

贺铮,徐邦琪,高迎侠. BCC S2S 模式对亚洲夏季风准双周振荡预报评估. 应用气象学报,2018,29(4):436-448.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180405

# BCC S2S 模式对亚洲夏季风准双周振荡预报评估

贺 铮 徐邦琪\* 高迎侠

(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

## 摘 要

利用 1994—2013 年 ERA-Interim 及 NCEP/NCAR 再分析数据,对国家气候中心(BCC)次季节到季节尺度模式(S2S)1994—2013 年的回报试验数据进行亚洲季风区准双周振荡(QBWO)预报能力评估,并诊断模式预报误差来源。结果表明:BCC S2S 模式对 QBWO 的预报能力随着预报提前时间的增长而降低,9 d 后预报技巧明显减弱,其周期、传播特征和强度出现误差;在提前 9 d 预报中,印度洋地区 QBWO 对流-环流系统结构松散,信号偏弱,对流向东传播,这与印度洋平均态的预报误差有关,夏季对流平均态低层水汽场在西太平洋和阿拉伯海较强,而东印度洋、孟加拉湾一带偏弱;西北太平洋地区 QBWO 具有向西北传播的特征,但强度偏弱,可能原因是预报低估了 QBWO 对流西北侧低层涡度的超前信号,经涡度方程诊断发现,地转涡度平流正贡献微弱,相对涡度平流在对流西北侧引发负涡度,从而减弱了对流西北侧由低层正涡度引发的有利条件。

**关键词:** BCC S2S 模式; 准双周振荡; 预报技巧; 模式误差诊断

## 引 言

季节内振荡(ISO)是赤道及副热带地区季节内尺度变率的主要模态,由 Madden 和 Julian 首先发现,也称作 Madden-Julian Oscillation (MJO)<sup>[1-2]</sup>。MJO 的对流和环流系统沿赤道向东传播,北半球冬季时信号较强,夏季时赤道东传的信号明显减弱,出现由赤道向北传播进入亚洲季风区的特征<sup>[3-5]</sup>。季节内振荡在移行过程中与不同的天气和气候系统相互作用,对全球天气、气候变率以及极端天气有重要影响<sup>[6-7]</sup>。季节内振荡作为天气和气候系统之间的模态,对其模拟和预报能力的提升成为提高延伸期预报的关键,这也是世界气象组织提出次季节至季节预报(subseasonal to seasonal prediction, S2S)计划的重要目的<sup>[8]</sup>。

北半球夏季季节内振荡的结构和传播比冬季 MJO 复杂,主要包括低频 30~90 d 向东、东北传播

的 MJO 以及高频 10~30 d 向北、西北传播的准双周振荡(quasi-biweekly oscillation, QBWO)。前者与赤道东传的 MJO 关系密切,周期较长,于季风区出现北传分量,对流和环流系统呈现西北—东南倾斜的结构,持续向东、东北传播<sup>[9-11]</sup>,且与印度季风降水<sup>[12-14]</sup>和东亚地区极端降水<sup>[15-17]</sup>以及高温事件的发生<sup>[18]</sup>关系密切。10~30 d 准双周振荡为东北—西南倾斜的对流和环流,由赤道印度洋和西太平洋上向北、西北传播<sup>[11,19-21]</sup>,不仅对西北太平洋上的台风活动产生影响<sup>[22-23]</sup>,当 QBWO 信号传播至亚洲季风区时,也会影响南海季风<sup>[24]</sup>,引发强降水<sup>[25-27]</sup>和持续高温事件<sup>[18]</sup>。亚洲季风区季节内振荡的传播机制至今仍未有定论。有关低频 MJO 在印度季风区北传的理论包括:罗斯贝波对赤道东传对流信号的响应<sup>[28]</sup>、垂直风切变引起的涡度超前<sup>[29-30]</sup>以及环流-水汽-对流反馈<sup>[29]</sup>等。而东亚—西北太平洋季风区季节内振荡向北、西北传播的原因包括赤道罗斯贝波的西传<sup>[31]</sup>、对流北侧、西北侧的正

2018-03-09 收到,2018-05-17 收到再改稿。

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB453200)

\* 通信作者, 邮箱: pangchi@nuist.edu.cn

涡度超前<sup>[32-33]</sup>、对流西北侧的水汽辐合引发较不稳定的大气层结<sup>[32]</sup>等。

季节内振荡是延伸期或次季节尺度预报的主要可预报性来源<sup>[34-36]</sup>,对季节内振荡的正确模拟和预报有助于提高延伸期或次季节天气预报的能力。由于季节内振荡周期、结构和移动特征的复杂性,大气模式对季节内振荡的模拟能力偏低<sup>[34,37]</sup>。近年来,随着模式物理和参数化方案的改进以及统计预报模型的研发,目前动力模式和统计模型对于赤道东传的 MJO 有 20~30 d 有效预报技巧<sup>[38-39]</sup>。相对于对赤道东传 MJO 的预报技巧,模式对夏季北传季节内振荡的预报能力偏弱,Fu 等<sup>[40]</sup>评估了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家环境预报中心(NCEP)业务预报模式及夏威夷大学海气耦合模式对夏季季风区季节内降水的预报能力,发现模式的预报技巧在 1~2 周后迅速降低。Lee 等<sup>[41]</sup>分析了参与大气季节内变率回报试验(ISVHE)的 6 个预报模式,并指出单一模式对夏季季节内振荡实时指数<sup>[11]</sup>的预报技巧为 5~15 d,集合预报技巧可提高至 10~30 d。然而,目前这些模式评估研究多关注于 30~90 d 低频的季节内振荡信号<sup>[40-41]</sup>,对 10~30 d QBWO 预报技巧评估鲜见报道。

为了提高季节内振荡的预报能力,填补中长期天气预报到季节预测之间的缝隙,S2S 预测计划中一个重要的任务就是了解目前业务模式对季节内振荡的预报能力,评估和诊断模式对季节内振荡模拟的误差来源,进而改进模式的 S2S 预报能力<sup>[8]</sup>。目前,全球已有 11 家单位提供 9 个模式的模拟结果,S2S 试验数据可分别在中国气象局(CMA)和 ECMWF 的 S2S 数据中心获取。

中国气象局国家气候中心(Beijing Climate Center,BCC)的业务预报模式目前也参与了 S2S 预报项目。BCC\_AGCM2.1 和 BCC\_CSM1.1 曾经参与 CMIP5 项目,对气候变化的模拟显示出一定技巧,而对季节内振荡的模拟存在偏差,如 BCC\_AGCM2.1 和 BCC\_CSM1.1 低估了 MJO 强度,MJO 的周期偏短和西传偏强<sup>[42]</sup>。关于 BCC\_AGCM2.2 模式的模拟,吴捷等<sup>[43]</sup>诊断其 MJO/夏季季节内振荡(BSISO)提前预报有效时间为 16 d 和 10 d;Fang 等<sup>[44]</sup>发现模式低估东亚地区的 ISO 信号,但高估西北太平洋地区的 ISO 强度,且无法掌握季节内振荡传播的特征。BCC S2S 模式版本为 BCC\_CSM1.2,对 1994—2017 年每日进行未来 60 d 的预报。Liu 等<sup>[45]</sup>对 BCC S2S 预

报模式中的冬季沿赤道东传的 MJO 预报技巧进行评估,其指出 BCC S2S 模式可以提前 16 d 正确预报到 MJO 的空间模态、时间演变和传播特征。过去研究多关注 BCC 模式对冬季 MJO 的模拟和预报能力,对于影响亚洲季风区灾害天气发生的夏季季节内振荡(尤其是 QBWO)预报能力评估的相关研究较少,评估 BCC S2S 模式对夏季季节内振荡的预报能力及其预报偏差来源,不仅有助于气象业务工作,也可为 BCC 模式对季节内振荡模拟和预报能力提供改进基础。为了应用于 QBWO 实时预报作业中,将利用多变量经验正交函数(multi-variate empirical orthogonal function, MV-EOF)分解定义 QBWO 模态,定量评估 QBWO 信号强度、空间模态、时间演变和传播特征等预报能力,结果显示 BCC S2S 对 QBWO 的预报能力为 9 d,并进一步诊断模式在预报提前 9 d 时 QBWO 结构和传播技巧大幅降低的可能原因。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

BCC S2S 预报模式原始分辨率为 T106,垂直方向为 40 层<sup>[45]</sup>。为了减少数据量并统一模式与再分析数据的水平分辨率,将模式数据插值为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,垂直层采用 8 层(1000, 925, 850, 700, 500, 300, 200, 100 hPa),变量包括水平风场、比湿场和向外长波辐射(OLR)。

评估模式的再分析数据包括:①美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的 OLR 逐日数据<sup>[46]</sup>,②欧洲中心全球再分析数据 ERA-Interim<sup>[47]</sup>,③美国国家环境预报中心(NCEP)/国家大气研究中心(NCAR)<sup>[48]</sup>数据。所用数据时段均为 1994—2013 年 5—10 月。为降低再分析数据的不确定性,将 ERA-Interim 和 NCEP/NCAR 两套再分析数据进行简单平均,作为评估模式预报能力的标准。采用的变量包括全球分辨率  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的水平风场和比湿场,垂直方向上挑选与模式数据输出相同的等压面数据(1000, 925, 850, 700, 500, 300, 200, 100 hPa)。

### 1.2 QBWO 信号提取及其预报评估指标

为了评估 QBWO 实时预报能力,该研究采用夏季季节内振荡实时指数<sup>[11]</sup>提取 QBWO 信号,对亚洲季风区  $10^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $40^\circ \sim 160^\circ\text{E}$  的低层风场

(850 hPa 纬向风) 和对流场(OLR) 扰动进行 MV-EOF 分解, 为了获取季节内信号, OLR 和 850 hPa 纬向风去除了其气候平均态(气候年循环的前 3 个谐波) 和年际变率(每日的前 120 d 滑动平均)。MV-EOF 的第 1 和第 2 模态清晰地表现出 30~90 d 北传、东北传的季节内振荡特征, 而第 3 和第 4 模态则表现出 10~30 d 的北传、西北传信号<sup>[11]</sup>。将该方法应用于不同提前时间的模式预报数据中, 将 OLR 和 850 hPa 纬向风扰动场进行 MV-EOF 分解, 由第 3 和第 4 模态及其对应的时间系数定义出不同预报提前时间下 QBWO 空间模态和生命周期的 8 个位相<sup>[49]</sup>。

为了定量评估模式对不同预报提前时间下 10~30 d QBWO 时空演化的预报技巧, 研究采用了空间相关系数、均方根误差和双变量时间相关系数作为评估指标。这些指标广泛应用于 MJO 模拟和预报评估的研究中<sup>[45,50-51]</sup>。

### 1.3 QBWO 传播过程的涡度诊断

东亚—西北太平洋季风区 10~30 d QBWO 向西北传播与对流西北侧的正涡度超前相关<sup>[32-33]</sup>, 为

了探讨对流西北侧涡度的来源, 对 850 hPa 涡度方程进行收支诊断:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) - v \frac{\partial f}{\partial y} - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p}\right) - (f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right). \quad (1)$$

其中,  $\zeta$  代表涡度,  $u$  和  $v$  分别代表纬向风和经向风,  $f$  代表科氏参数,  $p$  代表气压,  $\omega$  代表垂直速度。等号左侧为局地涡度变化项, 等号右侧 5 项分别为相对涡度平流项、地转涡度平流项、涡度垂直输送项、涡度倾侧项以及散度项<sup>[52]</sup>。

## 2 BCC S2S 模式对 QBWO 模态的预报能力

图 1 比较了再分析数据和模式预报 QBWO 的基本模态<sup>[11]</sup>。再分析数据季节内扰动的第 3 模态显示对流中心位于北印度洋和西北太平洋(图 1a), 且赤道印度洋和西北太平洋对流中心的北侧、西北侧为气旋性异常环流, 有利于 QBWO 对流中心向北、向西北传播<sup>[32-33]</sup>。MV-EOF 的第 4 模态与第 3 模

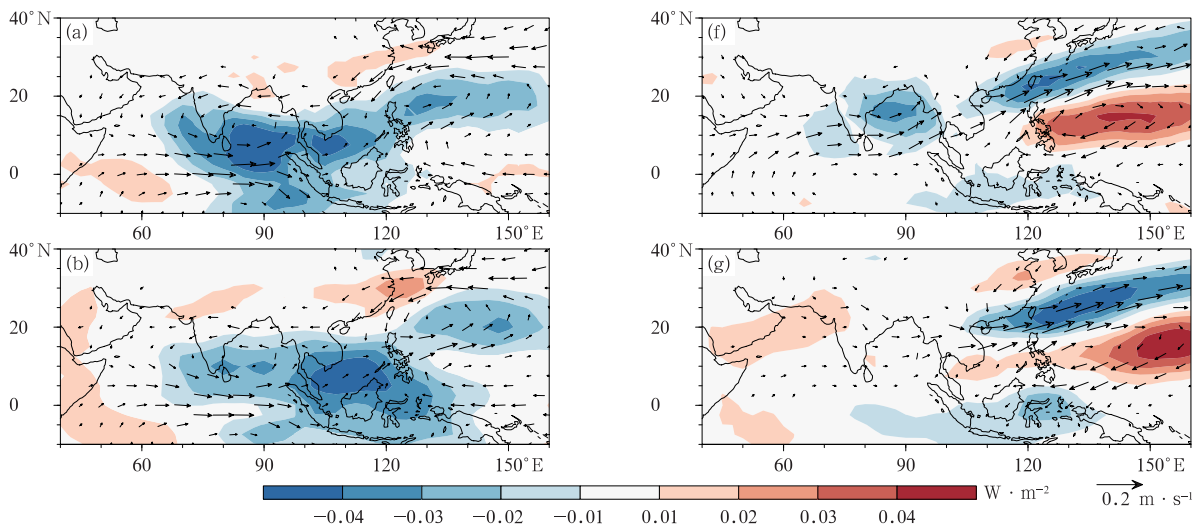
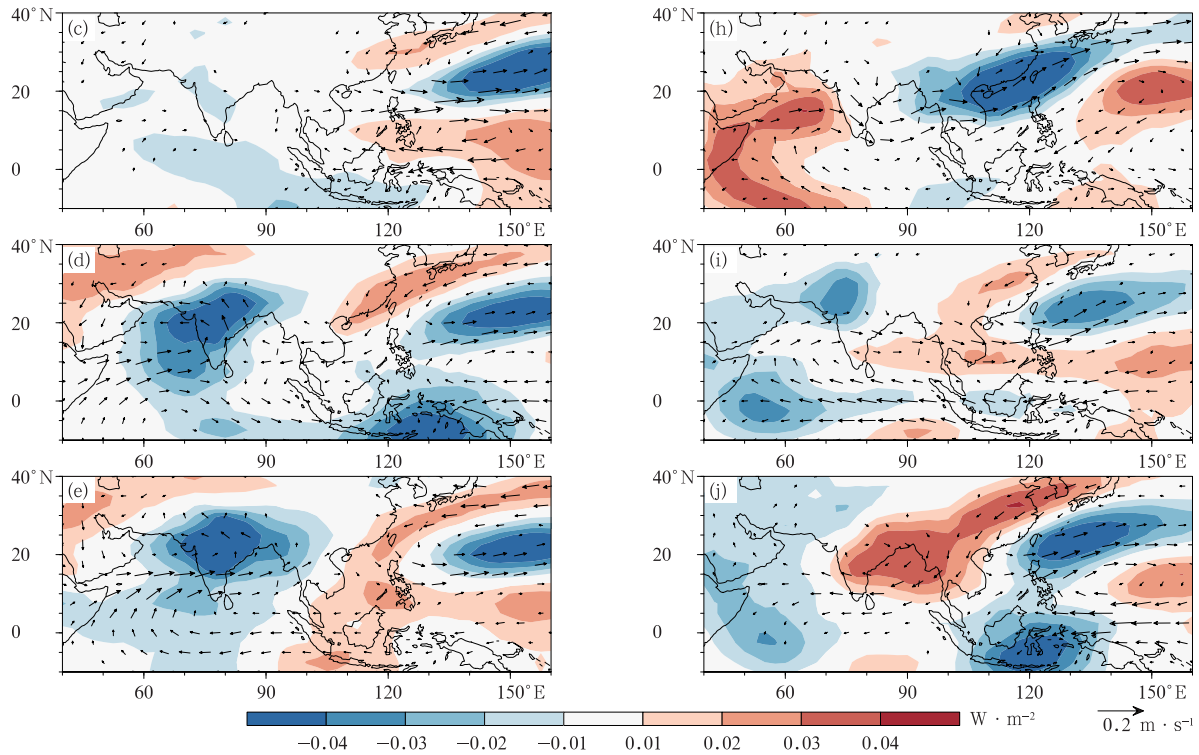


图 1 1994—2013 年夏季(5—10 月)季节内尺度 MV-EOF 的 OLR(填色) 和 850 hPa 风场(矢量)的第 3 和第 4 模态分布

- (a) 再分析数据第 3 模态, (b) 模式提前 1 d 预报第 3 模态, (c) 模式提前 6 d 预报第 3 模态, (d) 模式提前 11 d 预报第 3 模态, (e) 模式提前 16 d 预报第 3 模态, (f) 再分析数据第 4 模态, (g) 模式提前 1 d 预报第 4 模态, (h) 模式提前 6 d 预报第 4 模态, (i) 模式提前 11 d 预报第 4 模态, (j) 模式提前 16 d 预报第 4 模态

Fig. 1 The third mode and the fourth mode of intraseasonal OLR(the shaded) with 850 hPa wind(the vector) during boreal summer(May–October) in 1994–2013 based on MV-EOF

- (a) the third mode of reanalysis, (b) the third mode of 1 d lead time prediction, (c) the third mode of 6 d lead time prediction, (d) the third mode of 11 d lead time prediction, (e) the third mode of 16 d lead time prediction, (f) the fourth mode of reanalysis, (g) the fourth mode of 1 d lead time prediction, (h) the fourth mode of 6 d lead time prediction, (i) the fourth mode of 11 d lead time prediction, (j) the fourth mode of 16 d lead time prediction



续图 1

态呈现  $90^\circ$  位相差, 表现出 QBWO 对流和环流向北、向西北传播发展, 赤道印度洋的对流向北传播到孟加拉湾及印度次大陆, 西北太平洋的对流区向西北方向传播到日本以南海域, 菲律宾海东侧出现一支下沉异常和反气旋性异常环流(图 1f), QBWO 对流—环流系统呈现东北—西南向的条带状波列分布<sup>[11,20]</sup>。在模式结果中, 当预报时间为提前 1 d 时, QBWO 大尺度结构特征与再分析结果相似, 第 4 模态与第 3 模态分布与再分析结果的相关系数分别为 0.81 和 0.75; 在西北太平洋存在向西北侧传播的波列, 但在赤道印度洋北传的对流强度微弱(图 1b、图 1g)。随着预报提前时间的增加, 西北太平洋 QBWO 的对流波列仍然显著, 但第 4 模态与第 3 模态之间的空间位相差不显著, 代表传播信号偏弱(图 1c~1e、图 1h~1j), 当预报时间为提前 6 d 时, 相关系数已下降至 0.33(第 3 模态)和 0.54(第 4 模态); 在提前 11 d 和提前 16 d 的预报中, 赤道印度洋上向北传播的 QBWO 系统波列结构不清晰, 向北传播特征不明显(图 1d、图 1e、图 1i、图 1j), 相关系数下降至 0.3 以下。

计算不同预报提前时间的双变量时间相关系数, 可作为评分显示模式对 QBWO 的预报能力(图

2)。图 2a 将不同预报提前时间模拟出的对流和环流场, 进行 MV-EOF 得出第 3 模态和第 4 模态后, 将两者与再分析数据 MV-EOF 的第 3 和第 4 模态对应的时间系数进行计算得出双变量时间相关系数; 图 2b 则以预报数据逐日对流和环流扰动场, 分别投影至再分析数据 MV-EOF 分析得到的第 3 模态和第 4 模态上, 得到第 3 和第 4 模态对应的时间系数, 进而得到相应双变量时间相关系数(投影法)。两种计算方法均显示, 双变量时间相关系数评分随着预报提前时间的增加而下降, 若以 0.5 作为有效预报能力的阈值<sup>[46,51]</sup>, 可以发现 BCC S2S 模式在超过 9 d 的预报中, 对 QBWO 的预报能力明显下降。

QBWO 的波动周期和位相关系可通过 MV-EOF 的第 3 和第 4 模态对应的时间系数的超前滞后相关关系得到, 再分析数据(图 3 中黑色实线)第 3 超前第 4 模态对应的时间系数约 4~5 d, 二者同时相关系数为 0, 表示第 3 和第 4 模态对应的时间系数为 1 对传播的模式, 两者存在  $90^\circ$  位相差, 周期约为 16~20 d<sup>[11]</sup>。模式在提前 1~8 d 的预报中(图 3 中彩色实线)能预报出 QBWO 的波动特征, 包括第 3 模态对应时间系数超前第 4 模态对应时间系数约 3~5 d, 两者存在  $90^\circ$  位相差。然而, 模式在提前

9 d 的预报中(图 3 中蓝色虚线),第 3 和第 4 模态对应的时间系数的最大相关系数出现在超前 3 d 左右,但相关系数小于 0.1;超前滞后相关 0~20 d 时,

第 3 和第 4 模态对应的时间系数相关十分微弱,表明波动的结构不显著且周期信号偏弱。当预报超前时间提前更多(11 d,13 d,15 d)时,波动周期和位相

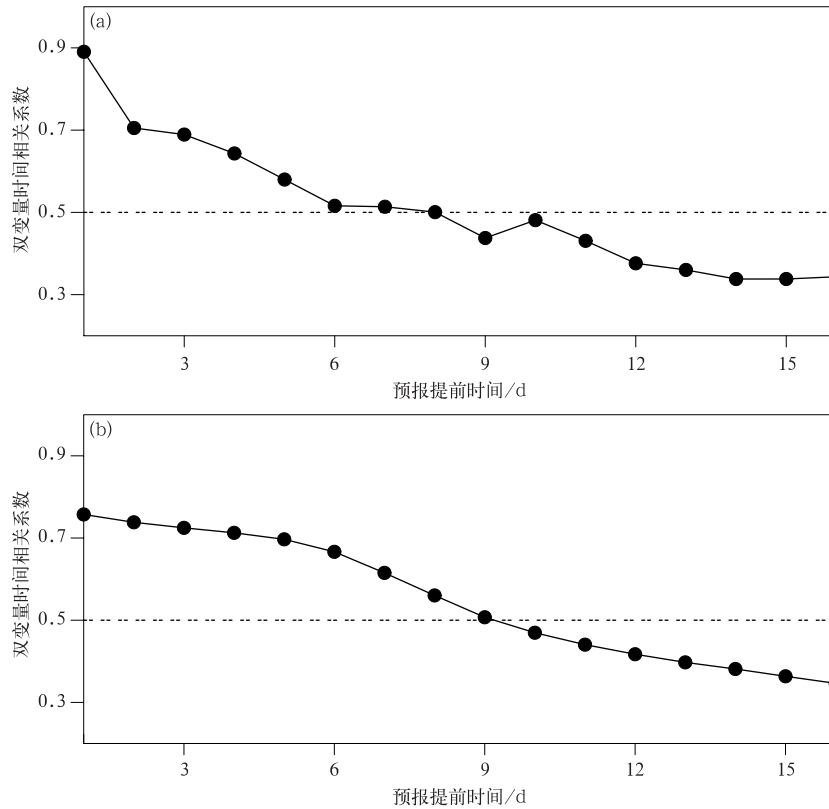


图 2 BCC S2S 模式预报 QBWO 的双变量时间相关系数 (a)MV-EOF,(b)投影法

Fig. 2 Forecast skills of BCC S2S model measured by multi-variate anomaly correlation coefficient of QBWO (a)MV-EOF, (b)projections

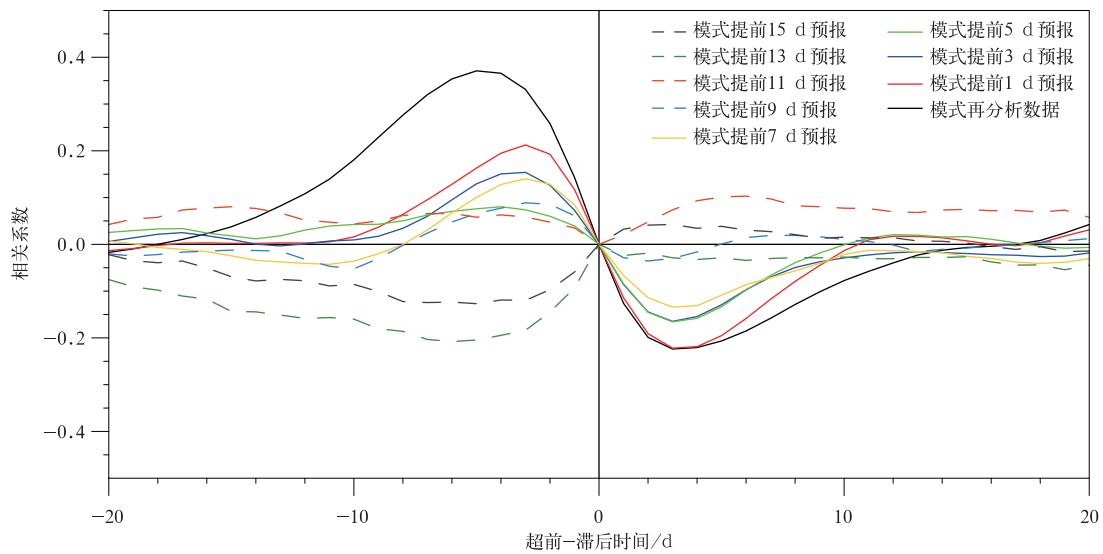


图 3 QBWO 第 3、第 4 模态对应时间系数的超前-滞后相关系数

Fig. 3 Lead-lag correlation coefficients between time series of the third mode and the fourth mode associated with QBWO

关系误差显著增加(图 3 中橙红、绿、灰色虚线)。功率谱分析的结果(图 4)与以上分析相似,在提前 9 d

预报中(图 4b)模式明显低估了再分析数据中显著的 10~30 d 信号(图 4a)。

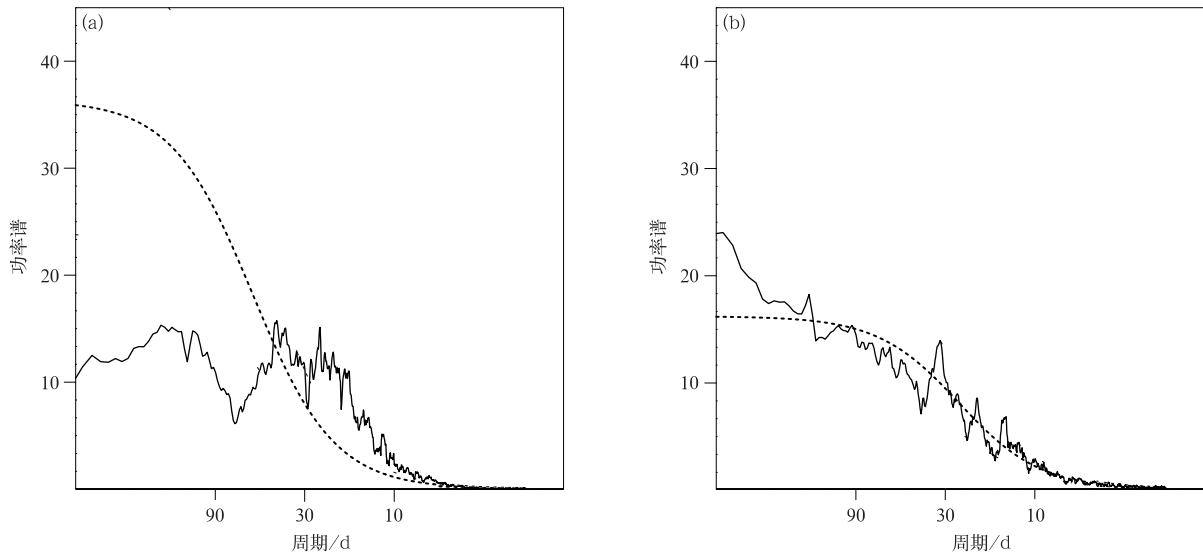


图 4 MV-EOF 第 4 模态对应的时间系数功率谱分布(虚线为红噪声检验)

(a)再分析数据,(b)模式提前 9 d 预报

Fig. 4 Power spectra of time series of the fourth mode associated with QBWO

(the dashed line is Markov red noise spectrum) (a)the reanalysis,(b)9 d lead time prediction

图 5 给出再分析数据和模式提前 9 d 预报的 QBWO 生命周期的 8 位相演变图。再分析数据中,热带印度洋—西北太平洋上可见活跃的东北—西南向对流波列,持续向北、西北传播。在第 1 位相,

QBWO 对流中心位于菲律宾海东侧,下沉中心位于日本南部、孟加拉湾以及赤道印度洋。随时间演变(第 2~第 3 位相),对流波列增强,持续向西北方向传播,西北太平洋上的 QBWO 对流于第 4 位相传播

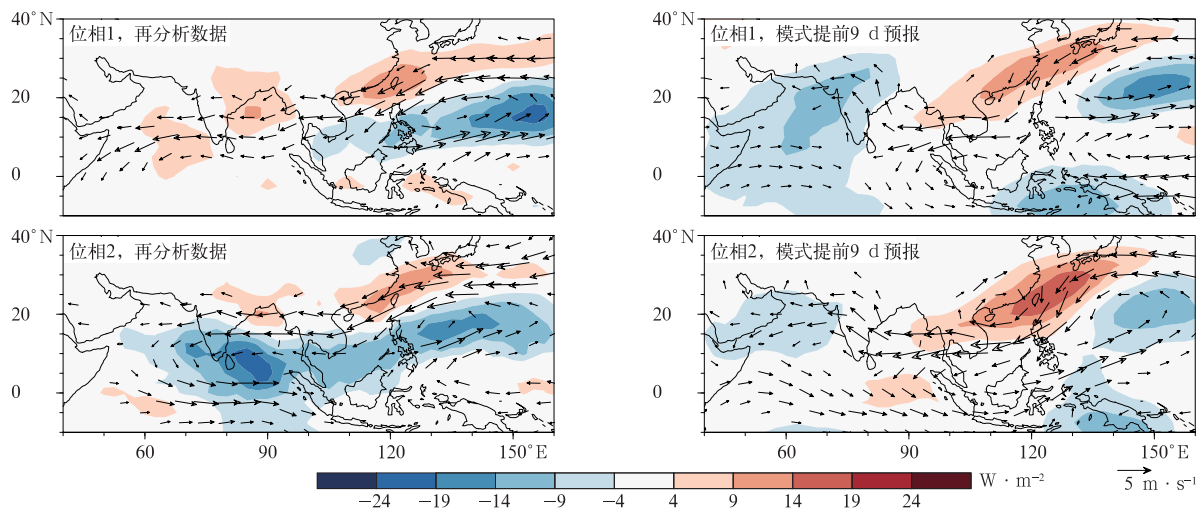
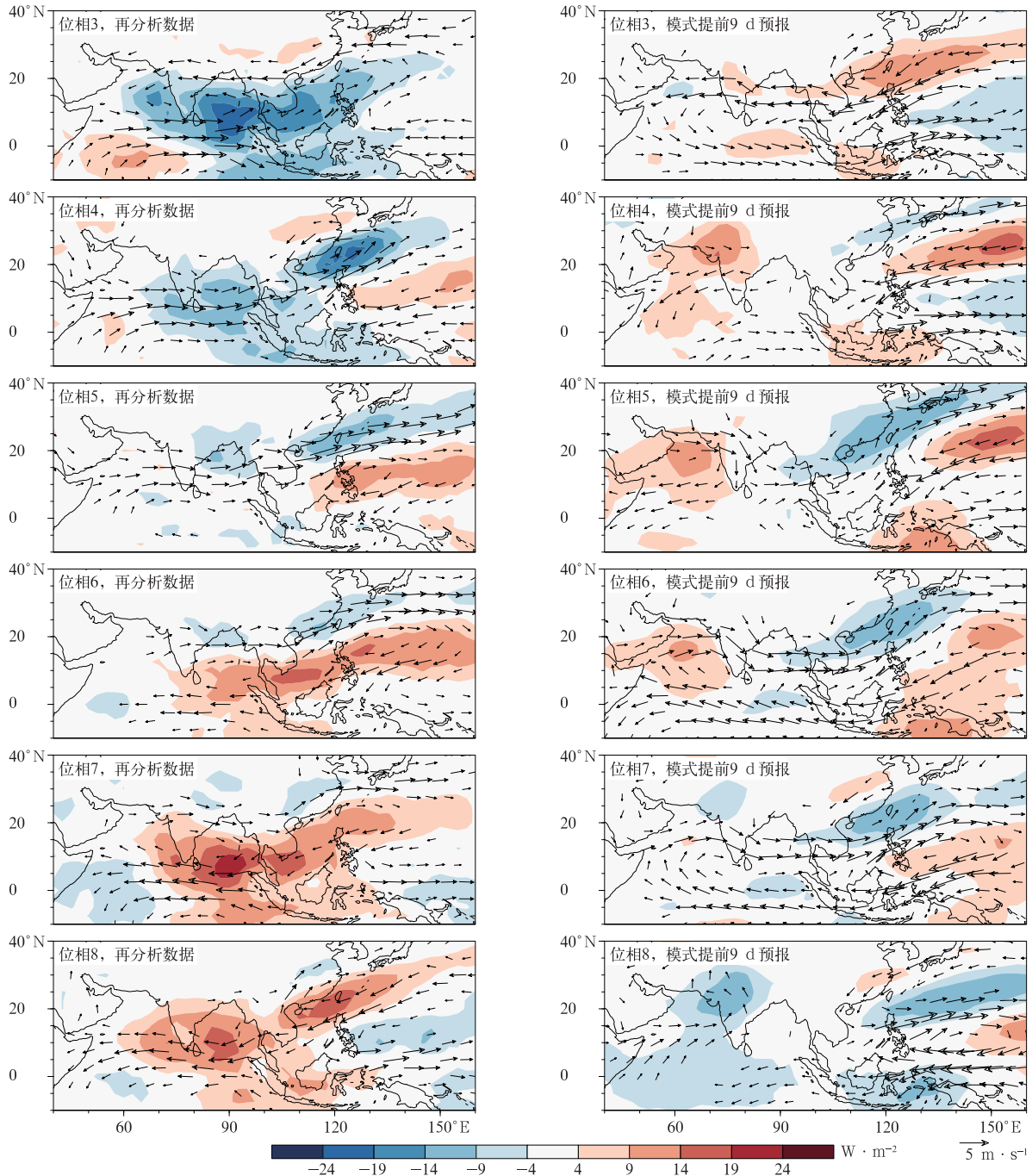


图 5 再分析数据和模式提前 9 d 预报 QBWO 生命周期 8 位相合成 OLR(填色)和 850 hPa 风场(矢量)

Fig. 5 8-phase composited anomalous OLR(the shaded) and 850 hPa wind(the vector) of QBWO life cycle by reanalysis and 9 d lead time prediction





续图 5

到日本南部海域,新一支下沉异常出现于菲律宾海东侧。第 5~第 8 位相呈现与第 1~第 4 位相类似的结构,但位相相反。BCC S2S 模式在提前 9 d 预报中, QBWO 的强度比再分析数据结果偏弱,西北太平洋仍可见西北移行的东北—西南倾斜的波列,但波列结构较为松散,且与再分析数据的对流波列存在位相差(模式的波列较再分析数据偏北);而热带印度洋上的 QBWO 微弱,模式未预报出赤道东

印度洋向北传播至孟加拉湾的强对流,而在阿拉伯海一带出现了微弱的东传信号。

### 3 印度洋及西北太平洋 QBWO 的预报误差诊断

由图 3~图 5 可知, BCC S2S 模式在提前 9 d 及以上的预报中,印度洋和西北太平洋季风区的 QB-

WO 整体信号偏弱, 结构松散。BCC S2S 模式对西北太平洋上 QBWO 波列结构和西北传播的预报能力较好, 只是强度偏弱, 波列稍偏北。但模式对印度洋上的 QBWO 预报出现明显偏差, 低估了东印度洋及孟加拉湾的 QBWO 对流信号。

QBWO 活动的活跃区域和强度可能与夏季平均背景场有关, 大尺度背景场的对流和水汽条件往往影响了其内部较小尺度扰动场的活动, 如大尺度的对流加热有利于加强上升运动, 引发低层辐合和正涡度环流, 在水汽丰沛的大环境下, 低层水汽辐合和浅对流的发展, 进一步加热低层大气, 增加大气的不稳定度, 提供有利于小尺度扰动生成和发展的环境条件。图 6 给出夏季对流场和水汽场的气候平均

分布, 再分析数据夏季对流和水汽平均场的大值中心(图 6a、图 6c)位于东印度洋、孟加拉湾和中南半岛一带, 西太平洋暖池为次大值中心。模式虽然可以正确预报出大尺度分布形态, 但对大值中心的预报出现误差(图 6b、图 6d), 即模式在西北太平洋对流和水汽强度偏强、偏北, 而在印度洋对流平均态的预报较再分析结果偏弱。这可能是导致模式中 QBWO 波列在西北太平洋偏北, 而 QBWO 扰动对流强度在印度洋地区明显偏弱(信号不显著)的原因之一。过去研究指出, 全球模式对印度洋地区平均场的模拟偏差往往是导致季节内振荡预报能力偏低的原因之一<sup>[26]</sup>。

虽然模式可以模拟西北太平洋上向西北移动的

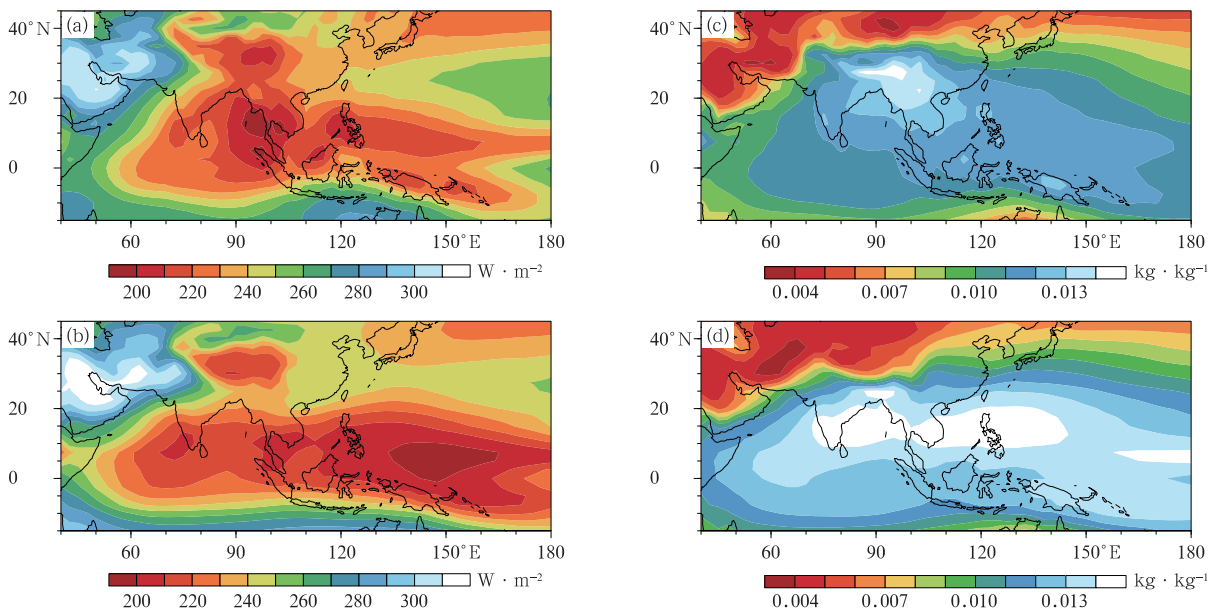


图 6 1994—2013 年夏季(5—10月)气候平均分布(a)再分析数据 OLR, (b)模式提前 9 d 预报 OLR, (c)再分析数据 700~1000 hPa 比湿, (d)模式提前 9 d 预报 700~1000 hPa 比湿

Fig. 6 Climatological mean during boreal summer(May–October) of 1994–2013  
(a)OLR of reanalysis, (b)OLR of 9 d lead time prediction,  
(c)700–1000 hPa specific humidity of reanalysis,  
(d)700–1000 hPa specific humidity of 9 d lead time prediction

QBWO 波列, 但波列的强度和位相仍具有误差, 因此, 将进一步利用涡度方程对提前 9 d 预报结果进行诊断, 分析造成 QBWO 传播特征误差的可能来源。基于再分析数据诊断的研究指出, 西北太平洋上准双周振荡向西北方向传播的关键在于低层正涡度超前于对流<sup>[32-33]</sup>, 即低层正涡度出现于对流的西北侧, 该正涡度有利于低层水汽辐合, 产生对流条件

不稳定层结, 从而促进新对流的建立和发展。图 7 给出了夏季 10~30 d OLR 和 850 hPa 涡度与 MV-EOF 第 4 模态对应时间系数的超前回归分布。图 7 中再分析数据 QBWO 对流和低层涡度的空间位相关系显示, 同期对流(下沉)在菲律宾海东部(日北东南侧)达最强, 由对流波列传播演化图(图 7)可以看到, 低层正涡度持续位于对流的西北侧, 超前对流发



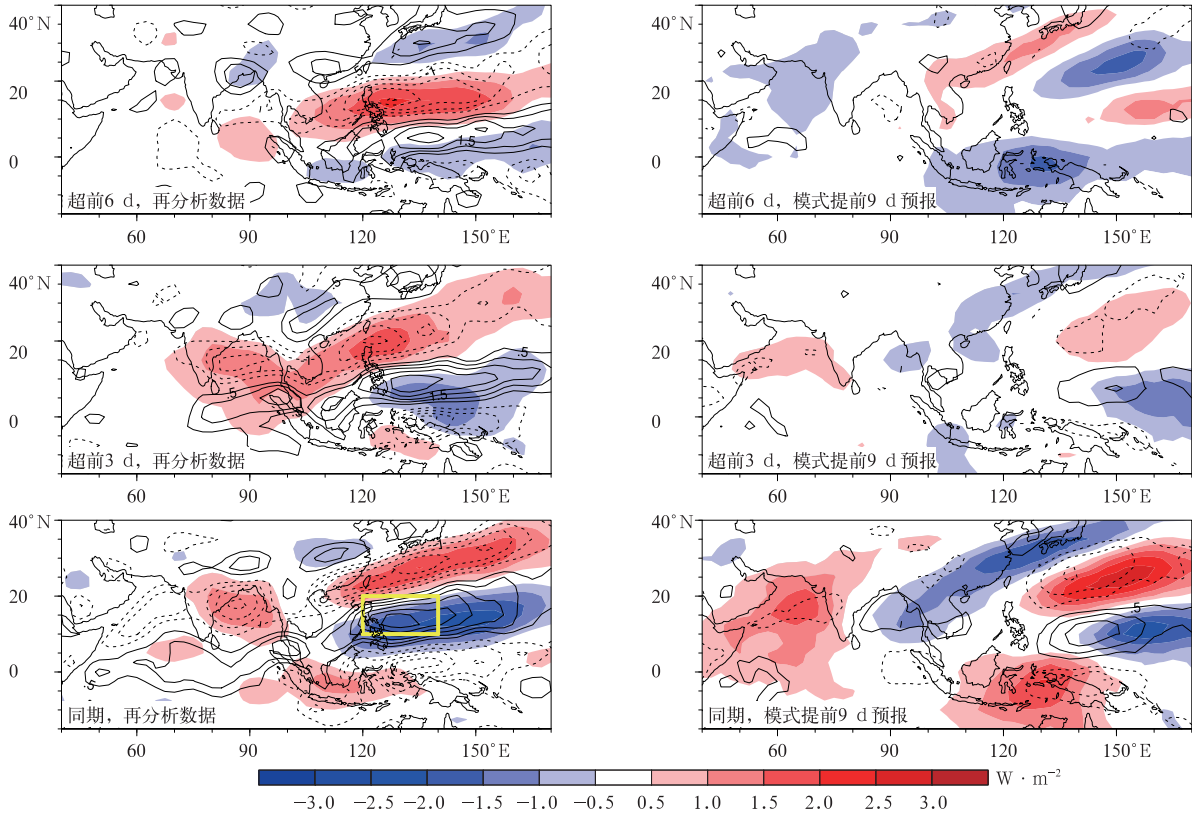


图 7 1994—2013 年夏季(5—10 月)10~30 d OLR(填色)和 850 hPa 涡度(等值线,单位: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , 由  $0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  起始,每条线间隔为  $0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )与 MV-EOF 第 4 模态对应时间系数超前回归 (黄色框为同期对流西北侧涡度最大值中心)

Fig. 7 Lead regression coefficients of 10—30 d filtered OLR(the shaded, unit:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) and 850 hPa vorticity(the contour, unit:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , starting from  $0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  with an interval of  $0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) to time series of the fourth mode(the yellow box marks the positive vorticity center to the northwest of convection of lag 0 d) during boreal summer(May—Oct) of 1994—2013

展。BCC S2S 提前 9 d 预报的结果中显示,西北太平洋上对流波列结构较为松散,低层涡度强度偏弱,西北传播的信号较不显著(图 7),超前 3 d~0 d 时,菲律宾海东侧的对流北传分量微弱,正涡度持续出现于对流西侧,对流也呈现略微的西移。

为了进一步探讨导致模式在提前 9 d 预报中对流传播信号出现误差的可能原因,首先诊断同期再分析数据 QBWO 对流西北侧正涡度(图 7c 中黄框区域)产生的主要物理过程。涡度收支方程的诊断结果(图 8)显示,对流西北侧呈现正涡度趋势,相对涡度平流、地转涡度平流、散度项皆呈正贡献,而涡度垂直输送项和涡度倾侧项十分微弱,且略微呈负贡献。

图 9 为模式提前 9 d 预报中,正涡度来源收支项(相对涡度平流、地转涡度平流散度项)和 OLR

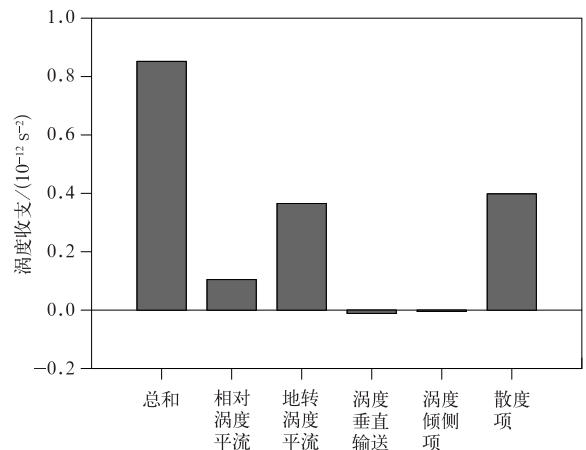


图 8 再分析数据对流西北侧涡度最大值中心的涡度方程收支诊断

Fig. 8 Diagnostic results of vorticity equation averaged over the positive vorticity center to the northwest of convection

与 MV-EOF 第 4 模态对应时间系数的同期回归。相对涡度平流项在对流西侧为负值,而在对流西北侧为微弱的正值,地转涡度平流的正贡献则出现在对流西侧,散度项引发的正涡度趋势位于对流中心及其西侧。由地转涡度平流和散度项在对流西侧引

起的正涡度趋势被相对涡度平流引发的负涡度趋势抵消,导致对流西侧的正涡度趋势偏弱,而对流北侧则为散度项引起的负涡度趋势主导,因此,模式在提前 9 d 预报中,对流向西北发展的信号偏弱。

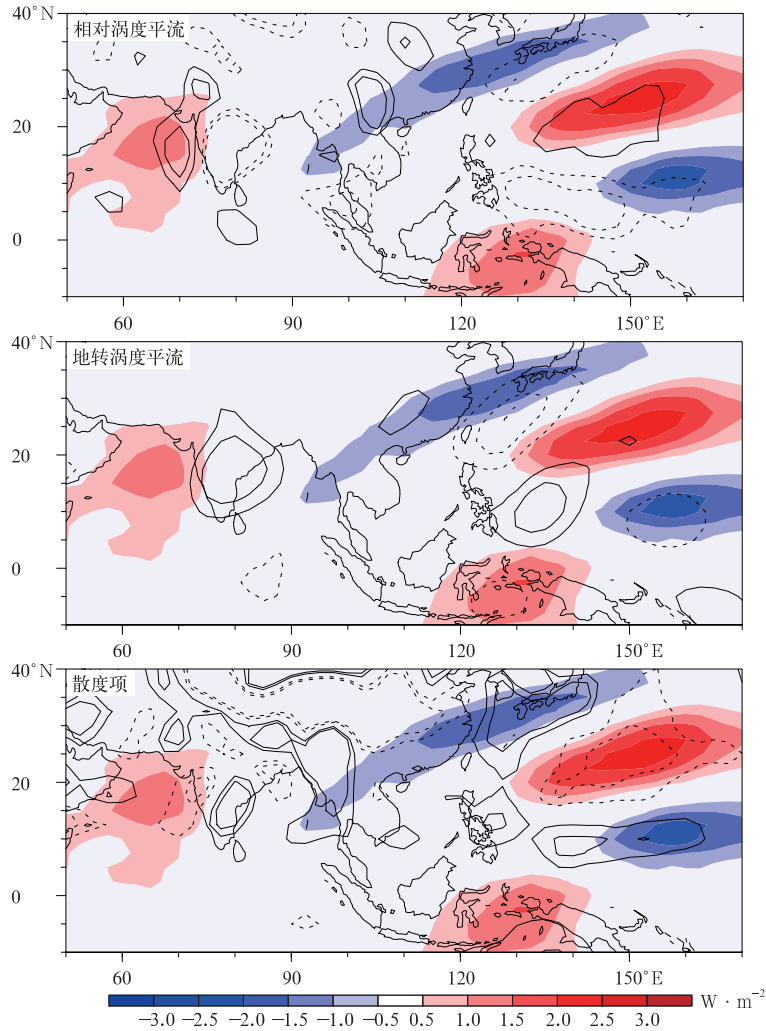


图 9 1994—2013 年夏季(5—10 月)10~30 d 850 hPa 的涡度方程收支项(等值线,单位: $10^{-12} \text{ s}^{-2}$ )和 OLR(填色)与 MV-EOF 第 4 模态对应时间系数的同期回归

Fig. 9 Regression coefficients of 10—30 d filtered 850 hPa vorticity equation budget terms (the contour, unit:  $10^{-12} \text{ s}^{-2}$ ) and OLR(the shaded) to time series of the fourth mode during boreal summer(May—Oct) of 1994—2013

#### 4 结论与讨论

本研究对国家气候中心次季节到季节尺度预报模式北半球夏季 QBWO 的预报能力进行了评估,并诊断了模式预报误差的可能原因。研究表明:

1) BCC S2S 预报模式低估了 QBWO 信号的强

度,且强度和传播特征随预报提前时间的增加而显著下降,在提前 9 d 以上的预报中, QBWO 的双变量相关系数降至 0.5 以下,波动的周期、位相和传播强度存在较明显偏差。

2) 在提前 9 d 预报中,赤道印度洋地区 QBWO 对流-环流系统结构松散,信号偏弱,其偏差主要出现在模式无法预报出热带东印度洋和孟加拉湾一带

向北传播的 QBWO, 而表现为向东传播, 诊断模式提前 9 d 预报的大尺度场显示, 模式对印度洋地区对流的平均态存在低估, 大值中心出现在西北太平洋, 这可能是导致印度洋 QBWO 对流偏弱的原因之一。

3) 在提前 9 d 预报中, 西北太平洋 QBWO 具有向西北传播的特征, 但强度偏弱, 正涡度中心出现于对流偏西侧, 主要由地转涡度平流和辐合作用产生, 相对涡度引发负涡度趋势, 大幅抵消了前两者产生的正涡度趋势; 而模式北侧的负涡度趋势主要由辐合作用主导产生, 使模式中 QBWO 波列向北、西北传播的特征不如再分析数据结果显著。

模式大尺度对流场的模拟与对流参数化方案有关, 今后的工作将比较参与 S2S 项目其余 10 个模式中 QBWO 预报能力及其与不同对流参数化方案的关系, 可以对 BCC 模式对流参数化方案的改进提供参考。

### 参考文献

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28(5):702-708.
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29(6):1109-1123.
- [3] Yasunari T. A quasi-stationary appearance of 30 to 40 day period in the cloudiness fluctuation during the summer monsoon over India. *J Meteor Soc Japan*, 1980, 58(3):225-229.
- [4] 任宏利, 吴捷, 赵崇博, 等. MJO 预报研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(6):658-668.
- [5] Chen T C, Chen J M. The 10—20-day mode of the 1979 Indian monsoon: Its relation with the time variation of monsoon rainfall. *Mon Wea Rev*, 1993, 121(9):2465-2482.
- [6] Zhang C D. The Madden-Julian Oscillation. *Rev Geophys*, 2005, 43(2):RG2003.
- [7] 李崇银, 凌健, 宋洁, 等. 中国热带大气季节内振荡研究进展. *气象学报*, 2014, 72(5):817-834.
- [8] Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. The sub-seasonal to seasonal prediction (S2S) project database. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(1):163-173.
- [9] 李崇银. 大气中的季节内振荡. *大气科学*, 1990, 14(1):32-45.
- [10] 林爱兰, Li Tim, 李春晖. 热带夏季风场与对流场季节内振荡传播模比较. *应用气象学报*, 2010, 21(5):545-557.
- [11] Lee J Y, Wang B, Wheeler M C, et al. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Clim Dyn*, 2013, 40(1-2):493-509.
- [12] Webster P J. Monsoon: Processes, predictability and the prospects for prediction. *J Geophys Res*, 1998, 103(C7):14451-14510.
- [13] Annamalai H, Slingo J M. Active/break cycles: Diagnosis of the intraseasonal variability of the Asian summer monsoon. *Clim Dyn*, 2001, 18(1-2):85-102.
- [14] 陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 基于南海夏季风季节内振荡的降水延伸预报试验. *应用气象学报*, 2016, 27(3):273-284.
- [15] 王遵娅, 丁一汇. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6):710-715.
- [16] 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等. 6月 MJO 对广东降水调制与直接影响系统的联系. *应用气象学报*, 2013, 24(4):397-406.
- [17] Hsu P C, Lee J Y, Ha K J. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China. *Int J Climatol*, 2016, 36(3):1403-1412.
- [18] Hsu P C, Lee J Y, Ha K J, et al. Influences of boreal summer intraseasonal oscillation on heat waves in monsoon Asia. *J Climate*, 2017, 30(18):7191-7211.
- [19] 温敏, 张人禾. 苏门答腊附近大气准双周振荡的可能维持机制. *科学通报*, 2005, 50(9):938-940.
- [20] Chen G H, Sui C H. Characteristics and origin of quasi-bi-weekly oscillation over the western North Pacific during boreal summer. *J Geophys Res*, 2010, 115(D14113):1-14.
- [21] 李春晖, 何超, 郑彬, 等. 夏季(5—10月)南海准双周和 20~60 天振荡的年代际变化特征. *热带气象学报*, 2016, 32(5):577-587.
- [22] 孙长, 毛江玉, 吴国雄. 大气季节内振荡对夏季西北太平洋热带气旋群发性的影响. *大气科学*, 2009, 33(5):950-958.
- [23] Zhao H K, Jiang X A, Wu L G. Modulation of Northwest Pacific tropical cyclone genesis by the intraseasonal variability. *J Meteor Soc Japan*, 2015, 93(1):81-97.
- [24] 李春晖, 刘燕, 李霞, 等. 热带西北太平洋 10~30 d 振荡对南海夏季风影响. *应用气象学报*, 2016, 27(3):293-302.
- [25] 占瑞芬, 孙国武, 赵兵科, 等. 中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡及其可能维持机制. *高原气象*, 2008, 7(增刊 1):98-108.
- [26] Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. Performance of the seasonal forecasting of the Asian-western Pacific summer monsoon hindcasted by BCC\_CSM1.1(m). *Adv Atmos Sci*, 2015, 32(8):1156-1172.
- [27] 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. *热带气象学报*, 2017, 33(2):155-166.
- [28] Kemball-Cook S, Wang B. Equatorial waves and air-sea interaction in the boreal summer intraseasonal oscillation. *J Climate*, 2001, 14(13):2923-2942.
- [29] Jiang X A, Li T, Wang B. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. *J Climate*, 2004, 17(5):1022-1039.
- [30] Bellon G, Sobel A H. Instability of the axisymmetric monsoon flow and intraseasonal oscillation. *J Geophys Res*, 2008, 113(D07108):1-18.

- [31] Wang B, Xie X. A model for the boreal summer intra-seasonal oscillation. *J Atmos Sci*, 1997, 54(1): 72-86.
- [32] Hsu H H, Weng C H. Northwestward propagation of the intra-seasonal oscillation in the western North Pacific during the boreal summer: Structure and mechanism. *J Climate*, 2001, 14(18): 3834-3850.
- [33] Tsou C H, Hsu P C, Kau W S, et al. Northward and northwestward propagation of 30-60 day oscillation in the tropical and extra-tropical western North Pacific. *J Meteor Soc Japan*, 2005, 83(5): 711-726.
- [34] Waliser D E. Predictability of Tropical Intraseasonal Variability. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 275-305.
- [35] 丁一汇, 梁萍. 基于 MJO 的延伸预报. *气象*, 2010, 36(7): 111-122.
- [36] 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 533-543.
- [37] Lin J L, Lee M I, Kim D, et al. The impacts of convective parameterization and moisture triggering on AGCM-simulated convectively coupled equatorial waves. *J Climate*, 2008, 21(5): 883-909.
- [38] Seo K H, Wang W Q, Gottschalck J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. *J Climate*, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [39] Kang I S, Kim H M. Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models. *J Climate*, 2010, 23(9): 2368-2378.
- [40] Fu X H, Lee J Y, Wang B, et al. Intraseasonal forecasting of Asian summer monsoon in four operational and research models. *J Climate*, 2013, 26(12): 4186-4203.
- [41] Lee S S, Wang B, Waliser D E, et al. Predictability and prediction skill of the boreal summer intraseasonal oscillation in the Intraseasonal Variability Hindcast Experiment. *Clim Dyn*, 2015, 45(7-8): 2123-2135.
- [42] Zhao C, Zhou T J, Song L C, et al. The boreal summer intraseasonal oscillation simulated by four Chinese AGCMs participating in the CMIP5 project. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(5): 1167-1180.
- [43] 吴捷, 任宏利, 赵崇博, 等. 国家气候中心 MJO 监测预测业务产品研发及应用. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 641-653.
- [44] Fang Y J, Wu P L, Wu T W, et al. An evaluation of boreal summer intra-seasonal oscillation simulated by BCC\_AGCM2. 2. *Clim Dyn*, 2016, 48(9-10): 3409-3423.
- [45] Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. MJO prediction using the sub-seasonal to seasonal forecast model of Beijing Climate Center. *Clim Dyn*, 2016, 48(9-10): 3283-3307.
- [46] Liebmann B, Smith C A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(6): 1275-1277.
- [47] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137(656): 553-597.
- [48] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3): 437-471.
- [49] Wheeler M, Hendon H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(8): 1917-1932.
- [50] Lin H, Brunet G, Derome J. Forecast skill of the Madden-Julian oscillation in two Canadian atmospheric models. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(11): 4130-4149.
- [51] Xiang B Q, Zhao M, Jiang X A, et al. The 3-4-Week MJO prediction skill in a GFDL coupled model. *J Climate*, 2015, 28(13): 5351-5364.
- [52] Hinton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology. New York: Academic Press, 1979.

## Evaluation of Quasi-biweekly Oscillation Prediction in the Asian Summer Monsoon Regions by BCC S2S Model

He Zheng Hsu Pang-chi Gao Yingxia

*(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)*

### Abstract

The quasi-biweekly oscillation (QBWO) plays an important role in global weather and climate change. It's a very important source of sub-seasonal to seasonal (S2S) predictability. Using the sub-seasonal to seasonal forecast model of Beijing Climate Center (BCC S2S), the boreal summer QBWO is simulated, the forecast skill is discussed, and the model bias is analyzed. QBWO can be obtained from the third and fourth modes of multivariate empirical orthogonal function (MV-EOF) analysis on daily anomalies of outgoing longwave radiation (OLR) and zonal wind at 850 hPa (U850) in the Asian monsoon region. According to reanalysis data, QBWO shows a northeast-southwest-tilted convection-circulation structure, propagating north/northwestward from the equatorial western Pacific and Indian Ocean. The forecast skill of BCC S2S on QBWO decreases as the forecast lead time increases, and biases become very significant in the period, propagation characteristics and strength when the lead time comes to 9 days. BCC S2S reveals a higher forecast skill of QBWO structure and propagation over the western North Pacific, while it significantly underestimated convection signal of QBWO over the tropical Indian Ocean. The convection-circulation wave structure of QBWO in 9-day lead time prediction over the Indian Ocean is loose and appears over the Arabian Sea (instead of over the tropical eastern Indian Ocean and Bay of Bengal where the reanalyzed QBWO is active). It suggests that the unrealistic Indian Ocean QBWO is related to biases of model mean state. The simulated low-level moisture and convection during boreal summer are enhanced over the western Pacific and the Arabian Sea. However, the model underestimates the abundant moisture and vigorous convection over the eastern Indian Ocean and Bay of Bengal. BCC S2S captures the structure and propagation of QBWO over the western North Pacific, but slightly underestimates the strength of QBWO wave train. This underestimation of QBWO convection might be attributable to the relatively weaker vorticity to the northwest of QBWO convection. By diagnosing the vorticity equation, it's found that although the model well simulates positive contributions of geostrophic vorticity advection and convergence effects to the northwest of convection, these contributions are still underestimated. Moreover, the simulated relative vorticity advection shows an opposite effect to reanalysis data in the 9-day lead time prediction, weakening the favorable environment of QBWO development associated with positive vorticity to the northwestern part of convection.

**Key words:** BCC S2S model; quasi-biweekly oscillation; prediction skill; model bias diagnosis