

朱茵霖,翁翹楚,褚子禾,等.全球变暖背景下南海夏季风变化特征[J].海洋气象学报,2024,44(3):1-10.
ZHU Yinlin, WENG Qiaochu, CHU Zihe, et al. Characteristics of the South China Sea summer monsoon under global warming[J].
Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220629001. (in Chinese)

全球变暖背景下南海夏季风变化特征

朱茵霖¹, 翁翹楚¹, 褚子禾¹, 范伶俐^{1,2,3}

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学广东省高等学校陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室, 广东 湛江 524088; 3. 中国气象局-广东海洋大学海洋气象联合实验室, 广东 湛江 524088)

摘要 南海夏季风的爆发和推进影响着中国夏季雨带的进程。采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)再分析资料分析全球变暖前、后南海夏季风的演变特征。研究结果表明, 全球变暖导致南海夏季风减弱, 主要出现以下特征: (1) 南海夏季风的平均建立时间提早, 平均撤退时间推迟, 历时长度更长, 持续时间有上升的趋势。(2) 南海夏季风爆发后(6—9月), 南海西北部对流层低层(700 hPa以下)由海陆热力差异导致的局地环流在全球变暖后有减弱趋势, 进入中国华南和西南地区的西南夏季风有所减弱。(3) 夏季风盛行期间, 西南风携孟加拉湾水汽经过中南半岛进入中国南海的水汽呈减少趋势, 且从南海输入华南的水汽减少, 导致中国东部降水变化趋势存在空间差异。(4) 南海夏季风指数表明, 南海夏季风对南海中南部以及华南东部的影响加强, 而对南海北部和西南地区的影响强度明显减弱。

关键词 全球变暖; 南海夏季风; 水汽通量; 降水

中图分类号: P466 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2024)03-0000-09

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220629001

Characteristics of the South China Sea summer monsoon under global warming

ZHU Yinlin¹, WENG Qiaochu¹, CHU Zihe¹, FAN Lingli^{1,2,3}

(1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Climate, Resource and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. CMA-GDOU Joint Laboratory for Marine meteorology, Zhanjiang 524088, China)

Abstract The onset and advance of the South China Sea summer monsoon affect the process of the summer rain belt in China. The NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research) reanalysis data are used to analyze the characteristics of changes in the South China Sea summer monsoon before/after global warming. The results show that the South China Sea summer monsoon is weakened after global warming, and the main features are as follows. (1) The average establishment time of the South China Sea summer monsoon is earlier, the average retreat time is delayed, the duration is longer, and the duration has an upward trend. (2) After the onset of the South China Sea summer monsoon (between June and September), the local circulation in the lower

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2023-07-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(72293604); 广东海洋大学本科生创新创业团队项目(CCTD201805)

第一作者简介: 朱茵霖, 女, 本科生, 主要研究方向为气候与气候变化, 1183785628@qq.com。

通信作者简介: 范伶俐, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为气候与气候变化, fanlingli@126.com。

troposphere (below 700 hPa) in the northwest of the South China Sea caused by the thermal difference between land and sea tends to weaken after global warming, and the southwest summer monsoon entering South China and Southwest China tends to weaken. (3) When the summer monsoon prevails, the water vapor transferred by the southwest early from the Bay of Bengal into the South China Sea through the Indo-China Peninsula shows a decreasing trend, and the water vapor transfer from the South China Sea to South China decreases, leading to a spatial difference in the change trend of precipitation in the east of China. (4) The South China Sea summer monsoon index shows that the influence of the South China Sea summer monsoon on the south-central part of the South China Sea and the east of South China is strengthened, while the influence on the north of the South China Sea and Southwest China is weakened.

Keywords global warming; the South China Sea summer monsoon; water vapor flux; precipitation

引言

中国东部属季风气候区,南海夏季风(又称“南海季风”)作为东亚夏季风的重要组成部分,是东亚季风和南亚季风的联系桥梁。南海夏季风的强弱与中国主雨带推进、旱涝灾害及其衍生灾害的发生有密切联系,是每年雨季气象部门和应急减灾部门重点关注的气候事件。

联合国政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告(Sixth Assessment Report, AR6)指出,气候变暖是毋庸置疑的,并预测当全球平均升温 2°C 时,季风降水会进一步减弱^[1]。南海夏季风一直是研究热点,20世纪末就已经对南海夏季风的爆发给出了多种角度的判定方法,对爆发前后的机制特征、水汽输送等有了初步的认识^[2-4]。自南海季风试验(South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX)以来,有关南海夏季风的爆发、活跃和间歇循环,以及季风的维持与变化都有了较为深刻的认识,后续关于南海夏季风的各种研究也推进迅速^[5-6]。近十年有许多工作都指出,南海夏季风爆发日期在20世纪90年代中期经历了显著的年代际变化,南海夏季风的爆发时间由偏晚转为偏早^[7-11];胡鹏等^[10]对南海夏季风撤退的气候学特征及年际、年代际变化进行研究,发现南海夏季风撤退在21世纪初期之后也经历了显著的年代际变化。实际上,研究^[11]发现整个亚洲地区的夏季风爆发,包括阿拉伯海、孟加拉湾、南海、菲律宾海,都在20世纪90年代中后期经历了显著的年代际提前,只是阿拉伯海和孟加拉湾夏季风爆发的年代际提前发生晚于南海夏季风爆发的年代际提前。对于南海夏季风年代际提前发生的机制,这些年来许多研究工作者从不同角度进行了分析。黄菲等^[12-13]应用多变量联合季节经验正交分解

(Multivariate Season-reliant Empirical Orthogonal Function, MV-SEOF)方法,研究了南海季风系统的前两个主模态特征,发现一个模态是厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)模态,另一个是在1990年代中期的年代际转型模态。季风的爆发推进依赖海洋-大气耦合作用,并且南海局地的海洋-大气耦合作用起到“放大器”的作用,使南海中北部海面温度(sea surface temperature, SST)的年代际信号强化并影响到整个季风系统中^[13-14]。蔡榕硕等^[15]也指出了海气界面热通量对季风产生作用,南海区域是中国近海SST与东亚季风年际变异的主要相关区域。显然,SST的影响对南海夏季风的作用是举足轻重的,热带西南印度洋和热带西北太平洋是影响南海夏季风爆发的关键海区^[16-17];在年代际尺度上,影响南海夏季风爆发日期的还有西南印度洋、东南印度洋、北太平洋、热带东南太平洋和东南太平洋5个显著不同的相关区^[18-19]。另外,还有学者^[20-21]指出南海夏季风爆发的年代际提前和南海季风区对流层经向温度梯度季节性逆转的年代际提前以及南海-西太平洋春季对流10~30 d振荡强度(简称“SCSWPSISO”)也有关。

南海夏季风活动主导着水汽的输送,仅南海就提供了东亚地区45%左右的水汽,全球气候变化必然导致季风活动的异常,进而影响中国夏季旱涝灾害的发生^[3,22],特别是对华南前汛期的降水产生重大影响^[23-28],给人们的生活带来诸多不便,如2022年5月华南出现长达5 d的密集降雨期^[29]。

已有大量研究^[30-35]证明,20世纪70年代以来,全球气候快速增暖,升温趋势十分明显,全球变暖进程比以往任何时期都要迅速。在全球变暖背景下南海夏季风的许多特征发生了明显变化。前人的研究多为全球变暖后南海夏季风爆发有关机理的研究,而南海夏季风在全球变暖前、后的年代际特征对比

的研究尚不多见。因此本文基于多要素的综合表现,从短期气候的角度分析全球变暖前、后南海夏季风特征变化,以期提高汛期降水的预报准确率。

1 资料和方法

1.1 资料

选用 1948—2018 年美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 再分析日平均数据资料,包括 850 hPa 纬向风、温度场、比湿场等要素,空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [36]。1948—2018 年 NCEP/NCAR 再分析月平均资料,共 17 层,包括纬向风、经向风、垂直速度、温度、湿度等要素,空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [36]。1901—2013 年 NCEP/NCAR 第七版全球降水气候中心 (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) 再分析月总降水资料,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ [37]。

1.2 方法

南海夏季风建立与结束候的确定:根据中国气象局现行南海夏季风爆发标准,即选取南海区域 ($110^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, $10^\circ \sim 20^\circ \text{N}$),当 850 hPa 平均纬向风稳定地由东(西)风转为西(东)风时,且在同一等压面上稳定地有假相当位温 $\theta_{se} \geq 335 \text{ K}$ ($\theta_{se} < 335 \text{ K}$) 时定义为南海夏季风建立(结束)候。由此指标计算出每年南海夏季风建立、结束候数及南海夏季风的持续时间。

假相当位温 θ_{se} (或称绝热相当位温) 计算公式 [38-39] 为:

$$\theta_{se} = \theta_d \exp \left(\frac{r_s L_v}{c_{pd} t} \right), \quad (1)$$

$$\theta_d = t \left(\frac{P_{00}}{P_d} \right)^{\frac{R_d}{c_{pd}}}, \quad (2)$$

式中: θ_d 为空气中所含干空气的位温, r_s 为混合比, L_v 为潜热, c_{pd} 为干空气定压比热, P_{00} 为标准气压(常取 1 000 hPa), t 、 P_d 为环境大气的温度和气压, R_d 为干空气的比气体常数。

2 全球变暖前后时间划分及南海夏季风建立、撤退的变化

近一个世纪以来,人类活动影响全球气候变暖毋庸置疑,尤其是 1970 年代之后,气候变暖更剧烈,冰山消融、海平面上升,大气环流也在随之调整 [32-35]。为计算方便,将 1948—2018 年划分为全

球变暖前 (1948—1977 年,共 30 a) 和全球变暖后 (1978—2018 年,共 41 a) 2 个时段。

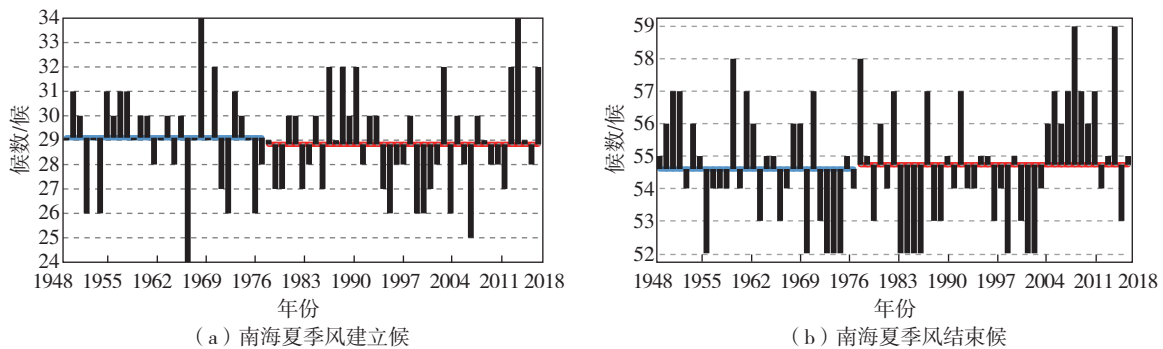
基于南海夏季风建立的标准,可确定南海夏季风的建立和结束候数,建立候到结束候之间的时段即为南海夏季风的历时长度。利用 1948—2018 年 NCEP/NCAR 再分析日平均数据资料可计算出 1948—2018 年南海夏季风爆发(图 1a)及结束(图 1b)的时间及每一年南海夏季风的历时长度(图 2)。按照全球变暖前、后时间段划分可看出,在全球变暖前南海夏季风的平均建立时间为 29.1 候,平均撤退时间为 54.6 候,南海夏季风平均历时 25.5 候;而在全变暖后南海夏季风平均建立时间为 28.8 候,平均撤退时间为 54.7 候,南海夏季风平均历时 26.0 候。可见,在全球变暖背景下南海夏季风的平均建立时间提前,平均撤退时间比变暖前推后,此结论与张莉萍等 [40] 的研究结果一致,并且通过 0.05 的显著性水平检验。进一步对全球变暖前后南海夏季风的历时长度进行分析,两个阶段有不同的变化趋势:全球变暖前 (1948—1977 年) 存在一定的下降趋势,线性拟合方程为 $y = -0.050 1x + 26.276$,未通过 0.05 的显著性水平检验;而全球变暖后 (1978—2018 年) 存在上升趋势,线性拟合方程为 $y = 0.034 1x + 25.21$,未通过 0.05 的显著性水平检验,即南海夏季风在全球变暖后历时长度变长。

3 南海夏季风环流变化特征分析

3.1 南海夏季风 850 hPa 特征

季风的形成是行星风带移动和海陆热力差异的共同结果,季风环流的变化只出现在季风区的对流层低层,南海夏季风是一个浅薄的环流系统,故选取 850 hPa 等压面进行其空间特征分析。通过计算,南海夏季风多年平均建立时间为 5 月第 5 候,与已有研究结论一致,平均撤退时间为 10 月第 1 候,因此选用 6—9 月对南海夏季风爆发后的环流和水汽输送特征(图 3)进行描述。

全球变暖后与全球变暖前的差值可以更清晰地表现全球变暖前、后南海夏季风爆发后风场特征的变化。南海夏季风盛行的是西南风,而图 3 中除了南海的东南部和菲律宾群岛的北部是西南风异常,其余受南海夏季风影响的区域均出现东北风异常,可推断在全球变暖后,南海夏季风爆发后的西南风有所减弱,并且中国西南地区盛行的西南风削弱最为明显。



蓝色实线—全球变暖前南海夏季风平均建立/结束候；红色实线—全球变暖后南海夏季风平均建立/结束候。

图1 南海夏季风建立及结束候统计情况

Fig.1 Statistics on establishment and end of the South China Sea summer monsoon

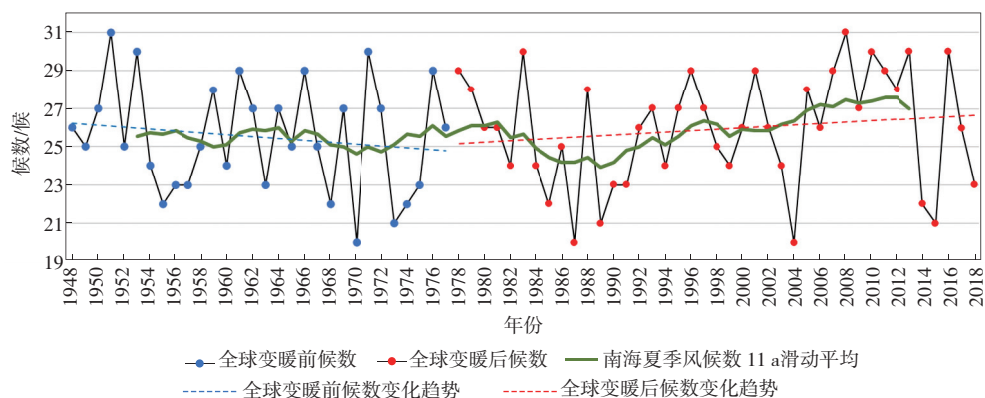


图2 1948—2018年南海夏季风历时候数及其11 a滑动平均结果

Fig.2 Statistics of pentad of the South China Sea summer monsoon and its 11-a moving average results from 1948 to 2018

水汽通量等值线是变暖前、后水汽通量的差值,在全球变暖背景下南海夏季风爆发后孟加拉湾—南海西部—华南地区 850 hPa 的水汽通量差值都为负值,并且越深入内陆水汽通量差值的绝对值越大,其中 $104^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的 850 hPa 水汽通量在全球变暖后比之前减小了 $30\text{ g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})^{-1}$ 以上,表明孟加拉湾进入中国华南的水汽通量在不同地区有不同程度的减少。与此同时,南海东南部和菲律宾群岛北部情况相反,水汽通量在全球变暖后增加, 15°N 附近水汽通量增加值超过 $5\text{ g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})^{-1}$,与 850 hPa 环流场变化表现一致。

水汽通量散度差值为正对应辐散异常,是异常的水汽源。全球变暖背景下受南海夏季风影响的区域内,南海西北部到华南中部以及台湾岛东部洋面的水汽通量散度出现正异常,该区域 850 hPa 水汽辐散将比变暖前更大;而菲律宾群岛以及中南半岛北部至 30°N 区域的水汽通量散度则为负异常,是

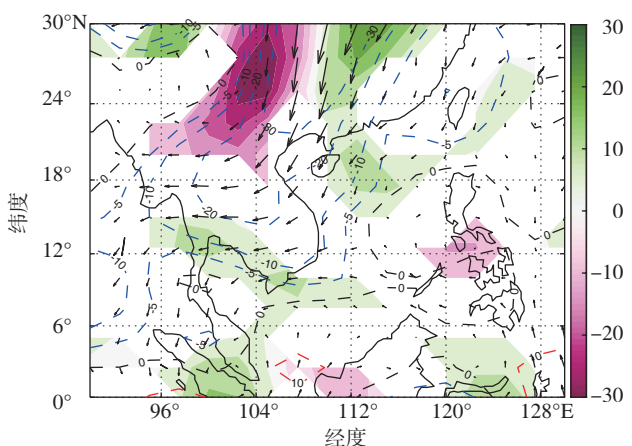
异常的水汽汇区域。风速、水汽通量下降明显的区域,对应水汽通量散度的变化,在图 3 中 $96^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域内表现最为明显。

综上所述,在 850 hPa 上除南海东部外,南海夏季风爆发后(6—9月)的西南风强度在全球变暖背景下都有所减弱;西南夏季风携孟加拉湾水汽经过中南半岛后到达中国南海西北部和中国西南地区的水汽减少,进而从南海进入华南的水汽通量有所减少,输送到中国内陆的水汽也会减少。

3.2 南海夏季风经向及纬向剖面速度

虽然南海位于热带辐合上升气流区,但受海陆热力性质差异影响,夏季,陆地升温相对较快,而海洋升温相对较慢,地面就会出现从海洋吹向陆地的夏季风,因此海洋上表现为下沉气流,该下沉气流在 NCEP/NCAR 再分析资料中为正值。但这层下沉气流是浅薄的,仅会出现在对流层低层,850 hPa 高度上就转变成由行星风带控制的上升气流,因此仅对

对流层中层(500 hPa)以下的垂直速度变化进行分析。由经向(图4)和纬向(图5)垂直剖面的差值可看出全球变暖前、后垂直速度随高度的异常变化。



箭矢—风场差值, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 等值线—水汽通量差值, 红色虚等值线为正值, 蓝色虚等值线为负值, 黑色虚等值线为0线, 单位为 $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$; 色阶—通过0.05显著性水平检验的水汽通量散度差值, 单位为 $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})^{-1}$ 。

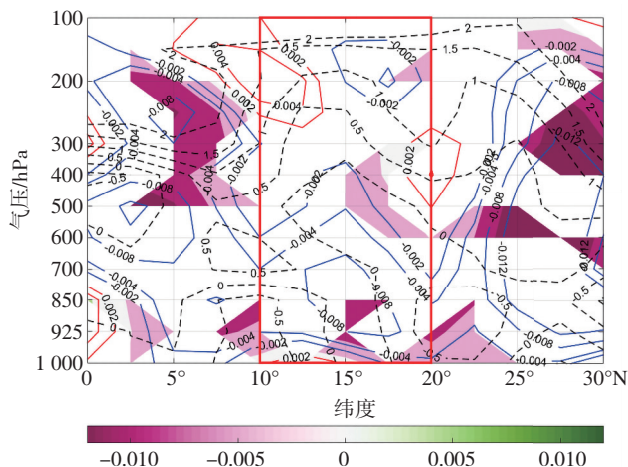
图3 全球变暖前、后南海夏季风爆发后(6—9月)850 hPa风场、水汽通量和水汽通量散度的差值场

Fig.3 Difference of wind, water vapor flux and water vapor flux divergence at 850 hPa after the onset of the South China Sea summer monsoon (between June and September) before/after global warming

由经向 115°E 剖面的差值(图4)可见,南海区域($10^\circ \sim 20^\circ\text{N}$)南部海平面附近的垂直速度在全球变暖前、后相差并不大,变化在 $0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,但 10°N 、 15°N 和 20°N 附近的垂直速度差值通过0.05的显著性水平检验,说明全球变暖前、后垂直速度的变化是显著的。南海北部海平面、整个南海区域和华南区域(20°N 以北)的对流层低层(700 hPa以下)都出现负速度异常,并且 27°N 的850 hPa附近出现负速度异常最大值,差值超过 $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。南海区域850~600 hPa高度上的差值也表现为负速度异常,其中 15°N 负速度异常高度超过500 hPa,并且在850~700 hPa高度上达到负速度异常最大值 $-0.008 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由纬向 15°N 剖面的差值(图5)可见,850 hPa高度以下 $110^\circ \sim 115^\circ\text{E}$ 的垂直速度表现出较大的负速度异常,且南海区域在 115°E 附近700 hPa以下垂直速度差值通过0.05的显著性水平检验,说明下沉气流的速度在全球变暖后比全球变暖前要小。 $115^\circ \sim 120^\circ\text{E}$ 全球变暖前、后差值并不明显,但是在 120°E 以西出现 $0.002 \sim 0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正速度异常,

可推断该经度上的下沉气流强度在全球变暖后略有增加,与图3中850 hPa的分析一致。



黑色虚等值线—纬向风速差值, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 彩色实等值线—垂直速度差值, 红色为正值, 蓝色为负值, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; 色阶—通过0.05显著性水平检验的垂直速度差值, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色框—南海所在纬度范围。

图4 沿 115°E 剖面的全球变暖前、后6—9月多年平均纬向风速和垂直速度差值场

Fig.4 Multi-year average zonal wind speed and vertical velocity difference along profile of 115°E between June and September before/after global warming

南海夏季风的西南风仅出现在对流层低层,500 hPa高度西南风已经完全转变为东北风,因此南海夏季风全球变暖前、后的变化仅关注高度在700 hPa以下风场。由图4可见, $5^\circ \sim 15^\circ\text{N}$ 的850 hPa高度及 $17^\circ \sim 24^\circ\text{N}$ 的700 hPa高度以下的纬向风差值均为负值,并且 $7^\circ \sim 13^\circ\text{N}$ 和 20°N 附近850 hPa高度以下西风在全球变暖后减小 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;而南海中部在全球变暖前、后并未出现明显变化。根据南海区域内 115°E 附近低层的经向风 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等值线可判断,西部为负值,东部为正值;且南海西部的南风风速减小较大,最大值达 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相较之下,东部南风风速增大则并不明显(图5)。综上,进一步说明南海西部和北部海陆热力差异形成的局地环流在全球变暖后减弱,进而使南海夏季风有所减弱。

3.3 中国东部季风区降水及南海夏季风指数分析

南海夏季风最直接的影响就是给华南地区带来丰沛的降水,这使得华南地区虽位于副热带地区,却能有雨热同期的气候特征。6—8月是南海夏季风的盛期,中国的降水也达到盛期,9月开始雨带自北向南迅速撤退,降水量显著减小。因此,分析全球变

暖前、后中国东南部降水特征是研究南海夏季风不可缺少的一部分,同时也可以根据降水在全球变暖前、后的不同特征提高短期气候预测的精度。

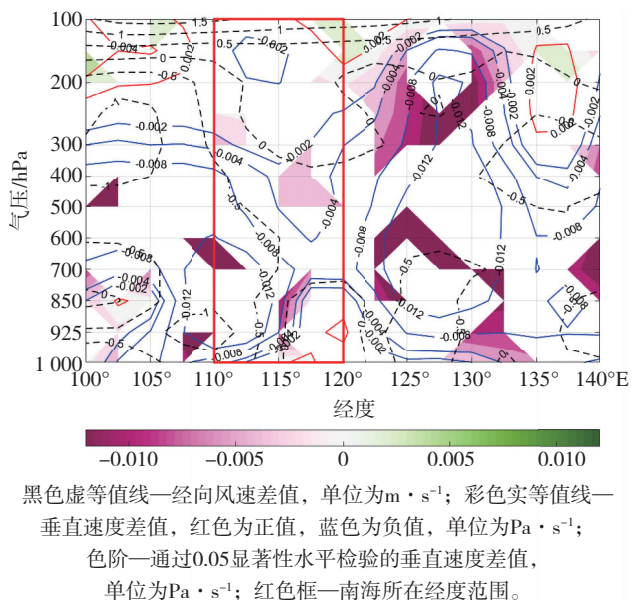


图5 沿15°N剖面的全球变暖前、后6—9月多年平均经向风速和垂直速度差值场

Fig.5 Multi-year average meridional wind speed and vertical velocity difference along profile of 15°N between June and September before/after global warming

南海夏季风爆发后(6—9月)平均总降水量分布的差值场(图6),反映出西南、华南和华北地区在全球变暖后降水量都出现不同程度的减少。华南地区是南海夏季风影响最为显著的关键区^[41],大部分地区降水量减少超过10 mm,局部地区降水量减少超过25 mm。但是有些局部地区与整体降水量减少的趋势相反,表现为增加,例如112°~120°E、26°~34°N的江淮地区在全球变暖后降水增加超过10 mm。已有研究^[42-44]表明,华南和华北少雨而江淮流域多雨的年份都是南海夏季风偏弱的年份,由气候平均总降水来看,全球变暖后华南和华北降水量减少,因此可推测在变暖后南海夏季风是减弱的。

为进一步揭示南海夏季风变化特征,根据李崇银等^[3]的研究,用对流层高层(200 hPa)与低层(850 hPa)的散度差定义南海夏季风指数 I_d ,能较好地描写南海夏季风的活动,指数为负值则代表南海夏季风的爆发,南海夏季风指数 I_d 负值的绝对值越大,则表明南海夏季风越强。由南海夏季风指数 I_d (图7)可看出全球变暖后,南海中部和南部的南海

夏季风指数负值的绝对值增大,而南海北部和西南地区,南海夏季风指数负值的绝对值则是变小的。因此在全球变暖背景下,南海夏季风对南海中南部、华南东部的影响有所加强,而对南海北部和西南地区影响强度则减弱。同时,华南中部到台湾岛的地区南海夏季风指数由原来的正值转变为负值,正值范围明显北抬,在图7b中几乎已经看不到正值地区,这些区域受南海夏季风影响的程度有增大趋势。

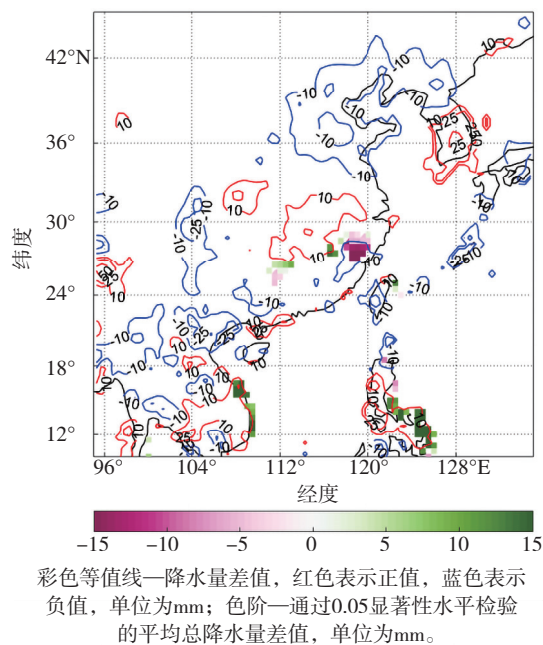


图6 全球变暖前、后南海夏季风爆发后(6—9月)平均总降水量差值场

Fig.6 Difference of average total precipitation after the onset of the South China Sea summer monsoon (between June and September) before/after global warming

热成风是两个气层间温度分布不均匀所导致的,热成风的方向与气层间的平均等温线平行,热成风越小则说明温差越小,反之亦然。南海上空的热成风风场在全球变暖前(图7a)、后(图7b)的风向并无发生明显变化,但是中南半岛东部到南海西部的热成风风速减小;南海北部到菲律宾群岛也出现上述变化。同时,在25°N附近以北的大陆上,热成风在全球变暖后的风向出现了向南偏转的现象,但风速无明显变化。故可以推测,中南半岛东部—南海西部和南海北部—菲律宾群岛的温度梯度变小;而华南地区温度梯度方向由变暖前的东南—西北方向转变为东—西方向。南海夏季风爆发与海陆温差有关^[44],全球变暖后海陆温度梯度变小,导致南海夏季风减弱。

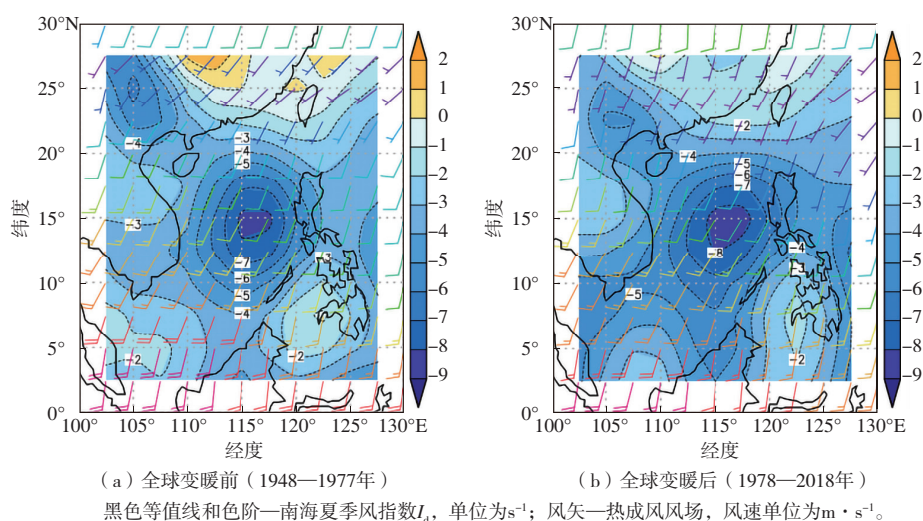


图7 全球变暖前、后南海夏季风爆发后(6—9月)平均南海夏季风指数 I_d 和热成风

Fig.7 The average South China Sea summer monsoon index I_d and thermal wind after the onset of the South China Sea summer monsoon (between June and September) before/after global warming

4 结论和讨论

南海夏季风在全球变暖后出现以下特征:

(1) 南海夏季风的平均建立时间提早, 平均撤退时间推迟; 相应的南海夏季风历时长度更长, 持续时间有上升趋势。

(2) 南海夏季风爆发后(6—9月), 南海西北部对流层低层(700 hPa 以下) 由海陆热力差异导致的局地环流在全球变暖后有减弱趋势, 进入中国华南和西南地区的西南夏季风强度有所减弱。

(3) 夏季风盛行期间西南风携孟加拉湾水汽经过中南半岛进入中国南海的水汽通量呈减少趋势, 且从南海输入华南的水汽通量也减少, 导致中国东部降水变化趋势存在空间差异。华南和华北大部分地区在夏季风期间总降水呈下降趋势, 而江淮地区在夏季风期间总降水呈上升趋势。

(4) 南海夏季风指数表明南海夏季风对南海中南部以及华南东部的影响加强, 而对南海北部和西南地区的影响强度明显减弱。

文中仅对南海夏季风部分主要特征进行全球变暖前、后简要的分析, 其他要素变化尚需进一步研究。另外, 南海夏季风对全球变暖的响应和可预报性需要更深入的研究。为减轻日益增加的重大气象灾害损失, 中国对南海夏季风的监测、预警能力必须持续建设并提高。同时, 还需根据南海夏季风在全球变暖背景下的变化规律采取工程性防御措施, 以防范和应对强降水引发的洪涝灾害和城市内涝, 以及与降水持续

不足有关的重大干旱和高温热浪等气象灾害事件。

参考文献:

- [1] 翟盘茂, 余荣, 周佰铨, 等. 1.5 °C 增暖对全球和区域影响的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 465-472.
- [2] 陈隆勋, 刘洪庆, 王文, 等. 南海及其邻近地区夏季风爆发的特征及其机制的初步研究[J]. 气象学报, 1999, 57(1): 16-29.
- [3] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响[J]. 大气科学, 1999, 23(3): 257-266.
- [4] 谢安, 宋焱云, 毛江玉, 等. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 425-434.
- [5] 丁一汇, 李崇银, 何金海, 等. 南海季风试验与东亚夏季风[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 561-586.
- [6] 邵颢, 黄平, 黄荣辉. 南海夏季风爆发的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1126-1137.
- [7] KAJIKAWA Y, WANG B. Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset[J]. J Climate, 2012, 25(9): 3207-3218.
- [8] KAJIKAWA Y, YASUNARI T, WANG B. Decadal change in intraseasonal variability over the South China Sea[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36(6): 3207-3218.
- [9] 丁硕毅, 温之平, 陈文. 南海夏季风爆发与热带太平洋两类海温型关系的年代际差异[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 243-256.
- [10] 胡鹏, 陈文. 南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及 ENSO 的作用[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(4): 401-412.

- [11] LIN A L, ZHANG R H. Climate shift of the South China Sea summer monsoon onset in 1993/1994 and its physical causes[J]. *Climate Dyn*, 2020, 54(3): 1819-1827.
- [12] 黄菲, 邢雯, 李元妮, 等. 1990s 年代际转型前后南海季风系统的季节变化[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(1/2): 9-15.
- [13] 黄菲, 董静舒, 黄少妮, 等. 1990 年代中期南海季风系统年代际转型模态的时空特征[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(6): 938-944.
- [14] 孙启振. 海气热通量与东亚夏季风的关系[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009.
- [15] 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(1): 94-104.
- [16] 谷德军, 纪忠萍, 林爱兰. 影响南海夏季风爆发年际变化的关键海区及机制初探[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(1): 1-11.
- [17] 李业进. 西太平洋暖池热状态变异及其对南海夏季风的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [18] 谷德军, 纪忠萍, 李春晖. 南海夏季风爆发日期与海温的多尺度关系及最优子集回归预测[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 55-63.
- [19] 吴丹晖. 近 20 年南海夏季风的变化特征及其与孟加拉湾海表温度变化的联系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [20] 尤俊丽, 简茂球, 林晓霞. 春季对流层温度的季内和季节以上分量对南海夏季风爆发的年代际变化的相对影响[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(3): 313-323.
- [21] 李春晖, 潘蔚娟, 李霞, 等. 南海-西太平洋春季对流 10~30 天振荡强度对南海夏季风爆发早晚的影响[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(1): 43-52.
- [22] 薛媛, 薛晓萍. 极端降水与干旱同步频发的研究进展[J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(1): 61-73.
- [23] 吴胜安, 邢盈淼, 朱晶晶. 南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(4): 75-82.
- [24] 任菊章, 琚建华, 米瑞芝, 等. 亚洲热带夏季风指数与中国南方降水的关系[J]. *气象科学*, 2021, 41(2): 228-236.
- [25] 李争辉, 罗亚丽. 1980—2017 年南海季风爆发前后华南前汛期降水统计特征对比分析[J]. *暴雨灾害*, 2021, 40(2): 101-110.
- [26] 孔蕴淇, 范伶俐, 李俊杰. 两类厄尔尼诺事件对登陆中国热带气旋的影响[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(4): 77-88.
- [27] 李超, 陈潜, 赵春阳, 等. 相似天气背景下深圳两次前汛期降水过程对比分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 24-33.
- [28] 甘秋莹, 范伶俐, 陈汉森, 等. 湛江地区汛期降水稳定同位素的变化与水汽来源的关系[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(1): 129-137.
- [29] 中国气象局. 以预警为先导强化部门联动南方多地全力防御强降雨[EB/OL]. (2022-05-10) [2022-06-29]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202205/t20220510_4814987.html.
- [30] 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 等. 中国近 45 年来气候变化的研究[J]. *气象学报*, 1998, 56(3): 257-271.
- [31] 董李丽, 李清泉, 丁一汇. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. *气象*, 2015, 41(10): 1177-1189.
- [32] 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 157-164.
- [33] 赵平, 周秀骥. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 548-556.
- [34] 李春晖, 万齐林, 林爱兰, 等. 1976 年大气环流突变前后中国四季降水量异常和温度的年代际变化及其影响因子[J]. *气象学报*, 2010, 68(4): 529-538.
- [35] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. *高原气象*, 2004, 23(2): 238-244.
- [36] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3): 437-471.
- [37] SCHNEIDER U, FINGER P, MEYER-CHRISTOFFER A, et al. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) [J]. *Atmosphere*, 2017, 8(3): 52.
- [38] 陈创买, 郭英琼, 刘丽英. 论假相当位温的数值计算(一)[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1989, 28(2): 111-116.
- [39] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [40] 张莉萍, 李栋梁, 李潇. 气候变暖背景下南海夏季风建立和结束日期及其强度的关系[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(6): 1037-1047.
- [41] 张莉萍. 气候变暖背景下南海夏季风变化特征及与我国南方降水的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [42] 罗会邦. 南海夏季风爆发及相关雨带演变特征[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 32.
- [43] 齐庆华, 蔡榕硕, 郭海峡. 中国东部气温极端特性及其气候特征[J]. *地理科学*, 2019, 39(8): 1340-1350.
- [44] 李建平, 朱建磊. 晚春初夏西太平洋副热带高压南撤过程的气候学特征[J]. *气象学报*, 2008, 66(6): 926-939.