

王乙竹,梁静舒,曹云昌,等,2025.近 40 年华南地区水汽收支变化特征及与降水的相关分析[J].气象,51(7):789-802. Wang Y Z, Liang J S, Cao Y C, et al, 2025. Variation characteristics of water vapor budget and its correlation with precipitation in South China during recent 40 years[J]. Meteor Mon, 51(7):789-802(in Chinese).

近 40 年华南地区水汽收支变化特征及 与降水的相关分析^{*}

王乙竹^{1,2,3} 梁静舒^{2,4} 曹云昌^{2,4} 梁 宏^{2,4} 粟华林¹ 陶 伟¹ 罗 晋^{2,5}

1 广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022

2 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081

3 贵州气象数据中心, 贵阳 550002

4 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

5 云南省大气探测技术保障中心, 昆明 650034

提 要: 华南地区是重要的水汽传输通道, 研究该地区水汽收支有助于预测华南及周边区域降水过程 and 了解大气环流变化对我国天气气候的影响。本文利用 ERA5 再分析资料对华南地区近 40 年(1983—2022 年)水汽收支变化趋势及与降水关系进行了分析。结果表明: 华南地区水汽主要以西、南边界为输入, 东、北边界为输出, 净收支均为负值, 水汽收支各边界均呈减少趋势, 其中东边界输出减少显著, 四季中春季输入输出减少最为明显; 水汽主要通过印度洋—孟加拉湾西南方向和西太平洋东南方向进入华南地区, 中低层(700 hPa)水汽多来自印度洋—孟加拉湾水汽输送, 低层(925 hPa)多来自西太平洋水汽输送; 近 40 年印度洋—孟加拉湾、西太平洋水汽输送减弱, 华南地区出现由东北向西南方向水汽输送变化; 广西、广东大部分地区水汽输送与降水量呈现正相关(相关系数 >0.6), 其中西南水汽输送加强是导致降水发生的关键原因。此外, 华南地区有变湿趋势, 近 40 年大气可降水量(PWV)增加 2.32%, 与区域水汽总输出减少趋势大于总输入减少趋势有关。本文研究结果可为深入理解华南地区水汽收支变化及异常降水事件提供参考依据。

关键词: 华南地区, 水汽收支, 整层水汽输送量, 大气可降水量, 降水

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.032901

Variation Characteristics of Water Vapor Budget and Its Correlation with Precipitation in South China During Recent 40 Years

WANG Yizhu^{1,2,3} LIANG Jingshu^{2,4} CAO Yunchang^{2,4} LIANG Hong^{2,4}

SU Hualin¹ TAO Wei¹ LUO Jin^{2,5}

1 Guangxi Meteorological Technical Equipment Center, Nanning 530022

2 CMA Research Centre on Meteorological Observation Engineering Technology, Beijing 100081

3 Guizhou Meteorological Data Center, Guiyang 550002

4 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

5 Yunnan Technical Support Center for Atmospheric Sounding, Kunming 650034

Abstract: South China is an important water vapor transport channel. Studying the water vapor budget in South China is essential for predicting precipitation processes in South China and its neighboring areas, and

^{*} 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J061)、国家自然科学基金项目(42174027)、广西科技计划项目(桂科 AB21075005)、北部湾大气水分循环综合观测试验(BEIGAWEX2023to2028)和中南半岛水循环综合观测暨中港大湾区水汽输送观测试验(GCSYJH23-04)共同资助
2024 年 5 月 20 日收稿; 2025 年 3 月 29 日收修定稿

第一作者: 王乙竹, 主要从事大气水循环观测及应用研究. E-mail: 617575956@qq.com

通讯作者: 曹云昌, 主要从事导航卫星气象学研究. E-mail: caoyc@126.com

comprehending the impact of atmospheric circulation changes on weather and climate in China. Based on ERA5 data, the variation trend of water vapor budget and its correlation with precipitation in South China during the recent 40 years (1983–2022) are analyzed. The results show that water vapor in South China is mainly input through its the southern and western boundaries, and output through the northern and eastern boundaries, with the net budget being negative. The water vapor budget shows a declining trend, with a significant decrease in the output from the eastern boundary. In the four seasons, the input and output water vapor budget declines most obviously in spring. Water vapor enters into the South China Region mainly from the Indian Ocean and the Bay of Bengal in the southwest direction and western Pacific in the southwest direction. Water vapor in the middle and lower layers (700 hPa) is primarily transported from the Indian Ocean and the Bay of Bengal, while water vapor in the lower layer (925 hPa) mainly originates from western Pacific. In the recent 40 years, water vapor transport from the Indian Ocean and the Bay of Bengal and western Pacific has been weakening, causing the changes in water vapor transport from the direction of northeast to southwest in South China. Water vapor transport is positively correlated to precipitation in most areas of Guangxi and Guangdong, with correlation coefficient > 0.6 , of which the strengthening of southwesterly water vapor transport is the key reason of precipitation. In addition, there is a trend of wetting in South China, with a 2.32% increase in precipitable water vapor (PWV) during the recent 40 years, which is the result of decrease in total water vapor outflow in the region than that of total inflow. The results of this study can provide a reference for further understanding of water vapor budget changes and abnormal precipitation events in South China.

Key words: South China, water vapor budget, integrated water vapor transport, precipitable water vapor (PWV), precipitation

引 言

水汽是大气中最活跃的成分之一,对地球系统水分收支和能量循环有重要意义(Shi et al, 2015; Trenberth et al, 2005)。水汽输送在海洋与内陆、低纬度与高纬度地区之间水分循环起重要作用(Bengtsson, 2010)。IPCC 第六次工作报告(IPCC, 2022)指出,气候变暖的背景下,水分循环发生明显改变,20 世纪 90 年代中叶以来,气候变暖已经导致对流层水汽和水汽输送的总体增加,风暴系统、季风系统和高纬度地区水汽输送有所增加,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和亚洲季风等大尺度环流也有显著变化(Arias et al, 2021)。

华南地区位于亚洲东南部,受典型季风环流影响,大量水汽从邻近海域带入,是我国水汽含量最充沛的区域之一。华南地区水汽输送受水汽源(Huang et al, 2018; Yang et al, 2018)、ENSO(伍红雨等, 2014)、太平洋年代际振荡(PDO)(Ding et al, 2014; Kim et al, 2014; Shi, 2021)等多种因素影响,极端降水事件频发,降水量多、时间长,所引起的暴

雨和洪涝灾害威胁人民生命财产安全,造成国民经济损失。水汽的输送、收支对暴雨产生具有最重要、最直接的作用(Trenberth, 1998)。例如,2013 年 12 月 13—17 日副热带西风急流影响孟加拉湾和南海的大量水汽输送至华南,暴雨范围从东亚地区延伸至华南(Li and Sun, 2015)。同样,来自孟加拉湾和南海的两支水汽异常输送导致的 2018 年 8 月极端降水事件,日降水量突破广东省历史极值(曾智琳等, 2020)。2020 年 6—7 月长江中下游以南出现长时间强降水,水汽主要来自印度洋向东北方向的水汽输送和南海强反气旋环流向北方向的水汽输送(Qi et al, 2023)。已有研究表明,近几十年来华南地区极端降水事件频发(韦志刚等, 2021; 周晓敏等, 2023),其中不同季节异常降水的水汽输送和收支有所差异。常越等(2006)利用多元数据分析华南地区 4—6 月前汛期异常降水水汽输送,表明水汽输送多来自西太平洋。李秀珍等(2010)研究表明,华南地区秋季、冬季降水的水汽源主要为我国南海、孟加拉湾地区,而春季降水则来自西太平洋。田红等(2004)探究了我国夏季水汽通道特征,发现南海水汽通道对华南地区降水有直接贡献。曲姝霖等

(2021)研究表明夏季南亚高压偏东和西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)偏西影响的水汽输送,是导致华南地区降水偏多的重要原因。

华南地区受多种环流和系统的影响,其水汽输送机制复杂,造成降水的原因不一。研究华南水汽收支和输送对理解华南及其周边区域降水特征、异常变化有重要意义。以往的研究主要集中在华南水汽输送特征对特殊个例事件的影响分析(Li et al, 2011;李秀珍等,2010;孙婧超等,2019),针对长时间水汽收支变化特征及与降水关系的研究较少。因此,本文基于华南地区近 40 年(1983—2022 年)水汽输送时间、空间、垂直分布特征及变化趋势,分析四个边界(东边界、西边界、南边界、北边界)水汽收支状况及区域内水汽输送长期变化趋势,探讨水汽收支与降水的关系,为理解华南地区水资源变化及其应对极端降水事件提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据

ERA5 是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代再分析资料,其同化了大量数值预报、地面观测和卫星遥感等数据(Hersbach et al,2020)。已有大量研究验证了 ERA5 资料精度(Zhang et al,2019;Zhu et al,2021;Du et al,2021),并应用于华南地区研究(Yi et al,2021;Tang et al,2023)。本研究采用 1983—2022 年华南地区 ERA5 月平均再分析资料,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,其中 1000~200 hPa(共 23 层)气压层的比湿、经向风、纬向风和位势高度场资料用于计算整层水汽输送量(IVT),总降水、蒸发资料用于讨论其对水汽收支影响的相关分析。数据来源于 ECMWF(<https://cds.climate.copernicus.eu>)。华南地区范围为 $18.0^\circ \sim 26.5^\circ \text{N}$ 、 $104.25^\circ \sim 117.25^\circ \text{E}$ (图 1)。全文地图底图使用 GS(2019)3082 号标准地图制作,底图无修改。

1.2 计算方法

大气可降水量(PWV),即为单位面积垂直大气柱中所含水汽总量全部凝结所形成的水柱高度,计算公式如下:

$$\text{PWV} = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q dp \quad (1)$$

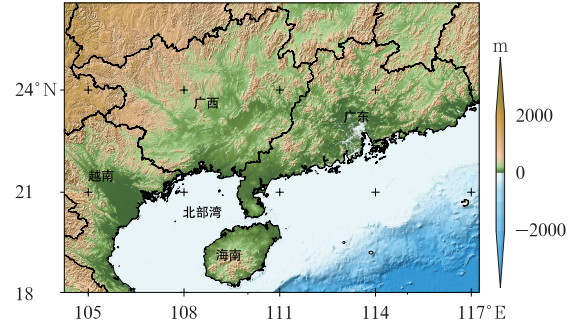


图 1 华南地区经纬度及海拔

Fig. 1 Longitude, latitude and altitude of South China

式中: q 为比湿(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); p 为大气压(单位: Pa), p_t 为大气层顶气压, p_s 为地表气压,由于 200 hPa 以上水汽含量稀少,取 $p_t = 200 \text{ hPa}$; g 为地球重力加速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

IVT 是指综合各气压层通过单位面积、单位时间的 PWV(Trenberth,1991),可分为纬向水汽通量 Q_u 和经向水汽通量 Q_v (李超等,2022),其计算公式如下:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u dp \quad (2)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v dp \quad (3)$$

$$\text{IVT} = \sqrt{Q_u^2 + Q_v^2} \quad (4)$$

式中: u 、 v 分别为纬向风和经向风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

一般来说,华南地区水汽输送是从南边界和西边界输入,东边界和北边界输出。因此,通过东、西、南、北四个边界的水汽收支 F (单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)可以由式(5)~式(8)计算得到,其中正值表示水汽输入,负值表示水汽输出,下角 E、W、S、N 分别代表东、西、南、北边界(丁一汇,2005;孙博,2015)。

$$-F_E = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_E} a d\varphi \quad (5)$$

$$F_W = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_W} a d\varphi \quad (6)$$

$$F_S = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_S} a \cos \varphi_S d\lambda \quad (7)$$

$$-F_N = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_N} a \cos \varphi_N d\lambda \quad (8)$$

式中: φ_S 、 φ_N 分别为南、北边界纬度, λ_E 、 λ_W 分别为东、西边界经度, Q_{λ_W} 、 Q_{λ_E} 分别为通过西、东边界的整层水汽通量, Q_{φ_S} 、 Q_{φ_N} 为通过南、北边界整层水汽通量。 $a = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$,为地球半径。

因此,区域内水汽净收支为水汽输入减去输出,可表示为:

$$D_s = F_w + F_e + F_s + F_n = F_i + (-F_o) \quad (9)$$

式中: D_s 为水汽净收支, F_i 表示水汽总输入, F_o 表示水汽总输出。

2 近 40 年华南地区水汽收支及变化特征

2.1 水汽年际收支及变化特征

图 2a 为 1983—2022 年华南地区各边界水汽收支分布及变化趋势。华南地区水汽主要以南、西边界为输入, 北、东边界为输出, 其中南边界输入大于西边界 ($F_s > F_w$), 东边界输出大于北边界 ($-F_e > -F_n$)。从近 40 年变化趋势来看, F_s 、 F_w 呈减少趋势, 降幅分别为 $3.23 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $3.16 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; $-F_e$ 、 $-F_n$ 也呈减少趋势, 其中东边界降幅为 $4.46 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 变化趋势通过 0.05 的显著性水平检验。

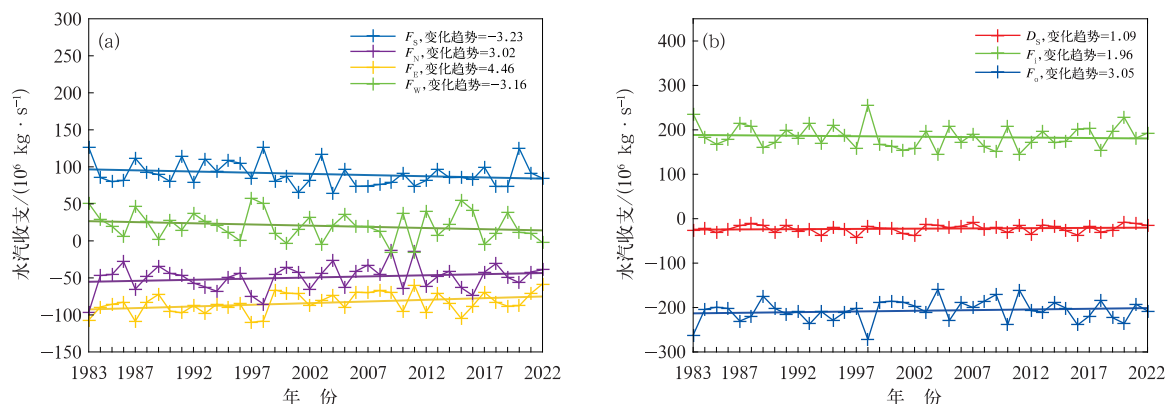
由于水汽总输出大于总输入, 近 40 年净收支均为负 ($-42.192 \times 10^6 \sim -7.799 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), 与已有研究结果相似 (Ding and Chan, 2005; Qiu et al, 2017)。各边界水汽输入、输出减弱使得水汽总输入、总输出也呈减少趋势, 其中总输出减少趋势 $3.05 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 大于总输入减少趋势 $1.96 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 使更多的 PWV 滞留在华南地区。

不同时段华南地区水汽收支有所差异, 表 1 列出了 10 年间隔水汽收支变化, 同时给出了 PWV、降水

量、蒸发量 10 年平均变化。1983—1992 年、2003—2012 年和 2013—2022 年净支出在 $-21.91 \times 10^6 \sim -21.55 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 1993—2002 年平均净支出 ($-27.82 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) 较大。从 10 年平均来看, PWV 和降水量近 40 年表现为低—高—低—高变化趋势, 最大 PWV 出现在 2013—2022 年 (41.98 mm), 最大降水量出现在 1993—2002 年 (1873.50 mm)。

由于研究区域包含陆地和海洋, 本文同时讨论了 PWV、降水量及蒸发量在华南陆地和海域的变化情况。海域 PWV 和蒸发量明显高于陆地区域, 而降水量则表现为陆地区域大于海域。海域高蒸发量、低降水量、高水汽持有量可能是区域内水汽总输出大于总输入 (净收支为负) 的主要原因。陆地区域 PWV 和降水量变化与华南全域相似, 最大 PWV 出现在 2013—2022 年, 最大降水量则出现在 1993—2002 年 (平均 1996.30 mm)。随海域 PWV 逐步增加, 最大降水量出现在 2013—2022 年 (1759.40 mm)。受全球变暖影响, 蒸发量在陆地和海域均表现为逐渐增加的趋势, 其中海域增量大于陆地, 与 Mears et al (2018) 和 Mao et al (2024) 结论相似。此外, 水凝物 (例如云水、云冰) 的形成、输送也对区域水汽收支有重要影响 (Zhou et al, 2020; 2024), 在未来的工作中将进一步探讨。

图 3 为 1983—2022 年华南地区春季、夏季、秋季、冬季四季平均水汽净收支、总输入和总输出的年际变化。可看出, 秋季、冬季水汽收支相对平衡, 水汽总输入和总输出年际变化相对稳定, 主要分布在 $100 \times 10^6 \sim 200 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; D_s 在零值附近波动,



注: 直线表示线性变化趋势, 单位为 $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

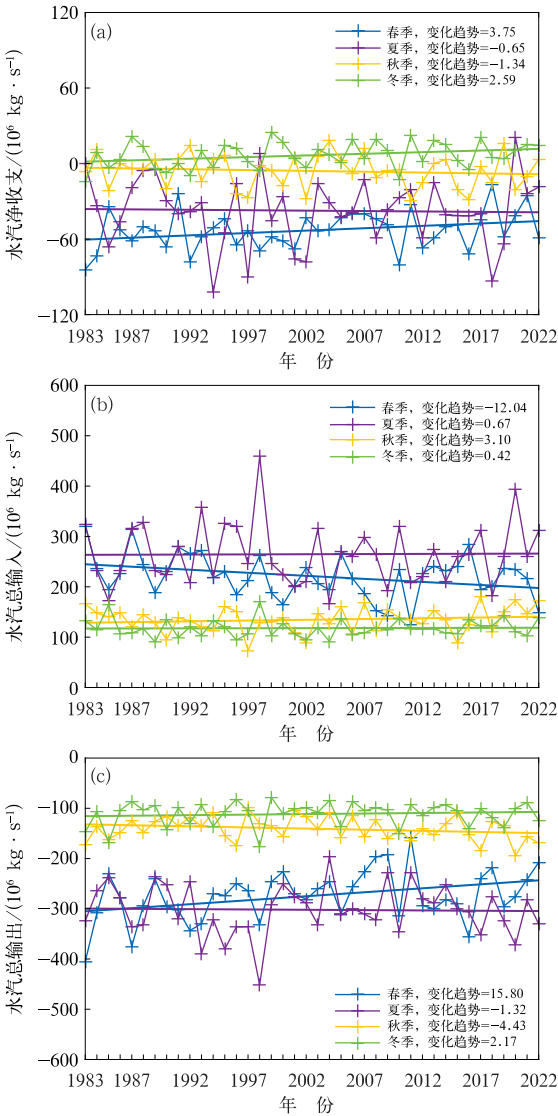
图 2 1983—2022 年华南地区 (a) 各边界水汽收支及 (b) 水汽总输入、总输出、净收支的分布及变化趋势

Fig. 2 Distribution and annual variation of (a) water vapor budget through four boundaries and (b) F_i , F_o , D_s in South China during 1983—2022

表 1 1983—2022 年华南地区 10 年平均水汽净收支、水汽总输入、水汽总输出、PWV、降水量、蒸发量以及
华南陆地和海域 10 年平均 PWV、降水量及蒸发量的变化

Table 1 Decade average changes of D_s , F_i , F_o , PWV, precipitation and evaporation in South China, and those of
PWV, precipitation and evaporation in the land and marine regions of South China during 1983—2022

时段	华南陆地			华南海域			华南全域			$D_s/(10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$F_i/(10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$-F_o/(10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$
	PWV/ mm	降水量/ mm	蒸发量/ mm	PWV/ mm	降水量/ mm	蒸发量/ mm	PWV/ mm	降水量/ mm	蒸发量/ mm			
1983—1992 年	39.95	1904.10	928.55	42.01	1657.40	1368.70	40.92	1797.60	1134.30	-21.91	189.78	211.69
1993—2002 年	40.24	1996.30	933.12	42.08	1733.60	1411.20	41.10	1873.50	1156.50	-27.82	183.58	211.40
2003—2012 年	39.10	1678.50	942.92	42.07	1684.20	1446.30	40.49	1681.20	1178.20	-21.63	173.54	195.16
2013—2022 年	40.76	1802.60	958.87	43.36	1759.40	1479.30	41.98	1782.40	1202.10	-21.55	188.38	209.94



注:直线表示线性变化趋势线,
单位为 $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

图 3 1983—2022 年华南地区春季、夏季、秋季、冬季
平均水汽(a)净收支,(b)总输入和(c)总输出年际变化
Fig. 3 Interannual variation of average (a) D_s ,
(b) F_i , and (c) F_o in spring, summer, autumn
and winter in South China during 1983—2022

秋季呈减少趋势 $[-1.34 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$,
冬季呈增加趋势 $[2.59 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 。
春季、夏季大多数年份为净支出,其中,夏季年际波
动大,输入输出水汽变化明显,年际 D_s 最大差值达
 $122.696 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,这可能与 PDO 有关(郭静
妍和肖栋,2023)。值得注意的是,春季水汽总输入
和总输出均有显著减少趋势,降幅分别为 $12.04 \times$
 $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $15.80 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot$
 $(10 \text{ a})^{-1}$ (均通过 0.05 的显著性水平检验),使得区
域降水减少,降水量变化趋势为 $-118.94 \text{ mm} \cdot$
 $(10 \text{ a})^{-1}$ 。但近 40 年夏季、秋季水汽增加,降水量
增多(图略),特别是“龙舟水”期间极端降水频发(覃
皓等,2023;钱维宏等,2020;周琰等,2024)。

图 4 给出了近 40 年月平均水汽收支情况。南边
界水汽收入差异显著,5—8 月水汽输入($93.979 \times$
 $10^6 \sim 283.568 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)最多,达全年水汽总输
入的 31.43%。输出较大值出现在北边界 5—8 月
($142.571 \times 10^6 \sim 247.511 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),占全年水
汽总输入的 30.95%,说明华南地区汛期(4—9 月)
通过南边界输入和北边界输出大量水汽。西边界水
汽上半年以输入为主,下半年以输出为主,其最大输
入、输出分别出现在 5 月($133.952 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
和 10 月($140.287 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。西边界水汽多表
现为输出,尤其是在 1—5 月,水汽输出为 $88.937 \times$
 $10^6 \sim 176.122 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,大于北边界输出。从
图 4b 可以看出,华南地区最大水汽输入、输出均出
现在 6 月,其 F_s 和 $-F_N$ 做出重要贡献。月变化差
异较小,表明华南地区各月水汽收支相对平衡。

总体而言,华南地区水汽以西、南边界为输入,
东、北边界为输出,净收支为负。相比华南陆地区
域,海域 PWV 高、蒸发量多、降水量少,海域的水汽
补充是华南净收支为负的主要原因。各边界近
40 年水汽收支均呈降低趋势,其中 $-F_E$ 下降显著。

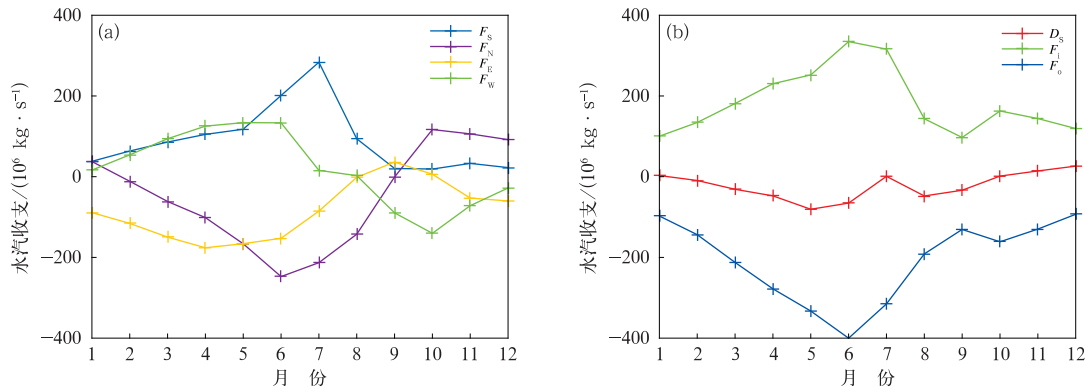


图 4 1983—2022 年华南地区 (a) 各边界水汽收支和 (b) 水汽总输入、总输出、净收支月平均变化

Fig. 4 Monthly variation of (a) average water vapor budgets through four boundaries and (b) F_i , F_o , and D_s in South China during 1983—2022

夏季收支年际波动大, 秋季、冬季相对稳定, 春季水汽总输入、输出下降趋势最明显。华南地区汛期通过南边界输入和北边界输出大量水汽, 最大输入、输出均出现在 6 月。

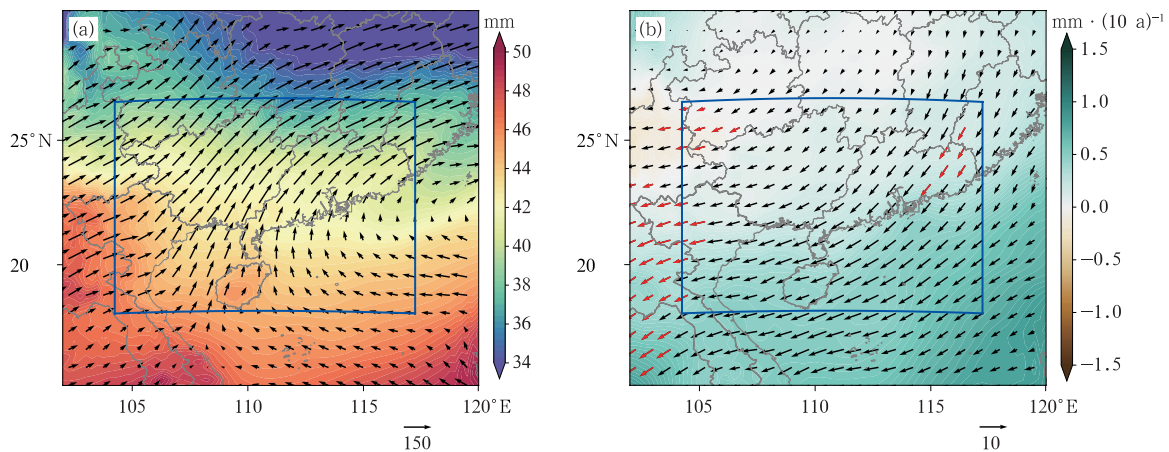
2.2 水汽空间输送及变化特征

由 1983—2022 年华南平均 IVT 和 PWV 的分布 (图 5a) 可见, 华南地区有两支主要的水汽输送来源, 一支为受印度季风环流控制携带阿拉伯海和孟加拉湾上空的水汽从西南方向进入的水汽输送, 另一支为受东亚季风环流或西太副高控制携带南海和西太平洋上空的水汽输送, 在华南地区形成水汽辐合。华南地区干湿程度有所不同, 呈由南向北递减的分布趋势, 其海域水汽含量明显高于陆地, 最大差

值 $> 20 \text{ mm}$ 。

从 PWV 和 IVT 近 40 年变化分析来看 (图 5b), 华南大部分地区水汽含量呈增加趋势, 40 年增加了 2.32%, 低于全球平均水汽增量 (Allan et al, 2022)。东北向西南方向和通过北边界向西方向的水汽变化趋势明显, 表明华南地区西南和东南方向的水汽输送减弱, 这可能与西太平洋水汽输送变化及东亚季风变化有关 (孙博, 2015; 丁一汇等, 2020)。

华南地区四季水汽输送及变化趋势也存在差异, 图 6 为春季、夏季、秋季、冬季 IVT 和 PWV 及其变化趋势的空间分布。春季来自赤道西太平洋的水汽于中南半岛南部—南海转向北上, 与青藏高原南侧的偏西气流在中南半岛北部汇合, 形成由西南向东北方向的水汽输送, 与 1958—2005 年春季华南



注: 蓝色方框表示华南地区边界线, 红色箭头表示 IVT 通过 0.05 的显著性水平检验, 下同。

图 5 1983—2022 年华南地区 (a) 平均 IVT (箭头, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 PWV (填色), (b) IVT 变化趋势

[箭头, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 和 PWV 变化趋势 (填色) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of (a) average IVT (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and PWV (colored), (b) IVT change trend [arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and PWV change trend (colored) in South China during 1983—2022

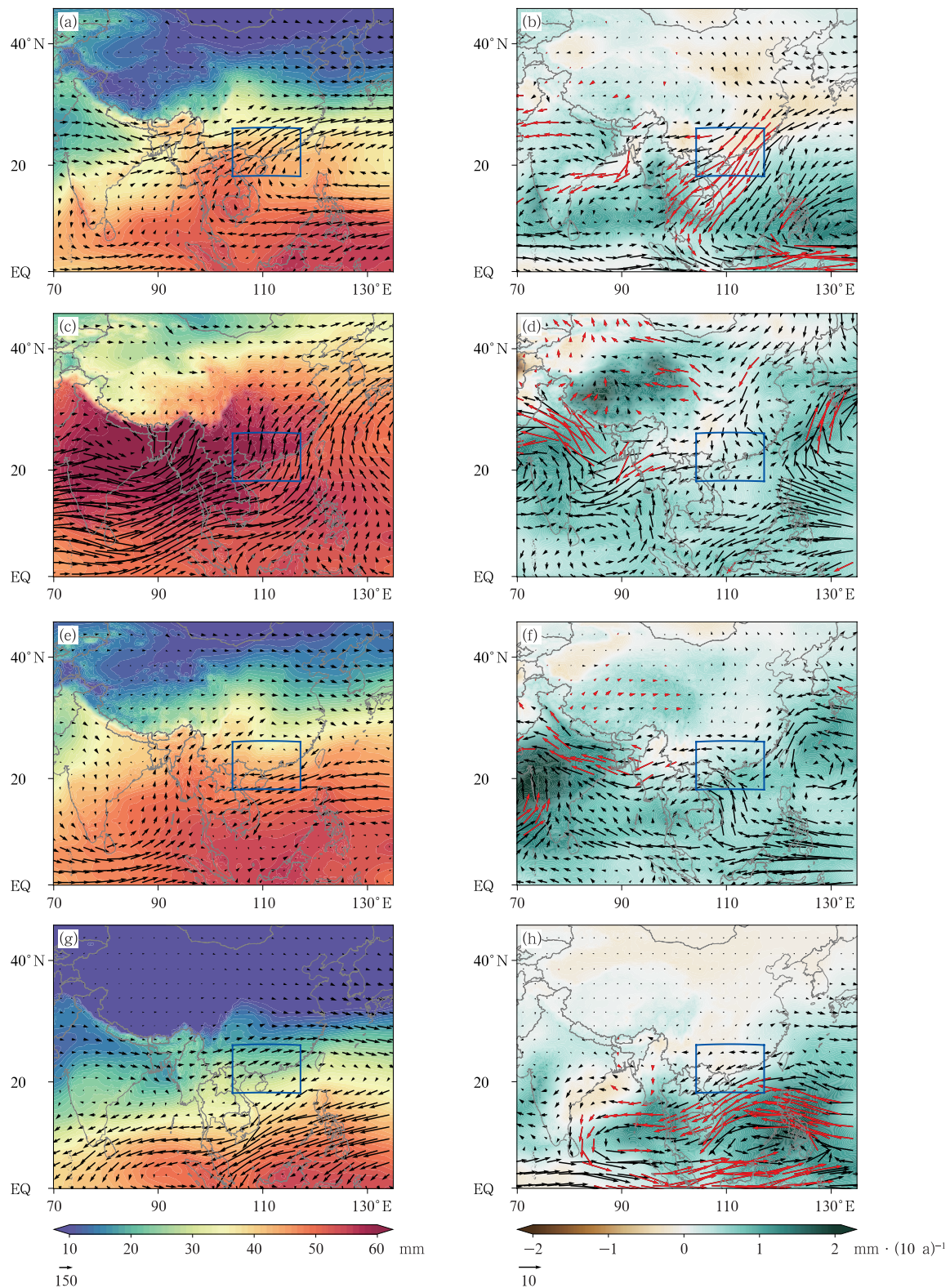


图 6 1983—2022 年华南地区(a,b)春季,(c,d)夏季,(e,f)秋季,(g,h)冬季(a,c,e,g)平均 IVT
(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和 PWV(填色)及(b,d,f,h)IVT 变化趋势

[箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]和 PWV 变化趋势(填色)的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of (a, c, e, g) average IVT (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and PWV (colored), and (b, d, f, h) IVT change trend [arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and PWV change trend (colored) in South China in (a, b) spring, (c, d) summer, (e, f) autumn and (g, h) winter in South China during 1983—2022

水汽输送方向基本一致(李秀珍等, 2010)。水汽输送变化趋势。在低纬度西太平洋上空存在显著气旋式水汽输送异常, 使得华南地区存在东北向西南方向的水汽输送异常, 近 40 年春季华南地区由西南向东北水汽输送减弱。暖湿气流减弱导致水汽持有量降低, 特别是陆地区域。常越等(2006)的研究中也提到, 西太平洋水汽输送对华南前汛期异常降水有较大关系。

6 月亚洲夏季风爆发, 华南地区水汽输送从春季西南方向转为夏季偏北方向(图 6c, 6d), 这与 2.1 节分析结论相同, 夏季月份通过南边界输入和北边界输出大量水汽。来自印度洋经孟加拉湾的强劲水汽与来自西太副高西缘的水汽汇合进入华南地区, 给该地区带来充足水汽($PWV > 50 \text{ mm}$)。近 40 年华南地区整层水汽输送变化在夏季纬向水汽输送有所减弱, 主要是由于来自印度半岛、孟加拉湾水汽输送减弱导致(Ashfaq et al, 2009)。此外, 在夏季华南大部分区域水汽持有量增加。

由图 6e, 6f 可见, 秋季来自印度洋的水汽输送在孟加拉湾转为向北, 与来自副热带西太平洋的偏东气流于孟加拉湾东岸汇合, 在华南地区形成反气旋式水汽输送环流。变化趋势方面, 秋季赤道经南海向北的水汽输送增加, 与西太平洋气旋式水汽输送变化汇合, 使得华南地区东南向西北方向的水汽

输送增加。与其他季节相比, 秋季华南地区水汽增量较大 $[0.49 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$, 其中海南省水汽增量 $> 0.8 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

冬季水汽以纬向输送为主, 其主要来自中南半岛经过西边界进入华南地区的水汽。此外, 副热带—热带西太平洋的偏东气流也对华南水汽输送有一定影响(图 6g)。副热带—热带西太平洋反气旋输送增加与孟加拉湾反气旋接力, 影响华南南部地区水汽向西南方向输送增加, PWV 增加, 而华南北部地区水汽含量降低(图 6h)。

通过水汽输送及变化特征空间分布分析可知, 华南地区主要受西太平洋和印度洋—孟加拉湾水汽输送影响。近 40 年, 春季由西南向东北方向的水汽输送减弱, 夏季由南向北水汽输送减弱, 秋季由东南向西北方向水汽输送增加, 冬季由东北向西南方向水汽输送增加, 这可能与孟加拉湾、南海、西太平洋进入华南地区的水汽输送变化有关。此外, 40 年华南地区 PWV 整体呈增加趋势, 其中秋季增量最大, 春季、冬季陆地区域水汽含量有所降低。

2.3 水汽垂直收支及变化特征

华南地区各边界水汽收支和净收支的垂直分布和变化趋势如图 7 所示。华南地区在 500 hPa 气压层以下水汽活动更为活跃, D_s 在 950 hPa 附近水汽输

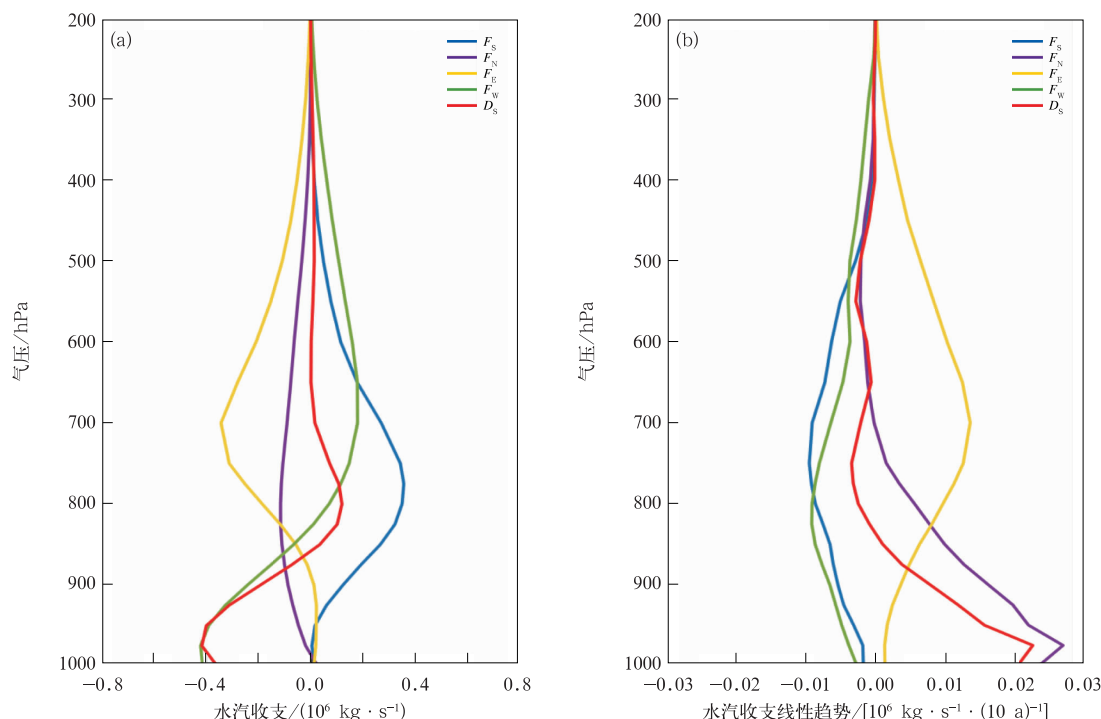


图 7 1983—2022 年华南地区平均各边界水汽收支和水汽净收支的 (a) 垂直分布和 (b) 线性趋势

Fig. 7 (a) Vertical distribution and (b) linear trend of average water vapor budget through four boundaries and D_s in South China during 1983–2022

出最强,随高度增加,在 875 hPa 附近转为水汽输入。净支出在 1000~900 hPa,呈减小趋势 $[0.015 \times 10^6 \sim 0.023 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}]$,其主要受 1000~800 hPa F_N 较强的减小趋势影响(通过 0.05 的显著性水平检验)。 F_E 在中低层更活跃,在 800~700 hPa 有较大输出,同时该气压层输出减少趋势也最大。 F_S 多为输入,在 800 hPa 附近达到最强, F_W 在底层

输出,到 825 hPa 附近转为输入,南、西边界整层呈较小减少趋势。

各边界在中低气压层水汽收支及变化趋势都较为显著,图 8 给出了 700、850、925 hPa 3 个气压层水汽输送、比湿及其变化趋势的空间分布,可看出,华南地区水汽输送主要来自于印度洋—孟加拉湾和西太平洋。700 hPa 多受印度洋由西南向东北方向

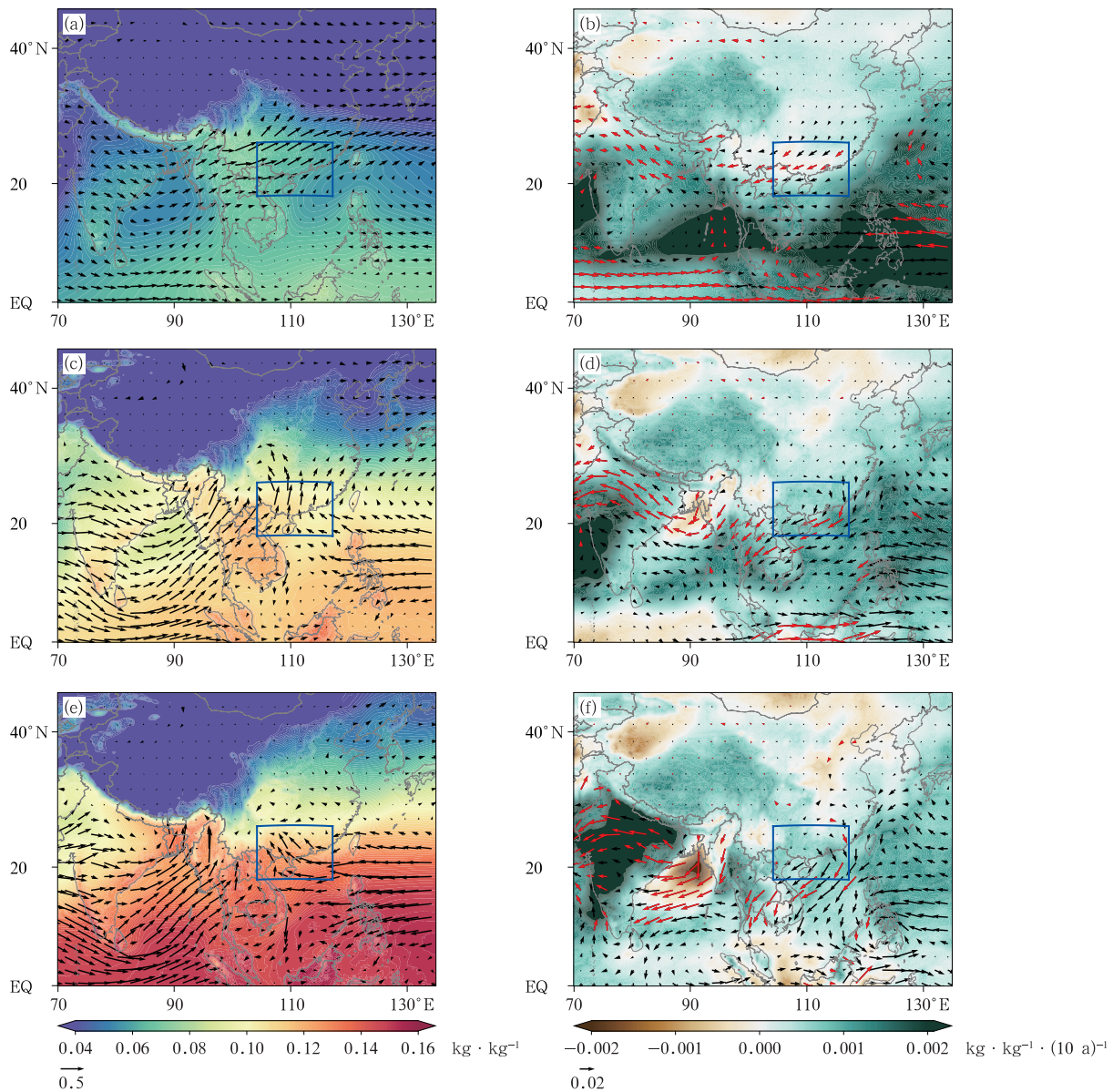


图 8 1983—2022 年华南地区(a,b)700 hPa,(c,d)850 hPa,(e,f)925 hPa
(a,c,e)水汽输送(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿(填色)及(b,d,f)水汽输送变化趋势
[箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]和比湿变化趋势(填色)的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of (a, c, e) water vapor transport (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and specific humidity (colored), and (b, d, f) water vapor transport change trend [arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and specific humidity change trend (colored) at (a, b) 700 hPa, (c, d) 850 hPa, and (e, f) 925 hPa in South China during 1983–2022

水汽输送影响,850 hPa 印度洋西南方向和西太平洋东南方向水汽在华南地区汇合,950 hPa 则以西太平洋东南水汽输送为主导。这意味着华南地区中低层(700 hPa)水汽多来自印度洋—孟加拉湾,低层(950 hPa)水汽多来自西太平洋,且低层比湿高于中低层,主要是由于中南半岛及青藏高原、云南等部分地区的陆地和高山阻挡,使得来自印度洋低层水汽较少输入华南地区,而西太平洋水汽输送主要从东、南边界输入,地形以海洋、平原为主,有利于低层水汽输送。

水汽输送变化趋势在 700、850、925 hPa 呈现由东北向西南方向的异常水汽输送变化,其中 850 hPa、925 hPa 陆地区域变化较小,主要变化发生在海洋区域。700 hPa、850 hPa 主要受印度洋—孟加拉湾由西南向东北方向的水汽输送减弱影响, F_w 、 F_s 、 $-F_E$ 、 $-F_N$ 减少,925 hPa 主要受西太平洋由东南向西北水汽输送减弱影响, F_s 、 $-F_N$ 减少,各气压层输入输出呈现减少趋势。气压层的输送变化与图 7b 各边界水汽收支有很好的对应关系。此外,700、850、925 hPa 气压层比湿均有增加趋势。

3 水汽收支与降水的相关分析

1983—2022 年华南地区年平均净支出距平、总降水量距平演变如图 9 所示。从图中可以看出,净收支变化与降水有很好的对应关系,水汽净支出较多、年降水偏多,反之,水汽净支出较少、年降水偏少,相关系数达 0.76。

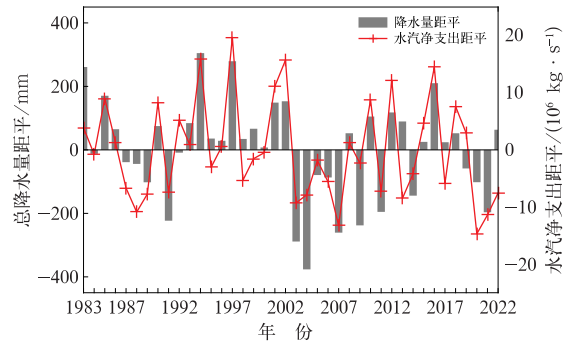
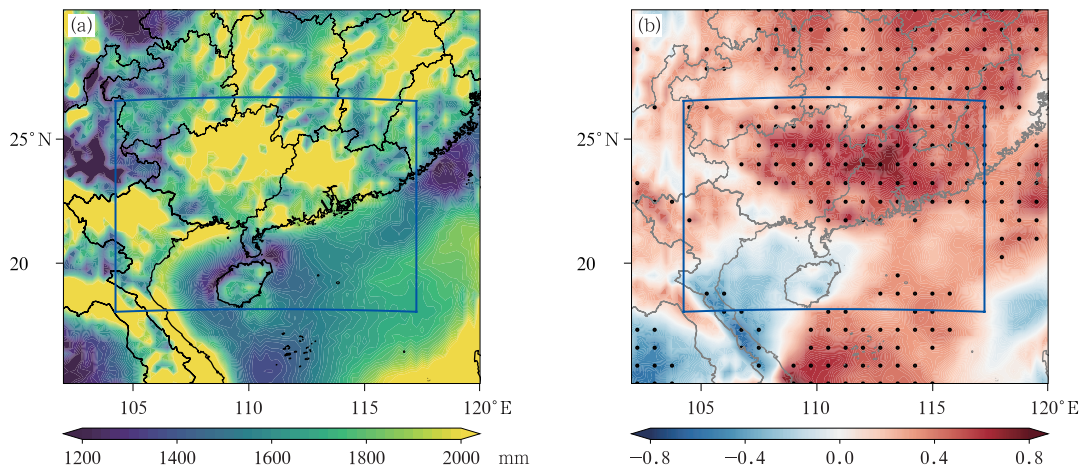


图 9 1983—2022 年华南地区年平均水汽净支出距平、总降水量距平演变

Fig. 9 Evolution of annual average net expenditure anomaly and total precipitation anomaly in South China during 1983—2022

图 10 为 1983—2022 年华南平均降水量和降水量与 IVT 相关系数的空间分布,可以看出,降水高值区主要集中在华南桂东北、粤北、粤西区域(年平均降水量 >70 mm),该区域对应的降水量与 IVT 有显著正相关(相关系数大于 0.6)。负相关主要出现在北部湾、海南省及越南南部区域。结合图 5a 显示,印度洋—孟加拉湾西南水汽输送和西太平洋东南水汽输送在广东、广西汇合,加之山脉地形的抬升作用,可能是使水汽输送与降水相关性较高的原因。

以均值加/减标准差作为阈值将华南近 40 年分为降水偏少年和降水偏多年,降水偏少年为 7 年(1991 年、2003 年、2004 年、2007 年、2009 年、2011 年、2021 年),降水偏多年为 5 年(1983 年、1985 年、1994 年、1997 年、2016 年)。图 11 分别给出了降水



注:图 b 中黑点表示降水量与 IVT 相关性通过 0.05 的显著水平性检验。

图 10 1983—2022 年华南地区(a)平均降水量和(b)平均降水量与 IVT 相关系数的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of (a) average precipitation and (b) correlation coefficient between average precipitation and IVT in South China during 1983—2022

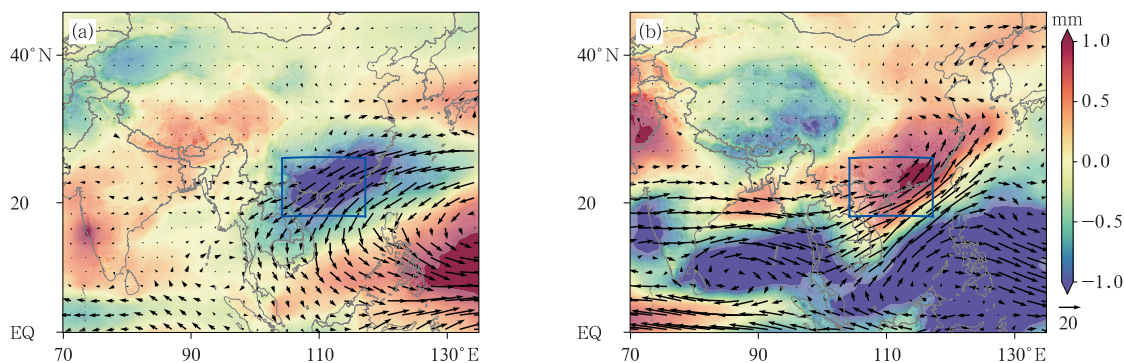


图 11 1983—2022 年华南地区(a)降水偏少年平均,(b)降水偏多年平均与 40 年平均的 PWV 差异(填色)、IVT 差异(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of the average PWV difference (colored) and IVT difference (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) between (a) years with less precipitation, (b) years with more precipitation and 40 years in South China during 1983—2022

偏少年平均、降水偏多年平均与 40 年平均的 PWV 差异、IVT 差异的空间分布。降水偏少年低纬度西太平洋上空存在显著气旋式水汽输送,华南至南海到西太平洋有明显水汽输送异常,呈东北向西南方向水汽输送,水汽值呈现相反的趋势,华南水汽值低,西太平洋气旋区水汽值高。降水偏多年主要是来自印度洋—孟加拉湾西南水汽输送加强,输送量较大,华南水汽值高,孟加拉湾、南海延伸至西太平洋水汽值低。以上说明环流背景可对华南地区降水有明显影响,当区域内西南方向水汽输送加强、水汽值增加时,降水偏多;反之,当区域内西南方向水汽输送减弱、水汽值降低,降水偏少。

选取 2020 年“龙舟水”期间 6 月 5—9 日一次大范围降水过程进行分析(图 12),降水区域覆盖广西、广东、福建等省份,其中广东全省平均累计降水量为 129.4 mm(钱维宏等,2020)。来自西南和东南两股水汽输送在上游区域汇合,由西南向东北水汽输送,IVT 均在 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。强降水开始前,4 日 16 时(北京时,下同)至 5 日 12 时西边界水汽输入快速增加,南边界输入减少,东边界、北边界输出减小,维持至 6 日 08 时发生强降水(区域内总降水达 1671 mm),此时西边界处于水汽输入高位,南边界处于输入最低位,东边界在降水开始前输出增加,而北边界输出小幅减少,净支出较大。7 日后西边界水汽输入减少,南边界输入增加,同时东、北边界输出减少,降水量下降,至 9 日 16 时该过程对华南影响减弱,收支相对稳定。

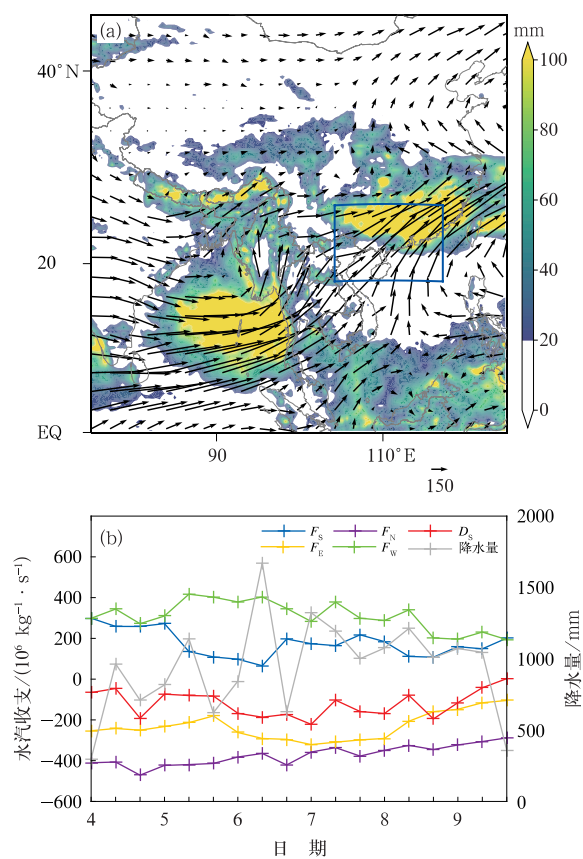


图 12 华南地区 2020 年 6 月(a)5—9 日降水量(填色)及 IVT(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)空间分布, (b)4—9 日各边界水汽收支、净收支及降水量随时间的演变

Fig. 12 (a) Spatial distribution of precipitation (colored) and IVT (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) from 5 to 9 June, and (b) evolution of boundary budget, D_s , and precipitation with time from 4 to 9 June 2020 in South China

4 结论与讨论

本文利用 1983—2022 年 ERA5 月平均再分析资料,对华南地区水汽输送时间、空间和垂直分布情况及变化特征进行分析,并讨论了水汽收支对降水的影响,得到如下结论。

(1) 华南地区水汽以南、西边界输入,北、东边界输出为主,最大输入、输出分别出现在夏季南边界和北边界。水汽净收支均为负值($-42.192 \times 10^6 \sim -7.799 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),总输出大于总输入。

(2) $-F_E$ 、 F_W 、 F_S 、 $-F_N$ 均呈减少趋势,其中 $-F_E$ 减少显著。四季中春季水汽输入减少 [$12.04 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 和输出减少 [$15.80 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] 最大。秋季、冬季年际变化趋势相对较小。

(3) 华南地区水汽输送主要来自印度洋—孟加拉湾西南方向和西太平洋东南方向进入的水汽输送,但两组水汽输送呈现减弱趋势,春季由西南向东北方向水汽输送减弱,夏季由南向北水汽输送减弱,秋季由东南向西北方向水汽输送增加,冬季由东北向西南方向水汽输送增加。此外,华南地区 PWV 整体呈增加趋势,秋季增量最大。

(4) 华南地区水汽主要集中在 500 hPa 气压层以下。最大收支分别在南边界 800 hPa 和西边界 975 hPa。中低层(700 hPa)水汽多来自印度洋—孟加拉湾,低层(925 hPa)多来自西太平洋水汽输送。变化趋势表现为由西南向东北方向水汽输送减弱,其中海域变化趋势大于陆地区域。

(5) 净支出与降水量相关系数达 0.76,广西、广东区域水汽输送与降水量呈现正相关,北部湾、海南等区域呈负相关。西南方向水汽输送较强时更可能导致降水增多。

华南作为我国重要的水汽输送入口,水汽收支变化趋势及区域对降水的影响值得更深入的探讨和研究。由于干湿年,不同季节、不同过程等水汽输送存在较大的差异,因而造成水汽输送异常的原因是多样的。本文只是初步探讨了华南水汽输送总体变化及与降水关系,在后续的工作中可进一步深入研究季风环流变化(史学丽和丁一汇,2000)、水凝物的形成和输送等(Zhou et al,2020)对华南水汽收支的影响,可为了解华南异常降水及其气候变化提供帮助。

参考文献

- 常越,何金海,刘芸芸,等,2006. 华南旱、涝年前汛期水汽输送特征的对比分析[J]. 高原气象,25(6):1064-1070. Chang Y, He J H, Liu Y Y, et al, 2006. Features of moisture transport of in pre-summer flood season of drought and flood years over South China[J]. Plateau Meteor, 25(6):1064-1070(in Chinese).
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第 2 版[M]. 北京:气象出版社. Ding Y H, 2005. Advanced Synoptic Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 丁一汇,柳艳菊,宋亚芳,2020. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. 水科学进展,31(5):629-643. Ding Y H, Liu Y J, Song Y F, 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Adv Water Sci, 31(5):629-643(in Chinese).
- 郭静妍,肖栋,2023. 孟加拉地区夏季水汽变化及其与太平洋年代际振荡的联系[J]. 干旱气象,41(3):380-389. Guo J Y, Xiao D, 2023. Changes of summer water vapor in Bengal Region and its linkage with the interdecadal Pacific oscillation[J]. J Arid Meteor, 41(3):380-389(in Chinese).
- 李超,崔春光,徐慧燕,等,2022. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象,48(12):1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12):1497-1511(in Chinese).
- 李秀珍,梁卫,温之平,2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系[J]. 热带气象学报,26(5):626-632. Li X Z, Liang W, Wen Z P, 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in South China in northern autumn, winter and spring[J]. J Trop Meteor, 26(5):626-632(in Chinese).
- 钱维宏,艾阳,陈绿文,等,2020. 一次广东典型龙舟水暴雨过程的扰动形势分析[J]. 热带气象学报,36(4):433-443. Qian W H, Ai Y, Chen L W, et al, 2020. Anomalous synoptic pattern of typical dragon boat precipitation process in Guangdong Province[J]. J Trop Meteor, 36(4):433-443(in Chinese).
- 覃皓,刘乐,农孟松,等,2023. 广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征[J]. 暴雨灾害,42(6):640-647. Qin H, Liu L, Nong M S, et al, 2023. The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi[J]. Torr Rain Dis, 42(6):640-647(in Chinese).
- 曲姝霖,苏涛,韩子轩,等,2021. 华南夏季降水两次年代际转折的水汽输送异常成因初探[J]. 大气科学,45(2):273-286. Qu S L, Su T, Han Z X, et al, 2021. Preliminary research on moisture transport anomalies in two interdecadal changes in summer precipitation in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):273-286(in Chinese).
- 史学丽,丁一汇,2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与季风活动的研究[J]. 气象学报,58(6):666-678. Shi X L, Ding Y

- H, 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994[J]. *Acta Meteor Sinica*, 58(6): 666-678 (in Chinese).
- 孙博, 2015. 我国不同区域的水汽源地及有关气候动力学研究分析[D]. 北京: 中国科学院大学.
- Sun B, 2015. Moisture sources of precipitation in different regions of China and related climate dynamics[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese).
- 孙婧超, 管兆勇, 李明刚, 等, 2019. 华南地区 7—10 月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比[J]. *气象学报*, 77(1): 43-57.
- Sun J C, Guan Z Y, Li M G, et al, 2019. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extremes over South China from July to October[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(1): 43-57 (in Chinese).
- 田红, 郭品文, 陆维松, 2004. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因素分析[J]. *热带气象学报*, 20(4): 401-408.
- Tian H, Guo P W, Lu W S, 2004. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors[J]. *J Trop Meteor*, 20(4): 401-408 (in Chinese).
- 韦志刚, 李娟娟, 刘雨佳, 等, 2021. 1961—2018 年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析[J]. *高原气象*, 40(6): 1513-1530.
- Wei Z G, Li X R, Liu Y J, et al, 2021. Comparative analysis of the characteristics of annual and seasonal extreme precipitation in South China during 1961—2018[J]. *Plateau Meteor*, 40(6): 1513-1530 (in Chinese).
- 伍红雨, 潘蔚娟, 王婷, 2014. 华南冬季气温异常与 ENSO 的关系[J]. *气象*, 40(10): 1230-1239.
- Wu H Y, Pan W J, Wang T, 2014. Winter temperature anomalies in South China and its relation to ENSO[J]. *Meteor Mon*, 40(10): 1230-1239 (in Chinese).
- 曾智琳, 湛芸, 王东海, 2020. 2018 年 8 月华南超历史极值降水事件的观测分析与机理研究[J]. *大气科学*, 44(4): 695-715.
- Zeng Z L, Chen Y, Wang D H, 2020. Observation and mechanism analysis for a record-breaking heavy rainfall event over southern China in August 2018[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(4): 695-715 (in Chinese).
- 周晓敏, 田付友, 郑永光, 等, 2023. 中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J]. *气象*, 49(3): 267-278.
- Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China[J]. *Meteor Mon*, 49(3): 267-278 (in Chinese).
- 周琰, 翟丽萍, 张丁丁, 等, 2024. 广西南宁一次“龙舟水”暴雨空报事件对流生消成因分析[J]. *气象*, 50(8): 941-952.
- Zhou Y, Zhai L P, Zhang D D, et al, 2024. Causes for convection generation and dissipation in an unsuccessful “dragon boat water” rainstorm prediction event in Nanning of Guangxi[J]. *Meteor Mon*, 50(8): 941-952 (in Chinese).
- Allan R P, Willett K M, John V O, et al, 2022. Global changes in water vapor 1979—2020[J]. *J Geophys Res Atmos*, 127(12): e2022JD036728.
- Arias P A, Bellouin N, Coppola E, et al, 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ashfaq M, Shi Y, Tung W W, et al, 2009. Suppression of South Asian summer monsoon precipitation in the 21st century[J]. *Geophys Res Lett*, 36(1): L01704.
- Bengtsson L, 2010. The global atmospheric water cycle[J]. *Environ Res Lett*, 5(2): 025202.
- Ding Y H, Chan J C L, 2005. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. *Meteor Atmos Phys*, 89(1): 117-142.
- Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al, 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change[J]. *J Meteor Res*, 28(5): 693-713.
- Du M K, Huang K M, Zhang S D, et al, 2021. Water vapor anomaly over the tropical western Pacific in El Niño winters from radiosonde and satellite observations and ERA5 reanalysis data[J]. *Atmos Chem Phys*, 21(17): 13553-13569.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.
- Huang W Y, He X S, Yang Z F, et al, 2018. Moisture sources for wintertime extreme precipitation events over South China during 1979—2013[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(13): 6690-6712.
- IPCC, 2022. IPCC Sixth Assessment Report. Working Group 1: the physical science basis[R/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Kim J W, Yeh S W, Chang E C, 2014. Combined effect of El Niño-southern oscillation and Pacific decadal oscillation on the East Asian winter monsoon[J]. *Climate Dyn*, 42(3): 957-971.
- Li C, Sun J L, 2015. Role of the subtropical westerly jet waveguide in a southern China heavy rainstorm in December 2013[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(5): 601-612.
- Li X Z, Wen Z P, Zhou W, 2011. Long-term change in summer water vapor transport over South China in recent decades[J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 89A: 271-282.
- Mao Y N, Bai J X, Wu G C, et al, 2024. Terrestrial evapotranspiration over China from 1982 to 2020: consistency of multiple data sets and impact of input data[J]. *J Geophys Res Atmos*, 129(3): e2023JD039387.
- Mears C A, Smith D K, Ricciardulli L, et al, 2018. Construction and uncertainty estimation of a satellite-derived total precipitable water data record over the world's oceans[J]. *Earth Space Sci*, 5(5): 197-210.
- Qi Y J, Zhang R H, Wang Z, 2023. Large-scale background and role of quasi-biweekly moisture transport in the extreme Yangtze River rainfall in summer 2020[J]. *Climate Dyn*, 61(7): 3721-3736.
- Qiu S, Zhou W, Leung M Y T, et al, 2017. Regional moisture budget associated with drought/flood events over China[J]. *Prog Earth Planet Sci*, 4(1): 36.
- Shi J, 2021. Reexamining the decadal variation in the ENSO-East Asian winter monsoon relationship[J]. *Geophys Res Lett*, 48(19): e2021GL094208.
- Shi J B, Xu C G, Guo J M, et al, 2015. Real-time GPS precise point

- positioning-based precipitable water vapor estimation for rainfall monitoring and forecasting [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 53(6):3452-3459.
- Tang L Z, Gao W H, Xue L L, et al, 2023. Climatological characteristics of hydrometeors in precipitating clouds over eastern China and their relationship with precipitation based on ERA5 reanalysis[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 62(5):625-641.
- Trenberth K E, 1991. Climate diagnostics from global analyses: conservation of mass in ECMWF analysis[J]. *J Climate*, 4(7):707-722.
- Trenberth K E, 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change[J]. *Climatic Change*, 39(4):667-694.
- Trenberth K E, Fasullo J, Smith L, 2005. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor[J]. *Climate Dyn*, 24(7-8):741-758.
- Yang Z F, Huang W Y, Qiu T P, et al, 2018. Interannual variation and regime shift of the evaporative moisture sources for winter-time precipitation over southern China [J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(23):13168-13185.
- Yi J, Han S, Shi C X, et al, 2021. Evaluation of HRCLDAS and ERA5 datasets for near-surface wind over Hainan Island and South China Sea[J]. *Atmos*, 12(6):766.
- Zhang Y L, Cai C S, Chen B Y, et al, 2019. Consistency evaluation of precipitable water vapor derived from ERA5, ERA-Interim, GNSS, and radiosondes over China[J]. *Radio Sci*, 54(7):561-571.
- Zhou L H, Cao Y C, Shi C, et al, 2024. Quantifying the atmospheric water balance closure over mainland China using ground-based, satellite, and reanalysis datasets[J]. *Atmos*, 15(4):497.
- Zhou Y Q, Cai M, Tan C, et al, 2020. Quantifying the cloud water resource: basic concepts and characteristics[J]. *J Meteor Res*, 34(6):1242-1255.
- Zhu D T, Zhang K F, Yang L, et al, 2021. Evaluation and calibration of MODIS near-infrared precipitable water vapor over China using GNSS observations and ERA5 reanalysis dataset[J]. *Remote Sens*, 13(14):2761.

(本文责编:侯翠梅)