

华南夏季降水两次年代际转折的水汽输送异常成因初探

曲姝霖¹, 苏涛², 韩子轩¹, 赵俊虎³, 封国林^{1,2,3}

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002

3 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

摘要 本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和中国 2374 站日降水资料, 通过水汽收支方程分解方法分析了华南夏季降水在 1993-2002 年时段年代际增多以及 2003-2013 年时段年代际减少的水汽输送特征及其成因。结果表明: 1993-2002 年时段 (2003-2013 年时段): 局地环流导致异常下沉 (上升) 气流, 南亚高压偏东 (偏西) 和西太平洋副热带高压 (简称副高) 偏西 (偏东), 菲律宾及副高西南侧水汽输送加强 (减弱), 华南地区低层出现强的水汽辐合 (辐散), 导致降水偏多 (偏少)。华南地区夏季降水两次年代际变化主要与风速变化引起的水汽输送动力散度项的异常有关, 同时还受到与比湿变化引起的水汽输送热力散度项异常、及天气尺度的涡旋引起的水汽输送涡流散度项异常影响。此外, 研究发现水汽输送的异常与环流和海温异常均密切相关。

关键词 华南夏季降水, 年代际转折, 水汽收支方程, 大气环流, 海表温度

稿件编号 2019231C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19231

Preliminary Research on the moisture transport anomalies in two interdecadal changes of summer precipitation in South China

QU Shulin¹, SU Tao², Han Zixuan¹, ZHAO Junhu³, and FENG Guolin^{1,2,3}

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002

3 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract

Based on reanalysis data provided by the National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and the daily

收稿日期 2019-10-18; 网络预出版日期

作者简介 曲姝霖, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候预测研究。E-mail: qsl.ln@163.com

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

资助信息 国家重点基础研究发展计划项目 2017YFC1502303, 国家自然科学基金项目 41530531, 41705053, 41875093。

Funded by National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFC1502303), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41530531, 41705053, 41875093).

rainfall data at 2374 stations from the China Meteorological Administration (CMA), the characteristics of moisture transport of precipitation increasing during 1993-2002 and decreasing during 2003-2012 over South China are compared and the reason of the two decadal changes of summer precipitation in South China is explained by using moisture transport budget equation. Results show that the increase(decrease) of summer precipitation during 1993-2002(2003-2013) in south China was mainly influenced by the local circulation on vertical airstream, eastward(westward) movement of South Asia high and westward(eastward) extension of West Pacific subtropical high (WPSH), which resulted in a strengthening(weakening) of the moisture transport from the Philippines and the southwest side of the WPSH and a strong convergence(divergence) of moisture in the lower layer of south China. The interdecadal variation of summer precipitation in south China is mainly related to the anomaly of dynamic divergence of moisture transport caused by the change of wind speed, it is also affected by the anomaly of thermodynamic divergence of moisture transport caused by the change of specific humidity and the anomaly of subseasonal-scale eddies caused by synoptic scale eddies. In addition, we found that the moisture transport anomalies were closely related to the circulation and SST anomalies.

Keyword Summer precipitation in South China, interdecadal change, moisture budget equation, atmospheric circulation, Sea surface temperatures (SST)

1. 引言

华南地处东亚季风区, 夏季降水与东亚夏季风环流的年际和年代际变化密切相关。Tao and Chen(1987)研究指出, 影响华南地区降水的夏季风环流系统包括西太平洋副热带高压(简称西太副高)、南亚高压、东亚副热带西风急流、定常罗斯贝波和欧亚中高纬度阻塞高压等。高层的南亚高压和低层的西太副高存在“相向而行”和“相背而去”的关系(陶诗言和朱福康, 1964; 谭晶等, 2005), 当南亚高压位置偏西(东), 西太副高位置偏东(西), 华南地区则低层辐合(辐散)异常、高层辐散(辐合)异常, 产生异常上升(下沉)运动, 华南地区降水年代际偏

多(少) (伯忠凯等, 2017)。东亚高空副热带急流对同期和后期东亚及我国东部地区降水影响很大, 夏季东亚急流偏南时华南和江南降水偏多; 相反急流偏北时华北降水偏多 (廖清海等, 2004)。同时, 乌拉尔山附近 ($50^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{E}$) 阻高活动与华南降水为显著的负相关; 而贝加尔湖附近 ($80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 阻高与华南降水关系则呈正相关 (黄菲和姜治娜, 2002)。朱益民 (2003) 研究发现, 当 PDO 处在暖(冷) 位相时, 热带中东太平洋海温异常暖(冷), 北太平洋海温异常冷(暖), 华南南部降水偏多(少)。

华南夏季降水还存在显著的年代际变化 (Ha et al., 2016)。众多研究表明, 我国东部夏季降水在 20 世纪 70 年代中后期、90 年代初和 90 年代末有三次年代际变化 (周连童和黄荣辉, 2003; Ding et al., 2008; Zhu et al., 2011; 吕从梅等, 2014)。其中, 华南夏季降水在 20 世纪 70 年代产生了年代际减少 (Xin et al., 2006; Ding et al., 2008, 2009; Ye and Lu, 2012), 研究基本一致认为这次年代际转折主要受东亚夏季风减弱 (Wang, 2001)、热带印度洋暖池和热带太平洋中东部变暖对应的太平洋年代际振荡 (PDO) 位相转变的影响 (黄荣辉等, 1999; Li et al., 2010; Qian and Zhou, 2014; Yu et al., 2015); 而 20 世纪 90 年代初发生了年代际增多 (Ding et al., 2008; Wang et al., 2009; Wu R et al., 2010), 而在 90 年代末 20 世纪初华南夏季降水又发生了年代际减少 (黄荣辉等, 2013; Ha et al., 2016; Ha et al., 2019)。多数研究认为 90 年代初华南降水年代际增多可能是夏季热带印度洋和太平洋持续变暖引发的沃克环流和哈德莱环流异常导致的青藏高原冬春季积雪增加和东亚季风槽的变化 (Wu et al., 2010; Zhu et al., 2014), 以及欧亚大陆北部春季降雪减少共同作用的结果 (Zhang et al., 2004; Wu et al., 2010)。而 90 年代末至 21 世纪初, 华南夏季降水相比前一时段减少, 主要是由于热带太平洋海温异常导致的西太副高的增强而引发的纬向环流下沉支在华南地区增强 (Ha et al., 2016), 及南海热带气旋活动在本世纪初显著减少导致 (Ha et al., 2014)。

水汽是形成降水的必要条件之一, 并且水汽输送的强弱和路径的变化是影响雨带和雨型的重要因素之一 (周天军等, 2001; 黄荣辉等, 2011)。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。研究水汽收支对降水的研究已有很多。Simmonds et al. (1999) 通过分析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。叶敏和封国林(2015)从水汽路径研究了长江中下游地区夏季降水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 Nino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。杨柳等(2018)则研究了中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异,发现华南型的水汽输送和收支特征与其他雨型有明显的差异。

综上所述,水汽输送和收支异常是中国夏季降水异常的直接原因,而前人对华南夏季降水两次年代际变化的研究主要集中在大气环流和海温、积雪等外强迫信号等方面,但鲜有研究从水汽来源贡献的角度量化地分析华南降水的两次年代际转折,尤其是从水汽输送方程出发,衡量水汽方程各分量贡献的工作还没有。因而本文选择从水汽收支平衡的角度,来对比研究华南地区夏季降水两次年代际变化的成因,探讨水汽收支平衡方程中各项对两次年代际变化的贡献及其与海温异常的联系,相关研究结论将对了解水循环和华南地区旱涝异常预测有一定的参考意义。

2. 资料和方法

2.1 研究数据

本文选取了美国气象环境预报中心(NCEP)提供的逐日以及月平均再分析资料(NCEP/NCAR Reanalysis 1),包括全球月平均高度场(H500)、垂直速度场(ω_{500})、海平面气压(SLP)、逐日风场(u 、 v 分量)、整层比湿(q)再分析资料(Kalnay et al., 1996)和来自美国国家海洋大气局(NOAA)的月平均再分析蒸发资料(Chen et al., 2002),水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文还用到了中国气象局国家气候中心提供的2374站逐日降水观测资料。以上资料的时间范围均为1979~2017年。Ha et al (2016)研究发现,华南地区夏季降水的年代际转折主要发生在6月中旬至8月中旬(参考Ha et al., 2016文章图4),因此本文中夏季指的是6月15日至8月15日。华南地区范围为 105°E – 120°E , 21°N – 30°N ,包含580个站点。

2.2 水汽收支方程

大气水汽输送收支方程表示在季节尺度上通过其边界进、出大气柱的降水量、

蒸发量和水汽输送量是平衡的(Brubaker et al., 1993)。方程公式为:

$$\rho_w g(\bar{P} - \bar{E}) = -\overline{\nabla \cdot \int_0^{p_s} q \vec{V} dp} \quad (1)$$

其中, E 为蒸发量, P 为降水量, ρ_w 为水汽密度, g 为重力加速度, p_s 为地表气压, q 为比湿, $\vec{V}$ 为风速, 上划线表示夏季平均, 方程右端为水汽辐散通量, 代表进出大气柱的净水汽输送(以下简称“水汽输送项”)。此外, 水汽输送平流项是由比湿和风速决定, 这两个变量分别与大气的热力和动力作用有关(周天军等, 1999; Seager and Vecchi., 2010; Seager et al., 2010; Han et al., 2018), 水汽平衡方程可写为:

$$\rho_w g([\bar{P}] - [\bar{E}]) = -\left[\overline{\nabla \cdot \int_0^{p_s} q \vec{V} dp}\right] = -\left[\int_0^{p_s} \nabla \cdot (\bar{q} \vec{V}) dp\right] - \left[\int_0^{p_s} \nabla \cdot (\bar{q} \vec{V}) dp\right] - \delta_s \quad (2)$$

右式中分别为水汽输送平流项、水汽输送涡流项以及与地表下垫面不均匀引起的变化项等因素相关的水汽输送项(Seager and Vecchi., 2010; Seager et al., 2010)。在此, 本文通过分离由扰动比湿和扰动风速引起的异常变化来研究水汽输送的变化, 以期得到降水量变化的热力和动力相对贡献。比湿和风速分别表示为 $\bar{q}_c$, $\bar{q}_a$, $\bar{V}_c$ 和 $\bar{V}_a$, 其中 $\bar{q}_c$ 和 $\bar{V}_c$ 分别为比湿和风速的1979~2017年夏季的气候平均值, $\bar{q}_a$ 和 $\bar{V}_a$ 是每年夏季相对气候平均值的偏差(扰动项)。进一步水汽输送平流项可以表示为:

$$-\delta \left[\int_0^{p_s} \nabla \cdot (\bar{q} \vec{V}) dp \right] = -\left[\int_0^{p_s} \nabla \cdot (\bar{q}_c \bar{V}_a) dp \right] - \left[\int_0^{p_s} \nabla \cdot (\bar{q}_a \bar{V}_c) dp \right] \quad (3)$$

3. 华南地区降水的年代际特征

华南夏季降水量空间分布整体比较均匀(图1), 大部地区平均降雨量均在300mm以上, 南部沿海大于500mm。华南夏季降水具有较大的年际变率。区域平均的气候平均降水量为399.5mm, 标准差为71.8mm, 2002年降雨量最大为536.1mm, 2013年最少为276.6mm(图2)。此外, 华南夏季降水还具有明显的年代际变化特征。表1给出了华南夏季降水的t检验值, 结果表明华南夏季降水分别在1992/1993年和2002/2003年发生年代际增多和年代际减少, 这一结果与Ha et al.(2016)的研究结论相一致。在1992-2002年期间, 华南地区夏季年平均降水量为478.1mm, 较常年平均偏多19.7%, 而2003-2013年期间, 华南地区夏季

年平均降水量明显减少，为 370.3mm，较常年平均偏少 7.3%（表 1）。据此本文定义了三个时期，以便后文分析：P1 时期（1979-1992 年），P2 时期（1993-2002 年）和 P3 时期（2003-2013 年）。

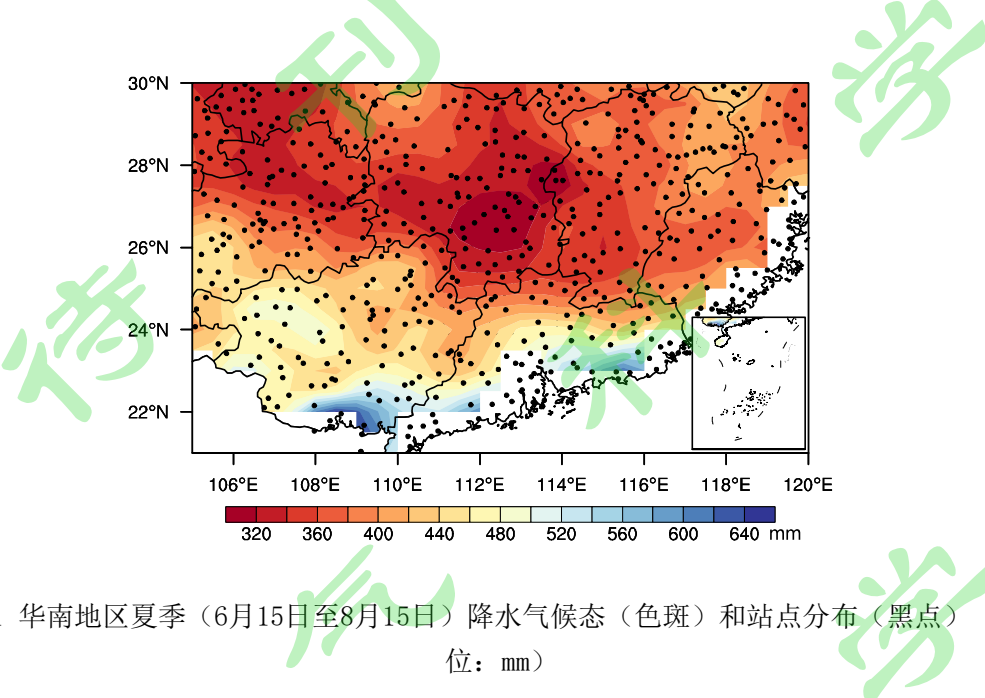


图1 华南地区夏季（6月15日至8月15日）降水气候态（色斑）和站点分布（黑点）（单位：mm）

Figure 1 Precipitation climate state (shadow) and station distribution (black bot) in summer (June 15 – August 15) in South China (unit: mm)

表 1 华南地区（105-120°E，21-30°N）在 p1、p2、p3 阶段降水量和最大最小值
Table 1 The maximum, minimum and total precipitation in south China (105-120°E, 21-30°N) during p1, p2 and p3 period, respectively.

	P1 时期 (1979-1992 年)	P2 时期 (1993-2002 年)	P3 时期 (2003-2013 年)
平均值	352.4mm	478.1mm	370.3mm
最大值/最小值	405.0/287.5mm	536.1/353.2mm	435.6/276.6mm
跟前一时段差值	125.7mm (19.7%)		-107.8mm (7.3%)
t 检验值	6.64**		-4.3**

注： **表示通过 99%显著性检验。

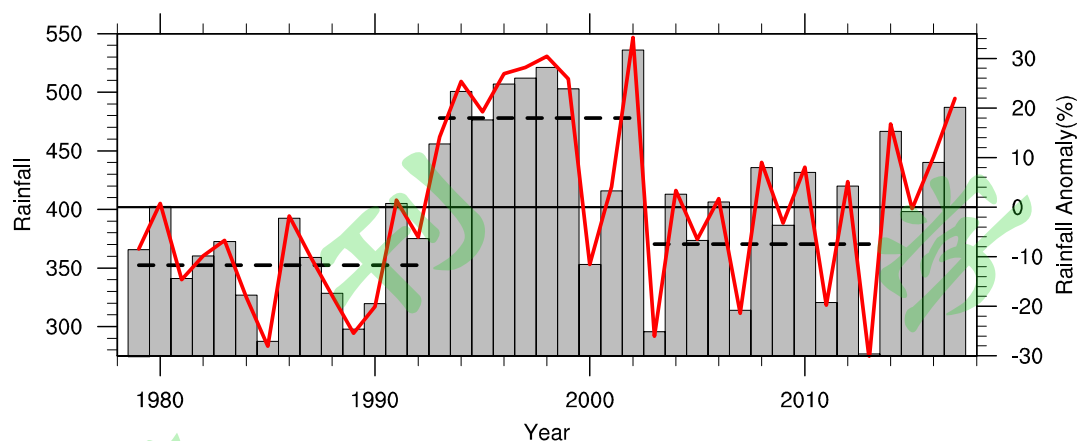


图2 华南地区夏季降水降水量（红色实线）和降水距平百分率（灰色直状图），黑色虚线表示三个时段均值。

Figure 2 Summer precipitation in south China precipitation and percentage of precipitation anomaly (the black dotted line represents the mean value of the three periods).

为了揭示华南夏季降水量年代际变化的空间分布，图3给出了不同时期的降水量差值。从P2时期与P1时期的降水量差值可见，全区为广泛的降水正异常，大部分地区增加超过50mm，其中东南沿海地区增加在100mm以上，通过95%的显著性检验。从P3时期与P2时期的降水量差值可见（图3b），全区降水量显著减少，大部分地区减少100mm以上，与P2时期的年代际增加形成了鲜明的对比。

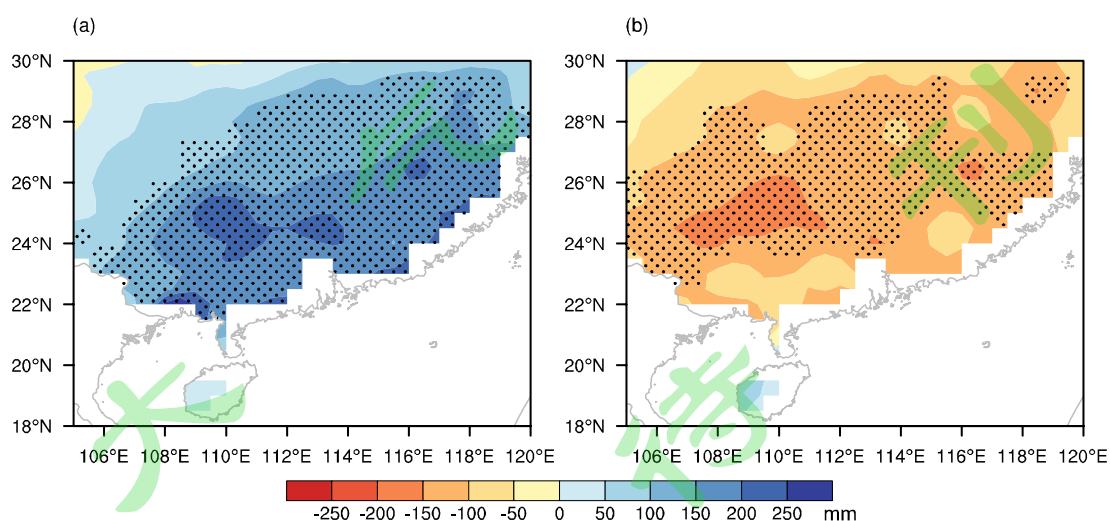


图3 华南地区不同时期夏季降水量的差值图（单位：mm）。其中（a）P2时期减去P1时期，（b）P3时期减去P2时期。黑点表示通过95%显著性检验。

Figure 3 Composited difference of precipitation in summer of different periods in south China (unit: mm). (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black dots representing a 95% confidence level.

4. 华南夏季降水与水汽输送特征

4.1 华南地区夏季水汽输送特征

水汽是形成降水必不可少的条件，因此本节基于大气水汽输送收支方程，重点分析华南夏季降水不同时期水汽输送及其各项的特征与差异，从水汽的角度来探讨华南夏季降水年代际转折的机理。首先从空间分布来看分别计算了不同时期夏季平均水汽输送散度（图 4）及其分解出的主要成分——水汽输送平流项（图 5）的差值。由 P2 时期与 P1 时期的差值场可见（图 4a），华南地区呈现一个异常的气旋式水汽输送分布，其东侧的偏南水汽把西太平洋的暖湿水汽输送到华南地区，形成水汽辐合，导致 P2 时期华南地区夏季降水年代际增多（图 4a）。P3 时期与 P2 时期的差值场分布（图 4b）和 P2 时期与 P1 时期的差值场（图 4a）恰好相反，华南地区受偏东北气流控制，形成水汽辐散，从而导致华南夏季降水年代际减少。不同时期夏季平均的水汽输送平流项的差值分布（图 5）与水汽输送散度场的差值分布（图 4）基本一致，表明水汽输送平流项对华南地区夏季降水的两次年代际转折有重要的影响。

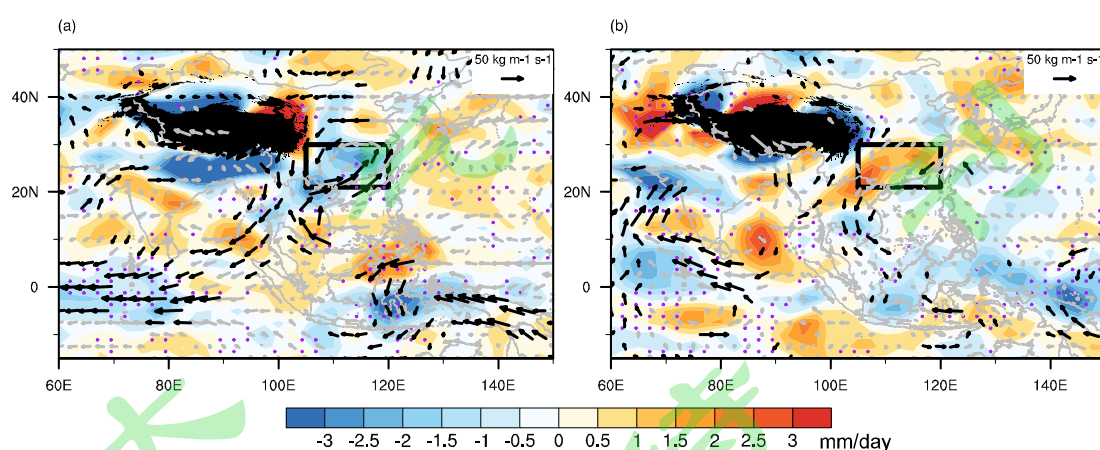


图4 华南地区不同时期夏季整层水汽输送通量积分（箭头，单位： $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和水汽输送散度（色斑，单位： mm/d ）的差值。其中（a）P2时期减去P1时期，（b）P3时期减去P2时期，黑色箭头和紫色打点区域表示通过95%显著性检验，黑框表示华南地区。

Figure 4 Composited difference of moisture transport vertical integration (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (shadow, unit: mm/d) in summer of different periods in south China. (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black arrows and purple dots represent the 95% confidence level, and the black box representing the south China region.

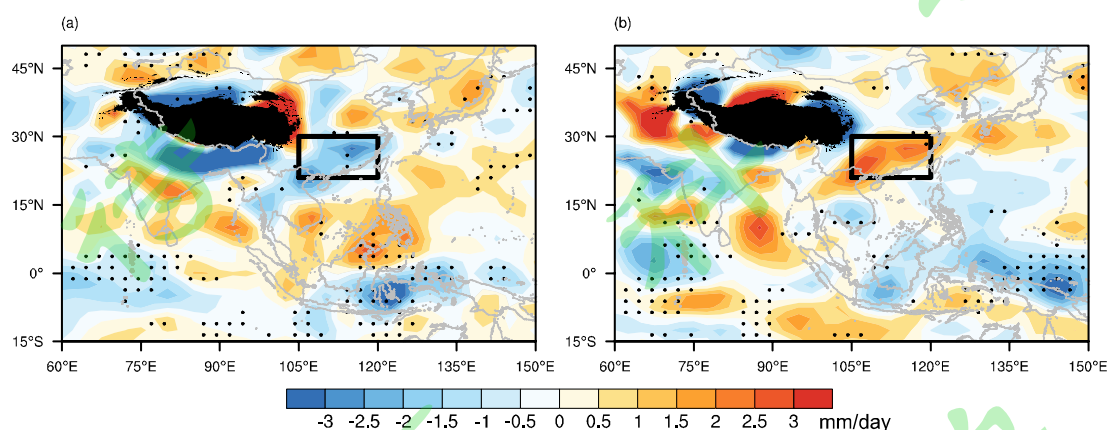


图5 华南地区不同时期夏季整层水汽输送平流散度（单位： mm/d ）的差值。其中（a）P2时期减去P1时期，（b）P3时期减去P2时期，打点区域表示通过95%显著性检验，黑框表示华南地区。

Figure 5 Composited difference of mean flow of moisture transport in summer of different periods in south China (unit: mm/d). (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black dots representing a 95% confidence level, and the black box representing the south China region, the same below.

而从不同时期水汽输送涡流项的差值场（图 6）可见，涡流项主要差异在热带地区，通过 95%显著性检验。在 P2 时期，华南地区西北部辐合，东北部大部辐散，南海、西太平洋水汽辐合，有利于台风、热带气旋等天气尺度的扰动增加，对华南地区夏季降水的年代际增加起到了正贡献作用(Chen et al., 2012)。而在 P3 时期，华南地区水汽辐合，南海区域水汽辐散，不利于华南沿海区域台风等天气尺度的涡旋生成，华南登陆台风频次显著减少(Ha et al., 2016)，不利于华南地区台风性降水增加。

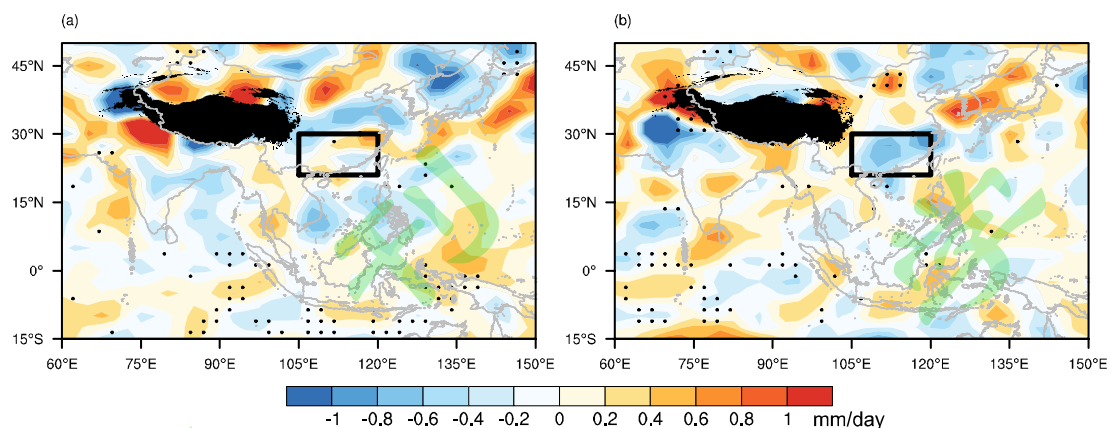


图6 同图5，为水汽输送涡流项

Figure 6 Same as Figure 5, but indicating the subseasonal-scale eddies of moisture transport.

本文进一步对华南地区年代际转折占主导影响的水汽输送平流项分解为以风场扰动为主的水汽输送动力项和以比湿变化为主的水汽输送热力项。从水汽输送动力项差值场（图 7）可以发现，其分布与水汽输送项（图 4）较为相似，说明华南地区降水的年代际转折主要受到由风场主导的动力项水汽输送异常的影响（对华南降水水汽输送贡献率 50.2%）。从图 7a 的分布来看，华南为水汽辐合区，主要受到南海、西太平洋的水汽输送年代际增多的影响，从而导致 P2 期间降水年代际增多。而在 P3 时期降水年代际减少的同时伴随着华南地区为水汽辐散区，来自西太平洋的水汽较前一时段显著减少。此外，从印度洋、阿拉伯海输送到华南的水汽有微弱增加（图 7b）。

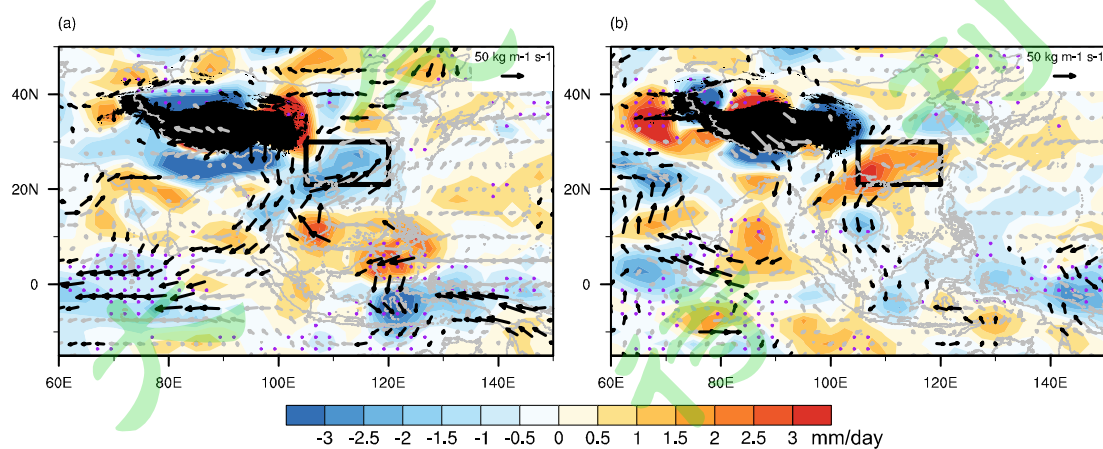


图7 华南地区不同时期夏季水汽输送通量动力项（箭头，单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）及其散度（色斑，单位： mm/d ）的差值。其中（a）P2时期减去P1时期，（b）P3时期减去P2时期，

黑色箭头和紫色打点区域表示通过95%显著性检验，黑框表示华南地区。

Figure 7 Composited difference of dynamic component of moisture transport vertical integration (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (shadow, unit: mm/d) in summer of different periods in south China. (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black arrows and purple dots represent the 95% confidence level, and the black box representing the south China region.

从不同时期水汽输送热力项的差值场（图8）可见，热力项在不同时期的差值较动力项量级明显偏小（对华南降水水汽输送贡献率 25.0%），P2 时期降水年代际增多时，比湿引导的水汽输送热力项引起的华南上空水汽含量的增加，结合这一时段水汽输送动力项的引导的华南地区的动力抬升作用，有利于华南降水增加。这可能与菲律宾和西太平洋一带异常的海温通过蒸发机制加湿低层大气，再通过异常的西南风将暖湿水汽带到华南地区有关。而在 P3 时期，华南东北部为水汽辐散，南边界至南海水汽辐合，异常偏北的干冷气流进入华南地区在南边界与南方暖湿气流汇合，导致海上区域水汽较多，华南降水年代际减少。

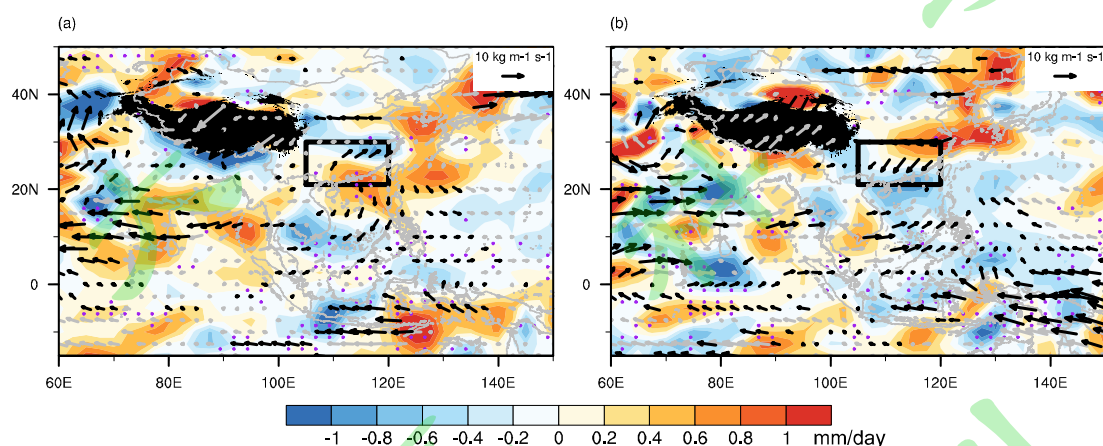


图8 华南地区不同时期夏季水汽输送通量热力项（箭头，单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）及其散度（色斑，单位： mm/d ）的差值。其中（a）P2时期减去P1时期，（b）P3时期减去P2时期，黑色箭头和紫色打点区域表示通过95%显著性检验，黑框表示华南地区。

Figure 8 Composited difference of thermodynamic component of moisture transport vertical integration (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (shadow, unit: mm/d) in summer of different periods in south China. (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black arrows and purple dots represent the 95% confidence level, and the black box representing the south China region.

考虑到不同阶段华南地区水汽输送热力项散度差值具有明显的南、北部反相

特征（图 8），本文进一步以 25°N 为界分别讨论华南南、北两个区域水汽平衡方程各项的变化（图 9）。在华南北部（图 9a），三个阶段蒸发量均远小于降水量，其中 P1、P2 和 P3 各个时段的平均降水量分别为 8.72、9.77 和 8.53mm/天，平均蒸发量 4.78、4.59 和 4.90 mm/天，说明水汽输送项对华南夏季降水的影响更为显著，水汽输送项可以解释大部分华南地区降水的变化。水汽输送涡流项和热力项的量级相对较小，平均值分别为 2.1 和 -0.1 mm/天，对华南降水贡献远小于水汽输送动力项。从各阶段变化来看，在 P2 阶段降水发生年代际增多之后，相对应的水汽输送项及其分解的平流项、动力项的量级显著增大，其中最大值为分别为 1.97 和 1.63 mm/天，平均增值分别为 1.7 和 2.1 mm/天，同时与降水关系也显著增强，然而热力项和涡流项在 P1、P2 时段的量级小且变化不大。在 P3 时段降水年际减少之后，各个项的量级均呈现不同程度的减小，值得注意的是该时段热力项相较与前一时段，与降水的关系明显增强，并且从前两时段弱的正相关变为负相关，不利于降水的发生。

对比华南北部，华南南部（图 9b）也主要受到水汽输送项、水汽输送平流项以及水汽输送动力项的影响，但不同的是，华南南部的水汽输送动力项在各个时段影响要更为显著，其中量级相较于华南北部 P1、P2 和 P3 平均增值分别为 0.54、1.7 和 0.06 mm/天。华南北部和南部主要差异体现在热力项上，南北热力项基本呈反向关系，华南北部热力项水汽输送与动力项等共同促进（P2）/抑制（P1、P3）华南降水的增加，而南部热力项则抵消动力项的作用。值得注意的是，通过计算各个项的趋势系数发现，除了华南南北可降水量趋势系数分别为 -0.67 和 -0.69mm/天，其它项趋势系数量级均较小，也就是说其它项的长期变化趋势不明显。

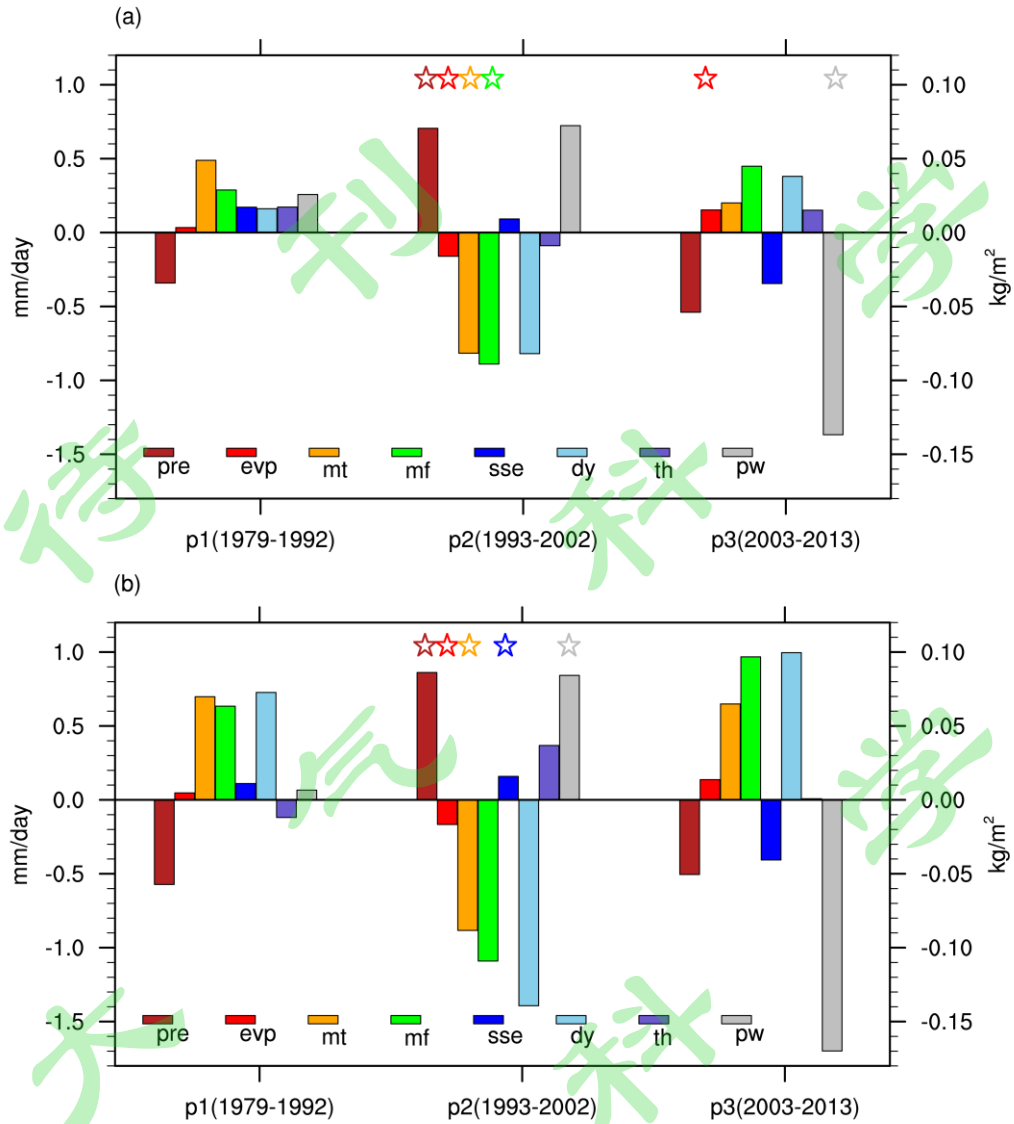


图9 华南地区 (105-120° E, 21-30° N) (a) 北部 (b) 南部在p1、p2、p3阶段降水量 (pre)、蒸发量 (evp)、水汽输送散度项 (mt)、水汽输送平流散度项 (mf)、水汽输送涡流散度项 (sse)、水汽输送动力散度项 (dy)、水汽输送热力散度项 (th) 的平均态 (单位: mm/d) 以及平均可降水量 (pw) (kg/m²), 星标表示变量在该时间段相对于1979-2013年时段的差值通过95%的显著性检验。

Figure 9 (a) northern (b) southern south China(105-120° E, 21-30° N) precipitation (pre), evaporation (evp), moisture transport (mt), mean flow of moisture transport (mf), subseasonal-scale eddies of moisture transport (sse), dynamic component of moisture transport (dy), thermodynamic component of moisture transport anomaly (th) in p1, p2, p3 (unit: mm/d), and precipitable water (pw) (kg/m²), with color stars representing a 95% confidence level

4.2 华南地区夏季水汽输送动力项潜在机制

从环流场讨论可以发现，P2 时段由于北半球局地环流异常，产生异常上升运动（图 10a），西太副高偏弱偏东（图 11a），来自西太平洋的水汽沿西太副高边缘，以副高西北侧的西南风输送为主，低层华南地区西南侧被异常反气旋式环流控制（图 10e），该反气旋西侧的西南气流把菲律宾和西太平洋一带的暖湿水汽带到华南，与此同时南亚高压位置偏西（图 11b），南亚高压和西太副高“相向而行”（图 11c），印证了陶诗言等（1964）等提出的南亚高压和西太副高的进退有密切关系，南亚高压偏西导致南亚高压南支从北印度洋输送到华南地区的水汽增多，副高偏东，这些都有利于华南水汽增多，因而华南地区在 P2 时段降水年代际偏多。而在 P3 时段分布几乎完全相反，垂直气流减弱，产生异常下沉运动（图 10b），加强了西太副高，此时西太副高偏强偏西（图 11a），不利于华南地区来自副高西南侧水汽的积累，且低层华南地区大部受东北冷干气流控制（图 10f），异常的东北气流从中国华南沿海向西南方向延伸至印度尼西亚爪哇岛，这表明南海夏季风自 2003 年以来一直较弱，局部 850hPa 风场常被用来代表南海夏季风的强度和变化(Wang et al., 2009)，以往研究说明南海夏季风可以在很大程度上影响沿海区域的天气尺度扰动和对流活动(Xu and Wang, 2013)，南海夏季风较弱，减少南海水汽向华南输送，不利于华南地区降水增多，与此同时南亚高压位置偏东（图 11b），南亚高压西太副高“相背而去”（图 11c），来自于北印度洋的西南风水汽从南部沿海进入华南地区。

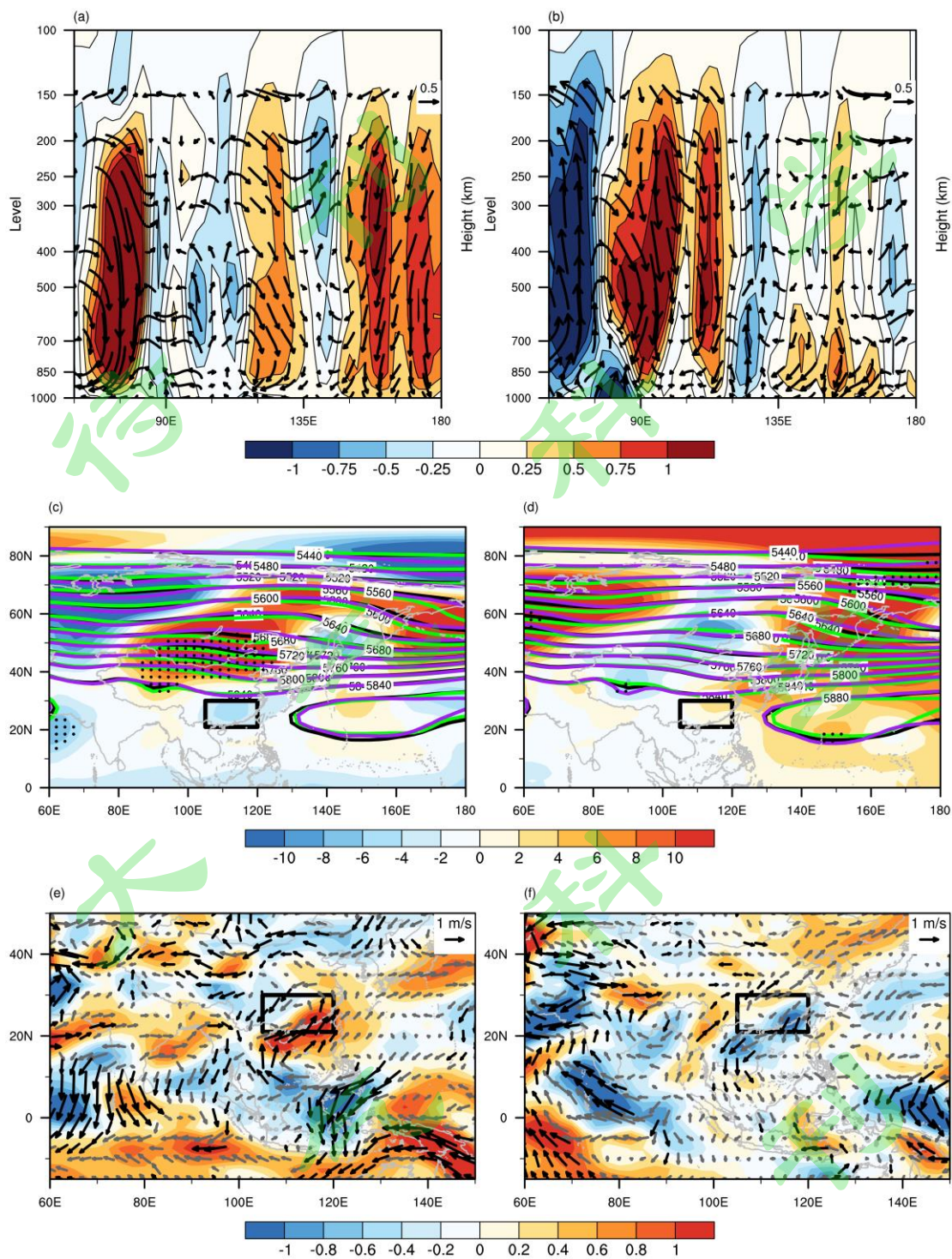


图10 夏季P2时期与P1时期 (a) 0-30° N纬向平均的经向风(箭头; 单位: m/s)和垂直速度(阴影; 单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的经度-气压剖面 (c) 500hPa高度场(单位: gpm)和(e) 850hPa风场差值场(单位: m/s); (b)、(d)和(f)分别同(a)、(c)和(e)相同, 但为P3时期与P2时期的差值; 其中, (c)和(d)中打点区域以及(e)和(f)中黑色箭头均表示通过95%显著性检验, 黑色实线为气候态的5880gpm等值线, (c)中绿(紫)色等值线表示P1(P2)合成的5880gpm等值线, (d)中绿(紫)色等值线表示P2(P3)合成的5880gpm等值线, 黑框表示华南地区(105-120° E, 21-30° N)。

Figure 10 Figure 10 Composite difference of P2 minus P1 in (a) Vertical - horizontal cross section of vertical wind (vectors; units:m/s) and omega (shading; units: $10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at the average of $0-30^{\circ}\text{N}$, (c) 500-hPa geopotential height (units: gpm) and (e) 850 hPa wind field. (b), (d) and (f) same as (a), (c) and (e), but are the difference of P3 minus P2. The black dots in (c) and (d) and the black vectors in (e) and (f) indicate the values are at 95% confidence level, The black solid line represents the climatology 5880 gpm contour, the green (purple) contour line represents composite 5880 gpm contour in P1 (P2), the green (purple) contour line represents the composite 5880 gpm contour in P2 (P3), and the black box represents the south China region ($105-120^{\circ}\text{E}$, $21-30^{\circ}\text{N}$).

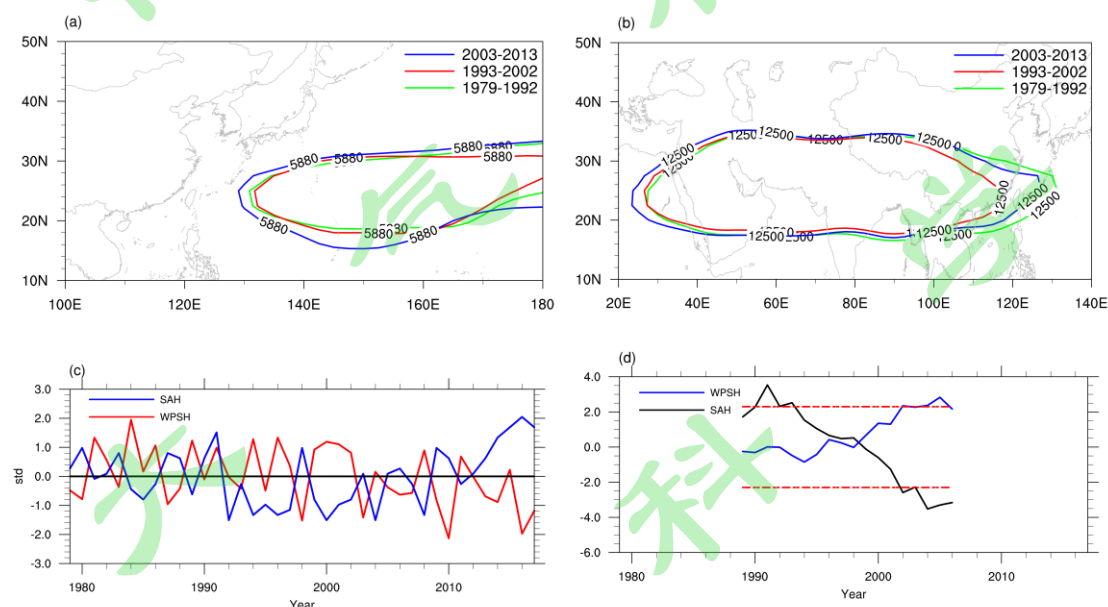


图11 三个时段夏季 (a) 200hPa南亚高压体 (b) 500hPa西太副高体的位置变化; 南亚高压与西太副高的 (c) 标准差和 (d) 滑动t检验

Figure 11 In the summer of the three periods of (a) 200hPa South Asia high pressure (b) 500hPa Western Pacific subtropical high; (c) standard deviation and (d) sliding t tests for the South Asia high pressure and the Western Pacific subtropical high .

4.3 华南地区夏季水汽输送热力项潜在机制

关于水汽输送热力项年代际变化的原因: 一方面会受动力作用影响, 大尺度大气环流辐合辐散能直接影响比湿分布, 并会间接影响与比湿紧密相关的热力项

变化。此外，P2 时期降水年代际增多时，受气压梯度力影响（图 10c），有从华南北边界流入的北方气流与从南边界进入的菲律宾和西太平洋一带的暖湿水汽在华南北部汇合（图 8a），另一方面 P2 时段热带印度洋和西北太平洋海温升高（图 12a），蒸发增强（图 13a），会导致水汽增多，结合西太副高西北侧西南水汽输送增加，有利于来自印度洋和南海、西北太平洋的水汽向华南地区输送，进而造成华南地区南北区域可降水量显著增加（图 9a、b）；P3 时段我国内蒙古东北部至西南地区为东北—西南走向的低槽控制（图 10d），有利于低层冷空气沿偏东路径影响南方地区，且季风槽（90° E）较强，有利于低纬度水汽输送，但华南被高压控制，盛行下沉气流带来暖干空气，水汽含量减少，同时西北太平洋降温（图 12b），华南地区蒸发增强、印度洋和西太平洋蒸发减弱（图 13b），来自海洋的水汽减少，导致华南地区降水偏少。

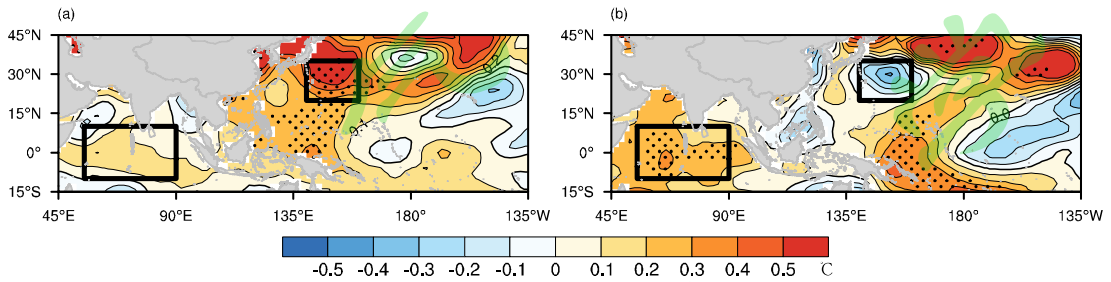


图12 海表温度 (a) P2时期与P1时期和 (b) P3时期与P2时期的差值合成分布（单位：℃），打点区域表示通过95%显著性检验，黑框区域分别表示海温关键区热带印度洋（55-90° E, 10° S-10° N）和西北太平洋（140-160° E, 20-35° N）。

Figure 12 Composites difference of sea surface temperature (SST) (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2 (unit: °C) , with black dots representing a 95% confidence level, and the black box representing the key SST areas of the tropical Indian Ocean (55-90° E, 10° s-10° N) and the northwest Pacific Ocean (140-160° E, 20-35° N).

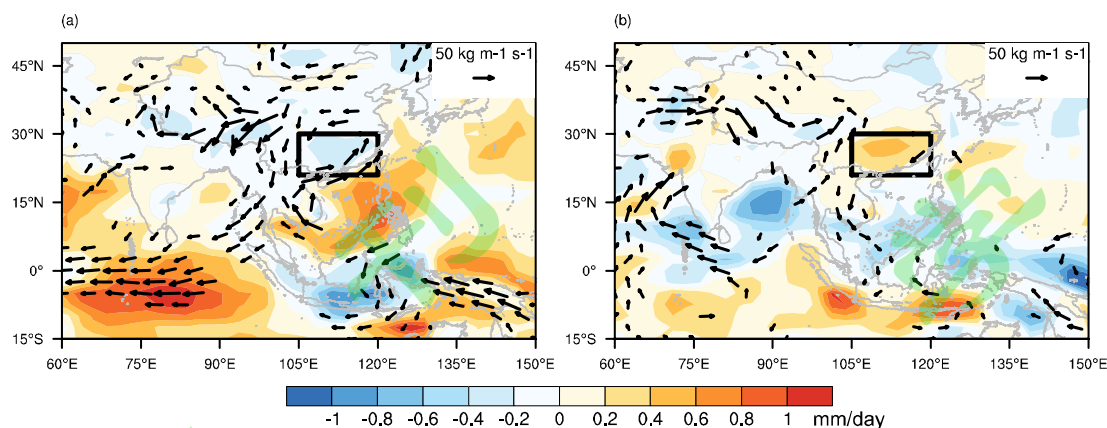


图13 蒸发量 (a) P2时期与P1时期和 (b) P3时期与P2时期的差值合成分布 (色斑; 单位: mm/d), 箭头表示为通过95%显著性检验区域的水汽输送通量矢量 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 黑框表示华南地区 (105°E – 120°E , 21°N – 30°N)。

Figure 13 Composited difference of evaporation in summer of different periods in south China (unit: mm/d). (a) P2 minus P1, and (b) P3 minus P2, with black arrow represents the 95% confidence level (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), and the black box representing the south China region (105°E – 120°E , 21°N – 30°N).

4.4 华南地区夏季降水年代际转折成因

华南地区夏季降水在过去几十年中发生了两次年代际转折, 在 1992/93 年显著增多, 在 2002/03 年显著减少。其中, 1992/1993 华南夏季降水年代际增多主要与西太平洋副热带高压南侧的西南水汽与南海季风水汽加强有关, 来自南海、西太平洋和热带印度洋的水汽输送是降水水汽的主要来源; 而 2002/2003 华南夏季降水年代际减少与这两条水汽输送通道减弱有密切关系。水汽输送强弱主要与动力项和热力项有关。在前一时段西太副高偏弱偏东, 副高西北侧的西南气流把菲律宾和西太平洋一带的暖湿水汽输送到华南地区, 与此同时南亚高压偏西导致从北印度洋输送到华南地区的水汽增多, 这都有利于华南夏季降水偏多; 而在后一时段西太副高偏强偏西, 不利于副高西南侧水汽向华南地区输送, 且低层又受东北冷干气流控制, 南海夏季风偏弱, 而南亚高压位置偏东, 导致华南降水偏少。

水汽输送热力项主要受到比湿变化的影响, 比湿一方面会受到大气环流动力项的影响, 通过辐合辐散影响比湿分布, 另一方面下垫面蒸发量也会直接影响局地比湿, 进而引起热力项异常。前一时段热带印度洋和西北太平洋海温升高, 蒸发增加, 导致比湿上升, 进入华南地区的水汽增加, 北方冷干空气与南

边界进入的暖湿水汽在华南北部汇合，有利于降水偏多；后一时段我国中西部受到低槽控制，有利于冷空气南下，且季风槽偏强，华南地区受高压控制盛行下沉气流，且来自海洋的水汽输送偏弱，华南地区降水增多。

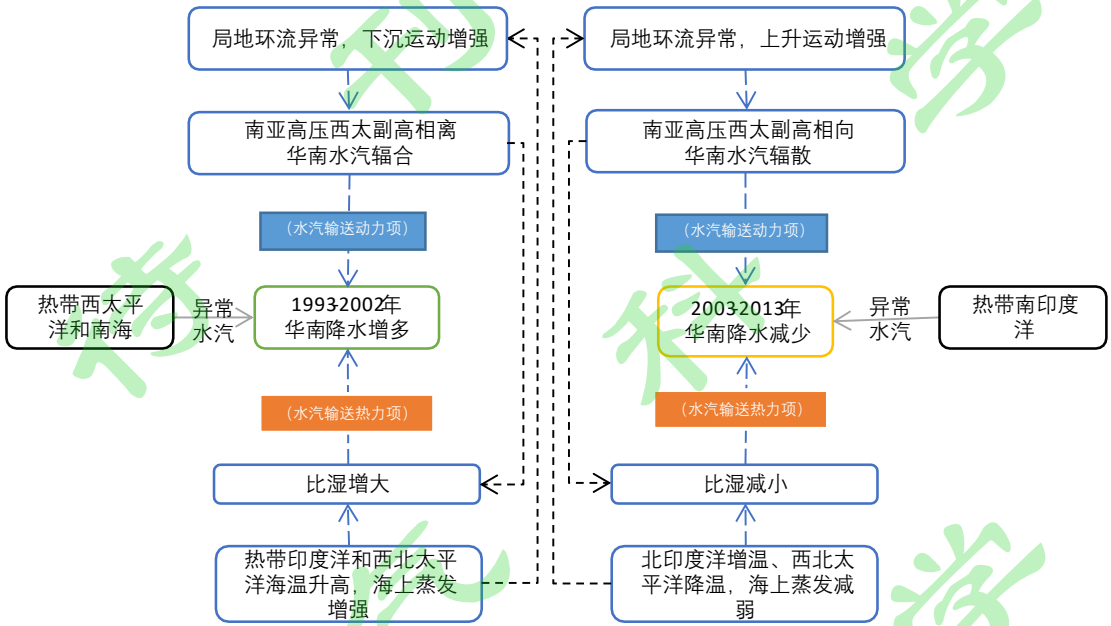


图14 华南夏季降水年代际转折可能成因示意图。

Figure 14 Possible genesis of interdecadal transition of summer precipitation in south China.

5. 结论与讨论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和 2374 站日降水资料，基于大气水汽平衡方程分析了华南地区夏季降水年代际变化的水汽输送特征及其成因，主要结果如下：

(1) 华南地区夏季降水在近三十年来发生了两次年代际转折，其中在 1992/1993 年后显著增多，至 2002/2003 年后又显著减少，造成 1992/1993 年华南夏季降水年代际增多的主要原因是西太平洋副热带高压南侧的西南水汽与南海季风水汽输送加强；而 2002/2003 年后华南夏季降水年代际减少也与这两条水汽输送通道减弱有密切关系。

(2) 水汽输送对华南降水年代际转折有重要影响，两次年代际转折主要是大气环流异常引起的水汽输送平衡方程各项异常导致，动力项主要受到环流场作

用，在 1992/1993（2002/2003）年异常局地环流引起异常下沉（上升）运动，影响西太副高和南亚高压相离（相向），导致华南水汽辐合（辐散），最终导致华南降水增多（减少）；热力项差异相对动力项量级较小，起次要作用，该项主要受到比湿变化的影响，在 1992/1993（2002/2003）年，西北太平洋增温（降温）蒸发增强（减弱），影响比湿增大（减小），同时受到环流场影响，最终影响华南夏季降水增多（减少）。

以往有关华南夏季降水年代际转折成因主要是从大气环流变化（[Ding et al., 2008](#); [Wu et al., 2010](#); [黄荣辉等, 2013](#); [Ha et al., 2016](#); [Ha et al., 2019](#)）的角度分析，本文主要研究了水汽输送动力和热力项对华南夏季降水的贡献，为水循环和预测旱涝异常提供了参考。但是关于水汽输送涡流项和地表相关项的作用尚需进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Brubaker KL, Entekhabi D, Eagleson PS. 1993. Estimation of continental precipitation recycling [J]. *Journal of Climate*, 6:1077–1089, doi: 10.1175/1520-0442(1993)006<1077:eocpr>2.0.co;2.
- Chen J, Wu R, Wen Z, et al. 2012. Contribution of South China Sea tropical cyclones to an increase in southern China summer rainfall around 1993. *Adv Atmos Sci*, 29:585–598.
- Ding Y, Sun Y, Wang Z, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes [J]. *International Journal of Climatology*, 29(13):1926–1944, doi:10.1002/joc.1759.
- Ding Y, Wang Z, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28(9):1139–1161, doi:10.1002/joc.1615.
- Ha Y, Zhong Z, Chen H, et al. 2016. Out-of-phase decadal changes in boreal summer rainfall between Yellow-Huaihe River Valley and southern China around 2002/2003[J]. *Climate Dynamics*, 47(1):137–158, doi: 10.1007/s00382-015-2828-2.
- Ha Y, Zhong Z, Hu Y, et al. 2019. Differences between decadal decreases of boreal summer rainfall in southeastern and southwestern China in the early 2000s [J]. *Climate Dynamics*, 52(5–6):3533–3552.
- Ha Y, Zhong Z, Sun Y, et al. 2014. Decadal change of South China Sea tropical cyclone activity in mid-1990s and its possible linkage with intraseasonal variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9):5331–5344, doi:10.1002/2013JD021286.
- Han Z, Su T, Huang B, et al. 2018. Changes in Global Monsoon Precipitation and the Related Dynamic and Thermodynamic Mechanisms in Recent Decades[J]. *International Journal of Climatology*, 39(3). doi:10.1002/joc.5896
- Kalnay, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77:37–470.
- Li H, Dai A, Zhou T, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000[J]. *Climate Dynamics*, 34(4):501–514, doi:10.1007/s00382-008-0482-7.
- Qian C, Zhou T. 2014. Multidecadal Variability of North China Aridity and Its Relationship to PDO during 1900–2010[J]. *Journal of Climate*, 27(3):1210–1222, doi:10.1175/JCLI-D-13-00235.1.
- 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.
- Seager R, Vecchi G A. 2010. Greenhouse warming and the 21st century hydroclimate of southwestern North America[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(50):21277–21282.
- Seager R, Naik N, Vecchi G A. 2010. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming[J]. *Journal of Climate*, 23(17):4651–4668.
- Tao S, Chen L. 1987. A review of recent research on the East Asian Summer monsoon in China, monsoon meteorology[M]. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- Wang B, Huang F, Wu Z, et al. 2009. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1–3):15–37.

- Wang H. 2001: The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(3):376-386, doi: 10.1007/BF02919316.
- Wu B, Li T, Zhou T. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer[J]. *Journal of Climate*, 23(11):2974-2986, doi: 10.1175/2010JCLI3300.1.
- Wu R, Wen Z, Yang S, et al. 2010. An Interdecadal Change in Southern China Summer Rainfall around 1992/93[J]. *Journal of Climate*, 23(9):2389-2403, doi:10.1175/2009JCLI3336.1
- Xu, S. and Wang, B. 2013. Enhanced Western North Pacific Tropical Cyclone Activity in May in Recent Years. *Climate Dynamics*, 42, 2555-2563, doi: 10.1007/s00382-013-1921-7.
- Xin X, Yu R, Zhou T, et al. 2006. Drought in late spring of South China in recent decades[J]. *Journal of Climate*, 19:3197-3206, doi:10.1175/JCLI3794.1.
- Ye H, Lu R. 2012. Dominant patterns of summer rainfall anomalies in East China during 1951-2006 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, (4):695-704.
- Yu L, Furevik T, Otterå O H, et al. 2015. Modulation of the Pacific Decadal Oscillation on the summer precipitation over East China: a comparison of observations to 600-years control run of Bergen Climate Model[J]. *Climate Dynamics*, 44(1-2):475-494, doi:10.1007/s00382-014-2141-5.
- Zhang Y, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 17(14):2780-2793.
- Zhu Y, Wang H, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation[J]. *Climate Dynamics*, 36(7-8):1463-1473.
- Zhu Z, Li T, He J. 2014. Out-of-phase relationship between boreal spring and summer decadal rainfall changes in southern China[J]. *Journal of Climate*, 27(3):1083-1099.
- 伯忠凯, 曾刚, 武英娇, 等. 2017. 华南夏季降水20 世纪90 年代初的年代际变化及其与南亚高压关系 [J]. *海洋气象学报*, 37(2): 65-73. Bo Zhongkai, Zeng Gang, Wu Yingjiao, et al. 2017. The interdecadal variability of summer precipitation over South China in early 1990s and its relationship with South Asia High [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 37(2): 65-73. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.008.
- 黄菲, 姜治娜. 2002. 欧亚大陆阻塞高压的统计特征及其与中国东部夏季降水的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 32(2):186-192. Huang Fei, Jiang Zhina. 2002. Study on the Statistical Characteristics of Atmospheric Blocking in the Eurasia and its Relationship with the Summer Rainfall over the East of China [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 32(2):186-192.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20世纪90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因[J]. *科学通报*, 58(8):617-628. Huang Rong hui, Liu Yong, Feng Tao. Interdecadal change of summer precipitation over Eastern China around the late 1990s and associated circulation anomalies[J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 58 (8):617-628.
- 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.

- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. 高原气象, 18(4):465-476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer rainfall in China and the drought trend in north China [J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 18(4):465-476.
- 廖清海, 高守亭, 王会军等. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响[J].地球物理学报, 2004, 47(1):10-18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly Jet in the north hemisphere and their impacts on east Asian summer monsoon climate anomalies .Chinese J .Geophys .(in Chinese), 47(1):10-18.
- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 林祥. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J]. 大气科学, 38(4):782-794, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227. Lv Junmei, Zhu Congwen, Ju Jianhua, LIN Xiang. 2014. Interdecadal Variability in Summer Precipitation over East China during the Past 100 Years and Its Possible Causes[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4):782-794, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227.
- 谭晶, 杨辉, 孙淑清, 等. 2005. 夏季南亚高压东西振荡特征研究[J]. 南京气象学院学报, 28(4): 452 – 460. Tan Jing, Yang Hui, Sun Shuqing, et al. 2005. Characteristics of the longitudinal oscillation of South Asia high during summer[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28(4): 452–460. DOI:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.003.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部100毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系[J]. 气象学报, 34 (4):385-396. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (4):385-396.
- 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.
- 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定量化研究 [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.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究[J]. 气候与环境研究, 8(3): 274-290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(3): 274-290.
- 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. 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.
- 周天军, 张学洪. 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. 1999. Ocean component study of global water cycle [J]. Acta

meteorologica sinica, 57(3):264-282.

朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641-654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641-654.