

周颖, 张贺, 张珂玮. 2020. 基于 K-均值聚类方法的大气环流模式 IAP AGCM4.1 对西北太平洋热带气旋的模拟评估 [J]. 大气科学, 44(5): 1141–1154. ZHOU Ying, ZHANG He, ZHANG Kewei. 2020. Evaluation of Simulated Tropical Cyclones over the Western North Pacific with IAP AGCM4.1 Based on K-Means Method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1141–1154. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19252

基于 K-均值聚类方法的大气环流模式 IAP AGCM4.1 对西北太平洋热带气旋的模拟评估

周颖^{1,2} 张贺^{2,3} 张珂玮^{4,5}

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 山东大学软件学院, 济南 250101

5 中国科学院计算技术研究所, 北京 100080

摘 要 IAP AGCM4.1 (Institute of Atmospheric Physics Atmospheric General Circulation Model, version 4.1) 是中国科学院大气物理研究所自主研发的大气环流模式, 也是中科院地球系统模式 CAS-ESM1 (Chinese Academy of Sciences Earth System Model, version 1) 的大气分量模式。本文利用极端气候分析软件 TECA (Toolkit for Extreme Climate Analysis), 对 IAP AGCM4.1 模拟的 1979~2012 年西北太平洋热带气旋 (TC) 进行了识别与评估。结果表明 IAP AGCM4.1 模拟的 TC 空间分布、路径走向与生成源地与观测基本一致, 但模拟的 TC 个数有所低估, 仅为观测的 36%。基于 K-均值聚类方法的分类评估显示, 这种低估主要体现在模式对于西北行转向类和西行类 TC 没有模拟能力。对于近海西—西北行类、西转向类和东转向类 TC, 模式模拟的个数可分别达到观测的 39%, 48% 和 85%, 模拟的季节变化与观测的相关系数在 0.89~0.91 之间, 周期误差在 1~2 天。就 TC 路径而言, 模式对于近海西—西北行类和东转向类 TC 模拟效果较好, 质心经度误差、质心纬度误差和经纬向标准差的模拟误差分别为 1%~5%、4%~16% 和 5~15%。此外, 环流合成分析表明模式很好地再现了东转向类 TC 发生、发展期间环境流场的演变以及副热带高压的变化情况, 模拟的副热带高压强度和面积指数与观测的相关系数可达 0.89。模式对西北行转向类和西行类 TC 模拟能力较差的原因可能与模式对副热带高压的模拟偏差有关。

关键词 大气环流模式 西北太平洋 热带气旋 K-均值聚类 副热带高压

文章编号 1006-9895(2020)05-1141-14

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19252

Evaluation of Simulated Tropical Cyclones over the Western North Pacific with IAP AGCM4.1 Based on K-Means Method

ZHOU Ying^{1,2}, ZHANG He^{2,3}, and ZHANG Kewei^{4,5}

1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of

收稿日期 2019-12-24; **网络预出版日期** 2020-04-02

作者简介 周颖, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候模式模拟和评估研究。E-mail: eleni_y@foxmail.com

通讯作者 张贺, E-mail: zhanghe@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2016YFB0200800, 国家自然科学基金重点项目 61432018、41630530, 国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFB0200800), State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grants 61432018, 41630530), National Key Scientific and Technological Infrastructure Project “Earth System Science Numerical Simulator Facility”

Sciences, Beijing 100029

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 School of Software, Shandong University, Jinan 250101

5 Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract As the atmospheric component of CAS-ESM1 (Chinese Academy of Sciences Earth System Model, version 1), IAP-AGCM4.1 (Institute of Atmospheric Physics Atmospheric General Circulation Model, version 4.1) is being developed independently by Institute of Atmospheric Physics. In this study, the authors used TECA (Toolkit for Extreme Climate Analysis) to identify and evaluate tropical cyclones (TC) over the western North Pacific simulated by IAP AGCM4.1 from 1979 to 2012. The results show that IAP AGCM4.1 can reproduce the spatial distribution, track, and source of TC reasonably well compared to observation data, but it underestimates the number of TC, with only 36% of the observed tropical cyclones over the western North Pacific simulated. Further analysis using K-means clustering revealed that this underestimation is mostly due to the model's inability to reproduce northwestward-turning and westward TC. For TC with westward-northwestward, westward-turning, and eastward-turning tracks, the numbers simulated are approximately 39%, 48%, and 85% of those observed, respectively. Moreover, the correlation coefficients of the seasonal variations between simulated and observed TC can reach 0.91, with duration biases of roughly 1–2 d. IAP AGCM4.1 performs well in simulating the tracks of the westward-northwestward and eastward-turning TC, with relative biases ranging between 1%–5% for the longitude of the centroid, 4%–16% for the latitude of the centroid, and 5%–15% for the latitudinal and meridional standard deviations. In addition, IAP AGCM4.1 reproduces the evolutions of environmental circulation and subtropical highs quite well during the lifetime of eastward-turning TC, with the simulated strength and area indexes of the subtropical highs highly correlated with the observations (the correlation coefficient is 0.89). The poor simulations of northwestward-turning and westward TC are likely due to simulated biases in the subtropical high.

Keywords Atmospheric general circulation model, Western North Pacific, Tropical cyclone, K-means clustering, Subtropical high

1 引言

热带气旋 (TC) 是生成于热带洋面上的一种中尺度或者天气尺度系统, 是具有有组织的对流和确定的气旋性环流以及暖心结构的非锋面性涡旋, 水平尺度约几百公里 (朱乾根等, 2007)。热带气旋是世界上最强烈的自然灾害之一, 其发生一般伴随着狂风、暴雨、巨浪和风暴潮, 甚至会造成泥石流、滑坡等许多衍生的自然地质灾害, 给人类生命安全和国家财产构成巨大的威胁。根据统计, 自 1971 年开始, TC 已经造成约 47 万人死亡, 并在全球造成了 7000 亿美元的损失 (CRED, 2016)。而中国近 20 年来气象灾害的类型分布 (吴吉东等, 2014) 显示, 在灾害发生次数、造成的直接损失以及死亡人数这三个方面, 台风所占的比重都超过了 17%, 尤其发生次数更是超过了 37%, 且呈上升的趋势。近期研究表明, 由于温室气体排放造成的全球增暖将增强全球平均的热带气旋强度, 这种强度的增长在 2100 年左右可达 2%~11% (Knutson et al., 2010)。因此, 热带气旋

的频率和强度预测及其未来预估对于评估气候变化影响下热带气旋变化趋势至关重要, 也为制定相关适应性政策与减排方案提供科学支撑。

对于热带气旋活动变化的历史归因和未来预估多基于不同情景下气候模式的长期模拟试验, 如耦合模式比较计划 (CMIP5)。这些研究通常使用气旋检测手段研究不同气候情景下热带气旋的活动变化 (Broccoli and Manabe, 1990; 栗晗等, 2016; Li et al., 2019), 也有一些研究基于热带气旋潜势指数 (GPI) 和广义极值分布 (GEV), 如 Emanuel (2010, 2013) 和 Moore et al. (2015)。而气候模式能否较为准确地模拟出当代气候条件下热带气旋的路径强度等特征是进行上述归因和预估研究的先决条件。典型的热带气旋的空间尺度在 100~1000 km 之间, 生命周期小于 4 周, 属于中尺度到天气尺度的热带天气系统。对分辨率较粗的全球气候模式而言, 准确模拟时空尺度相对较小的热带气旋有较大的难度。20 世纪 70 年代以来, 陆续有研究发现低分辨率的气候模式虽能够模拟出类似 TC 的结构 (Manabe et

al., 1970), 但是由于分辨率较粗, 模拟的风暴强度偏弱, 路径也存在较大偏差 (Bengtsson et al., 1982, 1996; Broccoli and Manabe, 1990; Haarsma et al., 1993)。近年来, 计算机性能的提高促进了高分辨率气候模式的发展, 气候模式对于热带气旋的模拟性能得到了显著提高。许多研究表明, 水平分辨率为 50~100 km 的全球气候模式能够大致模拟出全球热带气旋的频次、移动路径等基本分布特征 (Zhao et al., 2009; 曹翔, 2014; Li et al., 2019)。随着模式分辨率的进一步增加, 热带气旋的模拟性能也有一定的提升。Murakami et al. (2012) 分别使用分辨率为 20 km 及 60 km 的全球模式 MRI-AGCM 模拟了 1979~2003 年全球 TC 的活动情况, 结果表明, 模式能够较好地模拟除南大西洋外全球 TC 相对活跃的 6 个海域的 TC 活动。20 km 分辨率的模式模拟的 TC 的强度比 60 km 模式模拟的更强, 对强 TC (4、5 级飓风) 频数的模拟与观测更接近。Bacmeister et al. (2014) 的研究表明, 分辨率为 $0.23^{\circ} \times 0.31^{\circ}$ 的 CAM 模式模拟的 TC 分布及年际变化较 $0.9^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 的分辨率更接近观测。

IAP AGCM4.1 (Atmospheric General Circulation Model of the Institute of Atmospheric Physics, version 4.1) 是中国科学院大气物理研究所自主研发的大气环流模式 (Zhang et al., 2013), 水平分辨率有 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 及 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 两个版本。关于 IAP AGCM 的模拟结果评估已经有了大量的工作, 包括模式对全球以及区域尺度当代气候态的模拟 (孙泓川等, 2012; Zhang et al., 2013; Yan et al., 2014), 古气候的模拟 (Wang and Wang, 2013), 年际和季节尺度变率的模拟 (Su et al., 2014), 以及气候趋势的模拟 (Dong et al., 2012) 等。然而, IAP AGCM4.1 对于次季节尺度的热带气旋的模拟能力尚缺乏系统的分析。

影响我国的热带气旋大都生成自南海或西北太平洋。在不同的月份, 影响我国的热带气旋的路径有明显的差异, 相应地, 模式对不同路径类型的热带气旋的模拟能力也有明显的不同。目前的热带气旋模拟研究大多把西北太平洋作为一个整体进行分析评估, 不利于探寻模式模拟偏差的原因。本文将利用 K-均值聚类方法对西北太平洋的台风进行分类, 并评估 IAP AGCM4.1 对不同类型台风的模拟能力, 以期找出模式的优势及模拟偏差的可能原因, 为模式进一步改进发展与更广泛的应用提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 观测资料

本文所用 TC 观测资料为美国国家飓风中心 (NHC) 和联合台风警报中心 (JTWC) 编制的 1979~2012 年最佳 TC 路径 (Unisys, 2011; Murakami et al., 2012)。该数据的时间分辨率为 6 h, 内容包含 TC 位置 (中心经、纬度)、强度 (最大一分钟地面风速) 和风暴中心海平面气压。

风场、高度场资料采用 1979~2012 年的欧洲中心 ERA-Interim 资料 (Dee et al., 2011), 水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 6 h 一次。

2.2 TC 检测方法

本文使用美国伯克利实验室开发的一款极端气候分析工具包 (Toolkit for Extreme Climate Analysis, TECA, Prabhat et al., 2012) 识别气候模式模拟的热带气旋, 包含 TC 中心与 TC 路径。TECA 可用于识别热带气旋、大气河和副热带气旋在内的三类极端事件, 且具有高效的计算效率, 在对 TB (万亿字节) 量级的气候模式输出数据进行位相检测时可以将运行时间由年尺度缩减至小时尺度 (Prabhat et al., 2012, 2015)。TECA 检测 TC 路径的方法主要分为两个步骤, 第一步是检测满足多变量限制条件的候选点 (包括找到相对涡度的最大值, 距此 5° 半径范围内气压的最小值和温度的暖心), 第二步是将候选点连接成满足时空约束条件的轨迹。

TECA 提供了一套检测 TC 的标准和默认参数, 在具体应用时需进行相应地调试。针对 IAP AGCM4.1, 调试后的 TC 检测标准如下:

- (1) 850 hPa 上的相对涡度 $> 2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;
- (2) 在距涡度中心 4° 范围内找到海平面气压的最小值;
- (3) 在最小海平面气压中心到半径为 5° 的范围内, 气压至少增加 3.5 hPa, 将此气压中心定义为 TC 的中心;
- (4) 距 TC 中心 4° 的半径范围内, 暖心中心 (即平均温度的最高值所在的位置) 位于 300 hPa 至 500 hPa 之间, 从暖心向外, 温度必须在 5° 的范围内, 向各个方向至少降低 0.8°C ;
- (5) TC 中心 6 h 移动路径不超过 600 km;
- (6) TC 中心附近最大风速超过 8 m s^{-1} ;
- (7) 以上标准检测到的 TC 持续 2 d 以上。

2.3 TC 分类方法

本文中对于 TC 路径的分类采用的是 K-均值聚类法, 这种方法可以根据 TC 的地理特性(如形状、成因和轨迹位置)将给定海域中的风暴客观的划分为子类别, 对于建立气候时间尺度的预测非常有用, 是一种常用的聚类方法。其基本原理是利用空间聚类方法, 将研究对象的空间距离指标按照相似性准则划分到若干个子集中, 使得相同子集中各元素间差别最小, 而不同子集中各元素差别最大(杨善林等, 2006)。目前有许多研究采用 K-均值聚类法, 通过对 TC 经向质心、纬向质心、TC 路径的经向方差、纬向方差以及经纬向协方差共 5 个参数对 TC 进行分类。Nakamura et al. (2009) 将 TC 路径视为一条开放的空间曲线, 而曲线上的风速信息可以视为空间曲线的质量属性。因而曲线质心可以表征 TC 平均位置, 曲线在经向和纬向方向上的方差可以表征强度加权后 TC 在经向和纬向的伸展程度, 方差越大表明伸展越长。而曲线在经、纬方向上的协方差则代表了 TC 的方向特征, 如西北和东北向路径分别对应协方差的负值和正值。因为在计算中考虑了风速的加权, 上述 5 个参数在表征路径特征的同时也耦合了强度特征。Nakamura et al. (2009) 利用 K-均值聚类方法, 根据上述 5 个参数, 将北大西洋的热带气旋分成 6 大类, 并分析了不同类别各自的特征。郑颖青等人 (2013) 对上述方法做了一些改善, 将风速的平方根作为曲线的质量参与加权计算, 并依据改进后的 5 个参数对西北太平洋的热带气旋进行分类, 结果表明西北太平洋热带气旋的分类在 6~7 类比较合适。本文综合考虑上述两项研究, 利用风速平方根参与质量加权, 并将 1979~2012 年观测的西北太平洋 TC 路径分为了 6 大类(各类数据详见表 1, 详细分析见

3.2 节)。以下给出参数的具体计算方法。

(1) 计算 TC 路径质心的经 ($\bar{X}$)、纬度 ($\bar{Y}$)

$$\bar{X} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(i)} \sum_{i=1}^n w(i)x_i, \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(i)} \sum_{i=1}^n w(i)y_i, \quad (2)$$

式中, x_i 、 y_i 分别是 TC 路径上第 i 时刻所在的经度、纬度, n 是定位次数, $w(i)$ 是第 i 时刻所对应的 TC 强度的权重, 用风速的平方根 $\sqrt{V_i}$ 表示。

(2) 计算经向 ($V_{ar}(x)$)、纬向 ($V_{ar}(y)$) 和对角线 ($V_{ar}(xy)$) 方差

$$V_{ar}(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(i)} \sum_{i=1}^n w(i)(x_i - \bar{X})^2, \quad (3)$$

$$V_{ar}(y) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(i)} \sum_{i=1}^n w(i)(y_i - \bar{Y})^2, \quad (4)$$

$$V_{ar}(xy) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w(i)} \sum_{i=1}^n w(i)(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}). \quad (5)$$

模式 TC 聚类的参数计算与观测相同, 但是模式聚类不单独进行, 而是通过判断其与观测的 6 类 TC 之间的距离来决定其类别。对于某一条模拟 TC(i), 其到观测的第 j 类 TC 之间的平均距离 $d_{i,j}$ 由以下公式计算:

$$d_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^{n_j} \sum_{m=1}^5 |x_{i,m} - x_{j,m}|}{n_j}, \quad (6)$$

其中, n_j 为观测中第 j 类 TC 的个数, m 为 5 个聚类参数。 $x_{i,m}$ 是某一条 TC(i) 的某一个参数, $x_{j,m}$ 是观测的第 j 类 TC 的某一个参数, $d_{i,j}$ 是一种相似度的表征, $d_{i,j}$ 越小表明模拟 TC(i) 与观测的第 j 类 TC 之间差别越小, 从而模拟 TC(i) 的分类可以根据 $d_{i,j}$ 最小值来判定。

表 1 1979~2012 年观测和模拟平均的 6 类 TC 平均质心和方差

Table 1 Average centers and variances of six categories of observed and simulated TC averaged for 1979–2012

类别	数目		纬向质心坐标		经向质心坐标		纬向标准差		经向标准差		经纬向协方差	
	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟
1	119	5	142.1°E	136.0°E	20.8°N	29.5°N	7.4°E	6.7°E	7.7°N	7.3°N	-36.4°E×°N	-36.1°E×°N
2	272	106	118.3°E	122.3°E	17.3°N	20.0°N	3.4°E	3.9°E	1.9°N	2.0°N	-1.0°E×°N	-0.8°E×°N
3	181	40	128.9°E	138.0°E	15.6°N	16.5°N	7.2°E	8.0°E	3.4°N	2.6°N	-19.5°E×°N	-15.0°E×°N
4	138	66	139.6°E	146.4°E	23.4°N	33.0°N	5.6°E	9.2°E	7.2°N	8.6°N	18.2°E×°N	58.9°E×°N
5	119	10	133.3°E	144.4°E	14.6°N	16.7°N	12.9°E	15.4°E	3.9°N	3.2°N	-39.8°E×°N	-43.5°E×°N
6	163	138	151.0°E	152.7°E	24.8°N	26.3°N	3.4°E	4.0°E	3.8°N	3.2°N	-1.2°E×°N	-2.0°E×°N

2.4 模式简介与试验设计

本文所使用的大气环流模式为中国科学院大气物理研究所自主研发的 IAP AGCM4.1。该模式动力框架采用的是均匀经、纬格点的有限差分框架, 水平分辨率有 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 和 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 两个版本, 垂直方向 30 层, 模式顶 2.2 hPa。物理参数化方案包括改进后的 Zhang-McFarlane 深对流参数化方案 (Zhang and McFarlane, 1995; Neale et al., 2008; Richter and Rasch, 2008), 浅对流参数化方案 (Park and Bretherton, 2009), 边界层参数化方案 (Bretherton and Park, 2009), 云宏观物理方案 (Park et al., 2014), 双参数云微物理方案 (Morrison and Gettelman, 2008), RRTMG 辐射方案 (Iacono et al., 2008) 及三模态气溶胶方案 (Liu et al., 2012)。该模式已被广泛应用于季风、大气环流、高温热浪等方面的研究 (Su et al., 2014; Yan et al., 2014; Lin et al., 2016; Adeniyi et al., 2018)

本文使用的是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 版本的 IAP AGCM4.1 的 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 试验结果。AMIP 试验是国际大气模式比较计划的标准试验 (Gates, 1992), 提供了一套统一的逐月变化的海表温度、海冰密集度、温室气体浓度、气溶胶浓度等外强迫资料, 用于驱动大气模式。AMIP 试验被广泛用于评估大气模式在观测的海温和海冰强迫下的模拟性能。为更准确地刻画热带气旋的移动路径, 本文采用的 AMIP 试验的输出

频次设置为 3 h 一次, 积分时间为 1979~2012 年。

3 模拟结果

3.1 总体空间分布特征

图 1 比较了观测与模式模拟的 1979~2012 年西北太平洋所有的 TC 强度和路径分布。可以看出, 西北太平洋上模拟与观测的 TC 在空间分布、路径走向与生成源地上基本一致。在观测 (图 1a) 中, 西北太平洋的 TC 主要源地位于 $5^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$ 之间, TC 路径大多为西北向和西北转向型, 每年的 TC 平均个数为 29.2 个, 且强度多在 1 级以上。而模式模拟 (图 1b) 的 TC 主要生成位置比观测要偏北 5° 左右, 密度也比观测要稀疏, 模拟的年均 TC 个数约为观测的 36%。模拟的 TC 强度大多在 2 级以下, 显著弱于观测, 这与前人的研究一致 (姚隽琛等, 2018), 即 AMIP 模拟可以再现等级 1~2 左右的 TC。

3.2 观测聚类分析结果

为了进一步分析模式模拟结果低估 TC 数目的原因, 利用 K-均值聚类方法 (详见 2.3 节) 将观测的 TC 分为了 6 大类, 进而研究模式对每一类 TC 的模拟情况。图 2 为 1979~2012 年观测中 6 类 TC 的生成源地 (红点) 和路径 (绿线) 分布及其平均值 (黑线)。而表 1 为相应 6 类 TC 的各参数的平均数值。第 1 类 TC 共有 119 个, 源地主要位于大洋中部 ($5^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$, $140^{\circ} \text{E} \sim 180^{\circ}$), 平均质

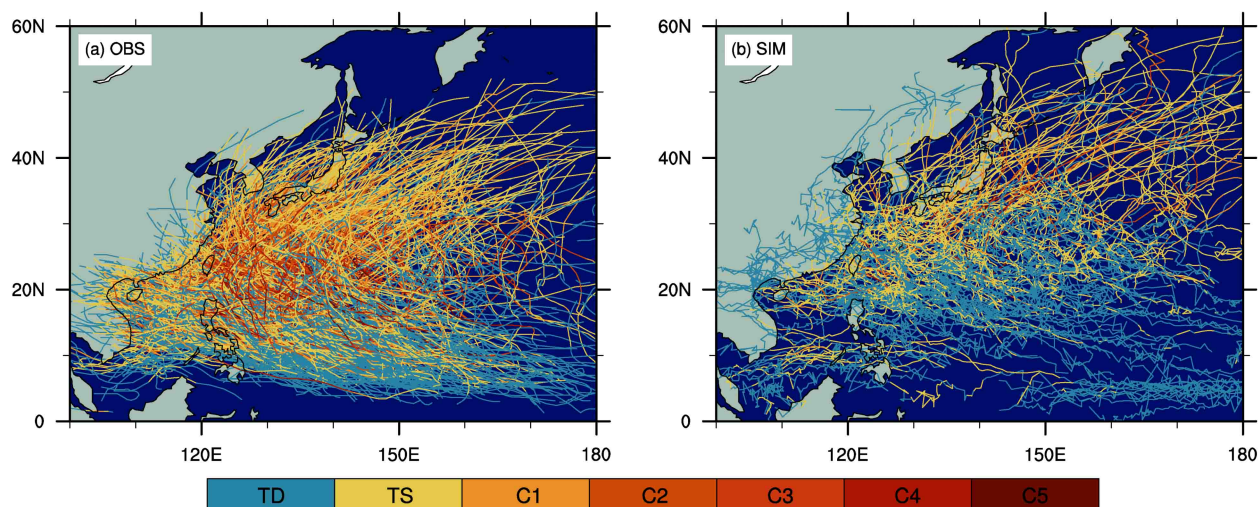


图 1 1979~2012 年西北太平洋地区 (a) 观测和 (b) 模拟的 TC 路径与强度分布。TD: 热带低压; TS: 热带风暴; C1~C5: 风暴等级 1~5

Fig. 1 Tracks and strengths of (a) observed and (b) simulated tropical cyclones (TC) over the northwestern Pacific during 1979–2012. TD: tropical depression; TS: tropical storm; C1–C5: storm levels 1–5

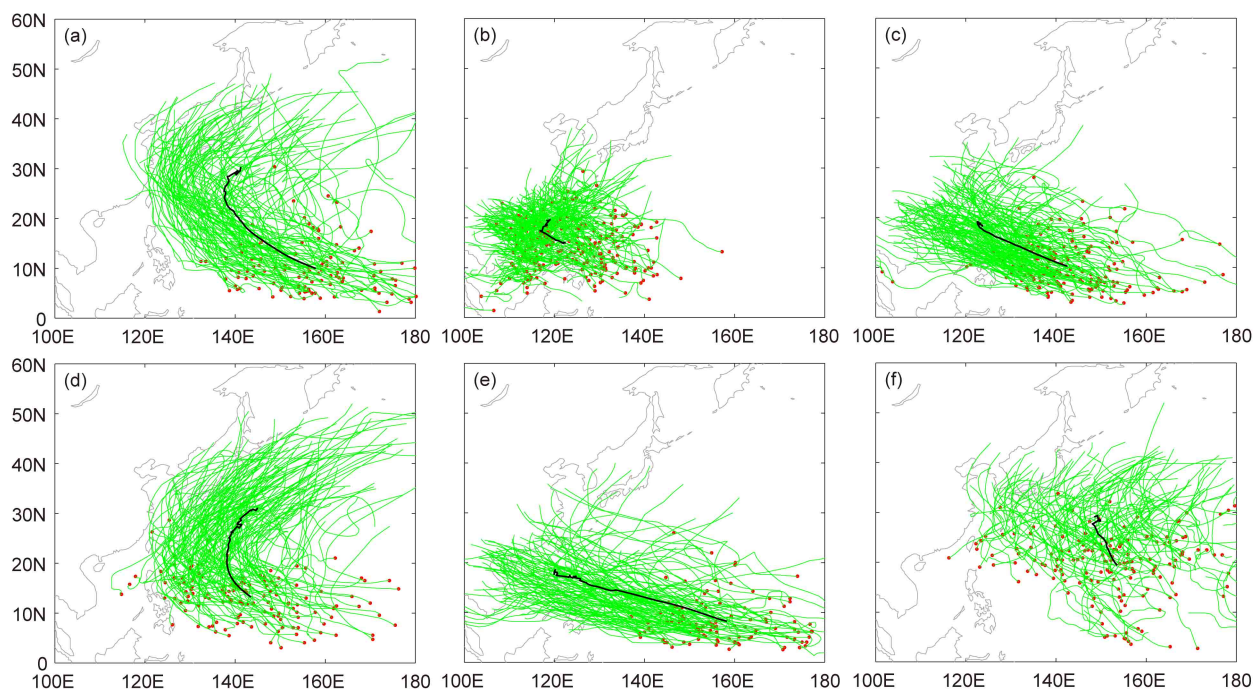


图2 1979~2012年观测中 (a) 第1类、(b) 第2类、(c) 第3类、(d) 第4类、(e) 第5类、(f) 第6类 TC 的平均路径 (黑色线), 单个 TC 的起始位置 (红点) 和路径 (绿色线)

Fig. 2 Original locations (red points), tracks (green lines) of each TC, and mean track (black lines) of (a) the first category (westward-turning tracks), (b) the second category (inshore westward-northwestward tracks), (c) the third category (westward-northwestward tracks), (d) the fourth category (northwestward-turning tracks), (e) the fifth category (westward tracks), (f) the sixth category (eastward-turning tracks) of TC observed during 1979–2012

心位于 (20.75°N, 142.06°E)。经向方向的标准差与纬向方向接近, 经纬向协方差小于 0, 表明该类 TC 路径向西北方向倾斜, 经向和纬向跨度接近, TC 先沿西北方向前进, 到 20°N 左右转向东北方向, 路径呈勺状, 称之为西北行转向类。第 2 类 TC 为近海西—西北行类, 其个数最多, 共有 272 个, 源地主要位于南海北部及菲律宾以东海域 (10°~20°N, 100°~140°E), 平均质心位于 (17.30°N, 118.34°E)。该类 TC 一般向西北偏西方向移动, 登陆菲律宾、中国或越南。相比于其他类, 第 2 类 TC 的经向和纬向标准差以及经纬向协方差最小, 这与其较短的路径有关。第 3 类 TC 个数为 181, 起源于菲律宾东侧的广阔洋面上 (5°~20°N, 130°~160°E), 平均质心位于 (15.58°N, 128.87°E)。纬向方向的标准差为经向方向的 2 倍, 经纬向协方差为负值, 这表明该类 TC 为西北走向且纬向伸展程度大于经向, 称为远海西—西北行类。第 4 类 TC 个数为 138 个, 源地大多位于菲律宾以东 (5°~20°N, 120°E~180°), 平均质心位于 (23.38°N, 139.56°E)。相比于第 1 类 TC, 第 4 类 TC 经向标

准差大于纬向, 且经纬向协方差为正值。结合图 2d 可以看出, 这是由于第 4 类 TC 主要为经向伸展, 且其路径先向西北移动, 转向后向东北方偏移, 为西转向类, 一般登陆日本。第 5 类 TC 个数为 119 个, 其走向与第 3 类相似, 相当于是直行路径, 但其源地更偏东偏南, 纬向方向的伸展长度更大, 路径更长, 一直向偏西方向移动, 大多登陆海南、广东等地, 为西行类。第 6 类 TC 为东转向类, TC 个数为 163, 源地相比于其他类别偏东偏北, 且较为分散, 分布于大洋中部广阔的洋面上, 主要集中在 (15°~25°N, 120°E~180°), 主要的走向为北行。

3.3 模式对各类 TC 的综合模拟评估

图 3 为模拟的各类 TC 路径分布情况。由图可见, 模式模拟结果对于第 1 类和第 5 类 TC 基本没有再现能力。表 1 的统计数据表明, 模拟结果中第 1 类 TC 的个数仅为 5 条, 而第 5 类 TC 的个数仅为 10 条, 均不到观测的 10%。模式对第 2 类 TC 有一定再现能力, 模拟个数为观测的 39%, 经向和纬向的标准差以及经纬向协方差与观测类似

(表 1), 但是模拟的 TC 质心位置较观测偏北偏东, 这与模拟的 TC 源地偏北有关。对于第 3、第 4 类 TC, 模式模拟个数为观测的 22% 和 48%, 虽然模拟的路径特征与观测接近, 但模拟的质心依旧偏北。对于第 6 类 TC, 模式模拟个数为观测的 85%, 模拟的 TC 平均参数也与观测相近 (表 1)。

图 4 给出了观测和模拟的第 2、第 4、和第 6 类 TC 数目和 TC 平均生命周期的季节分布。对于第 2 和第 4 类 TC, 模拟的个数与观测的个数具有相似的季节分布, TC 大部分发生在夏秋季 (6~10 月), 峰值出现在 9 月。但相较于观测, 模式中对于各月的 TC 数目均有一定的低估。对于第 2 类 TC, 各月的低估在 20%~80% 之间, 在春秋季节低估甚为显著。而对于第 4 类 TC, 这种低估则在 26%~77%。对于第 6 类 TC 而言, TC 数目的低估主要集中在 8 月份 (近 46%), 其他月份的模拟值与观测值基本一致。值得注意的是, 虽然 TC 存在明显的个数低估, 但是对于各月 TC 的平均生命周期, 模拟结果与观测结果较为一致 (图 4d-f)。因此模式能再现三类 TC 的季节性变化以及生命周期特征, 但是其在各月对于第 2、第 4 类 TC 个数都存在低估, 而仅在 8 月份对于第 6 类 TC 有显著低估。

为进一步分析模式对第 2 类、第 4 类和第 6 类 TC 的模拟情况, 给出了观测和模拟的各类 TC 参数的概率分布函数图 (图 5)。概率分布函数是根据各类 TC 样本, 采用非参数估计方法核密度估计求得, 因而其既可以表现平均状况又可以表现出个体差异。这里我们用方差椭圆倾角来表示 TC 路径倾斜方向, 0° 表示正北方向, 正值表示沿正北方向顺时针旋转, 而负值表示逆时针旋转。对于第 2 类 TC, 模拟值在右侧尾部的概率偏大, 说明模拟值更易偏东、偏北 (图 5a、b)。模拟的纬向和经向标准差相比观测略有偏大, 整体误差在 5%~15% (图 5c、d)。模拟的 TC 倾斜方向再现了观测的双峰特征, 但是模拟的周期相比观测偏大 1.2 d, 特别是对于生命周期在 10 d 以上的 TC, 偏大较为明显。对于第 4 类 TC, 模拟的质心显著偏北、偏东 (图 5g、h), 这与模拟结果中源地偏北路径偏东一致。虽然模式模拟的纬向标准差与观测基本相同, 但是经向方向模拟结果在尾端偏厚, 均值偏大近 14%, 同时模拟的 TC 平均生命周期也比观测多了近 2 d。相比第 2 类和第 4 类 TC, 第 6 类 TC 的模拟性能显著提高。图 5m、n 表明, 模式很好地模拟出了第六类 TC 的质心分布。虽然模拟的 TC 质心在较高纬度 ($30^\circ\sim40^\circ\text{N}$) 的概率要略大于观

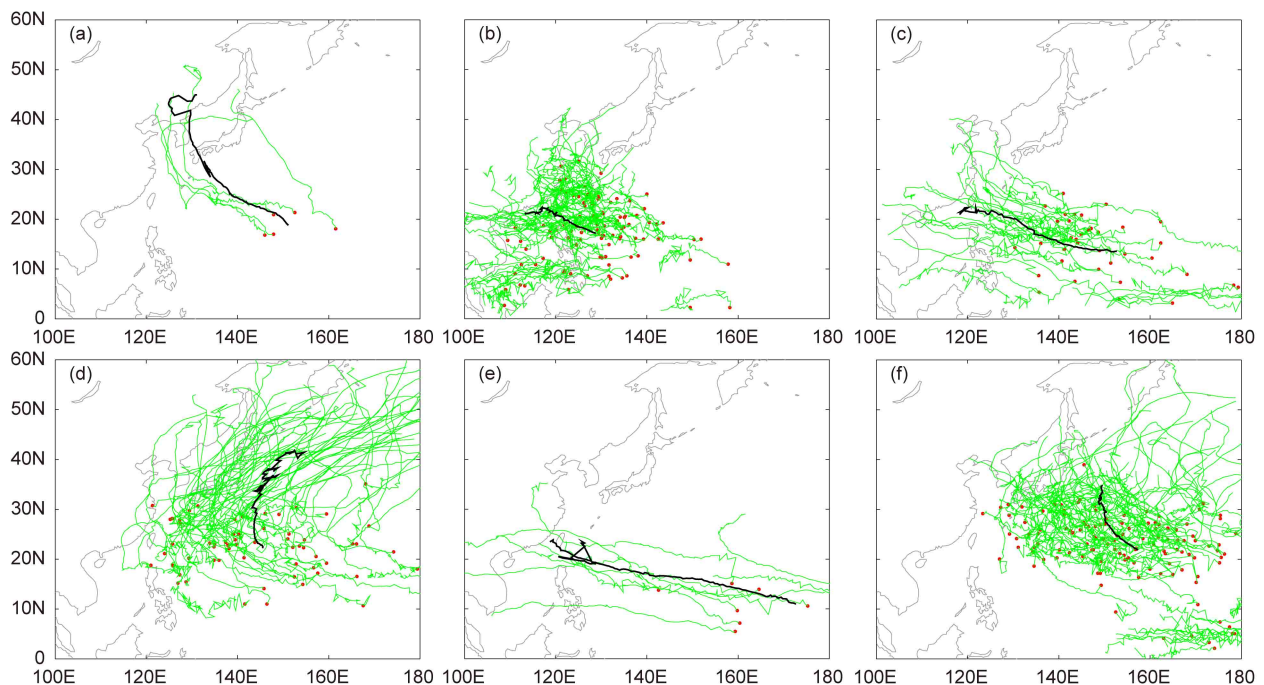


图 3 同图 2, 但为模式模拟的结果

Fig. 3 As in Fig. 2, but for simulation results

测, 从而使得平均质心偏北, 但是这种相对偏差仅在 6% 左右 (图 5n)。就纬向标准差 (图 5o) 而言, 虽然模拟的 TC 在纬向方向上的跨度比较集中导致对于低值和高值的模拟略显不够, 但平均偏差不到 14%。而就经向标准差 (图 5p) 而言, 虽然模拟的概率分布以及均值均与观测基本一致, 但模式对于倾角的模拟还有一定不足, 模拟的倾角相比观测在两端的分布更高, 而在中间的分布偏低 (图 5q), 这表明模拟的 TC 路径向东西方向倾斜的概率更大。就 TC 的生命周期 (图 5r) 而言, 模拟值相比观测值向右偏移, 模拟的平均生命周期相比观测多出近 1 d。综上所述, 模式对于第 2 类和第 6 类 TC 的各参数的总体分布有较好的模拟效果, 模拟质心经度的相对误差在 1%~5%, 而质心纬度的误差在 4%~16%, 经纬向标准差的模拟误差在 5%~15%, TC 平均生命周期偏长 1~1.2 d。而模式对于第 4 类 TC 的模拟位置偏北, 平均生命周期偏大, 使得相对误差在 14%~40%。

3.4 第 6 类 TC 环流的模拟评估

由上节分析可知, 模式对第 6 类 TC 的模拟效果较好。为了分析模拟较好的原因, 我们利用

1979~2012 年欧洲中心 ERA-Interim 资料的风场、高度场进一步评估了模式对第 6 类 TC 发生、发展过程中环流形势的模拟。图 6 与图 7 分别给出了 7~9 月份观测与模式中 TC 发展与削弱期间 500 hPa 环流合成。异常合成图是先选取所有第 6 类 TC 的最强盛时期以及其前后 4 d, 计算各天相对其气候态的异常后再对对应的天数进行合成。5880 gpm 气候态位置则是直接用选取的 TC 天数所对应的气候态直接合成。图 6e 为 TC 最强时刻 (根据最大风速确定), 图 6d 为最强时刻前 1 天而图 6f 为后 1 天, 以此类推到图 6a (最强时刻前 4 天) 与图 6i (最强时刻后 4 天)。这里采用 9 d 代表第 6 类 TC 的生命周期, 是考虑到其平均生命周期大概为 7~8 d (图 4f)。图 6 中阴影表示高度场异常, 箭头代表风场异常, 黑色实线代表气候态副热带高压 (简称副高) 位置 (气候态由第 6 类 TC 发生当日气候态合成, 以 5880 gpm 等值线表示), 绿色实线则表示 TC 发生时的副高位置。图 6a~c 显示位于日本南部的气旋性环流异常不断增强, 对应于 TC 的发展。相应的副高内部为负的高度场异常, 对应副高偏弱, 同时副高西边界相比气候态位置向

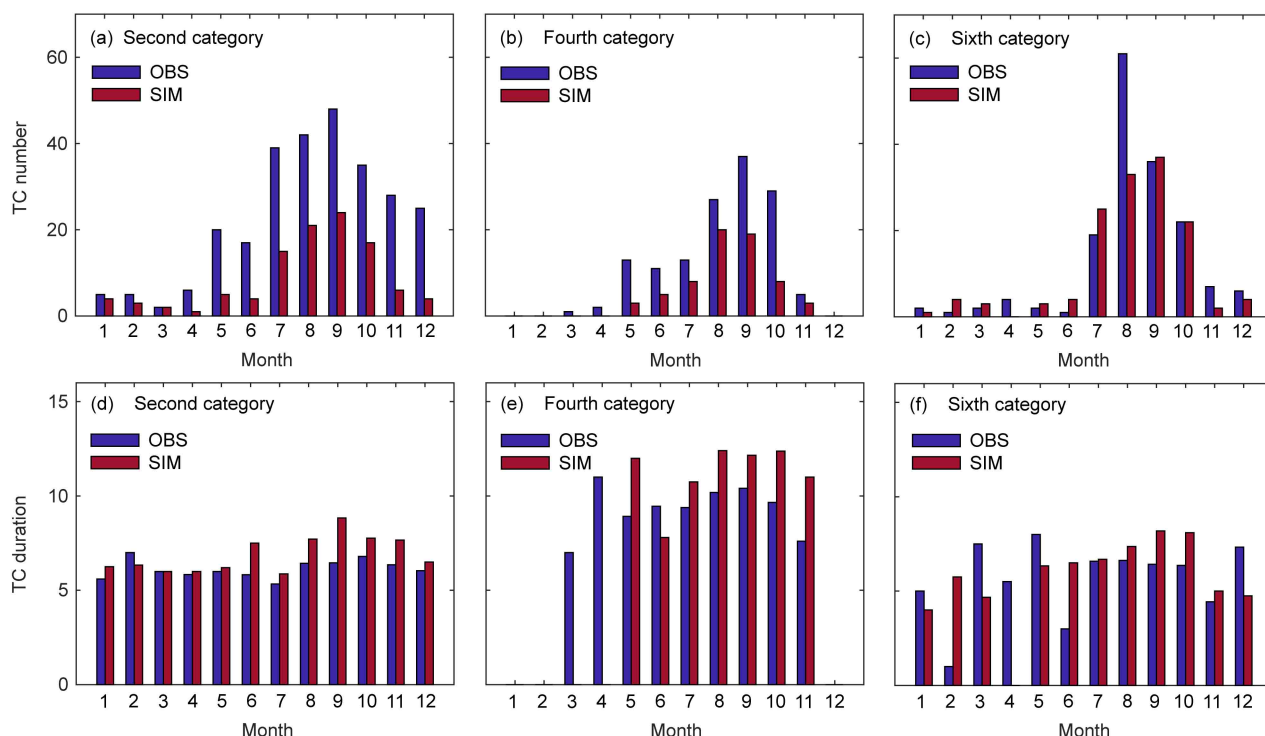


图 4 1979~2012 年观测和模拟 (a、d) 第 2、(b、e) 第 4、(c、f) 第 6 类 TC (a~c) 个数和 (d~f) 生命周期的季节分布

Fig. 4 Observed and simulated (a~c) numbers and (d~f) durations of the (a, d) second, (b, e) fourth, and (c, f) sixth TC categories for different months during 1979~2012

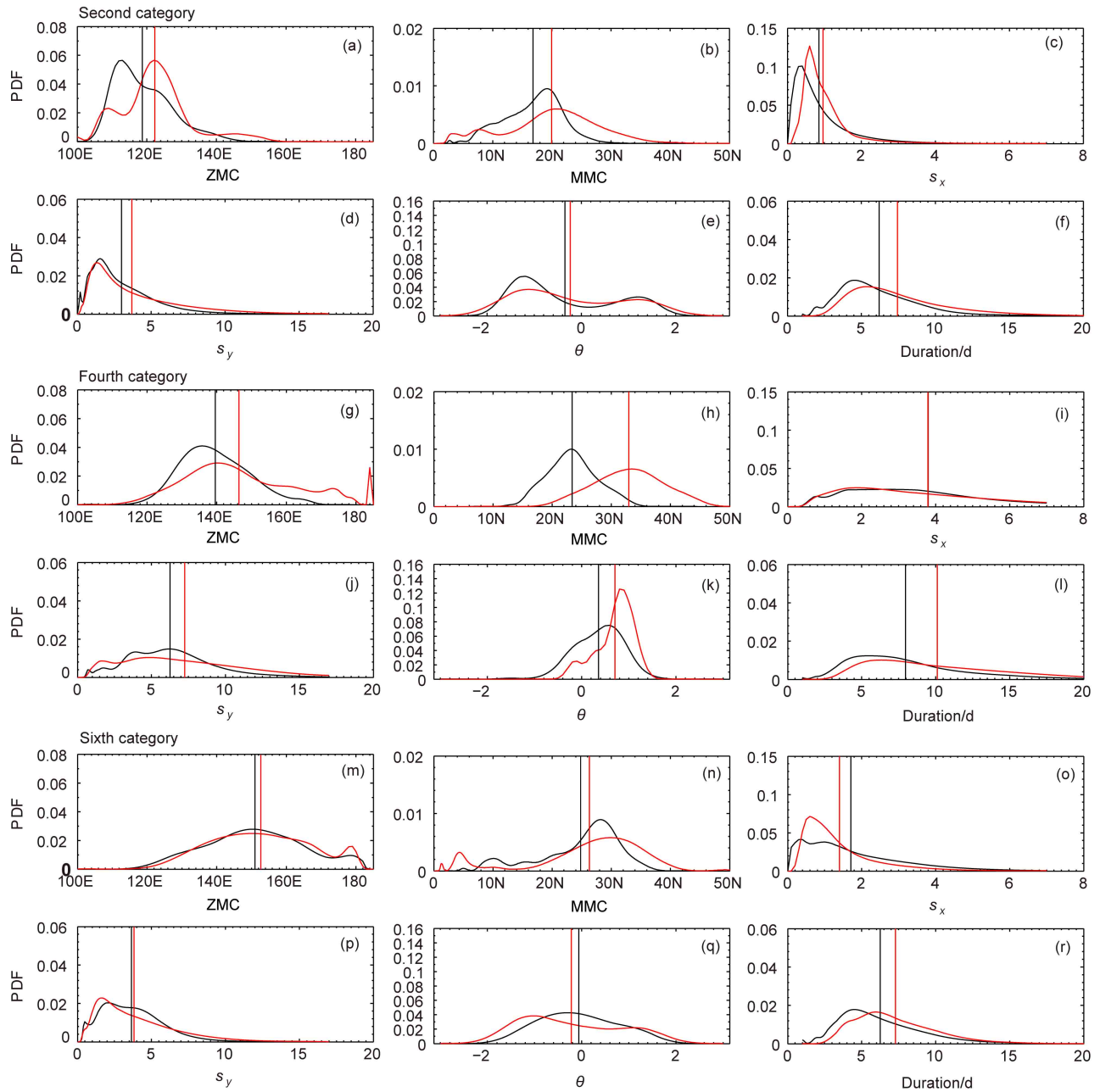


图5 1979~2012年观测(黑线)和模拟(红线)的(a-f)第2类、(g-l)第4类、(m-r)第6类TC(a、g、m)纬向质心、(b、h、n)经向质心、(c、i、o)TC路径的纬向方差 s_x 、(d、g、p)TC路径的经向方差 s_y 、(e、k、q)TC路径的经纬向协方差 θ 、(f、l、r)TC生命周期的概率分布。竖线表示平均值

Fig. 5 Probability distribution functions (PDF) of (a, g, m) zonal mass center (ZMC) of TC track, (b, h, n) meridional mass center (MMC) of TC track, (c, i, o) zonal standard variance (s_x) of TC track, (d, g, p) meridional standard variance (s_y) of TC track, (e, k, q) covariance (θ) of TC track, (f, l, r) TC duration for (a-f) the second TC category, (g-l) the fourth TC category, (m-r) the sixth category of TC observed (black lines) and simulated (red lines) during 1979–2012. The vertical lines are the mean values

东移动, 面积减小。图6f-i, 气旋性环流异常逐渐减弱, 对应于TC的减弱消失, 同时副高西边界逐渐恢复到气候态的位置。图7给出的是模式模拟的TC发展过程的环流形势合成。模式能够较准确地模拟出气候态副高的位置, 相比观测西伸脊点略

偏东, 面积略偏小。对日本南部TC气旋性环流异常的位置, 模式也能够准确地模拟, 只是强度较观测偏弱。模式准确地再现了TC发生、发展过程的环流演变趋势, 如副高的先东退再西进, 以及副高西北侧气旋性环流异常的先加强后减弱等。

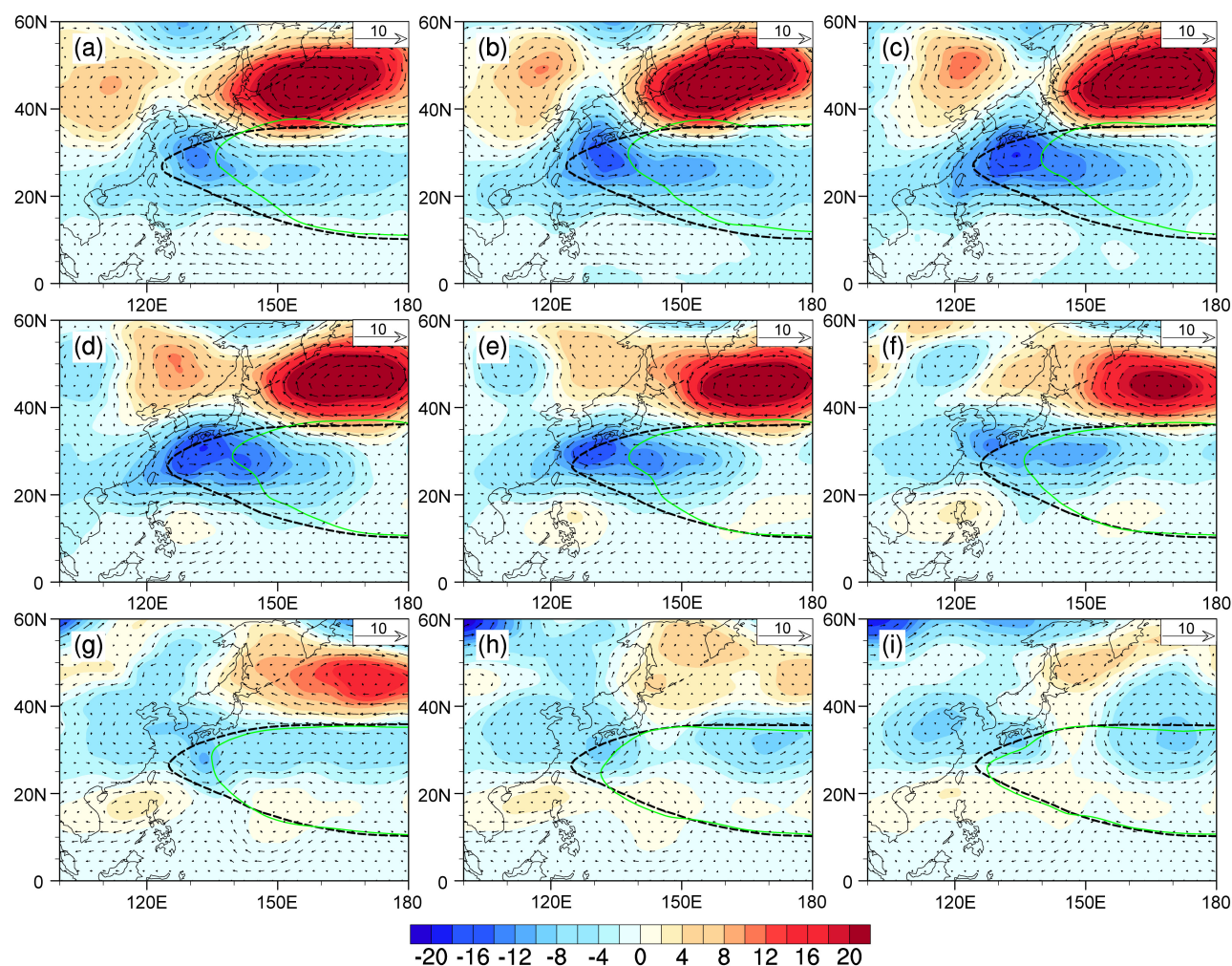


图6 1979~2012年7~9月份平均的观测的第6类TC的500 hPa环流异常(箭头, 单位: m s^{-1})与高度场异常(阴影, 单位: gpm)合成: (e) 观测中TC最强盛的时刻; (d-a) TC最强时刻的前1、2、3、4天; (f-i) TC强盛时刻后的1、2、3、4天。黑色线表示气候态的5880 gpm所在位置, 绿色线为TC发生期间的5880 gpm位置

Fig. 6 Composites of circulation anomalies (arrows, units: m s^{-1}) and geopotential height anomalies (shadings, units: gpm) at 500 hPa for the sixth category of TC observed for July–September during 1979–2012: (e) The strongest phase of TC; (d–a) the first, second, third, and fourth day before the strongest phase; (f–i) the first, second, third, and fourth day after the strongest phase. The black lines show the climatological positions of 5880 gpm; the green lines show the composite positions of 5880 gpm during TC duration

图8为第6类TC生成前4天到TC消亡整个生命周期的副高强度指数和副高面积指数异常合成。图8a表明在第6类TC发生前, 副高面积指数由正异常迅速降为负异常, 而副高强度指数在TC发生前已经为负异常, 这种大尺度环境条件有利于第6类TC后续向北推进。第6类TC发生发展期间, 由于其强度增长以及持续向北推进, 副高强度和面积不断减弱, 在第8天左右达到最低值。随后副高面积和强度缓慢增长, 逐渐接近气候态。总体而言, 模式模拟结果(图8b)与观测十分吻合, 副高强度和面积变化曲线的相关系数分别达到

0.88和0.89, 均超过99%信度水平的显著性检验。因此, 模式对于第6类TC发生、发展过程中的环流背景场有很好的模拟能力, 这也可能是模式对第6类TC模拟效果最好的原因。

4 总结与讨论

本文基于 0.5° 分辨率的大气环流模式IAP AMIP4.1在1979~2012年的模拟结果, 利用美国伯克利实验室开发的一款极端气候分析工具包(TECA)以及K-均值聚类方法评估了模式对西北太平洋热带气旋的模拟能力。总体而言, IAP

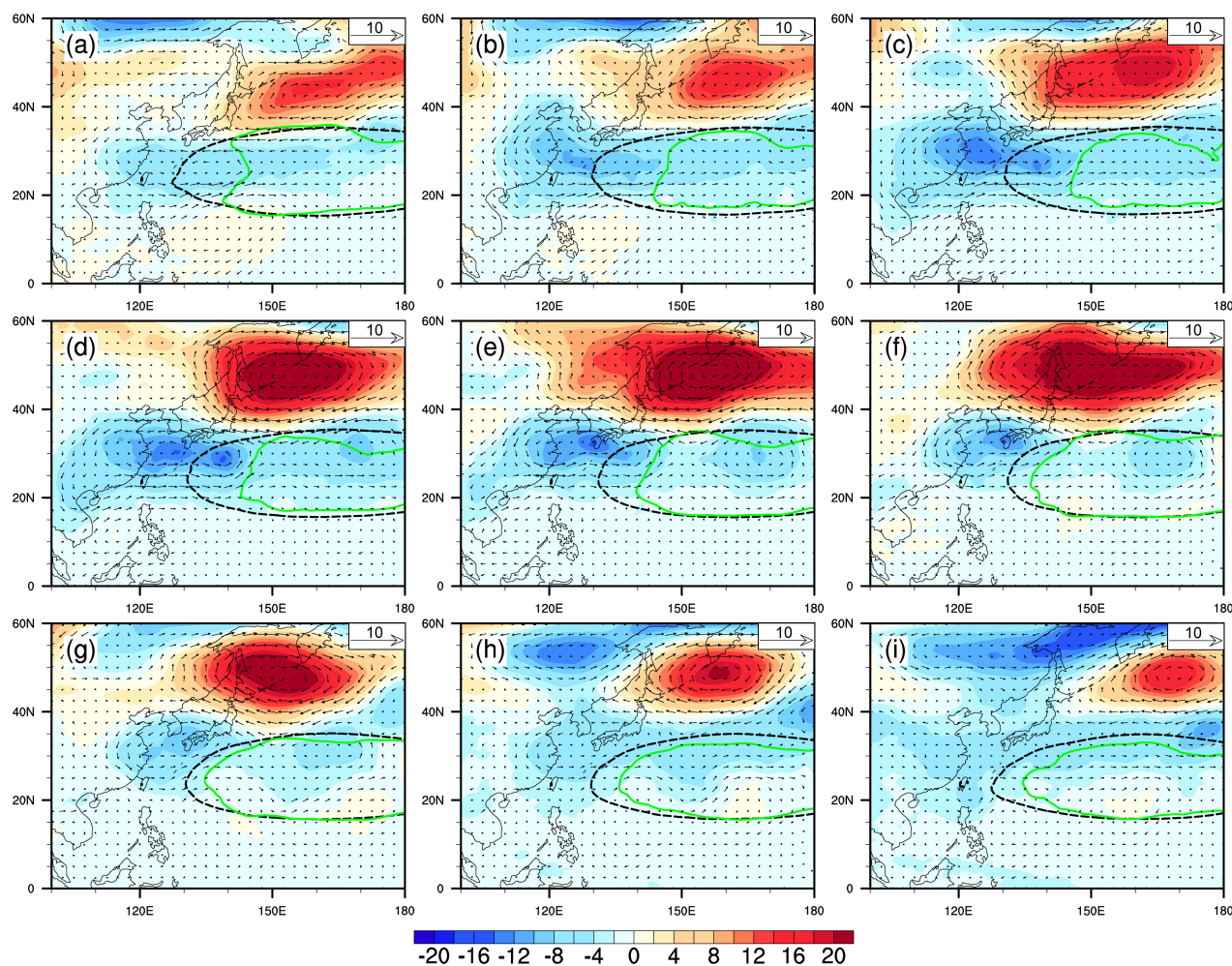


图7 同图6, 但为模式模拟结果
Fig. 7 As in Fig. 6, but for simulation results

AMIP4.1 能够较准确地再现西北太平洋 TC 的空间分布、路径走向与生成源地, 不过对 TC 的强度与数目有所低估, 仅模拟出观测中 TC 总数目的 36%。通过聚类分析表明, 模式对于第 1 类 (西北行转向类) 和第 5 类 (西行类) TC 基本没有模拟能力, 模拟的 TC 个数不到观测的 10%; 对于第 3 类 (远海西—西北行类) TC 也仅模拟出 22%。而对于第 2 类 (近海西—西北行类)、第 4 类 (西转向类) 和第 6 类 (东转向类) TC, 模式具有一定的模拟能力, TC 的模拟个数可分别达到观测的 39%、48% 和 85%, 且模拟的季节变化与观测的相关系数在 0.89~0.91 之间 (超过 99% 信度水平)。模式在各月对于第 2、第 4 类 TC 个数均存在一定程度的低估, 而对第 6 类 TC 个数的模拟除 8 月份偏少外, 其余各月均与观测较为接近。模式对于 TC 生命周期特征的模拟要优于 TC 个数模拟, 周期误

差在 1~2 d。

就模拟的 TC 路径而言, 模式对于第 2 类和第 6 类 TC 的路径有较好的模拟效果, 其中模拟的 TC 质心经度的相对误差在 1%~5%, 质心纬度的误差在 4%~16%, 经纬向标准差的模拟误差在 5%~15%, TC 的平均生命周期偏长 1~1.2 d。而模式对于第 4 类 TC 的模拟位置偏北, 生命周期偏长, 使得相对误差在 14%~40% 左右。此外, 模式很好地再现了第 6 类 TC 发生、发展期间副高的东退和 TC 消亡期间副高的西进特征, 相应的副高强度和面积在第 6 类 TC 发生、发展过程中的演变趋势也模拟的较好, 与观测的相关系数分别达到 0.88 和 0.89。

模式对于第 1 类和第 5 类 TC 模拟能力较差可能是由于其对副高强度和大小的模拟存在一定的偏差。图 9 给出了观测和模拟的 7 月 (第 5 类 TC 出

现频次最多的月份)和8月(第1类TC出现频次最多的月份)副高的气候态位置。可以看出,模拟的7月副高相比观测偏东,副高南部边界偏北了近5个纬度,这使得模式中的TC很难像第5类TC(图2e)那样在环境流场的引导下径直向西北部移动,而是会提前转向东北而成为第四类TC。而模拟的8月副高西伸脊点的位置比观测显著偏西

偏南,不利于模拟的TC北上至我国东海北部附近再折向东北(第1类TC),而是有利于西行靠近我国华南沿海(更接近第3类)。因第3类与第5类TC的路径相似,两类TC的发生、发展过程与形成原因可能类似,因此副高模拟的偏差,可能也是造成模式对于第3类TC模拟不足的原因之一。然而,副高模拟偏差对于TC模拟偏差的具体贡献

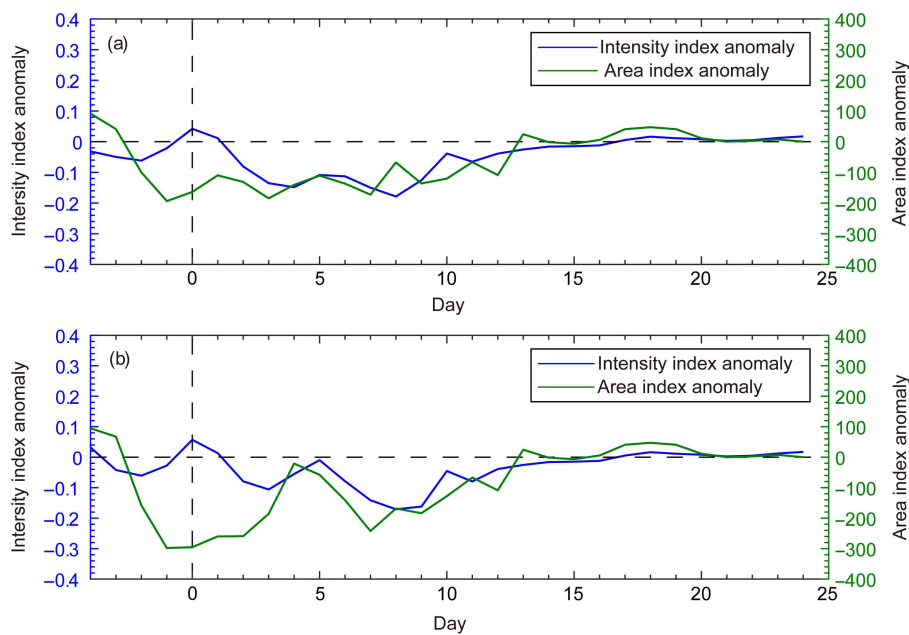


图8 1979~2012年7~9月份平均的(a)观测和(b)模拟的第6类TC发生、发展期间西北太平洋副热带高压强度与面积指数异常。横坐标的0表示TC发生当天,-1表示TC发生前1天,1表示发生后1天,以此类推

Fig. 8 Intensity index anomaly (blue lines) and area index anomaly (green lines) for the northwestern Pacific subtropical high during the happening and development of the sixth category of TC (a) observed and (b) simulated in July–September during 1979–2012. Number 0 in x-axis indicates the day of TC occurring, -1 and 1 indicate the first day before and after the beginning of the TC, respectively, and so on

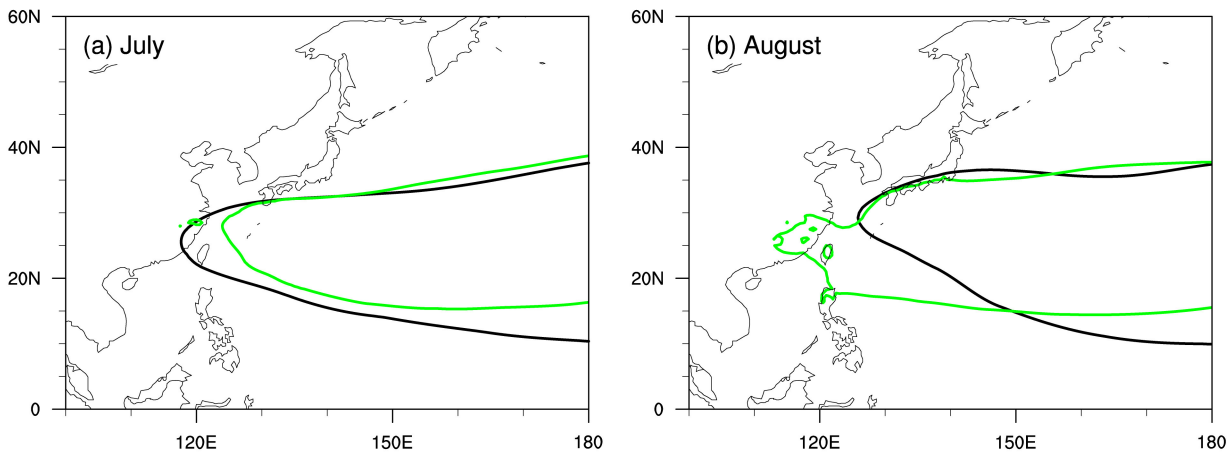


图9 1979~2012年(a)7月、(b)8月观测(黑线)和模拟(绿线)的西北太平洋副热带高压气候态位置分布

Fig. 9 Observed (black line) and simulated (green line) climatological positions of the northwestern Pacific subtropical high in (a) July and (b) August during 1979–2012

程度还有待进一步的归因分析。此外, 模式对于 5°~15°N 生成的 TC 个数模拟偏少也是其低估第 1 类、第 5 类 TC 的原因之一。除副高外, 台风的生成和移动还受相对涡度、垂直风切变、相对湿度等大尺度环境场的影响, 模式对上述大尺度环境场的模拟能力有待进一步检验, 以寻找模式对 TC 生成频数和移动路径与观测存在偏差的其他可能原因。

本文分析的 AMIP 数值试验采用的是观测月平均海温强迫大气模式, 观测中可能存在的一些海温扰动信号被平滑掉了, 也在一定程度上造成模拟的台风频数偏少。今后我们拟采用日海温数据强迫 IAP AGCM4.1 进行数值模拟试验, 考察模式对台风的模拟能力是否能有所提高。

参考文献 (References)

- Adeniyi M O, Lin Z, Zhang H. 2018. Evaluation of the performance of IAP-AGCM4.1 in simulating the climate of West Africa [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 136(3-4): 1419-1434. doi:10.1007/s00704-018-2571-9
- Bacmeister J T, Wehner M F, Neale R B, et al. 2014. Exploratory high-resolution climate simulations using the community atmosphere model (CAM) [J]. *J. Climate*, 27(9): 3073-3099. doi:10.1175/JCLI-D-13-00387.1
- Bengtsson L, Böttger H, Kanamitsu M. 1982. Simulation of hurricane-type vortices in a general circulation model [J]. *Tellus*, 34(5): 440-457. doi:10.3402/tellusa.v34i5.10830
- Bengtsson L, Botzet M, Esch M. 1996. Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? [J]. *Tellus*, 48A(1): 57-73. doi:10.3402/tellusa.v48i1.11632
- Bretherton C S, Park S. 2009. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model [J]. *J. Climate*, 22(12): 3422-3448. doi:10.1175/2008JCLI2556.1
- Broccoli A J, Manabe S. 1990. Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 17(11): 1917-1920. doi:10.1029/GL017i011p01917
- 曹翔. 2014. 全球 50 km 分辨率 SNU-AGCM 模式模拟热带气旋活动 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 60pp. Cao Xiang. 2014. Simulation of global tropical cyclone activity using 50-km-resolution SNU-AGCM [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 60pp.
- CRED. 2016. EM-DAT: The international disaster database [EB/OL]. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. <https://www.emdat.be/> [2019-10-13]
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(656): 553-597. doi:10.1002/qj.828
- Dong X, Xue F, Zhang H, et al. 2012. Evaluation of surface air temperature change over China and the globe during the twentieth century in IAP AGCM4.0 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5(5): 435-438. doi:10.1080/16742834.2012.11447031
- Emanuel K. 2010. Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES reanalysis, 1908-1958 [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2(1): 1. doi:10.3894/JAMES.2010.2.1
- Emanuel K A. 2013. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110(30): 12219-12224. doi:10.1073/pnas.1301293110
- Gates W L. 1992. AMIP: The atmospheric model intercomparison project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73(12): 1962-1970. doi:10.1175/1520-0477(1992)073<1962:ATAMIP>2.0.CO;2
- Haarsma R J, Mitchell J F B, Senior C A. 1993. Tropical disturbances in a GCM [J]. *Climate Dyn.*, 8(5): 247-257. doi:10.1007/BF00198619
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D13): D13103. doi:10.1029/2008JD009944
- Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. 2010. Tropical cyclones and climate change [J]. *Nature Geoscience*, 3(3): 157-163. doi:10.1038/ngeo779
- 栗哈, 凌铁军, 祖子清, 等. 2016. CMIP5 模式对登陆中国热带气旋活动的模拟和预估 [J]. *海洋预报*, 33(6): 10-21. Li Han, Ling Tiejun, Zu Ziqing, et al. 2016. Climate change projection of the landfalling tropical cyclone in China: Results of CMIP5 models [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 33(6): 10-21. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2016.06.002
- Li J X, Bao Q, Liu Y M, et al. 2019. Evaluation of FAMIL2 in simulating the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4): 1117-1136. doi:10.1029/2018MS001506
- Lin Z H, Yu Z, Zhang H, et al. 2016. Quantifying the attribution of model bias in simulating summer hot days in China with IAP AGCM 4.1 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 9(6): 436-442. doi:10.1080/16742834.2016.1232585
- Liu X, Easter R C, Ghan S J, et al. 2012. Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Description and evaluation in the Community Atmosphere Model CAM5 [J]. *Geoscientific Model Development*, 5(3): 709-739. doi:10.5194/gmd-5-709-2012
- Manabe S, Holloway Jr J L, Stone H M. 1970. Tropical circulation in a time-integration of a global model of the atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 27(4): 580-613. doi:10.1175/1520-0469(1970)027<0580:TCIATI>2.0.CO;2
- Moore J C, Grinstead A, Guo X R, et al. 2015. Atlantic hurricane surge response to geoengineering [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 112(45): 13794-13799. doi:10.1073/pnas.1510530112
- Morrison H, Gettelman A. 2008. A new two-moment bulk stratiform

- cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests [J]. *J. Climate*, 21(15): 3642–3659. doi:10.1175/2008JCLI2105.1
- Murakami H, Wang Y Q, Yoshimura H, et al. 2012. Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM [J]. *J. Climate*, 25(9): 3237–3260. doi:10.1175/JCLI-D-11-00415.1
- Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al. 2009. Classifying North Atlantic tropical cyclone tracks by mass moments [J]. *J. Climate*, 22(20): 5481–5494. doi:10.1175/2009JCLI2828.1
- Neale R B, Richter J H, Jochum M. 2008. The impact of convection on ENSO: From a delayed oscillator to a series of events [J]. *J. Climate*, 21(22): 5904–5924. doi:10.1175/2008JCLI2244.1
- Park S, Bretherton C S, Rasch P J. 2014. Integrating cloud processes in the Community Atmosphere Model, version 5 [J]. *J. Climate*, 27(18): 6821–6856. doi:10.1175/JCLI-D-14-00087.1
- Prabhat, Rübel O, Byna S, et al. 2012. TECA: A parallel toolkit for extreme climate analysis [J]. *Procedia Computer Science*, 9: 866–876. doi:10.1016/j.procs.2012.04.093
- Prabhat, Byna S, Vishwanath V, et al. 2015. TECA: Petascale pattern recognition for climate science [C]//Proceedings of the 16th Computer Analysis of Images and Patterns, Valletta, Malta: Springer, 426–436. doi:10.1007/978-3-319-23117-4_37
- Richter J H, Rasch P J. 2008. Effects of convective momentum transport on the atmospheric circulation in the Community Atmosphere Model, version 3 [J]. *J. Climate*, 21(7): 1487–1499. doi:10.1175/2007JCLI1789.1
- Su T H, Xue F, Zhang H. 2014. Simulating the intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon by IAP AGCM4.0 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(3): 570–580. doi:10.1007/s00376-013-3029-8
- 孙泓川, 周广庆, 曾庆存. 2012. IAP 第四代大气环流模式的耦合气候系统模式模拟性能评估 [J]. *大气科学*, 36(2): 215–233. Sun Hongchuan, Zhou Guangqing, Zeng Qingcun. 2012. Assessments of the climate system model (CAS-ESM-C) using IAP AGCM4 as its atmospheric component [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(2): 215–233. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11062
- Unisys. 2011. Unisys weather hurricane/tropical data [EB/OL]. <http://weather.unisys.com/hurricane/> [2019-10-11]
- Wang T, Wang H J. 2013. Mid-Holocene Asian summer climate and its responses to cold ocean surface simulated in the PMIP2 OAGCMs experiments [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(10): 4117–4128. doi:10.1002/jgrd.50287
- 吴吉东, 傅宇, 张洁, 等. 2014. 1949~2013 年中国气象灾害灾情变化趋势分析 [J]. *自然资源学报*, 29(9): 1520–1530. Wu Jidong, Fu Yu, Zhang Jie, et al. 2014. Meteorological disaster trend analysis in China: 1949–2013 [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 29(9): 1520–1530. doi:10.11849/zrzyxb.2014.09.007
- Yan Z B, Lin Z H, Zhang H. 2014. The relationship between the East Asian subtropical westerly jet and summer precipitation over East Asia as simulated by the IAP AGCM4.0 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 7(6): 487–492. doi:10.3878/AOSL20140048
- 杨善林, 李永森, 胡笑旋, 等. 2006. K-means 算法中的 k 值优化问题研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 26(2): 97–101. Yang Shanlin, Li Yongsen, Hu Xiaoxuan, et al. 2006. Optimization study on k value of K-means algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice (in Chinese)*, 26(2): 97–101. doi:10.3321/j.issn:1000-6788.2006.02.013
- 姚隽琛, 周天军, 邹立维. 2018. 基于气候系统模式 FGOALS-g2 的热带气旋活动及其影响的动力降尺度模拟 [J]. *大气科学*, 42(1): 150–163. Yao Junchen, Zhou Tianjun, Zou Liwei. 2018. Dynamical downscaling of tropical cyclone and associated rainfall simulations of FGOALS-g2 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(1): 150–163. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17129
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model [J]. *Atmosphere-Ocean*, 33(3): 407–446. doi:10.1080/07055900.1995.9649539
- Zhang H, Zhang M H, Zeng Q C. 2013. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(5): 1558–1576. doi:10.1175/MWR-D-11-00367.1
- Zhao M, Held I M, Lin S J, et al. 2009. Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM [J]. *J. Climate*, 22(24): 6653–6678. doi:10.1175/2009JCLI3049.1
- 郑颖青, 余锦华, 吴启树, 等. 2013. K-均值聚类法用于西北太平洋热带气旋路径分类 [J]. *热带气象学报*, 29(4): 607–615. Zheng Yingqing, Yu Jinhua, Wu Qishu, et al. 2013. K-means clustering method for classification of the northwestern Pacific tropical cyclone tracks [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 29(4): 607–615. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.009
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 510pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Principles and Methods of Meteorology (in Chinese) [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 510pp.