

粤东暴雨中心前汛期降水异常的环流特征及前兆性信号分析*

李明华^{1,2}, 李超^{1,2,4}, 陈芳丽³, 郑群峰^{1,4}, 陈潜^{1,4},
张超^{1,4}, 赵春阳^{1,4}, 周佐欢¹

- (1. 深圳市气象局(台), 广东 深圳 518040;
2. 深圳南方强天气研究重点实验室, 广东 深圳 518040;
3. 惠州市气象局, 广东 惠州 516001;
4. 深圳市国家气候观象台, 广东 深圳 518040)

摘要: 研究了 1967~2018 年粤东暴雨中心前汛期降水的年际变化, 以及降水异常对应的环流异常特征, 并对降水异常的前兆性信号特征进行分析。研究表明: 1990 年以后粤东暴雨中心前汛期降水年际变率增强, 2005 年以后降水偏多年异常增多。降水异常年的环流特征差异显著, 偏多年对流层中上层高空急流增强, 副热带高压范围偏大西脊点偏西, 东亚大槽偏深, 江南地区偏南风减弱, 有利于粤东辐合增强; 偏少年高空急流减弱位置偏北, 副热带高压范围偏小, 大陆高压增强, 底层我国东部地区偏南风一致减弱, 不利于粤东辐合。降水偏多(偏少)年的前兆性信号主要表现为极地海冰偏少(偏多)以及赤道东太平洋暖(冷)海温异常。进一步研究表明, 高空急流以及东亚大槽和前期极地海冰异常有关, 而副热带高压和前期赤道东太平洋海温有关。

关键词: 前汛期降水; 高空急流; 副热带高压; 极地海冰; 赤道东太平洋海温; 粤东暴雨中心

中图分类号: P448 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2020)05-0113-13

On the circulation feature of early rainy season and its precursors in storm center of eastern Guangdong

LI Minghua^{1,2}, LI Chao^{1,2,4}, CHEN Fangli³, ZHENG Qunfeng^{1,4}, CHEN Qian^{1,4}, ZHANG Chao^{1,4},
ZHAO Chunyang^{1,4}, ZHOU Zuohuan¹

- (1. Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China;
2. Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen 518040, China;
3. Meteorological Bureau of Huizhou, Huizhou 516001, China;
4. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

Abstract: The interannual variation of early rainy season precipitation over the storm center of eastern Guangdong from 1967 to 2018, and the association with the large-scale atmospheric circulation characteristics and the precursory oceanic conditions were analyzed in this present paper. The interannual variation has strengthened since 1990s. The years with rainfall amount above normal have occurred more fre-

* 收稿日期: 2020-02-19

基金项目: 广东省科技计划项目(2019B020208016, 2016A020223016, 2019A1515010814); 国家自然科学基金(91544102, 41405047); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-091)

作者简介: 李明华(1980年生), 男; 研究方向: 天气预报和环境气象; E-mail: hzqxlmh@qq.com

通信作者: 李超(1985年生), 男; 研究方向: 天气、气候诊断和统计分析; E-mail: lichao@weather.sz.gov.cn

quently since 2005. The circulation features were significantly between wet and dry years. The atmospheric conditions of enhanced upper-tropospheric jet, the larger subtropical high area than normal, the deepened East Asian trough, as well as the weakened southerly wind over Jiangnan area were favorable for the convergence over the storm center of eastern Guangdong in wet years. The atmospheric features of northward shift of upper-tropospheric jet, the smaller subtropical high area, strengthened continental high over East Asia, and consistent weakened southerly winds went against the convergence over the storm center of eastern Guangdong in dry years. The less (more) ice concentration in polar area and warm (cold) SST over eastern Pacific Ocean were the most significant precursors responsible for the precipitation anomalies. Further investigation showed the significant relation between ice concentration in polar area and upper-tropospheric jet, East Asian trough. On the other hand, the strong association between SST over eastern Pacific Ocean and subtropical high over western Pacific was also confirmed.

Key words: precipitation in early rainy season; upper-tropospheric jet; subtropical high; ice concentration in polar area; SST over eastern Pacific; rainstorm center of eastern Guangdong

华南汛期分为前汛期4~6月和后汛期7~9月两个阶段,前汛期降水占全年总降水的40%~50%,较后汛期降水偏多^[1]。前汛期主要是锋面降水和季风降水为主^[2],暴雨发生频次较高,“龙舟水”等前汛期强降水常引发城市积涝和地质灾害等,是人们关注和研究的重点之一。研究表明粤东地区是华南前汛期的3大暴雨中心之一^[3],粤东暴雨中心包括汕尾和揭阳等地区,同时有研究表明惠州东部也属于粤东暴雨中心区域^[4]。在全球变暖背景下,粤东前汛期暴雨降水量和日数均有增加趋势^[5]。该地区的惠东、汕尾和揭西、惠来、普宁和潮南等区县受莲花山等地形等因素影响易产生极端强降水^[4],该地区降水是影响华南防洪抗旱的重要因素;同时该地区是华南重要工农业生产基地之一,因此开展该地区前汛期降水研究具有重要意义。

以往有很多研究工作,将华南地区作为整体分析前汛期降水的年际变化特征和成因。华南前汛期降水的年际变化特征明显,2~4 a年际尺度周期最为显著^[6-7]。水汽输送是影响降水年际变化的直接因素,华南地区前汛期降水的水汽来源主要来自阿拉伯海的西风输送和西太平洋副高南侧东风的转向输送及孟加拉湾的西南风输送^[8-9],其中西太平洋副高南侧东风的转向经南海的水汽输送可能是影响华南地区降水年际变化的关键^[10]。水汽辐合异常和大气环流变化密切相关,马慧等^[6]研究指出副热带高压和南亚高压偏弱引起华南地区低层水汽辐合加强导致降水增多;李丽平等^[11]研究表明,对流层上层西风急流偏弱偏南也会造成华南地区降水异常偏多,反之降水偏少。大气

遥相关和持续性环流异常相关,也会造成降水持续异常^[12],陈锐丹等^[1]研究指出华南前汛期降水和东亚-太平洋遥相关型为显著正相关。MJO不同相位也可能通过Rossby波传播造成华南降水异常,如李文铠等^[13]和章丽娜等^[14]研究指出华南前汛期降水偏多和MJO的2~3位相有关,降水偏少则和MJO的6~7位相有关。

许多研究表明前期海温等外强迫因子可以通过大气环流异常,特别是持续性环流异常如大气遥相关型对降水造成影响。邓立平和王谦谦^[7]研究指出华南前汛期降水和西太平洋暖池北部海温呈负相关。伍红雨和吴遥^[15]研究指出中等及以上强度东部型厄尔尼诺事件次年,高层西风急流明显加强,东亚大槽增强,低层菲律宾以东存在反气旋异常环流,华南存在南北风的交汇和水汽辐合加强,有利于华南前汛期降水偏多;弱等级的东部型以及中部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期降水偏少。蔡学湛^[16]研究指出青藏高原前冬多雪时,华南前汛期降水偏多。

以上研究主要针对华南整体前汛期降水,华南前汛期降水存在明显区域性特征,粤东和华南西部反相变化是前汛期降水年际变化的重要模态^[17],说明粤东前汛期降水有一定独有特征。黄忠等^[18]分析指出2007年6月粤东持续性暴雨是东路冷空气和从西南地区不断东南移短波槽和低涡共同作用下产生的。任文斌等^[19]研究指出季风槽的缓慢北抬是影响2011年6月15~17日暴雨发生的直接系统。以上研究主要从天气角度分析了粤东前汛期的暴雨天气过程,未对粤东暴雨中心的前汛期降水的年际变化及成因进行系统分析。相

比整个华南地区, 影响粤东暴雨中心降水的大气环流以及前期外强迫因子有何不同?

本文将针对粤东暴雨中心前汛期降水年际变化进行研究, 包括粤东地区降水异常的大气环流特征, 粤东暴雨中心降水异常的前期外强迫等影响因素, 以及外强迫影响粤东暴雨中心降水的物理机制。

1 数据和方法

本文采用的数据资料主要包括:

1) 降水资料选用粤东暴雨中心7个国家基本站(图1)日值资料, 7个国家基本站分别为惠州惠东, 汕尾市汕尾、海丰和陆丰, 揭阳市揭西、惠来和普宁, 资料起止时间为1967年1月~2018年12月。降水日值资料为北京时间20时~20时累计降水量作为逐日降水, 本文分析中将4~6月7站平均作为粤东暴雨中心前汛期降水量。

2) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心发布的NCEP1再分析资料^[20], 使用1967~2018年共52a的月平均再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从1000 hPa到10 hPa, 分析

要素包含高度场 z 、水平风场 u 和垂直速度 w , 并由水平风场计算得到了水平散度 d , 其中垂直速度单位为Pa/s, 垂直速度为负时表示上升运动, 为正时表示下沉运动。

3) 英国气象局哈德莱中心发布海表温度和海冰密集度资料^[21], 空间分辨率均为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 资料时间从1870年至今, 本文研究中使用1967~2018年时段资料进行分析。在全球变暖背景下, 海温有明显升高趋势, 而海冰有明显减少趋势。为了讨论海温海冰对粤东前汛期降水年际变化的影响, 本研究中对海温海冰资料进行了去趋势处理。

4) 美国国家海洋和大气管理局发布的Nino1+2指数, 该指数使用 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}S$, $90^{\circ}W \sim 80^{\circ}W$ 区域平均海温异常表示ENSO活动特征。

根据以往研究结果, 本文选用4~6月作为前汛期时段进行分析^[22]; 研究方法包含合成分析和回归分析, 分析结果使用student's方法检验显著性水平。本文中使用的气候平均态定义1967~2018年共52a平均, 距平为对气象要素该气候平均态的差值。

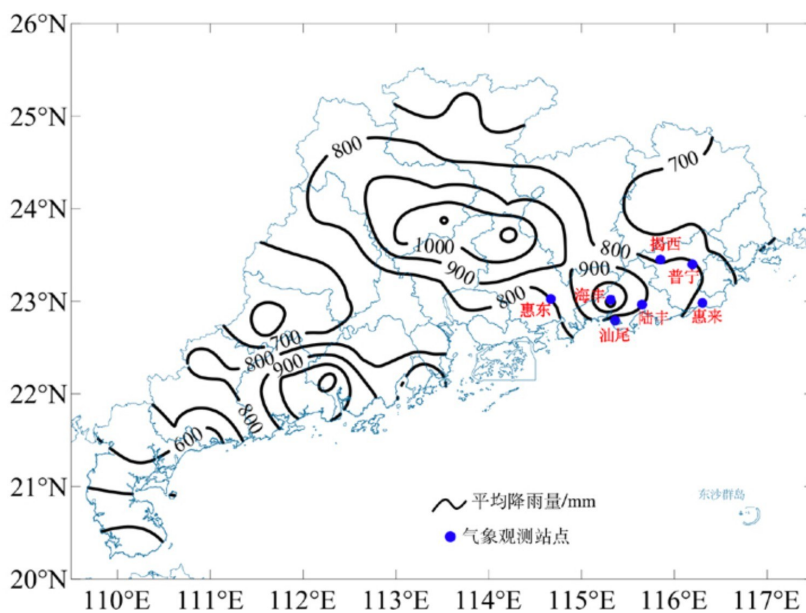


图1 广东前汛期气候平均降水量和粤东暴雨中心7个站点分布

Fig. 1 Climatology of pre-rainy season mean rainfall and spatial distribution of 7 surface meteorological stations in the rainstorm center of eastern Guangdong

2 粤东暴雨中心前汛期降水的年际变化特征

粤东暴雨中心位于华南地区东部, 受不同纬度天气系统相互作用影响, 降水量具有明显的年

际变化特征。图2a是粤东暴雨中心前汛期(4~6月)降水量的逐年变化, 粤东暴雨中心前汛期气候平均降水量876.0 mm, 标准差为246.9 mm。利用功率谱分析方法, 计算粤东暴雨中心前汛期降水不同时间尺度变化在总方差所占比重, 其中年

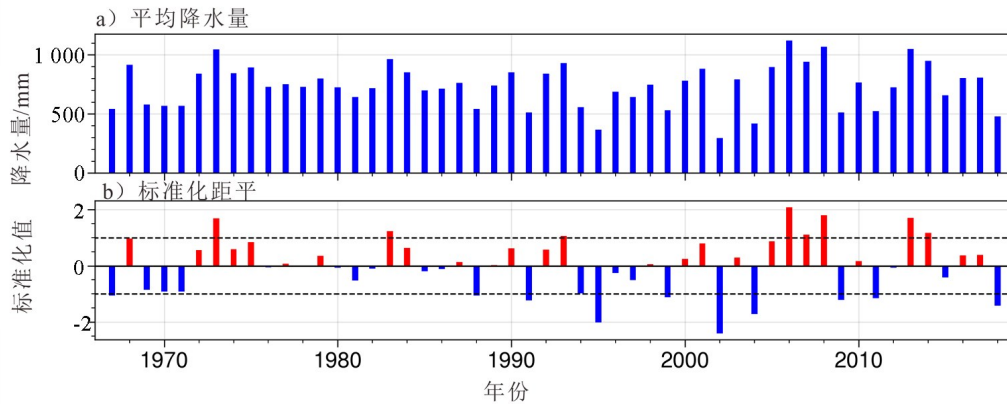


图2 粤东暴雨中心地区4~6月平均降水量和标准化距平

Fig. 2 Time series and associated normalized anomalies of April–June mean rainfall in the storm center of eastern Guangdong

际变化 (1~9 a) 方差占总方差的 82.6%，年代际 (10年及以上周期) 占总方差 17.4%，说明粤东暴雨中心前汛期降水年际变化最为显著。由降水计算标准化距平时间序列 (图 2b) 可见，1990 年前降水异常年发生较少，仅有 1967、1968、1973 和 1983 年降水异常值绝对值大于一个标准差，1976~1987 年降水波动很小，降水异常值在零值附近。1990 年以后，降水异常年明显增加，表明近年来

粤东暴雨中心地区前汛期降水年际变化增强，有必要针对粤东暴雨中心前汛期降水年际变化进行研究。由逐年降水距平的绝对值大于 1 个标准差的年选为粤东暴雨中心前汛期降水异常年 (表 1)。降水偏多年平均降水量为 1 243.6 mm，较气候平均偏多 42.0%；降水偏少年平均降水量为 526.0 mm，较气候平均偏少 40.0%，降水偏多年与偏少年的降水量差异是非常明显的。

表 1 粤东暴雨中心 4~6 月降水异常年

Table 1 Apr–Jun precipitation anomalous years over the storm center of eastern Guangdong

项目	粤东前汛期降水异常年
降水偏多年	1968, 1973, 1983, 1993, 2005, 2006, 2007, 2008, 2013, 2014
降水偏少年	1967, 1994, 1995, 1999, 2002, 2004, 2009, 2011

3 大气环流特征

降水异常往往是由不同高度诸多环流系统共同作用结果^[23]，本文将分别从 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 等不同高度层讨论影响粤东暴雨中心前汛期降水异常的关键环流。4~6 月 200 hPa 南亚高压尚未完全建立，这一时段高空急流的强度以及位置经向变化是影响降水的重要因素。图 3 是根据粤东暴雨中心降水异常年合成的 200 hPa 纬向风场及水平散度分布，从合成的 200 hPa 纬向风可以看到，降水偏多年 (图 3a) 和偏少年 (图 3c)，200 hPa 急流中心位置较为接近，均位于 35°N, 140°E 附近，粤东暴雨中心位于 200 hPa 高空急流入口区右侧。降水偏多年急流中心纬向风速超过 43 m/s，较降水偏少年急流中心风速 (约 40 m/s) 偏强，广东上空 200 hPa 纬向风速在 20 m/s 左右，而降水偏少年广东上空纬向风速仅为 16 m/s 左右。降水多寡

年高空急流差异特征在距平场上更加明显，日本南侧到粤东地区北侧为显著的纬向风正距平，距平中心值超过 3 m/s。受加强的高空急流影响，急流入口区右侧的粤东暴雨中心高空为明显加强的辐散环流 (图 3a 阴影)，有利于上升运动和降水加强。降水偏少年 (图 3d)，急流中心北侧为显著的纬向风负距平，距平中心值约为 -2 m/s，急流中心南侧为纬向风负距平，粤东暴雨中心北侧纬向风减弱。减弱高空急流使得粤东暴雨中心上空为负的散度距平 (图 3c 阴影)，说明高空辐散环流减弱，不利于粤东地区上升运动和降水加强。

粤东暴雨中心地区降水多寡年 500 hPa 环流差异也非常明显 (图 4)。降水偏多年东亚地区 500 hPa 距平场自南向北呈现“正-负-正”波列，低纬度为显著正高度距平 (图 4b)，对应高度场上表现为南海上 600 dagpm 等高线异常西伸 (图 4a)，有

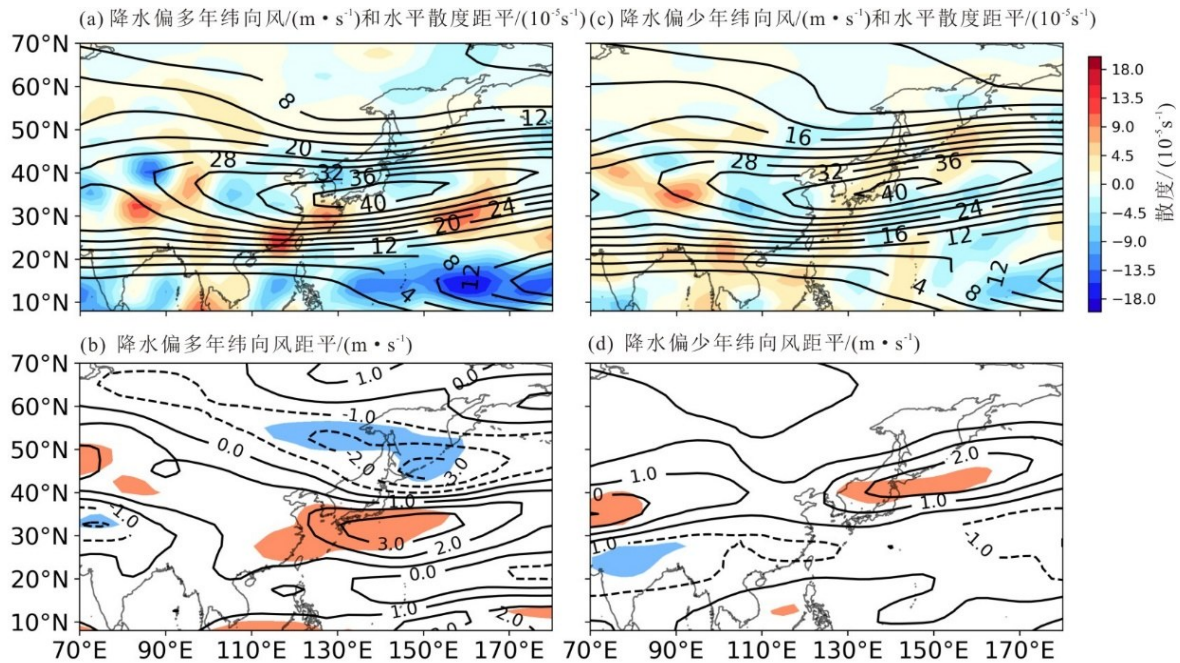


图3 降水多寡年 (a, c) 200 hPa 纬向风(等值线)和水平散度距平(阴影)分布以及 (b, d) 200 hPa 纬向风距平分布; (b, d) 中阴影为超过90%信度水平的显著性检验

Fig. 3 Composites of (a, c) 200 hPa zonal wind (contours) and horizontal divergence (shadings), and (b, d) zonal wind anomalies (contours) for precipitation anomalous years, shadings in (b, d) are the areas significant above the 90% confidence level

利于副热带高压西侧的西南气流加强; 中纬度 500 hPa 高度场上东海上空为东亚大槽, 而该区域为显著负高度距平, 中心超过 -2 dagpm , 东海上空的负高度说明了东亚大槽加深, 有利于槽后偏北风或偏北风异常维持。东亚大槽后部偏北风加强和副热带高压西侧西南风共同作用辐合增强, 导致粤东地区受较强垂直速度负距平中心控制 (图 4a 阴影), 有利于粤东暴雨中心上升气流的加强。降水偏多年东亚地区自低纬到高纬 500 hPa 分别为“正-负-正”高度距平分布, 这和东亚-太平洋遥相关型 (EAP) 正位相比较为一致, 有研究表明华南降水年代际偏多和 EAP 正位相相联系^[1, 11], 以上结果说明粤东暴雨中心前汛期降水偏多的环流特征和华南降水年代际偏多一致。降水偏少年和偏多年 500 hPa 高度场呈现了非对称分布特点, 降水偏少年我国大部地区受 500 hPa 正高度距平控制, 正高度距平中心位于贝加尔湖附近, 距平中心值超过 2 dagpm , 500 hPa 正高度距平说明大陆高压加强, 加强的大陆高压不利于粤东暴雨中心地区上升运动加强 (图 4c 阴影)。

对流层低层环流是影响降水的直接因子, 图 5 给出粤东暴雨中心降水多寡年 850 hPa 风场及水平散度分布。从 850 hPa 风场 (图 5a 和图 5c) 看到,

降水偏多年和偏少年长江以南到华南地区均为偏南风。从风场距平图可见, 降水偏多年华南北部和西部地区均为显著北风距平 (图 5b), 说明了华南北侧和西部的偏南风是显著减弱的, 这和 500 hPa 上加深的东亚大槽是一致的, 粤东地区 850 hPa 经向风异常不明显; 华南东部沿海地区为明显的西南风距平, 这和 500 hPa 的低纬度显著的正高度距平是一致的。以上风场分布有利于粤东地区对流层低层水平风场辐合明显加强 (图 5a 阴影), 但不利于华南西部地区低层辐合, 这说明粤东暴雨中心降水偏多年的低层环流表现出一定独有特征。降水偏少年 850 hPa 风场距平分布上, 我国东部地区从东北地区到华南以及东南亚地区都是明显的北风距平, 且华南地区较华南北侧偏北风距平偏大, 这和 500 hPa 上大陆高压加强是基本一致的, 850 hPa 的风场距平分布不利于水汽向华南水汽输送, 整个华南地区低层风场呈现为辐散异常 (图 5a 阴影), 导致粤东等地区降水偏少。

4 前兆性信号

研究表明, 大气环流持续异常和前期外强迫因子有密切关系。其中海温和海冰是重要外强迫因子, 其对我国气温、降水分布以及年际变化有

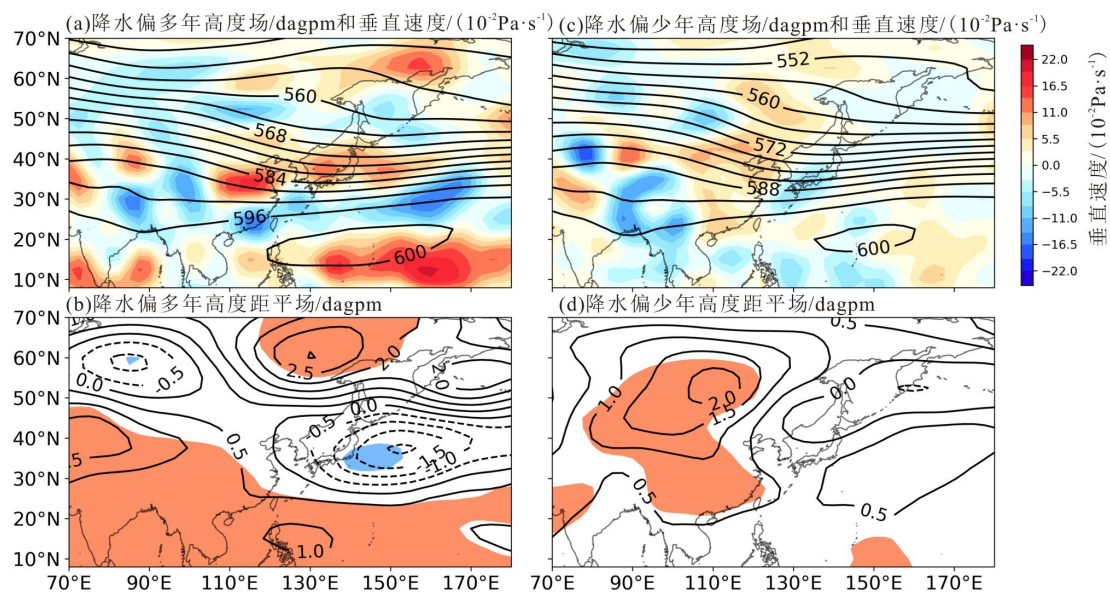


图4 降水多寡年(a, c) 500 hPa高度场(等值线)和垂直速度距平(阴影)分布;

(b, d) 500 hPa高度场距平(等值线)分布, (b, d) 中阴影为超过90%信度水平的显著性检验

Fig. 4 Composites of (a, c) 500 hPa geopotential height (contours) and vortical velocity (shadings), and (b, d) geopotential height anomalies (contours) for precipitation anomalous years, shadings in (b, d) are the areas significant above the 90% confidence level

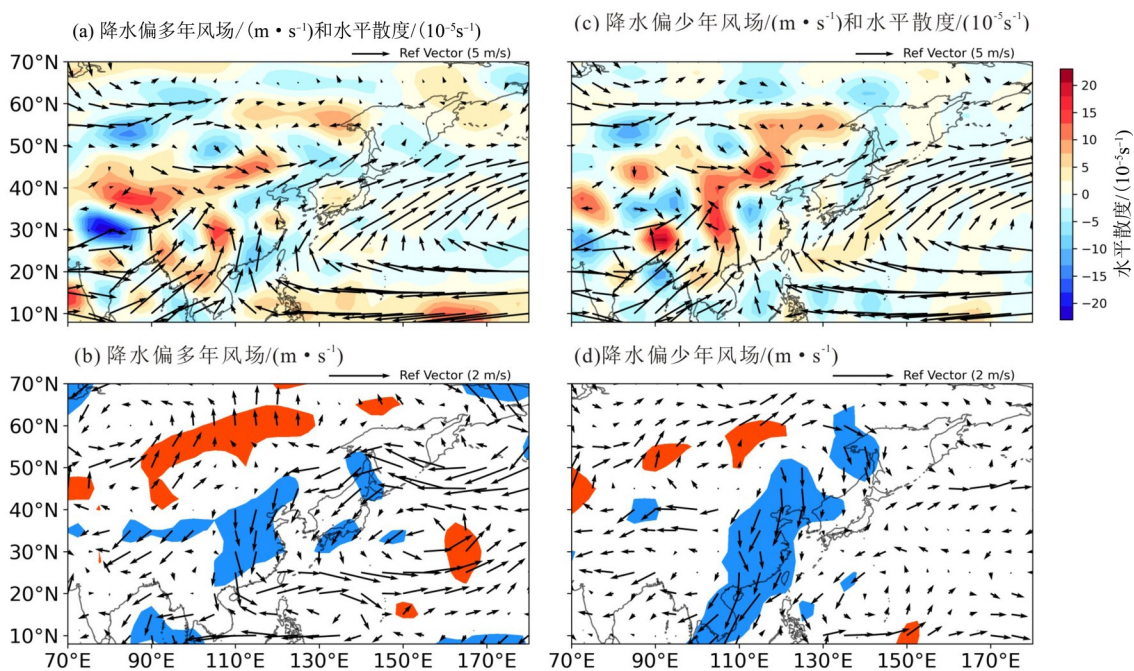


图5 降水多寡年(a, c) 850 hPa风场和水平散度分布和(b, d) 850 hPa风场距平, (b, d)中阴影为经向风异常超过90%信度水平的显著性检验

Fig. 5 Composites of (a, c) 850 hPa wind and horizontal divergence, (b, d) 850 hPa wind anomalies for precipitation anomalous years, shadings in (b, d) are the areas significant above the 90% confidence level for meridional wind anomalies

重要影响, 常作为预测降水变化的前兆性信号。

计算结果表明海温和海冰超前粤东暴雨中心降水2~4个月时信号表现最为明显, 我们给出了降水多寡年前汛期前期1~3月去趋势后的海冰密集度以及海温平均。由前期海冰差异分布(图6a)可见, 降水偏多年和降水偏少年海冰差异最为明显区域位于巴伦支海-喀拉海区域海冰(65°~85°N, 20°~60°E), 降水偏多年该海域海冰明显偏少; 而降水偏少年, 该海域海冰分布相反。使用前期1~3月巴伦支海-喀拉海海冰资料进行区域平均构建时间序列, 对4~6月200 hPa纬向风场以及500 hPa高度场进行回归(图7)。前期海冰回归的

200 hPa纬向风在我国东部地区从低纬度到高纬度分别呈现“正-负-正”带状分布。回归结果表明, 极地海冰偏少时空高200 hPa纬向风分布和降水偏多年200 hPa纬向风合成(图3b)是基本一致的, 热带地区和45°N以北地区的高纬度纬向风是显著减弱, 45°N以南到粤东北侧的纬向风是显著加强, 有利于粤东暴雨中心上升运动的加强。极地海冰偏多时, 热带地区和45°N以北地区的高纬度纬向风是显著加强, 粤东北侧的中纬度纬向风是显著减弱, 这和降水偏少年200 hPa纬向风合成(图3d)是基本一致的, 不利于粤东暴雨中心上升运动。

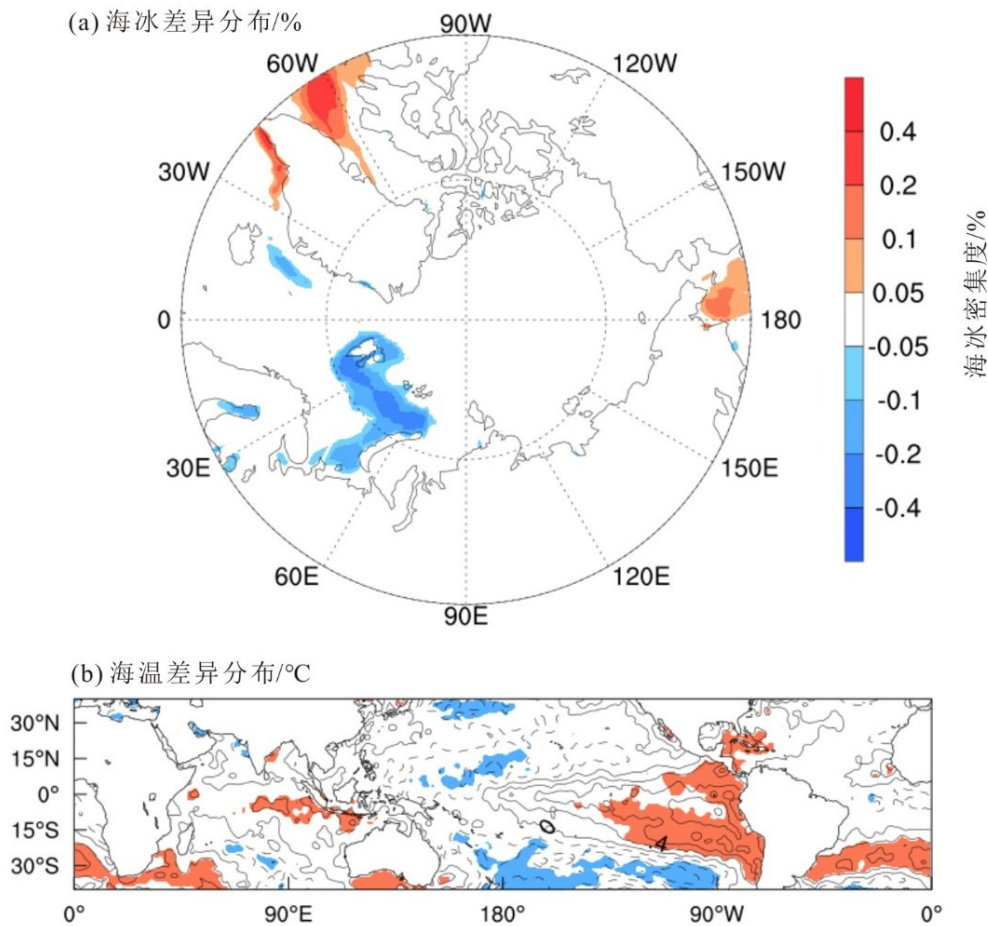


图6 降水多寡年同年1~3月极地海冰和海温差异分布(等值线)
(b) 中阴影为海温差异超过90%信度水平的显著性检验

Fig. 6 Difference of previous January–March mean ice concentration in north polar area, and sea surface temperature between wet and dry years, the shadings in (b) denote the difference exceeding 90% confidence level

图7b是前期海冰回归的500 hPa高度场分布, 我国东部均为为显著正距平异常, 中心位于内蒙古一带, 中心值超过80 dagpm, 低纬度华南沿海地区和东南亚地区也为显著正高度距平, 但异常

值相对较小; 日本南侧海上也为显著正高度距平。回归结果表明, 前期海冰偏少时, 日本南侧海上为显著负高度距平有利于东亚大槽加深, 这和粤东暴雨中心前汛期降水偏多的500 hPa中纬度环流

(图 4b) 特点一致, 而华南以及东南亚等低纬度地区为负高度距平, 这和降水偏多年 500 hPa 上低纬度显著的正高度距平并不一致, 说明华南沿海等低纬度的环流可能和其它外强迫有关。海冰偏多

时, 我国东部地区为大范围正高度距平代表大陆高压加强, 有利于粤东等地区低层偏北风距平加强, 这和降水偏少年的 500 hPa 环流 (图 4d) 特点是一致的。

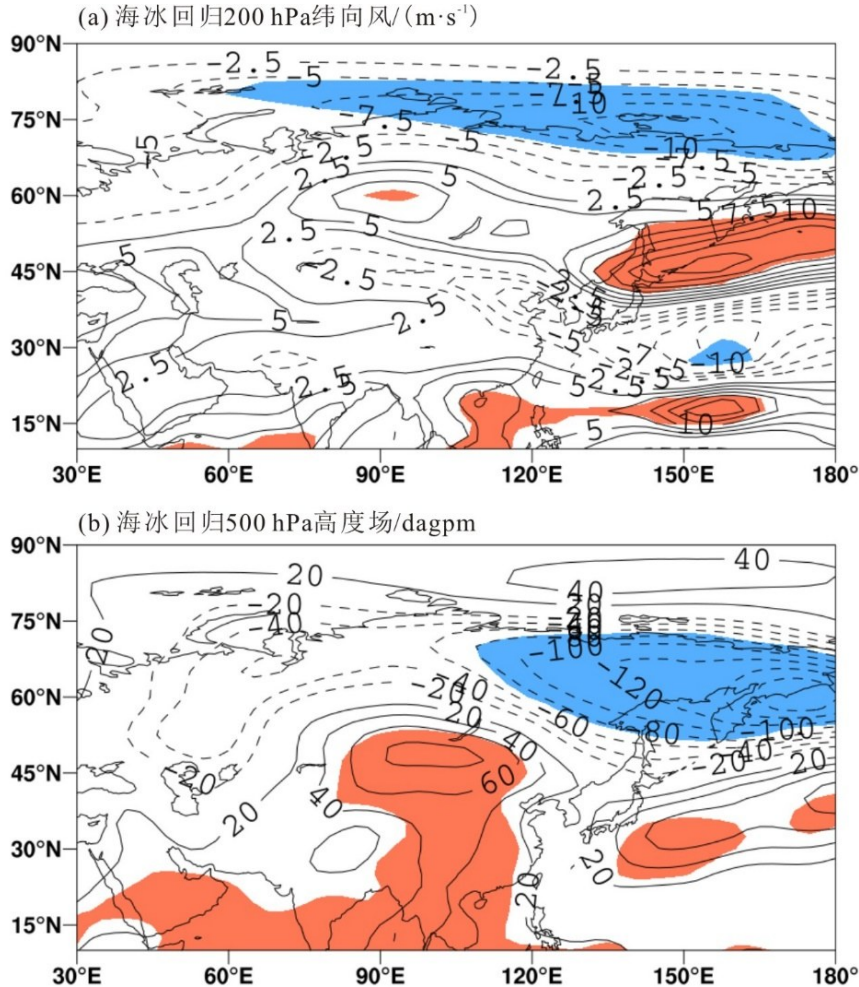


图 7 1~3月平均极地海冰回归的4~6月环流场分布
图中阴影为回归系数超过90%信度水平的显著性检验

Fig. 7 Regression maps of ensuring April-June circulation onto the previous January-March ice concentration in polar area
shadings denote areas exceeding 90% confidence level

外强迫异常改变局地环流, 通过 Rossby 波对下游环流和降水产生影响^[24]。为了进一步说明前期极地海冰异常和粤东暴雨中心降水关系, 利用如下公式计算了和位相独立的二维 Rossby 波活动通量 (WAF)^[25]:

$$WAF = \frac{1}{2|U|} \left\{ U(\psi_x^2 - \psi\psi_{xx}) + V(\psi_x\psi_y - \psi\psi_{xy}) \right\} \quad (1)$$

式中, ψ 为扰动流函数, 下标表示对 x 和 y 求偏导, U, V 分别为纬向和经向基流, 这里取 1967~2018 年气候态。WAF 矢量平行于 Rossby 波的群速度, 表示波能量的传播方向。由式 (1) 计算了前期 1

~3月极地海冰回归的4~6月的波作用通量分布 (图 8), 可以看到回归的流函数和 500 hPa 高度回归场是基本一致的 (图 7b), 极地海冰南侧为流函数的负异常中心, 同时也是重要的波源区, Rossby 波向东传播经过我国上空的流函数正异常区, 向东进一步传播到东北亚上空的流函数负异常区。由波作用通量的分布可见, 影响粤东暴雨中心降水的 500 hPa 环流特征可能和前期海冰异常有关。另一方面, 北太平洋高纬度有明显的 Rossby 波向中纬度传播, 中纬度地区为较为明显的波作用通量辐合区, 中纬度的波作用通量辐合有利于纬向

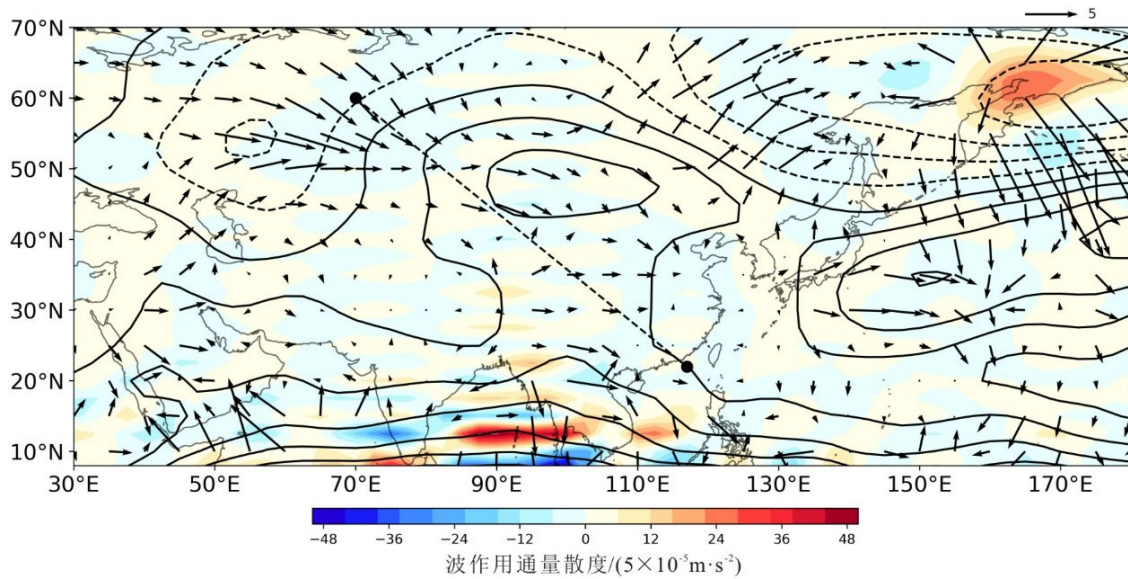


图8 前期1~3月极地海冰回归的4~6月500 hPa流函数(等值线)和波作用通量(矢量箭头)以及散度(阴影)

Fig. 8 Regression maps of ensuring April–June mean 500 hPa streamfunction (contours) and TN flux (vector) and associated divergence (shading) onto the previous January–March mean ice concentration in polar area

西风减弱。300 hPa高度的Rossby传播特征和500 hPa较为一致(图略),这说明极地海冰偏多时,Rossby传播特征有利于中纬度纬向西风减弱;而极地海冰偏少,Rossby传播特征有利于中纬度纬向西风增强,从而说明和影响粤东降水异常的高空急流异常可能和前期极地海冰异常有关。

前期海冰异常如何影响粤东暴雨中心降水?我们对极地海冰偏多年和偏少年,由极地南侧(60°N, 70°E)到粤东暴雨中心(22°N, 117°E)分别做剖面(图9)。海冰偏多年和偏少年(图9a和9c),极地海冰南侧均为上升运动,我国中纬度地区(90°~110°E)为下沉运动,华南地区(110°E以东)为上升运动。由垂直速度距平场分析,前期海冰偏多年(图9b),极地南侧为垂直速度正距平,表示上升运动减弱;而中纬度为垂直速度负距平,表示我国中纬度地区下沉运动明显减弱;华南地区(110°E附近)为垂直速度正距平,不利于粤东地区上升运动加强。海冰偏少年的垂直速度分布基本相反(图9d),极地南侧为垂直速度负距平,我国中纬度垂直速度正距平区范围偏小,而南方垂直速度负距平区范围明显偏大,有利于粤东地区上升运动加强。

和前期海冰异常相关的环流,并不能解释降水偏多年低纬度的显著正高度距平以及加强的西南风,说明引起粤东暴雨中心降水异常的大气环流可能还和其它外强迫因子有关。图6b是降水多

寡年前期1~3月的海温的差值分布,最为显著的海温异常是位于赤道东太平洋地区的正海温异常,该海温异常和Nino1+2指数的区域(0°~10°S, 90°W~80°W)较为接近。我们使用前期1~3月平均的Nino1+2指数对4~6月的500 hPa高度场以及850 hPa风场进行回归分析。由回归的500 hPa高度场(图10a)可见,我国南方地区以及到东南亚等低纬度地区均为显著的正高度距平;回归850 hPa风场上(图10b)我国东南沿海地区为显著的西南风异常。前期Nino1+2指数的回归结果说明,前期赤道东太平洋为暖海温异常时,低纬度地区为正高度距平,低层粤东以及粤东以南为明显的西南风异常,粤东北侧的回归风场并不显著,有利于粤东暴雨中心低层风场辐合,可以较好解释粤东暴雨中心降水偏多的低纬度环流异常特征。前期ENSO和我国东南沿海环流的关系,和前人的研究是基本一致的^[24, 26]。Wang et al^[26]通过观测数据分析和数值模拟研究给出了赤道太平洋海温对我国东南沿海低层环流的影响过程,指出赤道东太平洋暖海温异常通过沃克环流引起菲律宾等赤道西太平洋下沉运动和反气旋环流加强,反气旋环流加强引起我国东南沿海地区西南风加强,有利于粤东地区降水增加。

综上所述,前期的巴伦支海-喀拉海等极地海冰以及赤道东太平洋海温异常可以较好解释粤东暴雨中心前汛期降水异常的环流特征。高空急流、

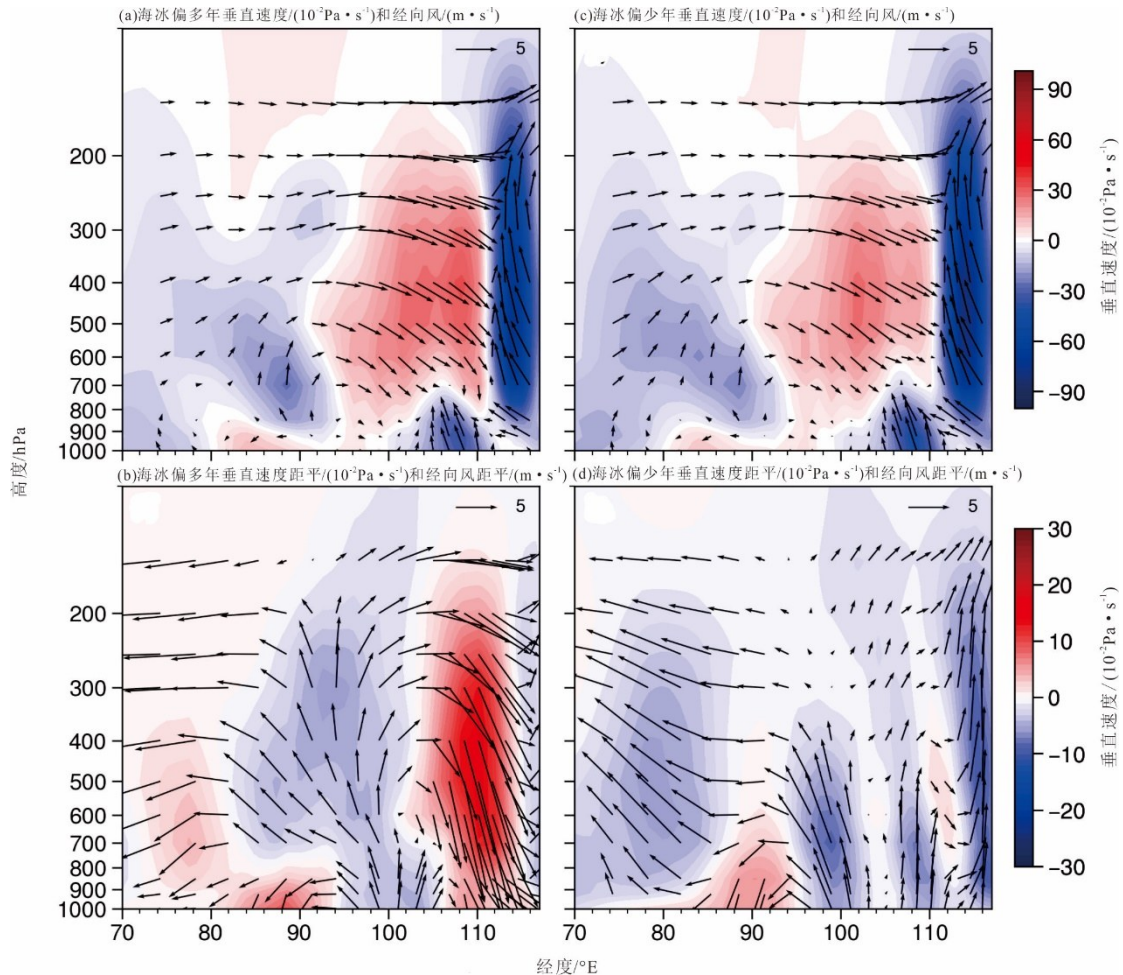


图9 前期1~3月极地海冰多寡年分别沿着点(60°N, 70°E)到点(22°N, 117°E)的
(a, c)垂直速度(阴影)和垂直风-经向风环流场(矢量箭头); (b, d) 其气候态的距平

Fig. 9 Height-longitude cross section from (60°N, 70°E) to (22°N, 117°E) of (a, c) vertical velocity (shading) and vertical-meridional wind (vector) for sea ice anomalous years, and (b, d) their anomalies against climatology

东亚大槽和大陆高压等影响粤东暴雨中心降水的环流异常和前期极地海冰有关, 而低纬度地区的西南风异常则和前期赤道东太平洋海温异常有关。

5 结论

本文探讨了粤东暴雨中心前汛期(4~6月)降水年际变化特征以及东亚大气环流异常和前期外强迫因子的关系, 粤东暴雨中心前汛期环流特征有一定独有特征, 对预测粤东暴雨中心前汛期降水异常有一定参考意义。主要结论如下:

1) 粤东暴雨中心前汛期降水的年际变化特征非常明显, 并且在1990年以后降水异常年增多, 降水年际变率明显增强。

2) 粤东暴雨中心前汛期降水偏多年的环流特征表现为, 高空急流加强, 粤东暴雨中心位于高空急流入口区南侧, 有利于次级环流加强; 副热

带高压明显加强, 且异常西伸, 有利于低层西南风加强, 东亚大槽加强有利于粤东暴雨中心北侧的偏北风异常, 受低层风场辐合加强影响, 粤东暴雨中心降水增强。

3) 粤东暴雨中心前汛期降水偏少年的环流特征表现为, 高空急流带减弱, 副热带高压西脊点偏东, 大陆高压加强, 低层为一致偏北风异常, 不利于粤东地区风场辐合, 导致粤东暴雨中心降水偏少。

4) 前期巴伦支海-喀拉海海域海冰和赤道东太平洋海温异常是影响粤东暴雨中心前汛期降水异常的重要外强迫因子。粤东暴雨中心降水偏多的环流异常和前期极地海冰偏少以及赤道东太平洋暖海温异常有关, 而降水偏少的环流异常和前期极地海冰偏多以及赤道东太平洋冷海温异常有关。

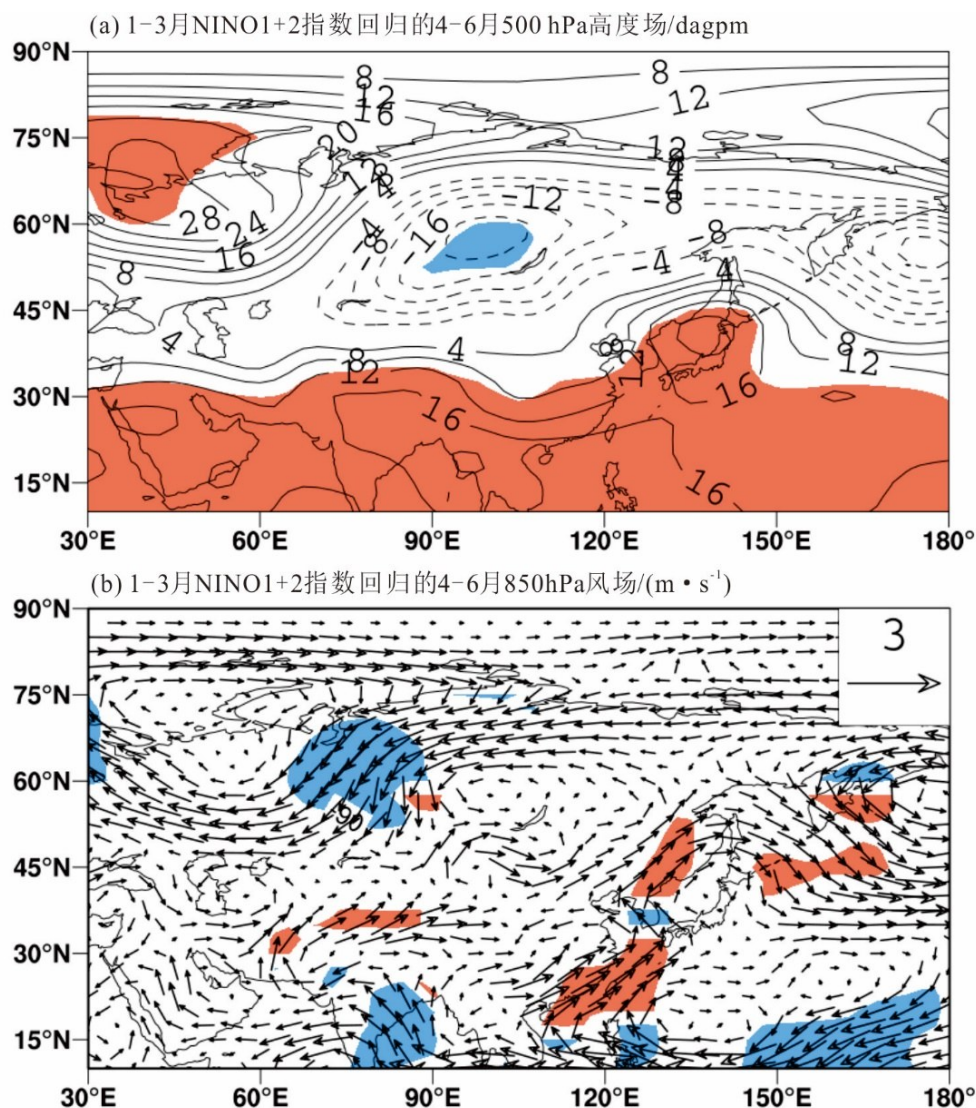


图 10 Nino1+2 指数回归的环流场分布, 阴影为高度场和经向风场回归系数超过 90% 信度水平的显著性检验
 Fig. 10 Regression maps of circulation onto Nino 1+2 index, shadings denote areas exceeding 90% confidence level for geopotential height and meridional wind

参考文献:

- [1] 陈锐丹, 温之平, 陆日宇, 等. 华南 6 月降水异常及其与东亚-太平洋遥相关的关系[J]. 大气科学, 2012, 36 (5): 974-984.
 CHEN R D, WEN Z P, LU R Y, et al. Variation of South China rainfall in June and its association with the East Asia-Pacific teleconnection[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36 (5): 974-984.
- [2] 苗芮, 温敏, 张人禾. 2010 年华南前汛期持续性降水异常与准双周振荡[J]. 热带气象学报, 2017, 33 (2): 155-166.
 MIAO R, WEN M, ZHANG R H. Persistent precipitation anomalies and quasi-biweekly oscillation during the annually first rainy season over South China in 2010[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33 (2): 155-166.
- [3] 马慧, 王谦谦, 陈桢华. 华南前汛期降水异常的时空变化特征[J]. 高原气象, 2006, 25 (2): 159-163.
 MA H, WANG Q Q, CHEN Z H. Spatial and temporal variations in pre-summer flood period precipitation of South China[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25 (2): 159-163.
- [4] 陈芳丽, 李明华, 姜帅, 等. 粤东暴雨中心的降水气候统计特征和成因分析[J]. 广东气象, 2019, 41 (4): 6-10.

- CHEN F L, LI M H, JIANG S, et al. On the statistical characteristics of precipitation climatology of heavy rain centers in Eastern Guangdong and analysis of its causation[J]. *Guangdong Meteorology*, 2019, 41 (4): 6-10.
- [5] 李晓娟, 简茂球, 方一川, 等. 广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征[J]. *气象*, 2012, 38 (11): 1339-1347.
- LI X J, JIAN M Q, FANG Y C, et al. Spatiotemporal variations of heavy rain's frequency in the early rainy season in Guangdong [J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38 (11): 1339-1347.
- [6] 马慧, 陈桢华, 姜丽萍, 等. 华南前汛期降水与我国近海海温的SVD分析[J]. *热带气象学报*, 2009, 25 (2): 241-245.
- MA H, CHEN Z H, JIANG L P, et al. SVD analysis between the annually first raining period precipitation in the South of China and the SST over offshore waters in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25 (2): 241-245.
- [7] 邓立平, 王谦谦. 华南前汛期(4-6月)降水异常特征及其与我国近海海温的关系[J]. *热带气象学报*, 2002, 18 (1): 45-55.
- DENG L P, WANG Q Q. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April-June) in Southern China and SST over offshore waters in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2002, 18 (1): 45-55.
- [8] 李莹, 原文杰, 徐倩倩, 等. 华南前汛期降水异常年水汽输送特征分析[J]. *高原气象*, 2017, 36 (2): 501-509.
- LI Y, YUAN W J, XU Q Q, et al. Water vapor transportation characteristics in pre-rainy season precipitation anomaly of South China [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36 (2): 501-509.
- [9] 池艳珍, 何金海, 吴志伟. 华南前汛期不同降水时段的特征分析[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28 (2): 163-171.
- CHI Y Z, HE J H, WU Z W. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28 (2): 163-171.
- [10] 陈长胜, 林开平, 王盘兴. 华南前汛期降水异常与水汽输送的关系[J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27 (6): 4-10.
- CHEN C S, LIN K P, WANG P X. Relation between pre-flood season precipitation anomalies in South China and water vapor transportation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, 27 (6): 4-10.
- [11] 李丽平, 周林, 俞子闲. 华南前汛期降水的年代际异常特征及其成因[J]. *大气科学学报*, 2018, 41 (2): 186-197.
- LI L P, ZHOU L, YU Z X. Interdecadal anomaly of rainfall during the first rainy season in South China and its possible causes [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41 (2): 186-197.
- [12] LOU M Y, LI, C, HAO S F, et al. Variations of winter precipitation over southeastern China in association with the North Atlantic Oscillation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(3): 476-489.
- [13] 李文铠, 何金海, 祁莉, 等. MJO对华南前汛期降水的影响及其可能机制[J]. *热带气象学报*, 2014, 30 (5): 983-989.
- LI W K, HE J H, QI L, et al. The influence of the Madden-Julian oscillation on annually first rain season precipitation in South China and its possible mechanism [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30 (5): 983-989.
- [14] 章丽娜, 林鹏飞, 熊喆, 等. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响[J]. *大气科学*, 2011, 35 (3): 560-570.
- ZHANG L N, LIN P F, XIONG, Z, et al. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35 (3): 560-570.
- [15] 伍红雨, 吴遥. 不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响[J]. *大气科学*, 2018, 42 (5): 1081-1095.
- WU H Y, WU Y. Possible impacts of El Niño events of different types and intensity on precipitation in the subsequent first rainy season in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42 (5): 1081-1095.
- [16] 蔡学湛. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响[J]. *应用气象学报*, 2001, 12 (3): 358-366.
- CAI X Z. The influence of abnormal snow cover over Qinghai-Xizang plateau and East Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12 (3): 358-366.
- [17] 吴尚森, 梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征[J]. *热带气象学报*, 1992, 8 (1): 87-92.
- WU S S, LIANG J Y. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in

- South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1992, 8 (1): 87-92.
- [18] 黄忠, 吴乃庚, 冯业荣, 等. 2007年6月粤东持续性暴雨的成因分析[J]. *气象*, 2008, 34 (4): 53-60.
HUANG Z, WU N G, FENG Y R, et al. Causality analysis of the continuous heavy rain in Eastern Guangdong in June 2007[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34 (4): 53-60.
- [19] 任文斌, 柯文华, 杨新, 等. 粤东一次前汛期大暴雨过程分析[J]. *广东气象*, 2013, 35 (3): 27-30.
REN W B, KE W H, YANG X, et al. Analysis of a storm over East Guangdong in early-rainy season [J]. *Guangdong Meteorology*, 2013, 35 (3): 27-30.
- [20] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77 (3): 437-472.
- [21] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108 (D14), DOI: 10.1029/2002JD002670.
- [22] 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定[J]. *大气科学*, 2006, 30 (6): 1207-1216.
- ZHENG B, LIANG J Y, LIN A L, et al. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part I: Determination of the division dates [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30 (6): 1207-1216.
- [23] LI C, ZHANG Q Y. January temperature anomalies over Northeast China and precursors [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(6): 671-677.
- [24] 李超, 张庆云. 春季长江中下游旱涝的环流特征及对前期海温异常的响应[J]. *气象学报*, 2013, 71 (3): 452-461.
LI C, ZHANG Q Y. The circulation characteristics of spring precipitation anomalies over the Yangtze river valley and their response to the preceding SSTA [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71 (3): 452-461.
- [25] TAKAYA K, NAKAMURA H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 58(6): 608-627.
- [26] WANG B, WU R G, FU X H. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13 (9): 1517 - 1536.

(责任编辑 秦社彩)