

MJO 对南海夏季降水的调制及其对海洋表层盐度的影响

谢晓丽^{1,2,3}, 杨婧灵^{1,2,3}, 凌征^{1,2,3*}

(1. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088;
2. 陆架及深远海气候、资源与环境广东省高等学校重点实验室, 广东 湛江 524088;
3. 广东海洋大学 海洋近海海洋变化与灾害预警实验室, 广东 湛江 524088)

摘要: 基于向外长波辐射、降水、大气再分析资料和 HYCOM(HYbrid Coordinate Ocean Model)盐度等资料, 研究了 MJO(Madden-Julian Oscillation, 热带大气季节内振荡)对南海夏季降水的调制, 并初步探讨了其对海洋表层盐度的影响。结果显示: MJO 对南海夏季降水有显著的调制作用, 导致南海降水具有强的季节内变化, 其最显著周期为 45 d。降水季节内信号在泰国湾北部、吕宋岛以西和台湾岛西南等迎风坡区域较强, 而在越南外海的安南山脉背风区域较弱, 且降水信号会随着 MJO 信号向东北方向移动。MJO 对流抑制(活跃)中心所在区域, 低层大气辐聚减弱(增强), 中层大气对流减弱(增强), 导致降水减少(增加); 此外, MJO 对流抑制(活跃)中心伴随的反气旋式(气旋式)环流会改变风场, 风场减弱(增强)使得迎风区域的降水减少(增加)。MJO 引起的降水异常进一步影响南海盐度, 南海表层盐度也有明显的季节内变化特征, 其显著周期和降水基本一致, 为 47 d, 且盐度异常信号也随降水异常向东北移动。本研究结果有助于进一步了解南海降水和表层盐度的季节内变化特征。

关键词: 降水; MJO; 盐度; 南海

中图分类号:P466

文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2022)02-0209-11

doi:10.1236/j.issn.1671-6647.2022.02.005

引用格式: 谢晓丽, 杨婧灵, 凌征. MJO 对南海夏季降水的调制及其对海洋表层盐度的影响[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2):209-219. XIE X L, YANG J L, LING Z. The modulation of MJO on precipitation and its effect on sea surface salinity in the summer South China Sea[J]. Advances in Marine science, 2022, 40(2):209-219.

热带降水凝结潜热所释放的能量占据着驱动大气环流总能量的四分之三, 但由于降水在空间和时间上的巨大变化, 使其成为最难测量的大气参数之一^[1]。南海降水的时间和空间变化对大尺度能量和水循环(例如, 亚洲季风系统)有重要影响^[2], 深刻地影响着中国乃至全球的天气和气候变化。

南海位于东亚季风区, 风场变化影响着大尺度水汽输送, 从而对南海降水产生显著影响^[3]。在季风影响下, 南海降水呈现显著的季节变化特征: 降水夏秋季多、春冬季少, 降水中心春夏季北移, 秋冬季南撤^[4-5]; 并且强、弱季风年南海夏季降水存在显著差异, 呈现弱季风年减少, 强季风年增多的特征^[6]。伴随着夏季风爆发时间^[7-9]以及夏季风建立、维持和撤退期的不同^[10-12], 南海降水特征也存在明显差异。江静和钱永甫^[13]表明季风爆发时期南海降水从小范围向大范围调整, 季风爆发后雨带主要出现在南海 10°N 以北的中部和北部。闫俊岳等^[8]发现 2002 年南海季风爆发过程中雨带在南北和东西方向上发生变化, 季风爆发时南海降水表现为单雨带型, 位于南海北部; 而季风爆发后单雨带向南海中部和北部偏移并转为“鉗”型的双雨带, 其“鉗”型顶端位于南海中北部和南部, 随后双雨带向西和向北移动, 南海中部被南侧雨带控制。宋明坤等^[14]发现在南海夏季风爆发后, 强降水出现的比例有所增加, 而弱降水所占比例减小, 并且在水平结构中降水低

收稿日期:2021-03-25

资助项目: 广东海洋大学启动经费资助项目——热带气旋与地形相互作用对南海影响研究(R17073)

作者简介: 谢晓丽(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事台风及海气相互作用方面研究. E-mail: xiexiaoli_ocean@163.com

* 通信作者: 凌征(1981—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事南海台风及海气相互作用方面研究. E-mail: lingz@gdou.edu.cn

(李燕 编辑)

值中心发生了偏移,对流降水(层云降水)由原来的南海中北部移至其南部(西北部)。而在垂向结构上降水率随高度变化显著加大,释放的潜热通量增加。海陆热力差异以及广泛分布的山地地形^[15-16]会影响夏季风,进而使得南海夏季降水呈现南部高于北部、东部高于西部的分布^[5,17]。在年际变化尺度上,南海降水受ENSO(El Niño-Southern Oscillation)调制。简茂球等^[18]发现前冬ENSO暖事件(冷事件)使得南海-菲律宾附近出现持续的异常反气旋(气旋)可影响次年5、6月份南海降水,引起南海降水负(正)异常。晏宏等^[19]发现年平均ENSO指数与西沙群岛海域年降水量呈现显著负相关关系,降水量在典型拉尼娜年比厄尔尼诺年多约50%。此外,南海是热带气旋活跃区域,热带气旋带来的降水不容忽视,研究表明在热带气旋活跃季(5—12月),热带气旋贡献了南海总降水的13.71%^[20]。

MJO(Madden-Julian Oscillation,热带大气季节内振荡)是热带大气最主要的季节内信号(生命周期约为30~60 d)^[21],其通过对流异常的强迫和遥相关作用对降水产生重要影响^[22-27]。作为MJO信号途经区域,南海深受MJO的影响,研究表明MJO对南海上层环流^[28]、风场^[29-30]和夏季越南外海冷舌^[31-32]等均有重要影响。此外,有研究表明南海及周边地区降水存在2个显著的季节内振荡信号,即以53.8 d为峰值的50~70 d振荡和以32 d为峰值的13~36 d振荡^[33],这说明MJO可能对南海降水有着重要的调制作用。降水的变化必然进一步影响海洋上层盐度和层结,进而对海洋上下层动量和热量交换以及海洋生态环境产生重要影响。目前关注较多的是MJO对陆地降水的影响^[34-35],鉴于MJO对南海降水影响研究较少,本文拟探讨夏季南海区域MJO对降水的影响,并在此基础上分析其对海洋表层盐度的影响。

1 数据和方法

1.1 数据来源

在本文中使用了向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)、降水、大气以及海洋盐度数据资料,数据具体来源如下:

1)OLR数据使用的是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的逐日资料(网址:https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.interp_OLR.html#detail)^[36],时间跨度为1974年6月至2019年12月,时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.25°×0.25°。

2)降水数据为NASA(National Aeronautics and Space Administration)的戈达德地球科学数据和信息服务中心提供的TMPA(Tropical Rainfall Measuring Mission-Multi-satellite Precipitation Analysis)数据产品的逐3 h多卫星降水资料(网址:<http://dx.doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/3H/7>)^[37],时间跨度为1998年1月1日至2019年12月31日,空间分辨率为0.25°×0.25°。

3)大气资料(500 hPa垂向速度以及925 hPa风场和散度)源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的ERA5再分析资料^[38](网址:<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#! /dataset/reanalysis-era5-pressure-levels? tab=overview>)。时间跨度为1979年至2019年,空间分辨率为0.25°×0.25°。

4)盐度数据为HYCOM(HYbrid Coordinate Ocean Model)模式模拟的2008—2018年的逐日数据^[39](网址:<https://www.hycom.org/>),空间分辨率为(1/12)°×(1/12)°,深度从0至5 500 m共33层,选用区域为(100~130°E,0~25°N)。

1.2 方法

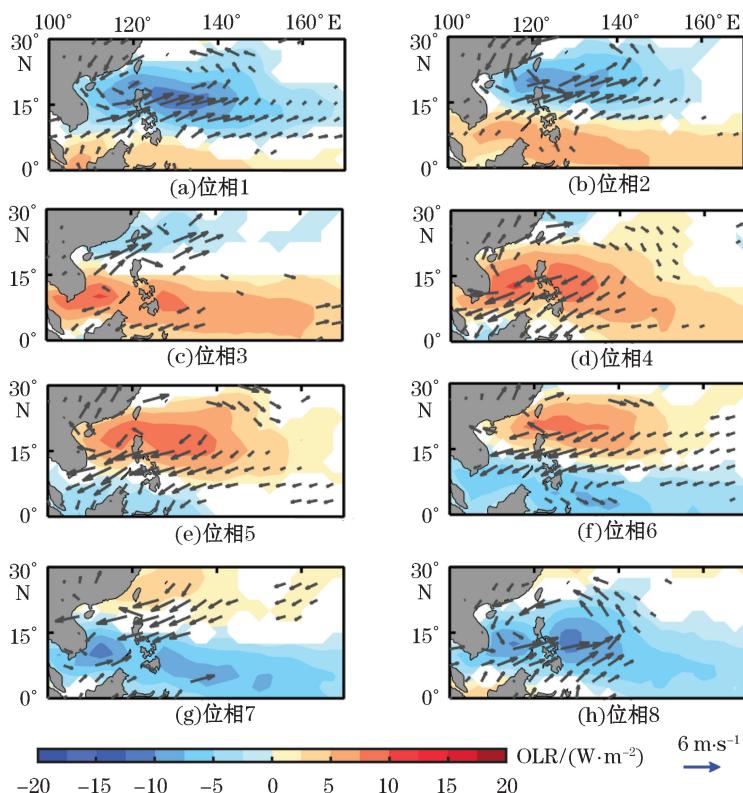
首先对(100~170°E,0~30°N)区域内的OLR数据进行30~60 d带通滤波以提取季节内尺度的信号,并对滤波后的OLR数据进行经验正交函数分解,参考Li和Zhou^[40-41]以及Jia等^[42]的方法,根据前2个模态的时间序列划分出MJO的8个位相。在此基础上,利用合成分析等方法得到MJO各位相夏季降水、大

气环流场和盐度异常特征。

2 结 果

2.1 夏季南海MJO信号传播特征

图1为MJO各位相夏季西北太平洋OLR和925 hPa大气环流场的变化特征。由图1可见,夏季西北太平洋30~60 d滤波的OLR信号呈现正负交替出现,并向东北方向传播的特征。就南海而言,MJO对流抑制中心在位相1开始进入南海南部,接着向东北传播,至位相7移出南海;其强度在位相1~4逐渐增强,在位相5~6开始减弱;其伴随的反气旋式风场异常使得其南侧(北侧)的西南季风减弱(增强)。MJO对流中心在位相5进入南海南部,随后逐渐增强并向东北传播,至位相3基本移出南海;其伴随的气旋式环流使得其南(北)侧的西南季风增强(减弱),随着其北移,西南季风增强的区域也逐渐扩大且北移。



注:图中值均通过了95%置信度水平检验。

图1 夏季MJO各位相30~60 d带通滤波OLR和925 hPa风速异常场

Fig.1 Composite maps of anomalous 925 hPa wind and 30-60 days filtered OLR in each phase of MJO in summer

2.2 MJO对南海夏季降水的影响

为研究MJO调制下南海降水的季节内变化,利用高斯滤波器提取了降水30~60 d周期的季节内信号,图2a为南海夏季30~60 d带通滤波后降水的标准差分布特征。如图2a所示,南海降水具有明显的季节内信号,其标准差在东部大部分区域都较大。标准差极大值主要出现在泰国湾北部、台湾岛西南部和吕宋岛西部等迎风坡区域;极小值则主要出现在安南山脉以东的背风坡区域。图2b为30~60 d带通

滤波后降水功率谱,峰值出现在45 d,与MJO的显著周期基本一致,也表明MJO对南海夏季降水有明显的调制作用。

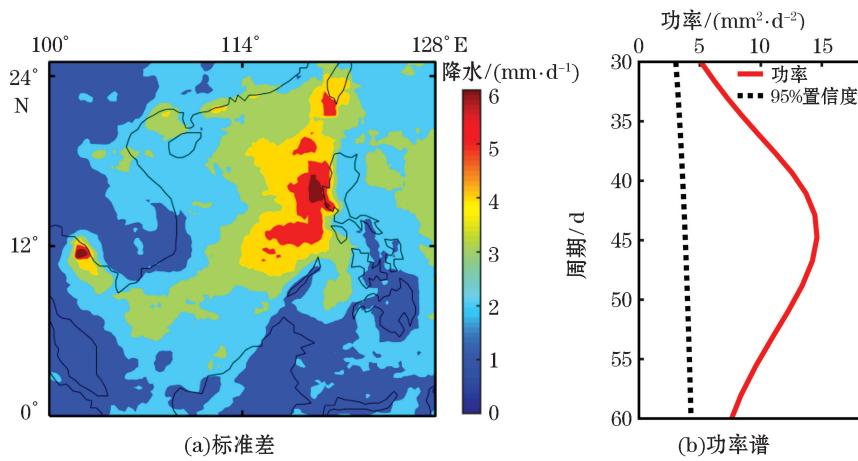
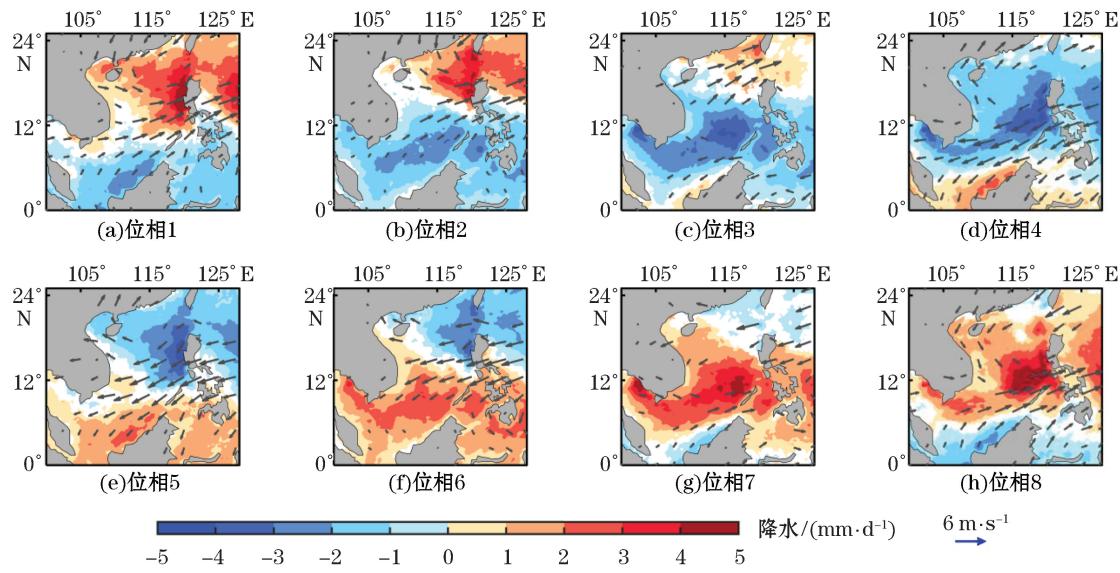


图2 南海夏季30~60 d带通滤波降水的标准差和功率谱

Fig.2 Standard deviation and power spectra of 30-60 days filtered precipitation in summer in the South China Sea

图3为MJO各位相南海夏季30~60 d降水异常。如图所示,南海夏季降水呈现出和MJO信号一致的正负异常交替变化。随着MJO对流抑制中心在位相1进入南海南部,南海南部降水开始减少,降水负异常也随对流抑制中心向东北移动而移动;位相2到达南海中南部,位相3~4继续北移,吕宋以西由于西南季风减弱,在迎风坡区域降水明显减少;位相5~6到达南海中北部,降水负异常中心主要位于吕宋岛西北部和台湾海峡;位相7基本移出南海,仅在台湾海峡存在较弱的降水负异常。MJO对流中心伴随的降水正异常信号则在第5位相开始影响南海南部,随后逐渐向东北移动;位相6~7主要影响南海中南部,位相8则达到南海中部,位相1和2则主要影响吕宋海峡和台湾海峡以西区域,第3位相移出南海。



注:图中值均通过了95%置信度水平检验。

图3 南海夏季MJO各位相30~60 d带通滤波降水异常和925 hPa风速异常

Fig.3 Composite maps of 30-60 days filtered precipitation and 925 hPa wind anomalies in each phase of MJO

为了更好地显示MJO影响下降水异常信号的传播特征,选取 115°E 和 15°N 两个断面计算了OLR以及降水异常随时间的变化(图4)。从整体上看,南海夏季OLR对流信号和降水中心随着MJO位相的变化呈现正负交替出现的传播特征,OLR正(负)异常与降水负(正)异常位置基本重合。对于 115°E 断面(图4a),在位相2~5,MJO对流抑制中心和降水负异常中心在南海南部开始往北传,最终达到南海北部,在位相6信号开始转变,对流中心和降水正异常出现在南海南部,在位相7、8、1往北传(图4a)。与北向传播相比, 15°N 断面OLR异常和降水异常信号向东传播的特征不明显,仅表现出正负交替的特征(图4b)。其原因在于南海海盆东西向较窄,同时MJO信号东西向较宽,使得OLR和降水异常信号基本覆盖了整个南海东西向(图1和图3),故信号未表现出明显的东传特征。

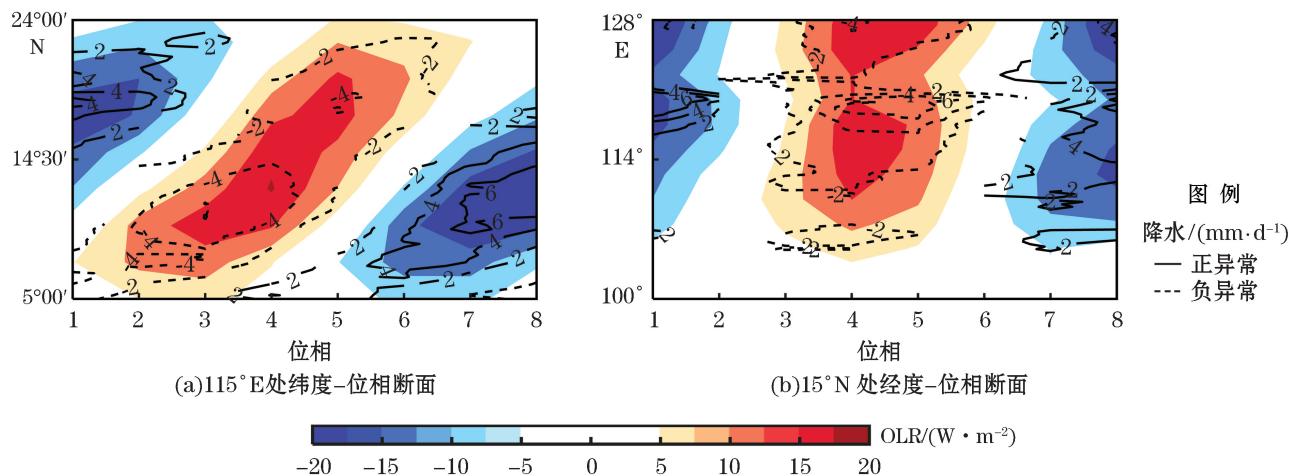
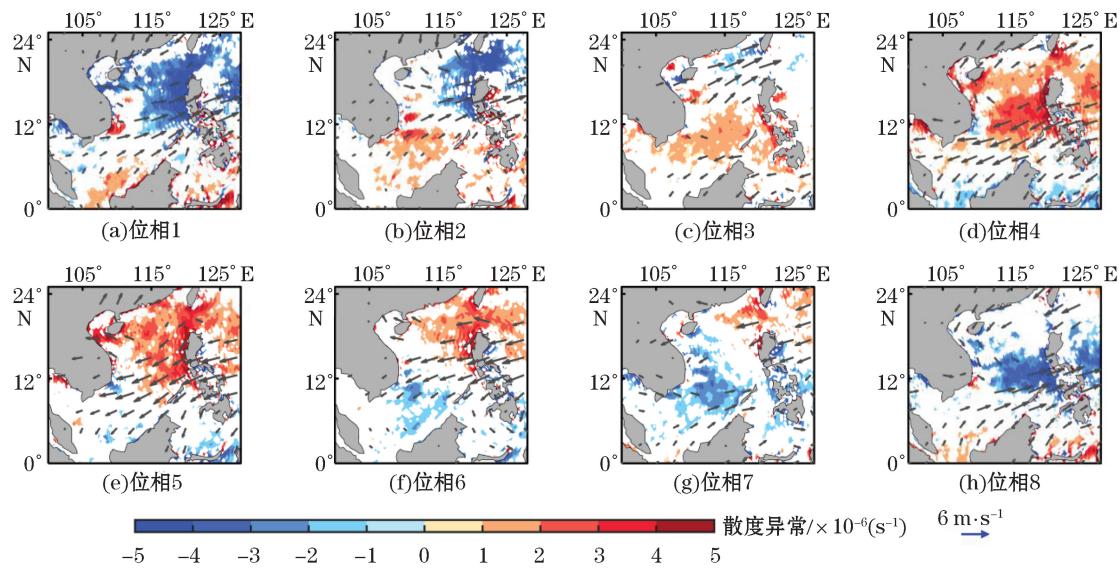


图4 115°E和15°N断面的30~60 d带通滤波OLR和降水异常

Fig.4 Anomalies of the 30–60 days filtered OLR and precipitation along the 115°E and 15°N sections

2.3 大气环流场分析

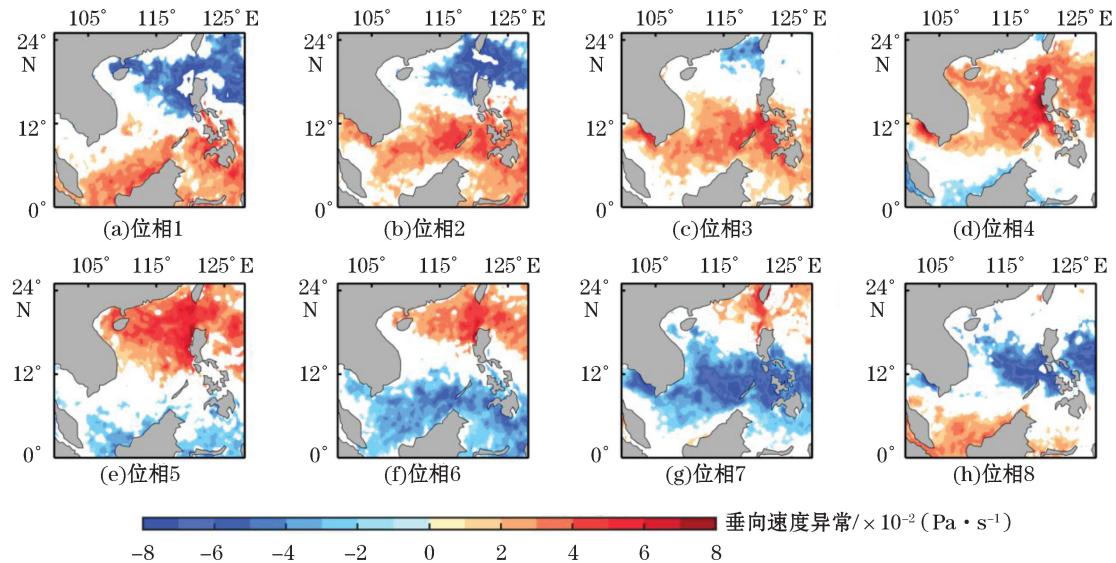
降水与低层大气的辐聚辐散和中层大气对流密切相关^[40,43],为了解MJO是如何调制南海的降水,进一步分析了MJO各位相的925 hPa风场及其散度场(图5)以及500 hPa垂向风速(图6)。如图5和图6所示,925 hPa风场散度和500 hPa垂向速度异常场均和MJO信号有很好的对应关系;在MJO对流活跃中心(对流抑制中心),低层大气辐聚(辐散),中层大气对流增强(减弱);随着MJO信号的传播,其也随之向东北传播。从各位相看,在位相1,南海北部被强的对流活跃中心控制,南海大部分区域西南季风增强,低层大气辐聚增强,中层大气对流增强,使得降水增加;南海南部受MJO对流抑制中心影响表现为辐聚减弱,中层大气对流减弱,使得降水减少。在位相2,随着MJO信号向东北移动及对流抑制(活跃)中心的增强(减弱),南海东北部(中南部)辐聚增强(减弱),中层大气为异常的上升(下沉)运动,使得降水增加(减少)。至位相3~5,南海大部分海域被强的对流抑制中心控制,除南海北部陆架区域外,西南季风减弱,导致辐聚减弱和中层大气对流减弱,南海降水减少;降水减少极大值出现在菲律宾以西迎风区域,这是由于西南季风减弱使得迎风区域低层大气辐聚和中层对流减弱所致;其位置也随着MJO信号的北移而北移。MJO对流活跃中心在位相6开始影响中南部,使得低层大气辐聚和中层大气对流增强,降水增多;而东北部仍然被对流抑制中心控制,低层大气辐聚和中层大气对流减弱,降水减少。在位相7~8,南海被对流活跃中心控制,几乎整个南海呈现低层大气辐聚和中层对流增强,降水增多;由于西南季风增强,菲律宾以西迎风区域,低层大气辐聚和中层对流显著增强,导致降水正异常。



注:图中值均通过了95%置信度水平检验。

图5 南海夏季MJO各位相925 hPa风场异常和散度异常

Fig.5 Composite maps of anomalous 925 hPa wind and divergence in each phase of MJO



注:图中值均通过了95%置信度水平检验。

图6 南海夏季MJO各位相500 hPa垂向速度异常场

Fig.6 Composite maps of anomalous 500 hPa vertical velocity in each phase of MJO

2.4 MJO 调制下降水对南海盐度的影响

降水的变化改变了海气间淡水通量,进而对盐度产生影响。图7a为30~60 d带通滤波后南海夏季表层盐度标准差分布,如图所示,表层盐度季节内信号在泰国湾、中南半岛南端、北部湾以及广东沿岸等有径流输入区域出现较大值;其次,吕宋岛以西和南海海盆南部的季节内信号也较强;极小值则出现在马来西亚东部海域。如图7b所示,30~60 d带通滤波表层盐度最显著周期为47 d,略大于降水周期峰值(45 d)。

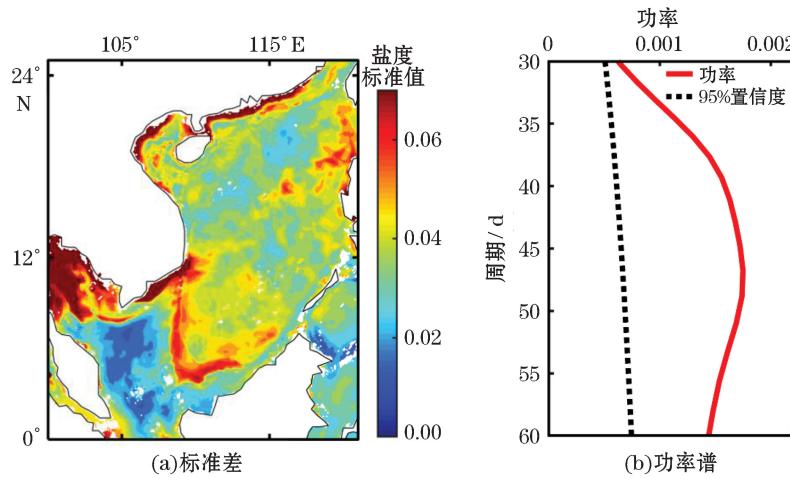
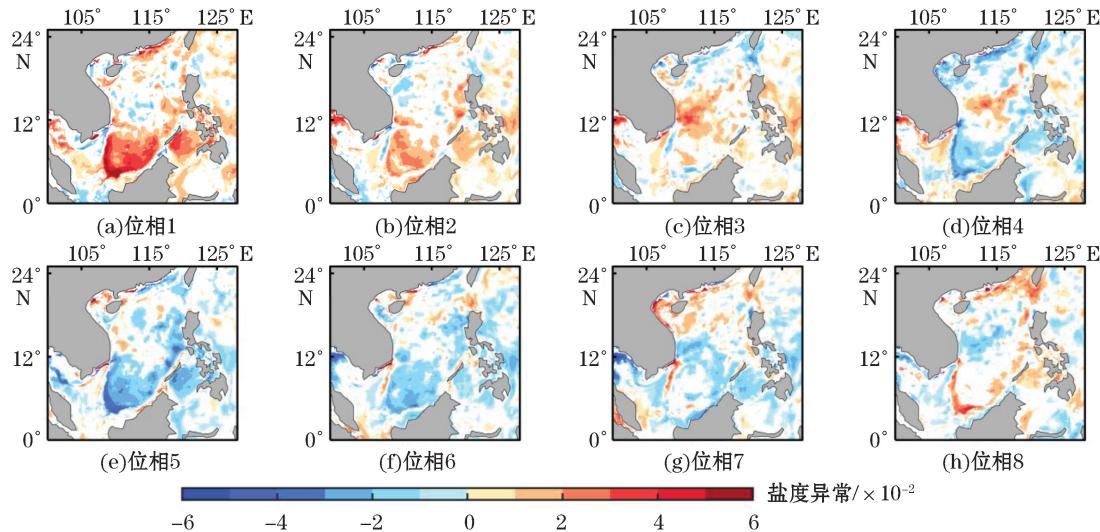


图7 南海夏季30~60 d带通滤波表层盐度的标准差和功率谱密度

Fig.7 Standard deviation and power spectrum density of 30-60 days filtered summer surface salinity in the South China Sea

图8为MJO各位相南海夏季30~60 d带通滤波表层盐度异常场。如图8所示,南海夏季表层盐度与MJO均呈现较为一致的正负交替变化特征,表层盐度与降水之间具有较强的负相关关系。在MJO对流活跃(抑制)中心,降水出现增强(减弱),使得更多(更少)的淡水输入海洋表层,造成了海表盐度的降低(升高),这种特征也随着MJO信号的传播而向东北方向移动。从各位相看,在位相1,南海北部被强的对流活跃中心控制造成降水增加,盐度降低;南海南部受MJO对流抑制中心控制使得降水减少,盐度升高。在位相2~3,受MJO信号向东北移动的影响,对流抑制(活跃)中心北移,南海降水负(正)异常区域北移,造成了南海南部(北部)的盐度正(负)异常中心也随之北移。在位相4,由于MJO抑制中心位于南海中部,降水负异常基本控制整个南海的同时也抑制着淡水输送,造成了南海中部的盐度升高,其极大值出现在吕宋以西区域;此时南海南部开始出现降水正异常,造成该区域盐度降低。从位相5~6开始,随着MJO活跃(抑制)中心的进一步北移,在位相4便已经形成的南海南部低盐中心伴随着降水正异常的北移而北移。在位相7~8,由于MJO活跃中心北移并控制着南海,低盐中心伴随着中南部降水正异常的北移而移动;至位相8时低盐中心位于南海中部。



注:图中值均通过了95%置信度水平检验。

图8 南海夏季MJO各位相30~60 d带通滤波表层盐度异常场

Fig.8 Composite maps of anomalous 30-60 days filtered summer surface salinity in each phase of MJO

3 结 论

本文利用卫星遥感降水资料、大气再分析资料和 HYCOM 海洋盐度数据研究了 MJO 对南海夏季降水的调制及其对表层盐度的影响,结果表明:

1) MJO 对南海夏季降水有显著的调制作用,导致南海降水具有强的季节内变化,其最显著周期为 45 d;降水季节内信号在泰国湾北部、吕宋岛西部和台湾岛西南部等山脉的迎风区域较大,而在越南外海的安南山脉背风区域较小;降水异常信号随 MJO 信号向东北方向移动。

2) 在 MJO 对流活跃(抑制)中心所在区域,低层大气辐聚(辐散),中层大气对流增强(减弱),导致降水增加(减弱)。此外,MJO 可调制季风强弱,风场增强(减弱)使得迎风区域降水显著增加(减少)。

3) MJO 引起的降水异常进一步影响南海表层盐度,南海表层盐度也有明显的季节内变化特征,其显著周期和降水基本一致,为 47 d。海表盐度异常和降水异常有很好的对应关系:盐度随降水增加(减少)则减少(增加),且也表现为明显的北传特征。

参考文献(References):

- [1] KUMMEROW C, SIMPSON J, THIELE O, et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(12): 1965-1982.
- [2] ISLAM M N, TERAO T, UYEDA H, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in and around Bangladesh[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2005, 83(1): 21-39.
- [3] 柳艳菊, 丁一汇, 宋艳玲. 1998 年夏季风爆发前后南海地区的水汽输送和水汽收支[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1): 55-62. LIU Y J, DING Y H, SONG Y L. The moisture transport and moisture budget over the South China Sea before and after the summer monsoon onset in 1998[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(1): 55-62.
- [4] 叶清文, 李江南, 罗家林, 等. 基于 TRMM 卫星探测的南海及周边地区降水、云和潜热特征的比较研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 419-432. YE Q W, LI J N, LUO J L, et al. Comparison study on precipitation cloud and latent heat characteristics over the South China Sea and its surrounding areas based on TRMM[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(3): 419-432.
- [5] 陈举, 施平, 王东晓, 等. TRMM 卫星降雨雷达观测的南海降雨空间结构和季节变化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 29-35. CHEN J, SHI P, WANG D X, et al. Spatial distribution and seasonal variability of the rainfall observed from TRMM precipitation radar in the South China Sea area[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(1): 29-35.
- [6] 柳艳菊, 闫俊岳, 丁一汇. 南海夏季风异常及其对南海与周边地区的大气和海洋要素的影响[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 39-50. LIU Y J, YAN J Y, DING Y H. Anomalies of the South China Sea summer monsoon and their influence on the atmospheric and oceanic elements over the South China Sea as well as its adjacent regions[J]. Haiyang Xuebao, 2008, 30(6): 39-50.
- [7] ZENG Q W, ZHANG Y, LEI H C, et al. Microphysical characteristics of precipitation during pre-monsoon, monsoon, and post-monsoon periods over the South China Sea[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(10): 1103-1120.
- [8] 闫俊岳, 唐志毅, 姚华栋, 等. 2002 年南海季风建立及其雨带变化的天气学研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5): 569-579. YAN J Y, TANG Z Y, YAO H D, et al. A synoptic study on establishment of the monsoon and associated variation of rain belt over the South China Sea in 2002[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(5): 569-579.
- [9] 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件[J]. 气象学报, 2005, 63(4): 431-442. LIU Y J, DING Y H, ZHAO N. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the south china sea in 1998: I analysis of large-scale fields for occurrence and development of mesoscale convective systems[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(4): 431-442.
- [10] 冯瑞权, 王安宇, 梁建茵, 等. 南海夏季风撤退期的气候特征 I ——40 年平均[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 7-13. FONG S K, WANG A Y, LIANG J E, et al. Climatic characteristics of the retreat of South China Sea summer monsoon I: 40-year Means[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(1): 7-13.
- [11] 林建恒, 王安宇, 冯瑞权, 等. 南海夏季风维持期的气候特征 I ——40 年平均[J]. 热带气象学报, 2005, 21(2): 113-122. LAM K, WANG A Y, FONG S K, et al. The climatic characteristics of maintaining period of South China Sea summer monsoon 40 yearly average[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(2): 113-122.

- [12] 冯瑞权, 王安宇, 吴池胜, 等. 南海夏季风建立的气候特征 I——40 年平均[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 345-354. FENG S K, WANG A Y, WU C S, et al. Climatological features of the establishment of South China Sea summer monsoon I: 40-year mean[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(4): 345-354.
- [13] 江静, 钱永甫. 南海地区降水的时空特征[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 60-69. JIANG J, QIAN Y F. The general character of precipitation over the South China Sea[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(1): 60-69.
- [14] 宋明坤, 李耀东, 胡亮. 夏季风爆发前后南海地区降水性质的变化[J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 339-348. SONG M K, LI Y D, HU L. An analysis of precipitation during South China Sea monsoon onset period in South China Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(3): 339-48.
- [15] 金敬华, 何金海, 祝从文. 亚洲南部地区海陆分布对亚洲冬季风影响的数值试验[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 34-44. JIN Q H, HE J H, ZHUC W. Impact of ocean-continent distribution over southern Asia on the formation of winter monsoon[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2): 34-44.
- [16] 陈晶华, 陈隆勋. 亚洲南部的海陆分布对亚洲夏季风形成的作用[J]. 应用气象学报, 1991, 2(4): 355-361. CHEN J H, CHEN L X. Influence of ocean-continent distribution in the south part of Asia on the formation of Asian summer monsoon[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1991, 2(4): 355-361.
- [17] LIU Q, FU Y F. An examination of summer precipitation over Asia based on TRMM/TMI[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(3): 430-441.
- [18] 简茂球, 乔云亭, 罗会邦. 南海夏季风爆发前后低纬大气环流突变特征[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 356-362. JIAN M Q, QIAO Y T, LUO Y B. The abrupt change of the circulation in low-latitudes during the period from April to June[J]. 2000, 5(4): 356-362.
- [19] 晏宏, 孙立广, 刘晓东, 等. 近 50 年来南海西沙群岛海域气候异常的 ENSO 效应[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(5): 32-38. YAN H, SUN L G, LIU X D, et al. Relationship between ENSO events and regional climate anomalies around the Xisha Islands during the last 50 years[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(5): 32-38.
- [20] 凌征. 热带气旋对南海上层海洋影响研究[D], 青岛: 中国海洋大学, 2011. LING Z. The influence of tropical cyclones on the upper layer ocean in the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [21] ZHANG C D. Madden-Julian oscillation[J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43(2): 1-36.
- [22] BOND N A, VECCHI G A. The influence of the Madden-Julian oscillation on precipitation in Oregon and Washington[J]. Weather and Forecasting, 2003, 18(4): 600-613.
- [23] DONALD A, MEINKE H, POWER B, et al. Near-global impact of the Madden-Julian oscillation on rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(9): L09704.
- [24] XAVIER P, RAHMAT R, CHEONG W K, et al. Influence of Madden-Julian oscillation on Southeast Asia rainfall extremes: observations and predictability[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(12): 4406-4412.
- [25] WHEELER M C, HENDON H H, CLELAND S, et al. Impacts of the Madden-Julian oscillation on Australian rainfall and circulation [J]. Journal of Climate, 2009, 22(6): 1482-1498.
- [26] LIEBMANN B, KILADIS G N, VERA C S, et al. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the low-level jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic convergence zone[J]. Journal of Climate, 2004, 17(19): 3829-3842.
- [27] MATTHEWS A J, HOSKINS B J, MASUTANI M. The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(601): 1991-2011.
- [28] WANG G H, LING Z, WU R G, et al. Impacts of the Madden-Julian oscillation on the summer South China Sea ocean circulation and temperature[J]. Journal of Climate, 2013, 26(20): 8084-8096.
- [29] 穆明权, 李崇银. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 375-387. MU M Q, LI C Y. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and activity of atmospheric intraseasonal oscillation[J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(4): 375-387.
- [30] 林爱兰, 谷德军, 李春晖, 等. 赤道 MJO 活动对南海夏季风爆发的影响[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 28-44. LIN A L, GU D J, LI C H, et al. Impact of equatorial MJO activity on summer monsoon onset in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 28-44.
- [31] NGO M H, HSIN Y C. Impacts of wind and current on the interannual variation of the summertime upwelling off southern Vietnam in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(6): 20-21.
- [32] ISOGUCHI O, KAWAMURA H. MJO-related summer cooling and phytoplankton blooms in the South China Sea in recent years[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): 597-613.
- [33] 梁建茵, 林爱兰, 李春晖. 南海及周边地区 TBB 季节内振荡及其与 ENSO 的联系[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 267-277. LIANG J Y, LIN A L, LI C H. ISOs of TBB over SCS and vicinity as well as its relationship with ENSO[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63

(3): 267-277.

- [34] 郝立生, LI TIM, 马宁, 等. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响[J]. 大气科学, 2020, 44(3): 187-204. HAO L S, LI T, MA N, et al. Influence of MJO on summer precipitation in North China in 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(3): 187-204.
- [35] 李汀, 严欣, 瑶建华. MJO 活动对云南 5 月降水的影响[J]. 大气科学, 2012, 36(6): 1101-1111. LI T, YAN X, JU J H. Impact of MJO activities on precipitation in may over Yunnan[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(6): 1101-1111.
- [36] LIEBMANN B, SMITH C A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(6): 1275-1277.
- [37] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, NELKIN E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55.
- [38] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [39] BLECK R, BOUDRA D B. Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(6): 755-770.
- [40] LI R C Y, ZHOU W. Modulation of Western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. Part I: genesis and intensity[J]. Journal of Climate, 2013, 26(9): 2904-2918.
- [41] LI R C Y, ZHOU W. Modulation of Western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. Part II: tracks and landfalls[J]. Journal of Climate, 2013, 26(9): 2919-2930.
- [42] JIA X L, YANG S. Impact of the quasi-biweekly oscillation over the western North Pacific on East Asian subtropical monsoon during early summer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10): 4421-4434.
- [43] 白旭旭, 李崇银, 李琳. MJO 对中国春季降水影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 986-1003. BAI X X, LI C Y, LI L. Numerical simulation study of the Madden-Julian oscillation influences on spring precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(5): 986-1003.

The Modulation of MJO on Precipitation and Its Effect on Sea Surface Salinity in the Summer South China Sea

XIE Xiao-li^{1,2,3}, YANG Jing-ling^{1,2,3}, LING Zheng^{1,2,3}

(1. College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, Zhanjiang 524088, China;

3. Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The modulation of MJO (Madden-Julian Oscillation) on the summer precipitation and its effect on sea surface salinity in the South China Sea is investigated based on the outgoing longwave radiation, precipitation, atmospheric reanalysis data and HYCOM salinity, with the composite analysis, significance test and correlation analysis. The MJO has significant modulation effects on the summer precipitation in the South China Sea, which exhibits strong intraseasonal variation with period of 45 days. The intraseasonal signal of precipitation shows significant changes in the windward slope including the northern Gulf of Thailand, the west of Luzon Island and the southwestern Taiwan Island, while weak in the leeward slope of the Annam mountains near Vietnam, and moves northeastward with the MJO signal. The analysis of dynamic factors suggests that the impact of the convergence in the lower troposphere and the convection in the middle troposphere is suppressed (enhanced) in the region of inactive (active) MJO convection, leading to low (high) precipitation. The influence between wind and anticyclonic (cyclonic) circulation followed by

inactive (active) MJO convection shows that weak (strong) wind maintain lower (high) precipitation in the windward slope. The MJO-induced anomalous precipitation also influences the salinity of the South China Sea, causing strong intraseasonal variation in salinity with period is 47 days. The salinity anomaly signal moves northeastward with the precipitation anomaly.

Key words: precipitation; MJO; salinity; the South China Sea

Received: March 25, 2021