

黄勇, 李崇银. 2010. 温室气体浓度增加情景下西北太平洋热带气旋变化的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 1-10. Huang Yong, Li Chongyin. 2010. A simulation study of tropical cyclone changes under the concentration increase scene of greenhouse gases [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 1-10.

温室气体浓度增加情景下西北太平洋 热带气旋变化的模拟分析

黄勇¹ 李崇银^{1,2}

¹ 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 利用德国 Max-Planck 气象研究所参与政府间气候变化委员会 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第四次评估报告的气候系统模式 (ECHAM5/MPI-OM) 的数值模拟结果, 分析研究了全球变暖背景下西北太平洋热带气旋的变化。结果表明, ECHAM5 模式较好的模拟出了热带气旋的基本结构和频数的分布特征。当大气中 CO₂ 浓度增加时, 热带气旋中心的最低气压升高, 850 hPa 正涡度降低, 风速减小, 风场出现反气旋性环流异常, 暖心强度减弱, 气旋的低层径向流入和高层径向流出减少, 气旋总体强度减弱。CO₂ 浓度的增加会总体上减少西北太平洋热带气旋的生成频数, 从模拟结果看年均减少 10 个左右。就 CO₂ 浓度增加对热带气旋频数季节变化的影响而言, CO₂ 浓度增加所引起气旋频数减少较平均的分配到多个月份里, 表明 CO₂ 浓度增加引起的大气环流异常在全年都会对西北太平洋热带气旋的发生频数产生影响。分析加拿大参加 IPCC 第四次评估报告的 CGCM3.1 (T47) 模拟资料, 其结果与 ECHAM5 资料得到的结果大致相似。

关键词 温室气体 热带气旋 结构变化 频数变化

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0001-10 **中图分类号** P457 **文献标识码** A

A Simulation Study of Tropical Cyclone Changes under the Concentration Increase Scene of Greenhouse Gases

HUANG Yong¹ and LI Chongyin^{1,2}

¹ *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

² *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The numerical simulation data of a new climate model (ECHAM5/MPI-OM) developed at Max-Planck Institute for Meteorology are used to analyze the variation of tropical cyclones in the western North Pacific under the global warming scenarios. The result shows that ECHAM5 model can simulate the distribution characteristics of basic structure and frequency of tropical cyclones well. The increase of CO₂ in atmosphere coincides with the increase in the lowest center pressure, decrease in vorticity at 850 hPa, less lower radial influx and less upper radial outflux, negative wind velocity anomalies and anti-cyclonic circulation anomalies at low levels, and lower warm core

收稿日期 2008-12-06 收到, 2009-09-27 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB411805 和中国科学院创新项目 KZCX3-SW-226

作者简介 黄勇, 男, 1979 年出生, 博士, 讲师, 主要从事气候与全球变化研究。E-mail: huangyong_1024@yahoo.com.cn

temperature in the tropical cyclones in the western North Pacific. In a word, the intensity of tropical cyclones in the western North Pacific became weak. The increase of CO₂ in the atmosphere causes the decrease in the frequency of tropical cyclones in the western North Pacific. There is an annual reduction of about ten tropical cyclones in the model. This decrease distributes in several months, which indicates that the general atmospheric circulation anomalies caused by the increase of CO₂ in atmosphere would influence the frequency of tropical cyclones in the whole year. Analyzing the simulation data in the CGCM3.1, some similar results are shown.

Key words greenhouse gases, tropical cyclones, change of structure, change of frequency

1 引言

西北太平洋热带气旋及台风的活动一般都带有狂风、暴雨、巨浪和风暴潮等严重自然灾害,往往给中国及周边一些国家造成巨大的损失,因此一直是气象界关注的研究课题。已有的研究包括了热带气旋的结构、形成机理、活动规律、变化特征及登录影响等方面(陈联寿和丁一汇, 1979; 李崇银, 1985; 薛宗元和 Neumann, 1985; 杨桂山和施雅风, 1999; 余晖和端义宏, 2002; 李英等, 2004; 祝从文等, 2004; Ren et al., 2006; 范可, 2007), 尽管还有不少问题需要进一步研究, 但人们对西北太平洋热带气旋及台风活动及变化的基本特征已有相当清楚的认识。

但自 2005 年飓风 Katrina 袭击美国新奥尔良, 给美国造成空前的巨大灾难以来, 全球变暖背景下热带气旋的变化问题成为热带气旋气候学研究的热点。Emanuel (2005) 采用对飓风能量的一种新的测量方法所做的研究表明, 热带气旋的破坏潜力在过去的 30 年里几乎增加了一倍, 并认为与热带海洋表面温度有高度相关。近 30 多年的资料与上个世纪 70 年代相比, 风暴平均持续时间更长, 平均强度更大。Webster et al. (2005) 研究了过去 35 年里随着海温的增加, 热带气旋数目、生存期和强度的变化, 认为伴随着气旋数目和生存期的减少, 不管在数量还是在比例上, 达到 4、5 级的台风都大大增加, 北太平洋、印度洋和西南大西洋增加最多, 增加比例最小的是北大西洋。但 Pielke et al. (2005) 的研究认为全球变暖和飓风活动存在联系的说法远未成熟, 温室气体排放和观测到的飓风变化之间的联系尚未建立。Chan (2006) 通过分析西北太平洋热带气旋记录揭示 Webster et al. (2005) 报告中所指最近强台风出

现的增加并不是一种趋势, 而是强台风年代际变化的一种表现, 与大气环境的时间波动存在相关。最近, Saunders and Lea (2008) 利用海表温度和风场的统计模型对热带北大西洋、加勒比海和墨西哥湾的风暴进行研究, 结果显示在 1996~2005 年局部海洋变暖造成飓风活动增加了大约 40%。以上的分析并未说明温室气体诱导的变暖是否对飓风活动的增加做出了贡献, 也未说明飓风活动将怎样对未来气候变化做出反应。我们最近对上百年资料的分析结果表明, 西北太平洋台风频数变化存在明显的年代际变化特征, 就变化趋势而言是在随时间减少, 并没有随温度升高而导致频数增加的现象(黄勇等, 2008)。

工业化革命以来受人类活动的影响, 大气中温室气体(主要是 CO₂) 的浓度不断增加, 增强了大气的温室效应, 使大气和地球表面温度增加(Houghton et al., 2001)。温室气体效应的增强引起了地球气候系统的一系列变化, 包括大气环流结构变化以及海洋环流结构变化(牟林等, 2006)。而上述地球气候系统变化是否对西北太平洋热带气旋的活动有明显影响是必须回答的问题。观测资料的分析研究结果还未完全统一, 大部分研究认为西北太平洋热带气旋(包括强台风)活动与全球增暖没有明显关系, 但仍有少数研究认为有联系。数值模拟已被证明是研究温室气体浓度增加导致全球增暖的重要科学方法, 因此, 进一步通过气候系统模式的数值模拟手段来研究温室气体增加与西北太平洋热带气旋活动的关系是十分必要的。数值模拟试验研究上述关系实际上有两种途径, 其一是作长时间积分, 最后分析随 CO₂ 浓度增加是否产生热带气旋频数的增加; 其二是分析关键时段中不同 CO₂ 浓度下热带气旋的数目、强度和结构的差异, 根据热带气旋形成的条件, 得到 CO₂ 含量增加是否明显影响热带气旋

的结论。我们认为第二条途径不仅在计算量相对少的情况下有每天的资料，并且有一定的物理意义，因此本文就采用这种办法。

本文基于对德国 Max-Planck 气象研究所的大气海洋环流模式 (ECHAM5/MPI-OM) 数值模拟资料的分析，着重研究在 CO₂ 浓度增加情景假定下西北太平洋热带气旋的变化特征。其实我们在研究中对多个模式都进行了考虑，根据资料的系统性尤其是每日模式资料的情况 (月平均模式结果无法确定热带气旋的生成和活动)，我们分析了 IPCC 第四次评估报告的气候系统模式 ECHAM5 (德国) 和 CGCM3.1 (加拿大) 的试验资料，发现两者有大致相似的结果。因篇幅关系，本文只给出 ECHAM5 模式资料的分析结果。

2 所用资料介绍及处理

本文采用参加 IPCC AR4 的耦合模式 ECHAM5 的两组试验“20 世纪气候模拟 (20C3M)”和“CO₂ 浓度增加情景模拟 (1% to4x)”的模拟结果。ECHAM5 模式是德国 Max-Planck 气象研究所为政府间气候变化委员会 (IPCC) 第四次评估报告而最新发展的耦合模式，基本能反映当前国际气候系统模式的水平，模式中大气分量模式采用 T63 的网格，水平分辨率为 1.875°×1.875°，全球共 96×192 个格点，垂直分 31 层，顶层气压 (高度) 为 10 hPa (Roeckner et al., 2003)。此耦合模式没有通量修正，这是其优点之一。许多模式参加了国际“20 世纪气候模拟 (20C3M)”试验，该实验的目的是利用实际的外强迫来驱动耦合模式，模拟 20 世纪气候的实际演变过程，以此作 CO₂ 浓度增加试验对比的依据。实验中使用的强迫因子既包括温室气体和硫酸盐气溶胶等人为排放因子，也包括火山喷发气溶胶、臭氧和太阳辐射等自然变化因子。“CO₂ 浓度增加情景模拟 (1% to4x)”试验中 CO₂ 浓度每年以 1% 的速度增长，增长到起始水平的 4 倍后，保持 CO₂ 浓度不变，试验持续积分 290 年。该实验的目的是通过与“20 世纪气候模拟 (20C3M)”试验进行比较以考察在 CO₂ 浓度增加情景下全球气候发生的变化情况。

模式资料中热带气旋的识别标准参考 Vitart

et al. (1997) 和 Bengtsson et al. (1995) 的热带气旋识别方法，即采用如下的气旋识别步骤：先在所选的西北太平洋地区寻找低压中心，也就是在 7×7 的网格里寻找海平面气压的最低点，如果某一点在以它为中心的 7×7 网格中气压最低，就认为这一点满足条件；在选中的低压系统中，选出 850 hPa 涡度大于 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的大涡度中心；7×7 网格 850 hPa 的平均风速大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (由于模式分辨率有限，因此模式中气旋的风速标准低于观测的标准是合理的，因为有限的分辨率使模式不可能产生实际观测中那么强的风暴)；7×7 网格中 700、500 和 300 hPa 的温度异常大于零，这三层的温度异常相加大于 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，300 hPa 的温度异常大于 850 hPa 的温度异常 (温度异常为中心格点和它所在 7×7 网格平均温度之间的差异)；7×7 网格的 850 hPa 平均风速大于 300 hPa 平均风速，从而可以排除变性的副热带气旋。最后，将识别出的气旋与时间相差一天、间距不超过三个格点的气旋认为是同一个气旋；如果一个气旋持续超过两天就记为一个模式气旋。

已有研究指出 20 世纪 90 年代，全球气候变暖对西北太平洋上热带气旋的影响尤为突出 (田荣湘, 2003)，所以本文选取 1991~1999 年作为分析时段。同时，ECHAM5 和 CGCM3.1 也正好在 1991~1999 年期间有较为完整的每日模式输出资料，其他时段没有我们所需的两组对比试验的每日模拟输出资料，无法描写热带气旋的生成及其活动状况。因此，本文用 1991~1999 年的模拟资料虽是不得以，但也有其物理考虑。通过分析这 9 年的模式大气日平均资料，研究温室气体浓度增加情景下西北太平洋热带气旋变化的主要特征。为了检验模式的模拟效果，文中还使用了 ECMWF 的再分析资料结果作为对照。

3 西北太平洋热带气旋结构变化的比较分析

利用气候系统模式开展气候情景预估研究的前提是耦合模式必须具备基本的对气候的模拟能力。ECHAM5/MPI-OM 所模拟的降水、气压和气温与实际观测非常接近，其降水、气压和温度的标准偏差都不超过观测的 ±25% (Roeckner et

al., 2003)。因此, ECHAM5/MPI-OM 模式的模拟能力是可信的。

CO₂浓度增加情景下, 耦合模式中全球温度会发生显著的变化, 在这种温度显著变化的环境下热带气旋自身的涡旋结构和生成频率将发生什么样的变化, 是研究全球变暖背景下热带气旋气候特征变化的关键问题。因此, 为了讨论在20C3M和1%to4x这两组试验所产生的热带气旋的结构差异, 需要分别对这两组试验识别出的热带气旋在以气旋中心为中心的13×13的网格中进行合成分析, 以消除一些不确定因素的影响, 突出最基本最重要的结果。以下就是对1991~1999年20C3M和1%to4x试验分别识别出的303和207个热带气旋的合成分析。

图1是两组试验合成的气压场及其差值的分布。由图可见, ECHAM5模式可以较好的模拟出热带气旋低层的低气压中心。从20C3M和1%to4x两组试验的差值分布可见, 在增加了CO₂浓度的试验中合成气旋中心气压相对略为偏高, 就中心气压而言ECHAM5模式试验的合成结果偏高0.1 hPa以上。

图2是模式模拟气旋合成的850 hPa涡度场分布。由图可见, 模式较好的模拟出了气旋中心的涡度大值。1%to4x试验减去20C3M的涡度差值分布显示有明显的负涡度异常, 表明CO₂浓度增加后气旋的中心涡度减小相当明显, 达到 $6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

图3为风场的模式试验结果, 由图可见, ECHAM5模式模拟出的热带气旋低层的气旋性环

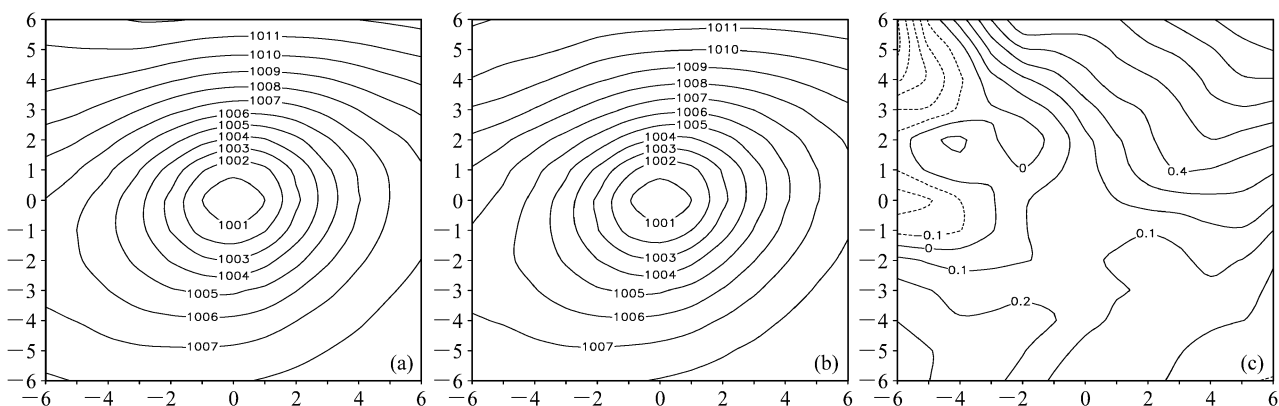


图1 ECHAM5模式所模拟气旋的合成气压场及其差值分布(单位: hPa): (a) 20C3M; (b) 1%to4x; (c) 1%to4x与20C3M之间的差异

Fig.1 Distributions of composite pressure fields of ECHAM5 model cyclones and their difference (units: hPa): (a) 20th century climate simulations (20C3M); (b) 1%/year CO₂ increase experiment (1%to4x); (c) the difference between 1%to4x and 20C3M

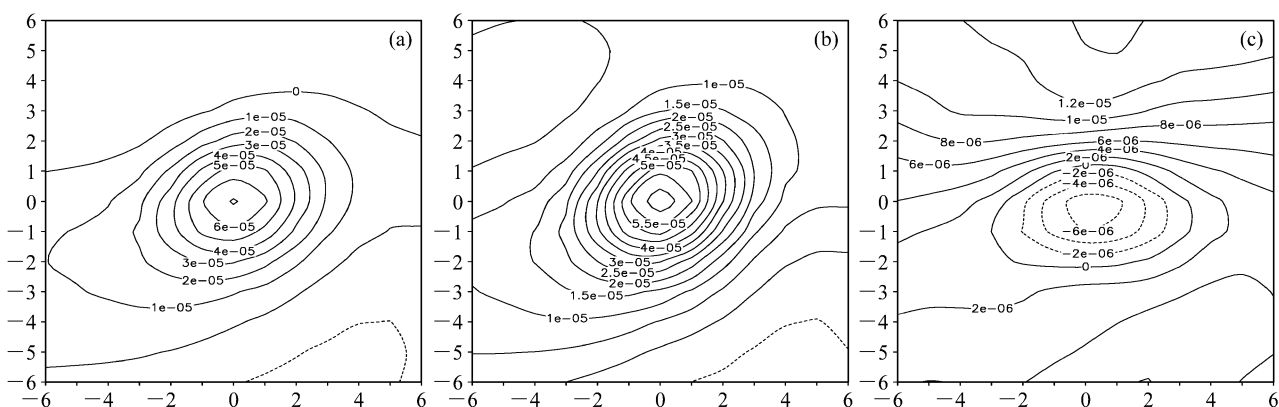


图2 同图1, 但为合成的850 hPa涡度场, 单位: s^{-1}

Fig.2 Same as Fig. 1, but for vorticity (s^{-1}) at 850 hPa

流场也很逼真，从 1%to4x 试验减去 20C3M 试验的风场差值分布可见气旋中心存在反气旋性异常风场，说明 CO₂ 浓度增加后气旋中心的气旋性环流明显减弱。

为了进一步揭示两个试验模拟结果的特征及其差异，图 4、5 分别给出了纬向风场和经向风场的空间分布及两组试验的差异。由图 4a 和 b 可见气旋中心的纬向风场分布呈现明显的南北向偶极型分布，气旋中心以南为正（西风），中心以北为负（东风）。而且气旋中心以南的西风都要强于气旋中心以北的东风，风场呈现一种强度上的不对称结构。1%to4x 试验减去 20C3M 试验的风场差异（图 4c）显示，纬向风场的差异也呈现出明显的南北反号分布，气旋中心以南为东风区，气旋中心以北为西风区。模拟结果的比较表明 CO₂ 浓

度增加后，出现了反气旋性环流，气旋中心以南的西风大值中心减弱了 2.5 m · s⁻¹，中心以北的东风大值中心减弱了 4.5 m · s⁻¹。图 5a 和 b 显示气旋中心经向风场的空间分布呈现明显的东西向偶极型，气旋中心西侧的南风强于东侧的北风，反映了气旋涡旋风场的非对称结构。1%to4x 试验减去 20C3M 试验的差值分布（图 5c）也呈现类似的偶极形势，异常场的分布存在明显的南风和北风中心，但总体量值小于纬向风场。上述这种模拟风场差值的分布也说明了在 CO₂ 浓度增加后模式气旋的纬向和经向风速均显示出减弱气旋性环流的特征，热带气旋强度被削弱。

图 6 给出了以气旋中心为原点的切向风场的空间分布，模式模拟所得的切向风场呈现明显的非对称结构，气旋中心是一个切向风场小值中心，

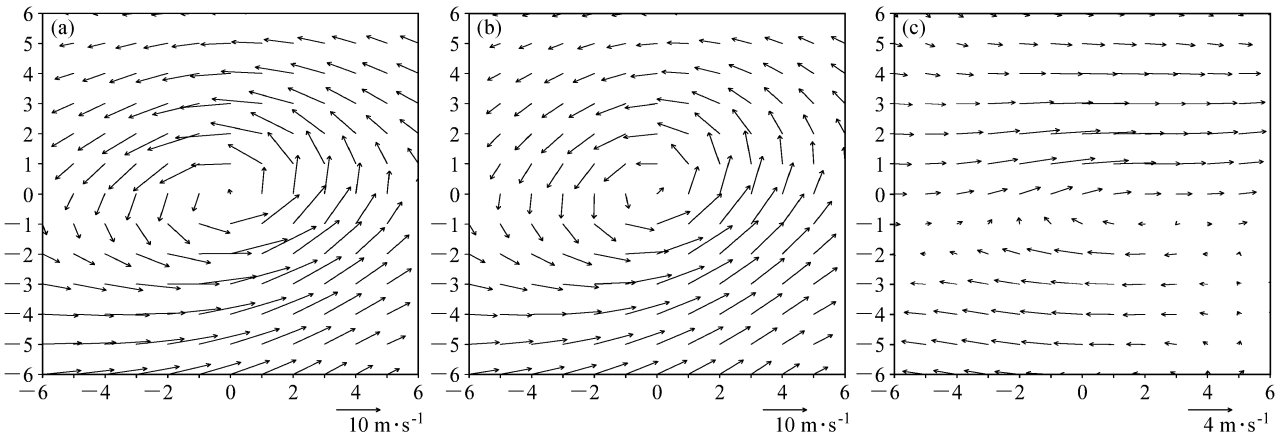


图 3 同图 1，但为合成的 850 hPa 风场

Fig.3 Same as Fig. 1, but for wind fields at 850 hPa

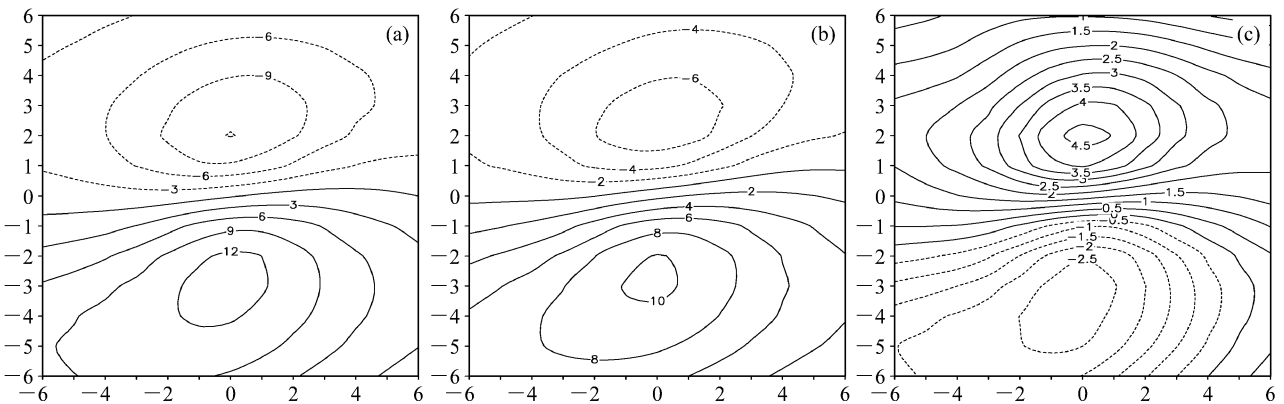


图 4 同图 1，但为 850 hPa 纬向风场，单位：m · s⁻¹

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for zonal wind (m · s⁻¹) at 850 hPa

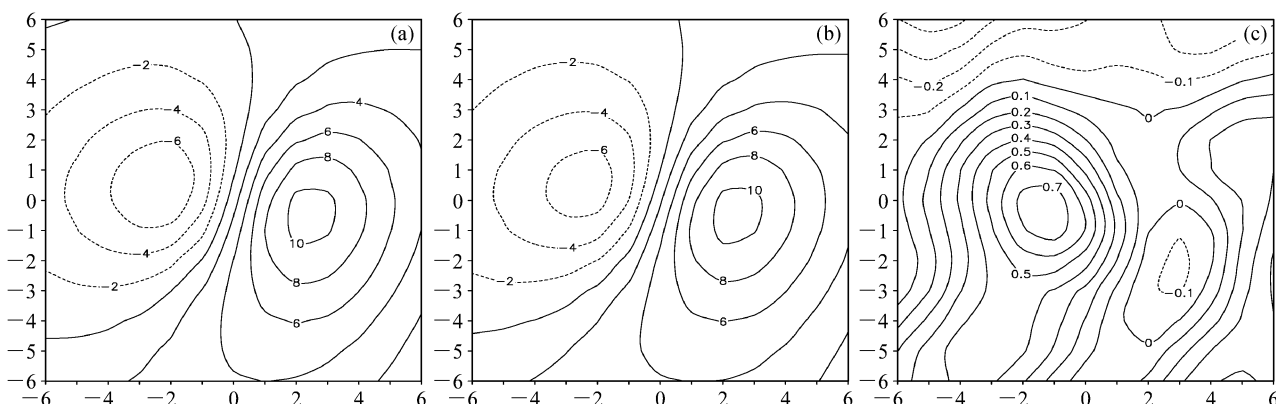


图5 同图1, 但为合成的850 hPa 经向风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for meridional wind ($m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa

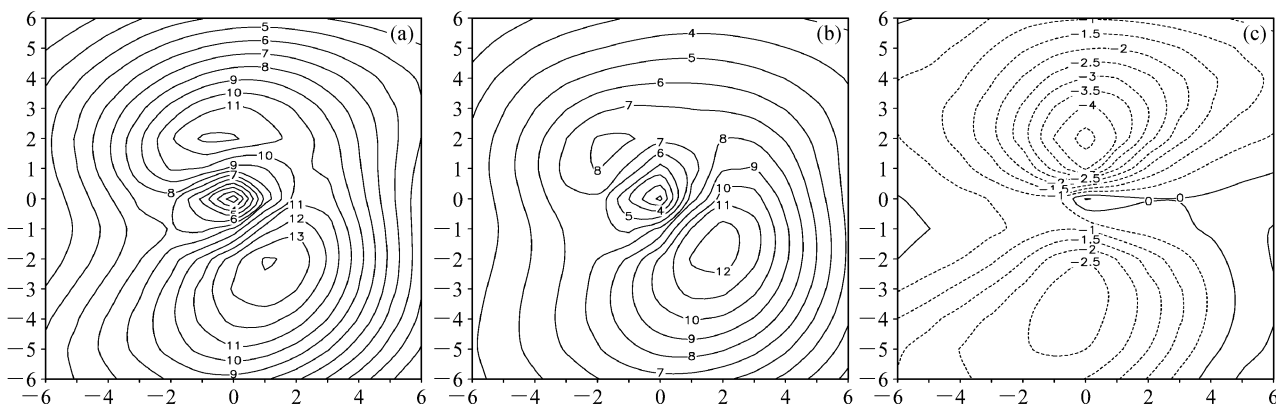


图6 同图1, 但为合成的850 hPa 切向风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$

Fig. 6 Same as Fig. 1, but for tangential wind ($m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa

小值中心外围有一圈大风速区, 最大的极值风出现在气旋中心的东南象限, 这种切向风的分布与实际观测的热带气旋的切向风场十分一致。比较 20C3M 和 1%to4x 两组试验的差值发现 CO_2 浓度增加后整个 13×13 网格范围里气旋的风速均明显减小。也说明 CO_2 浓度增加会使得热带气旋的切向风场尤其是大风速区的切向风强度减弱 $2.5 \sim 4 m \cdot s^{-1}$ 。

图7是以气旋中心为原点的径向风场空间分布和两组试验的差值分布。模拟的结果显示, 热带气旋中心西南和东北象限的流入气流较强, 相比而言气旋中心东南和西北象限的流出气流要弱一些, 也就是说在 850 hPa 等压面平均来讲气旋中心附近有气旋辐合流入, 这与一般观测结果相一致。分析 1%to4x 试验减去 20C3M 试验的差值分布 (图 7c) 可见, 气旋中心西南和东北象限的流入气流和气旋中心东南和西北象限的流出气流

都有减弱的趋势, 而更重要的是流入风速平均小于流出风速, 表明 CO_2 浓度增加将使热带气旋在 850 hPa 的辐合流入气流减弱。对于高层 200 hPa (图略) 模拟结果显示气旋中心附近主要是反气旋性辐散流出气流, 1%to4x 试验 200 hPa 的流出气流相对于 20C3M 试验明显减弱, 表明 CO_2 浓度增加将使热带气旋 200 hPa 的辐散流出气流减弱。可见, CO_2 浓度增加会同时减少热带气旋低层的流入和高层的流出气流。

图8是横过气旋中心的 1000~200 hPa 切向风速的垂直剖面, 可以看出, 耦合模式可以很好的模拟出热带气旋眼壁附近切向风速的分布及随高度的变化, 气旋眼区的风速相对要偏小, 模式风速的极大值位于距中心两至三个格距之间的位置; 就随高度的变化而言, 模式气旋的最强风速位于 900~800 hPa 之间。风速的垂直分布和结构

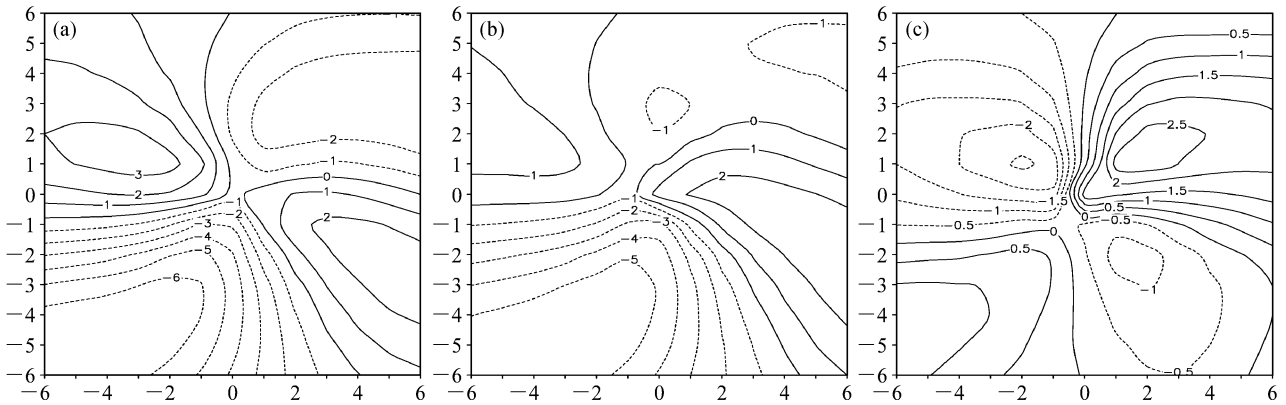


图7 同图1, 但为合成的 850 hPa 径向风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$

Fig. 7 Same as Fig. 1, but for radial wind ($m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa

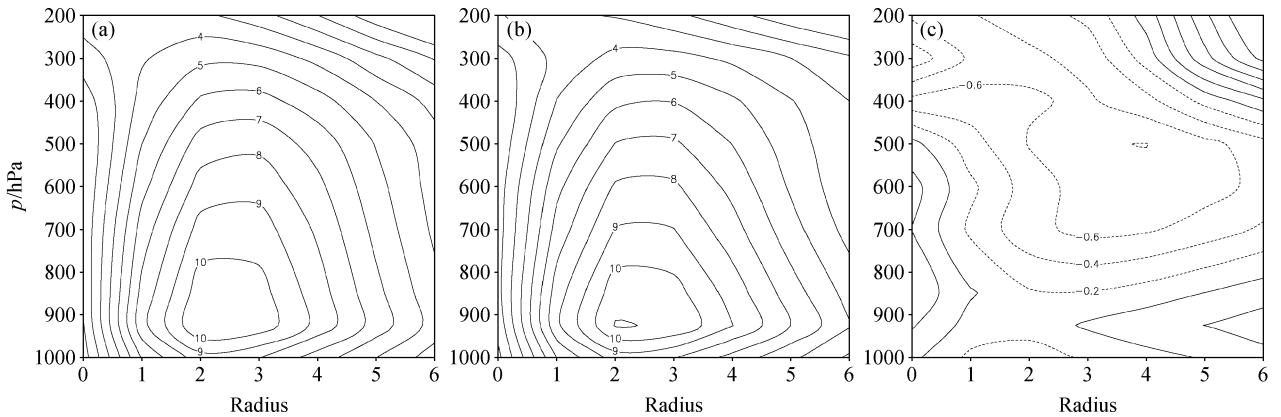


图8 同图1, 但为合成的切向风场垂直剖面, 单位: $m \cdot s^{-1}$

Fig. 8 Same as Fig. 1, but for vertical sections of tangential wind ($m \cdot s^{-1}$)

基本与实际观测的热带气旋风速分布一致, 反映了ECHAM5模式对于热带气旋的结构具有较好的模拟能力。由两个试验的差值分布(图8c)可见, 气旋中心附近几乎整层的切向风速都减小了, 负值中心主要集中在中层700~400 hPa, 说明CO₂浓度增加也造成了气旋中层切向风场强度减弱。

具有暖心结构是热带气旋的典型特征, 图9中为横过气旋中心的温度异常垂直剖面。由图9a和b可见, 模拟结果显示气旋中心存在明显的温度高于周边的暖异常结构, 也就是暖心结构。20C3M和1%to4x试验模拟出的暖心结构都位于500~200 hPa之间, 与实际观测比较吻合。1%to4x试验减去20C3M试验所得的温度差值分布(图9c)显示, 对流层中高层暖心的位置存在明显的负异常, 说明1%to4x试验的暖心强度要低于20C3M试验的强度, 这清楚表明CO₂浓度增

加以后气旋的暖心强度有所减弱。

4 西北太平洋热带气旋频数变化的比较分析

图10是20C3M和1%to4x两组试验所模拟的1991~1999年全部被识别出的热带气旋中心在整个生命史期间850 hPa上最大风速频数分布图, 图中显示风速和频数之间存在类正态分布。ECHAM5模式中介于15~20 $m \cdot s^{-1}$ 风速的气旋频数最多, 小于15 $m \cdot s^{-1}$ 风速区间上气旋频数随着风速的减小而减小; 大于20 $m \cdot s^{-1}$ 的风速区间上气旋频数随着风速的增大而减小。图10的虚线显示, 在最大频数的风速区间也就是15~20 $m \cdot s^{-1}$ 风速区间, CO₂浓度增大会降低在这个风速区间的热带气旋的生成频数, 而对于模式中的强度较

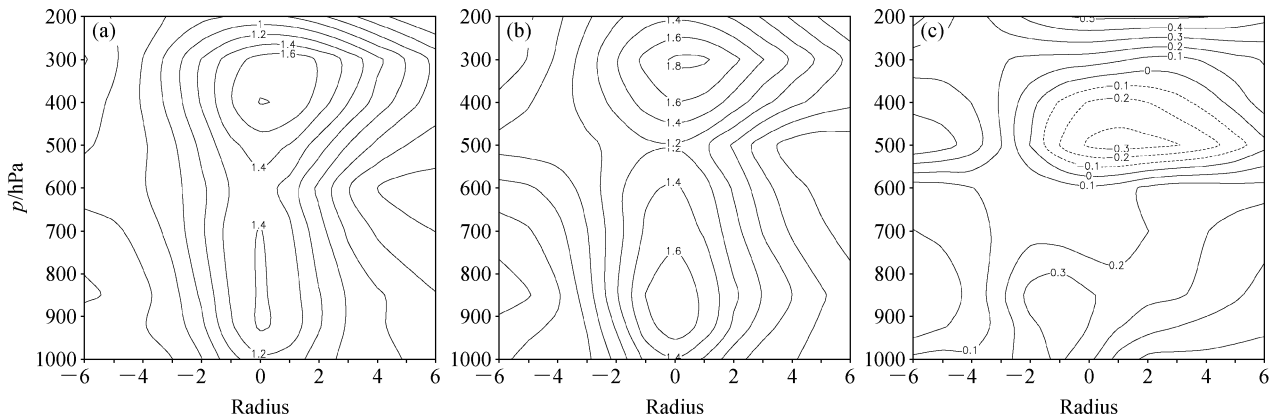


图9 同图1, 但为合成的温度异常垂直剖面, 单位: °C
Fig. 9 Same as Fig. 1, but for vertical sections of temperature anomalies (°C)

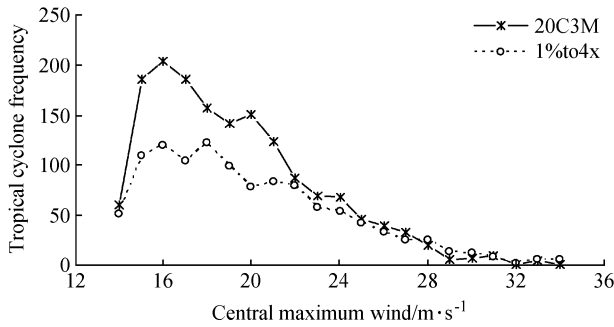


图10 ECHAM5 模式两组试验所模拟的热带气旋中心在 850 hPa 上的最大风速频数分布
Fig. 10 Distribution of the frequency of the central maximum wind at 850 hPa for all the ECHAM5 model tropical cyclones

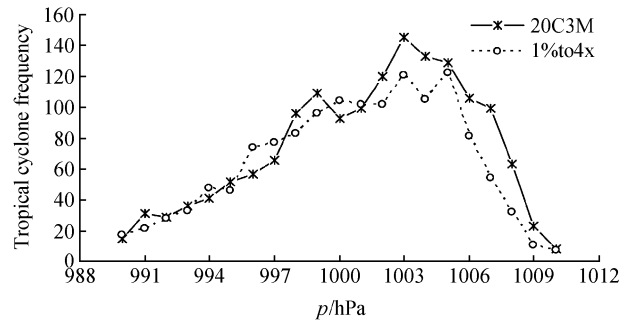


图11 ECHAM5 模式两组试验模拟的气旋中心最低气压频数分布
Fig. 11 Distribution of the frequency of the lowest center pressure for all the ECHAM5 model tropical cyclones

大的热带气旋, 如风速超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的热带气旋, 在 CO_2 浓度增加试验中频数有所增加。可见, 在 $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速的气旋频数最多的区间热带气旋频数降低的幅度接近一半, 而对于强度超过 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风速气旋其频数在 CO_2 浓度增加后反而有微小的增加。

图 11 为采用中心最低气压来表示的强度—频数分布图, 由图可见中心气压较高也就是强度较低的热带气旋频数在 CO_2 浓度增加后都存在不同程度的降低, 而对于气压较低强度较高的气旋, 其频数在 CO_2 浓度增加后变化不明显。

为了进一步分析 CO_2 浓度变化前后热带气旋频数的变化情况, 我们将 1991~1999 年 ECMWF 资料分析出的实际气旋频数与模拟结果进行比较 (图 12)。就 20C3M 模拟试验而言, 1995 年以后热带气旋频数年际变化的模拟结果与实测资料分

析结果 (ECMWF) 非常相近。比较 CO_2 浓度变化前后频数的变化状况表明, CO_2 浓度的增加会改变热带气旋频数的年际变化, 在有的年份热带气旋的频数会增加, 有的年份则会减少, 但总体上以减少的年份居多, 在模拟的 9 年中只有 2 年热带气旋的频数是增加的, 而其余 7 年都为减少。为了定量的分析热带气旋频数在 CO_2 浓度增加后的变化趋势, 对 1991~1999 年的热带气旋频数做平均, 结果显示 20C3M 试验年均生成 33.7 个热带气旋, 1%to4x 试验年均生成 23 个热带气旋, ECMWF 资料中年均热带气旋数目为 34.6 个。可见 20C3M 试验得到的年均频数与 ECMWF 资料分析出的热带气旋频数相当接近, 表明 ECHAM5 模式对于热带气旋的年平均频数具有较好模拟能力, 其模式结果是可信的。相比而言, CO_2 浓度增加的试验 (1%to4x) 模拟出的年均热带气旋频

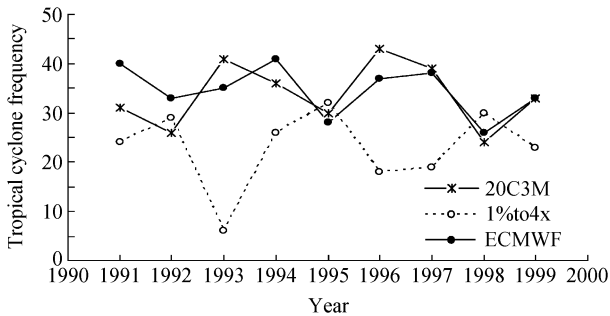


图 12 两组模拟试验的 1991~1999 年西北太平洋气旋生成频数与 ECMWF 资料的对比

Fig. 12 Comparison of the frequency of tropical cyclones over the western North Pacific between the simulation results of the two experiments and the results from ECMWF data from 1991 to 1999

数明显低于 20C3M 试验和观测，少了近 1/3。因此，在耦合模式中 CO_2 浓度的增加有明显抑制气旋生成的作用，在一定程度上表明 CO_2 浓度增加将减少热带气旋频数。

热带气旋的频数变化除了具有明显的年际差异还存在明显的季节差异。季节变化的特点是夏、秋季生成较多，冬、春季生成较少，主要生成月份集中在 7~10 月（台风季）。图 13 是 1991~1999 年平均的各月热带气旋生成频数的变化情况，可见模拟的热带气旋频数的季节变化基本可以再现实际观测的状况，由此耦合模式较好的模拟了热带气旋的季节变化特征。但是，不同试验的模拟结果也存在一些差异，和 ECMWF 再分析资料比较，20C3M 试验模拟的热带气旋频数在 4~9 月偏多，1、2、10、11、12 月偏少。可见模

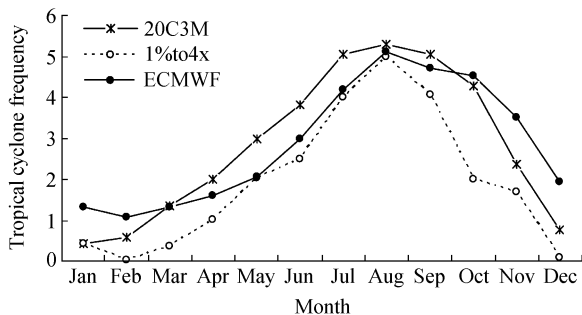


图 13 两组模拟试验的各月西北太平洋气旋生成频数与 ECMWF 资料的对比

Fig. 13 Comparison of the frequency of tropical cyclones over the western North Pacific in each month between the simulation results of the two experiments and the results from ECMWF data

式对于夏、秋季的热带气旋频数模拟偏多，而对于冬、春季的热带气旋频数模拟偏少。1%to4x 试验模拟的结果显示在一年的 11 个月（2~12 月）里气旋频数均少于 20C3M 试验，1 月份两组试验频数相等。因此 CO_2 浓度的增加引起气旋频数的减少会较为平均的分配到多个月里，说明 CO_2 浓度的增加引起大气环流异常在全年都会对西北太平洋热带气旋的发生频数造成影响。

5 结语

在 CO_2 浓度增加的温室气体排放情景下，我们对德国 Max-Planck 气象研究所为 IPCC 第四次评估报告而发展的气候系统模式（ECHAM5/MPI-OM）的数值模拟结果进行了分析。在此基础上，着重就 CO_2 浓度增加情景下热带气旋的基本结构、频数的变化特征对模拟结果进行了深入研究。

研究显示，ECHAM5 模式较好的模拟出了热带气旋的基本结构、频数的分布和时间演变特征，并与 ECMWF 资料的结果相当接近，模式模拟资料是可信的。当大气中 CO_2 浓度增加时，热带合成气旋的中心最低气压将略有升高，850 hPa 正涡度将降低，风速将减小，总体强度减弱。

进一步的分析表明， CO_2 浓度增加使气旋低层的径向流入减弱，并出现反气旋性环流异常，而高层的流出气流也减弱；在热力场上，暖心强度明显减弱。这些可能是导致热带气旋结构和强度变化的主要原因。

CO_2 浓度的增加会总体减少西北太平洋热带气旋的生成频数，从 1991~1999 年的模拟结果看出年均减少 10 个左右。就 CO_2 浓度增加对热带气旋频数季节变化的影响而言， CO_2 浓度增加所引起气旋频数的减少会较平均的分配到多个月份里，可见 CO_2 浓度增加引起的大气环流异常在全年都会对西北太平洋热带气旋的发生频数造成影响。

关于热带气旋生成的机理国内外已有不少研究，归纳起来基本上包括热力条件和动力条件两个方面。Emanuel (2005) 和 Webster et al. (2005) 的结果基本上是强调了热力（特别是海温）的作用，当然他们仅用了 30 年的资料，其结果是值得考究的。动力学条件（包括垂直风切变、大气稳定性、大尺度辐合辐散等）对于热带气旋

的生成和发展也是极为重要的。本文研究表明 CO₂浓度的增加, 可以升高海表面温度 (SST), 有利热带气旋的生成和发展; 但同时也可能造成了不利于热带气旋发生发展的大气动力条件, 因而热带气旋不仅数量少、强度平均也弱。而且, 本文的模拟结果与观测资料的结果也是基本相一致的。

参考文献 (References)

- Bengtsson L, Botzet M, Esch M. 1995. Hurricane-type vortices in a general circulation model [J]. *Tellus*, 47A: 175-196.
- Chan J C L. 2006. Comment on "changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment" [J]. *Science*, 311: 1713b.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 399-410. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Typhoon over the western Pacific [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 399-410.
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 436: 686-688.
- 范可. 2007. 北太平洋海冰, 一个西北太平洋台风生成频次的预测因子? [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37 (6): 851-856. Fan Ke. 2007. North Pacific sea ice cover, a predictor for the North-west Pacific typhoon frequency? [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 37 (6): 851-856.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 525-583.
- 黄勇, 李崇银, 王颖, 等. 2008. 近百年西北太平洋热带气旋频数变化特征及其与 ENSO 的关系 [J]. *海洋预报*, 25 (1): 80-87. Huang Yong, Li Chongyin, Wang Ying, et al. 2008. Study on the variation characteristics of annual frequency for tropical cyclones in western North Pacific during the last hundred years and relationship with ENSO [J]. *Marine Forecasts* (in Chinese), 25 (1): 80-87.
- 李崇银. 1985. 厄尔尼诺与西太平洋台风活动 [J]. *科学通报*, 29 (14): 1087-1089. Li Chongyin. 1985. El Niño and the typhoon activity [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 29 (14): 1087-1089.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. *热带气象学报*, 20 (1): 14-23. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20 (1): 14-23.
- 牟林, 吴德星, 陈学恩, 等. 2006. 温室气体浓度增加情景下全球海洋变化主要特征分析 [J]. *科学通报*, 51 (19): 2304-2308. Mu Lin, Wu Dexing, Chen Xueen, et al. 2006. Analyses of the predicted changes of the global oceans under the increased greenhouse gases scenarios [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 51 (19): 2304-2308.
- Pielke R A Jr, Landsea C, Mayfield M, et al. 2005. Hurricanes and global warming [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86 (11): 1571-1575.
- Ren F, Wu G, Dong W, et al. 2006. Changes in tropical cyclone precipitation over China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20702, doi: 10.1029/2006GL027951.
- Roeckner E G, Bäuml L, Bonaventura R, et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description [R]. Max-Planck-Institute für Meteorology, Report No. 349, Hamburg: 144pp.
- Saunders M A, Lea A S. 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity [J]. *Nature*, 451: 557-560.
- 田荣湘. 2003. 全球气候变暖对西北太平洋热带气旋的影响 [J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 30 (4): 466-470. Tian Rongxiang. 2003. Influence of global warming on tropical cyclone in north-western Pacific [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)* (in Chinese), 30 (4): 466-476.
- Vitart F, Anderson J L, Stern W F. 1997. Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations [J]. *J. Climate*, 10: 745-760.
- Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 309: 1844-1846.
- 薛宗元, Neumann C J. 1985. 西北太平洋热带气旋的频率和运动 [J]. *热带气象学报*, 1 (1): 53-64. Xue Zongyuan, Neumann C J. 1985. Frequency and motion of western North Pacific tropical cyclone [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1 (1): 53-64.
- 杨桂山, 施雅风. 1999. 西北太平洋热带气旋频数的变化及与海表温度的相关研究 [J]. *地理学报*, 54 (1): 22-29. Yang Guishan, Shi Yafeng. 1999. Changes in the frequencies of tropical cyclones and their relationships to sea surface temperature in the western North Pacific [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 54 (1): 22-29.
- 余晖, 端义宏. 2002. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征 [J]. *气象学报*, 60 (6): 680-687. Yu Hui, Duan Yihong. 2002. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over western North Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (6): 680-687.
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 2004. 大气季节内振荡对印度洋—西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响 [J]. *气象学报*, 62 (1): 42-50. Zhu Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian-western Pacific oceans by Madden-Julian oscillation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (1): 42-50.