

DEMETER 耦合气候模式对西北太平洋台风活动及其影响因子的预测效能

孙建奇^①, 陈活泼^{①②}

① 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

2011-03-16 收稿, 2011-06-16 接受

公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906018)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q03-3)、国家重点基础研究发展计划(2009CB421406)和中挪国际合作项目(East-Asia DecCen)资助

摘要 利用耦合气候模式实现一步法预测是气候预测的重要发展方向之一. 该研究基于欧洲多模式短期气候集合预测计划(DEMETER)6个耦合气候模式1974~2001年回报试验结果, 首先探讨了耦合气候模式对夏季(6~10月)西北太平洋台风发生密切相关的6个主要气候因子的预测性能, 在此基础上, 利用这6个气候因子与台风发生频次的统计关系, 研究了耦合气候模式对西北太平洋台风频次变化的预测技巧. 结果显示, DEMETER 6个耦合气候模式可以较好地预测影响台风频次的主要气候因子及台风频次本身的变化特征. 进一步的对比研究发现, 这种统计降尺度与耦合模式相结合的预测方法明显好于耦合气候模式的直接预测效能. 此外, 多模式集合平均表现出最优的预测性能. 可见, 采用多模式集合与统计降尺度相结合的预测方法可以大大提升耦合气候模式的预测技巧, 它将成为未来台风预测的重要方向.

关键词

台风预测
耦合气候模式
统计降尺度
集合预测
DEMETER

台风是西北太平洋地区最为重要的一种高影响极端天气, 它的发生常常伴随大风和强降水, 对于当地航海业和人民的生命财产安全具有重要影响. 因此, 一直以来, 关于台风的研究是气象领域一项重要的热点课题. 过去几十年, 国内外很多学者对于西北太平洋台风的变化规律及其影响因子开展了大量工作. 这些研究结果显示, 台风活动的年际变化比较复杂, 受到诸多因子的影响. 在西北太平洋地区, 局地的海温条件、对流状况、风切变幅度、赤道辐合带位置和强弱等都对台风的发生频次、强度和位置具有直接影响^[1-8]. 在更大尺度上, 像 ENSO 事件^[9-14]、大气准两年振荡^[15,16]、大气季节内振荡^[17,18]、南极涛动^[19,20]、北太平洋涛动^[21]、北太平洋海冰变化^[22]、春季 Hadley 环流^[23]、亚洲-太平洋涛动^[24,25]等, 都可以通过影响西北太平洋地区局地环流和海洋状况的

方式, 对台风活动产生间接的影响. 这些前期富有成效的研究工作, 王会军等人^[26]在一篇综述性文章中作了系统的回顾和总结.

依据影响西北太平洋台风活动影响因子的不同, 发展出两种台风活动异常的预测方法. 一种为统计预测方法, 这种方法主要是利用对西北太平洋台风活动有显著间接影响的前期大尺度海洋、大气环流系统, 建立预测模型, 开展预测工作^[27-30]. 近几年西北太平洋台风预测的结果显示, 统计预测模型表现出了良好的预测技巧. 然而, 众所周知, 具有间接关系的两个气候系统之间的关系可能存在不稳定性^[31,32], 即某些时段两者关系密切, 某些时段两者关系微弱, 因此统计气候预测模型存在的一个潜在风险就是利用之前统计关系建立起来的预测模型, 在后期的预测中可能会失效^[33]. 为了克服统计气候预测的这一

缺点,随着计算机技术和数值气候模式的发展,出现第二种预测方法,即利用气候模式开展的动力预测方法.这一方法主要是利用与台风发生具有最直接影响关系的因子来开展预测工作,其优点在于预测因子与预测量之间的关系是稳定的.这是近些年关于台风预测的一个新的发展方向.目前有欧洲中期气候预报中心、美国国际气候与社会研究所和中国科学院大气物理研究所等少数几家机构开展针对西北太平洋台风异常的系统动力实时预测^[5,34].他们的预测方案有海-气分离的两步法预测和海气耦合模式的一步法预测;预测方法有利用客观判断法鉴别动力预测系统中气旋性环流的直接预测方法和利用预测与台风活动密切相关的大尺度环流因子的间接方法.由于第一种方法是在气候模式中直接鉴别台风系统^[35,36],这对模式的分辨率具有较高要求,而目前来说大多数全球气候模式的分辨率还相对较低,这在很大程度上限制了这些耦合气候模式对于台风的鉴别和预测能力.第二种方法相对来说具有更好的普适性,各种分辨率的气候模式都可以尝试开展预测工作,但是这种方法的预测准确率的高低直接取决于气候模式对于西北太平洋地区大尺度环流系统的模拟效能.一些研究针对应用两步法开展预测的模式作了系统的评估工作,发现采用两步法的气候模式对西北太平洋地区的台风活动具有一定的模拟和预测技巧^[7].然而,利用耦合气候模式的一步法对于西北太平洋台风相关的大尺度环流预测能力如何?耦合模式是否具备对该地台风生成频次变化的模拟能力?这些问题,到目前为止涉及尚少.因此,本文将分析多个耦合气候模式对西北太平洋大尺度环流场的预测性能,探讨耦合气候模式对该地台风异常的预测能力,进一步从方法上研究集合模拟的优越性.

1 模式和资料介绍

用于本文分析的耦合气候模式回报试验结果来自于欧洲多模式短期气候集合预测计划(DEMETER)^[37].该计划包含7个耦合气候模式,分别来自于 CERFACS (European Centre for Research and Advanced Training in Scientific Computation, France), ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts), INGV (Istituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia, Italy), LODYC (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et

de Climatologie, France), CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France, France), UKMO (Met Office, UK) 和 MPI (Max-Planck Institut für Meteorologie, Germany), 这些模式均在同一平台相同条件下运行和诊断,计划目标为通过对7个耦合气候模式回报试验的分析,进一步改进对多模式集合预测的认识. DEMETER 回报试验分别从每年2, 5, 8和11月的1日开始,连续积分6个月,每个积分为9个不同初始场的集合.这7个耦合气候模式中,有6个模式共同的积分时段为1974~2001年.综合考虑集合研究的模式个数问题和台风观测资料在20世纪70年代中期之前的精确性问题^[38,39],本文选择1974~2001年作为分析时段.因为西北太平洋台风季节主要集中在每年的6~10月份,因此我们选择5月1日开始的回报试验作为分析对象,也即考察耦合模式提前一个月对夏季(6~10月)台风活动的预测性能,这对于现代台风预测业务具有一定的参考价值.

为了考察耦合模式的模拟性能,大气动力和热力场资料选取欧洲中期天气预报中心再分析资料(ERA-40)^[40],分析变量有风场、表面气压场、水汽场、散度、涡度和气温场.台风资料来自于美国联合台风监测中心的西北太平洋热带气旋资料(100°E~170°W, 0°~55°N),热带气旋按照最大风速标准一般可分为热带低压、热带风暴和台风.本研究所讨论的台风有别于传统的台风定义,为热带风暴和台风的总和,即最大风速大于17.2 m/s的热带气旋.

2 影响西北太平洋台风生成的局地气候因子

众所周知,影响台风的气候因子很多,但是与台风生成具有最直接关系的气候因子主要集中在热带太平洋局地区域.如图1所示,当台风多发时,低纬度北太平洋对流层低层会出现异常低压系统、大气正涡度和水汽增加、高层出现显著的辐散异常,台风主要爆发区高低空纬向风切变幅度减小,与此同时,海表温度表现出东高-西低的偶极分布模态(因为DEMETER资料里面没有提供海表温度资料,本文中都用表面气温来代替海表温度资料),这些气候因子共同作用,为台风的生成和发展提供了有利的动力、热力和水汽条件.关于这些气候因子对于台风生成和发展影响的物理过程已在引言的多篇文献中被揭示和研究,我们不再作细致分析.

这里我们主要是想考察这些气候因子对台风生

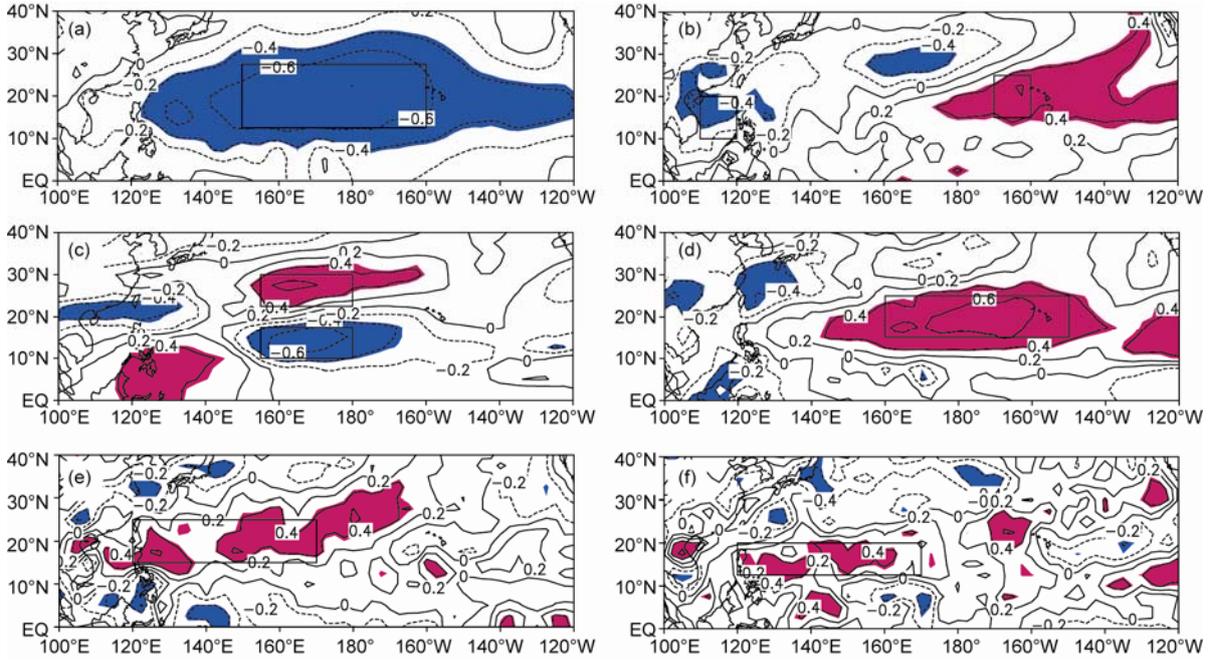


图1 观测西北太平洋夏季台风发生频次与观测表面气压场(a), 表面气温场(b), 200与850 hPa 纬向风切变幅度场(c), 850 hPa 绝对湿度场(d), 850 hPa 涡度场(e)和 200 hPa 散度场(f)的相关系数分布

红色(蓝色)阴影区表示正(负)相关系数通过 95%显著性的区域. 方框表示每个变量与台风活动联系最密切的关键区

成频次定量的影响程度, 为后面评估耦合气候模式的预测性能奠定基础. 为此, 选择图 1 中各变量与台风活动异常高度相关的关键区区域平均值作为指数, 进一步定量考察这些影响因子与台风频次的关系. 值得指出的是, 对于图中含有正负关键区的变量, 其指数定义为负关键区平均的指数与正关键区平均的指数之差. 6 个指数平均的关键区分别为: 表面气压指数 (12.5°~27.5°N, 150°E~160°W)、海表温度指数 (10°~20°N, 110°~120°E; 15°~25°N, 170°~160°W)、200 hPa 和 850 hPa 纬向风切变幅度指数 (10°~17.5°N, 155°E~180°; 22.5°~30°N, 155°E~180°)、850 hPa 绝对湿度指数 (15°~25°N, 160°E~150°W)、850 hPa 涡度指数 (15°~25°N, 120°~170°E) 和 200 hPa 散度指数 (12.5°~20°N, 120°~170°E). 表 1 为 6 个变量指数与台风发生频次的相关系数表, 可以看到这 6 个指数都与西北太平洋台风频次指数表现出很好的相关关系, 6 个指数中相关最小的也有 0.61, 最大的可以达到 -0.76, 相关系数均超过 99%的显著性检验. 为了定量研究这 6 个变量对西北太平洋台风发生频次异常的解释程度, 我们利用这 6 个变量指数, 采用多元线性回归方法对台风频次的变化进行拟合, 拟合方程

如下:

$$y = -1.45x_1 - 1.02x_2 - 0.90x_3 + 0.82x_4 - 1.59x_5 + 1.86x_6 + 20.07, \quad (1)$$

其中, y 表示拟合的台风频次, x_1 到 x_6 分别代表标准化的表面气压指数、海表温度指数、200 和 850 hPa 纬向风切变幅度指数、850 hPa 绝对湿度指数、850 hPa 涡度指数和 200 hPa 散度指数.

图 2 为观测和利用这 6 个指数拟合的西北太平洋台风发生频次指数. 互相对照可以发现, 该多元线性回归方程很好地表征了西北太平洋台风发生频次异常与这 6 个气候因子之间的定量关系. 拟合与观测台风发生频次变化非常一致, 两者的相关系数可以达到 0.88, 远超过了 99%的显著性检验. 拟合的台风

表 1 6 个观测气候因子指数与观测西北太平洋台风发生频次的相关系数^{a)}

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
相关系数	-0.76*	-0.68*	-0.72*	0.70*	0.61*	0.63*

a) x_1 ~ x_6 分别代表表面气压、海表温度、高低层纬向风切变、850 hPa 绝对湿度、850 hPa 涡度和 200 hPa 散度指数. *表示信度超过 99%的显著性

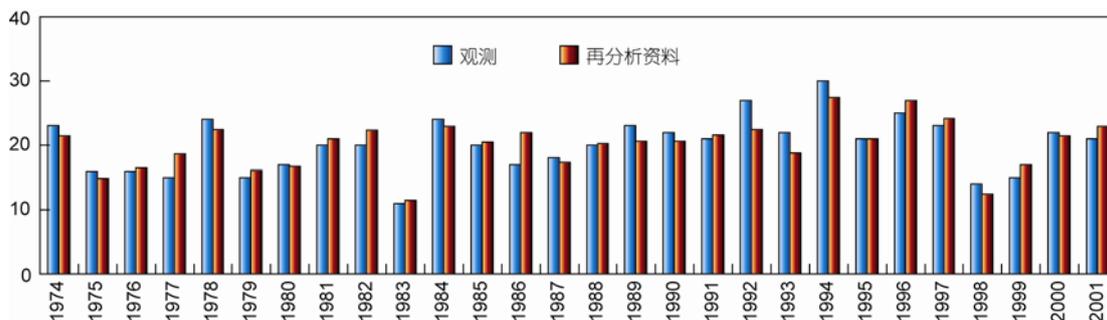


图2 观测的西北太平洋台风发生频次和利用观测的6个主要气候因子拟合的台风频次

发生频次相对于观测结果的均方根误差为 2.0. 可见, 这 6 个指数之间的线性组合就可以解释 77% 以上的台风发生频次变化, 而且拟合误差还可以保持在一个较低的水平上.

3 耦合气候模式对西北太平洋台风影响因子的预测效能

由第 2 节的分析可以看出, 利用表面气压、低层涡度和湿度、高低层纬向风切变、高层辐散度和海表温度 6 个变量就可以很好地解释西北太平洋台风发生频次异常的变化. 那么 DEMETER 多个耦合气候模式对这 6 个重要气候因子的预测能力如何呢? 这个问题直接关系到耦合气候模式对西北太平洋台风发生频次异常的预测效能.

表 2 为采用相同定义方式从各模式提取的 6 个气候因子指数与 ERA-40 资料中 6 个气候因子指数的相关系数表. 让人欣慰的是, 经过多年耦合气候模式的发展和预测方法的改进, 现在的耦合气候模式对热带地区与西北太平洋台风发生频次异常高度相关的 6 个主要气候因子指数已具备相当的模拟能力. 如表 2 的 1~3 列所示, 耦合气候模式对于表面气压指数、海表温度指数和纬向风切变幅度指数模拟的非常好, 模拟与观测的相关系数都在 0.58 以上, 最大的相关可以达到 0.85, 所有的相关系数均超过 99% 的显著性检验. 相对而言, 模式对于涡度、散度和湿度的模拟能力要低一些, 这主要是由于像散度、涡度和水汽这些气候因子变化的空间尺度相对环流场要小很多, 而且其变化也更为复杂一些, 这对于耦合气候模式来说模拟起来就会更困难. 但是总的来说这 6 个模式对散度、涡度和水汽这 3 个变量的预测能力还是较好的, 除了第 5 个模式对于散度的预测没有达到 90% 显

表 2 6 个耦合气候模式及其集合平均预测的 6 个影响西北太平洋台风发生频次的主要气候因子指数与观测因子指数的相关系数^{a)}

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
模式 1 (ECMWF)	0.58***	0.80***	0.61***	0.42**	0.53***	0.45**
模式 2 (INGV)	0.68***	0.66***	0.63***	0.37**	0.54***	0.38**
模式 3 (LODYC)	0.60***	0.83***	0.60***	0.45**	0.50***	0.58***
模式 4 (CNRM)	0.73***	0.85***	0.65***	0.51***	0.73***	0.38**
模式 5 (MPI)	0.64***	0.65***	0.62***	0.54***	0.33	0.28
模式 6 (UKMO)	0.72***	0.74***	0.78***	0.60***	0.60***	0.51***
集合平均	0.74***	0.84***	0.76***	0.59***	0.69***	0.69***

a) x_1 ~ x_6 分别代表表面气压、海表温度、高低层纬向风切变、850 hPa 绝对湿度、850 hPa 涡度和 200 hPa 散度指数. ***, **, * 分别表示信度超过 99%, 95%, 90% 的显著性检验

著性检验外, 其他模式的所有预测结果与观测的相关性都是显著的.

在利用数值模式进行模拟研究中, 一个很重要的减小单个模式模拟不确定性的方法就是开展多成员、多模式的集合研究. 上述每个模式的分析结果都是 9 个成员的集合结果, 进一步我们再对这 6 个模式进行多模式集合, 此处的集合是 6 个模式等权重的算术平均. 集合平均的结果显示(表 2), 耦合气候模式对这 6 个气候因子的综合预测效能进一步增强. 6 个因子中相关系数最小值可以达到 0.59, 最大的可以达到 0.84, 这大大降低了个别模式对于某些因子模拟较差带来的风险.

4 耦合气候模式对西北太平洋台风发生频次的预测效能

上节分析显示, DEMETER 耦合气候模式对于影响西北太平洋台风发生异常的 6 个气候因子具有较

好的预测性能. 那么进一步, 这些耦合气候模式能否再现观测中台风发生频次与这些气候因子的综合影响关系呢? 为此, 将公式(1)中观测资料的6个因子指数换成各耦合气候模式预测的因子指数, 保持公式(1)中各因子的系数不变, 来考察耦合气候模式对西北太平洋台风发生频次异常的预测效能. 由于在该预测模型中, 每个模式相同因子的系数都是一样的, 都来自于观测资料, 所以每个模式的预测结果都相当于独立样本检验, 各模式预测结果之间也就具备客观的可比性.

由表3可以看出, 不同模式对西北太平洋台风发生频次的预测效能有所不同. 预测与实测台风发生频次的相关系数最小为 0.54, 最大为 0.64; 均方根误差最小为 3.3, 最大为 4.0. 这6个耦合气候模式预测的台风指数和实测的相关系数都超过 99%的显著性检验. 图3给出了预测和观测台风频次的年际变化曲线, 可以看到模式可以较好地预测台风的发生频数变化, 像1983, 1998和1999这些台风偏少年, 这些耦合气候模式都可以较好地模拟. 相对而言, 多模式集合结果的预测效能最好, 预测和观测的台风频次相关系数可以达到 0.68, 而均方根误差可以降到 3.1. 可见, 这6个耦合气候模式已具备对西北太平洋台风发生频次变化较好的预测效能, 尤其是多模式集合的预测方法更能提升耦合气候模式的预测性能.

5 小结

利用 DEMETER 6个耦合气候模式 1974~2001年

的回报试验结果, 本文考察了耦合气候模式对影响西北太平洋台风活动 6个主要气候因子的预测能力, 结果显示这6个耦合气候模式都表现出了令人鼓舞的预测性能, 尤其是对大尺度环流场和海温场的模拟效能更好. 进一步, 本文考察了这些耦合气候模式对西北太平洋台风发生频次异常的预测能力, 结果显示经过统计降尺度后这些耦合气候模式对台风频次的变化都表现出了较好的预测效能, 尤其是6个耦合模式集合平均的结果预测性能最佳. Vitart^[36]也曾利用 DEMETER 资料, 但是采用客观判断热带气旋的方式, 研究了多个耦合气候模式对于西北太平洋台风的预测能力. 他的研究结果显示只有3个模式预测的台风频次与观测值的相关系数可以超过显著性. 而本文发展的统计降尺度与耦合模式预测相结合的方法, 可以大大增强耦合气候模式的预测性能, 使得所有6个耦合气候模式的预测结果都超过 99%的显著性.

为了便于多个耦合气候模式的客观比较, 本文从观测资料出发, 采用统一的指数定义和降尺度方法模型, 来检测这些耦合气候模式对西北太平洋台风发生频次及其影响因子的预测性能. 然而, 事实上不同模式对于这些气候因子和台风发生频次的模拟效能都存在差异, 比如模拟的显著区域相对观测结果可能会有所偏移, 模式对某些因子模拟的好, 另外一些因子模拟的不好等. 所以, 实际预测业务中, 不同预测机构需要根据自身模式的特点将作出最优组合, 耦合气候模式的预测能力相对于本文统一定义

表3 6个耦合气候模式及其集合平均预测的西北太平洋台风发生频次与观测频次的相关系数和均方根误差^{a)}

	模式 1 (ECMWF)	模式 2 (INGV)	模式 3 (LODYC)	模式 4 (CNRM)	模式 5 (MPI)	模式 6 (UKMO)	集合平均
相关系数	0.54 [*]	0.54 [*]	0.63 [*]	0.59 [*]	0.64 [*]	0.61 [*]	0.68 [*]
均方根误差	4.0	3.6	3.5	3.4	3.3	3.7	3.1

a) *表示信度超过 99%的显著性检验

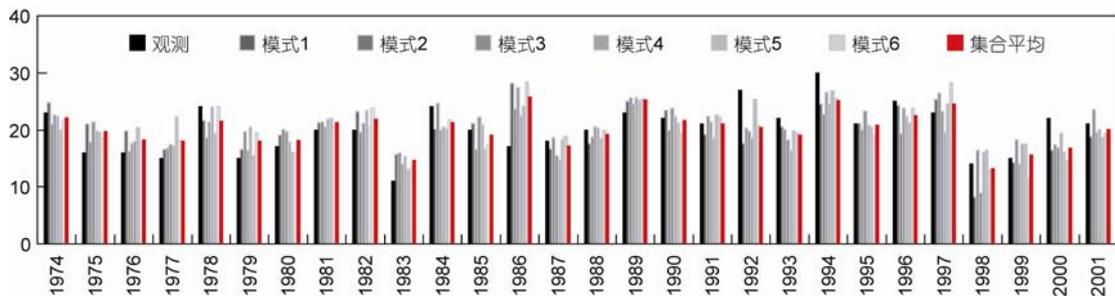


图3 观测西北太平洋台风发生频次和6个耦合气候模式及其集合平均预测的台风频次

的方法还会有一定的提升空间.

提取耦合气候模式最好的模拟信息开展预测, 可以大大提升耦合气候模式的预测效能^[41]. 本文发展的将耦合气候模式与统计降尺度相结合的方法,

是提升台风预测的一个重要方案. 利用该方法, 更多的耦合气候模式可以被用于台风的预测, 这对于尽早实现台风预测的超级集合, 进而提高台风动力预测效能大有裨益.

参考文献

- 1 Gray W M. Global view of the origin of topical disturbance and storms. *Mon Weather Rev*, 1968, 96: 669–700
- 2 丁一汇, 范惠君, 薛秋芳, 等. 热带辐合区中多台风同时发展的初步研究. *大气科学*, 1977, 1: 89–98
- 3 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 491
- 4 丁一汇, 莱特 E R. 影响西太平洋台风形成的大尺度环流条件. *海洋学报*, 1983, 5: 561–574
- 5 王会军, 郎咸梅, 范可, 等. 关于 2006 年西太平洋台风活动频次的气候预测试验. *气候与环境研究*, 2006, 11: 133–137
- 6 Yuan J N, Wang D X, Wang Q L, et al. A 28-year climatological analysis of size parameters for northwestern Pacific tropical cyclones. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 24–34
- 7 郎咸梅, 王会军. 利用气候模式能够预测西北太平洋台风活动的气候背景吗? *科学通报*, 2008, 53: 1702–1708
- 8 Chen G H, Huang R H. Influence of monsoon over the warm pool on interannual variation on tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 319–328
- 9 Chan J C L. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon. *Mon Weather Rev*, 1985, 113: 599–606
- 10 李崇银. 厄尔尼诺与西太平洋台风活动. *科学通报*, 1985, 30: 1087–1089
- 11 Lander M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO. *Mon Weather Rev*, 1994, 122: 636–651
- 12 何敏, 宋文玲, 陈兴芳. 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*, 1999, 15: 17–25
- 13 Wang B, Chan J C L. How does ENSO regulate tropical storm activity over the western North Pacific? *J Clim*, 2002, 15: 1643–1658
- 14 Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J Clim*, 2005, 18: 2996–3006
- 15 Gray W M. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 hPa quasi-biennial oscillation influences. *Mon Weather Rev*, 1984, 112: 1649–1668
- 16 Chan J C L. Tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation. *Mon Weather Rev*, 1995, 123: 2567–2571
- 17 Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation. *J Meteorol Soc Jpn*, 1994, 72: 401–411
- 18 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 大气季节内震荡对印度洋-西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响. *气象学报*, 2004, 62: 42–51
- 19 王会军, 范可. 西太平洋台风生成频次与南极涛动的关系. *科学通报*, 2006, 51: 2910–2914
- 20 Ho C H, Kim J H, Kim H S, et al. Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *J Geophys Res*, 2005, 110: D19104, doi: 10.1029/2005JD005766
- 21 王会军, 孙建奇, 范可. 北太平洋涛动与台风和飓风频次的关系研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 966–973
- 22 范可. 北太平洋海冰, 一个西北太平洋台风生成频次的预测因子? *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 851–856
- 23 Zhou B T, Cui X. Hadley circulation signal in the tropical cyclone frequency over the eastern North Pacific. *J Geophys Res*, 2008, 113: D16107, doi: 10.1029/2007JD009156
- 24 周波涛, 崔绚, 赵平. 亚洲-太平洋涛动与西北太平洋热带气旋频数的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 118–123
- 25 邹燕, 赵平. 夏季亚洲-太平洋涛动与中国近海热带气旋活动的关系. *气象学报*, 2009, 67: 708–715
- 26 王会军, 范可, 孙建奇, 等. 关于西太平洋台风气候变异和预测的若干研究进展. *大气科学*, 2007, 31: 1076–1081
- 27 Chan J C L, Shi J E, Lam C M. Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over western North Pacific and the South China Sea. *Weather Forecast*, 1998, 13: 997–1003
- 28 Chan J C L, Shi J E, Liu K S. Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Weather Forecast*, 2001, 16: 491–498
- 29 范可. 西太平洋台风活动频次的新预测因子和新的预测模型研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1260–1266
- 30 Fan K, Wang H J. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific. *Weather Forecast*, 2009, 24: 974–986
- 31 Wang H J. The instability of the East Asian summer monsoon ENSO relations. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 1–11

- 32 Sun J Q, Wang H J, Yuan W. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature. *J Geophys Res*, 2008, 113: D15107, doi: 10.1029/2007JD009626
- 33 Sun J Q, Ahn B J. A GCM-Based Forecasting Model for the Landfall of Tropical Cyclones in China. *Adv Atmos Sci*, 2011, doi: 10.1007/s00376-011-0122-8
- 34 Camargo S J, Barnston A G, Klotzbach P J, et al. Seasonal tropical cyclone forecasts. *WMO Bull*, 2007, 56: 297–309
- 35 Camargo S J, Zebiak S E. Improving the detection and tracking of tropical cyclones in atmospheric general circulation models. *Weather Forecast*, 2002, 17: 1152–1162
- 36 Vitart F. Seasonal forecasting of tropical storm frequency using a multi-model ensemble. *Quart J Royal Meteorol Soc*, 2006, 132: 647–666
- 37 Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull Am Meteorol Soc*, 2004, 85: 853–872
- 38 Zou Y, Zhao P, Qiao L. A method of estimating typhoon central wind based on sea level pressure of the Typhoon Yearbook of China. *J Trop Meteor*, 2009, 16: 20–26
- 39 Zou Y, Zhao P. Comparison of some tropical cyclone datasets and correction of yearbook data. *J Trop Meteor*, 2010, 16: 109–114
- 40 Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 Reanalysis. *Quart J Royal Meteorol Soc*, 2005, 131: 2961–3012
- 41 Wang H J, Fan K. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies. *Weather Forecast*, 2009, 24: 548–554