

辅天华, 陈海山, 曾智华, 等. 云微物理参数化对东亚近海热带气旋活动模拟的影响[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(1): 12-21.
FU Tianhua, CHEN Haishan, ZENG Zhihua, et al. Impact of cloud microphysical parameterization schemes on the simulation of tropical cyclones over offshore areas of East Asia[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(1): 12-21. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.002. (in Chinese)

云微物理参数化对东亚近海热带气旋活动模拟的影响

辅天华¹, 陈海山¹, 曾智华², 徐明³

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 3. 上海市气象学会, 上海 200030)

摘要: 基于 CWRf 模式 (Climate Extension of Weather Research and Forecast Model) 结果, 探讨了 8 种云微物理参数化方案对 1986—2015 年间东亚近海热带气旋的空间分布、频数及强度模拟的影响。结果发现: CWRf 模式中各云微物理参数化方案模拟的热带气旋频数普遍较观测偏少, 其模拟的强度相比观测也偏弱; 热带气旋的空间分布和频数对云微物理参数化方案的选择较为敏感, 而云微物理方案的选择对热带气旋强度的模拟影响不大; Morrison 方案和 Morrison-a 方案模拟的热带气旋空间分布更接近于观测, 但对热带气旋频数及强度的年际变化趋势模拟得较差, 而 GSFCGCE 方案的 TS 评分及强度、频数的相关系数均较其他方案偏高。综合来看, 采用 GSFCGCE 方案模拟热带气旋活动总体最优。进一步分析发现, 相较于 Morrison 方案和 Thompson 方案, 考虑气溶胶影响的 Thompson-a 和 Morrison-a 方案不仅可以有效提高对热带气旋频数及空间分布的模拟能力, 还对热带气旋频数及强度年际变化趋势的模拟能力也有所提升。

关键词: CWRf; 云微物理参数化; 模式评估; 热带气旋

中图分类号: P457.8; P456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)01-0012-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.002

Impact of cloud microphysical parameterization schemes on the simulation of tropical cyclones over offshore areas of East Asia

FU Tianhua¹, CHEN Haishan¹, ZENG Zhihua², XU Ming³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Meteorological Society, CMA, Shanghai 200030, China)

Abstract Based on CWRf (Climate Extension of Weather Research and Forecast) model, 8 cloud microphysical parameterization schemes are compared in simulations of tropical cyclones (TCs) occurred over offshore areas of East Asia from 1986 to 2015 with respect to spatial distribution, frequency, and intensity. It is found that the TCs simulated by each cloud microphysical parameterization scheme in CWRf model have less frequency and weaker intensity compared with observations. The spatial distribution and frequency of the simulated TCs are sensitive to the selection of cloud microphysical parameterization schemes, whereas it has little impact on the TC intensity. The spatial distribution of the

收稿日期: 2019-11-25; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家重点研究发展计划项目 (2018YFC1506405); 国家自然科学基金项目 (41975067, 41275067, 41575108)

作者简介: 辅天华, 男, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与气候数值模拟研究, fth19950510@163.com。

通信作者: 陈海山, 男, 博士, 教授, 主要从事台风气候理论研究, haishan@nuist.edu.cn。

通信作者: 曾智华, 男, 博士, 研究员, 主要从事台风机理和预报技术研究, zengzh@typhoon.org.cn。

TCs is well simulated by the Morrison and Morrison-a schemes, while the annual variation tendency of TC frequency and intensity is poorly simulated by these two schemes in comparison with other schemes; by contrast, the GSFCGCE scheme performs better in the TS score and correlation coefficients between frequency and intensity. In all, the GSFCGCE scheme can better simulate TC activities than other microphysical schemes in CWRf model. Further analysis shows that compared with the Morrison and Thompson schemes, the Thompson-a and Morrison-a schemes, which take the impact of aerosol into consideration, can improve not only the simulation of frequency and spatial distribution, but also annual variation tendency of frequency and intensity.

Key words CWRf; cloud microphysical parameterization scheme; model evaluation; tropical cyclone

引言

西北太平洋是全球热带气旋活动最为频繁的海域之一,平均每年约有 27 个热带气旋在该海域生成,约占全球热带气旋总数的 1/3^[1]。当前,台风活动在全球变暖背景下的变化趋势越来越被人们关注,近些年来对全球台风活动变化特征的观测研究、成因分析、数值模拟与预测等方面都取得了很大的进展^[2-4]。

随着计算机技术的发展,使用高分辨率的气候模式模拟热带气旋已取得了丰硕的成果,然而模式中参数化方案的不确定性仍会对热带气旋活动的模拟产生一定的影响。

云微物理过程通过影响地气系统间的水循环及热量收支,在数值模拟中扮演了非常重要的角色^[5]。研究指出,不同云微物理参数化方案对热带气旋强度的模拟影响较小,如周昊等^[6]利用 WRF 模式模拟超强台风“鲑鱼”时,不同云微物理方案模拟的台风中心气压变化趋势较为一致;HUA and LIU^[7]利用 GRAPES 模式模拟台风 KROSA (2007) 时也认为热带气旋强度的模拟对云微物理方案的变化表现并不敏感;而对热带气旋的路径模拟,不同云微物理方案表现不一。吴珊珊等^[8]对比了 WRF 模式中 13 种不同的云微物理参数化方案对台风“麦德姆”登陆后路径的模拟,发现台风路径对云微物理方案的选择较为敏感,在相同条件下模拟路径与实况路径的最小值和最大值相差约 40 km。周昊等^[6]、HUA and LIU^[7]也在个例的分析中得到了类似的结论。

而另些研究则认为云微物理方案对热带气旋路径影响小,强度的影响则相对较大,如 TAO et al.^[9]利用 WRF 模式模拟飓风 KATRINA 时,热带气旋的路径对不同云微物理方案表现不敏感,平均偏差计算上模拟最好的 Goddard 2ICE 方案与模拟

最差的 Thompson 方案仅相差 20 km; MOHAN et al.^[10]利用 WRF-ARW 模式模拟孟加拉湾的 4 次强热带气旋过程时也得出不同云微物理方案模拟的热带气旋强度有明显的差异,而模拟的热带气旋路径尽管有所不同但相比对强度的影响明显较小。因此,根据所选个例及模式方案不同,结果会产生很大差异。虽然比较在高分辨率气候模式下不同云微物理方案模拟热带气旋气候特征的能力已然成为许多研究关注的重点,但是这方面的研究相对较少,主要原因在于分析不同云微物理方案在气候尺度上模拟热带气旋的活动需要大量的模拟数据资料,而计算资源上的限制使得模拟的数据资料很难获得。

LIANG et al.^[11-12]在 WRF 模式的基础上研发了区域气候模式 CWRf (Climate Extension of Weather Research and Forecast Model),进行了大量的敏感性试验和验证研究,相较于 WRF 模式,CWRf 模式在初始化的处理、侧边界动力松弛、地面边界条件及物理过程参数化方案上均有改进^[13]。目前 CWRf 模式已被广泛地应用于夏季降水等大范围区域气候特征的模拟^[14-15],而 CWRf 模式在区域气候模拟上的优异表现是否同样对热带气旋的模拟适用是目前人们开始关注的重点。

本文基于 LIANG et al.^[16] CWRf 模拟的 8 种不同的云微物理参数化方案对东亚区域的模拟结果,探讨了云微物理参数化方案对 1986—2015 年东亚近海热带气旋活动的模拟影响,并结合 TS 评分、空报率 (FAR)、漏报率 (PO) 以及相关系数的计算,分析比较 CWRf 模式中云微物理参数化方案对热带气旋气候特征的模拟差异,为 CWRf 模拟和预报热带气旋活动提供一定的依据;同时也有助于在不同云微物理方案中挑选出适用于东亚近海区域热带气旋活动模拟的合适方案。

1 资料与方法

1.1 模式介绍

CWRF 模式是 WRF 模式在气候预报能力上的拓展,模式采用的是 Lambert 投影,模拟区域的中心为 $35.18^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$, 经向共 172 个格点, 纬向共 232 个格点, 并为每一组包括积云对流、云微物理、边界层、辐射过程等关键物理过程设计了较为全面的交替参数化方案, 用于敏感性试验比较。研究区域选取在东亚近海(图 1), CWRF 模式从 1979 年 10 月 1 日积分至 2015 年 12 月 31 日, 而本文因考虑到模式初始化需要一定的时间, 采用的研究时段是从 1986 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日共 30 a。

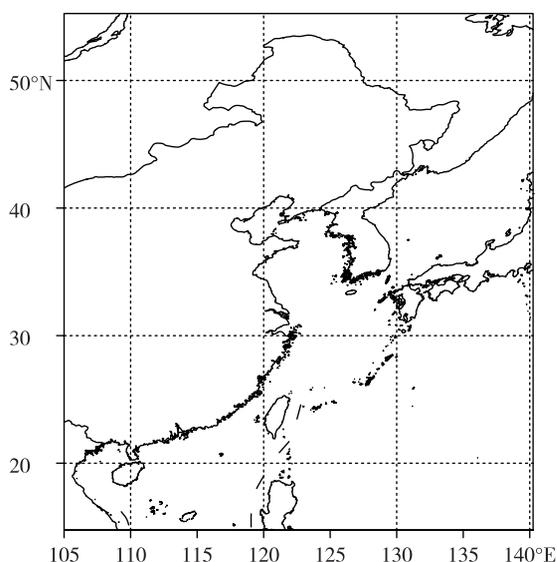


图 1 研究区域的选择

Fig.1 Geographic area used in the study

表 1 具体描述了 CWRF 中的 8 种云微物理方案以及在本文研究中所用的简称, 其中 GSFCGCE 方案^[17]为控制试验所采用的云微物理参数化方案, 而其他 7 种为敏感性试验选用的云微物理方案。控制试验中的积云对流方案采用优化集合积云参数化方案(ECP)^[18], 边界层方案采用 CAM (Community Atmosphere Model) 方案^[19], 辐射过程采用 GSFCCLXZ (Goddard Space Flight Center Liang, Xinzhong Radiation Scheme) 方案^[20]。在预处理阶段, 将 CWRF 的数据插值至 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的网格中, 进而与 JTWC 的资料保持一致。

气溶胶作为云凝结核影响着对流活动的发展, 在云微物理方案的选择中, 为讨论 Thompson 方案和 Morrison 方案引入气溶胶因子的影响, 设计了

Thompson-a 和 Morrison-a 两组试验, 而两组试验引入气溶胶因子的方法有所不同。Thompson-a 是在 WRF 中原 Thompson 方案的基础上考虑了气溶胶作为云凝结核和冰核的核化过程。其中, 云凝结核的核化率采用查表法决定, 查表的参数为模式预报的温度、垂直速度、气溶胶可用数量、给定的亲水参数 (0.4) 和气溶胶半径 ($0.04 \mu\text{m}$); 而冰核的核化率则是依据是否达到水面饱和决定采用不同的计算方法, 并且考虑了冰核的均质核化^[21]。Morrison-a 则是利用经验公式 $N=CS^k$ 来计算云凝结核数浓度, 进而讨论气溶胶的影响。式中 S 为过饱和度, N 为过饱和度 S 下的云凝结核数浓度, C 和 k 为拟合参数^[22]。

表 1 云微物理参数化方案的选择

Table 1 Information of cloud microphysical parameterization schemes used in the study

方案简称	云微物理方案	选择方案试验
GCE	GSFCGCE ^[17]	控制试验
Lin	Lin ^[23]	敏感性试验
WSM6	WSM6 ^[24]	敏感性试验
Et	Etamp new ^[16]	敏感性试验
Thompson	Thompson ^[25]	敏感性试验
Thompson-a	Thompson-aerosol ^[26]	敏感性试验
Morrison	Morrison ^[27]	敏感性试验
Morrison-a	Morrison-aerosol ^[16]	敏感性试验

1.2 热带气旋最佳路径资料的来源及其说明

热带气旋的最佳路径资料来源于美国联合台风警报中心(JTWC)所提供的 6 h 一次热带气旋的数据 (<https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html>), 在筛选热带气旋时选取经过东亚近海且近中心附近最大风速达到 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的持续时间超过 2 d 的热带气旋进行讨论, 经统计 30 a 间共有 433 个热带气旋满足条件。在研究中为了与 CWRF 模式的资料分辨率保持一致, 已将 JTWC 的 00 时、06 时、12 时、18 时的热带气旋数据通过算术平均的方法处理为日平均的资料。

1.3 热带气旋的识别方法

根据 ZHAO et al.^[28] 提出的热带气旋中心识别判据为基础, 调整了从 CWRF 模式资料中提取热带气旋中心坐标的方法。

1) 取研究区域内 850 hPa 的涡度最大值且数值超过 $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的点记作涡度最大值中心;

2) 在涡度最大值为中心的 $8^\circ \times 8^\circ$ 范围内取海平面气压最小值且和涡度最大值中心距离不超过 2° 记作低压中心;

3) 判断低压中心的气压是否小于 1 000 hPa 且低压中心附近 $6^\circ \times 6^\circ$ 范围内的 10 m 最大风速值是否大于 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 符合条件即记录低压中心坐标;

4) 计算低压中心附近 $8^\circ \times 8^\circ$ 范围内 300 hPa, 400 hPa, 500 hPa 的垂直平均温度的区域最大值减去三层的垂直平均温度的区域平均值, 若差值超过 1°C , 则定义低压中心为热带气旋中心。

1.4 物理量的计算方法

为了定量反映模式对热带气旋强度的模拟, 研究中对热带气旋的累积气旋能量指数 (ACE) 以及潜在耗散指数 (PDI) 分别进行了计算。其中, ACE 指数 (I_{ACE}) 是根据西北太平洋热带气旋气候图集^[29]中的定义, 通过计算达到热带气旋及以上强度时近中心最大风速的累积平方和求得, 即:

$$I_{ACE} = \sum_n^N \sum_t^T v_{\max}^2 \quad (1)$$

式中, $v_{\max} \geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为近中心最大风速, $n = 1, 2, \dots, N$ 为热带气旋的个数; $t = 1, 2, \dots, T_n$ 为第 n 热带气旋生命史期间的记录次数。而 PDI (I_{PD}) 的计算是根据 EMANUEL^[30]的定义, 即:

$$I_{PD} = \int_0^T v_{\max}^3 \quad (2)$$

单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$, 式中 v_{\max} 代表近中心附近最大风速, T 代表热带气旋生命史期间记录的次数。PDI 涉及到热带气旋的频次、强度以及生命史, 可以用来综合表征热带气旋的潜在破坏力。此外, TS 评分 (S_{threat})、空报率 ($\text{FAR}, R_{\text{falsealarm}}$) 和漏报率 (PO, R_{po}) 也能较为直观地反映各方案模拟性能的差异, 其具体计算公式如下:

$$S_{\text{threat}} = N_A / (N_A + N_B + N_C) \quad (3)$$

$$R_{\text{falsealarm}} = N_B / (N_A + N_B) \quad (4)$$

$$R_{\text{po}} = N_C / (N_A + N_C) \quad (5)$$

式中, N_A 为模式预报正确数, N_B 为模式空报数, N_C 为模式漏报数。当模式预报结果与 JTWC 统计结果在热带气旋的发生时次上相对应且模拟的热带气旋的位置与 JTWC 统计的热带气旋位置经纬度上不超过 10° 时, 则判定为模式正确预报; 若模式预报出, 而 JTWC 的统计结果并未显示则为空报; 若模式未预报出, 而 JTWC 统计中有出现则为漏报。

2 不同云微物理参数化方案对热带气旋活动模拟的影响

2.1 对热带气旋空间分布模拟的影响

研究中, 热带气旋的出现频次定义为在 $5^\circ \times 5^\circ$ 的网格中有热带气旋记录的个数, 而有热带气旋记录应满足的条件为热带气旋过程发生时近中心最大风速超过 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 2 给出的是各种云微物理方案模拟及 JTWC 统计的热带气旋出现频次的空间分布图。由观测结果 (图 2i) 可知, 热带气旋主要经过的区域是中国南海 ($110^\circ \sim 120^\circ \text{E}, 15^\circ \sim 20^\circ \text{N}$) 以及菲律宾北部的洋面上 ($120^\circ \sim 135^\circ \text{E}, 15^\circ \sim 30^\circ \text{N}$)。尽管大部分方案均能模拟出菲律宾北部洋面上的热带气旋出现频次大值区, 但南海区域模拟的热带气旋出现频次相对较少, 且不同方案之间模拟的频次空间分布差异较大。由图中 JTWC 与各方案间的热带气旋出现频次偏差值可知, 各云微物理方案在大部分区域内对热带气旋出现频次均有较明显的低估, 尤其是在纬度越低的区域, 各方案模拟偏低得越明显。综合来看, Morrison 的两组方案对菲律宾北部洋面上多数网格中偏差值的计算均较其他方案偏小, 而值得注意的是, 在考虑了气溶胶的影响后, 观测与 Thompson-a 方案 (图 2f) 模拟的热带气旋出现频次偏差值较 Thompson 方案 (图 2e) 在大多数区域内有明显减小。尽管 Morrison 方案与 Morrison-a 方案并没有像 Thompson 的两组方案一样相差很大, 但是在较多区域, 尤其是热带气旋出现频次偏多的菲律宾北部洋面上, Morrison-a 方案 (图 2h) 较 Morrison 方案 (图 2g) 的模拟仍有所提高, 计算所得的偏差值在多数区域内有所减小。

由各组方案模拟的热带气旋出现频次随经纬度的变化 (图 3) 可知, 各云微物理参数化方案整体上模拟的热带气旋频次明显较观测偏少, 尤其是在低纬度地区 ($15^\circ \sim 25^\circ \text{N}$), 各云微物理参数化方案明显对热带气旋出现频次有所低估。然而对热带气旋随经纬度的空间分布各方案均能较为准确地把握, 超过 70% 的热带气旋出现在中低纬区域 ($15^\circ \sim 30^\circ \text{N}$), 且大多集中在洋面上 ($120^\circ \sim 135^\circ \text{E}$)。各方案之间差异相对较小, Morrison 的两组方案在 $125^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ 模拟的热带气旋频次较其他方案明显偏多。Thompson 方案 (绿色实线) 模拟的热带气旋频次在大部分区域内都是较其他方案偏小的, 而考虑气溶胶的影响后, Thompson-a 方案 (藏青色实线) 模拟的热带气旋频次明显增多, 与观测也更为接近。

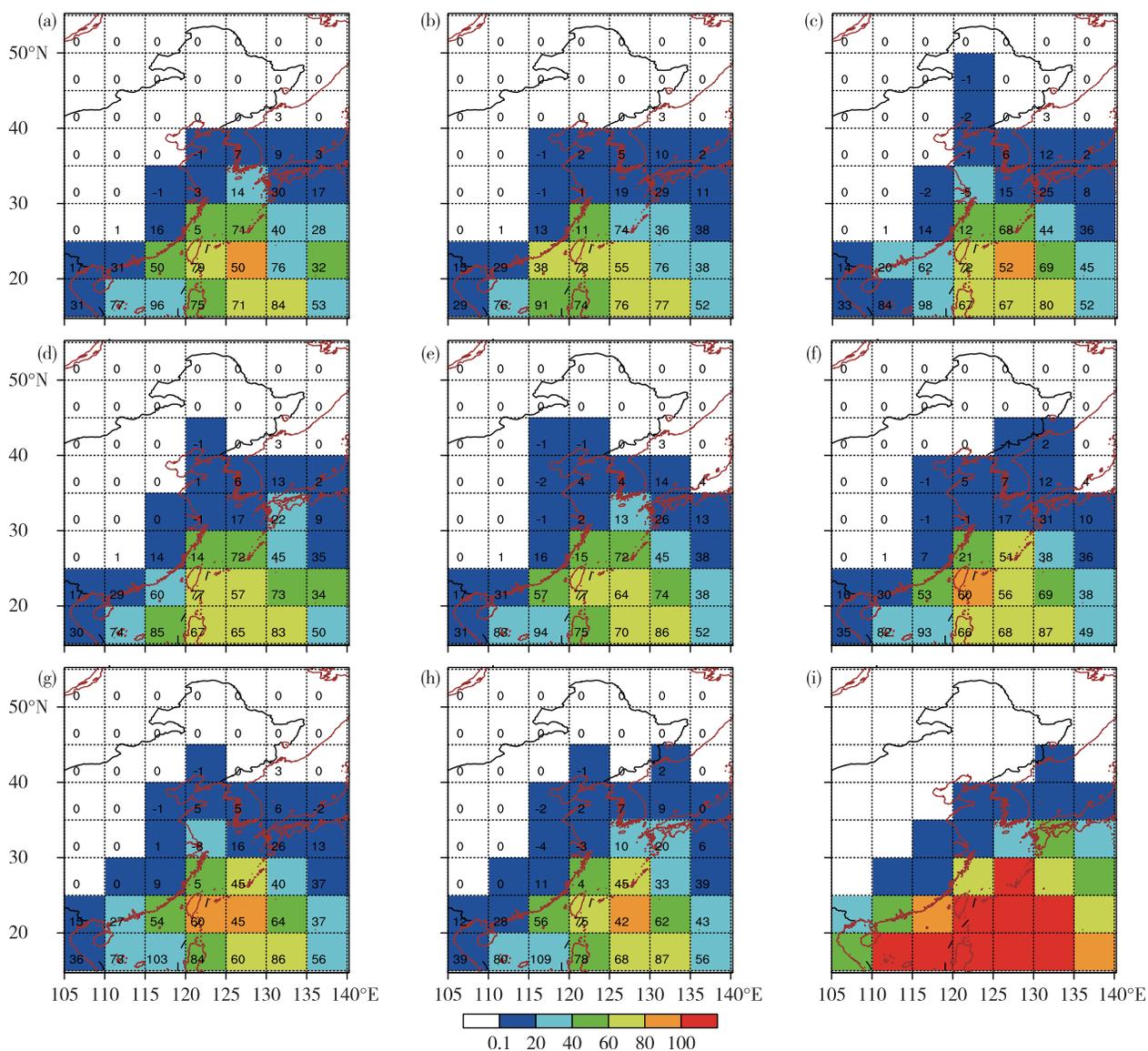


图2 不同云微物理参数化方案模拟的热带气旋30 a间在东亚近海出现频次分布(单位:个;网格内的数值代表的是JTWC统计与各方案模拟结果的偏差值;a. GCE, b. Lin, c. WSM6, d. Etamp new, e. Thompson, f. Thompson-a, g. Morrison, h. Morrison-a, i. 观测)

Fig.2 Distribution of TC frequency over offshore areas of East Asia in 30 a simulated by different cloud microphysical parameterization schemes (units: digit; the number in each grid represents the difference between results of JTWC and each microphysical scheme; a. GCE, b. Lin, c. WSM6, d. Etamp new, e. Thompson, f. Thompson-a, g. Morrison, h. Morrison-a, i. observation)

2.2 对热带气旋发生频次模拟的影响

由热带气旋生成频数的年际变化(图4a)可知,各方案普遍对热带气旋的生成频数有所低估,不同云微物理方案对热带气旋生成频数的年际变化趋势模拟差异较明显。综合来看,GCE方案在大部分年份中模拟的热带气旋生成频数偏高,相较于其他方案与观测更为接近。值得注意的是,在考虑了气溶胶的影响后,Thompson-a方案(藏青色实线)在大部分年份中模拟出的热带气旋个数明显较

Thompson方案(绿色实线)有所提高,与观测更为接近。各方案模拟的热带气旋生成频率的月变化(图4b)也有较为明显的区别,其中差异主要出现在7—10月。相对而言,Morrison-a方案在这四个月中模拟出的热带气旋生成频率月分布更接近于观测。值得关注的是Thompson方案(绿色实线)和Morrison方案(深蓝实线),在考虑了气溶胶的影响后,所模拟的热带气旋月生成频率均有较为明显的变化,在考虑气溶胶的影响后,Morrison-a方案模拟

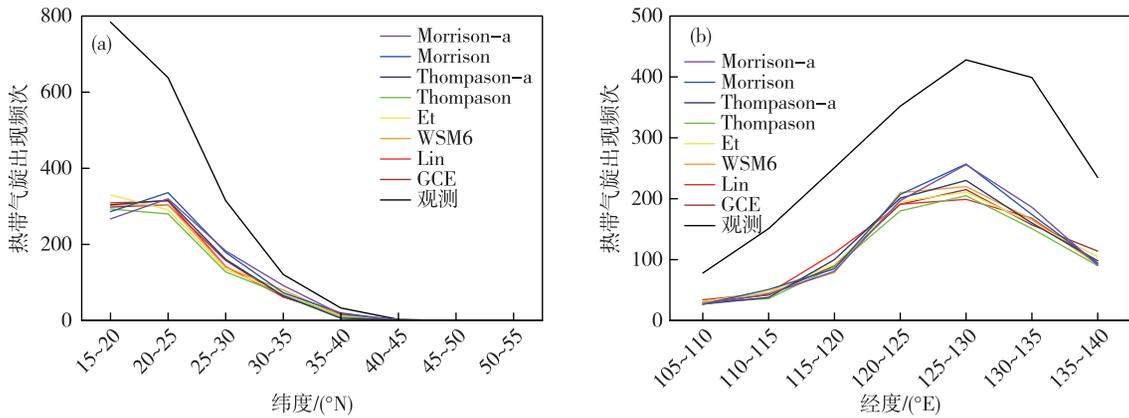


图 3 热带气旋出现频次随纬度 (a) 与随经度 (b) 的变化
Fig.3 Variation of TC number with latitude (a) and longitude (b)

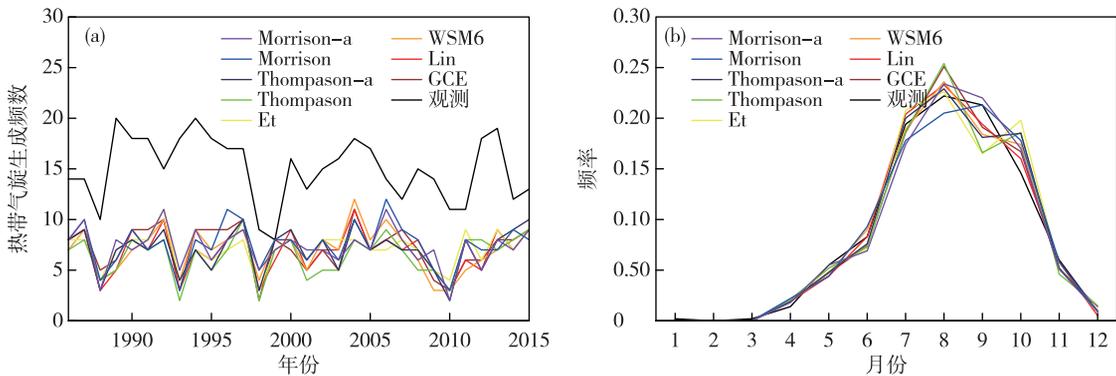


图 4 不同云微物理参数化方案模拟的热带气旋生成频数年际变化 (a) 与频率月变化 (b)
Fig.4 Annual number of genesis (a) and monthly frequency (b) of observed (black line) and simulated (colored line) TCs

的 8 月份生成的热带气旋频数明显较 Morrison 方案偏多,而 Thompason-a 方案模拟的 9 月份生成的热带气旋频数较 Thompason 方案也有明显增加。

2.3 对热带气旋强度模拟的影响

图 5a 描述的是各方案模拟出近中心最大风速频率分布,其中横坐标的值是划分的近中心最大风速分布区间,如 17~22 对应的频率指的是热带气旋模拟出的近中心最大风速在 17~22 $m \cdot s^{-1}$ 这一范围的频率。由各方案模拟的热带气旋最大风速频率分布 (图 5a) 可知,各云微物理方案的选择模拟出的近中心最大风速频率分布曲线较为相似,大部分方案模拟出的近中心最大风速主要集中在 27~32 $m \cdot s^{-1}$ 之间,而模式普遍对风速超过 42 $m \cdot s^{-1}$ 的热带气旋模拟得较观测偏少。Morrison 两组方案模拟近中心最大风速在 27~32 $m \cdot s^{-1}$ 范围内的频率较其他方案偏小而在 32~37 $m \cdot s^{-1}$ 范围内的频率较其他方案偏大,由此可知 Morrison 两组方案模拟强度偏强的热带气旋的能力更强。此外值得关注的是,考虑了气溶胶影响的 Thompason-a 方案和

Morrison-a 方案对热带气旋强度的模拟能力提升不明显。进一步比较 ACE 指数 (图 5b) 和 PDI (图 5c) 的年际变化,不同云微物理参数化方案模拟的 ACE 指数以及 PDI 的数值都明显较观测偏低,而对热带气旋 ACE 指数及 PDI 的年际变化趋势的模拟,各方案之间差异不是很大,仅在个别年份有所不同。综合来看,对热带气旋强度的模拟, Morrison 的两组方案与观测更接近。

3 对热带气旋风压关系与预报精度的影响

由各云微物理方案模拟的风压关系拟合曲线 (图 6) 可知,在模拟强度较弱的热带气旋 (海平面中心气压高于 975 hPa) 的近中心最大风速时,各云微物理方案之间差异不大,而在模拟强度偏强的热带气旋 (中心气压低于 975 hPa) 时, Morrison 的两组方案根据风压关系得到的两条拟合曲线在相同气压条件下模拟得到的近中心最大风速明显小于其他方案。由于 CWRf 模拟出大部分热带气旋近中心最大风速小于 50 $m \cdot s^{-1}$ (虚线),较观测偏小,而

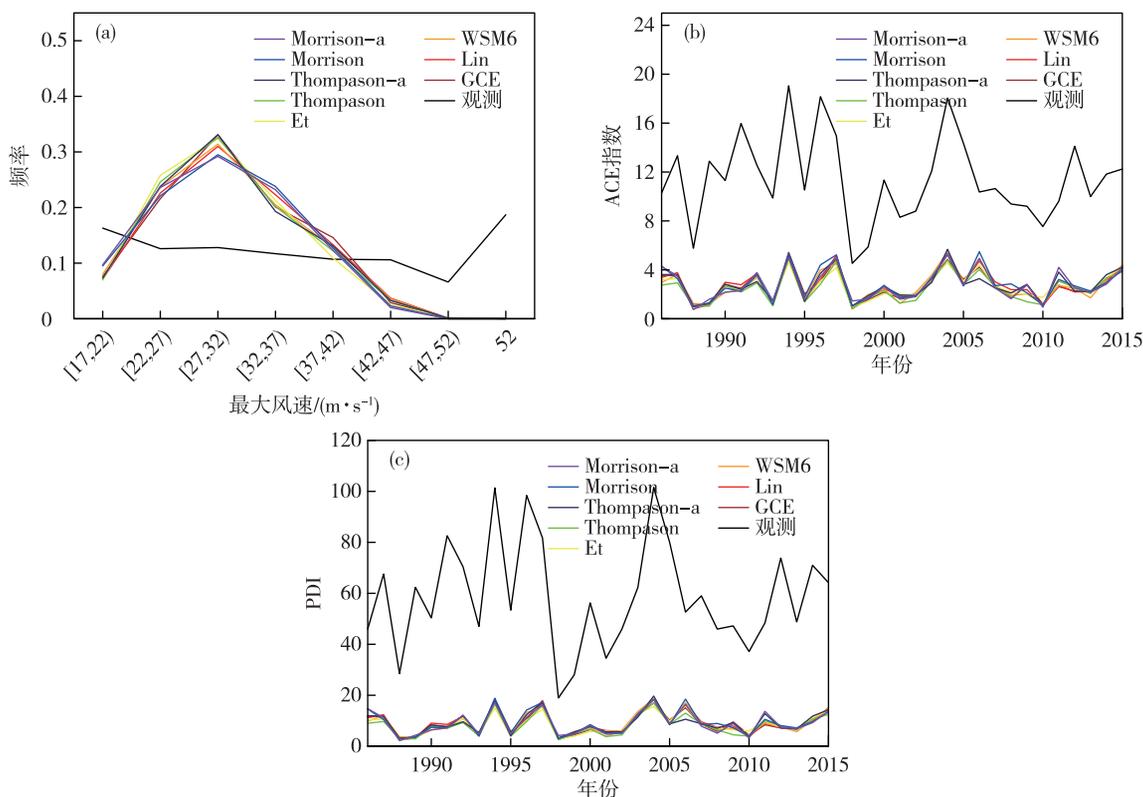


图5 不同云微物理参数化方案模拟的热带气旋近中心最大风速频率分布(a)、ACE指数年际变化(b;单位: $10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和PDI指数年际变化(c;单位: $10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig.5 Frequency distribution of maximum surface wind speed (a) and annual variation of ACE index (b; units: $10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and PDI (c; units: $10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$) near centers of observed (black line) and simulated (colored line) TCs

Morrison 的两组方案在风速模拟普遍偏低的情况下较其他方案能模拟出的强热带气旋更多,这也是 Morrison 的两组方案在模拟热带气旋频数时较其他方案模拟的热带气旋个数偏多的原因。与之相对应,Thompson 方案在模拟相同气压条件下的强热带气旋时需要满足的近中心风速条件比其他方案都要高,因此在8种不同云微物理方案中,Thompson 方案所模拟的热带气旋频数相对较少且热带气旋的 ACE 指数及 PDI 相对偏低。而在考虑了气溶胶的影响后,Thompson-a 方案与 Morrison-a 方案相比 Thompson 方案与 Morrison 方案模拟出的风压关系拟合曲线与观测更为接近。综合来看,不同云微物理参数化方案在模拟相对偏弱的热带气旋时对风压关系的模拟是较为一致的,而在模拟偏强的热带气旋时,不同方案之间差异较大。在考虑了气溶胶的影响后对风压关系的模拟能力有一定的提升,与观测的拟合曲线更为接近。

各云微物理参数化方案模拟性能的好坏可以较为直观地从 TS 评分、空报率和漏报率的计算中反映。由表 2 可知,各云微物理参数化方案计算得

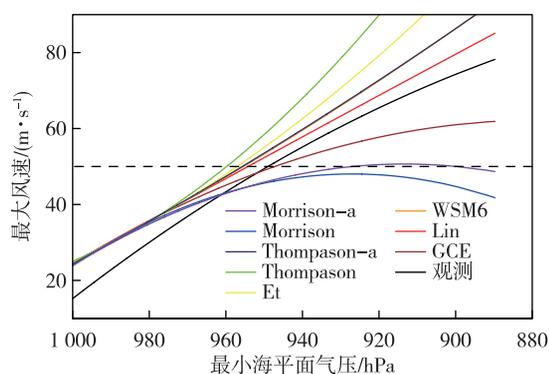


图6 JTWC 与各云微物理方案模拟的风压关系图(虚线为近中心最大风速为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的参考线)

Fig.6 Relation between maximum surface wind speed (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and minimum sea-level pressure (units: hPa) of observed (black line) and simulated (colored line) TCs (dashed line for reference line marking $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ as maximum wind speed near TC center)

到的 TS 评分相差不大,TS 评分最高的 GCE 试验和最低的 Lin 试验相差仅有 6 个百分点左右,从漏报率和空报率上也能反映出类似的结果。而考虑了

气溶胶的影响后, Thompson-a 方案相对于 Thompson 方案计算得到的 TS 评分有所提高, Morrison-a 方案与 Morrison 方案所计算的 TS 评分差异不是很大, 仅相差 0.6 个百分点, 但在空报率 (FAR) 上相比 Morrison 方案是有所下降的。由此可知, CWRf 模式中不同云微物理参数化方案模拟热带气旋的能力差异不大, 考虑气溶胶的影响对提升模拟热带气旋的能力有所帮助。

表 2 不同云微物理参数化方案模拟结果的各项评分比较
Table 2 Performance of different cloud microphysical parameterization schemes

方案名称	TS 评分	空报率(FAR)	漏报率(PO)
GCE	0.439	0.083	0.542
Lin	0.373	0.159	0.598
WSM6	0.411	0.113	0.566
Et	0.408	0.118	0.568
Thompson	0.391	0.088	0.594
Thompson-a	0.407	0.114	0.570
Morrison	0.412	0.147	0.557
Morrison-a	0.406	0.138	0.566

表 3 不同云微物理参数化方案与 JTWC 统计结果的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between observed and simulated results

方案名称	模拟值与观测值的相关系数		
	气旋生成频数	累积气旋能量指数(ACE)	潜在耗散指数(PDI)
GCE	0.349	0.709	0.713
Lin	0.357	0.690	0.689
WSM6	0.280	0.717	0.723
Et	0.268	0.680	0.678
Thompson	0.196	0.705	0.735
Thompson-a	0.217	0.715	0.726
Morrison	0.148	0.677	0.678
Morrison-a	0.260	0.638	0.642

4 结论与讨论

基于 CWRf 模式多物理过程的 1986—2015 年的模拟结果, 探讨了不同云微物理参数化方案对东亚近海热带气旋的空间分布、频数及强度模拟的影响, 得到如下初步结论:

1) 热带气旋的频数及空间分布均对云微物理参数化方案的选择表现得较为敏感, 而云微物理方案对热带气旋强度的模拟影响则相对较小;

相关系数可以反映各方案对于热带气旋频数以及强度变化趋势的模拟效果, 其数值越接近 1, 模式模拟结果与观测值之间的相关性则越好。分别计算各云微物理方案下模拟的热带气旋频数及强度与观测值间的相关系数可知(表 3), 各云微物理方案对表征热带气旋强度的 ACE 指数和 PDI 的年际变化趋势模拟得都较好, 相关系数均超过了 0.6, 而对热带气旋频数的年际变化趋势模拟, 不同云微物理方案之间差异较大。Lin 方案模拟的热带气旋频数与观测值间的相关系数相对较好, 超过了 0.35, 而 Morrison 方案尽管模拟出的热带气旋较多, 但对热带气旋频数的年际变化趋势模拟得是所有方案中最差的。在考虑了气溶胶的影响后, Thompson-a 方案和 Morrison-a 方案模拟的热带气旋频数的年际变化趋势明显较 Thompson 方案和 Morrison 方案有所提升。综上可知, 不同云微物理方案模拟热带气旋频数的年际变化趋势差异较大, Lin 方案模拟的频数变化趋势最好, Morrison 方案模拟的最差, 而热带气旋强度的变化趋势对云微物理方案的选择仍表现得不敏感。

2) 结合 TS 评分、相关系数的计算以及风压关系的模拟分析后可知, 控制试验选用的 GSFCGCE 方案在模拟热带气旋活动时较其他方案更接近于观测结果;

3) 在方案中考虑了气溶胶的影响后, 对热带气旋活动的模拟有所提升, 因此在用 Morrison 和 Thompson 两组方案进行模拟热带气旋时, 改用考虑了气溶胶影响的 Thompson-a 和 Morrison-a 方案可以更有效地模拟出热带气旋的活动。

本文中作为控制试验选用的 GSFCGCE 方案是包含了暖雨、谱分档及多层次冰微物理过程的集合方案,其中谱分档微物理过程对云-气溶胶作用及辐射作用有较清晰的描述,当在云微物理过程的参数化方案中考虑了气溶胶的影响后,对热带气旋的空间分布、生成个数的变化以及强度的变化的模拟效果均有提高,而这也是 GSFCGCE 方案相比其他方案模拟热带气旋活动与观测结果更接近的可能原因。

在频数的模拟中,各云微物理参数化方案模拟的热带气旋频数普遍偏低,这与模式在模拟多台风时未能准确预报出每个多台风过程有一定联系,而对强热带气旋模拟能力偏弱也是造成模式模拟的热带气旋频数偏少的可能原因。此外,各方案间模拟的频数差异和不同方案模拟的大尺度环境场不同也有一定的联系,在后续的研究中将会进一步讨论和分析。

而在强度的模拟中,CWRF 中各云微物理方案普遍模拟偏弱,这与研究区域选择有很大的关系。在区域模式中,侧边界条件的选择对大尺度环流影响很大,尽管 CWRF 模式对于侧边界条件已有一定的改进,但由于 LIANG et al.^[11-12]用 CWRF 模式模拟的区域仅为东亚近海区域,要准确模拟出热带气旋活动仍有较大的难度。此外,模式的分辨率一定程度上也对热带气旋的模拟有一定的影响,30 km 的模式分辨率相较于业务中常用的 9 km 的模式分辨率仍显得较为粗糙。在未来的研究中将继续关注在扩大的模拟区域范围内精细网格高分辨率下 CWRF 模式对热带气旋活动模拟性能的表现。

参考文献:

- [1] 赵海坤,吴立广.西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J].气象科学,2015,35(1):108-118.
- [2] 吴彦洁,黄菲,许士斌,等.秋季西北太平洋热带气旋累积能量的年际变化及其预报[J].海洋气象学报,2018,38(4):19-27.
- [3] 柳龙生,吕心艳,高拴柱.2018年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2019,39(2):1-12.
- [4] 赵秀兰.近50年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述[J].海洋气象学报,2019,39(4):1-11.
- [5] 邓琳.热带气旋降水不同云微物理方案模拟对比研究[D].北京:中国气象科学研究院,2016.
- [6] 周昊,朱伟军,彭世球.不同微物理方案和边界层方案对超强台风“鲇鱼”路径和强度模拟的影响分析[J].热带气象学报,2013,29(5):803-812.
- [7] HUA C, LIU Q J. Sensitivity of landfalling typhoon structure and precipitation to varying cloud microphysical process[J]. J Trop Meteor,2016,22(3):341-351.
- [8] 吴珊珊,邹海波,单九生.不同积云和微物理方案对“麦德姆”台风登陆后路径的影响[J].暴雨灾害,2018,37(1):41-47.
- [9] TAO W K, SHI J J, CHEN S S, et al. The impact of microphysical schemes on hurricane intensity and track[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci,2011,47(1):1-16.
- [10] MOHAN P R, SRINIVAS C V, YESUBABU V, et al. Tropical cyclone simulations over Bay of Bengal with ARW model: Sensitivity to cloud microphysics schemes[J]. Atmos Res,2019,230:104651.
- [11] LIANG X Z, CHOI H I, KUNKEL K E, et al. Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models[J]. Earth Interact,2005,9(18):1-28.
- [12] LIANG X Z, XU M, GAO W, et al. Development of land surface albedo parameterization based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data[J]. J Geophys Res Atmos,2005,110(D11):D11107.
- [13] 刘冠州,梁信忠.新一代区域气候模式(CWRF)国内应用进展[J].地球科学进展,2017,32(7):781-787.
- [14] 曾明剑,陆维松,梁信忠,等. CWRF 模式对夏季降水的集合预报试验研究[J].高原气象,2008,27(6):1218-1228.
- [15] 董晓云,余锦华,梁信忠,等. CWRF 模式在中国夏季极端降水模拟的误差订正[J].应用气象学报,2019,30(2):223-232.
- [16] LIANG X Z, SUN C, ZHENG X H, et al. CWRF performance at downscaling China climate characteristics[J]. Climate Dyn,2019,52(3/4):2159-2184.
- [17] TAO W K, SIMPSON J, BAKER D, et al. Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model[J]. Meteor Atmos Phys,2003,82(1):97-137.
- [18] QIAO F X, LIANG X Z. Effects of cumulus parameterization closures on simulations of summer precipitation over the continental United States[J]. Climate Dyn,2017,49(1/2):225-247.
- [19] HOLTSLAG A A M, BOVILLE B A. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model[J]. J Climate,1993,6(10):1825-1842.
- [20] CHOU M D, SUAREZ M J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies, NASA Tech Memo, No 10460 [R]. Washington, DC: NASA,1999(15):1-42.
- [21] 杨玉华,陈葆德,王斌,等.背景场云凝结核浓度对

- 理想热带气旋强度的影响[J]. 高原气象, 2015, 34(5):1379-1390.
- [22] 李力. 黄山地区云凝结核与气溶胶化学成分的特性及其关系[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
- [23] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. J Climate Appl Meteor, 1983, 22(6):1065-1092.
- [24] HONG S Y, LIM J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. J Korean Meteor Soc, 2006, 42(2):129-151.
- [25] THOMPSON G, RASMUSSEN R M, MANNING K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme Part I: Description and sensitivity analysis [J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(12):519-542.
- [26] THOMPSON G, EIDHAMMER T. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone [J]. J Atmos Sci, 2014, 71(10):3636-3658.
- [27] MORRISON H, THOMPSON G, TATARSKII V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two- moment schemes [J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(3):991-1007.
- [28] ZHAO M, HELD I M, LIN S J, et al. Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM [J]. J Climate, 2009, 22(24):6653-6678.
- [29] 中国气象局上海台风研究所. 西北太平洋热带气旋气候图集:1981—2010[M]. 北京:科学出版社,2017:13.
- [30] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. Nature, 2005, 436(7051):686-688.