

2019年夏季江南降水偏多的原因分析

张莹琪, 孙即霖

中国海洋大学, 山东 青岛
Email: 1911088123@qq.com

收稿日期: 2021年4月8日; 录用日期: 2021年5月3日; 发布日期: 2021年5月11日

摘要

本文利用NECP/NCAR提供的1981~2019年月平均位势高度场、风场、垂直速度场等再分析资料,对2019年夏季中国雨带位置异常偏南的原因进行了分析。研究发现,雨带位置偏南和行星锋区位置异常偏南、强度偏强有很大的关系。造成行星锋区位置异常偏南主要有两个原因:一是位于贝加尔湖附近的高压脊异常偏强,高压脊前的西北气流偏强,冷气团势力偏强将行星锋区推进到江南地区;二是行星锋区南侧西太平洋副热带高压位置的偏南,造成夏季风异常偏弱,暖气团势力相对较弱。副高位置偏南的原因与太平洋发生El Niño事件的次年及印度洋偶极子正位相有关。分别以850 hPa上的垂直速度异常考察行星锋区强迫抬升造成的上升运动异常,以500 hPa上垂直速度异常考察根据热成风原理,行星锋区对应高空西风急流南侧强辐散造成的对流上升运动,发现2019年夏季江南降水主要是由锋面抬升作用引起的。夏季风偏弱导致高空急流南侧对流层中、下层暖湿空气输送偏弱可能是对流性降水作用相对偏弱的原因。

关键词

夏季降水, 锋面抬升, 中亚高压脊, 西太平洋副热带高压

Analysis on the Reasons of More Precipitation in the South of the Yangtze River in Summer of 2019

Yingqi Zhang, Jilin Sun

Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: 1911088123@qq.com

Received: Apr. 8th, 2021; accepted: May 3rd, 2021; published: May 11th, 2021

Abstract

Based on the NECP/NCAR reanalysis data of monthly mean geopotential height field, wind field and vertical velocity field from 1981 to 2019, this paper analyzes the reasons for the anomalous southward location of rain belts in China in the summer of 2019. It is found that the southward location of the rain belt is closely related to the anomalous southward location and strong planetary front. There are two main reasons for the anomalous southward position of the planetary front zone. First, the anomalous strong high pressure ridge near Lake Baikal, the strong northwest air flow in front of the high pressure ridge, and the strong cold air mass force pushed the planetary front zone to the south of the Yangtze River. Second, the position of the western Pacific subtropical high on the south side of the planetary front zone is southward, which results in the abnormally weak summer monsoon and relatively weak warm air. The southward location of the subtropical high is related to the next year of El Niño event in the Pacific Ocean and the positive phase of Indian Ocean Dipole. According to the thermal wind principle, the planetary front corresponds to the convective upward movement caused by the strong divergence on the south side of the high-altitude westerly jet. It is found that the summer precipitation over the south of the Yangtze River in 2019 is mainly caused by the frontal uplift. The weak transport of warm and moist air in the middle and lower troposphere on the south side of the upper jet due to the weak summer wind may be the reason why the convective precipitation is relatively weak.

Keywords

Summer Precipitation, Frontal Lifting, Central Asian Ridge, Western Pacific Subtropical High

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国位于欧亚大陆中高纬的下游地区, 且具有典型的东亚季风气候, 在高纬度环流异常和夏季风的作用下, 我国降水的整体状况主要呈现东多西少, 沿海多内陆少的分布特点[1]; 特别是夏季, 降水一般比其它季节偏多, 再加上降水区域比较集中, 更容易发生洪涝灾害。相关的统计结果表明, 长江中下游地区大概每两到三年就会发生一次洪涝灾害[2], 对人民的生命财产安全和生活造成了很大的影响, 给我国经济带来的损失也是十分严重。南方地区夏季多降水的同时, 北方地区经常发生干旱[3], 研究我国夏季雨带的推进过程, 预测降水的强弱和位置, 一直是我国短期气候研究中的一个重要部分。开展夏季降水异常的研究对提高我国天气预报水平, 提前做好预防措施, 从而提高我国的经济水平具有十分重要的现实意义。

多年来, 很多专家学者从不同方面研究分析了我国夏季降水的情况。陶诗言等[4]从环流形势的角度出发研究了大气环流异常与我国夏季降水的关系, 发现我国夏季降水异常直接受到大气环流异常的影响; 李维京[5]指出 1998 年长江流域夏季特大洪水的发生主要跟夏季中高纬度地区出现的阻塞形势以及夏季风异常偏弱有关; Nakazawa [6]发现, 1998 年夏季对流位置的异常使得西太平洋副热带高压发生了异常, 进而影响降水。刘芸芸和丁一汇[7]的研究表明, 当西北太平洋夏季风偏强时, 我国长江流域的夏季降水通常偏少; 况雪源和张耀存[8]定义了东亚副热带西风急流轴指数, 发现西风急流的位置异常对中国降水

造成了明显影响; 叶许春等[9]的结果表明长江中下游夏季降水与东亚夏季风和南海夏季风指数之间均呈现负相关。一些学者研究了不同海域海温异常与中国夏季降水的可能联系[10] [11] [12]。黄荣辉等[13]认为, 在 ENSO 的发展年, 江淮多雨, 黄河和华北少雨; 在 ENSO 衰减年, 江淮少雨, 长江流域降水偏多。闵锦忠等[14]研究了南海和印度洋海温异常对东亚大气环流及降水的影响, 发现当南海、孟加拉湾和阿拉伯春季海温处于正异常时, 夏季副热带高压偏南偏西偏强, 对应长江流域降水偏多, 华北和华南降水偏少。Karumuri 等[15]指出印度洋偶极子不但会对赤道印度洋地区产生影响, 还会影响到南方涛动、印度夏季风以及东亚季风区的夏季天气气候变化。李崇银和穆明权[16]的研究表明, 赤道印度洋海温偶极子可以通过影响对流层低层的流场而对亚洲夏季风产生明显的影响, 即海温偶极子呈现正位相时, 有较强的南海夏季风和印度夏季风。除此之外, 欧亚中高纬地区产生的外强迫能够使得大气产生低频遥相关, 对东亚气候及全球大气环流产生重要的影响[17] [18]。

综上所述, 我国夏季降水不但受到低纬度环流形势的影响, 还受到中高纬度大气环流的作用和影响[19]。由于多种影响因子之间的相互作用以及各自产生的贡献不同, 我国夏季降水的情况也不尽相同。针对 2019 年的情况, 解晋和周宁芳[20]对 2019 年 7 月的大气环流和天气进行了分析, 发现 7 月 500 hPa 极涡呈现偶极型分布, 西太平洋副热带高压位置在 7 月中上旬明显偏南; 丁婷和高辉[21]将 2019 年夏季的情况与 1992 年对比分析, 认为东亚中高纬度异常强的低槽是 2019 年夏季江南多雨长江中下游少雨的主要原因, 但是对于这一低槽与其它环流系统之间的相互作用和机制并没有进行深入地开展。本文将从环流异常等方面出发, 深入探讨造成 2019 年夏季江南地区降水偏多的原因。

2. 资料和方法

本文所用的资料是由美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)提供的全球格点 NCEP/NCAR 再分析数据集[22], 主要包括月平均位势高度场、风场、垂直速度场等, 时段为 1981~2019 年, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的扩展重建的月平均海温资料(版本 4), 时段为 1854~2019 年, 水平分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ 。

文中提到的西太平洋副热带高压脊线、西伸脊点指数[23] [24]由国家气候中心提供。其中将 10°N 以北 110°E ~ 150°E 范围内 588 dagpm 等值线所包围的副热带高压体内纬向风 $u = 0$, 且 $\partial u / \partial y > 0$ 的特征线所在纬度位置的平均值定义为脊线指数; 西伸脊点指数则用 90°E ~ 180° 范围内, 588 dagpm 最西格点所在的经度来表示。另外, 本文所选取的气候平均态均为 1981~2010 年, 夏季是指 6~8 月。

3. 2019 年我国夏季降水分布特征

根据国家气候中心绘制的降水距平百分率图(图 1)可以看出, 2019 年夏季中国旱涝特征明显, 结合孙林海等[25]的方法进行雨带划分, 属于第 IV 类雨型[21]。降水分布在空间上呈现一定的差异性, 即长江地区和江南华南地区的降水分布呈现反位相的特征, 多雨区主要集中在江南至华南以及东北地区, 少雨区主要位于长江以北地区。尤其是在江西中南部、浙江以及福建中北部地区, 降水比往年明显偏多; 而在我国西部地区, 新疆南部、内蒙古西部以及西藏西部地区的降水比往年偏多, 新疆北部、西藏南部以及云南降水比往年偏少。

4. 2019 年夏季江南降水偏多的成因分析

4.1. 上升运动

影响大型降水过程的影响因素主要有: 强烈的上升运动、稳定的环流形势、充沛的水汽供应和有利的地形。从图 1 的降水分布特征, 显然形成江南雨带的系统可能与行星锋区位置偏南有关。行星锋区的

北侧, 主要是来自西风带的冷气团, 而行星锋区的南侧则受与副热带高压相联系的暖气团影响。与行星锋区相联系的垂直运动存在两种方式: 锋面的强迫抬升运动和高空西风急流南侧辐散引起的对流上升运动。锋面强迫抬升引起上升运动的降水主要来自雨层云, 因此可以用 850 hPa 高度附近的垂直运动近似表示; 而夏季深厚对流的积雨云降水对应的垂直运动一般在 500 hPa 高度上量值比较大, 可以近似用 500 hPa 上的垂直运动表示。图 2 给出了 2019 年夏季 850 hPa 和 500 hPa 垂直速度的异常场。从图中可以看出, 在江南至华南地区, 垂直速度异常在 850 hPa 和 500 hPa 高度上均呈现负值, 即上升运动比多年平均偏强。对比图 2(a)和图 2(b)发现, 在季节时间尺度上, 2019 年夏季与江南雨带对应的行星锋区引起的强迫抬升上升运动(850 hPa 上的异常垂直速度)要比由高空西风急流南侧辐散导致的垂直对流上升运动(500 hPa 上的异常垂直速度)更加明显。图 2(a)中的上升运动分布特点与降水异常的分布(图 1)大致相同, 根据锋生函数第二项垂直运动作用项, 可以认为, 锋面强迫抬升, 锋区偏强, 为降水提供了有利的条件, 是影响 2019 年雨带分布的主要因素。图 2(b)中与对流运动有关的上升运动与雨区分布也存在联系, 是导致 2019 年雨带分布特征的另一影响因素。

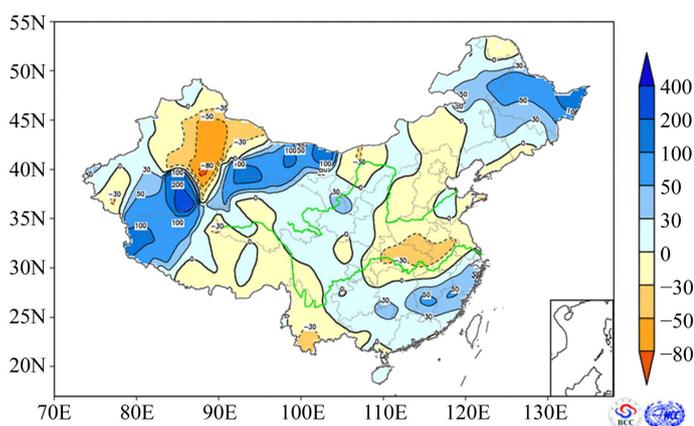


Figure 1. Percentage of Precipitation Anomaly in Summer of 2019 (unit: %) (quoted by the National Climate Center)

图 1. 2019 年夏季全国降水距平百分率分布图(单位: %) (引自国家气候中心)

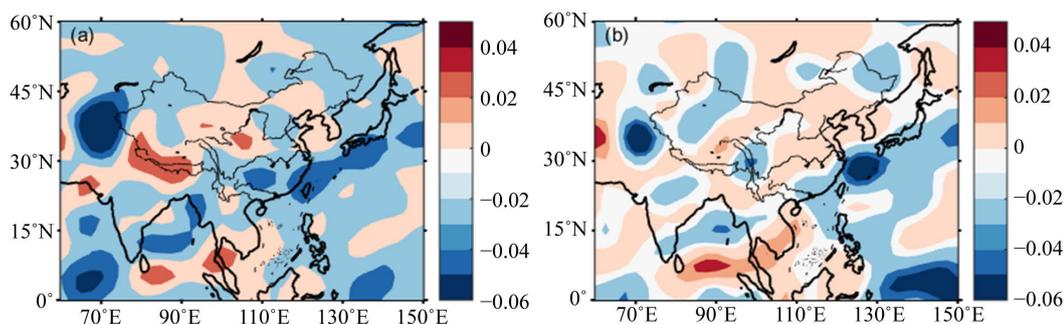


Figure 2. Distribution of (a) 850-hPa and (b) 500-hPa vertical velocity anomalies in summer of 2019 (unit: 10^{-3} Pa/s)

图 2. 2019 年夏季垂直速度异常场(a): 850 hPa; (b): 500 hPa (单位: 10^{-3} Pa/s)

图 3 是 2019 年夏季 200 hPa 和 850 hPa 涡度图, 图 4 是 2019 年夏季 200 hPa 和 850 hPa 散度图。图 3(a)显示, 江南地区明显处于负涡度控制范围内; 图 3(b)中, 江南地区正涡度数值较小。从图 4(a)中可以

看出, 江南地区在 200 hPa 高度上散度较小, 辐散较弱; 尽管在图 4(b)中, 低层 850 hPa 有明显的辐合, 但是由于低层辐合高层辐散的高低空配置没有明显地形成, 在该地区由对流作用产生的降水可能性不大。结合图 3 和图 4, 更能说明江南地区夏季降水异常主要是受到锋面抬升的作用, 与对流运动有关的上升运动较弱。

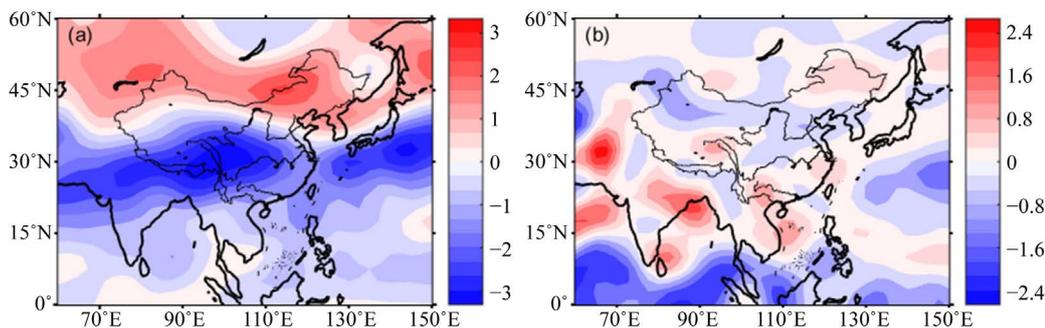


Figure 3. The distribution of (a) 200-hPa and (b) 850-hPa vorticity in summer of 2019 (unit: s^{-1})

图 3. 2019 年夏季涡度图: (a) 200 hPa; (b) 850 hPa (单位: s^{-1})

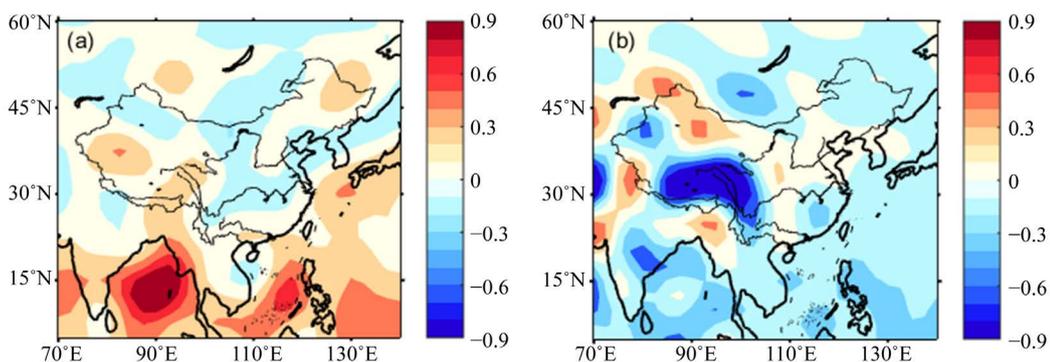


Figure 4. The divergence of (a) 200 hPa and (b) 850 hPa in summer of 2019 (unit: s^{-1})

图 4. 2019 年夏季散度图: (a) 200 hPa; (b) 850 hPa (单位: s^{-1})

4.2. 水汽条件

2019 年夏季 1000 hPa 至 500 hPa 垂直积分的水汽通量及散度如图 5 所示。从图中可以明显看出, 西太平洋副热带高压西侧的偏南气流以及阿拉伯海、孟加拉湾及南海等地区的西南气流引导水汽输送至江南地区, 且该地区水汽通量散度呈现负值, 水汽通量有明显的辐合, 为降水提供了有利的条件。

4.3. 中高纬度环流异常的影响

图 6 给出了 2019 年夏季影响中国的异常大气环流分布。从图 6(a)中看出, 200 hPa 西风急流异常, 在江南地区主要是异常的西北风, 西风急流偏强, 表明锋区位置比较偏南, 且锋区强度偏强。在高空西风急流的南侧, 高空对应反气旋式的涡度和辐散(图 3(a)和图 4(a))。500 hPa 距平风场(图 6(b))显示, 江南地区主要受西北气流的影响, 来自高纬度的冷空气增强了冷气团的势力, 将行星锋区推进至江南地区。结合 200 hPa (图 6(a))和 850 hPa (图 6(c))距平风场图来看, 2019 年夏季存在着一个自东南南部, 环渤海、黄海, 直到江南和日本以东的, 明显的异常气旋性环流。这个具有近正压结构的异常气旋式环流是影响行星锋区位置偏南的直接系统。从对流层高层到低层, 异常气旋中心西侧的西北、偏北和东北气流将来

自北极地区的冷空气输送到江南, 是造成行星锋区位置异常偏南, 高空西风急流异常偏强的最直接因素。尤其在对流层的低层, 异常气旋性环流使得来自海上的暖湿气流减弱, 不利于大气垂直层结出现不稳定。考虑到季节尺度的平均已经基本滤去了天气尺度系统的影响, 因此导致季节尺度异常气旋性环流形成的因素可能与行星尺度大气波动的异常有关。

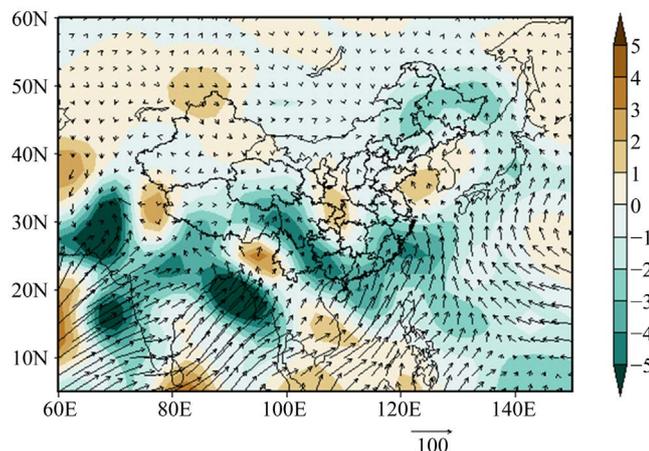


Figure 5. Vertical integration of water vapor flux (vector, unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence (shaded, unit: $10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) from 1000 hPa to 500 hPa in summer of 2019

图 5. 2019 年夏季 1000 hPa 至 500 hPa 整层积分的水汽通量(箭头, 单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)及散度(阴影, 单位: $10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

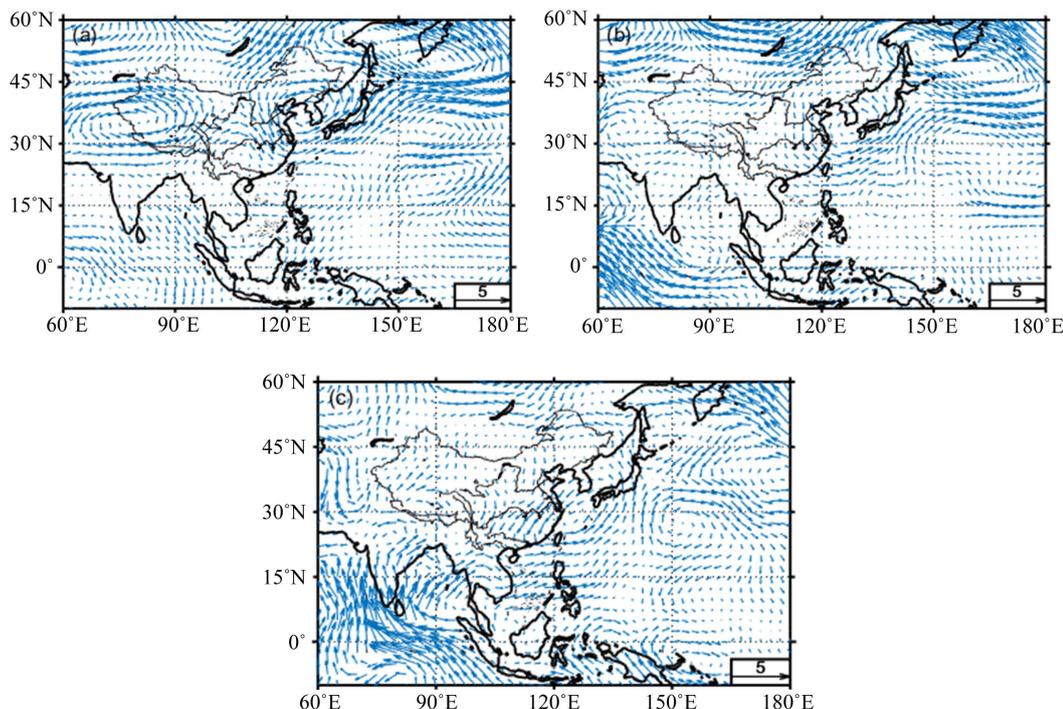


Figure 6. The distribution of (a) 200-hPa, (b) 500-hPa and (c) 850-hPa wind anomalies in summer of 2019 (unit: m/s)

图 6. 2019 年夏季距平风场(a): 200 hPa; (b): 500 hPa; (c): 850 hPa(单位: m/s)

根据 2019 年夏季 500 hPa 位势高度及其距平场(图 7), 可以说明锋区北侧冷空气在行星尺度波动的角

度上对江南地区夏季降水偏多的影响。在 500 hPa 季平均时间尺度的位势高度场及其异常场上, 欧亚地区中高纬度主要表现为“两槽一脊”的环流形势, 亚洲中部中高纬度地区有一明显的高压脊存在, 500 hPa 位势高度距平场呈现“-+-”的分布特征, 乌拉尔山和鄂霍次克海均为负距平, 贝加尔湖地区呈现明显的正距平分布, 位势高度偏高, 中心数值可达 100 dagpm 左右。我国东部地区基本处于高压脊前, 受到贝加尔湖高压脊前西北气流的控制, 高纬度较冷的空气可以被输送至江南地区。

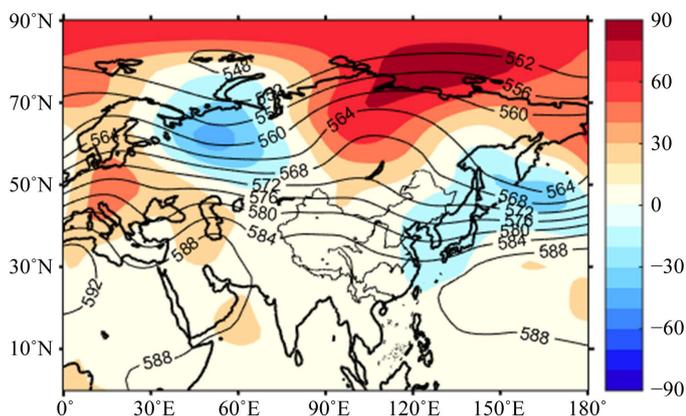


Figure 7. The distribution of 500-hPa geopotential height (contours) and its anomalies (shading) in summer of 2019 (units: dagpm)

图 7. 2019 年夏季 500 hPa 位势高度场(等值线)及其距平场(阴影) (单位: dagpm)

由于行星尺度波动相对变化缓慢, 季节时间尺度的平均异常流场可能保留比较多的行星尺度波动影响。图 8 给出了两个候平均时段的 500 hPa 位势高度场。从图 8 中看出, 行星尺度的环流形势与图 7 大致相同, 在贝加尔湖附近有一高压脊存在, 在脊前的一冷涡对应图 6 中异常气旋式环流的存在。也就是说, 2019 年夏季中高纬度的异常信号是多个类似的行星尺度波动共同累加的结果。

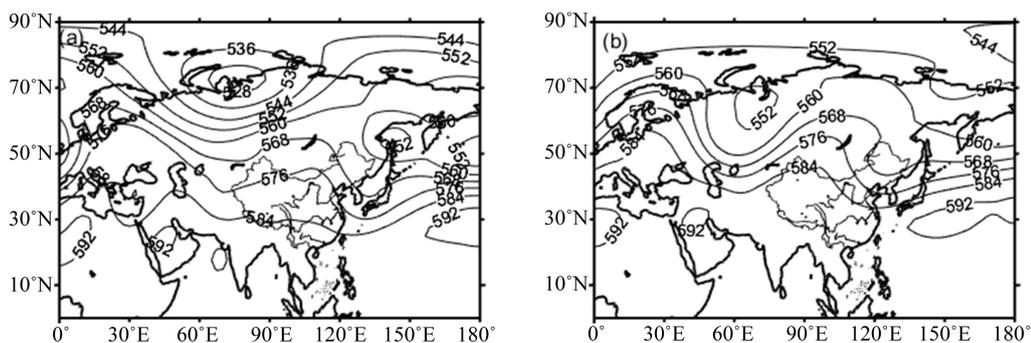


Figure 8. The distribution of 500-hPa geopotential height in the 3rd pentad of June and the 6th pentad of August, 2019 (units: dagpm)

图 8. 2019 年 6 月第 3 候, 8 月第 6 候 500 hPa 位势高度场(单位: dagpm)

鉴于夏季风环流背景下, 热带异常对流可以激发向高纬度传播的 PJ 波列, 绘制了 2019 年夏季异常 OLR 场的分布(图略)。由于缺少明显的可以激发球面 Rossby 波的异常强对流激发源, 因此环渤、黄海上空的异常气旋性环流受来自热带波动信号的影响不大。

考虑到异常气旋性环流有很大部分位于高空西风急流的纬度带内, 因而又考察了沿高空西风急流的

遥相关波列的影响。根据图 6(a)及北半球 200 hPa 环流异常(图略), 异常气旋性环流受沿急流传播“遥相关”波列信号的影响也不明显。因此, 环渤、黄海上空的季节性异常气旋式环流主要受行星尺度波动的影响形成。引导冷空气南下的中亚高压脊的形成和持续, 对行星锋区偏向江南有直接的影响。综上, 中亚高压脊的存在应当是造成 2019 年夏季江南降水偏多的最重要的大气环流系统。

4.4. 低纬度环流异常的影响

雨带的位置和强度主要是受到行星锋区位置和强度的影响。在行星锋区的南侧, 主要是西太平洋副热带高压等热带系统的影响。图 9 是 2019 年西太平洋副热带高压强度指数的逐月变化。图 9 显示, 在 2019 年夏季西太平洋副热带高压强度均强于多年平均值, 尤其是在 6 月份, 副高强度指数明显偏高; 图 10 表示的是 2019 年逐月西太平洋副热带高压脊线相对于多年平均位置的南北偏移情况, 从图 10 可以看出, 副高脊线位置在 4 月份大致与往年相同, 5 月份位置与多年平均相比有所南移, 处于较南的纬度, 6、7 月份又有所北移, 但与多年平均相比位置仍然较为偏南。综上所述, 2019 年夏季西太平洋副热带高压强度偏强, 位置偏南。

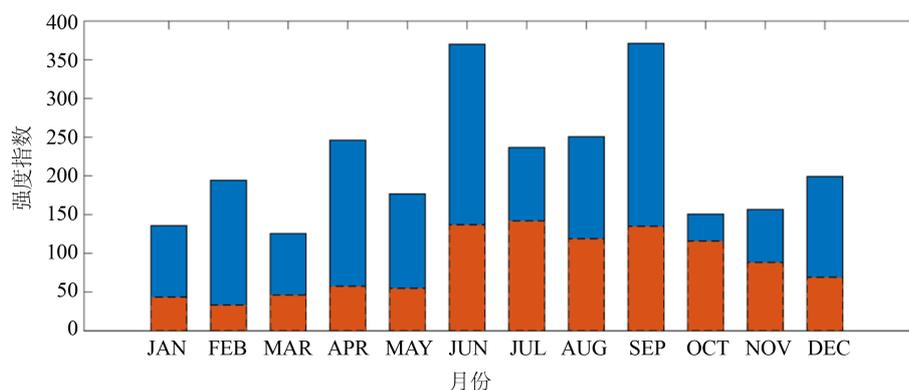


Figure 9. The variations of the intensity of the western Pacific subtropical high in 2019 (Orange: Multi-year average)

图 9. 2019 年西太平洋副热带高压强度指数的逐月变化(橙色: 多年平均)

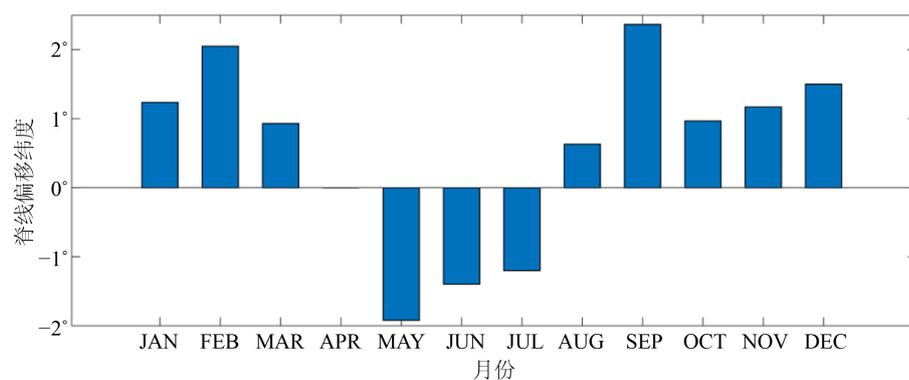


Figure 10. Monthly north-south excursion of the western Pacific subtropical ridge in 2019 (Positive: northward; Negative: southward)

图 10. 2019 年逐月西太平洋副热带高压脊线的南北偏移(正值: 北移; 负值: 南移)

参照美国国家气象局气候预测中心(CPC)提供的 Niño 3.4 区海温距平的 3 个月滑动平均值(Niño 3.4 指数)(图 11), 发现从 2018 年 9 月到 2019 年 6 月, 连续 6 个月 Niño 3.4 指数均达到 0.5°C 及以上, 因此

2019 年是厄尔尼诺事件的衰减年。由于热带西太平洋的暖水东移, ITCZ 位置偏南, 导致副热带高压位置偏南。

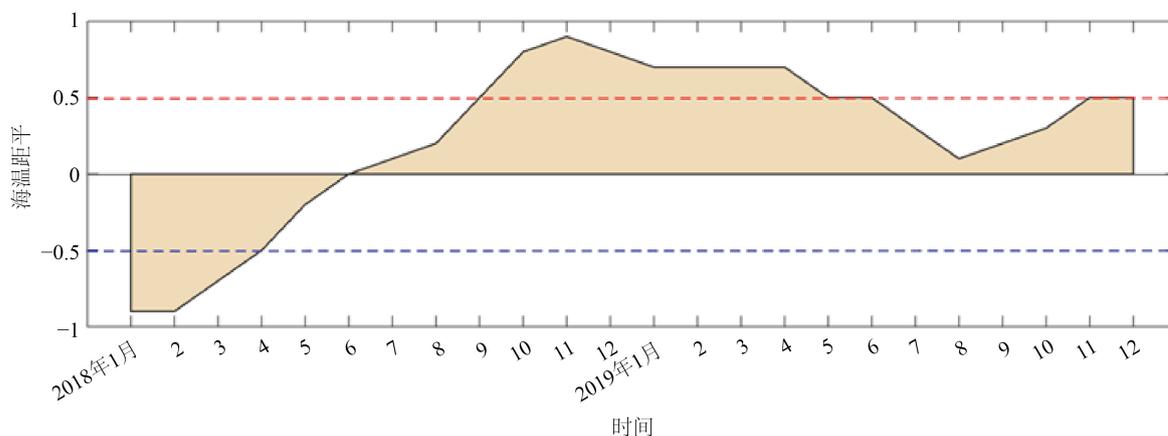


Figure 11. 3-month moving average of SST anomaly in Niño 3.4 area from 2018 to 2019 (Niño 3.4 index)

图 11. 2018~2019 年 Niño 3.4 区海温距平的 3 个月滑动平均值(Niño 3.4 指数)

由于厄尔尼诺事件的衰减年雨带一般出现在长江流域, 因此 2019 年的江南雨带偏强与受东部型厄尔尼诺事件衰减年的分布差别较大。从 2019 年夏季全球海表面温度异常(图 12)可以明显看出, 印度洋西侧海温处于异常偏暖的状态, 东侧海温异常偏冷, 属于典型的印度洋偶极子正位相分布。根据林大伟等[26]的研究, 当赤道中东太平洋海温异常随时间演变表现为冬春 El Niño 衰减型, 且印度洋偶极子呈现正位相时, 会减弱东亚夏季风, 使得西太平洋副热带高压位置更加异常偏南。

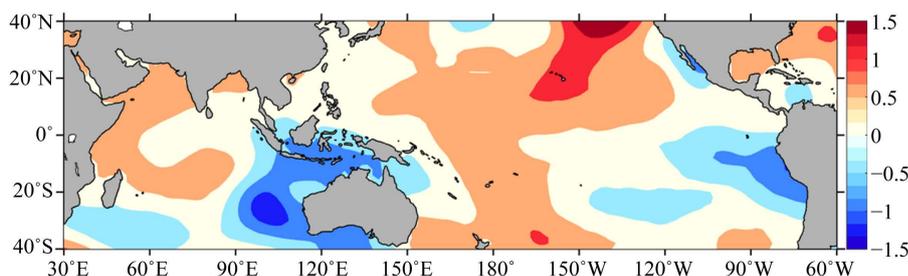


Figure 12. The distribution of SST anomalies in summer of 2019 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

图 12. 2019 年夏季全球海表面温度异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)

5. 结论和讨论

本文通过对 2019 年我国夏季降水的大气环流状况和热带对流情况进行分析, 探讨了 2019 年夏季我国江南降水异常偏多的原因, 主要结论概括如下:

(1) 2019 年夏季中国雨带位置偏南和行星锋区位置偏南、强度偏强有很大的关系。根据地面锋线与高空锋区的关系, 用 200 hPa 西风急流的异常来判断锋区的位置和强度, 在江南地区 200 hPa 为西北风异常, 偏西分量明显, 西风急流加强, 即锋区位置偏南, 强度偏强。

(2) 2019 年夏季江南降水主要由锋面抬升作用引起。由于低层 850 hPa 异常环流减弱了来自海上的暖湿气流, 不利于大气垂直层结不稳定状态的出现, 因此造成 2019 年夏季江南地区降水的垂直运动主要受锋面抬升的影响, 对流性降水的比重比常年偏小。

(3) 行星锋区位置偏南的一个原因是中高纬度的影响。在 2019 年夏季 500 hPa 一直维持着“两槽一脊”的环流形势, 位于贝加尔湖附近高压脊脊前的西北气流偏强, 高纬度较冷的空气被输送至江南地区, 有利于降水偏南, 使雨带稳定维持在江南地区。

(4) 行星锋区位置偏南还与西太平洋副热带高压位置的异常偏南有关。受 El Niño 衰减阶段和印度洋偶极子正位相的共同影响, 东亚夏季风异常偏弱, 西太平洋副热带高压位置异常偏南。

对中国夏季雨带位置和强度的预测是短期气候预测的重要内容, 也是气候预测的一个难点问题。本文重点对 2019 年夏季雨带位置偏南的原因进行了分析, 深入了解了大气环流异常对汛期气候的影响。由于篇幅所限, 引导冷空气南下的中亚高压脊形成的前期海温异常特征及可能的影响机理将另文讨论。除此之外, 下一步还计划对其它年份进行研究分析, 归纳总结我国多年夏季雨带位置的分布特点以及对应的原因, 为短期气候预测提供一定的应用参考。

基金项目

本文资助课题为国家自然科学基金重点项目(41430963)。

参考文献

- [1] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 周连童. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 730-743.
- [2] 孙林海, 陈兴芳. 南涝北旱的年代气候特点和形成条件[J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 641-647.
- [3] 吴荷, 陈海山, 黄菱芳. 欧亚中高纬春季地表感热异常与长江中下游夏季降水的可能联系[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 119-128.
- [4] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119-134.
- [5] 李维京. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象, 1999, 25(4): 20-25.
- [6] Nakazawa, T. (2001) Suppressed Tropical Cyclone Formation over the Western North Pacific in 1998. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **79**, 173-183. <https://doi.org/10.2151/jmsj.79.173>
- [7] 刘芸芸, 丁一汇. 西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1225-1237.
- [8] 况雪源, 张耀存. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 382-389.
- [9] 叶许春, 许崇育, 张丹, 李相虎. 长江中下游夏季降水变化与亚洲夏季风系统的关系[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1174-1182.
- [10] 彭加毅, 孙照渤, 倪东鸿. 春季赤道东太平洋海温异常与东亚夏季风的关系[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(3): 385-390.
- [11] 苗秋菊, 徐祥德, 张雪金. 长江中下游旱涝的环流型与赤道东太平洋海温遥相关波列特征[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 687-697.
- [12] 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 倪东鸿. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 835-846.
- [13] 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 李崇银. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 484-502.
- [14] 闵锦忠, 孙照渤, 曾刚. 南海和印度洋海温异常对东亚大气环流及降水的影响[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(4): 532-548.
- [15] Karumuri, A., Zhao, Y.G. and Toshio, Y. (2001) Impact of the Indian Ocean Dipole on the Relationship between the Indian Monsoon Rainfall and ENSO. *Geophysical Research Letters*, **28**, 4499-4502. <https://doi.org/10.1029/2001GL013294>
- [16] 李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. 大气科学, 2001, 25(4): 433-443.
- [17] 李崇银, 肖子牛. 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟——II: 对欧亚中高纬“寒潮”异常的响应[J]. 大气科学, 1993, 17(5): 523-531.

-
- [18] Wu, B.Y., Yang, K. and Zhang, R.H. (2009) Eurasian Snow Cover Variability and Its Association with Summer Rainfall in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **26**, 31-44. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-0031-2>
- [19] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. 气象学报, 2003, 61(5): 559-568.
- [20] 解晋, 周宁芳. 2019年7月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1494-1500.
- [21] 丁婷, 高辉. 2019年夏季东亚大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 2020, 46(1): 129-137.
- [22] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., et al. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
- [23] 刘芸芸, 李维京, 艾(子兑)秀, 李清泉. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 2012, 23(4): 414-423.
- [24] Liu, Y.Y., Liang, P. and Sun, Y. (2019) The Asian Summer Monsoon: Characteristics, Variability, Teleconnections and Projection. Candice Janco, Cambridge, 233-237.
- [25] 孙林海, 赵振国, 许力, 陈国珍, 李维京, 王永光, 等. 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, 2005, 16(z1): 56-62.
- [26] 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威. 夏季中国华北降水、印度降水与太平洋海表面温度的耦合关系[J]. 大气科学, 2018, 42(6): 1175-1190.