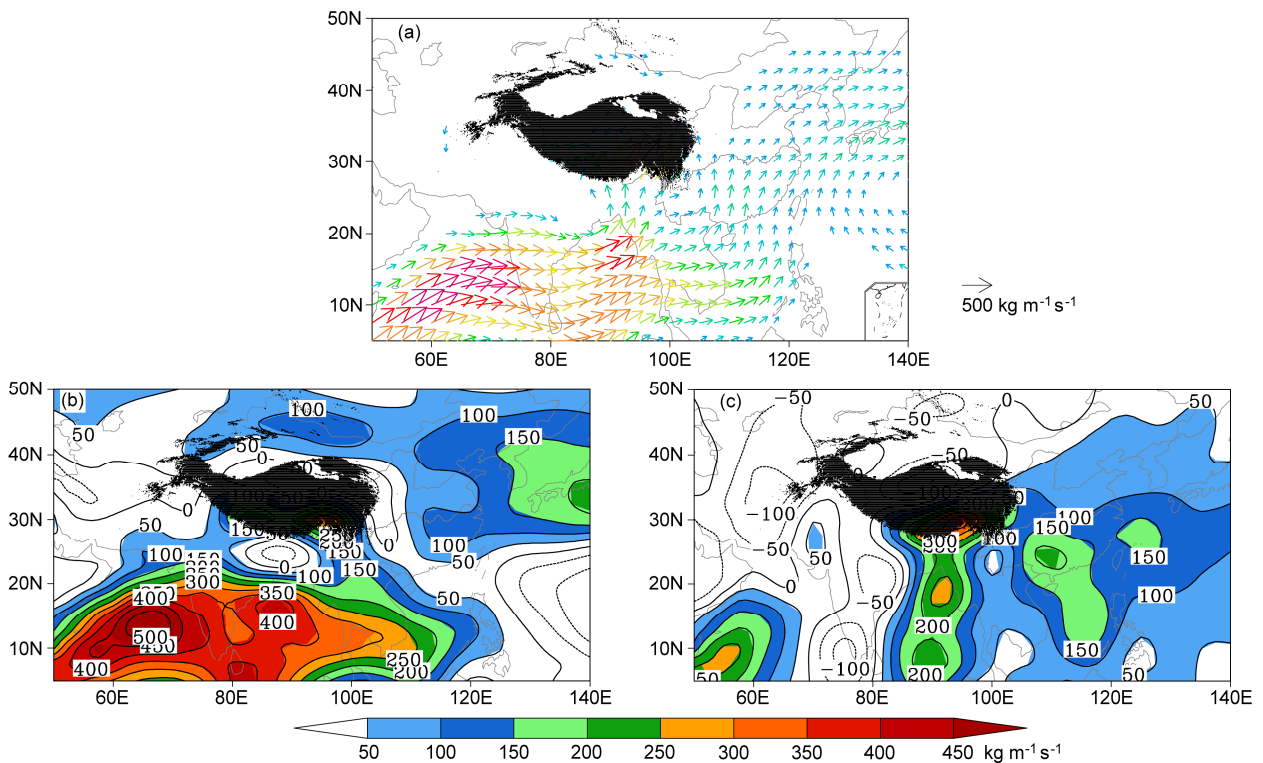


图 2 1951~2015 年夏季平均水汽输送特征（单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）：(a) 水汽通量矢量；(b) 纬向水汽输送；(c) 经向水汽输送。黑色区域表示青藏高原大地形

Fig. 2 Climatological mean distribution of summer (June–July–August) moisture transport during 1951–2015 (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) Zonal moisture transport, (b) meridional moisture transport, and (c) moisture transport flux vectors. Black area represents the Qinghai–Tibet Plateau

看,夏季进入中国大陆的水汽主要有四支:第一支是印度西南季风气流经孟加拉湾和中印半岛进入中国西南边界的水汽;第二支是由 105°E 附近越赤道气流与南亚季风的南支在南海南部汇合,流经南海北部进入中国南边界;第三支是西太平洋水汽沿西太平洋副热带高压(简称副高)西南侧的东南季风输送到达中国东南边界;第四支是中纬度西风气流带来的水汽,从中国西北边境进入并向东输送。由此可见,供给中国东部季风区夏季降水的水汽主要由印度西南季风从孟加拉湾带来的水汽,副热带东南季风从热带西太平洋带来的水汽,越赤道气流从南海带来的水汽以及中纬度西风从北大西洋带来的水汽,这四支水汽基本体现了印度季风、南海季风、副热带季风和中纬度西风带对中国夏季水汽输送和气候的综合影响。从四条水汽输送的量值来看,西北通道要比低纬度三条水汽通道明显偏弱。这与黄荣辉和陈际龙(2010)研究结论相一致。

这四支水汽输送从纬向和经向细分来看,纬向水汽输送可以划分为四条水汽通道(图 2b): (1) 印度洋通道,主要位于 $(10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 范围内,由西向东横贯阿拉伯海经孟加拉湾到达南海南部地区的水汽输送,强度较强,表征印度季风区偏南的西风水汽输送强度,为了体现它对中国东部夏季降水的影响,参照周晓霞等(2008)定义水汽通道的方法,定义 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 范围内通过 100°E 截面的纬向通量,表示印度洋通道的水汽输送强度; (2) 高原南侧通道,主要位于 $(20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E})$ 范围内,是来自印度洋和孟加拉湾转向或经青藏高原转向向东输送的水汽,实际代表印度季风区偏北的西风水汽输送强度,参照李永华等(2010)定义水汽通道的方法,考虑到北部青藏高原的影响,定义 $22.5^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 范围内通过 100°E 截面的纬向通量,表示高原南侧通道的水汽输送强度; (3) 太平洋通道,主要位于 $(25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E})$ 范围内,表征来自西太平洋的水汽,经由副高南侧的东风携带并转向为西南水汽输送进入中国东部地区,参照周晓霞等(2008)定义水汽通道的方法,定义 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围内通过 120°E 截面的纬向通量,表示太平洋通道的水汽输送强度; (4) 西风带通道,主要位于 $(35^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 范围内,表征西风带的水汽输送,定义 $35^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 范围内通过 110°E 截面的纬向通量,表示西风带通道的水汽输送强度。经向水汽输送主要有两条通道

(图 2c): (1) 孟加拉湾通道,主要位于 $(5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 85^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E})$ 范围内,表征来自孟加拉湾向北的水汽输送,为了体现它对中国东部夏季降水的影响,定义 $85^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 范围内通过 20°N 截面的经向通量,表示孟加拉湾通道的水汽输送强度; (2) 南海通道,主要位于 $(10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 范围内,表征来自印度洋和孟加拉湾在中南半岛转向以及来自南海的水汽,定义 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围内通过 20°N 截面的经向通量,表示南海通道的水汽输送强度。

由此可见,图 2a 中的第一支水汽输送可以划分为三条水汽通道:即高原南侧通道、印度洋通道和孟加拉湾通道,这三条水汽通道输送的水汽主要体现印度季风输送水汽的特征,水汽主要来源于印度洋;而太平洋通道水汽主要体现东南季风输送水汽的特征,水汽主要来源于热带太平洋;中南半岛南海水汽通道则比较复杂,它处于印度季风及东南季风的过渡区域,水汽来源比较复杂,既有来自印度洋的,也有来自太平洋的,还有来自南海越赤道气流的;西风带水汽通道,水汽主要来自大西洋和地中海等的蒸发。已有研究也表明,这 6 条水汽输送通道与中国东部夏季降水关系密切(田红等, 2002; 周晓霞等, 2008; 李永华等, 2010; 叶敏和封国林, 2015)。

为分析夏季各条水汽通道与中国东部降水的关系,根据图 1 中四类雨型的降水显著区域,选取华北区域 $(35^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 、淮河流域 $(32.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 、长江中下游地区 $(27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 和华南地区 $(20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E})$ 。将每个区域平均的降水量定义为该区域的降水指数。表 2 详细的给出了 1951~2015 年夏季及逐月各水汽通道与中国东部四个区域降水指数的相关系数。

首先从华北夏季降水与各水汽通道的相关系数可见,华北不同阶段降水与水汽通道的关系差异较大,其中,6~8 月逐月降水与印度洋通道、及 6~7 月降水与高原南侧通道关系均较弱,8 月降水与高原南侧通道呈显著正相关;6~8 月逐月降水与西风带通道均呈正相关,其中 7 月最显著;6~8 月逐月降水与孟加拉湾通道和南海通道均呈正相关,但并不显著;6 月、盛夏(7~8 月)降水与太平洋通道分别呈正、负相关,表明华北夏季降水受副高带来的水汽强弱的影响,但副高的位置是变动的,因此 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围内通过 120°E 截面的纬向通量仅

表 2 6 条水汽通道与各区域降水指数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between six moisture channels and regional precipitation indexes

区域降水指数	月份	印度洋通道	高原南侧通道	太平洋通道	西风带通道	孟加拉湾通道	南海通道	季风通道
华北	6	-0.14	0.08	0.22	0.08	0.22	0.16	0.04
	7	-0.10	0.10	-0.24	0.46***	0.21	0.06	0.60***
	8	-0.04	0.26*	-0.05	0.21	0.16	0.18	0.54***
	7~8	-0.08	0.24	-0.25*	0.47***	0.21	0.21	0.64***
	6~8	-0.08	0.18	-0.14	0.48***	0.21	0.18	0.54***
淮河	6	-0.33*	0.23	0.23	-0.04	0.35**	0.13	
	7	0.04	0.39**	0.27	-0.05	0.01	0.11	
	8	-0.11	0.29**	0.22	-0.12	-0.20	0.06	
	7~8	-0.04	0.34**	0.23	-0.09	-0.16	0.08	
	6~8	-0.13	0.25*	0.16	-0.08	-0.06	0.07	
长江	6	-0.26*	0.20	0.65***	-0.16	0.15	0.36**	
	7	-0.17	0.32**	0.54***	-0.30**	0.18	0.25**	
	8	-0.28*	0.04	0.54***	-0.36**	0.03	0.15	
	6~7	-0.36**	0.31**	0.72***	-0.28*	0.09	0.28*	
	6~8	-0.42***	0.21	0.66***	-0.38**	0.07	0.15	
华南	6	-0.06	0.23	0.27*	-0.18	-0.05	0.52***	
	7	0.50***	-0.37**	-0.29*	-0.31**	-0.04	0.38**	
	8	0.26*	-0.41***	0.30*	-0.01	-0.09	0.41***	
	6~7	0.23	-0.04	-0.06	-0.19	-0.07	0.46***	
	6~8	0.19	-0.12	-0.13	-0.22	-0.11	0.36**	

注：水汽通道的月份与降水指数的月份选取一致。

*表示通过 95%的信度检验。

**表示通过 99%的信度检验。

***表示通过 99.9%的信度检验。

能表示到达长江中下游水汽的强弱，不能很好的反映副高偏北以后的水汽输送强度。事实上，孟加拉湾通道、南海通道及太平洋通道均代表了不同性质的夏季风水汽输送，它们在中国东部汇合以后向华北地区输送。因此将 110°~120°E 范围内通过 35°N 截面的经向通量，定义为季风通道水汽输送强度，它反映了西南季风、南海季风及副热带季风分别从孟加拉湾、南海和太平洋带来的水汽，向北输送后进入华北地区。季风通道与 6~8 月逐月降水的相关系数分别为 0.04、0.64 和 0.54，表明 6 月季风通道的水汽尚未到达华北，盛夏季风水汽输送才影响到华北的降水。综上可见，6 月降水的水汽来源较复杂，没有关系密切的水汽通道，盛夏则主要受季风水汽输送和西风带水汽输送的影响，二者水汽输送偏强时华北降水易偏多。

淮河流域夏季降水与高原南侧通道和太平洋通道水汽输送呈正相关，其中与高原南侧通道的关系较显著，即高原南侧通道和太平洋通道偏强时，有利于水汽向淮河流域输送，进而造成淮河流域降水偏多。此外 6 月降水与印度洋通道和孟加拉湾通道分别呈显著的负、正相关。其中，孟加拉湾水汽通道是经向水汽通道，水汽输送需要经过青藏高

原，遇到青藏高原大地形以后水汽部分凝结形成降水，剩余部分转向后到达中国东部地区，它的增强有利于高原南侧通道加强，进而影响淮河流域降水。

长江流域夏季降水与太平洋通道呈显著的正相关，与西风带通道呈显著的负相关，表明长江流域的降水主要受到副高和中高纬度环流的综合影响，副高偏强、偏南时，太平洋水汽通道水汽输送会显著增强，而中高纬西风带水汽输送偏弱则表示经向环流较强，副高携带来的水汽与北方的冷空气在长江中下游地区辐合，容易造成长江中下游地区降水偏多。此外，6~7 月降水与高原南侧通道和南海通道也呈显著的正相关。

从华南夏季降水与各水汽通道的相关系数可见，华南地区夏季逐月降水与南海通道均呈显著的正相关，与孟加拉湾通道关系较弱；其他 4 条水汽通道与各月降水的关系差异则也较大，其中 6 月降水与印度洋通道和高原南侧通道分别呈弱的负、正相关，7~8 月降水则与这两条通道分别呈显著的正、负相关，即反映了华南 7~8 月降水与西南印度季风水汽输送的南支和北支关系的差异，当南支偏强时，北支易偏弱，水汽输送到长江以南地区，造成华南—江南南部降水偏多；6~8 月逐月降水与

太平洋通道分别呈显著的正、负、正相关,反映了夏季副高南北位置的变化对华南降水的影响较大;华南夏季降水与西风带水汽输送呈负相关,其中7月最显著,即西风带水汽输送偏弱时中高纬经向环流偏强,北方冷空气南下到华南地区,与南方来的水汽辐合,容易造成华南地区降水偏多。

综上所述,与中国东部不同地区降水异常相联系的水汽通道存在明显的差异,且同一条水汽通道在夏季不同阶段与降水的关系也不尽相同。

5 夏季四类雨型的水汽输送、收支特征及其差异

为进一步分析四类雨型的水汽输送特征及其差异,对每类雨型年的水汽输送通量场、纬向水汽输送距平、经向水汽输送距平、及水汽输送距平分别进行合成分析。

5.1 北方型的水汽输送及收支特征

由于华北夏季降水主要出现在7~8月(周晓霞等, 2008),两个月降水量占夏季总降水量的80%

左右,且6月华北降水与各水汽通道关系均较弱(表2),因此这里主要分析北方型年华北盛夏的水汽输送及收支特征(图3)。由23个北方型年盛夏的整层积分的水汽输送的合成(图3a)可见,中国东部总水汽输送主要来自低纬的水汽输送通道,但中国东部地区中华北(方框区)的水汽输送明显比东部其他地区强。由纬向水汽通量距平成(图3b)可见,35°N以北为西风水汽输送距平,且华北地区较显著,表明北方型年,西风带水汽输送增强;22.5°~35°N为东风水汽输送距平,且江南地区较显著,表明长江中下游地区的西南水汽输送减弱。由经向水汽通量距平成(图3c)可见,30°~40°N为南风水汽输送距平,表明北方型年,到达北方地区的季风水汽输送增强。由经纬向水汽通量距平成(图3d)可见,西太平洋至中国南方地区为气旋距平水汽输送,环渤海地区至日本岛为反气旋距平水汽输送,表明北方型年副高偏北,副高西北侧的西南水汽输送与中纬度西风输送增强,造成北方降水偏多。

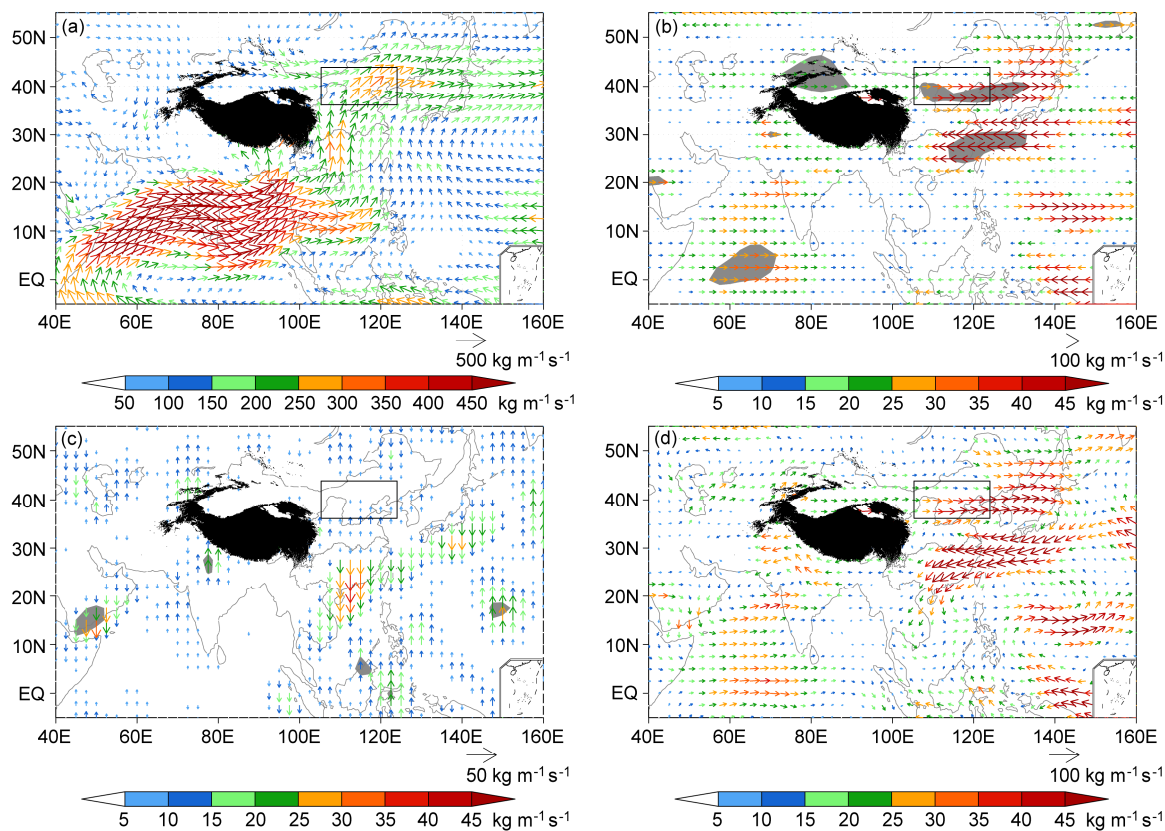


图3 北方型年盛夏(7~8月)整层积分的水汽输送通量合成(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) 原始水汽输送通量; (b) 纬向水汽通量距平; (c) 经向水汽通量距平; (d) 经纬向水汽通量距平。矩形方框表示华北区域, 阴影区域表示通过95%的信度检验

Fig. 3 Composite July and August vertically integrated moisture fluxes in NCP years (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) Moisture fluxes, (b) anomalies of zonal moisture fluxes, (c) anomalies of meridional moisture fluxes, (d) anomalies of zonal and meridional moisture fluxes. The rectangular box indicates North China, shadings indicate the 95% confidence level

分别计算中国东部四个区域四个边界的水汽通量和区域净收支，其中西边界和南边界的水汽通量为正值、东边界和北边界的水汽通量为负值，表示水汽通过边界向区域输入，反之表示水汽通过边界从区域输出；当水汽输入大于水汽输出时，区域净收支为正。从 23 个北方型年华北区域各边界和区域的水汽收支（表 3）可见，华北区域水汽主要从南边界和西边界收入，两条边界气候平均的水汽收入分别为 62.00×10^6 和 $44.20 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ ，贡献分别占 58.4% 和 41.6%；而北方型年平均的收入分别为 136.75×10^6 和 $69.15 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ ，贡献分别占 69.4% 和 33.6%，其中正距平分别有 21 年和 20 年，即北方型年季风和西风带水汽输送均增强，尤其是季风水汽输送增加一倍以上，贡献也明显增加。此外，20 世纪 70 年代中后期以来，南边界的水汽输送较之前显著减弱，而西边界的水汽输送没有明显的减弱。从区域水汽净收支可见，华北盛夏多年平均的水汽净收入为 $12.43 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ ，而北方型年平均为 $26.17 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$ ，水汽净收入增加一倍以上，且 23 个北方型年华北区域水汽净收入均为正。

表 3 北方型年盛夏（7~8 月）华北区域各边界和区域水汽收支
Table 3 Moisture budget over North China in July and August in NCP years

	水汽收支 ($\times 10^6$) / kg s^{-1}				区域净收支
	西边界	南边界	东边界	北边界	
1953 年	116.70 (+)	198.01 (+)	195.77 (+)	79.05 (+)	39.89
1958 年	87.63 (+)	237.51 (+)	155.81 (+)	160.30 (+)	9.03
1959 年	115.14 (+)	213.27 (+)	186.23 (+)	110.45 (+)	31.73
1961 年	96.05 (+)	487.77 (+)	283.73 (+)	156.80 (+)	143.29
1964 年	63.94 (+)	256.65 (+)	196.56 (+)	55.69 (+)	68.34
1966 年	77.50 (+)	155.53 (+)	183.21 (+)	10.54 (+)	39.28
1967 年	77.59 (+)	185.75 (+)	160.57 (+)	78.37 (+)	24.40
1970 年	30.89 (+)	130.61 (+)	86.74	45.93 (+)	28.83
1973 年	83.99 (+)	204.86 (+)	162.76 (+)	108.18 (+)	17.91
1976 年	82.37 (+)	130.04 (+)	124.59 (+)	68.26 (+)	19.56
1977 年	35.46	64.37 (+)	84.82	14.00 (+)	1.11
1978 年	61.60 (+)	108.35 (+)	128.14 (+)	19.08 (+)	22.73
1979 年	69.84 (+)	65.38 (+)	128.22 (+)	-13.27	20.27
1981 年	68.88 (+)	85.03 (+)	131.78 (+)	8.73 (+)	13.40
1985 年	81.75 (+)	69.73 (+)	133.10 (+)	0.24 (+)	18.14
1986 年	60.30 (+)	18.31	99.85 (+)	-42.32	21.08
1988 年	49.54 (+)	104.59 (+)	96.23	56.58 (+)	1.32
1990 年	95.97 (+)	76.09 (+)	143.90 (+)	7.09 (+)	21.07
1992 年	57.11 (+)	66.72 (+)	105.70 (+)	3.506 (+)	14.62
1995 年	45.96 (+)	79.30 (+)	102.74 (+)	8.05 (+)	14.47
2004 年	10.68	61.71	82.52	-18.52	8.01
2012 年	41.62	64.14 (+)	76.72	16.46 (+)	12.59
2013 年	79.93 (+)	81.46 (+)	158.79 (+)	-10.46	13.06
平均	69.15 (+)	136.75 (+)	139.50 (+)	40.23 (+)	26.17

注：括号内“+”表示相对于气候态的距平符号。

综上可见，华北盛夏水汽主要来自亚洲季风水汽输送，其次是西风带的水汽输送，北方型年二者明显增加，季风水汽输送增加幅度更大，但 1970 年代中后期以来季风水汽输送显著减弱，这与周晓霞等（2008）研究结论相一致。

5.2 中间型的水汽输送及收支特征

图 4 是中间型对应的夏季水汽异常输送。由 18 个中间型年相应的整层积分的水汽输送的合成（图 4a）可见，中国东部总水汽输送主要来自低纬的水汽输送通道，淮河流域（方框区）的水汽输送较强。由纬向水汽通量距平合成（图 4b）可见， $30^\circ \sim 34^\circ \text{N}$ 为西风水汽输送距平，表明中间型年，高原南侧水汽输送增强。由经向水汽通量距平合成（图 4c）可见， 30°N 以北为南风距平，表明中间型年，到达北方地区的季风水汽输送增强。由经纬向水汽通量距平合成（图 4d）可见，中国北方地区为气旋距平水汽输送，西风异常输送和南风异常水汽输送在淮河流域辐合，造成淮河流域降水偏多。

表 4 给出了中间型年淮河流域各边界和区域的水汽收支情况。由表 4 可见，中间型年，淮河流域水汽主要从南边界和西边界收入，南边界和西边界水汽收入正距平分别有 12 和 15 年，即中间型年季风水汽和高原南侧水汽以偏强为主。从 18 年平均来看，南边界和西边界水汽收入贡献分别占 64.2%

表 4 中间型年夏季淮河流域各边界和区域水汽收支

Table 4 Moisture budget over Huaihe River Basin in summer in IRP years

	水汽收支 ($\times 10^6$) / kg s^{-1}				区域净收支
	西边界	南边界	东边界	北边界	
1951 年	29.89 (+)	65.50 (+)	27.34 (+)	59.69 (+)	8.36
1956 年	49.29 (+)	109.91 (+)	46.52 (+)	95.43 (+)	17.26
1957 年	43.58 (+)	68.01 (+)	45.17 (+)	53.90 (+)	15.52
1960 年	59.60 (+)	100.24 (+)	27.51 (+)	126.60 (+)	5.73
1962 年	53.40 (+)	82.97 (+)	33.75 (+)	90.79 (+)	11.82
1963 年	44.61 (+)	87.57 (+)	29.13 (+)	98.68 (+)	4.37
1965 年	38.13 (+)	49.54 (+)	41.92 (+)	34.5 (+)	11.24
1971 年	48.99 (+)	79.45 (+)	55.51 (+)	63.61 (+)	9.32
1972 年	22.92 (+)	40.94 (+)	17.75	41.36 (+)	4.75
1974 年	29.21 (+)	37.42	27.6 (+)	34.44 (+)	4.58
1982 年	15.26	38.60	17.63	27.6	8.63
1984 年	22.16 (+)	37.97	21.28	31.66 (+)	7.19
1989 年	20.0 (+)	19.19	18.92	16.25	4.02
2000 年	6.42	36.03	10.28	26.94	5.23
2003 年	39.86 (+)	42.89 (+)	49.79 (+)	20.84	12.13
2005 年	19.93 (+)	58.81 (+)	29.81 (+)	40.65 (+)	8.28
2007 年	16.79	54.30 (+)	27.16 (+)	36.47 (+)	7.46
2009 年	21.01 (+)	30.93	25.53	19.41	7.0
平均	32.28 (+)	57.79 (+)	30.70 (+)	51.05 (+)	8.33

和 35.8%，由此可见，淮河流域汛期水汽主要来自亚洲季风水汽输送。从区域水汽净收支可见，18 年淮河流域水汽净收入为正。此外，20 世纪 80 年代之后，南边界和西边界的水汽输送较之前显著减弱。

5.3 长江型的水汽输送及收支特征

图 5 给出了长江型年份的水汽输送特征。图 5a 是 12 个长江型年相应的整层积分的水汽输送的合成图，由图可见，中国东部地区中长江中下游地区的水汽输送明显比东部其他地区强。由纬向水汽通量距平合成（图 5b）可见，长江中下游及其以南地区为较显著的西风水汽异常输送，表明长江型年，副高东南侧转向西风水汽输送增强；由经向水汽通量距平合成（图 5c）可见，长江中下游及其以南为显著的南风水汽输送距平，南风距平越过长江，而江北则为北风水汽输送距平，二者在长江中下游地区辐合。由经纬向水汽通量距平合成（图 5d）可见，西太平洋至中国南方地区为反气旋距平水汽输送，表明长江型年副高偏强偏西偏南，副高西北侧的西南异常输送与北方冷空气异常在长江中下游地区辐合，造成该地区降水偏多。

表 5 给出了长江型年长江中下游地区各边界和区域的水汽收支情况。由表 5 可见，12 个长江型年，长江中下游地区水汽主要从南边界和西边界收入（贡献分别占 80.0% 和 20.0%），12 年南边界和西边界水汽收入均为正距平，即长江型年副高南侧转向的西风 and 夏季风水汽输送均偏强。从区域水汽净收支可见，12 个长江型年长江中下游地区水汽净收入均为正。

表 5 长江型年夏季长江中下游地区各边界和区域水汽收支
Table 5 Moisture budget over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin in summer in YRP years

	水汽收支 ($\times 10^6$) / kg s^{-1}				
	西边界	南边界	东边界	北边界	区域净收支
1954 年	40.28 (+)	273.48 (+)	111.85 (+)	151.83 (+)	50.08
1969 年	66.98 (+)	191.00 (+)	105.82 (+)	110.62 (+)	41.54
1980 年	64.35 (+)	183.29 (+)	143.75 (+)	52.92	50.97
1983 年	71.03 (+)	157.50 (+)	117.89 (+)	69.90 (+)	40.75
1987 年	59.59 (+)	179.92 (+)	122.15 (+)	78.21 (+)	39.14
1991 年	57.31 (+)	182.75 (+)	118.66 (+)	77.70 (+)	43.69
1993 年	49.22 (+)	160.08 (+)	133.51 (+)	34.05	41.74
1996 年	40.47 (+)	186.85 (+)	80.39 (+)	88.47 (+)	58.46
1998 年	65.06 (+)	222.29 (+)	137.31 (+)	79.54 (+)	70.50
2010 年	50.21 (+)	133.58 (+)	66.83 (+)	71.97 (+)	44.99
2011 年	42.84 (+)	133.26 (+)	75.43 (+)	59.85	40.82
2015 年	43.12 (+)	102.93	75.27 (+)	34.53	36.25
平均	54.21 (+)	175.58 (+)	107.41 (+)	75.80 (+)	46.58

5.4 华南型的水汽输送及收支特征

图 6 给出了华南型年的水汽输送特征。由 9 个华南型年相应的整层积分的水汽输送的合成（图 6a）可见，华南地区的水汽输送明显比东部其他地区强。由纬向水汽通量距平合成（图 6b）可见， $25^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 为显著的东风水汽输送距平， $0 \sim 20^{\circ}\text{N}$ 为显著的西风水汽输送距平。由经向水汽通量距平合成（图 6c）可见，中国东部为北风水汽输送距平，华南南部为南风水汽输送距平，华南至江南南部地区为南北风水汽输送异常交汇地区，即水汽在该地区辐合。由经纬向水汽通量距平合成图（图 6d）可见，长江中下游以南至菲律宾为气旋水汽输送距平控制，华南地区水汽辐合较强，造成华南降水偏多。

表 6 给出了华南型年华南地区各边界和区域的水汽收支情况。从 9 个华南型年各边界平均和气候态的水汽收入来看（表 6），华南地区水汽主要从南边界收入，部分年份西边界也有水汽输入。从区域水汽净收支可见，9 年华南水汽净收入均为正。

表 6 华南型年夏季华南地区各边界和区域水汽收支

Table 6 Moisture budget over South China in summer in SCP years

	水汽收支 ($\times 10^6$) / kg s^{-1}				
	西边界	南边界	东边界	北边界	区域净收支
1952 年	-19.35	229.21 (+)	38.85	168.55 (+)	2.47
1968 年	69.96 (+)	154.03 (+)	87.10 (+)	127.29 (+)	9.59
1994 年	-11.22	190.92 (+)	21.22	133.78 (+)	24.69
1997 年	40.88 (+)	186.19 (+)	102.11 (+)	101.37	23.58
1999 年	52.27 (+)	144.37	93.99 (+)	90.6	12.06
2001 年	-5.38	139.4	6.61	96.05	31.36
2002 年	39.85 (+)	152.49 (+)	68.73 (+)	85.99	37.62
2006 年	21.63	169.96 (+)	69.07 (+)	110.28	12.24
2014 年	26.63	147.13	67.93 (+)	80.66	25.17
平均	23.92	168.19 (+)	61.73 (+)	110.51	19.86

综上所述，中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送和收支特征有明显的差异，水汽输送和收支的异常是造成不同雨型的直接原因之一。

6 结论和讨论

本文首先分析了东亚夏季水汽输送的气候特征及其与中国东部季风区夏季降水的关系，在此基础上比较了中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送、收支特征及其差异，发现中国东部夏季不同区域降水异常与不同的水汽通道异常有关，四类雨型的水汽输送和收支特征有明显的差异，具体结论如下：

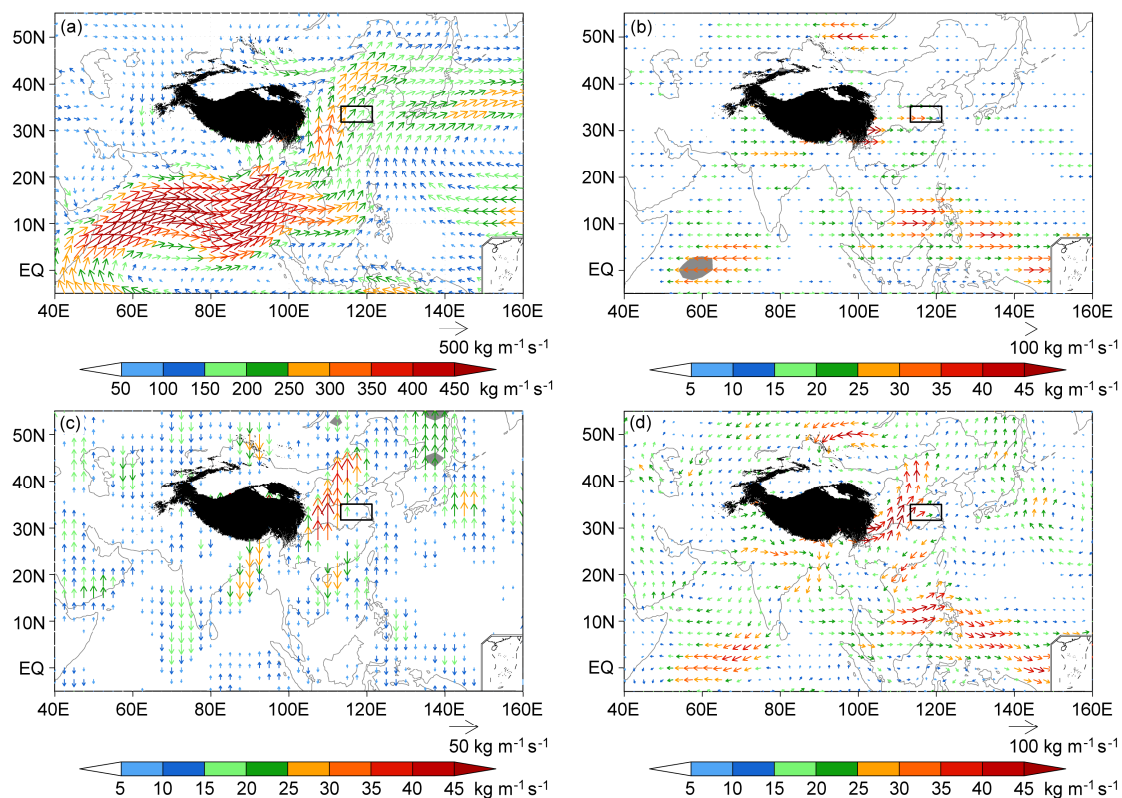


图 4 同图 3，但为夏季中间型年

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for IRP years in summer (June–July–August)

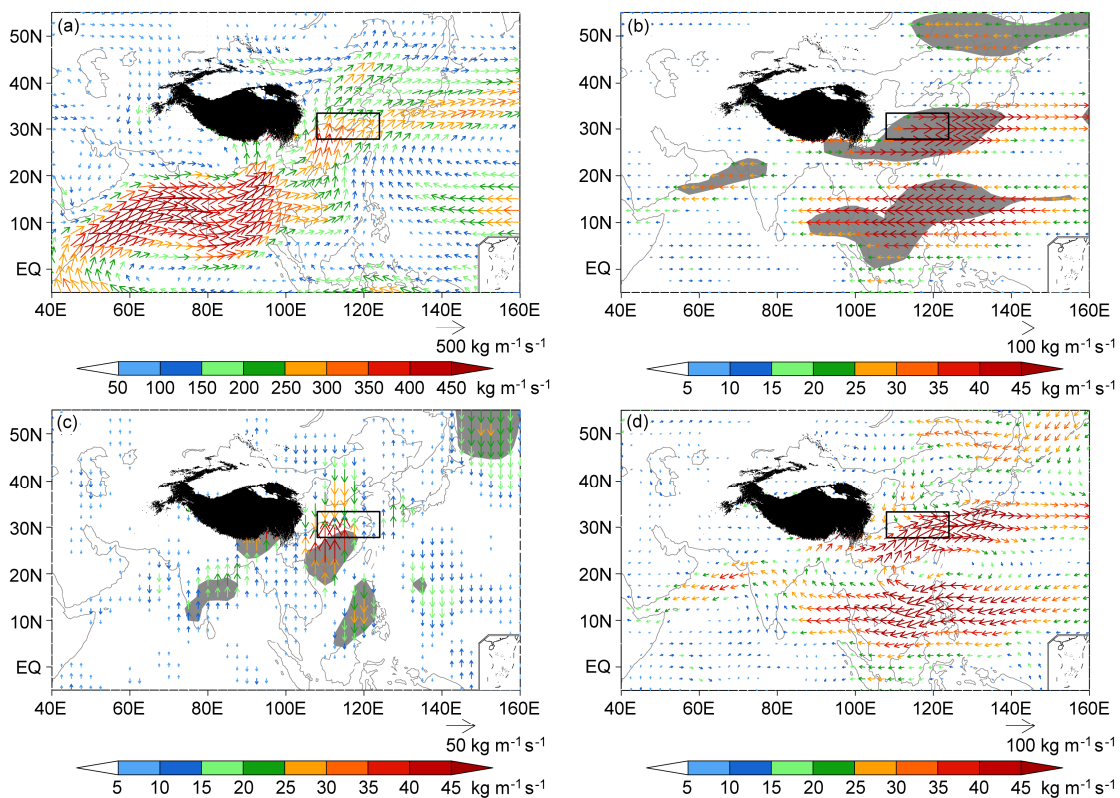


图 5 同图 3，但为夏季长江型年

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for YRP years in summer (June–July–August)

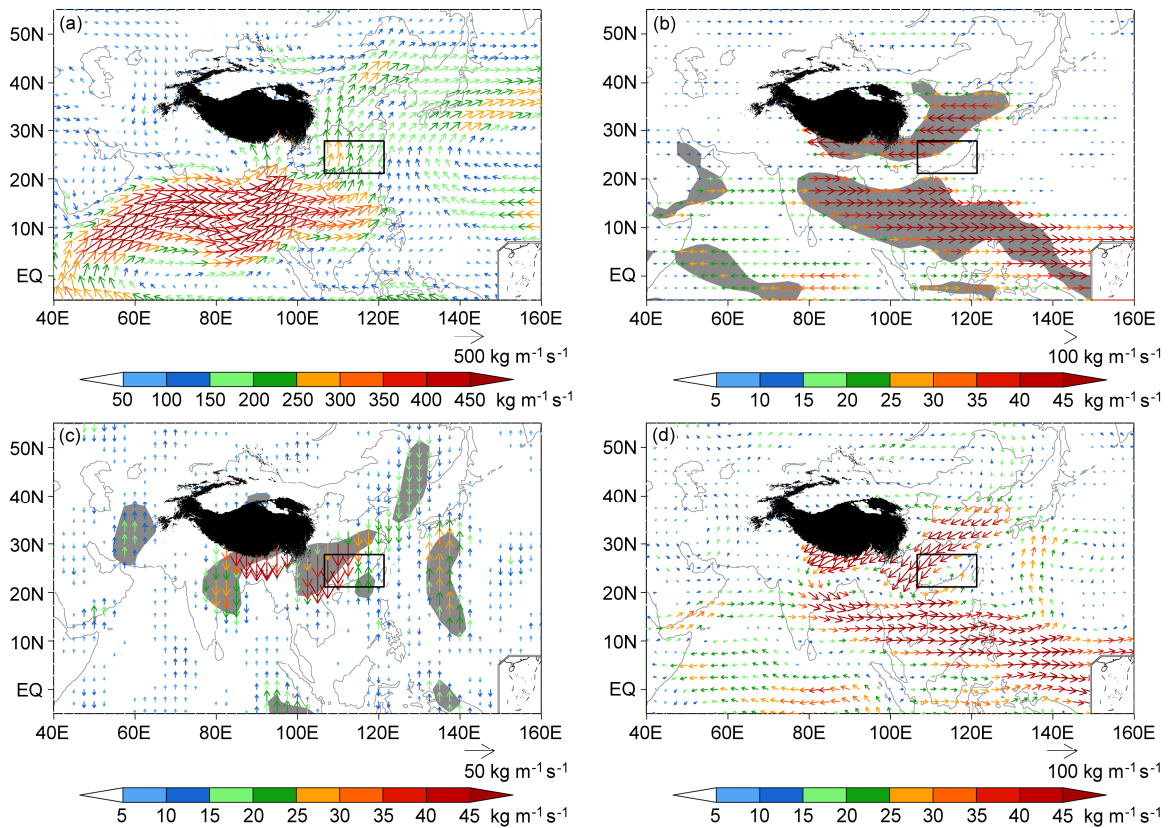


图6 同图3, 但为夏季华南型年

Fig. 6 Same as Fig 3, but for SCP years in summer (June–July–August)

(1) 夏季影响中国东部季风区的水汽通道主要有以下6条: 印度洋通道, 表征印度季风区偏南的西风水汽支输送; 高原南侧通道, 表征印度季风区偏北的西风水汽支输送; 太平洋通道, 表征由副高带来的西太平洋的水汽; 西风带通道, 表征西风带的水汽输送; 孟加拉湾通道, 表征来自孟加拉湾向北的水汽输送; 南海通道, 表征来自印度洋和孟加拉湾在中南半岛转向以及来自南海的水汽; 中国东部主要为自南向北的季风水汽输送, 年际变化较大, 这与中国东部季风区夏季旱涝年际变化大相一致;

(2) 与中国东部不同地区降水异常相联系的水汽通道存在明显的差异, 且同一条水汽通道在夏季不同阶段与降水的关系也不尽相同, 华北地区6月降水的水汽来源较复杂, 没有关系密切的水汽通道, 盛夏则主要受季风水汽输送和西风带水汽输送的影响, 二者水汽输送偏强时华北降水偏多; 淮河流域6月降水与印度洋通道和孟加拉湾通道分别呈显著的负、正相关, 夏季降水则与高原南侧通道和

太平洋通道水汽输送呈正相关, 其中与高原南侧通道的关系较显著; 长江流域6~7月降水与高原南侧通道和南海通道也呈显著的正相关, 夏季降水与太平洋通道呈显著的正相关, 与印度洋通道和西风带通道呈显著的负相关; 华南地区夏季逐月降水与南海通道均呈显著的正相关, 与孟加拉湾通道关系较弱, 各月降水与其他4条水汽通道的关系差异则较大;

(3) 四类雨型的水汽输送和收支特征有明显的差异, 华北盛夏降水主要受亚洲季风水汽输送的影响, 其次是西风带水汽输送, 北方型年, 二者往往偏强, 尤其是季风水汽输送增加一倍以上, 贡献也明显增加, 20世纪70年代中期之后, 季风水汽输送显著减弱, 西风带水汽输送的重要性相对增大; 淮河流域夏季降水异常主要受太平洋通道水汽输送异常的主导, 其次是高原南侧通道水汽输送, 二者偏强并在淮河流域辐合时, 淮河流域降水偏多形成中间型年; 长江中下游地区夏季降水主要受太平洋通道水汽输送异常的主导, 长江型年, 副高西北

侧的西南水汽异常输送加强, 并与北方冷空气异常在长江流域辐合, 区域水汽为正的净收支; 华南地区夏季降水则受印度洋通道、太平洋通道及南海通道的共同影响, 当三条通道异常偏强, 水汽与北方冷空气在华南地区辐合, 形成华南型年。

本文从水汽输送和收支的角度, 研究了中国东部季风区夏季四类雨型水汽输送的差异, 得到一些初步的结论, 所得结论有助于我们加深对四类雨型形成机理的认识, 并为汛期主雨带的预测提供了参考依据。但由于所用资料是再分析资料, 它与实际测站所观测到的实际值有一定的误差, 在计算过程中对地形的考虑也可能不全面。此外, 从 3 个非典型雨型年 (1955 年、1975 年和 2008 年) 的水汽输送场发现, 这 3 年与四类雨型合成的水汽输送场差异很大, 中国东部地区有多个水汽辐合中心, 导致了这三年多雨中心较多, 没有明显的主雨带。这种异常的水汽输送可能与整个夏季低纬度和中高纬度环流系统强烈的季节内振荡有关, 需要进一步分析。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见, 同时也感谢在论文修改过程中陈丽娟研究员的建议和帮助。

参考文献 (References)

- Ding Y H. 1994. Monsoons over China [J]. London: Kluwer Academic, 419pp.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 585pp.
- Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 585pp.
- Ding Y H. 2007. The variability of the Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85B: 21–54, doi:10.2151/jmsj.85B.21.
- 丁一汇. 2011. 季节气候预测的进展和前景 [J]. 气象科技进展, 1 (3): 14–27.
- Ding Yihui. 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 1 (3): 14–27.
- Feng G L, Sun S P, Zhao J H, et al. 2013. Analysis of stable components for extended-range (10–30 days) weather forecast: A case study of continuous overcast-rainy process in early 2009 over the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. Sci. China Earth Sci., 56 (9): 1576–1587, doi:10.1007/s11430-012-4527-8.
- 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 2013. 动力-统计客观定量汛期降水预测研究新进展 [J]. 应用气象学报, 24 (6): 656–665.
- Feng Guolin, Zhao Junhu, Zhi Rong, et al. 2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (6): 656–665, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.002.
- 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力-统计预测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–330.
- Feng Guolin, Zhao Junhu, Yang Jie, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China [M]. Beijing: Science Press, 1–330.
- Gong, Z Q, Hutin C, Feng G L. 2016. Methods for improving the prediction skill of summer precipitation over East Asia–West Pacific [J]. Wea. Forecasting, 31 (4): 1381–1392, doi:10.1175/WAF-D-16-0007.1.
- Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L, et al. 2015. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia [J]. Sci. China: Earth Sci., 58 (3): 404–419, doi:10.1007/s11430-014-4967-4.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34 (6): 1035–1045.
- Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1035–1045, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.01.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01.
- 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.
- Kalnay, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- 李维京, 左金清, 宋艳玲, 等. 2015. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化 [J]. 气象, 41 (3): 261–271.
- Li Weijing, Zuo Jinjing, Song Yanling, et al. 2015. Changes in spatio-temporal distribution of drought/flood disaster in southern China under global climate warming [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41 (3): 261–271, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.03.001.
- 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 2010. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征 [J]. 气象学报, 68 (6): 932–943.
- Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, et al. 2010. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the East of the southwestern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (6): 932–943, doi:10.11676/qxxb2010.088.
- 廖荃荪, 陈桂英, 陈国珍. 1981. 长期天气预报文集 [M]. 北京: 气象出版社, 103–114.
- Liao Quansun, Chen Guiying, Chen Guozhen. 1981. Long-Term Weather Forecast Corpus (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 103–114.
- 施能, 古文保. 1993. 大气环流异常分析中使用合成方法的一个问题 [J]. 气象, 19 (9): 32–34.
- Shi Neng, Gu Wenbao. 1993. A note on composite analysis of atmospheric circulation anomalies [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 19 (9): 32–34.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583.
- Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer

- large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 施能, 杨永胜, 陈辉. 2001. 我国东部夏季降水百年雨型的多时间尺度变化特征研究 [J]. 气象科学, 21 (3): 316–325. Shi Neng, Yang Yongsheng, Chen Hui. 2001. A study on the features of East-China summer rainfall pattern on the multi-time scale in the past 98 years [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (3): 316–325, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2001.03.008.
- 施能, 陈辉, 冯俊茹, 等. 1999. 我国夏季雨型的前期异常特征及预报方法的初步研究 [J]. 应用气象学报, 10 (S): 70–79. Shi Neng, Chen Hui, Feng Junru, et al. 1999. Study on the preceding anomalous characteristics and forecasting method for summer rainfall patterns in eastern China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 10 (S): 70–79, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.1999.z1.009.
- 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.
- Sun L, Shen B Z, Sui B. 2010. A study on water vapor transport and budget of heavy rain in Northeast China [J]. Adv. Atmos. Sci., 27 (6): 1399–1414, doi:10.1007/s00376-010-9087-2.
- 孙林海, 赵振国, 许力, 等. 2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析 [J]. 应用气象学报, 16 (S): 56–62. Sun Linhai, Zhao Zhenguo, Xu Li, et al. 2005. Study of summer rain pattern in monsoon region of East China and its circulation cause [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (S): 56–62, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.z1.007.
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2002. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (4): 496–502. Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. 2002. Features of water vapor transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (4): 496–502, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2002.04.009.
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 夏季风进退 [J]. 气象杂志, 18: 1–20. Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon [J]. Meteorological Magazing (in Chinese), 18: 1–20.
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. Climate Dyn., 33 (1): 93–117, doi:10.1007/s00382-008-0460-0.
- 王绍武, 黄建斌. 2006. 近千年中国东部夏季雨带位置的变化 [J]. 气候变化研究进展, 2 (3): 117–121. Wang Shaowu, Huang Jianbin. 2006. The variations of geographical latitude of rain belts in summer over eastern China during the last millennium [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (3): 117–121.
- 王绍武, 叶瑾林, 龚道溢, 等. 1998. 中国东部夏季降水型的研究 [J]. 应用气象学报, 9 (S): 65–74. Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. 1998. Study on the patterns of summer rainfall in eastern China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 9 (S): 65–74.
- 魏凤英, 陈官军, 李茜. 2012. 中国东部夏季不同雨带类型的海洋和环流特征差异 [J]. 气象学报, 70 (5): 1004–1020. Wei Fengying, Chen Guanjuan, Li Qian. 2012. Differences of oceanic and atmospheric circulation features among the rainfall band patterns in summer in eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (5): 1004–1020, doi:10.11676/qxxb2012.084.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in Southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403, doi:10.1175/2009JCLI3336.1.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. 气象学报, 30 (2): 173–185. Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 30 (2): 173–185, doi:10.11676/qxxb1959.021.
- 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]. Journal of Applied Meteorological Science (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—季风水汽输送“大三角扇形”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.
- Yang L, Zhao J H, Feng G L. 2016. Classification of typical summer rainfall patterns in the East China monsoon region and their association with the East Asian summer monsoon [J]. Theor. Appl. Climatol., doi:10.1007/s00704-016-1843-5.
- 叶敏, 封国林. 2015. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观量化研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 777–788. Ye Min, Feng Guolin. 2015. Objective quantification of moisture transport that influences summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 777–788, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14208.
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (5): 1005–1017.
- Zhao J H, Feng G L. 2014. Reconstruction of conceptual prediction model for the three rainfall patterns in the summer of eastern China under global warming [J]. Sci. China: Earth Sci., 57 (12): 3047–3061, doi:10.1007/s11430-014-4930-4.
- Zhao J H, Yang L, Feng G L. 2017. Circulation system configuration characteristics of four rainfall patterns in summer over the East China [J]. Theor. Appl. Climatol., doi:10.1007/s00704-017-2047-3. (in press)
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. 气象学报, 70 (5): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (5): 1021–1031, doi:10.11676/qxxb2012.085.
- 赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 237–250. Zhao Junhu, Zhi Rong, Shen Qian, et al. 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in

- China and analysis of the cause for anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 237–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12215.
- 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:10.1029/2004JD005413.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. 大气科学, 32 (2): 345–357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July–August [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 345–357, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.13.
- 周天军, 字如聪, 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. 2001. Features of atmospheric moisture transport, convergence and air–sea freshwater flux simulated by the coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 596–608, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.05.03.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, (1): 1–27. Zhu Kezhen. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), (1): 1–27.