

华南冬季区域性暴雨过程强度异常的成因分析*

伍红雨¹, 吴遥², 郭尧³

1. 广东省气候中心, 广东 广州 510641
2. 重庆市气候中心, 重庆 401147
3. 南方电网数字电网研究院有限责任公司, 广东 广州 510555

摘要: 利用 1961—2018 年华南 192 个气象观测站逐日降水资料, 客观定量评估华南冬季区域性暴雨过程, 确定强的冬季区域性暴雨过程和冬季暴雨强年。利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 采用合成分析方法研究华南冬季暴雨强年的气候背景和强区域性暴雨过程的天气特征, 其气候和天气共同的特点是: 冬季在对流层高层, 中南半岛、南海到华南的西风急流加强, 中层东亚大槽减弱, 西太平洋副热带高压加强, 低层南支槽和偏南气流加强, 水汽辐合加强。差异表现在对于日尺度的华南冬季强暴雨过程, 其北半球副热带异常环流波列结构非常明显, 具有类似夏季北半球对流层高层的“丝绸之路遥相关型”特点, 但波列中心位置在冬季较夏季明显偏南, 同时华南距平异常环流更加显著, 低层偏南气流风速大, 水汽的辐合非常突出。对于冬季暴雨强年, 上年 7~12 月, 赤道中东太平洋以及热带印度洋、南海的海温偏高, 热带西太平洋海温偏低, 有利于华南冬季暴雨的发生, 超强厄尔尼诺的发生对应华南冬季暴雨偏强。所以冬季尺度的环流和前期海温反映了华南出现区域性暴雨的大气环流和海温的气候背景, 而日尺度的大气环流异常更能体现其异常的天气学特征。

关键词: 区域性暴雨过程; 强度; 大气环流; 海温; 冬季; 华南

中图分类号: P462.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0008-11

On the causes of abnormal intensity of regional winter rainstorm processes in South China

WU Hongyu¹, WU Yao², GUO Yao³

1. Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510641, China
2. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China
3. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510555, China

Abstract: Based on the daily precipitation data of 192 meteorological observation stations in South China during 1961-2018, the regional rainstorm processes in winter in South China are evaluated objectively and quantitatively, and the annual rainstorm intensity index and regional strong winter rainstorms are determined. Based on the reanalysis of NCEP/NCAR data, combining with other methods, the climate background of the severe winter rainstorm in South China and the weather characteristics of the regional rainstorm processes are studied. The common characteristics of climate and weather are as follows: The westerly jet strengthens in the upper troposphere in winter in the Indo-China Peninsula and the South China Sea, the East Asian Trough weakens in the middle layer, the subtropical high over the Western Pacific strengthens, the southern branch trough and southerly current at the lower level

* 收稿日期: 2020-12-07

录用日期: 2021-03-11

网络首发日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(41661144019); 广东省科技计划项目(2017B020244002); 广东自然资源厅项目(GDOE[2019]A11号); 广东省气象局科技项目(GRMC2019M10); 广东省气候中心项目(QH202002)

作者简介: 伍红雨(1969年生), 女; 研究方向: 气候特征、变化及机理研究; E-mail: 492019784@qq.com

strengthen, and the water vapor convergence strengthens. The difference is presented in the heavy rain process at the daily scale in South China in winter, in which the wave train structure of the northern hemisphere subtropical abnormal circulation is very obvious, similar to the 'remote correlation of silk road' in the upper troposphere of the northern hemisphere in summer circulation characteristics, but the center of oscillation is southerly in winter than it in summer. For the strong winter rainstorm year, the SST is higher in the equatorial Middle East Pacific, the tropical Indian Ocean, and the South China Sea, while it is lower in the tropical western Pacific from July to December in last year, which was conducive to the occurrence of winter rainstorm in South China. Therefore, the seasonal scale (particularly in winter) circulation and early SST reflect the climate background of the regional rainstorm in South China, while the daily scale atmospheric circulation anomaly can better reflect its abnormal weather characteristics.

Key words: regional rainstorm process; intensity; atmospheric circulation; SST; winter; South China

随着全球气候变暖, 南方冬季极端降水强度普遍增加^[1], 特别是2010年以来华南冬季区域性暴雨过程频繁发生, 常常危害人民生命财产安全, 甚至造成严重洪涝灾害。如2013年12月13~17日, 南方地区出现持续性、大范围暴雨天气, 华南平均降雨量较常年同期偏多2.7倍, 为1951年以来历史同期最多^[2]; 其中广东出现冬季罕见的全省性暴雨过程, 其影响范围、持续时间和累积雨量都超过同期历史记录^[3]。2015—2016年冬季华南平均降雨量较常年同期偏多1.6倍, 为历史同期最多^[4], 2015年12月9日广东中东部地区出现大范围暴雨天气^[5]。2016年1月28~29日华南出现1961年以来1月历史同期最强暴雨过程^[6], 广东86个站中有83个站出现暴雨以上降水, 21个站出现大暴雨, 广东单日出出现暴雨站点数破有气象记录以来的最多值, 此过程造成广东直接经济损失2.1亿元, 五华、封开发生强降雨引发山体崩塌、滑坡等次生地质灾害, 造成7人死亡^[7]。虽然华南冬季出现暴雨过程相对汛期少, 但有时暴雨过程的范围和强度并不小, 对防灾减灾而言冬半年的暴雨过程不能忽视^[8]。有必要定量评估华南冬季暴雨过程的综合强度, 并探讨其异常的大气环流和海温特征, 为气候预测和决策服务提供依据。

关于华南冬季降水气象学者进行了很有意义的研究。李帅等^[9]分析指出1951—2005年中国冬季降雨量变化趋势不明显。曾波和王钦^[10]研究指出近50 a (1960—2009年) 南方冬季降水强度整体呈上升趋势。我国冬季降水年际变化与ENSO以及东亚冬季风变化关系密切, 当ENSO处于暖位相时, 冬季风偏弱, 有利于南方降水偏多^[11]。厄尔尼诺是影响南方冬季降水偏多的重要外强迫因子,

而拉尼娜的影响具有明显的年代际差异^[12]。南方冬季多雨年与ENSO暖位相联系, 对应冬季风减弱, 副热带高压增强^[13]。在发生厄尔尼诺事件的当年冬季, 珠江流域北部的降水天数及强度均会加强^[14]。赵杰等^[15]分析指出湖南冬季降水的年代际变化与西伯利亚高压、北极涛动(AO)、东亚西风急流等年代际变化的协同作用有关。

中国南方冬季降水与赤道中东太平洋以及海洋性大陆西部海温异常密切相关, 但相关性存在年代际差异^[16]。华南冬季降水还与同期东印度洋海温显著相关^[17], 与前期6~7月暖池关键区(6.5~11.55°N, 160.5~172.5°E)热含量显著负相关^[18]。东亚冬季风强弱与华南降水有显著的相关关系, 其偏弱(强)时, 华南降水偏多(少)^[1]。东亚大槽偏弱, 东亚对流层中低层存在南风异常, 有利于南方冬季降水偏多^[19]。欧亚中纬度地区西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)偏强偏北, 南支槽活跃, 导致南方降水偏多^[20]。

可见华南冬季降水与海温和大气环流关系密切。对华南冬季降水的研究主要是从月、季平均的角度来分析大尺度环流的异常, 主要是气候特征, 可能会掩盖暴雨事件天气尺度的大气环流特征; 或从某次冬季暴雨过程来分析环流的异常, 不具有普遍代表性。本文从华南冬季暴雨过程的强度出发, 首先确定暴雨过程的划分标准, 识别并定量评估暴雨过程的强度, 得到华南冬季最强的暴雨过程和冬季年暴雨强度指数序列。从月、季尺度分析华南冬季暴雨过程强度与大气环流和海温关系的气候背景; 从日尺度分析华南冬季强暴雨过程的大气环流异常特征, 研究结果为华南冬季暴雨预报和服务提供依据。

1 资料和方法

1.1 资料

1) 采用国家气象信息中心经过质量控制和均一化处理的、1961—2018年全国2419个气象观测站逐日降水资料,选取广东、广西、海南三个省作为华南区域进行研究,剔除资料长度不足50 a的站,选取站点192个。

2) 1961—2018年NCEP/NCAR日、月尺度再分析资料,包括位势高度场、风场、海平面气压场、比湿场^[21]。海温资料为NOAA扩展重建海表温度资料(ERSST v5)^[22]。

1.2 方法

1.2.1 华南冬季区域性暴雨过程综合强度评估 参考伍红雨等^[23]对区域性暴雨过程综合强度量化的评估方法,首先对华南冬季区域性暴雨过程进行定义,各相关指标及定义如下:

单站暴雨日:单站日降雨量(20:00~20:00)≥50 mm的降雨日。

区域性暴雨日:192个华南测站中,≥9站(5%)出现单站暴雨日。

区域性暴雨过程:区域性暴雨日持续天数≥1 d的过程或间断1 d且间断日≥1个测站日降雨量达暴雨及以上的过程。

选取过程持续时间、暴雨范围、最大日降雨量和最大过程降雨量作为评估指标,华南冬季区域性暴雨过程综合强度指数

$$I_R = AG_p R_p + BG_d R_d + CG_c R_c + DG_i R_i, \quad (1)$$

式中 I_R 为某次区域暴雨过程的综合强度指数; G_p 、 G_d 、 G_c 和 G_i 分别为4个指标的评估等级; R_p 、 R_d 、 R_c 和 R_i 分别为标准化的4个指标; A 、 B 、 C 、 D 为权重系数,其计算方法详见参考文献[23],得到这4个指标的权重系数分别为0.242, 0.241, 0.239, 0.278。 I_R 值大小表明暴雨过程的强弱。

1.2.2 华南冬季年暴雨强度指数 累加某年冬季所有区域性暴雨过程强度指数得到。其值越高,冬季暴雨强度越强,华南冬季无暴雨出现的年份,强度指数定为0。由此得到1961—2018年的华南冬季暴雨过程的年综合强度指数的年变化序列,选出华南冬季暴雨强年。

1) 根据以上定义识别出1961—2018年共发生了47次华南冬季区域性暴雨过程,对其进行逐场评估得到冬季暴雨过程的综合强度指数 I_R 序列。采用百分位法对暴雨过程强度进行划分,得到弱、较弱、中等、较强、强5个等级。

2) 对华南冬季暴雨强年采用前期冬季海温、同期大气环流资料进行距平合成分析并进行 t 检验。对华南强的冬季区域性暴雨过程,采用NCEP/NCAR的日尺度再分析资料进行距平合成分析并进行 t 检验。

3) 本文冬季为上年12月至次年2月,如1969年冬季定为1968年12月—1969年2月;气候态为1981—2010年平均。

2 结果分析

2.1 华南冬季区域性暴雨过程的特征和客观评估

根据前面的定义和方法,在1961—2018年的58 a冬季华南共出现了47次区域性暴雨过程。华南冬季区域性暴雨过程(简称华南冬季暴雨)次数具有显著的年际和年代际变化。1983年出现最多(6次),其次是2016年(4次),有11年(2次),有15年(1次),有30年(占51.7%)华南冬季无区域性暴雨过程发生。2010年以来,除2011、2014和2017年没有出现冬季暴雨过程外,其余7年都有发生,可见华南冬季暴雨2010年后发生更加频繁。华南冬季暴雨在1960、1970和2000年代偏少,1980、1990和2010年代偏多。最少出现在1960年代,仅1次;最多出现在1980年代,有12次。这47次华南冬季暴雨过程持续时间1~3 d,平均1.3 d。表1为华南冬季区域性暴雨过程综合强度指数排在前6位的过程。可见,最强暴雨过程出现在2013年12月14~16日,第2强出现在2016年1月28~29日。这两次过程华南都出现了大范围的冬季暴雨^[2-4]。统计表明:2013年12月14~16日,华南有96站出现暴雨,最大日降雨量177.5 mm,过程最大累计降雨量334.6 mm,强度指数为7.06。2016年1月28~29日,华南有104站

表1 1961—2018年华南冬季区域性暴雨过程综合强度指数排名前6位

Table 1 Top six of comprehensive strength index of regional rainstorm process in winter in South China during 1961-2018

排名	年份	区域暴雨过程时段	强度指数
1	2013	12月14~16日	7.06
2	2016	1月28~29日	6.16
3	1969	1月30~31日	3.44
4	1983	2月27日~3月1日	3.44
5	1983	1月4~5日	2.38
6	1992	1月4~5日	2.28

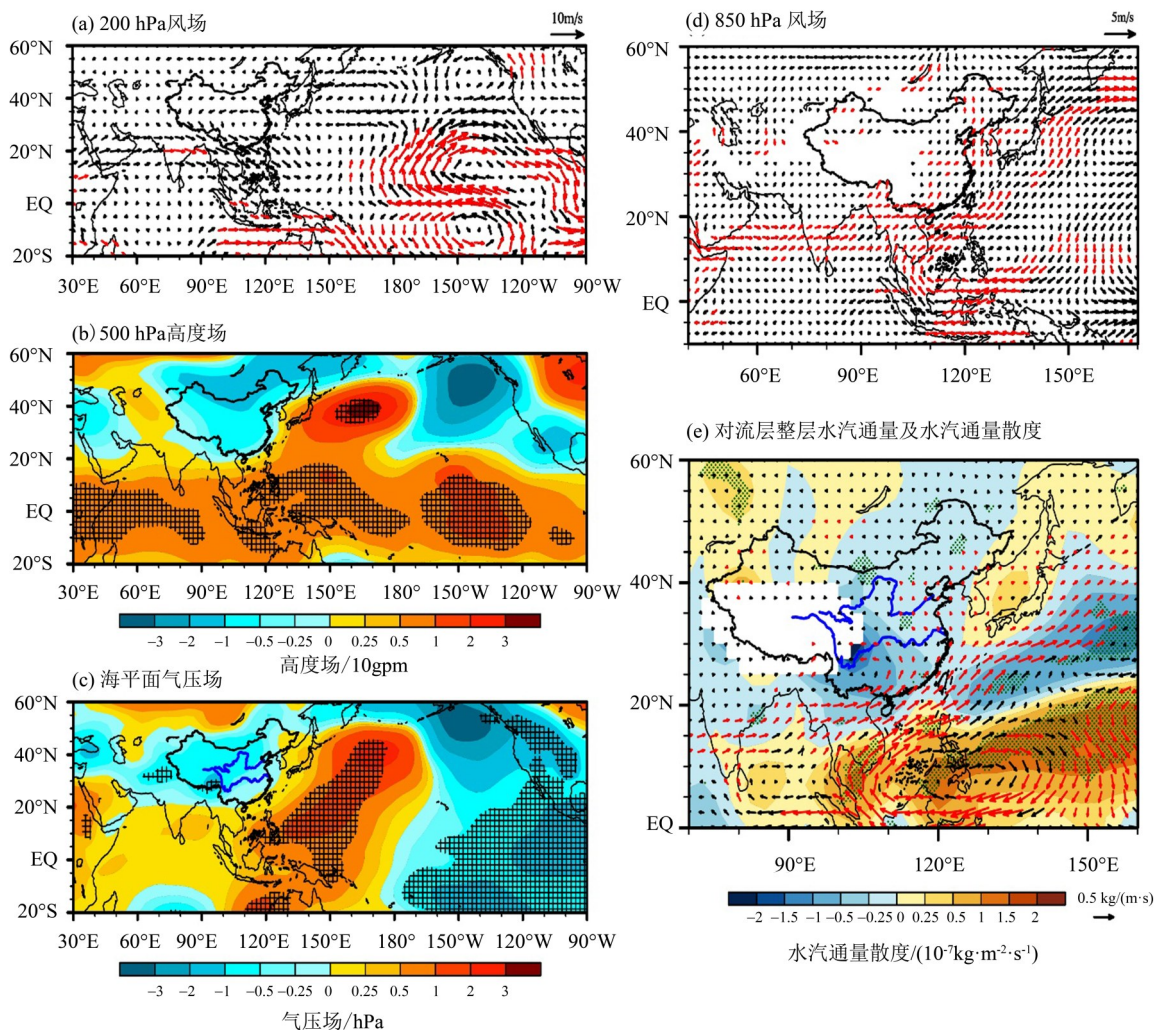
出现暴雨, 最大日降雨量 200.9 mm, 过程最大累计降雨量 228.2 mm, 强度指数为 6.16。根据前面的定义, 计算华南出现区域性冬季暴雨过程的年综合强度指数, 得到 1969、1983、1992、2013、2015 和 2016 年为华南冬季暴雨过程年综合强度指数最强的前 6 年, 可见有 3 次出现在 2010 年以来。华南冬季区域平均降水的标准化值 ≥ 1 的年份有 1983、1985、1990、1992、1995 和 2016 年共 6 个年份。可见只有 3 年和选出的冬季暴雨强年相同, 冬季暴雨的年综合强度指数更加突出冬季暴雨及灾害的影响, 而不仅仅考虑冬季降雨量。本文对华南冬季暴雨过程强度前 6 位和年综合强度指数前 6 年的同期大气环流以及前期海温进行距平合成分析。

2.2 华南冬季暴雨过程强度与大气环流的关系

2.2.1 暴雨过程强年同期大气环流特征 下面分

析华南冬季暴雨强年高、中、低层大气环流合成距平场特征。从冬季 200 hPa 风场距平场合成和通过 90% 显著性水平的区域 (图 1a) 可见, 在中低纬度, 从阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛到华南地区存在西风距平, 在印度半岛和孟加拉湾的西风距平通过了 90% 的显著性水平检验, 说明冬季暴雨强年亚洲低纬度高层西风急流明显加强。

从 500 hPa 高度距平场合成和通过 90% 显著性水平的区域 (图 1b) 可见, 距平场主要表现在热带地区 ($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) 的位势高度为显著正异常, 同时中高纬度亚洲东岸有显著的位势高度正异常中心, 导致东亚大槽明显减弱, 中低纬度“东高西低”的异常环流形势表明南支槽活跃、西太副高偏强偏北, 有利于中低层偏南气流输送水汽到华南地区^[20]。



红色矢量和黑点分别代表风速距平和高度距平场、海平面距平通过 90% 的显著性水平; 图(e)中阴影区代表辐合和辐散。

图 1 1961—2018 年华南冬季暴雨强年距平场合成

Fig. 1 The departure composite of rainstorm year in South China winter from 1961 to 2018

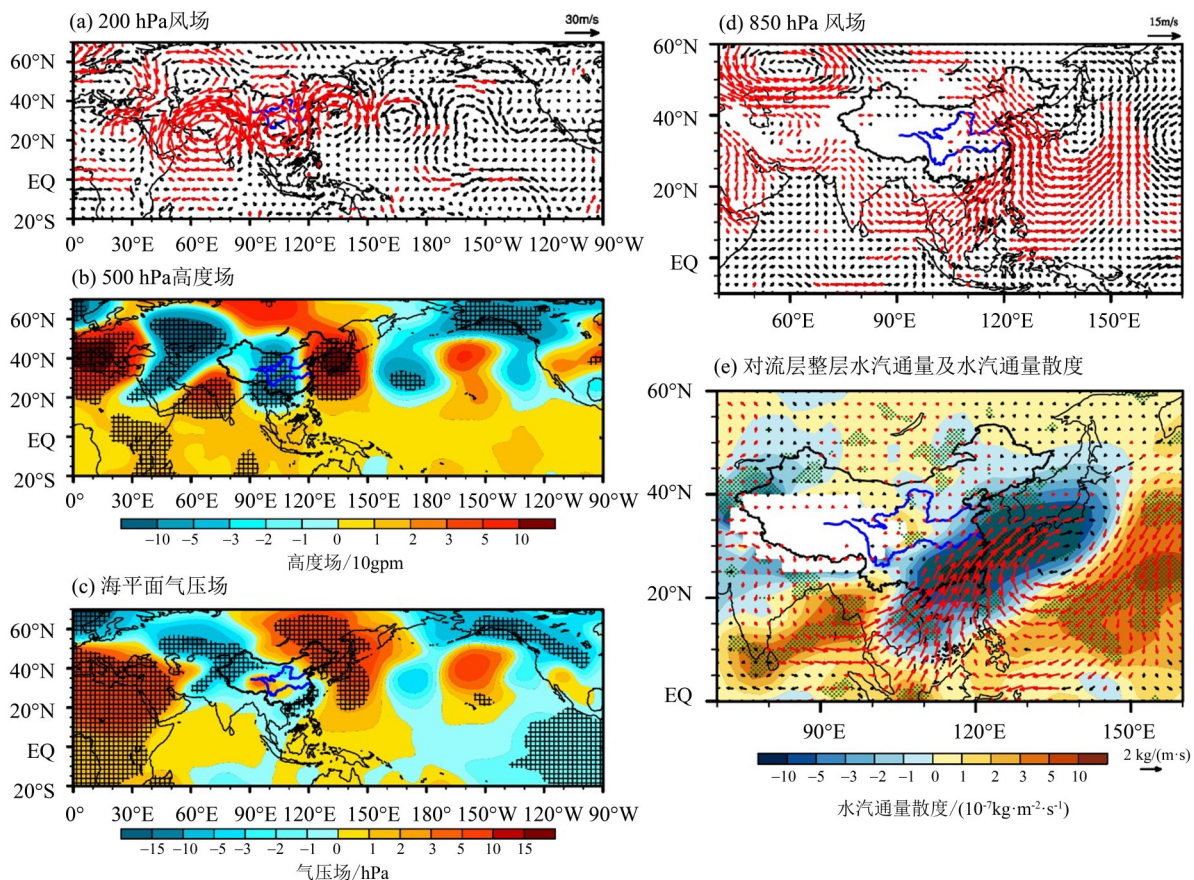
从海平面气压距平场合成和通过 90% 的显著性水平检验的区域 (图 1c) 可见, 在 50°N 以南, 中低纬度太平洋海平面气压距平场呈西高东低的分布。海平面气压在日界线以西明显上升, 日界线以东明显降低, 东西的气压差明显加大。同时中纬度欧亚大陆海平面气压降低, 导致海洋和大陆的气压梯度减弱, 东亚沿岸的冬季风偏弱, 而偏南风的加强, 有利于华南冬季暴雨偏强。从 850 hPa 风场距平场合成, 阴影区表示通过 90% 显著性水平检验的区域 (图 1d) 可见, 在孟加拉湾 90°E 附近为明显低槽区, 对应南支槽活跃, 从阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛到华南存在显著异常偏南气流, 而亚洲东岸为偏南异常气流影响, 南风异常气流达到 50°N, 给我国南方带来丰沛的水汽, 同时在热带西太平洋存在异常反气旋环流, 中心位于菲律宾以东洋面, 其前部的转向环流把西太平洋的丰富水汽输送到华南, 有利于华南冬季暴雨偏强。

从华南冬季暴雨强年对流层整层 (1 000~300

hPa) 水汽通量及水汽通量散度 (图 1e) 可见, 华南和我国东部受到显著偏南气流的影响, 在华南存在水汽辐合配合, 有利于华南冬季暴雨的发生。

2.2.2 暴雨过程大气环流合成分析 采用 NCEP/NCAR 的全球日再分析资料对前面表 1 中 6 次华南冬季强区域性暴雨过程 (简称冬季暴雨过程) 的大气环流距平场进行合成分析 (图 2), 进一步探讨其异常的天气、气候特征。从图 2 可见, 在冬季对流层高、中、低层的风场、位势高度场、海平面气压场的距平合成场上, 北半球从西到东的副热带地区均存在波列状环流异常, 波列中心基本位于 30°~45°N 之间, 随着高度的上升, 高层比低层更加明显。

从冬季强暴雨过程的对流层高层 200 hPa 风场距平合成 (图 2a) 可见, 在北半球副热带地区存在异常气旋、反气旋环流的波列分布, 异常环流中心主要在 30°N 附近。在西欧存在显著异常的反气旋环流, 环流中心位于地中海、黑海附近。在东欧存在显著异常的气旋环流, 中心在乌拉尔山



红色矢量和黑点分别代表风速距平和高度距平场、海平面距平通过 90% 显著性水平; 图(e)中阴影区代表辐合和辐散。

图 2 1961—2018 年华南冬季强区域性暴雨过程距平场合成

Fig. 2 The departure composite of regional rainstorm process in South China winter from 1961 to 2018

附近。在西亚存在巨大显著异常反气旋环流, 包括阿拉伯半岛、伊朗高原、阿拉伯海、印度半岛以及孟加拉湾, 中心位于里海、咸海的东南部。在东亚, 包括中南半岛、南海及我国大部存在显著异常气旋环流, 中心位于青藏高原上空, 华南为气旋环流底部偏西异常气流影响。在东北亚, 包括我国东北、朝鲜半岛、日本及以东亚沿岸存在显著异常反气旋环流, 中心位于日本海附近。其右侧的西北太平洋上, 依次存在异常的气旋-反气旋-气旋环流, 可见范围最大、最显著是位于西亚的反气旋异常环流, 从西亚到北太平洋的距平反气旋、气旋环流由西向东逐渐减弱。说明对流层高层南亚高压减弱, 同时异常气旋、反气旋的波列结构对应冬季暴雨偏强。

从冬季强暴雨过程的中层 500 hPa 位势高度距平合成 (图 2b) 可见, 在北半球中纬度从西向东存在 “+ - + - + -” 的位势高度距平中心, 并且其距平通过 90% 的显著性水平检验的范围和距平中心值自西向东逐渐的减小, 其距平中心位置和 200 hPa 风场异常环流中心位置有很好的对应关系。我国大部以及中南半岛和南海为显著的负距平, 其左侧在印度半岛和阿拉伯海存在显著正距平中心, 右侧的东北亚以及日本海存在显著正距平中心。热带印度洋、热带太平洋均为正距平。说明东亚大槽显著减弱、西太副高偏强、偏西, 中纬度正负距平中心的波列结构有利于华南冬季暴雨偏强。

从冬季强暴雨过程的海平面气压距平合成 (图 2c) 可见, 北半球自西向东存在 “+ - + - + -” 的海平面距平分布。距平通过 90% 显著性水平的区域主要位于贝加尔湖以东到鄂霍次克海。在乌拉尔山附近存在异常负距平中心, 青藏高原存在异常正距平中心, 我国东部和南部以及南部沿海为显著负距平, 华南处于两个正距平之间的负距平区域, 气压梯度增大, 有利于华南冬季暴雨的发生。

从冬季强暴雨过程的低层 850 hPa 风场距平合成 (图 2d) 可见, 在副热带地区存在异常气旋、反气旋波列, 异常环流中心在 30°N 附近。在孟加拉湾 90°E 的低纬南支槽明显加强, 华南受槽前异常偏南气流影响。定常 Rossby 波能量沿着急流波导传播到孟加拉湾, 是导致南支槽明显加强的一个重要机制^[24]。在乌拉尔山附近存在异常气旋环流, 其后部的异常偏北气流一直往南经过印度半

岛、孟加拉湾、中南半岛以偏南异常气流影响华南, 这是干冷空气, 而中低纬菲律宾异常反气旋环流的存在, 其后部的异常偏南气流把西太平洋和南海的暖湿气流输送东亚沿岸, 同时华南北部存在偏北风的异常, 华南位于偏南和偏北异常气流的交汇, 有利于华南冬季暴雨的发生。

从冬季强暴雨过程整层水汽通量及水汽通量散度 (图 2e) 可见, 在我国南方以及东亚近海存在巨大的水汽辐合, 从孟加拉湾、中南半岛到华南存在显著偏南气流, 同时在西太平洋存在巨大反气旋环流, 其后部转向偏南气流风速很大, 把孟加拉湾、南海、西太平洋的水汽向南方输送, 长江以南存在显著的水汽辐合, 有利于华南冬季暴雨过程的发生。图 2(e) 比图 1(e) 的水汽辐合更大更强。可见广东强的冬季区域性暴雨过程与中高纬环流稳定和底层水汽输送密切相关, 得到和林爱兰等^[25]以及赵玉春^[26]对广东或华南前汛期持续性暴雨相一致的结论。

可见对于华南冬季强区域性暴雨过程这种短时间尺度 (1~3 d) 的暴雨过程, 对流层高中低层扰动均表现为显著的纬向型分布特征, 从近地面到 200 hPa 高度, 异常中心在垂直方向上表现出准正压的结构, 这种北半球大气遥相关与 Wallace and Gutzler^[27]指出北半球中纬度地区冬季欧亚遥相关型是准正压、纬向型结构相一致。这种清晰的波列状结构特征与夏季对流层高层的“丝绸之路遥相关型” (SRP, silk road pattern)^[28-29]存在异同, 相同点都在北半球对流层高层的中纬度地区, 从欧亚大陆西部一直到东亚、太平洋存在波列状环流异常, 对应大气环流遥相关。但冬季和夏季大气环流遥相关的空间分布特征存在明显差异, 波列中心位置在冬季较夏季偏南 5~10 个纬度, 这可能与经向环流在冬夏的变化有关。在夏季, 季风区对流加热增强, 经圈环流加强, 经向非地转运动向中高纬输送的角动量会导致中高纬地区西风急流加强^[30], 而夏季季风区对流较冬季更加活跃, 急流更偏北, 相应夏季波列中心位置较冬季偏北。黄荣辉等^[31]指出在北半球冬季, 存在从亚洲西部到东部的纬向遥相关型。北半球冬季最典型的大气遥相关与 ENSO 事件相关联^[27], 而 ENSO 对全球气候的影响是通过热力强迫实现。Horel and Wallace^[32]指出 ENSO-PNA 这种北半球冬季大气遥相关型的建立与赤道中东太平洋热力异常造成的外强迫密切相关。而影响北半球夏季大气环

流遥相关的主要热力因子并不是赤道中东太平洋的海温异常,而主要与西太平洋暖池区的对流活动、亚洲夏季风活动造成的热状况变化有关^[33-37]。本文评估得出华南冬季最强的6次暴雨过程中有5次出现在厄尔尼诺事件发生的年份,其中有3次出现在超强厄尔尼诺事件发生的年份(1983和2016年),而这6次最强暴雨过程距平合成场得到的北半球冬季大气环流遥相关的建立与ENSO暖位相的外强迫有关。陈芳丽和黎伟标^[38]分析指出北半球冬夏季典型的大气遥相关型具有很大的差异,且大气遥相关路径的偏折与温度场变化密切相关。

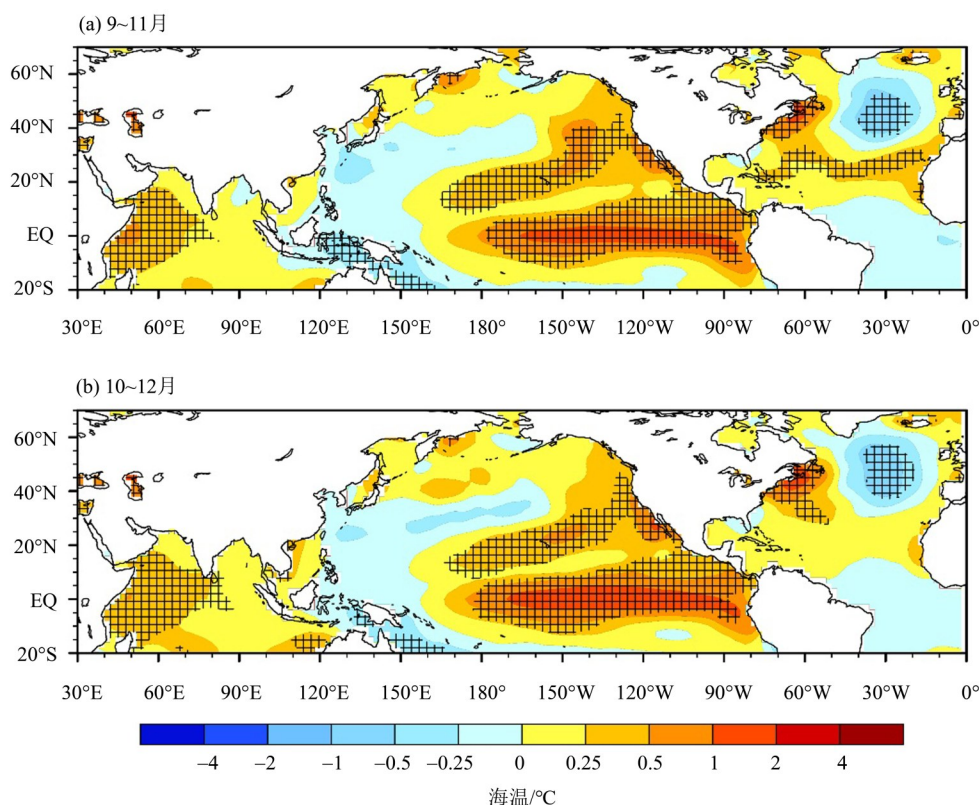
从华南冬季暴雨强年的年际变化的气候背景和华南冬季强暴雨过程日尺度的大气环流距平合成分析的天气特征可见,环流异常相同之处是在对流层高层,中南半岛、南海到华南西风急流加强,中层东亚大槽减弱,西太副高加强,低层南支槽和偏南气流加强,水汽辐合加强。差异表现在对于日尺度的华南冬季强暴雨过程,其北半球副热带异常环流波列结构非常明显。同时华南距平异常环流更加显著,低层偏南气流风速大,水汽的辐合非常突出,具有和前汛期持续降水异

常的环流特点。所以冬季尺度的环流反映了华南出现区域性暴雨的大气环流的气候背景,而日尺度的大气环流异常更能体现其异常的天气学特征。

2.3 华南冬季暴雨强年前期海温的特征

因大气环流对海温的响应滞后,对前面选出的华南冬季暴雨强年(1969、1983、1992、2013、2015和2016年)的上年9~11月,10~12月海温距平场进行合成(图3),分析其海温异常的特征。可见图3(a,b)很相似,表明华南冬季暴雨强年在上年9~12月海温的分布变化不明显,只是在东热带印度洋和南海海温距平在10~12月(图3b)比9~11月(图3a)更明显,其中部分地区通过了90%显著性水平检验。

从图3可见,华南冬季暴雨强年的上年9~11月,10~12月,海温距平场差异显著的区域位于赤道中东太平洋,热带印度洋和我国南海,中纬度大西洋。在赤道中东太平洋存在1~4℃的海温正距平,中心位于赤道中东太平洋。热带印度洋、南海存在0.25~1℃的海温正距平,而低纬度日界线以西太平洋(0°~40°N, 120°~160°E)存在海温负距平,而低纬度北大西洋为海温正距平。热带印



图中黑色网格点表示 SSTA 通过 90% 的显著性水平。

图3 1961—2018年华南冬季暴雨强年的上年海温距平合成

Fig. 3 SSTA composite last year on winter rainstorm in South China from 1961 to 2018

度洋、太平洋海温距平自西向东呈“+ - +”分布,且在热带西太平洋(0°~20°S, 120°~150°E)存在显著海温负距平。在中纬度北大西洋(20°~50°N, 0~60°W)海温西高东低。上年7~9月的海温距平变化也得到相同的结果(图略)。进一步说明厄尔尼诺事件发生,有利于华南冬季暴雨增多。1951年以来赤道中东太平洋共发生了3次超强厄尔尼诺事件^[4],分别是1982年4月—1983年6月、1997年4月—1998年4月,2014年10月—2016年4月,对应的华南冬季区域平均降水与常年同期相比,1983年偏多226%,1998年偏多78%,2016年偏多231%,其中2016和1983年冬季降水为华南历史最多和第二多,1998年为第6多。可见厄尔尼诺特别是超强厄尔尼诺事件的发生有利于华南冬季降水显著偏多,1983和2016年也是华南区域性暴雨强年。何溪澄等^[13]和张自银等^[19]也指出我国南方冬季异常多雨与ENSO的暖事件联系紧密。超强厄尔尼诺次年华南前汛期降水也是显著偏多^[39],可见超强厄尔尼诺对华南冬季和前汛期影响一致,都是导致降水显著偏多。在2014—2016年发生的超强厄尔尼诺事件存在从中部型向东部型的转变^[40],2015年冬季是处于中部型厄尔尼诺控制下,华南区域平均降水接近常年,而不是如其他超强的东部型厄尔尼诺事件发生后降水显著偏多,说明华南冬季降水除了与厄尔尼诺的发生强度有关外,还与厄尔尼诺事件的类型有关,这与厄尔尼诺对华南前汛期降水的影响相类似。

从以上对华南冬季暴雨过程的强度与大气环流和海温的分析可见,大气环流对厄尔尼诺遥强迫的响应是出现欧亚遥相关,这是海气相互作用的结果。当上年7~12月热带印度洋和南海海温偏高,西太平洋海温偏低,赤道中东太平洋海温异常偏高,热带印度洋、太平洋、大西洋海温距平自西向东呈“+ - + -”分布,热带太平洋出现类似厄尔尼诺的海温分布,大气对这种海温分布的响应是通过菲律宾异常反气旋这个桥梁来实现^[41],同时东印度洋海温偏高有利于南支扰动向下游传播,南支槽前的西南气流将水汽从孟加拉湾向华南输送,导致华南冬季暴雨偏强。当东印度洋海温和厄尔尼诺的作用相叠加时,华南出现异常冬季降水的可能性大^[17]。在冬季,对流层高层在中南半岛、南海到华南西风急流加强;中层东亚大槽明显偏弱,西太副高偏强;低层孟加拉湾、中南半岛、南海中北部到华南的偏南、偏西气流明

显加强,在华南、华东沿海存在水汽辐合。大气环流高、中、低层这样的环流特征有利于华南冬季暴雨的发生。当超强厄尔尼诺发生时,大气对海温异常的响应会更明显,菲律宾异常反气旋环流会更加显著,环流左侧偏南风加大带来海洋上更加丰富的水汽,更有利于华南冬季暴雨的发生。

3 结 论

定义华南冬季区域性暴雨过程的标准,对近58 a华南冬季区域性暴雨过程进行识别并对其客观定量评估,确定6次强的华南冬季区域性暴雨过程和6个强的年份。利用NCEP/NCAR日、月再分析资料对其海温和环流特征进行合成分析,得到结论如下:

1) 1961—2018年华南冬季共发生47次区域性暴雨过程。对其进行客观定量评估的基础上,确定华南冬季区域性暴雨过程的综合强度指数最强的6次过程,选出1969、1983、1992、2013、2015和2016年为冬季暴雨强年。

2) 华南冬季暴雨强年和强的区域性暴雨过程的相同大气环流气候背景:在冬季,对流层高层在中南半岛、南海到华南西风急流加强;中层东亚大槽明显偏弱,西太副高偏强;低层孟加拉湾、中南半岛、南海中北部到华南的偏南气流明显加强,在华南、华东沿海存在水汽辐合。大气环流高、中、低层这样的环流特征有利于华南冬季暴雨的发生。

3) 对于日尺度的华南冬季强暴雨过程,除了具有相同的气候背景外,其大气环流异常主要表现在北半球副热带异常环流波列结构非常明显,具有类似夏季北半球对流层高层的“丝绸之路遥相关型”特点,但波列中心位置在冬季较夏季明显偏南。同时华南距平异常环流更加显著,低层偏南气流风速大,水汽的辐合非常突出,具有和前汛期持续降水异常的环流特点。

4) 华南冬季暴雨过程的年综合强度指数与前期海温密切相关。当上年7~12月赤道中东太平洋、热带印度洋和南海海温偏高(低),而热带西太平洋海温偏低,有利于华南冬季暴雨偏强。厄尔尼诺事件发生时,华南冬季暴雨偏强,特别是超强厄尔尼诺事件发生有利于华南冬季暴雨偏强。

5) 当上年7~12月热带印度洋和南海海温偏高,热带西太平洋海温偏低,赤道中东太平洋海温异常偏高,赤道海温自西向东呈“+ - +”的距

平分布,大气对这种海温的响应是通过在对流层低层菲律宾以东洋面激发异常反气旋环流和南风异常来实现。同时东印度洋海温偏高有利于南支槽偏强,导致华南冬季暴雨偏强。当东印度洋海温和厄尔尼诺的作用相叠加时,华南出现异常强

冬季暴雨的可能性大。冬季尺度的环流和上年7~12月海温反映了华南出现区域性暴雨的大气环流和海温的气候背景,而日尺度的大气环流异常更能体现其异常的天气学特征。

参考文献:

- [1] 智协飞,张玲,潘嘉露. 我国南方冬季气候变暖前后极端降水事件分析[J]. 热带气象学报,2011,27(2): 166-172.
- [2] 吕梦瑶,何立富. 2013年12月大气环流和天气分析[J]. 气象,2014,40(3):381-388.
- [3] 邓文剑,吴乃庚,林良勋,等. 2013年冬季广东罕见持续暴雨过程特点及成因[J]. 气象科技,2015,43(2): 276-294.
- [4] 袁媛,高辉,贾小龙,等. 2014—2016年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象,2016,42(5):532-539.
- [5] 杨雨轩,张立凤,谢胜浪. 2015年12月广东罕见暴雨的成因分析[J]. 暴雨灾害,2016,35(4):326-333.
- [6] 江琪,马学款,王飞. 2016年1月大气环流和天气分析[J]. 气象,2016,42(4):514-520.
- [7] 广东省防灾减灾年鉴编纂委员会. 广东省防灾减灾年鉴(2017年卷)[M]. 广州:岭南美术出版社,2017: 48-62.
- [8] 叶殿秀,王遵娅,高荣,等. 1961—2016年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J]. 气候变化研究进展,2019,15(6):575-583.
- [9] 李帅,陈莉,任王玉. 1951/1952—2004/2005年中国冬季降水变化研究[J]. 热带气象学报,2008,24(1): 94-98.
- [10] 曾波,王钦. 我国南方地区50a冬季降水和相对湿度特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(4): 828-839.
- [11] 王林,冯娟. 我国冬季降水年际变化的主模态分析[J]. 大气科学,2011,35(6):1105-1116.
- [12] 袁媛,李崇银,杨崧. 与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征[J]. 气象学报,2014,72(2):237-255.
- [13] 何溪澄,丁一汇,何金海,等. 中国南方地区冬季风降水异常的分析[J]. 气象学报,2006,64(5): 594-604.
- [14] 黄翀,张强,肖名忠. ENSO、NAO、IOD和PDO对珠江流域降水的影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2016,55(2):134-142.
- [15] 赵杰,乔云亭,王超. 湖南冬季降水的年代际突变及其影响因子[J]. 中山大学学报(自然科学版),2016, 55(2): 143-150.
- [16] 张福颖,黄乾,董丽娜. 热带海温影响我国南方冬季降水年际变化的年代际差异及其成因[J]. 气象科学,2019,39(5):635-643.
- [17] 彭京备. 东印度洋海温对中国南方冬季降水的影响[J]. 气候与环境研究,2012,17(3):327-338.
- [18] 任倩,何金海,祁莉,等. 中国南方冬季降水与前期暖池热含量异常的关系及可能机制[J]. 高原气象,2014,33(6):568-578.
- [19] 张自银,龚道溢,郭栋,等. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析[J]. 地理学报,2008,63(9): 899-912.
- [20] 田青,温敏,张人禾,等. 中国南方冬季持续性温湿异常事件的分类和特征分析[J]. 气象学报,2017,75(5):729-743.
- [21] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1996, 77: 437-472.
- [22] HUANG B, THORNE P W, BANZON V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. J Climate, 2017, 30(20):8179-8205.
- [23] 伍红雨,邹燕,刘尉. 广东区域性暴雨过程的定量化评估及气候特征[J]. 应用气象学报,2019,30(2): 233-244.
- [24] 索渺清,丁一汇,王遵娅. 冬半年南支西风 Rossby 波传播及其与南支槽形成的关系[J]. 应用气象学报,2008,19(6):731-740.
- [25] 林爱兰,李春晖,郑彬,等. 广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势[J]. 气象学报,2013,71(4):628-642.
- [26] 赵玉春,王叶红. 近30年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害,2009,28(3):193-202+228.
- [27] WALLACE J M, GUTZLER D S. Teleconnection in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Monthly Weather Review, 1981, 109:784-812.
- [28] LU R Y, JAI-HO O H, KIM B J. A teleconnection pat-

- tern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 2002, 54(1):44-55.
- [29] ENOMOTO T, HOSKINS B J, MATSUDA Y. The formation mechanism of the Bonin high in August[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129:157-178.
- [30] HONG X W, LU R Y, LI S L. Asymmetric relationship between the meridional displacement of the Asian westerly jet and the Silk Road Pattern [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35:21-28.
- [31] 黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展[J]. *大气科学*, 2016, 40(1):3-21.
- [32] HOREL J D, WALLACE J M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation [J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4): 813-829.
- [33] 黄荣辉. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究[J]. *大气科学*, 1990, 14(1):108-117.
- [34] 黄荣辉. ENSO及热带海-气相互作用动力学研究的新进展[J]. *大气科学*, 1990, 14(2):234-242.
- [35] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发的北半球大气环流遥相关型[J]. *大气科学*, 1997, 21(3): 283-288.
- [36] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发北半球大气遥相关的物理机制探讨 I. 正规模及有限时间不稳定奇异矢量分析[J]. *大气科学*, 1999, 23(4): 477-486.
- [37] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发北半球大气遥相关的物理机制探讨 II. 最优强迫模及其响应[J]. *大气科学*, 1999, 23(5): 571-580.
- [38] 陈芳丽, 黎伟标. 北半球大气遥相关型冬夏差异及其与温度场关系的探讨[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 513-523.
- [39] 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.
- [40] 任宏利, 刘颖, 左金清, 等. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014/2016 年超强厄尔尼诺事件的预测[J]. *气象*, 2016, 42(5):521-531.
- [41] WANG B, ZHANG Q. Pacific-East Asian teleconnection: Part II: How the Philippine sea anomalous anticyclone is established during El Nino development [J]. *J Climate*, 2002, 15(22):3252-3265.

(责任编辑 秦社彩)