0577-6619/2009/67(5)-0679-88 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

全球变暖对台风活动影响的研究进展*

雷小途[1] 徐 明[1] 任福民[2]
LEI Xiaotu[1] XU Ming[1] REN Fumin[2]

1. 中国气象局上海台风研究所，上海，200030
2. 国家气候中心，北京，100081
1. *Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration*, *Shanghai* 200030, *China*
2. *National Climate Center*, *Beijing* 100081, *China*
2008-10-08 收稿，2009-02-28 改回.

Lei Xiaotu, Xu Ming, Ren Fumin. 2009. A review on the impacts of global warming on tropical cyclone activities. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5):679－688

Abstract Global warming is a hot topic, while the "extraordinary" episodes of global tropical cyclone activities in recent years are also concerned. Most of studies concentrated on two aspects: one is whether the climate character of global typhoon is changed? The other is if this change related to the global warming? An overview on this topic, which includes observational fact, cause analysis, numerical modeling, was given in this paper. Some main consensus can be concluded as: (1) No individual tropical cyclone can be directly attributed to climate change; (2) The recent increase in societal impact from tropical cyclones has largely been caused by rising concentrations of population and infrastructure in coastal regions; (3) The long term trend of frequency change of global tropical cyclone is not obvious; (4) The ratio of super-typhoon over some oceans has increased greatly since 1970, and the figure is much greater than the results of numerical modeling; (5) It is likely that some increase in tropical cyclone peak wind-speed and rainfall will occur if the climate continues to warm; (6) Though there is evidence either for or against the existence of a detectable anthropogenic signal in the tropical cyclone climate record to date, no firm conclusion can be made on this point. On the other hand, the two main problems, i. e., the homogeneity and consistency of tropical cyclones and climate data, and the deficiency of climate model in simulating tropical cyclone climate, make it difficult to explain definitely the relation between global warming and tropical cyclone climate at current stage.
Key words Typhoon climate, Global warming, Impact

摘 要 全球变暖是当前热点问题之一，各大洋区时有发生的"超乎寻常"的台风活动也广为关注。全球范围内的台风活动特征是否悄然发生了变化？这种变化与全球变暖是否存在关联？这些问题已成为国际台风界的重点研究内容之一，近年来取得了许多进展。文中从全球台风活动特征变化事实的观测研究、成因分析、数值模拟与预测等方面对此进行了概述。综合各方观点，得到主要共识如下：单个台风的异常活动不宜直接归因于气候变化；全球台风频数的年际变化趋势并不明显；沿海地区人口增长和基础设施增加是近期台风对社会影响加重的主要原因；自 1970 年以来，一些海区的超强台风比例明显增大，比目前数值模式的模拟结果要大许多；如果全球气候持续变暖，台风的最大风速和降水很可能会继续增加；尽管在台风记录中同时有支持和不支持人类活动(全球变暖的影响)信号存在的证据，但在这一点上还不能给出一致的肯定结论。另外，由于台风和相关气候资料存在均一性方面问题，气候数值模式对台风气候特征描述也存在缺陷，这两类问题的存在使得在目前阶段确切阐明全球变暖和台风活动的关系仍有极大的不确定性。
关键词 台风气候，全球变暖，影响
中图法分类号 P467

---

* 资助课题：国家重点基础研究发展(973 计划)项目(2009CB421500)、国家自然科学基金重点课题(40730948)、公益性行业科研专项(GYHY200806009)。
作者简介：雷小途，主要从事台风动力学及台风气候研究。Email: leixt@typhoon.gov.cn

1 “超乎寻常”的台风时有发生

当前,全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。许多“超乎寻常”的台风(泛指热带气旋,下同)活动现象在全球各大洋区也时有发生,如:2003 年北大西洋长达 9 个月(4—12 月)的飓风季节(常年约为 6 个月)、2004 和 2005 年的多达 14 和 27 个(常年平均 10 个)的飓风频数;百余年来首次于 2004 年 3 月观测到南大西洋也有飓风活动(并袭击了巴西);2004 年登陆日本的台风频数离奇地高达 10 个之多(常年平均约 3 个);2004 年的南海台风特少,加剧了华南地区的严重干旱;2005 年 2—3 月的 5 周时间内多达 5 个台风袭击了库克群岛;2005 年 8 月美国南部重镇新奥尔良市遭受 5 级飓风“Katrina”的严重袭击,2006 年 3 月超级热带气旋“Larry”袭击了澳大利亚东海岸、2006 年 8 月超强台风“桑美”袭击了中国浙江和福建两省、2006 年 11 月超级台风“榴莲”袭击了菲律宾东海岸、2007 年 6 月超级热带气旋“Gonu”袭击了阿曼和伊朗……

种种“超乎寻常”的迹象表现出全球热带气旋的异常变化信号,但是否表明全球范围及各大洋区的台风活动季节、台风频数、台风的群发性及台风登陆时的强度等气候特征正在悄然发生变化?这种变化是否与全球变暖有关?引起了科学家及社会各界的普遍关注。

2 台风气候及其变化归因

正当人们沉浸于对飓风“Katrina(2005)”造成巨灾教训的反思之际,2005 年 8、9 月《Nature》和《Science》相继刊登了 Emanuel(2005)和 Webster 等(2005)关于台风气候特征变化趋势的观测研究论文,指出:受全球变暖的影响,在过去 30 多年中,北大西洋、西北太平洋的台风潜在破坏力分别增强了一倍以上和约 75%;20 世纪 70 年代全球平均每年发生约 10 个超强台风(4 和 5 级飓风),而 20 世纪 90 年代之后每年则达到 18 个之多,几乎翻了一番。但却遭到 Landsea(2005)、Knaff 等(2006)和 Chan(2006)等科学家的质疑,由此引发了国际台风界对台风气候变化及其归因的激烈争议。

2.1 台风活动的气候特征是否发生了显著变化

争议的首要问题是,全球范围内的台风气候是否发生了显著变化?即资料的可靠性和非均一性是否导致了台风气候特征的虚假变化。

2.1.1 台风潜在破坏力的变化

Emanuel(2005)将台风中心附近最大风速 3 次方的时间积分定义为台风的潜在破坏力(PDI),计算了 1949—2003 年北大西洋和西北太平洋共 4500 个台风的 PDI,发现均有明显的增大。Landsea(2005)基于 20 世纪 60 年代以前缺少静止卫星的监测、对那些远离大陆的台风缺少飞机探测(自 1986 年以后停止了对西北太平洋的台风飞行),认为 Emanuel(2005)可能大大低估了 60 年代以前台风的 PDI 值。Landsea 等(2004)还推测,由于同样的原因,60 年代以前的台风频数有可能被漏记,并认为 1851—1885 年平均每年漏记的大西洋风暴或飓风约 0—6 个、1886—1905 年平均每年约漏记 0—4 个。Mann 等(2006)则认为 60 年代以前台风频数的观测比其强度估计存在的问题要小,因为在缺少基于飞机与卫星观测的预警情况下,船舶经常会至少在其外围遭遇台风。Kossin 等(2007)对 Emanuel 使用的气旋资料进行了订正,得到的大西洋飓风 PDI 变化趋势与 Emanuel(2005)相近,但在西北太平洋等海域则不尽相同。

由于 PDI 是台风强度(中心附近最大风速)和持续时间的综合量,台风强度的增强、台风持续时间的增长(频数增加或生命史增长)均可以导致 PDI 的增加。Wu 等(2007)认为大西洋 PDI 的增加主要是由气旋的频数增加和生命史延长所致。此外,虽然部分区域的台风频数可能存在一定的变化趋势,但是全球范围内的台风频数并没有发生显著的变化(Landsea,et al,1998; Chan,et al,1996; Henderson,et al,1998; Klotzbach,2006)。因此,台风的强度是否增强(或强台风的频数是否增加)?便成为讨论的重点。

2.1.2 强台风频数的变化

Webster 等(2005)利用 1970—2004 年最佳台风定位资料,分析发现:全球超强台风(4 和 5 级飓风,下同)有明显增多的趋势,20 世纪 70 年代超强台风占总热带气旋数的 20%,而 20 世纪 90 年代则升为 35%,其中在北太平洋、印度洋、西南印度洋增加最明显,而北大西洋增加最少。Knaff 等(2006)利用他们再分析后的资料,统计了 1966—1987 年西北太平洋的台风最大强度,发现超强台风年频数的上升趋势比原始最佳定位资料的结果明显减小。

Klotzbach(2006)基于卫星云图资料的研究发现1986—2005年全球超强台风频数的变化趋势并不很大(±10%之间),并指出大西洋飓风活动有明显增强的同时,东北太平洋台风的活动则存在量级相当的减少,而其他海域的变化趋势在量级上则小到可以忽略不计。Landsea等(2006)还注意到Webster(2005)的统计样本中未包含20世纪70和80年代发生在北印度洋的6个超级台风,若将其统计在内后就会使得北印度洋的趋势明显变弱甚至变得不显著,并认为这种系统性的低估对于主要依赖卫星云图进行台风强度监测的海域(即除大西洋以外的所有海域)在所难免,此外,由于近些年强台风的定强更趋准确,也可能导致统计结果的系统性偏差。

Kamahori等(2006)则注意到1977—2004年东京台风中心(JMA)与美国台风联合预警中心(JTWC)各自整编的台风最佳路径之间的差别,比较发现JMA资料中超级台风的日数由1977—1990年的每年7.2 d减少为1991—2004年的每年4.3 d,而JWTC资料的结果正好相反(超级台风的日数由1977—1990年的每年9.8 d增加到1991—2004年的每年16.9 d),指出这种差异与自1987年西北太平洋飞机探测台风业务中断以后JMA和JTWC在TC强度的卫星处理技术上的差别有关,并认为目前尚不能断定究竟哪种资料更可靠。雷小途(2001)比较发现中国气象局(CMA)整编的台风最佳定位资料与JTWC存在平均约54.4 km的差异。余晖等(2006)则分析比较了CMA台风定强资料与JMA和JTWC的差别,平均分别为0.6 m/s和1.7 m/s。王元(2006)[①]分析了源自3套整编资料对西北太平洋台风频数和强度气候变化的影响,发现3者的最大差别在于对热带低压的确定上。

虽然对不同来源或不同时段台风定强资料(因监测手段、定强技术指标的不同而存在差异)的统计结论仍存在不小差距,但是全球大多数海域的超强台风频数呈增多趋势。

2.1.3 登陆台风频数和强度的变化

中国学者除注意到西北太平洋台风频数有一定的减少(王小玲等,2006)外,更关注登陆或影响中国的台风频数和强度等的气候变化趋势。近年来,基于CMA整编的台风年鉴资料,进行了大量的统计分析:

Ren等(2006)的统计表明,1951—2004年,影响(包括登陆)中国的台风频数和带来的台风降水均呈减少的趋势。应明等(2007)[②]的研究则表明,过去50年(1949—2006年)影响中国的台风频数显著减少、台风的季节长度没有显著变化、受台风影响时的极大风速显著减弱、降水强度和面雨量均增加,但区域性差别明显:影响华南和华北的台风频数显著减少、华东地区无明显趋势,华南地区气旋的平均间断日数有所延长、华东地区则显著缩短,华南和华东的台风降水强度和面雨量均增加、华北则减少。

曹楚(2006)统计发现,1949—2002年登陆中国的台风频数有减少的趋势、登陆时的台风强度(平均强度和极端强度)有减弱趋势,但都不如西北太平洋的台风明显;1968年以后,台风的登陆位置有偏向中国海岸线中部的趋势。王秀萍等(2006)计算表明,1951—2002年登陆中国的台风频数的减少速率为每年约3%。王凌(2006)对不同强度等级的登陆台风频数统计表明,70年代以来登陆时强度达台风级别的气旋频数略有增加。许映龙(2007)[③]则指出,1975—2006年登陆台风的强度呈增强的趋势,具体表现为:登陆中国时达到台风等级的气旋比例增加(由1975—1990年的28.38%,增加到1991—2006年的39.40%)、登陆时强度在台风等级以下的气旋则减少(由1975—1990年的71.62%,减少到1991—2006年的60.64%)。

杨玉华等(2007)[④]的研究则认为,登陆中国的热带气旋频数有减小趋势,但达到台风等级的气旋频数变化不明显;气旋登陆位置的最北点有明显的南落趋势,使气旋登陆位置的南北最大差异有减小趋势,气旋登陆的区域更为集中(在20°—35°N有增多趋势,在35°N以北和20°N以南地区有减少趋势);台风登陆中国季节延续时间缩短了近1个月;气旋登陆时年平均强度有增加趋势,登陆强度概率

① 王元,宋金杰.2006.西北太平洋源地热带气旋频数和强度的气候变异—源自三种西北太平洋热带气旋观测记录的比较研究.第一届热带气旋国际学术研讨会(IWTC06),上海

② 应明,雷小途,杨玉华等.2007.近五十年热带气旋对我国影响的变化.第二届热带气旋国际学术研讨会(IWTC07),南京

③ 许映龙.2007.我国台风业务现状及其挑战.第二届热带气旋国际学术研讨会(IWTC07),南京

④ 杨玉华,应明,陈葆德.2007.近58年登陆中国热带气旋气候变化特征.第二届热带气旋国际学术研讨会(IWTC07),南京

分布的偏度长期有增加趋势,表明登陆时强度较强的气旋比重有所增加;登陆强度年最大差异有减小趋势。此外,Wu 等(2005)发现 1965—2003 年西北太平洋台风的盛行路径存在区域性的趋势变化。李英等(2004)则统计了台风登陆后的陆上维持时间等特征。

胡娅敏等(2007)① 对 1949—2006 年的资料统计也表明,登陆中国的热带气旋频数呈现下降趋势,但达到台风等级的登陆气旋频数变化不明显;登陆时气旋的平均强度增加,但达到台风等级的登陆气旋的平均强度变化不明显;初台推迟、终台提前,台风季节显著变短。刘燕等(2007)② 统计后则认为,登陆中国的台风频数呈弱的减少趋势,而台风及以上级别的登陆气旋频数则有增加趋势;登陆中国的气旋生成源地有向北移的趋势;登陆台风的平均登陆点无明显北移或南移趋势,但登陆点最北的纬度在 70 年代中期以后出现南落,主要在 35°N 以南。

可见,尽管统计的起止年份不尽相同,但在登陆中国的台风频数、强度及登陆位置变化等方面的结论较为一致:影响和登陆中国的热带气旋频数呈弱的减少趋势、但达到台风等级的登陆气旋频数却变化不明显或有所增加,登陆时气旋的平均强度有显著增加、登陆时强台风的比例增加,登陆中国的初台推迟、终台提前、登陆季节显著缩短,气旋登陆区域更趋集中在中国海岸线的中部地带。

2.2 归 因

在全球气候变化的背景下,热带气旋研究特别关注的海洋圈也发生着深刻的变化,包括海面温度升高、海冰面积减少、海平面上升以及盐度、波浪和海洋环流的变化。全球气候发生了变化,海洋上生成的热带气旋的发生频率、发生地点、强度、路径及其登陆地点也会发生相应的变化。台风异常活动是全球气候变暖的必然结果,还是台风年代际周期性变化的反映,成为当前争论的焦点。

2.2.1 全球变暖的影响

全球变暖,海表温度(SST)也随之升高(Barnet, et al, 2005;Webster, et al, 2005),而高 STT 是台风生成的有利条件之一,因而台风的频数趋多。此外,根据 Emanuel(1987)提出的台风最大可能强度(MPI)理论模型,Holland(1997)、Henderson-Seller 等(1998)推断,高 SST 会导致台风的 MPI 增大,即台风可能更强或强台风可能增多。Knutson 等(1998,1999,2001,2004)则基于飓风数值模式对大尺度热力条件的模拟分析认为,全球变暖条件下台风的强度更强、降水率更高。

Hoyos 等(2006)根据对影响台风变化的多种变量分析,表明 1970—2004 年全球范围内超强台风的增多趋势主要与 SST 相关联。热带环境场的其他变量,如风垂直切变、925—500 hPa 比湿、850 hPa 纬向伸长形变(纬向风随经度的变化)等只影响较短时期的台风强度变化,而不能明显地影响全球台风强度变化。

Emanuel(2006)将大西洋飓风的 PDI 序列延至 18 世纪初,分析发现该序列与大西洋飓风主要源地的 SST 的长期变化(尤其是世纪尺度的变暖趋势)相当接近,并与飓风主要源地的 SST 存在很好的相关性,特别是对于 1970—2004 年相关系数高达 0.74。Sriver 等(2006)估算了全球台风 PDI 的敏感性,发现 SST 每增加 0.25 ℃,全球台风的 PDI 将增加约 60%。由于 20 世纪 70 年代中期 SST 发生了基本态的变化(SST 升高 0.5—1.0 ℃,1990 年以后升高 0.5 ℃),这种变化被认为与全球变暖有关,因而近 30 年台风强度的变化可能与全球变暖有关。

也有人认为这种关联不一定通过 SST 的升高,而通过排放的 CO_2 产生的温室效应造成。Henderson-Sellers 等(1998)的估算表明,CO_2 加倍的情况下,从台风中心气压下降的程度来看,台风的 MPI 将增加 10%—20%。Wu 等(2004)通过台风轨迹模型的模拟,发现温室气体引起的气候变化对台风路径会产生影响,但情况较为复杂。

曹楚等(2006)则通过气候趋势的检测,分析发现,1949—2002 年西北太平洋的台风频数及登陆中国的台风频数与全球平均地面温度具有反相的气候变化趋势,相关系数分别为 −0.54 和 −0.12,即:全球变暖背景下,西北太平洋和登陆中国的台风频数均有减少的趋势,但西北太平洋台风频数的减少更为明显。

已有的观测研究表明,大西洋的飓风活动受全

① 胡娅敏,宋丽莉,刘爱君等. 2007. 近 58 年登陆我国热带气旋的气候特征分析. 第十四届全国热带气旋科学讨论会. 上海

② 刘燕,叶萌. 2007. 新等级标准下我国登陆热带气旋的气候特征. 第十四届全国热带气旋科学讨论会. 上海

球变暖的影响相对更大。这可能是因为 SST 对于大西洋飓风的发生、发展和移动具有相当的主导作用,而对西北太平洋等海域的台风活动的主导作用相对较弱。

马丽萍等(2006)阐述了全球气候变化对全球台风活动的影响在国际上取得的进展,指出:全球气候变化主要以全球大气环流、海气相互作用、全球海面温度和温盐环流这 4 个方面的相互影响及其共同作用,对全球台风活动的发生频率、强度、路径趋势和登陆地区产生影响,并给出了全球台风活动与全球气候变化相互关系图。

2.2.2 自然变化

全球变暖与强台风频数增加之间的关联受到了不少科学家的质疑:一方面,由于长期的气候循环或年代际变化也起着重要作用,这表现在一百多年来各海区台风频数的增减上;另一方面,由于全球变暖对台风影响的机理不清楚,如:SST 的升高,会增强洋面的对流,释放更多的潜热使对流层上层趋暖,大气层结变得更稳定,从而抑制台风的生成和发展、未必有利于超强台风的产生。此外,由于早期台风监测手段和定强技术的局限、强台风序列的非均一性,使全球变暖与强台风频数间关系的可靠性受到一定程度的质疑。因此,目前认为全球变暖与强台风频数增加有因果关系为时尚早。

Goldenberg 等(2001)认为大西洋飓风近 10 年来的活跃,是其数十年至百年尺度周期(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)的正常波动。Chan 等(2004)也发现,1960—2003 年西北太平洋的台风活动(年频数、强台风所占的比例以及台风 PDI)与局地的 SST 变化没有显著关系。Chan (2006)将 Webster 等(2005)对西北太平洋的分析时段延长至更早时期,分析发现该海域所谓的"趋势"只是更长年代际变化的一部分。张加春等(2007)[①]则对 1884—2006 年的西北太平洋台风资料进行了整理,并得到了存在百年尺度变化的类似结果。Liu 等(1993,2000)则利用沿海湖泊及沼泽中沉积冲刷沙层等地质代用资料,建立了过去 5000 年袭击 Alabama 和 Florida 西北部超强台风(4 和 5 级飓风)的古气候记录,旨在揭示更长时间尺度的飓风活动特征。类似的技术用于从 Rhode 岛和 New Jersey 堤坝后的沼泽数据中,并建立了过去 700 年袭击加勒比海地区的飓风记录。在从壳化的海滩背脊年代的地层序列推算过去 5000 年澳大利亚地区台风频数时,还考虑了海平面长期变化的影响。徐明(2007)[②],则基于中国丰富的史志记载,建立了近 500 年华东地区的致灾台风资料,分析发现 16 世纪中到 17 世纪末致灾台风偏多、而 18 世纪初至 19 世纪中致灾台风偏少。徐过冬等(2007)综述了古风暴学研究进展,认为由于台风器测资料的年限太短,即使在美国也不超过 150 年的观测历史,对台风(尤其是强台风)的长周期变化更是认识不足。

也有学者认为,台风活动的年代际气候振荡对近十来年台风活动"异常"也有重要贡献。Chan (1995)指出,20 世纪 60 年代中期到 70 年代初期为西北太平洋台风活动频繁期,50 年代和 80 年代初期为台风活动较少期,但 80 年代中期以后台风活动又逐渐增多。叶英(2002)和张庆云等(2003)则发现登陆中国的台风频数在 50—60 年代为偏少期、70 年代中期发生了突变、此后为偏多期。

更多的学者则注意到 ENSO、北大西洋涛动(NAO)、季风等大气、海洋环流的年际和年代际变化,并认为这正是造成台风活动年代际振荡甚至更长尺度气候循环的主要原因。如:Gray(1999)认为大西洋飓风的活动与温盐环流的强弱有关:温盐环流强,北大西洋 SST 暖,对流旺盛,飓风活跃;相反,温盐环流弱,北大西洋 SST 冷,对流不旺,飓风不活跃。他同时认为温盐环流的强弱存在约 20—50 a 时间尺度的周期。然而,执全球变暖影响观点者,认为温盐环流本身就受全球变暖的影响。如:何敏等(1999)分析表明,El Niño 年西北太平洋的台风频数减少、La Nina 年的台风频数增加,并认为海-气耦合作用对环流的不同影响可能是其主要原因。Lander(2000)则认为 ENSO 对西北太平洋台风的频数影响不大,而 El Niño(La Nina)期间的台风源地则有偏东(西)的趋势。Horsfall(2000)也认为,ENSO 对西北太平洋的台风影响很小,但 El Niño 发生的前期,北大西洋和加勒比海的台风频数增加,而墨西哥湾的台风频率则减少,ElNiño期间东北

① 张加春等. 2007. 1884—2006 年西太平洋热带气旋活动特征分析. 第十四届全国热带气旋科学讨论会. 上海

② 徐明等. 2007. 影响华东台风 500 年历史资料重建方法. 中国气象学会 2007 年年会. 广州

太平洋的台风频数增加。造成 ENSO 对西北太平洋台风影响有差异的原因可能是使用的资料来源不一。吴迪生等(2003)、林蕙娟等(2004)基于 CMA 台风年鉴资料的研究表明:El Niño 期间,西北太平洋的强台风频数减少(特别是 El Niño 的次年)、影响中国的台风频数少但强度强,La Nina 反之。Wu (2007)[①]分析认为,大西洋弱的风切变暖和的 SST 有利于生成更多的风暴和使飓风季节开始得更早、结束得更迟,从而导致了 PDI 的增大;萨哈拉的大气层(SAL)和热带气旋的源地及路径的变化对近 30 年以来飓风的强度变化有重要影响。

另有大量的相关研究(Knutson,2006)表明,在大多数洋区(尤其是大西洋和太平洋)El Nino 事件与台风数和路径之间有较清楚的联系。表现为一种负相关关系,即:El Nino 年,在大西洋和西太平洋澳洲地区,台风发生数减少。由于 El Nino 事件的强度和频率近 30 年有增加趋势(即北太平洋年代际涛动(PDO)高位相阶段),而全球变暖对 ENSO 的暖位相也有贡献,所以上述趋势可能反映了年代际变化和全球变暖的共同影响。

3 数值模拟研究

在观测研究中,全球变暖的影响及自然变率的贡献通常不易甚至不能被区分。数值模式,因其特有的优势,在台风气候变化的回归检测及未来趋势预估中得到应用。

3.1 历史台风气候变化的模拟

(全球)气候模式的粗分辨率,制约了模式对台风气候变化的准确模拟。低(300 km)、中(120 km)分辨率的全球气候模式,模拟的台风水平尺度偏大,因而内核强度不能很好地模拟出来,模拟的风速也比实际观测的低,但对中心最低气压的模拟效果稍好,并具有较好模拟大西洋飓风频数年代际变化的能力。而高分辨率(20—50 km)的气候模式或台风模式对台风强度及其地理分布的模拟效果更好,但对于强台风的模拟依然有局限性。受分辨率的影响,全球气候模式模拟不出台风的中小尺度特征,但能较好地模拟出台风活动的季节和年际变化等某些气候特点。提高模式的水平分辨率能显著改善模式对单个台风的模拟效果,却不一定能提高对台风频率的气候变化特征的模拟能力。

Emanuel(1999)使用一个简化的气候模式,成功地模拟出了几例台风的强度,Knutson 等(2004)也曾利用理想飓风模式来模拟气候变化对飓风强度的可能影响。最近,一种基于统计的台风气候模式广受关注,它将合成方法产生台风路径与台风强度预报方案相结合,台风强度预报方案中包括了大尺度热力环境条件、风切变及海洋的相互作用,通过一种简单的非对称的平衡飓风模式耦合到一维海洋模式之中,能很好地模拟出大西洋飓风的最大风速特征,且运算效率高。Wu 等(2004)则将气候平均风场输入到一个台风轨迹模型中,利用 NCEP/NCAR 再分析资料为气候背景场,更好模拟出了当前西北太平洋台风路径的主要气候特点。

不同模式的分辨率和物理过程不尽相同,模拟的台风生成频数、生成时间、路径的长度(生命史)等也有一定的差异。而且,由于不同模式所采用的判断台风的客观标准和方法(如:850 hPa 的局地最大气旋性相对涡度、暖核、最大风速临界值、"季节生成参数"等)也不完全相同,因而降低了不同模拟结果间的互相检验和可比较性。

目前,利用气候模式模拟的全球台风年频数与实际观测的台风频数的相关系数通常介于 0.15 (JMA 模式)至 0.41(GFDL),且因季节、海域和模式的不同而不同,其中西北太平洋和大西洋的相关系数相对较大(Knutson,2006)。

3.2 未来台风气候变化的趋势预估

鉴于气候模式对台风的活动已具有一定的模拟能力,因此原则上便可利用气候模式,预测不同排放情景下未来几十年到百年的台风频数、强度和路径的变化。

中高分辨率(120—20 km)气候模式的预估表明,CO_2 倍增和全球变暖将使全球范围内的台风频数减少或很少变化、强台风的频数、台风的强度和台风的降水率等均有增加趋势(Knutson,et al, 2001, 2004),但是存在明显的区域差异,而且这种区域差异在不同模式的预测结果中有很大不同。

100 km 分辨率的全球模式(T106)预测表明:未来(2100 年)全球台风频数将比现在减少约 6%,但北大西洋的飓风频数却增加;台风的强度则没有明显变化,平均与极端的台风降水增加。20 km 分辨率的全球模式则预测:在A1B排放情景下,全球台风频数将减少 30%,但北大西洋增加;超强台风频数将增加(极端最大风速增加约19%),而弱台风频

① Wu L G. 2007. Understanding of Tropical Cyclone Intensity Change in a Warming World. 第十四届全国热带气旋科学讨论会. 上海

数将减少;全球的台风路径则没有明显变化。此外,高分辨率的全球气候模式还预测:如 SST 增暖 2.2 ℃,西北太平洋强台风的最大风速将增加 5%—10%。Walsh 等(2004)基于 30 km 分辨率的区域气候模式,预测 CO_2 加倍后澳大利亚附近的台风频率不会发生明显变化。Knutson 等(2004)则指出,在套网格的全球气候模式中,CO_2 增加引起的全球变暖对台风强度增强的贡献却有限,递增率约为(5%—10%)/100 a,而且海-气的耦合作用对台风的增强有抑制作用(Knutson,et al,2001)。但是,台风最大风速随全球变暖增加的预测得到了理论计算(MPI,最大潜在强度)的支持。Holland 计算表明,对于 CO_2 加倍的条件,MPI 可增加 10%—20%。曾有人认为,如果考虑由台风引起的海面冷却的反馈作用,其强度可能减少。但最近基于与海洋耦合的台风模式的试验表明,即使考虑这种海洋冷却的反馈作用,在 CO_2 引起的全球增暖的条件下,台风的最大强度仍会增加。李永平等(2006)[①]的研究表明在 A2 和 B2 排放情景下,西北太平洋台风频数在未来 50 年可能有所减少。

GFDL 模式预测,在全球更暖的气候背景下,与飓风相关的降水量将增加,递增率约为(15%—30%)/100 a,造成的洪涝灾害等社会影响可能加剧(Knutson, et al, 2004)。基于其他中高分辨率的气候模式也预测,全球变暖将使西北太平洋和北大西洋地区的台风降水增加。分析认为台风降水的增加是因为气候变暖使得大气湿度的增加所致。虽然台风降水增加后潜热释放增强,但由于气候变暖时静力稳定度增加,上升绝热冷却增强,抵消了潜热的影响,因此台风的强度也不一定增加。Dutton(2002)的研究表明,CO_2 增加,全球变暖,SST 升高,热带地区的深对流活跃,降水强度增加。SST 每升高 1 ℃,台风中心 100 km 范围内的降雨增强约 10%。

Walsh 等(2000)使用多网格嵌套的气候模式研究表明,在暖的海区,台风有向极地运动的趋势,这就意味着全球变暖、SST 升高,台风路径将向极漂移。这与 Knutson 等(1999)认为全球变暖不会引起台风的向极漂移相反。Wu 等(2004)则认为,全球变暖对台风的路径会产生影响,但影响的情况较为复杂。

目前,大多数的气候模拟预测(基于在全球气候模式中嵌套高分辨率的台风模式)认为,全球变暖背景下,台风可能变得更强,具有更大的风速和更强的降水。但是,要对未来百年内台风频数分布及强度变化做出准确预测是相当困难的(Henderson-Sellers, et al,2006)。这是由于:预测的可靠性受未来气候强迫情景、模式的物理过程等许多不确定因子的制约;与全球模式相比,台风的空间尺度太小、且强度很强,在气候模式中真实地详细描述台风的生成、移动和整个生命史是相当困难的。后者,目前主要采用在高分辨率的全球模式中嵌套甚高分辨率的台风预报模式的办法来解决,但对台风核区的强风与强降水的模拟与预报仍存在很大问题。因此,目前要确切估计台风最大风速(强度)与最大降水的气候变化存在许多不确定性,模式模拟的台风频数变化往往也小于模式的气候平均偏差,从而增加了模拟台风未来变化的不确定性。

4 共识与问题

4.1 共 识

如前所述,近几年全球范围内出现的许多严重影响台风事件,一些观测和模拟研究认为台风潜在破坏力(或能量)、频数和强度等的迅速增加趋势与 SST 的升高密切相关,另一些研究则指出这些变化主要来源于观测技术和仪器的变化。从而引起全球范围科学家及社会各界的广泛关注,也受到 IWTC 和 IPCC 的高度重视,并在台风频数和强度变化的影响等方面已初步形成了些许共识。

4.1.1 IWTC 声明

作为对社会各界广泛关注的回应,2006 年 11 月,在哥斯达黎加召开 IWTC-VI 会议期间,专题研讨了全球变暖对台风活动影响问题,并发表了一份关于人类活动引起的气候变化与台风之间关系的声明(IWTC-VI,2006),主要观点如下:

(1) 尽管在台风记录中同时有支持和不支持人类活动(全球变暖的影响)信号存在的证据,但在这一点上还不能给出一致的肯定结论。

(2) 单个台风的异常活动不宜直接归因于气候变化。

(3) 沿海地区人口增长和基础设施增加是近期台风对社会影响加重的主要原因。

(4) 在过去几十年中,对台风的定强技术(监测和确定台风最大风速的手段)发生了很大变化,这给确定准确的变化趋势带来许多困难。

① 李永平,王晓峰,于润玲. 2007. 全球气候变化背景下西北太平洋热带气旋生成频数趋势展望,第十四届全国热带气旋科学讨论会. 上海

(5) 在一些海域已经观测到台风存在多年代际变率,而这些变率的成因,无论是自然原因、人为原因或者综合原因,目前正在成为争论的焦点。这种变率使得对台风活动的任何长期变化趋势的检测变得困难重重。

(6) 如果全球气候持续变暖,台风的最大风速和降水很可能会继续增加。模拟研究和理论分析显示当海表温度每升高 1 ℃,台风的风速将增强 3%—5%。

(7) 理论和模式模拟得到的小的风速变化和一些观测研究得出的相对大的风速变化之间存在不一致。

(8) 数值模拟显示,在全球变暖的气候背景下,全球台风频数趋于不变或减少,但全球气候模式的模拟精度仍较低,因此该结论的可信度较低。另外,还不清楚未来台风的路径或影响范围将如何变化。

(9) 对台风的监测方法存在很大的区域性差异,许多海域没有飞机探测手段,这些明显的局限性将继续阻碍台风气候变化的趋势检测研究的深入开展。

(10) 如果全球变暖引起的海平面升高这一情景预测成为现实,则对台风风暴潮的脆弱性无疑将会增加。

4.1.2 IPCC 评估

2007 年 2 月,正式发布的 IPCC 第 4 次评估报告(AR-IV)的决策者摘要(IPCC,2007),也对全球变暖与台风气候变化的问题作了评估,主要结论有:

(1) 已有观测证据表明,自 1970 年以来,北大西洋的强飓风趋于活跃,并与热带 SST 密切相关。

(2) 全球其他海域的强台风也趋于增多,但其可靠性很大程度上依赖于其资料的质量。在卫星观测(1970 年)前表现出的多年代际变化(Multi-decadal variability),使台风活动长期(气候)变化趋势的检测变得更复杂。

(3) 全球台风频数的年际变化趋势并不明显。数值试验表明,由于全球变暖和 SST 升高,未来的强台风(飓风)将变得更强、台风最大风速的极值和台风降水都将变得更大。

(4) 尚没有足够的证据表明全球的台风频数在减少。

(5) 自 1970 年以来,一些海区的超强台风比例明显增大,比目前数值模式的模拟结果要大许多。

4.2 存在的主要问题

(1) 资料的均一性,包括台风的历史数据集和相关的气候变量资料,仍是检测台风气候变化及其与全球变暖关系研究的主要障碍。

20 世纪 60 年代开始卫星观测之前,任何海域都没有完整的台风资料。目前,业务上主要根据卫星估计的台风强度与飞机探测到的强度之间仍存在很大的偏差,而在一些地区,由于缺乏飞机探测(西北太平洋始于 20 世纪 40 年代,终止于 1987 年),因此对台风强度的监测能力明显不足,而且由于各海域的探测手段和台风的定位/定强技术不尽相同,造成全球台风资料的非均一性。此外,即使在大西洋,飞机也只能探测到其中一半左右的台风。

SST、风切变等与台风活动密切相关的大气-海洋环流因子的历史资料质量,对于台风气候变化的成因分析至关重要。虽然 NCEP/NCAR 和 ECMWF 的再分析资料取得了较大进展,但是最近的研究表明,再分析资料中高层大气资料仍存在缺陷,这将直接影响到台风活动和不同的环境影响因素之间的配置关系。

(2) 有限分辨率的全球气候模式,尚不能较好地刻画出台风的精细结构(如:台风眼和云墙等),加之模式物理过程的局限性(如:辐射强迫和海洋热吸收率的敏感性、海-气耦合作用的描述、温室气体浓度的不确定性等),导致目前的模式模拟的台风不很真实。虽然高分辨率的区域气候模式在某种程度上可以解决分辨率不足的问题,但其自身也存在局限性和不确定性。例如,用于降尺度的嵌套模式与大模式相比具有不同气候态和气候敏感性,模式的兼容性严重影响到模拟和预测结果的可靠性。同时,模拟及预测结果还受所选区域范围的影响。为避免降尺度产生的问题,最好直接用 GCM 的模拟结果来统计台风信息。此外,台风活动对气候系统的潜在反馈过程无法用简单的单向嵌套方法来模拟。从而制约了气候模式对历史台风气候变化的模拟和成因检测能力,也使得基于模式的对未来台风气候变化的预测更具不确定性。

5 结 论

虽然目前尚不能证明全球变暖对台风频数有明显的影响,但是在全球变暖背景下,台风的强度及强台风频数有增加的趋势、海平面的上升、沿海地区对台风风暴潮的脆弱性增大,因而台风灾情将加重。然而,台风气候变化及其与全球变暖关系的许多方面仍不甚清楚,特别是台风气候的变化将对社会经济的各行各业产生怎样的影响及其风险防御对策

等,远没有形成共识。为了提早防范全球变暖对台风活动及社会经济带来的可能风险,有关台风气候变化的观测研究和全球变暖对台风气候影响的数值模拟预测工作仍在继续深入。

References

Barnett T P, Pierce D W, AchutaRao K M, et al. 2005. Penetration of human-induced warming into the world's oceans. Science, 309:284-287

Chan J C L. 1995. Tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation. Mon Wea Rev, 123: 2567-2571

Chan J C L, Shi J. 1996. Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific. Geophys Res Lett, 23: 2765-2767

Chan J C L, Liu K S. 2004. Global warming and Western North Pacific typhoon activity from an observational perspective. J Climate, 17: 4590-4602

Chan J C L. 2006. Comment on "changres in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment". Science, 311:1713

Cao Chu, Peng Jiayi, Yu Jinhua. 2006. An analysis on the characteristics of landfalling typhoons in China under global climate warning. J Nanjing Inst Meteor(in Chinese), 29(4): 455-461

Dutton J A. 2002. Opportunities and priorities in a new era for weather and climate services. Bull Amer Meteor Soc, 83(9): 1303-1311. Doi: 10.1175/1520-0477(2002)083<1303:OAPIAN>2.3.CO;2

Emanuel K A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. Nature, 326: 483-485

Emanuel K A. 1999. Thermodynamic control of hurricane intensity. Nature, 401: 665-669

Emanuel K A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 436: 686-688

Emanuel K. 2006. Environmental influences on tropical cyclone variability and trends. Proc. 27th AMS Conf. on Hurr. and Trop. Meteor., #4.2. Available online at: http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/107575.pdf

Goldenberg S B, Shapiro L J. 1996. Physical mechanisms for the association of El Nino and West Africa rainfall with Atlantic major hurricanes. J Clim, 9: 1169-1187

Gray W M. 1999. On the causes of multi-decadal climate change and prospects for increased Atlantic basin hurricane activity in the coming decades. Boston: Ameri Meteor Soc, 378-381

He Min, Song Wenling, Chen Xingfang. 1999. Typhoon activity in the northwest Pacific in relation to El Niño/La Nina events. J Tropical Meteor (in Chinese), 15(1):17-25

Henderson-Sellers A, Zhang H, Berz G, et al. 1998. Tropical cyclones and global climate change: A post-IPCC assessment. Bull Amer Meteor Soc, 79: 19-38

Henderson-Sellers A, Zhang H, Berz G, et al. 2006. Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. Science, 312: 94-97

Holland G J. 1997. The maximum potential intensity of tropical cyclones. J Atmos Sci, 54: 2519-2541

Horsfall F. 2000. Climatological analysis of tropical cyclogenesis in the north Atlantic and eastern north Pacific basins. 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 53-54

Hoyos C D, Agudelo P A, Webster P J. 2006. Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. Science, 312: 94-97

IPCC. 2007. A report of working group I of the intergovernmental panel on climate change: Summary for policymakers

IWTC-VI. 2006. Summary statement on tropical cyclones and climate change. San Jose, Costa Rica., http://www.wmo.int/pages/prog/arep/tmrp/tcf/IWTC-VI. htmlKamahori H, Yamazaki N, Mannoji N, et al. 2006. Variability in intense tropical cyclone days in the western North Pacific. SOLA, 2: 104-107, Doi:10.2151/sola.2006-027

Klotzbach P J. 2006. Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986—2005). Geophys Res Lett, 33: L10805, Doi:10.1029/2006GL025881

Knaff J A, Sampson C R. 2006. Reanalysis of West Pacific tropical cyclone intensity 1966—1987. Proceedings of 27th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, #5B.5. Available online at: http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/108298.pdf

Knutson T R, Tuleya R E, Kurihara Y. 1998. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. Science, 279:1018-1020

Knutson T R, Tuleya R E. 1999. Increased hurricane intensities with CO_2-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system. Clim Dyn, 15(7): 503-519

Knutson T R, Tuleya R E, Shen. 2001. Impact of CO_2-induced warming on hurricane intensities as simulated in a hurricane model with ocean coupling. J Clim, 14: 2458-2468

Knutson T R, Tuleya R E. 2004. Impact of CO_2-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. J Clim, 17: 3477-3495

Knutson T. 2006. Possible relationships between climate change and tropical cyclone activity. Workshop Topic Reports Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (TMRP 72), 464-492

Kossin J P, Knapp K R, Vimont D J, et al. 2007. A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. Geophys Res Lett, 34: 4815-4820

Lander M A. 2000. The tropical cyclone distribution in the western North Pacific during the El Nino-La Nina swing of 1997—1999: Extraordinary interannual changes. Florida: Amer Meteor Soc, 179-180

Landsea C, Holland G, Lighthill J, et al. 1998. Tropical cyclones and global climate change: A post-IPCC assessment. Bull Amer Meteor Soc, 79: 19-38

Landsea C W, Anderson C, Charles N, et al. 2004. The Atlantic hurricane database re-analysis project: Documentation for the 1851—1910 alterations and additions to the HURDAT database //Murname R J, Liu K B. Hurricanes and Typhoons: Past, Present and Future. Columbia University Press, 177-221

Landsea C W. 2005. Hurricanes and global warming. Nature, 438:

Doi:10.1038/nature04477

Landsea C W, Harper B A, Hoarau K, et al. 2006. Can we detect trends in extreme tropical cyclones? Science, 313: 452-454

Lei Xiaotu. 2001. The precision analysis of the best positioning on WNP TC. J Tropical Meteor (in Chinese), 17(1): 65-70

Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China. J Tropical Meteor (in Chinese), 20(1): 14-23

Lin HuiJuan, Zhang Yaocun. 2004. Climatic features of the tropical cyclone influencing China and its relationship with the sea surface temperature in the pacific ocean. J Tropical Meteor (in Chinese), 20(2): 218-224

Liu K B, Fearn M L. 1993. Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama. Geology, 21: 793-796

Liu K B, Fearn M L. 2000. Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediment records. Quaternary Res, 54: 238-245

Ma Liping, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2006. On the characteristics of correlation between global tropical cyclone activities and global climate change. J Tropical Meteor (in Chinese), 22(2): 147-154

Mann M, Emanuel K. 2006. Atlantic hurricane trends linked to climate change. EOS, 87: 233-241

Ren F M, Wu G. X, Dong W J, et al. 2006. Changes in tropical cyclone precipitation over China. Geophys Res Lett, 33: L20702, Doi:10.1029/2006GL027951

Sriver R, Huber M. 2006. Low frequency variability in globally integrated tropical cyclone power dissipation. Geophys Res Lett, 33: L11705, Doi: 10.1029/2006GL026167

Walsh K J E, Katzfey J J. 2000. The impact of climate change on the poleward movement of tropical cyclone-like vortices in a regional climate model. J Clim, 13(6): 1116-1132. Doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1116:TIOCCO>2.0.CO;2

Walsh K J E, Nguyen K C, McGregor J L. 2004. Fine-resolution regional climate model simulations of the impact of climate change on tropical cyclones near Australia. Clim Dyn, 22: 47-56

Wang Ling, Luo Yong, Xu Liangyan, et al. 2006. Review of typhoon and its related natural disasters over the past 35 years in China. Sci Techn Rev (in Chinese), 24(11): 23-25

Wang Xiaolin, Wang Yunmei, Ren Fumin, et al. 2006. Interdecadal variations in frequencies of typhoon affecting China during 1951—2004. Adv Clim Change Res (in Chinese), 2(3): 135-138

Wang Xiuping, Zhang Yongming. 2006. Interdecadal change of the landing tropical cyclone tracks over China. J Dalian Maritime University (in Chinese), 32(3): 41-45

Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, 309: 1844-1846

Wu Disheng, Bai Yiping, Zhang Hongmei, et al. 2003. The influence of variation of subsurface ocean temperature in the equatorial western Pacific warm pool on tropical cyclones. J Tropical Meteor (in Chinese), 19(3): 253-259

Wu L, Wang B. 2004. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks. J Clim, 17: 1686-1698

Wu L, Wang B, Geng S. 2005. Growing typhoon influence on east Asia. Geophys Res Lett, 32: L18703, Doi: 10.1029/2005GL022937

Wu L G., Wang B, Scott A B. 2007. Implications of tropical cyclone power dissipation index. Int J Climatol (in press), Published online in Wiley Inter Science (www.interscience.wiley.com) Doi: 10.1002/joc.1573

Xu Guodong Fan Daidu, Liu Kambiu. 2007. Advances in the study of paleotempestology. Adv Earth Sci (in Chinese), 22(12): 1274-1280

Ye Ying, Dong Bo. 2002. Interdecadal change analysis of the landing tropical cyclone over China. Marine Foreca, 19(2): 23-30

Yu Hui, Hu Chunmei, Jiang Leyi. 2006. Comparison of three tropical cyclone strength datasets. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 64(3): 357-363

Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2003. The interannual and interdecadal variations of east Asian summer cirvulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 27(1): 97-105

附中文参考文献

曹楚,彭加毅,余锦华. 2006. 全球气候变暖背景下登陆我国台风特征的分析. 南京气象学院学报, 29(4):455-461

何敏,宋文玲,陈兴芳. 1999. 厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件与西北太平洋台风活动. 热带气象学报,15(1): 17-25

雷小途. 2001. 西北太平洋热带气旋最佳定位的精度分析. 热带气象学报, 17(1): 65-70

李英,陈联寿,张胜军. 2004. 登陆中国热带气旋的统计特征. 热带气象学报, 20(1):14-23

林惠娟,张耀存. 2004. 影响我国热带气旋活动的气候特征及其太平洋海温的关系. 热带气象学报, 20(2): 218-224

马丽萍,陈联寿,徐祥德. 2006. 全球气候变化和全球热带气旋相关特征. 热带气象学报,22 (2):147-154

王凌,罗勇,徐良炎等. 2006. 近35年登陆我国台风的年际变化特征及灾害特点. 科学导报, 24(11): 23-25

王小玲,王咏梅,任福民等. 2006. 影响中国的台风频数年代际变化趋势:1951—2004年. 气候变化研究进展, 2(3):135-138

王秀萍,张永宁. 2006. 登陆中国热带气旋路径的年代际变化. 大连海事大学学报, 32(3):41-45

吴迪生,白毅平,张红梅. 2003. 赤道西太平洋暖池次表层水温变化对热带气旋的影响. 热带气象学报, 19(3): 253-259

徐过冬,范代读, Liu Kam-biu. 2007. 古风暴学研究进展. 地球科学进展, 22(12): 1274-1280

叶英,董波. 2002. 登陆中国热带气旋活动的年代际变化分析. 海洋预报,19(2):23-30

余晖,胡春梅,蒋乐贻. 2006. 热带气旋强度资料的差异性分析. 气象学报, 64(3):357-363

张庆云,彭京备. 2003. 夏季东亚环流有年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. 大气科学,27(1): 97-105