

关于西太平洋台风气候变异和预测的若干研究进展

王会军 范可 孙建奇 郎咸梅 林美静

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 在概述近几十年来关于大气环流和海温等条件与台风活动关系方面以中国学者为主的研究之后, 重点介绍了最近关于西太平洋台风气候年际变异和预测研究的若干新的进展。主要包括: 西太平洋台风活动频次和登陆中国台风的气候年际变化特征, 以及从动力数值模式和动力统计方法两个方面如何进行台风气候的预测。关于台风气候的年际变异, 重点介绍了有关台风气候年际变异和南极涛动、北太平洋涛动、北太平洋海冰覆盖面积指数以及西太平洋暖池热状态之间的联系。关于台风气候的动力数值预测, 介绍了基于中国科学院大气物理研究所的气候模式所进行的第一个针对西太平洋台风气候的预测试验结果。本文还介绍了一个动力统计预测模型及其回报情况。

关键词 西太平洋台风 年际变异 南极涛动 北太平洋涛动 气候预测

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1076-06

中图分类号 P461

文献标识码 A

Some Advances in the Researches of the Western North Pacific Typhoon Climate Variability and Prediction

WANG Hui-Jun, FAN Ke, SUN Jian-Qi, LANG Xian-Mei, and LIN Mei-Jing

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This paper briefly reviewed the studies of the relationships between the typhoon activity and the atmospheric circulation as well as the sea surface temperature in the first part. Then the authors introduced some new research results about the interannual variability and prediction of the typhoon climate, including the frequency of typhoon genesis and landfall, as well as the typhoon climate prediction by using both the numerical climate model and the dynamical-statistical model. These researches relate the Antarctic oscillation, the North Pacific oscillation, sea ice coverage, and thermal state of the warm pool over the western Pacific. On the prediction aspect, the paper introduced the first attempt to make the seasonal prediction of the typhoon climate by use of the climate model developed at the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and a new dynamical-statistical model for the prediction of the typhoon frequency.

Key words the western North Pacific typhoon, interannual variability, Antarctic oscillation, the North Pacific oscillation, climate prediction

1 关于大气环流和海温等与台风活动关系的研究

西太平洋台风活动对我国影响很大, 尤其是登

陆台风, 除了带来丰沛的降水以外, 还经常引起严重的灾害。因此, 有关台风的天气、气候和预测研究非常重要, 我国在这方面也有着很长的研究历史。

本节重点介绍我国学者近几十年来在大气环流、海温等与台风活动的关系研究,也谈及了外国和海外学者的若干相关研究。

早期我国学者对大气环流特征与台风活动的关系进行了很多十分有创见的研究。1962年,陶诗言等^[1]就指出了夏季东亚低纬分为经向和纬向两种环流型,西太平洋台风活动次数在两种不同的环流型期间有很大的差别。其所以有如此悬殊,可以从两时期的低纬度环流特点来说明。在经向环流期间,热带太平洋上存在赤道辐合区,基本气流垂直切变较弱,高层有强烈的辐散,有利于台风的发生和发展。此外,在这两个不同的环流时期,北半球的纬向风带位置、长波系统配置、副热带高压活动及南北半球环流关系都有显著的不同。在东亚低纬度的经向环流期间,南半球(澳洲)也盛行经向环流,在澳洲附近从南半球向北半球的质量输送最强烈,而在东亚低纬盛行纬向环流期间,以上特点反之。许健民等^[2]指出夏季在西太平洋的热带地区,当对流层上层和下层同时由纬向型转变成经向型时,往往与强台风或多台风有关系。谢义炳等^[3]研究指出,北半球夏季西太平洋台风发生在赤道西风与北半球信风交界面的东端。而赤道西风由于其尺度大且稳定可视作低纬基本气流,台风发生的时间、地点及次数与低纬基本气流的位置及强度有密切的关系。谢义炳等^[4]研究还指出初冬西太平洋低纬流场分为两种流型,即浅薄的副热带高压型和深厚的副热带高压型。前者在高纬度为低西风指数,副热带急流的配置与平均情况一致,在近赤道的对流层下层有不剧烈发展的东风波,后者在高纬为西风指数型,副热带急流与平均情况反相,近赤道对流层下层有赤道西风,在赤道辐合带上有台风发生。丁一汇等^[5]进一步给出了赤道辐合带中多台风同时发生和发展的天气学模式。陈联寿^[6]研究表明了西太平洋台风活动的路径不仅受东亚副热带环流的影响,也受盛夏东亚中高纬流型的影响。他的研究表明东亚阻塞高压的形势对副热带高压的进退和台风的路径都有密切的关系。

我国的学者还揭示并强调了南半球大气环流与西太平洋台风活动的关系^[7~10],他们认为,当南半球低纬是经向环流,澳洲有冷空气爆发,南半球的越赤道气流加强,导致赤道辐合带加强,西太平洋容易生成台风。从上述的个例研究说明,西太平洋

台风发生发展和移动路径受高中低纬环流和南北半球环流相互作用的影响。

后来,我国学者与国外的科学家几乎同时开始注意到了海温的影响,如丁一汇等^[11]就不仅比较了西太平洋台风活动的频繁年和稀少年中热带和中高纬的大气环流特征的异同,还比较了海温分布的差异。近年来,大量研究都揭示了 ENSO 和大气准两年振荡(QBO)是影响西太平洋活动年际变化的主要的两个因子。他们揭示了 ENSO 与西太平洋台风活动年际变化的关系并讨论了其中的物理机制。他们的研究表明赤道东太平洋海温异常可以通过影响太平洋低纬地区的纬圈环流、赤道辐合带、海温等、对流,风切变幅度进而影响西太平洋台风的活动频次,强度,位置^[12~22]。

这些研究工作提出,当赤道东太平洋海温较正常年偏暖时,沃克环流减弱,热带西太平洋对流减弱,菲律宾以东的台风发生源地赤道辐合带减弱,西太平洋台风减少。在 El Niño 当年,西太平洋热带气旋生成位置较平均位置偏东偏南,更多的气旋在太平洋中部形成,热带气旋的生命史较长,容易出现强度较强的热带风暴。而 La Niña 年则反之。Chan 等^[23, 24]进一步分析了 El Niño 及 La Niña 发生的前一年、当年及之后对西太平洋热带气旋活动频次的不同的影响,并将 ENSO 作为一个重要因子应用于西太平洋热带气旋活动的季节预测中。QBO 是影响西太平洋台风活动的年际变化另一个因子^[25, 26],有研究表明,当平流层低层纬向风处于西风位相时,有利于西太平洋台风活动增加。

最近,陈光华和黄荣辉^[27]研究了西太平洋暖池的热状态对热带气旋活动的影响,他们发现,暖池次表层偏暖时,台风偏少,生成热带风暴的位置偏向于靠近大陆的西北侧,且以西行路径为主,因此,台风多影响我国。反之,则台风多生成于西北太平洋东南侧。另外,他们还提出,暖池热状态还会影响季风槽。

2 近几年来关于大气环流主要模态和海冰异常与台风活动关系的研究

王会军和范可^[28]研究了西北太平洋台风生成频次(TNWP)和南极涛动(AAO)的关系,AAO 指数由标准化的 40°S 和 60°S 纬向平均海平面气压之差来定义。结果发现,6~9 月南极涛动和西北太

平洋台风生成频次 (TNWP) 具有显著的反相关关系 (1949~1998 年期间年际变化的相关系数为 -0.48)。进一步分析与南极涛动的变化相联系的热带西太平洋大气环流和海温的变化后, 他们发现, 当南极涛动处于正异常位相时, 西北太平洋区纬向风的垂直切变幅度加大, 对流层低层为异常反气旋环流并且涡度异常为负值, 而高层为异常气旋环流并且涡度异常为正值, 海表温度降低, 这些变化均不利于台风生成和发展。反之, 当南极涛动处于负异常位相时则有利于台风生成和发展。有关南极涛动的近期研究进展可以参见文献^[29]。

由于 ENSO 对西太平洋台风活动有很重要的影响, 所以, 他们在这篇文章^[28]的有关分析 (例如, 组合差异分析) 中把 ENSO 年份都去掉了, 仍然可以得到上述结论。说明南极涛动确实和西太平洋台风活动有显著的关系。

最近, 王会军等^[30]又分析了北太平洋涛动 (NPO) 这一北太平洋区域的主要大气模态和西太平洋台风/热带大西洋飓风频次之间显著的联系。其结果显示, 与北太平洋涛动的变化相联系的西太平洋区和热带大西洋区的纬向风垂直切变幅度、海温等变化均与台风生成的环境条件有联系。当北太平洋涛动处于正异常位相时, 西太平洋区纬向风垂直切变幅度减小、SST 增高; 热带大西洋的情况相反。结果有利于西太平洋台风生成和发展不利于热带大西洋飓风的生成和发展。反之亦然。

实际上, 在对流层上层存在着两个大气遥相关, 一个是北太平洋-热带西太平洋大气遥相关, 另一个是北太平洋-热带大西洋大气遥相关。这样, 北太平洋涛动异常就会导致西风急流发生变化, 进而导致纬向风的变化直至纬向风垂直切变幅度的变化, 最终影响台风/飓风活动频次。

王会军等^[30]还利用挪威科学家研制的一个气候耦合模式 (BCM) 的积分结果进行了分析研究, 结果表明, 模式中北太平洋涛动变化和纬向风垂直切变幅度、SST、散度及涡度的变化均存在显著的联系, 并且和观测的结果基本吻合。因而, 这个耦合模式的结果印证了他们在观测资料中得到的结论。

当然, 有关两个半球中高纬的大气模态异常是如何引起热带西太平洋区域大气环流和海温异常的, 还需要进行更深入的研究; 利用气候模式进行

有关旨在研究物理机制的敏感性试验也是非常重要的; 同时, 也需要利用更多的耦合气候模式进行分析研究。这些都是下一步工作可以考虑的重点课题。

最近, 范可^[31]研究了北太平洋海冰面积与西北太平洋台风生成频次的关系。研究表明, 冬季 (前一年 12 月至当年 1 月、2 月) 和春季 (当年 3、4、5 月) 北太平洋海冰面积指数与全年的西北太平洋台风活动频次在 1965~2004 年中有显著的反相关关系, 相关系数分别为 -0.42 和 -0.49 (显著性水平达到 99% 以上)。冬、春季北太平洋海冰面积越大, 西北太平洋台风生成频次减少。反之亦然。

文章^[31]提出, 春季北太平洋海冰有可能通过北太平洋涛动及大气遥相关而影响到春季的热带太平洋环流。通过分析春季北太平洋高纬格点 (65°N , 170°E) 的海平面气压与春季全球 200 hPa 的纬向风相关系数分布场, 展示了从北极到热带太平洋地区有显著的正、负相间的异常结构, 这就反映了北太平洋高纬到热带的大气遥相关分布。这也表明, 春季北太平洋高纬格点 (65°N , 170°E) 的海平面气压正异常, 对应同期热带太平洋上的高层东风异常。由于热带太平洋环流从春季到 6~10 月有很好的季节持续性, 进而有利于西北太平洋台风的在 6~10 月生成和发展。

文章^[31]还分析了海冰面积指数处于正异常和负异常组合的春季海温和 6~10 月海温的差值场。其结果是, 春季负的海温异常在赤道太平洋 140°E 以东的地区和阿留申群岛地区; 而在 6~10 月, 海温分布特征与春季相似, 只是阿留申群岛的海温负异常减弱。由此可知, 与春季北太平洋海冰面积相关的海温分布从春季到 6~10 月也有很好的季节持续性。海温的差异分布与丁一汇等 (1983)^[11]的研究一致, 他们注意到赤道中东太平洋和北美西岸的负海温距平将不利于西北太平洋热带气旋活动。由于赤道中太平洋冷的海温抑制了 140°E 以东的对流活动, 在赤道太平洋两侧出现了一对反气旋的环流异常。同时, 在 850 hPa 的散度差异场上, 热带西太平洋地区是显著的辐散区。因此, 赤道中太平洋海温的负异常及相关的热力条件将导致西北太平洋台风生成数减少。

3 最近关于台风活动气候预测的研究

2006 年初, 王会军等^[32]提出并首次进行了利

用气候数值模式进行台风活动气候预测试验。其基本思路是: 海洋表面和上层水温、大气对流条件、辐散辐合条件、风的垂直切变幅度等等是影响热带气旋、热带风暴、台风、飓风生成和发展的主要环境条件。所以, 利用气候数值模式预测这些气候条件就有可能展望台风生成和发展的宏观形势, 进而展望台风生成频数的大趋势。

王会军等^[32]的预测试验利用了中国科学院大气物理研究所的大气环流模式, 并结合热带太平洋海洋环流与大气环流模式的耦合模式 (IAP-TOGA) 来完成的。他们采用了“两步法”的预测思路, 即, 先预测海洋表面温度, 然后强迫大气模式, 预测大气环流的各有关变量。初始场采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 实测大气分析资料, 然后将其插值到模式网格点上。海洋温度的边界条件是实测和预测结果的结合: 在热带太平洋地区考虑实测海表温度距平和 IAP-TOGA 预测的海表温度距平的线性组合, 随着积分过程中线性组合系数的变化, 前 (后) 者的作用线性减小 (增大); 在太平洋以外地区, 考虑到海洋温度变化的持续性, 在积分过程中保持初始实测海表温度距平不变。由 2006 年 2 月 22~28 日分别积分至 10 月底。最后取 7 个单个积分的算术平均作为集合平均预报结果。

王会军等^[32]的预测结果表明, 2006 年的夏季西太平洋区台风生成的几个重要的大气环境条件都将不利于台风的生成和发展。以此分析, 2006 年的台风生成频次可能较常年偏少一些。当然, 他们也注意到, 台风的生成是一个非常复杂的问题, 他们预测的热带西太平洋的 SST 距平值比较小, 难以据此分析是否有利于台风生成和发展。而西太平洋的 SST 预测的技巧也比热带东太平洋 SST 的预测技巧要低一些, 这是一个重要的不确定性因素。此外, 台风生成还有很多其它的影响因素, 非常复杂。但是, 实际的 2006 年西太平洋台风生成数与预测的结果基本吻合。

这一工作是台风频次气候预测的一个初步的尝试, 但确实是一个有价值的试验。最近, 郎咸梅等开始通过气候模式来研究与西太平洋台风活动有关的气候变量的可预测性问题 (私人通讯), 并进行了大量的回报试验。必须指出, 未来还需要对有关台风生成频次的气候环境条件进行更深入和系统性的分析研究, 以便进一步形成台风频次气候预测的

初步理论框架和预测方法。当然, 还要结合动力统计预测方法, 以便做出更准确的预测。

实际上, 动力统计预测方法在台风活动预测中始终是很重要的。最近, 范可^[33]根据近年来提出的一些新的台风活动影响因子, 特别是前文提到的北太平洋涛动、北太平洋海冰覆盖面积等, 利用多元线性回归方法研究建立了一个具有较高预测效能的新的动力统计预测模型。其预测模型所用的预测因子包括: X1: 春季的北太平洋涛动 NPO; X2: 850 hPa 冬季西北太平洋低纬位势高度; X3: 850 hPa 的冬季北太平洋高纬位势高度; X4: 1000 hPa 的冬季低纬温度; X5: 冬季 Niño3.4 指数; X6: 冬季北太平洋海冰指数; X7: 春季北太平洋海冰指数; X8: 春季 850 hPa 低纬西北太平洋的涡度; X9: 春季低纬西北太平洋的风垂直切变幅度。

预测模型的建立应用了 1965~1999 年的资料, 模型与实际台风数的拟合相关系数达到了 0.79。利用这个预测模型回报了 2000~2006 年逐年的台风数。这 7 年的台风实际生成数是 15、20、16、17、21、16、15 个。台风在 1965~1999 平均数是 17 个, 均方差是 3.95。这样, 2000~2006 年中, 除了 2001 年 20 个, 2004 年 21 个, 属于正常偏多, 其它年份基本上都属于台风数正常年。模型预测台风数分别是 15.7、16.6、17.7、16.6、19.7、19、17.6 个。其中 2001 年误差最大, 少报台风数 3.4 个, 2004 年比实际少报了 1.3 个, 2006 年多报了 1.6 个台风, 其它的年份的误差都是正、负两个台风数。因此, 模型显示出了较好的预测效能, 预测误差较小。此外, 预测模型在 2000~2006 年预测台风数走势与实际基本一致。

这些预测方法均有望在台风气候跨季节预测中予以应用, 并得到较好的预报效果。

4 结语和展望

西太平洋台风活动年际变化及其预测研究是一个具有重要科学意义和巨大实际价值的课题。近年来, 也有人注意到了台风/飓风活动的年代际变化问题^[34, 35]。依作者浅见, 未来的研究应该着重以下几个方面:

(1) 如何综合地考虑影响台风活动的各种大气环流、海洋以及陆面过程等条件, 来理解台风活动气候年际变异的规律和进行更有效的台风活动气候

预测。

(2) 台风登陆的年际变异规律和台风路径的气候变异规律。

(3) 耦合气候系统模式中西太平洋大气环流和海洋条件与全球大气环流的主要模态的关系。

(4) 基于高分辨率的全球气候模式或者嵌套模式的台风活动预测研究, 以及动力数值预测方法和动力统计预测方法的结合研究。

(5) 全球变暖背景下西太平洋台风活动及其登陆特征的变化方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. 气象学报, 1962, **32** (1): 91~103
Tao Shiyang, Xu Shuying, Guo Qiyun. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32** (1): 91~103
- [2] 许建民, 谷美荣. 北半球夏季西太平洋热带地区的环流特征及其与台风发生的关系. 大气科学, 1978, **2**: 174~178
Xu Jianmin, Gu Meirong. The relationship between the circulation features and the typhoon genesis over the western Pacific in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1978, **2**: 174~178
- [3] 谢义炳, 陈受钧, 张一良, 等. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计分析. 气象学报, 1963, **33** (2): 217~229
Xie Yibing, Chen Shoujun, Zhang Yiliang, et al. A preliminary statistic and synoptic study about the basic currents over southeaster Asia and the initiation of typhoons. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1963, **33** (2): 217~229
- [4] 谢义炳, 陈受钧, 郭肖容. 10-12 月低纬度东南亚和西太平洋上空流场特征. 气象学报, 1965, **35** (3): 338~342
Xie Yibing, Chen Shoujun, Guo Xiaorong. Low latitude flow patterns over South-East Asia and western Pacific in the months from October to December. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1965, **35** (3): 338~342
- [5] 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
Ding Yihui, Fan Huijun, Xue Qiufang, et al. Preliminary study on the multi-typhoon development in the tropical convergence zone. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1977, (1): 89~98
- [6] 陈联寿. 盛夏亚洲中高纬流型与西太平洋台风路径的关系. 气象学报, 1965, **35** (4): 476~485
Chen Lianshou. Flow patterns in westerlies in relation to the East-Asia typhoon tracks. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1965, **35** (4): 476~485
- [7] 李宪之. 台风生成的综合学说. 气象学报, 1956, **27** (2): 87~89
Li Xianzhi. A comprehensive theory for the typhoon genesis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1956, **27** (2): 87~89
- [8] 王作述, 何诗秀, 方宗义, 等. 西北太平洋 ITCZ 多台风发生的初步研究. 气象科学, 1982, **1** (2): 132~139
Wang Zuoshu, He Shixiu, Fang Zongyi, et al. A preliminary study on the multi-typhoon occurrence on the ITCZ in the west Pacific. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, **1** (2): 132~139
- [9] 何诗秀, 张宝严, 傅秀琴. 西北太平洋盛夏台风频数与大尺度环流条件的关系. 热带气象, 1986, **2** (3): 251~256
He Shixiu, Zhang Baoyan, Fu Xiuqin, et al. Relationship between the frequency of midsummer typhoon over northwest pacific and the condition of large scale circulation. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1986, **2** (3): 251~256
- [10] 李曾中. 越赤道气流与中国天气关系的初步统计分析. 气象, 1986, **4** (1): 11~14
Li Zengzhong. Preliminary statistical analysis on the relationship between the cross-equatorial flow and the Chinese weather. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1986, **4** (1): 11~14
- [11] 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** (5): 561~574
Ding Yihui, Wright E R. The large scale circulation condition for the western Pacific typhoon genesis. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1983, **5** (5): 561~574
- [12] 潘怡航. 赤道东太平洋的热力状况对西太平洋台风发生频率的影响. 气象学报, 1982, **40** (1): 25~33
Pan Yihang. The effects of the thermal state of equatorial eastern Pacific on the frequency of typhoons over western Pacific. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, **40** (1): 25~33
- [13] Chan J C L. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, **113** (4): 599~606
- [14] 李崇银. 厄尔尼诺与西太平洋台风活动. 科学通报, 1985, **30**: 1087~1089
Li Chongyin. El Niño and the western Pacific typhoon activity. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1985, **30**: 1087~1089
- [15] 董克勤, 钟铨. 赤道东太平洋海温与南海热带风暴频数的相关关系. 热带气象学报, 1989, **5** (4): 345~350
Dong Keqin, Zhong Shuan. The correlation between SST for equatorial eastern Pacific and frequency of occurrence for tropical storms in the South China Sea. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1989, **5** (4): 345~350

- [16] 杨祖芳, 范永祥. 埃尔尼诺年西北太平洋强热带气旋发生频数的某些统计特征. 海洋学报, 1991, **13** (5): 709~711
Yang Zufang, Fan Yongxiang. Some statistical characteristics of the western North Pacific strong tropical cyclones frequency in the El Niño years. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1991, **13** (5): 709~711
- [17] Wu G X, Lau N C. A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120** (6): 958~977
- [18] Lander M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122** (4): 636~651
- [19] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 1999
Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. *Research and Application for the China Rainy Season Precipitation*. Beijing: China Meteorological Press, 1999
- [20] Wang B, Chan J C L. How does ENSO regulate tropical storm activity over the western North Pacific? *J. Climate*, 2002, **15** (13): 1643~1658
- [21] Chia H H, Ropelewski C F. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific. *J. Climate*, 2002, **15** (20): 2934~2944
- [22] Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J. Climate*, 2005, **18** (15): 2996~3006
- [23] 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 Forecasting*, 1998, **13** (5): 997~1003
- [24] 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 Forecasting*, 2001, **16** (4): 491~498
- [25] Gray W M. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 hPa quasi-biennial oscillation influences. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112** (9): 1649~1668
- [26] Chan J C L. Tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123** (9): 2567~2571
- [27] 陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响. 热带气象学报, 2006, **22** (6): 527~532
Chen Guanghua, Huang Ronghui. The effect of warm pool thermal states on tropical cyclone in west Northwest Pacific. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2006, **22** (6): 527~532
- [28] 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** (24): 2910~2914
Wang Huijun, Fan Ke. Relationship between the Antarctic oscillation and the western North Pacific typhoon frequency. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52** (4), 561~565
- [29] 范可, 王会军. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展. 大气科学, 2006, **30** (3): 402~412
Fan Ke, Wang Huijun. Studies of the relationship between southern hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 402~412
- [30] 王会军, 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), 2007, **37** (7): 966~973
Wang Huijun, Fan Ke. Relationship between the North Pacific oscillation and the typhoon/hurricane frequencies. *Sci. China* (Ser. D-Earth Sci.), 2007, **50** (9): 1049~1416
- [31] 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), 2007, **37** (6): 851~856
Fan K. North Pacific sea ice cover, a predictor for the western North Pacific typhoon frequency? *Sci. China* (Ser. D-Earth Sci.), 2007, **50** (8): 1251~1257
- [32] 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** (2): 133~137
Wang Huijun, Lang Xianmei, Fan Ke, et al. Real-time climate prediction experiment for the typhoon frequency in the western North Pacific for 2006. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (2): 133~137
- [33] 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), 2007, **37** (9): 1260~1266
Fan Ke. New predictors and a new prediction model for the typhoon frequency over western North Pacific. *Sci. China* (Ser. D-Earth Sci.), 2007, **50** (9): 1417~1423
- [34] 张庆云, 彭京备. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响. 大气科学, 2003, **27** (1): 97~106
Zhang Qingyun, Peng Jingbei. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 97~106
- [35] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 2005, **309** (5742): 1844~1846, doi: 10.1126/science.1116448