

冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 2013. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 364–382, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307. Feng Tao, Huang Ronghui, Chen Guanghua, et al. 2013. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 364–382.

近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展

冯涛^{1,2} 黄荣辉² 陈光华² 武亮² 黄平² 王磊²

¹ 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘 要 本文主要综述和回顾了近年来季风系统研究中心关于西北太平洋热带气旋和台风 (TCs) 活动的气候学研究进展及有关的国内外研究。文中不仅回顾了最近关于夏、秋季西北太平洋利于 TCs 生成的大尺度环流型及其与涡旋的正压能量交换、西北太平洋 TCs 活动的年际和年代际及季节内的变化特征、以及今后全球变暖背景下西北太平洋 TCs 活动的变化趋势的气候学研究进展, 而且综述了西北太平洋季风槽及热带对流耦合波动对西北太平洋上 TCs 生成的动力作用的研究。此外, 文中还指出今后有关西北太平洋 TCs 活动一些亟需进一步研究的气候学问题。

关键词 西北太平洋 热带气旋 台风 年际和年代际变化 季风槽

文章编号 1006-9895(2013)02-0364-19

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307

Progress in Recent Climatological Research on Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific

FENG Tao^{1,2}, HUANG Ronghui², CHEN Guanghua², WU Liang², HUANG Ping², and WANG Lei²

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

Abstract In this paper, the progress of recent climatological research on tropical cyclone (TC) activity over the western North Pacific conducted by the Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS), and associated domestic and international studies are synthesized and reviewed. In addition to recent climatological studies on the large-scale circulation patterns favorable to TC genesis and their barotropic energy conversions to eddies in summer and autumn, interannual, interdecadal, and intraseasonal variabilities of TC activity over the western North Pacific and their future changing trends attributed to global warming are reviewed. Moreover, recent research on the dynamical effects of the monsoon trough and convectively coupled tropical waves on tropical cyclogenesis over the western North Pacific are discussed. In addition, many important domestic and international studies associated with the abovementioned investigations are also systematically reviewed. Climatological problems of TC activity over the western North Pacific, which are urgently needed to be studied further in the future, are

收稿日期 2012-10-08, 2012-10-29 收修定稿

资助项目 国家公益性行业 (气象) 专项 GYHY201006021, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950403, 国家自然科学基金重点项目 41230527, 国家自然科学基金两岸合作项目 40921160379, 国家公益性行业 (海洋) 专项 GYHY201005019-2

作者简介 冯涛, 男, 1985 年出生, 博士, 主要从事台风气候学研究。E-mail: atao@mail.iap.ac.cn

通信作者 黄荣辉, E-mail: hrh@mail.iap.ac.cn

also pointed out in this paper.

Keywords Western North Pacific, Tropical cyclone, Typhoon, Interannual and interdecadal variabilities, Monsoon trough

1 引言

西北太平洋是全球热带气旋(TC)主要发生区域之一,全球约 1/3 的 TC(大约每年 30 个 TC)在西北太平洋上生成,这当中约 80%发展成热带风暴或台风(为方便起见,在后面把热带气旋和台风统称为 TCs)。由于受东风气流、季风槽和西太平洋副热带高压的影响,在西北太平洋上生成的 TCs 中一大部分移向中国、日本、菲律宾、越南和韩国,并在这些国家登陆,从而给这些国家带来严重的经济损失和重大人员伤亡。

中国是世界上遭受 TCs 灾害最严重的少数国家之一。每年平均约 7~8 个 TCs 登陆中国,最多可达 12 个,一般年份,影响中国的 TCs(不一定在中国登陆)可达 10 个左右。每年这些 TCs 给中国约造成 250 多亿经济损失和数百人的人员伤亡(黄荣辉和陈光华,2007;王磊等,2009a, 2009b)。如 2006 年 7 月 12 日“碧丽斯”台风在福建霞浦登陆以后向西移动,在湖南和江西南部 and 广东北部带来特大暴雨,7 月 14 日晚在上述地区降雨量达 400 mm 以上,引发了严重滑坡和泥石流灾害,造成 600 多人死亡和 200 多人失踪;2009 年 9 月 7 日“莫拉克”台风在台湾南部登陆,降雨量达 3000 mm 多,引发了严重滑坡和泥石流灾害,造成了台湾南部 461 人死亡和 192 多人失踪。因此,关于西北太平洋 TCs 活动的气候学研究具有重要的科学意义,它不仅可以为西北太平洋 TCs 活动的季节预测提供科学依据,而且对于台风路径和登陆地点的预报也具有广泛的应用价值。

由于西北太平洋 TCs 活动气候学研究的重要性,国际上很早就关注了西北太平洋 TCs 生成的气候学条件(Gray, 1968, 1975)。与此同时,我国一些学者对台风气候学也做出了不少研究,如丁一汇等(1977),陈联寿和丁一汇(1979)以及陈联寿等(1997)对西北太平洋 TCs 的生成、发展和移动路径的规律做了不少研究。近年来,李英等(2004a, 2004b)对登陆中国的西北太平洋 TCs 的统计特征也做了深入研究。在 20 世纪 90 年代中后期,Elsberry(1995),王斌等(1998)对 20 世纪有关 TCs 的观测事实、动力理论和数值模拟以及路径预报做了系

统的回顾和综述。

然而,应该看到:以前许多有关西北太平洋 TCs 的研究主要强调 TCs 结构和强度的变化以及移动路径和登陆地点和登陆后强降水和强风等的天气学方面,相对而言,关于西北太平洋 TCs 活动的年际和年代际变化研究不是很多。在这方面较多的研究集中在热带 Madden-Julian 振荡(MJO)对西北太平洋 TCs 活动的影响(Harr and Elsberry, 1991; 祝从文等, 2004)以及 ENSO 循环对西北太平洋上 TCs 活动年际变化的影响(Chan, 2000)。由于台风给我国带来灾害的严重性,开展西北太平洋 TCs 活动的气候学特征和年际、年代际变化以及台风在我国登陆地点年际和年代际变化的研究对于提高我国台风灾害的季节预测水平具有重要的科学意义。为此,近几年,中国科学院季风系统研究中心与许多院校一起开展了西北太平洋 TCs 活动的气候学研究。特别在西北太平洋上空利于 TCs 生成的大尺度大气环流型、西北太平洋 TCs 活动的年际和年代际变化、热带西太平洋季风槽对 TCs 活动(包括生成和移动)的动力作用、赤道对流耦合波动在西北太平洋 TCs 生成的作用以及全球变暖背景下西北太平洋 TCs 的活动的变化趋势进行了深入研究,并取得了一系列研究进展。

本文主要综述和回顾近几年来中国科学院大气物理所季风系统研究中心关于西北太平洋 TCs 活动气候学一些研究进展以及有关的国内外研究,特别是综述了关于夏、秋季西北太平洋上空对流层低层利于 TCs 生成的五类大尺度环流型及其与涡旋的正压能量交换、西北太平洋 TCs 活动的年际和年代际变化和季节内变化、热带西太平洋季风槽对 TCs 生成的动力作用、热带西太平洋上空赤道对流耦合波动在西北太平洋 TCs 生成的作用以及全球变暖背景下西北太平洋 TCs 活动的变化趋势。由于篇幅和学识所限,本文所综述的内容可能挂一漏百,甚至是很重要的研究。

2 西北太平洋上空对流层低层利于 TCs 生成的几类大尺度环流型

西北太平洋上空是 TCs 易于产生的区域,每年 6~11 月份大约 30 个 TCs 在此区域生成。之所以在

此区域上空产生这么多的 TCs, 不仅仅是由于这个海域为全球最高海表温度 (SST) 的区域, 此海域终年 SST 超过 28.5°C (Gray, 1968; Nitta, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988), 它总是满足 TCs 生成的热力条件, 而且也是由于在热带西太平洋上空具有利于 TCs 形成的季风槽及其它大尺度环流, 这些大尺度环流型为 TCs 生成提供低层辐合和气旋性相对涡度以及适宜的垂直风切 (Lander, 1994; Briegel and Frank, 1997; Ritchie and Holland, 1999; 王慧等, 2006)。

2.1 关于与西北太平洋上空 TCs 生成有关的几类大尺度环流型的研究

西北太平洋上空大气低层与季风槽有关的环流型是西北太平洋上 TCs 生成的重要大尺度环流背景, 这也是开展西北太平洋 TCs 活动的季节预测首先要搞清楚的一个问题。最近, Feng et al. (2012) 利用 1991~2010 年期间 20 年 JTWC (Joint Typhoon Warning Center, U.S.A.) 的 TC 资料和 NCEP-DOE

的 AMIP-II 再分析资料分析了利于西北太平洋上空 TCs 生成的西北太平洋上空对流层低层几类大尺度环流型。他们指出了在西北太平洋上空对流层低层有五类利于 TCs 生成的大尺度环流型。这五类环流型分别是: 如图 1 所示, 季风切变型 (简称 MS, 见图 1a)、季风辐合型 (简称 MC, 见图 1b)、逆向的季风槽 (即东北—西南向的季风槽, 简称 RMT, 见图 1c)、季风涡旋型 (简称 MG, 见图 1d) 以及热带东风环流型 (简称 TE, 见图 1e)。前三类大尺度环流型都是与季风槽有关。据 Feng et al. (2012) 的统计, 每年在前三类大尺度环流型生成的 TCs 约占西北太平洋每年总 TCs 生成的 80%。这个结果与 Ritchie and Holland (1999) 和 Chen et al. (2004) 的结果较一致, 他们也指出每年 70% 以上西北太平洋上空 TCs 在季风槽中生成。

Feng et al. (2012) 不仅从西北太平洋上空大气低层的涡度、高层散度、垂直风切和水汽条件分析了这些大尺度环流型为 TCs 生成提供了有利的动力

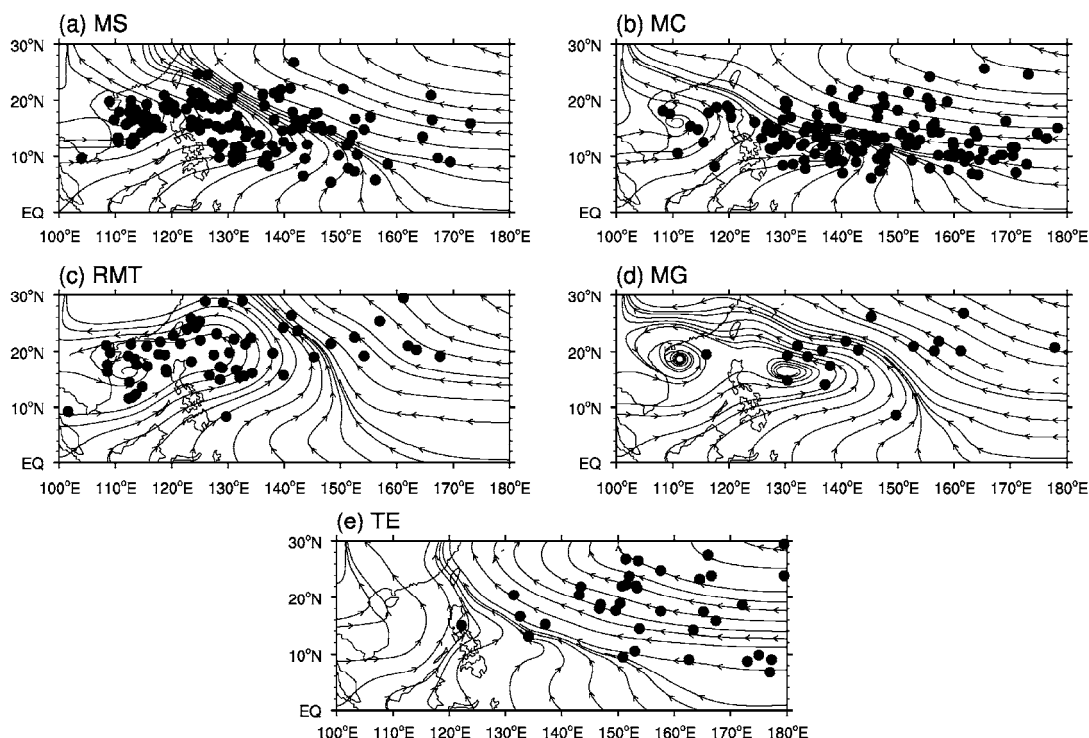


图 1 西北太平洋上空利于 TC 生成的对流层低层 850 hPa 上五类大尺度环流型合成: (a) 季风切变型 (MS), (b) 季风辐合型 (MC), (c) 逆向季风槽型 (RMT), (d) 季风涡旋型 (MG) 以及 (e) 东风型 (TE)。风场资料取自 NCEP-DOE 的 AMIP-II 再分析资料 (Kanamitsu et al., 2002), TC 资料取自 JTWC 的 TC 资料

Fig. 1 Five types of the composite large-scale circulation patterns at 850 hPa in the lower troposphere favorable to tropical cyclone (TC) genesis over the western North Pacific: (a) The monsoon shear pattern (MC), (b) the monsoon confluence pattern (MS), (c) the reverse-oriented monsoon trough (RMT), (d) the monsoon gyre pattern (MG), and (e) the trade wind easterlies pattern (TE). The data of wind fields are from the National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy (NCEP-DOE) AMIP-II reanalysis (e.g., Kanamitsu et al., 2002) and the data of TC are from TC best track dataset of the Joint Typhoon Warning Center (JTWC), U.S.A.

和热力条件,而且分析了这些大尺度环流型与涡旋之间的正压能量转换。他们的结果表明了在季风切变、季风辐合以及逆向季风槽三种大尺度环流型由于纬向或经向风存在较大的纬向辐合或经向切变,故在这三种大尺度环流型与涡旋之间存在很显著的正压能量转换,即能量从大尺度环流型向涡旋转换,但在季风涡旋型和东风型,这两种大尺度环流与涡旋之间的正压能量转换并不明显。

在上述西北太平洋上空对流层低层五类利于 TCs 生成的大尺度环流型中季风辐合型,有的研究与赤道辐合带 ITCZ 混合在一起。故本文下面再讨论一下赤道辐合带对 TC 生成的影响。

2.2 赤道辐合带对西北太平洋上 TCs 生成的影响

赤道辐合带 (ITCZ) 也是热带大气环流重要成员之一,它具有强的经向风切变以及强的对流系统,因此,它不仅通过经向风的辐合为 TCs 生成提供大气低层的动力条件,而且通过大量潜热释放为 TCs 生成提供热力条件。Gray (1968) 和陈联寿和丁一汇 (1979) 指出,西北太平洋上空 TCs 约 80% 在 ITCZ 生成,这可能是由于一般把季风槽的槽线视为 ITCZ,因此,ITCZ 与季风槽密不可分。

早在 20 世纪 60 年代谢义炳等 (1963) 以及谢义炳和黄寅亮 (1964) 就讨论了 ITCZ 对西北太平洋上 TC 生成的作用。并且,丁一汇和莱特 (1983) 也指出,在 ITCZ 偏北、偏东的年份,西北太平洋上往往台风生成偏多,而在 ITCZ 偏南、偏西的年份,西北太平洋上往往台风生成偏少。最近,曹西等 (2012) 利用卫星资料和再分析资料讨论了夏季 ITCZ 对西北太平洋上 TCs 活动的影响,并指出了 ITCZ 上对流活动的强弱与西北太平洋上 TCs 生成和路径有很好的关系。在 ITCZ 偏强年,西北太平洋上 TCs 生成个数偏多,TCs 路径易于转向;相反,在 ITCZ 偏弱年,西北太平洋上 TCs 生成个数少,TCs 路径更易于西北行。

2.3 热带西太平洋越赤道气流对西北太平洋上 TCs 生成的影响

在北半球夏季,南半球的气流经常跨越赤道流向北半球(即越赤道气流),从南半球来的越赤道气流到了北半球由于受科氏力的影响就会向东偏,从而加强了热带西太平洋季风槽。在热带西太平洋上有三支越赤道气流,它们分别位于 105°E 、 125°E 和 150°E 。在这三支越赤道气流中,位于 105°E 和 125°E 这两支越赤道气流的强弱直接影响热带辐合

带的位置和强度(刘向文等,2009)。

关于越赤道气流与西北太平洋上 TCs 生成频次的关系,早在 1956 年李宪之就提出越赤道气流对西北太平洋 TCs 生成的作用(李宪之,1956),在年际尺度上,夏季西北太平洋越赤道气流的强弱与整个台风季节的 TCs 生成频数有比较明显的正相关,王继志和莱夫特维奇 (1984) 指出多台风时期,越赤道气流较强,而在少台风期,越赤道气流相对较弱。并且,李曾中等 (2004) 根据统计研究也指出了西北太平洋上全年的 TCs 活动与 6~9 月 145°E 处偏南风的强度呈显著的正相关,而 1998 年为西北太平洋上台风生成极少的原因可能是因为该年在 $90^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 区间的越赤道气流都很弱所致。肖文俊 (1987) 诊断了 1982 年西太平洋越赤道气流与 TCs 活动的关系,指出了 130°E 和 $150^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 之间的两支偏南气流向北越过赤道之后转为西南风并且迅速加强,从而对该年的 TCs 的生成有重要影响。

最近,冯涛等 (2012) 利用美国联合台风预警中心的热带气旋 (TC) 数据以及 JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis Project, Japan) 全球再分析等资料,分析了 6~10 月西太平洋上的三支越赤道气流的年际变化及其对西北太平洋 TCs 生成位置和数量的影响。他们的结果表明:在 6~10 月期间,热带西太平洋中部和东南部的 TCs 生成数量与 125°E 及 150°E 的越赤道气流强度呈显著的正相关;而在热带西太平洋北侧 (25°N 以北) 的 TCs 生成频次与这两支越赤道气流的强度呈负相关。并且,他们还通过合成分析来分析越赤道气流强弱通过对西北太平洋上空大气低层的对外长波辐射 (Outgoing long-wave radiation, 以下简称 OLR)、200~850 hPa 垂直风切变、850 hPa 相对涡度、200 hPa 散度等的影响,从而来研究越赤道气流影响 TCs 生成的成因。他们指出了在越赤道气流偏强年,有利于热带西太平洋中部和东南部上空 TCs 的生成,而同时不利于 TCs 在 25° 以北的热带西太平洋北侧生成。此外,他们还从正压能量转换讨论了越赤道气流强弱对西北太平洋 TCs 生成的动力作用,表明:在越赤道气流偏强年,如图 2a 所示,季风槽东伸,这导致在热带西太平洋的中、东部基本气流的动能容易通过纬向风的切变和辐合向扰动动能转换,有利于扰动在热带西太平洋偏东的区域上空加强,并形成 TC;而在越赤道气流偏弱年,如图 2b 所示,季风

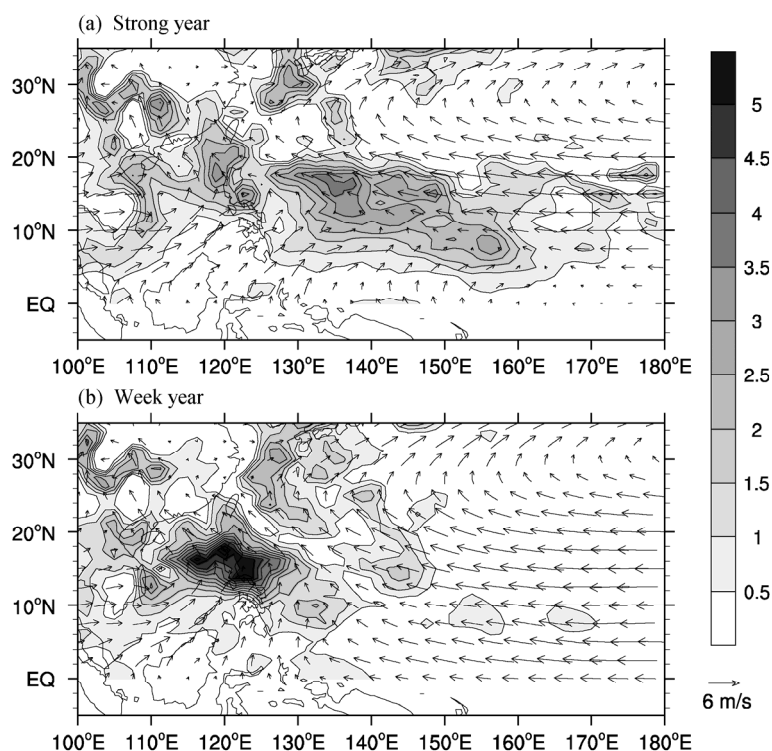


图2 越赤道气流偏强 (a) 和偏弱 (b) 年的 6~10 月在西北太平洋上空 850 hPa 面上涡旋动能倾向 $\partial K'/\partial t$ 的合成分布。单位: $10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ 。风场资料取自 JRA-25 再分析资料

Fig. 2 Composite distributions of the tendency of eddy kinetic energy $\partial K'/\partial t$ at 850 hPa over the western North Pacific during the period Jun-Oct (a) for the years with strong cross-equatorial flow and (b) for the years with weak cross-equatorial flow. Units: $10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$. The data of wind fields are from the JRA-25 reanalysis

槽偏西, 这导致在热带西太平洋的中、东部基本气流的动能不容易通过纬向风的切变和辐合向扰动动能转换, 高频扰动不容易在热带西太平洋东部加强, 因而 TCs 主要在热带西太平洋西部生成。此外, 他们还指出: 无论在越赤道气流强年或者弱年, 在 TCs 生成之前的 2~4 天均可以发现邻近的越赤道气流突然加强的过程, 这可能是触发 TC 生成的动力因素之一。

3 关于西北太平洋上 TCs 活动的年际、年代际及季节内变化及其成因的研究

西北太平洋上 TCs 无论生成频次或移动路径都有很明显的年际、年代际及季节内变化, 这也是一个与西北太平洋上 TCs 活动及登陆我国台风的季节预测密切相关的重要问题, 因此, 近年来我们对此开展了系统研究, 并取得了重要进展。

热带太平洋海—气相互作用对 TCs 路径和强度的变化有着重要影响 (Wu et al. 2005), 特别是 ENSO 循环的不同位相对于西北太平洋 TCs 活动的

年际和年代际变化有重要影响 (Chan, 2000)。然而, 热带太平洋 El Niño 和 La Niña 事件发生的最强信号在冬季, 而热带西太平洋最强信号一般领先于东太平洋 3~5 个月出现, 而西北太平洋 TCs 生成的最盛期在 6~9 月, 这正是热带西太平洋海温异常 (特别是次表层海温) 最强信号发生的时期。为此, 用西太平洋暖池次表层的热力来分析热带西太平洋季风槽位置和西北太平洋 TCs 活动年际变化会更合理。

3.1 西北太平洋上 TCs 活动的年际变化与西太平洋暖池次表层热力和季风槽位置的关系

Wu et al. (2011) 研究表明西北太平洋 TCs 路径和强度有很大年际变化且与热带太平洋海—气通量有很密切关系。黄荣辉和陈光华 (2007) 以及 Chen and Huang (2008) 利用热带西太平洋次表层海温以及 NCEP/NCAR 再分析资料分析了西太平洋暖池次表层的热力与西北太平洋上空季风槽和 TCs 活动年际变化的关系。分析结果表明: 如图 3a (见文后彩图) 所示, 当西太平洋暖池次表层处于暖状态, 则西北太平洋 TCs 的生成位置和移动路径偏北、

偏西, 这导致影响我国台风个数偏多; 相反, 如图 3b (见文后彩图) 所示, 当西太平洋暖池次表层处于冷状态, 则西北太平洋 TCs 的生成位置和移动路径偏南、偏东, 易于 130°E 附近转向, 影响日本的台风偏多, 而影响我国的台风偏少。

最近, 冯涛等 (2013) 分析了 2004 年和 2006 年 7~9 月热带太平洋季风槽位置和结构的不同所引起西北太平洋上 TCs 生成特征的不同。他们指出: 2004 年西太平洋暖池次表层偏冷, 季风槽位置偏东, 如图 4a 所示, 季风槽东端有强的纬向风的经向切变和纬向辐合, 因此, 在 2004 年台风季节 (7~9 月) 西北太平洋对流层低层大尺度环流型为季风辐合型 (MC 型); 并且在此季风切变型的大尺度背景场的作用下, 很多 MRG 波转变成 TD 型扰动, 从而导致热带西太平洋东侧上空不断出现强的 TD 型波列, 这使得大量强的 TCs 在西北太平洋偏东位置上生成, 这造成了在 2004 年 7~9 月份西北太平洋上就有 9 个 TCs 在 MC 型里生成, 其中在 8 月就有 6 个 TCs 在 MC 里生成。而在 2006 年, 西太平洋暖池次表层偏暖, 季风槽位置偏西, 如图 4b 所示, 季风槽东端呈现有强的纬向风切变, 因此, 在 2006 年台风季节, 西北太平洋上空对流层低层大尺度环流型为季风切变型 (MS 型)。由于强的季风切变位置偏西, 这使得在西北太平洋偏东、偏南侧很少有 MRG 波转变成 TD 型扰动, 导致了西北

太平洋上 TD 型波列不强, 从而引起 TCs 在西北太平洋偏西位置上生成。2006 年在 7~9 月份, 只有 2 个 TC 在 MS 型中生成, 而在 MG 型 (季风涡旋) 中有 4 个 TC 生成。

3.2 西北太平洋上空 TCs 活动和台风登陆我国地点的年际变化及其与 EAP 型遥相关的关系

王磊等 (2009a) 的研究表明了西北太平洋偏西、偏北地区生成的热带气旋或台风易于在我国登陆; 并且, 黄荣辉和王磊 (2010) 利用美国联合台风预警中心 (JTWC) 的 TC 资料和再分析资料, 分析了西北太平洋 TC 和台风登陆我国最多的 7~9 月份台风登陆我国地点的年际变化及其与 Huang (2004) 所提出的东亚/太平洋 (EAP) 指数的关系。他们的结果指出: 7~9 月份在我国厦门以北登陆台风个数的年际变化与夏季 (6~8 月) EAP 指数有很好的正相关, 相关系数达到 0.53, 超过 95% 信度。这表明: 当 6~8 月份 EAP 指数为正, 如图 5a 所示, 则 7~9 月份西太平洋副热带高压位置偏北, 从而引起西北太平洋台风登陆厦门以北的个数偏多; 相反, 当 6~8 月份 EAP 指数为负, 如图 5b 所示, 则 7~9 月份西太平洋副热带高压偏南, 从而引起西北太平洋台风登陆厦门以北的个数偏少。此外, 王磊等 (2009b) 的研究还揭示了夏、秋季东亚和西北太平洋大尺度环流, 特别是西太平洋副热带高压和季风槽对于台风登陆我国有很大影响。

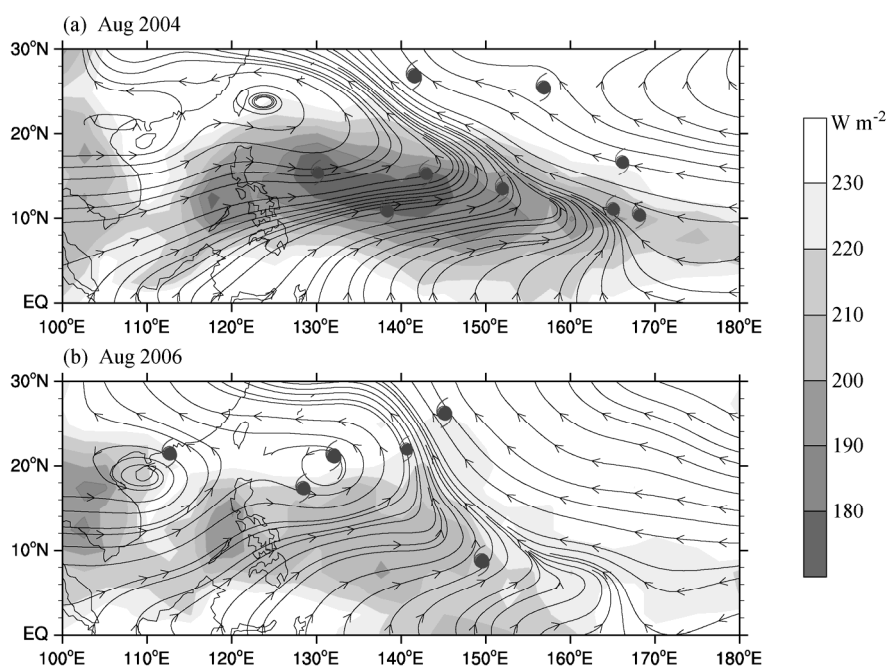


图 4 2004 年 (a) 和 2006 年 (b) 8 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 流场 (流线) OLR (阴影, 单位 W/m^2) 以及 TCs 生成位置

Fig. 4 Averaged streamline fields at 850 hPa, OLR (shaded) and TC genesis locations over the western North Pacific during August, (a) 2004 and (b) 2006

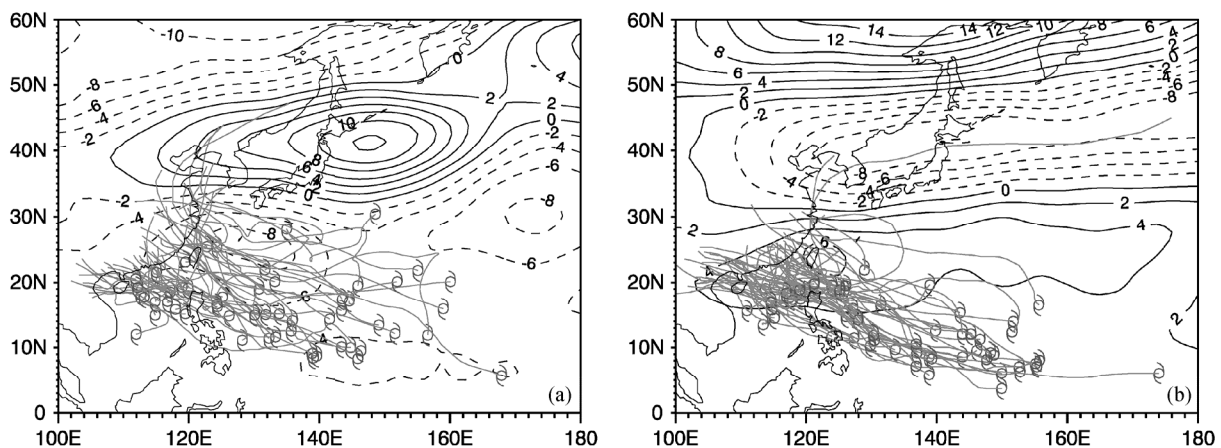


图5 夏季(6~8月)东亚/太平洋(EAP)指数为高指数年(a)和低指数年(b)的7~9月份东亚和西北太平洋上空500 hPa高度场距平(实、虚等值线分别表示正、负距平,单位:gpm)和台风路径合成分布。取1979~2007年7~9月份500 hPa高度场的气候平均为正常值,高度场资料取自JRA-25再分析资料

Fig. 5 Composite distributions of 500-hPa geopotential height anomalies (solid and dashed contours, units: gpm) and moving tracks of typhoons over East Asia and the western North Pacific during Jul-Sep for (a) the years with high summertime (Jun-Aug) EAP (East Asia-Pacific teleconnection) index and (b) the years with low summertime EAP index. The climatological mean monthly 500-hPa geopotential height fields for 1979-2007 are taken as the regular fields, and the data of geopotential height fields are from the JRA-25 reanalysis

由于EAP指数是利用Nitta(1987)所提出的PJ振荡以及黄荣辉和李维京(1988)所提出的东亚/太平洋(EAP)型遥相关波列而定义,而此遥相关波列与西太平洋暖池的热力和上空对流活动紧密相关,因此,这也进一步说明了西太平洋暖池的次表层热力对西北太平洋TCs移动路径有很大影响。

上述研究可以为西北太平洋上TCs活动和台风登陆我国地点的季节预测提供科学依据。

3.3 两类ENSO事件对西北太平洋和南海上空TCs生成位置和频次年际变化的影响

最近, Ashok et al. (2007) 已指出热带太平洋有两类ENSO事件,即热带东太平洋增温型和热带中太平洋增温型(又称El Niño Modoki)。热带太平洋这两类增温型不仅对东亚夏季风降水有严重影响(黄平和黄荣辉, 2010),而且对西北太平洋和南海上空TCs生成位置和频次也有重要影响。Chen and Tam (2010) 研究了热带太平洋两类ENSO事件对西北太平洋及南海上空TCs生成位置生成频次的影响。他们的结果表明:在东太平洋增温型El Niño事件发生的年份,则西北太平洋上TCs生成位置偏南、偏东;而中太平洋型增温型El Niño事件发生的年份,则西北太平洋上TCs生成位置偏北、偏西。这主要是由于两类不同ENSO事件发生时,热带太平洋上空的加热位置不同,在东太平洋增温型El Niño发生的年份,如图6a(见文后彩图)所示,热带太平洋上空对流加热偏东、偏南;而在

中太平洋增温型El Niño发生的年份,如图6b(见文后彩图)所示,热带太平洋上空对流加热偏西、偏北。因此,热带太平洋两类ENSO事件通过对流加热位置不同而引起热带太平洋上空环流异常不同,从而造成西北太平洋上TCs生成频次和位置的不同。并且,他们还指出:当东太平洋增温型的El Niño事件发生,南海上空TCs生成少;而当中太平洋增温型的El Niño事件发生,南海上空TCs生成多。

3.4 西北太平洋和南海上空TCs生成频次和移动路径的年代际变化

(1) 西北太平洋和南海上空TCs生成频次的年代际变化

Xie et al. (2009) 指出,在热带印度洋增暖时,由于所激发Kelvin波的作用,夏季在西北太平洋西部上空对流层下层往往出现反气旋型的异常环流;并且, Du et al. (2011) 的研究表明了这个反气旋异常环流会抑制西北太平洋上TCs的生成,从而使西北太平洋上空TCs生成频次减少,从20世纪70年代中后期起由于热带印度洋持续增温,使得西北太平洋上TCs生成频次减少。

最近, Wang and Huang (2013) 利用IBTrACS (International Best Tracks Archive for Climate Stewardship project) 1948~2009年近62年TC资料分析了5~11月中国南海TCs生成频次的年际和年代际变化特征及其与热带印度洋海表温度的关

系,其结果表明:5~11月份我国南海 TCs 生成个数有明显的年际和年代际变化,特别是从 20 世纪 70 年代中后期到 2009 年,我国南海 TCs 生成频次明显减少;并且,他们的研究还表明了热带南印度洋 ($10^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 的海表温度 (SST) 也有很明显的年际和年代际变化,它与南海 5~11 月 TCs 生成频次有很高的反相关,相关系数达到 0.61,超过 99% 的信度 (见图 7)。这表明了热带南印度洋增暖对我国南海 TCs 生成有抑制作用,由于热带印度洋海表温度从 20 世纪 70 年代中后期起明显增温,这利于热带西太平洋反气旋距平环流的加强,从而引起了南海 TCs 生成频次的减少。

(2) 西北太平洋 TCs 移动路径和登陆中国地点的年代际变化

随着全球气候变暖以及气候的年代际变化,西北太平洋上 TCs 不仅生成频次有很大年代际变化,而且它们的移动路径也有很大的年代际变化。Wu et al. (2005) 分析了西北太平洋和南海上空 TCs 和台风移动路径的变化,指出了西北太平洋台风的盛行路径自 1965 年以来总体向西偏移,而南海盛行台风路径有向北偏移的趋势,影响南海的台风明显减少。值得注意的是,这种影响台风移动路径的大尺度引导气流的变化与某些全球变暖数值试验基本一致 (Wu and Wang, 2004)。并且,Ren et al. (2006) 的统计表明,随着台风盛行路径的偏移,在我国台风带来的降水呈减少的趋势。此外王磊等 (2009a) 的研究表明,从 20 世纪 80 年代起登陆厦门以北的台风增多,并且强度加强。

3.5 西北太平洋上 TCs 生成的季节内变化

热带西北太平洋上 TCs 生成有很明显的季节内变化,它与热带西太平洋大气的季节内振荡有密切关系。热带西太平洋地区上空的季节内振荡存在两个主要的振荡频段:30~60 天振荡 (MJO) 及准双周振荡 (QBWO)。为此,我们主要从 MJO 和 QBWO 对西北太平洋 TCs 生成频次的影响来研究西北太平洋 TCs 生成频次的季节内变化。

(1) MJO 对西北太平洋 TCs 生成频次的影响

陈光华和黄荣辉 (2009) 以及 Huang et al. (2011a) 的研究表明了热带西太平洋上空大气 MJO 的不同位相对西北太平洋上 TCs 活动有很强的调制作用。当西北太平洋西侧为 MJO 的西风位相所控制时, MJO 通过纬向风的辐合作用,使得在辐合区传播的赤道波动将发生波数增加、波长缩短的结构改变,从而触发较大尺度的 MRG 波动向天气尺度 TD 型扰动演变;并且,他们的研究还表明了,在 MJO 的西风位相期间,纬向风的纬向辐合与经向切变可以使得低频波动动能向高频波动的动能转换,使得高频波动得到加强,从而使得在此区域 TCs 生成的数量明显偏多。相反,当西北太平洋西侧为 MJO 的东风位相时, TCs 生成的数量受到抑制。

并且,陈光华和黄荣辉 (2009) 还对 MJO 活动的年际变化进行了研究,他们的研究表明:在西太平洋暖池处于暖状态时,西北太平洋西侧的 MJO 活动频繁,西风位相活跃,从而有利于此区域 TCs 的生成;相反,在西太平洋暖池处于冷状态时,西北太平洋西侧的 MJO 活动减弱,西风位相不活跃,

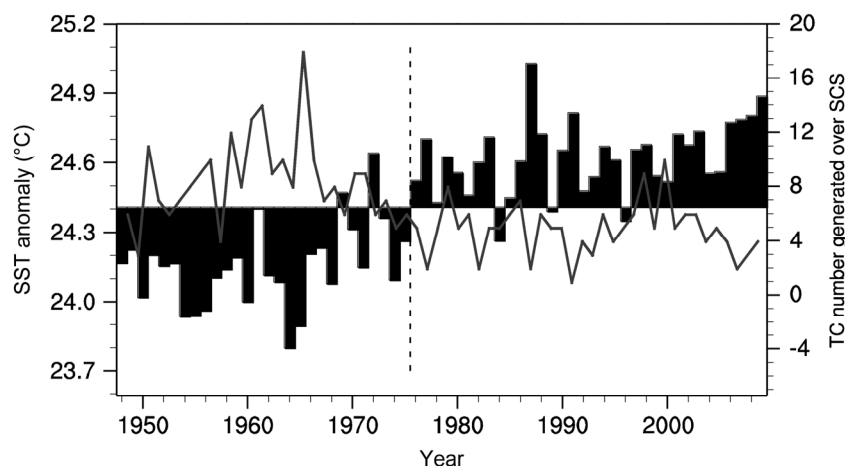


图 7 1948~2009 年 5~11 月中国南海上空的 TCs 生成频次 (实线) 和热带南印度洋 ($10^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 的 SST 距平 (柱图, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 的变化趋势。TC 资料取自 IBTrACS 资料集

Fig. 7 The variation of the frequency of TC genesis over the South China Sea (SCS) and SST anomalies in the tropical Indian Ocean ($10^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) (bar chart) during May–Nov from 1948 to 2009. The data of TC are from the dataset of IBTrACS

从而不利于此区域 TCs 的生成。最近, Cao et al. (2012) 研究还表明了 ITCZ 的季节内振荡对于西北太平洋上 TCs 生成的季节内变化也有很明显的调节作用。

(2) QBWO 对西北太平洋上 TCs 生成频次的影响

王磊等 (2009c) 研究了西北太平洋上空大气的 QBWO 对西北太平洋上 TCs 活动的影响。他们的研究结果表明了在准双周尺度上, 对流与纬向风表现出沿热带地区向西偏北传播的特性, 特别是不同 QBWO 位相合成的季风槽位置和强度也会产生相应的不同, 因此, QBWO 是西北太平洋上空季风槽季内变化的重要影响因子之一。当 QBWO 处于 1、4 位相时, 则西北太平洋上 TCs 生成的频次较低, 且登陆我国 TC 的数量也较少; 当 QBWO 处于 2、3 位相时, 则西北太平洋上 TCs 生成的频次较高, 特别是处于位相 3 时, 不仅 TCs 生成频次高而且登陆我国的 TCs 数量也多。

4 西北太平洋季风槽对 TCs 生成的动力作用

不少研究都揭示了西北太平洋季风槽的位置和强度对于此区域 TCs 生成有重要影响, 并表明了西北太平洋上 70% 以上 TCs 的生成与季风槽有联系 (Briegel and Frank, 1997; Ritchie and Holland, 1999; Chen et al., 2004; Wu et al., 2012b; Feng et al., 2012)。这不仅是由于季风槽可以在大气低层为 TCs 生成提供气旋性相对涡度 (Sadler, 1967; Frank, 1987; Chia and Ropelewski, 2002; Chen et al., 2006), 而且还可以通过纬向风的辐合和切变使得 MRG 波转变成 TD 型扰动, 而 TD 型扰动可以认为是 TCs 生成的先兆胚胎或先兆扰动 (precursor disturbance) (Takayabu and Nitta, 1993; Dickinson and Molinari, 2002; Chen and Huang, 2009)。因此, 西北太平洋上季风槽对于 TCs 生成具有重要的动力作用。

4.1 热带西太平洋上空热带对流耦合波动

自从 Matsuno (1966) 从理论上提出赤道波动以后, 热带大气和海洋环流动力学得到很大发展。近几年, 热带对流活动与赤道波动的相互作用, 由于它是深入研究西北太平洋 TCs 生成动力学的关键, 因此它已成为热带大气动力学研究的一个热点问题。Yang et al. (2007a, 2007b) 和 Kiladis et al. (2009) 系统地研究了热带对流耦合波动。

最近, Huang and Huang (2011) 利用 Cloud Archive User Service (CLAUS) 的云顶亮温 (T_b) 资料以及 NOAA 的射出长波辐射 (OLR) 资料, 并基于 Wheeler-Kiladis 滤波方法 (Wheeler and Kiladis, 1999) 研究了热带对流耦合波动的气候平均和年际变化特征, 即 MRG 波, TD 型波动, 赤道 Rossby 波 (ER) 以及赤道 Kelvin 波 (Kelvin) 强度的气候及年际变化特征 (见图 8)。虽然他们所得的结果与以前的一些研究结果 (Yang et al., 2007a; Kiladis et al., 2009) 相似, 但在 Huang and Huang (2011) 的研究中不仅对于这些波动的气候分布有更精细的描述, 而且对这些波动的年际变化做了深入的研究。

Huang and Huang (2011) 对热带对流耦合波动的年际异常和年际方差进行了系统分析, 他们的研究结果表明: Kelvin 波活动异常在热带东太平洋有最大的年际方差, 而其余 3 种对流耦合波动的年际方差分布特征与 ITCZ 分布相类似; 这四种波动在热带东太平洋有最强的超前滞后 1 月的自相关且波动异常和局地海温异常的关系在此地区也最好。并且, 他们还指出: 在热带东太平洋对流耦合波动异常信号的持续性可能是由于这个地区的波动异常受海温异常控制而造成的。此外, 他们的研究还表明, 两类 ENSO 事件对热带大气波动异常有一定影响, 两类 ENSO 事件是影响热带地区波动异常的主要因子之一, 赤道东太平洋的波动异常和 Nino3 区的海温异常有正相关, 而西太平洋的波动异常与 Nino.3 区海温异常有负相关关系。

4.2 西北太平洋季风槽对 TCs 生成的动力作用

从图 8 可以看到, TCs 生成先兆扰动的 TD 型波动 (或 TD 型扰动) 的波数和频率大于 MRG 波, 波长短于 MRG 波。Takayabu and Nitta (1993) 指出了 MRG 波进入热带西太平洋后将逐渐转变为向西北方向传播的 TD 型扰动。MRG 波如何转变成 TD 型扰动? 关于此问题, 黄荣辉和陈光华 (2007) 以及 Chen and Huang (2008, 2009) 做了深入研究, 他们把 Webster and Zhang (1988) 所推导的赤道 Rossby 波在沿波传播路径传播时波数变化与纬向风辐合的关系推广到 MRG 波与 TD 型波动的波数域中, 即

$$\frac{d_g k}{dt} = -k \frac{\partial \bar{u}(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

式中, k 是纬向波数, $\bar{u}(x)$ 是纬向风的时间平均, d_g/dt 是沿群速度 (即波的传播路径) 方向的随体

微商。(1)式表明了纬向风辐合的区域传播的赤道 MRG 波的纬向波数将增加,其波长将变短。黄荣辉和陈光华(2007)以及 Chen and Huang (2009)指出:由于西北太平洋季风槽的东端是纬向风的强辐合之处。这样当波长较长而波数较小的 MRG 波西进到季风槽的东端,此波动在季风槽纬向风辐合的作用下,它将转变成波数较大而波长较短的 TD 型扰动,这将为 TC 生成提供了先兆(precursor)扰动。并且,他们利用同样原理,得到下式

$$\frac{d_g m}{dt} = -m \frac{du}{dy}, \quad (2)$$

式中 m 是经向波数。(2)式表明了纬向风经向切变强的区域,赤道波动的经向波数将增加,其波长将变短。Chen and Huang (2009)的研究表明:西北太平洋季风槽中是纬向风强切变之处,这样,当 MRG 波西进到季风槽东端时,此波动在季风槽东端纬向风辐合的作用下,其波数增大,而波长将变短;并且,当此波继续传播到季风槽中,在季风槽纬向风的经向切变和纬向辐合的共同作用下,此波动不仅纬向波数继续变大,而且经向波数将变大,且波长继续变短,而且将变形、分裂,最后变成 TC。

黄荣辉和陈光华(2007)以及 Chen and Huang (2008, 2009)利用 1980~2001 年 7~10 月再分析的 850 hPa 风场和 OLR 资料进行了 3~6 d 的带通滤波,并以(0°, 160°E)的经向风为参考点,对热带太平洋上空 850 hPa 高频(3~6 d)变化风场和 OLR 距平场求线性回归,将回归系数场乘以 0.1 m/s,得到含有单位的变量场,从而分析了与热带西太平洋次表层热力相关的季风槽位置的不同对 MRG 波转变成 TD 型扰动的影响。他们的结果表明:当热带西太平洋处于暖状态,这时西北太平洋上空季风槽位置偏西,如图 9a1, a2, a3 所示,热带西太平洋偏东侧存在明显的 MRG 波,这说明在 160°E 附近,对流层低层 MRG 波还未转变成 TD 型扰动,波列强度远弱于西太平洋暖池处于冷状态的波列强度,同时波的垂直结构随高度东倾;相反,当热带西太平洋处于冷状态,这时季风槽位置偏东,如图 9b1, b2, b3 所示,热带西太平洋偏东侧已有明显的 TD 型扰动,这说明在 160°E 附近对流层低层 MRG 波已转变成 TD 型扰动,且波列强度较强。Wu et al. (2012d)的研究也表明了西北太平洋东南侧上空 TCs 生成是与季风槽对 MRG 波转变成

TD 型扰动的动力作用有密切关系。

上述结果表明了西北太平洋上季风槽对 MRG 波转变成 TC 先兆的 TD 型扰动起了重要的动力作用。

4.3 从正压能量转换来看西北太平洋季风槽中涡旋发展的动力作用

为了说明西北太平洋上空季风槽对 TC 生成的动力作用, Wu et al. (2012b)进一步利用正压能量转换来诊断季风槽对 TC 生成的动力作用,他们应用正压能量循环方程,即

$$\frac{\partial K'}{\partial t} = -\overline{u'^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \overline{v'^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, \quad (3)$$

式中, u' 、 v' 分别为瞬变涡旋的纬向和经向风速, \bar{u} 、 \bar{v} 分别是时间平均的纬向和经向风速, K' 是瞬变涡旋的动能。Wu et al. (2012b)利用(3)式对西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 的平均气流和瞬变扰动正压能量之间的转化进行了定量计算和分析。如图 10 所示,热带西太平洋对流层低层沿着季风槽存在着明显的平均动能向涡旋动能转化,该能量转化区随着季风槽的增强东伸(或减弱西退)也加强东进(或减弱西退)。因此,正是季风槽位置和强度的变化引起了大尺度平均动能向较小尺度瞬变涡旋动能转化的变化,从而影响了相应地区 TC 的生成。

Huang et al. (2011a)根据(3)式从动力理论分析了涡旋在季风槽中的演变过程并结合了 Wu et al. (2012c)利用(3)式的计算结果,提出了西北太平洋季风槽从 MRG 波向 TD 型扰动转变且发展成 TC 过程中的动力作用概念图(见图 11)。图 10 表明,当 TD-MRG 波从赤道中东太平洋向西传播过程中,当波位于日期变更线以东时,其波的结构更接近 MRG 波,而当波传播接近到西太平洋季风槽东端的位置时,波的强度开始加强,水平尺度收缩,并呈东北—西南倾斜,垂直结构呈正压结构,对流中心与涡旋中心重合;当此种波动沿着季风槽向西北行,此时 TD-MRG 波更具 TD 波的性质。

此外, Wu et al. (2012d)还利用浅水波模型对这个动力过程进行了模拟,模拟结果清楚展现了在季风槽气流影响下热带波动的演变过程。如图 12 所示,当 MRG 波移近季风槽,在季风槽纬向风纬向辐合和经向切变的作用下,它的尺度收缩、形状改变,最终演变为小尺度扰动的过程,这些扰动在合适的大尺度环境配合下发展成为 TC。

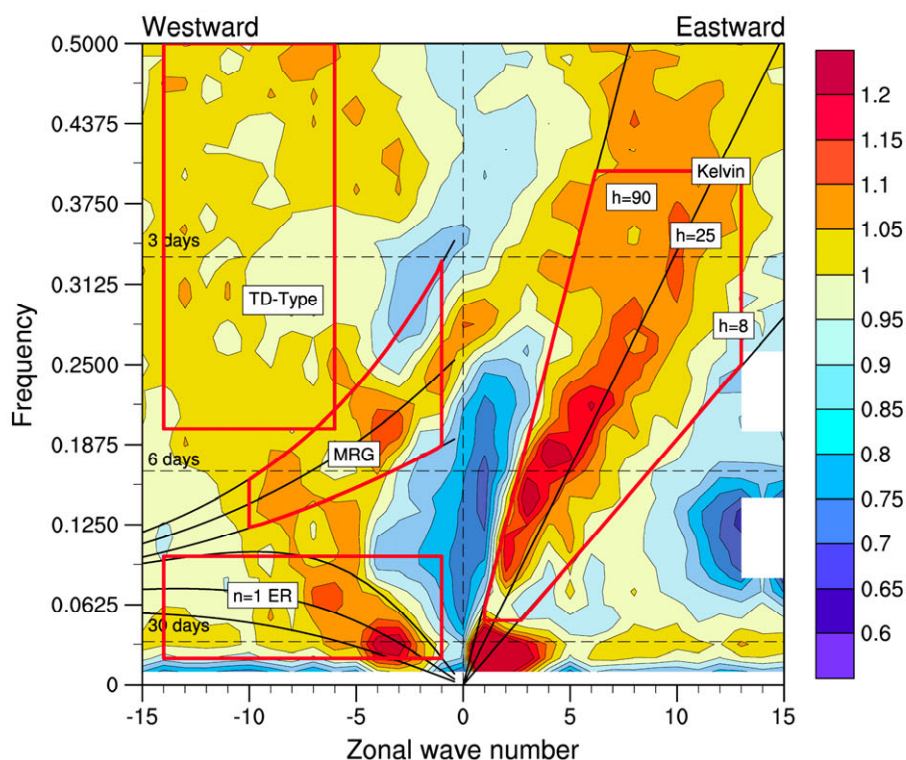


图8 1984~2004年平均的在 20°S ~ 20°N 之间热带OLR的频率—波数谱分布。红色实线表示滤出的Kelvin波、 $n=1$ 向西传播赤道Rossby波(ER)、Rossby-重力混合波(MRG)和热带低压型波动(TD型波动)的区域;黑色实线表示对于等效高度为8 m、25 m和90 m波的频散曲线。资料取自NOAA

Fig. 8 Wavenumber-frequency spectrums of OLR from 1984 to 2004 between 20°S and 20°N . The red solid polygons indicate the domains for filtering the Kelvin wave, the $n=1$ westward-propagating equatorial Rossby (ER) wave, the mixed Rossby-gravity (MRG) wave, and the TD-type wave, respectively; the black solid lines denote the dispersion curves for the equivalent heights of 8, 25, and 90 m. The data are from NOAA

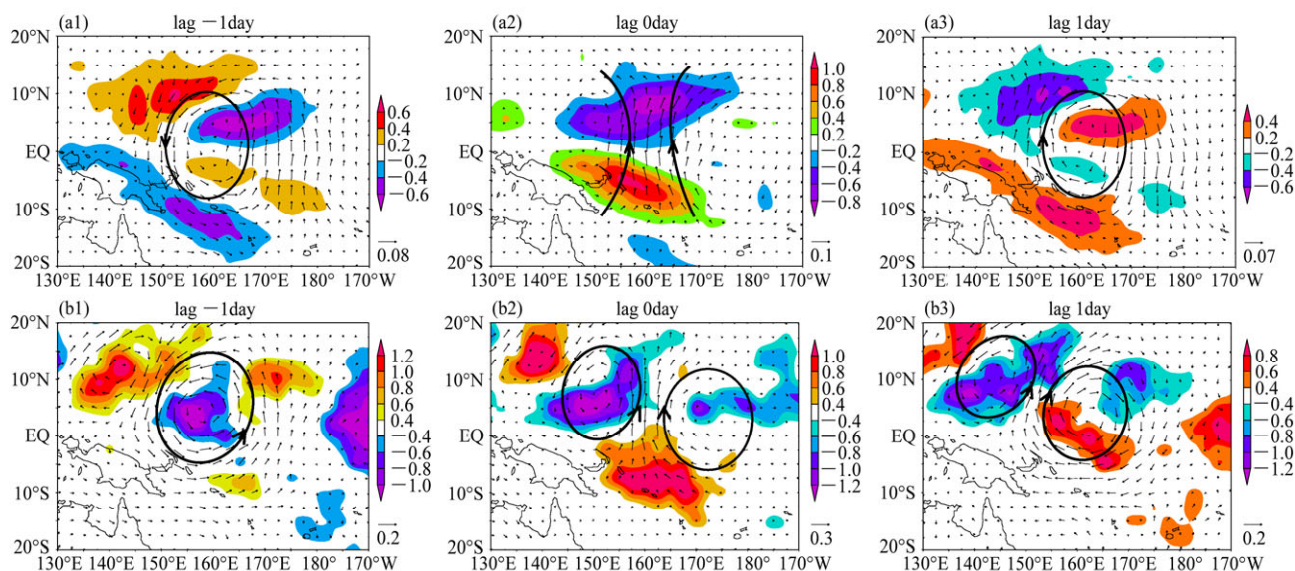


图9 西太平洋暖池处于暖状态(a1, a2, a3)和冷状态(b1, b2, b3),以 $(0^{\circ}, 160^{\circ}\text{E})$ 的经向风为参考点的超前1 d、同时和落后1 d的线性回归的热带太平洋上空7~10月850 hPa 3~6 d滤波的高频风场(矢量,单位: m/s)和OLR距平场(阴影区,单位: W/m^2)的合成分布。风场资料取自NCEP/NCAR再分析资料(Kalnay et al., 1996)

Fig. 9 Distributions of linear regression of 850-hPa winds (vectors) and OLR anomaly (shading) with respect to 850-hPa meridional wind at the base point $(0^{\circ}, 160^{\circ}\text{E})$ derived from 3-6-day filtered data for successive three lag, simultaneous, and lead days for (a1, a2, a3) the warm years and (b1, b2, b3) the cold years of the western Pacific warm pool. The data of wind fields are from the NCEP/NCAR reanalysis (e.g., Kalnay et al., 1996)

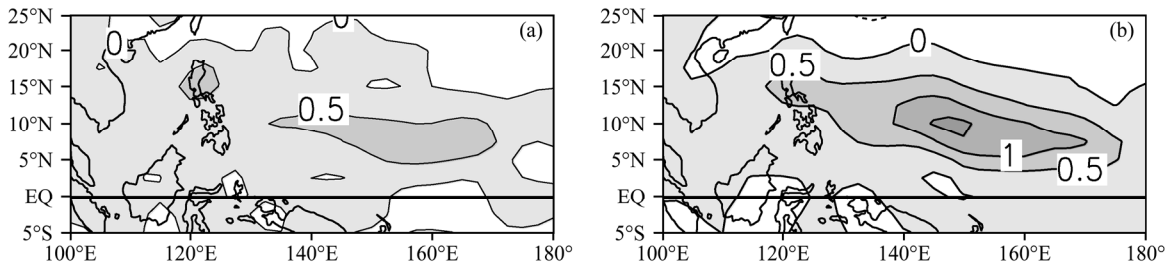


图 10 西太平洋暖池 (a) 偏暖 (季风槽位置偏西) 和 (b) 偏冷 (季风槽位置偏东) 年的 6~10 月 850 hPa 面上 (涡旋) 动能倾向 $\partial K' / \partial t$ 合成分布。单位: $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$

Fig. 10 Composite distributions of the tendency of eddy kinetic energy $\partial K' / \partial t$ at 850 hPa over the western North Pacific during the period Jun–Oct for (a) the years with the warming warm pool (the westward shift of the monsoon trough) and (b) the years with the cooling warm pool (the eastward shift of monsoon trough) over the western North Pacific. Units: $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$

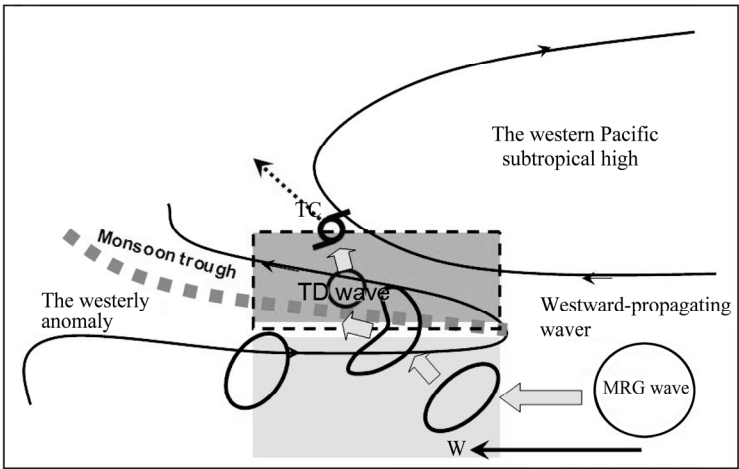


图 11 在西北太平洋季风槽 MRG 波向 TD 型扰动转变的动力过程概念图

Fig. 11 Conceptive diagram of dynamical process of the transition from the MRG wave to TD-type disturbance in monsoon trough over the western North Pacific

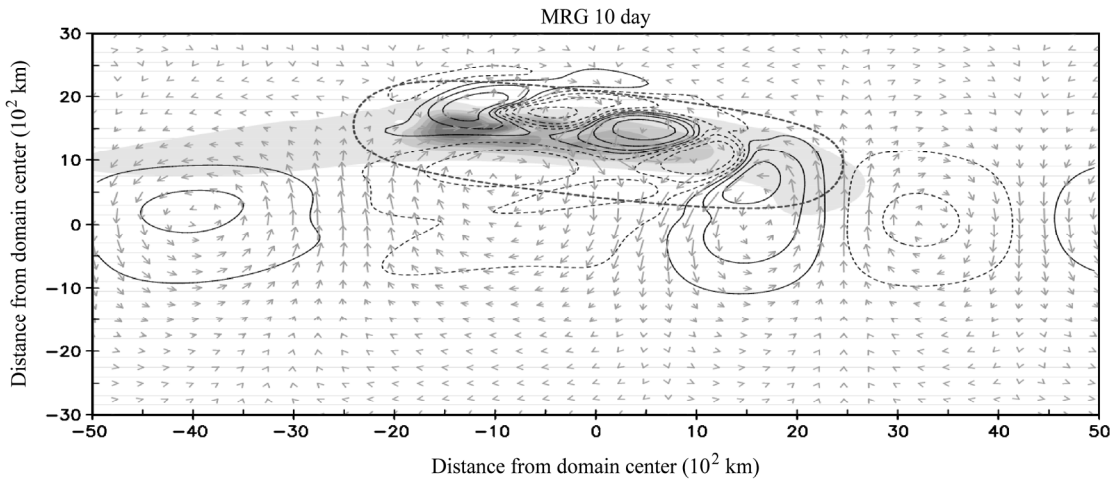


图 12 利用浅水波模型对 MRG 波—TD 型扰动的转变过程模拟第 10 天的结果。矢量箭头表示扰动风场, 浅色实、虚线分别表示扰动正、负涡度区域 (单位: 10^{-6} s^{-1}), 粗虚线的区域表示季风槽区, 阴影表示正压能量转换的区域

Fig. 12 The 10th day simulation results of the evolution process from the MRG wave to the TD-type disturbance by using the shallow water wave model. The vectors represent horizontal eddy wind; light solid and dashed lines represent the areas of positive and negative relative vorticity (units: 10^{-6} s^{-1}), respectively; the heavy black line represents the monsoon trough; the shading represents the areas of positive barotropic energy conversion

4.4 ENSO 循环对热带西太平洋 MRG 波激发及其转变成 TD 型波动的影响

ENSO 循环不同阶段对西北太平洋 TCs 活动有重要影响, 特别对于热带 TD-MRG 波动有着明显的影响 (Wu et al., 2012e)。Chen (2012) 利用一个全球大气斜压异常模式, 研究了在不同背景场中, MRG 波转变成 TD 型扰动的差异, 并初步探讨了这种高频波动的转变对 TC 生成的影响。研究结果显示, 在同时存在理想基本气流和波动—对流热力反馈的条件下, 对应季风槽东伸的 El Niño 年, MRG 波和 TD 型波动两类天气尺度波动的转变位置偏东, 且波列北移显著; 而对应季风槽西撤的 La Niña 年, 高频波的转变位置偏西, 波列以西传为主。

并且, Chen and Tam (2012) 的研究表明了赤道波动对赤道外天气尺度波源产生的 Rossby 波能量频散的响应是激发低层 MRG 波的一种新机制。他们通过观测与模拟结果都表明, 在 ENSO 循环的不同阶段的背景气流场对赤道 MRG 波的激发有着不同的影响, 对应 El Niño 年, 西北太平洋低层盛行西风, 由此产生的纬向风辐合和东风垂直切变有利于东南向的能量频散和赤道 MRG 波响应; 相比较而言, 在 La Niña 年, 赤道 MRG 波的响应要明显减弱, 且不利于能量的频散。

4.5 西北太平洋上 TD 型扰动在 TC 生成中的作用

前面已经阐述了很多学者在研究西北太平洋上 TCs 生成时, 指出了 TD 型扰动是 TC 生成的先兆 (precursor) (Takayabu and Nitta, 1993; Dickinson and Molinari, 2002; Chen and Huang, 2009)。Fu et al. (2007) 的研究结果表明, 导致 TCs 生成的初始扰动有三类, 它们分别是: 来自于前一个 TCs 的能量频散、天气尺度波列 (主要是 TD 型波动) 以及东风波三种类。这三种初始扰动尺度的缩小以及大尺度环境气流的辐合强迫可能是导致 TC 生成的机制。因此, 从他们的研究结果可以看到, 西北太平洋上 TD 型扰动是触发 TC 生成主要扰动之一。

最近, 关于 TD 型扰动因何能发展成 TC 已成为一个台风动力学研究中一个焦点问题。Chen (2012) 利用一个全球大气斜压异常模式, 并考虑了波动—对流热力反馈条件下通过敏感性试验来研究 TD 型扰动发展成 TC 的过程。他的试验结果表明了对流非绝热加热过程可以使波动显著收缩水平尺度, 从而使 TD 型扰动发展成 TC。因此, 不同年份, 相应于不同热力场的差异就有可能造成

TD 型扰动发展成 TC 的差异。这可能是造成了西北太平洋上 TCs 活动差异的一个重要因子。

5 未来全球变暖背景下西北太平洋 TCs 活动变化的预估

目前, 国际上关于在全球变暖背景下全球 TCs 活动变化趋势的研究结论还存在着争议。一部分科学家 (Emanuel, 2005; Webster et al., 2005; Elsner et al., 2008) 认为, 全球气候变暖显著加强台风活动, 他们的主要依据有以下四个理由: 全球 TCs 在过去 30 年总体有显著增强的趋势, 而且这种趋势与 TCs 发生和发展区域的海温升高趋势相吻合; 全球热带海温升高似乎是唯一能解释全球强 TCs 过去 30 年在不同海域显著增加的因素; 全球热带海温升高可以从理论上说明强 TCs 生成频次增加的物理机制; 动力模型也显示出在全球变暖气候背景下强 TC 发生频率有增加的趋势。但也有一部分科学家 (Landsea et al., 1996; Chan and Shi, 1996; Chan, 2006; Trenberth, 2005) 认为, 全球变暖对 TCs 的影响并没有前者所说的那么明显, 至少到目前为止尚无充分的证据表明全球变暖已经造成了更多的 TCs 的产生, 他们也有以下四个主要依据: 30 年的资料太短, 无法说明长期的 TCs 变化趋势; 过去 30 年强 TCs 增加的趋势可能是观测手段改变和对气旋强度确定过程中所造成误差的产物; 由于全球变暖同时使对流层上部增暖等因素将完全或部分抵消海温增暖对 TCs 强度变化的影响; 当前气候系统的内在周期变化可以解释过去 30 年的 TCs 生成频率及强度变化。因此, 全球变暖背景下西北太平洋 TCs 活动的长期变化趋势至今也没有确定的说法, 这是需要更多有说服力的研究。

5.1 在全球变暖背景下西北太平洋 TCs 和台风登陆中国地点的变化

Huang and Huang (2011) 根据西北太平洋台风登陆中国地点的年际变化与夏季 EAP 指数有很好的相关 (黄荣辉和王磊, 2010), 从 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第四次评估报告 (AR4) 22 个耦合气候数值模式的模拟结果重构了夏季 EAP 型遥相关, 并与实况相比较, 指出只有中国 IAP (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) 和美国 NCAR 气候数值模式能较好地再现夏季 EAP 型遥相关, 从而能较好地模拟西北太平洋台风登陆中国地点的年际和年代际

变化。并且,最近 Huang and Du (2012) 分别从 IPCC-AR4 的 22 个海—气耦合气候数值模式以及 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 的 33 个海—气耦合气候数值模式重构了在 A1B 排放情景下 21 世纪夏季 EAP 型遥相关,研究了 21 世纪夏季 EAP 型遥相关的变化趋势,从而预估 21 世纪早、中、晚期台风在中国登陆地点的变化趋势。如图 13 所示,在全球变暖背景下,在 21 世纪早、中期 EAP 指数有很大年际变化,而从 21 世纪中期以后 EAP 指数变为负值。这表明:在 21 世纪早、中期西北太平洋台风登陆中国地点仍有很大的年际变化。且登陆厦门以北台风个数偏多,而从 21 世纪中期之后登陆中国厦门以北的台风个数将减少。然而,由于数值模式的不确定性,这个预估有很大的不确定性。

最近, Wu et al. (2012a) 还应用一个区域气候数值模式研究了西北太平洋 TCs 活动将来的变化趋势,表明了未来 30 年内西北太平洋 TCs 生成个数将减少,而强台风个数没有什么变化,并且台风登陆我国厦门以北的个数将有所增加。

5.2 在全球变暖背景下热带对流耦合波动的变化趋势

在 5.5 中阐述了国内外已有许多研究表明了热带对流耦合波动的 MRG 波和 TD 型波动是西北太平洋上 TCs 生成的先兆扰动。因此,可以通过

IPCC 各种大气环流模式或耦合模式对热带对流耦合波动的模拟和将来变化趋势的预估来研究今后西北太平洋上 TCs 生成的长期变化趋势。

Huang et al. (2011b) 从 IPCC-AR4 的 CMIP3 (Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project) 中挑选了 10 个大气环流模式资料分析了热带对流耦合波动的数值模拟结果。他们的结果表明:在 IPCC 大气环流数值模式中所模拟的 MRG 波似乎是赤道 Rossby 波与 TD 型波动的混合,而不是观测的赤道 Rossby 波与重力内波的混合,大多数 IPCC 大气环流数值模式不能模拟西北太平洋上空的 TD 型波动的西北向传播。特别是他们指出: IPCC-AR4 的 CMIP3 模式所模拟的 MRG 波和 TD 型波动的活跃位相都比实际观测的这两类活动活跃时期短。并且, Huang et al. (2012) 利用 CMIP3 模式资料分析了未来 MRG 波和 TD 型波动的变化趋势,指出了随着全球气候变暖,热带大气的 MRG 波和 TD 型波动活跃期开始的时间推迟,活跃期持续时间将缩短。这说明,随着全球气候变暖,西北太平洋上 TCs 活动的活跃期有可能变短。

6 结论及需进一步研究的问题

本文主要综述和回顾近年来中国科学院大气物理所季风系统研究中心关于西北太平洋 TCs 活动

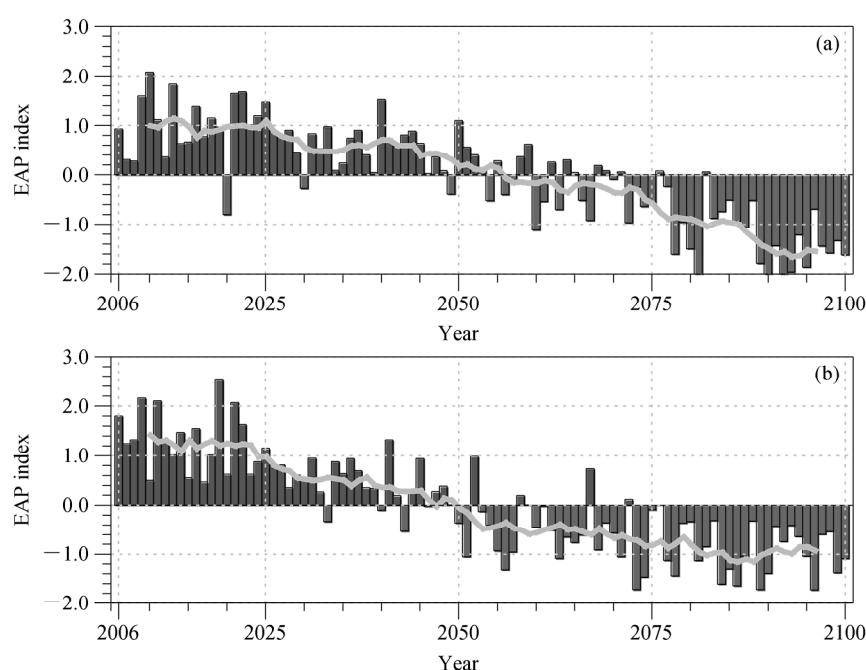


图 13 由 IPCC AR4 (a) 和 AR5 (b) 在 A1B 情景下海—气耦合模式资料所计算的 21 世纪夏季东亚/太平洋 (EAP) 指数变化趋势

Fig. 13 The changing trend of the summertime (Jun–Aug) East Asia/Pacific (EAP) index during the 21th century calculated by using (a) IPCC-AR4 and (b) IPCC-AR5 modeling data of air–sea coupled models under the scenario of A1B

的气候学研究进展及有关的国内外研究。文中主要综述了最近关于夏、秋季西北太平洋上空利于 TCs 生成的大尺度环流型及其与涡旋的正压能量交换、西北太平洋 TCs 活动的年际和年代际以及季节内变化特征、西北太平洋季风槽对 TCs 生成的动力作用、赤道对流耦合波动在西北太平洋上 TCs 生成的作用以及全球变暖背景下西北太平洋 TCs 活动的变化趋势等的研究进展以及相关的国内外研究。这些内容都是国际上关于热带气旋和台风气候学的前沿科学问题。然而,应该看到,我们的研究进展还是初步的,关于西北太平洋上 TCs 活动气候学还有许多问题亟需进一步研究。

(1) 正如前面所综述,西北太平洋上越赤道气流、季风槽、西太平洋副热带高压等大尺度环流以及 MJO、QBWO 以及赤道波动对于西北太平洋的 TCs 活动的季节内、年际和年代际变化有很大影响。因此,热带西太平洋不同时空尺度的环流、波动、对流与 TCs 的相互作用过程和机理是今后一个亟需进一步深入研究的问题。

(2) 无论是季风槽或 MJO、QBWO,甚至赤道波动和 TCs 都受热带太平洋和印度洋的海—气相互作用所调控,这些系统又作用于海洋,因此,热带海洋与这些系统,特别是与 TCs 活动的相互作用也是值得进一步研究的问题。

(3) 正如前面所综述,许多研究都表明了西北太平洋上空对流层低层的 TD 型波动是 TC 生成的先兆扰动,然而 TD 型扰动空间尺度大,它在什么样的动力和热力作用下尺度收缩,强度加强,从而发展成 TC 的过程应进一步深入研究。

(4) 目前,国内外许多关于 TCs 气候学的研究,较多关注 TCs 生成方面,而关于 TCs 移动路径及登陆地点的年际和年代际变化关注较少;并且由于 TCs 强度变化也是比较难的问题,关于这方面的研究也比较少。因此,今后在关于西北太平洋 TCs 活动的气候学研究方面应该对于 TCs 路径和强度的年际和年代际变化给予关注。

(5) 目前,由于 TCs 生成与移动的物理过程了解还不清楚,特别是积云对流在模式中描述不准确,并且受气候数值模式中强迫因子、初始条件和边界条件和模式的分辨率的约束,在气候模式的模拟中难于生成台风,往往要采取“人造台风”方法来模拟某种大尺度环流背景下台风活动的变化。因此,由气候模式所模拟的台风生成频率的变化往往

小于模式的平均偏差,这就大大增加了 TCs 和台风活动变化模拟的困难性和不确定性。这需要今后长期不断改进 TCs 和台风气候数值模式的研究。

(6) 目前,为了要减轻台风造成的严重灾害,有关部门亟需对西北太平洋 TCs 活动及其登陆我国台风的季度和年际变化趋势进行预测。这一方面需要系统地分析并揭示西北太平洋和印度洋的热状态及其上空季风环流以及 MJO 等不同的动力和热力因子与 TCs 和台风活动之间的关联;另一方面应深入地对热带西太平洋季风槽及其与赤道波动变化密切相关的 TCs 活动年际和年代际变化特征、过程和机理进行深入的探讨;此外,要对未来台风活动状况作出客观定量的预测,这要不断改进以往 TC 和台风气候数值模式,提高模式对 TC 和台风的模拟和预测能力。

总之,西北太平洋上 TCs 活动及登陆我国台风的气候学是与一个台风季节预测密切相关的研究课题。目前,为了国民经济建设和社会发展的需求以及减轻台风造成的灾害,我国应特别重视西北太平洋 TCs 活动及登陆我国台风的气候学研究,争取在这方面做出国际一流的研究成果。

参考文献 (References)

- Ashok K, Behers S K, Rao A S, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: C11007, doi: 10.1029/2006JC003798.
- Briegel L M, Frank W M. 1997. Large-scale influences on tropical cyclogenesis in the western North Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125: 1397–1413.
- 曹西, 陈光华, 黄荣辉, 等. 2013. 夏季西北太平洋赤道辐合带强度的年际变化及其对热带气旋的影响 [J]. *热带气象学报*, (即将出版).
- Cao Xi, Chen Guanghua, Huang Ronghui, et al. 2013. The interannual variation of the summer intertropical convergence zone in the western North Pacific and its impact on the tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, in press.
- Cao X, Huang P, Chen G H, et al. 2012. Modulation of western North Pacific tropical cyclone genesis by intraseasonal oscillation of the ITCZ: A statistical analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29: 744–754.
- Chan J C L. 2000. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events [J]. *J. Climate*, 13: 2960–2972.
- Chan J C L. 2006. Comments on “Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment” [J]. *Science*, 311: 1713.
- Chan J C L, Shi J E. 1996. Long-term trends and interannual variability in tropical cyclones activity over the western North Pacific [J]. *Geophys.*

- Res. Lett., 23: 2765–2767.
- Chen G H. 2012. A comparison of the transition of equatorial waves between two types of ENSO events in a multilevel model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 69: 2364–2378, doi: 10.1175/JAS-D-11-0292.1.
- Chen G H, Huang R H. 2008. Influence of monsoon over the warm pool on interannual variation of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 319–328.
- Chen G H, Huang R H. 2009. Interannual variations in mixed Rossby-gravity waves and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 22: 535–549.
- 陈光华, 黄荣辉. 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制 [J]. *大气科学*, 33: 205–214. Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific and the physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33: 205–214.
- Chen G H, Tam C Y. 2010. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L01803, doi: 10.1029/2009GL041708.
- Chen G H, Tam C Y. 2012. A new perspective on the excitation of low-tropospheric mixed Rossby-gravity waves in association with energy dispersion [J]. *J. Atmos. Sci.*, 69: 1397–1403.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Survey of Typhoons over the West Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 491pp.
- 陈联寿, 徐祥德, 解以杨, 等. 1997. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. *大气科学*, 21: 83–90. Chen Lianhsou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 21: 83–90.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C, et al. 2004. Role of the monsoon gyre in the interannual variation of tropical cyclone formation over the western North Pacific [J]. *Wea. Forecasting*, 19: 776–785.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C, et al. 2006. Interannual variation of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 19: 5709–5720.
- Chia H H, Ropelewski C F. 2002. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclone in the northwest Pacific [J]. *J. Climate*, 17: 466–484.
- Dickinson M, Molinari J. 2002. Mixed Rossby-gravity waves and western Pacific tropical cyclogenesis. Part 1: Synoptic evolution [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59: 2183–2196.
- 丁一汇, 范惠君, 薛秋芳, 等. 1977. 热带辐合区中多台风同时发展的初步研究 [J]. *大气科学*, 1: 89–98. Ding Yihui, Fan Huijun, Xue Qiufang, et al. 1977. A preliminary study on the simultaneous developments of the multiple typhoons in the convergence zone [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 1: 89–98.
- 丁一汇, 莱特 E R. 1983. 影响西太平洋台风形成的大尺度环流条件 [J]. *海洋学报*, 5: 561–574. Ding Yiui, Reiter E R. Large-scale circulation condition affecting typhoon formation over the West Pacific [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 5: 561–574.
- Du Y, Yang L, Xie Shangping. 2011. Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño [J]. *J. Climate*, 24: 315–322.
- Elsberry R L. 1995. Global Perspectives on Tropical Cyclone [M]. WMO, TD-No. 693. Ch. 4: 106–197.
- Elsner J B, Koissin J P, Jagger T H. 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones [J]. *Nature*, 455: 92–95.
- Emanuel K A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 436: 686–688.
- Feng T, Chen G H, Huang R H, et al. 2012. Large-scale circulation patterns favorable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversion [J]. *Int. J. Climatol.*, Accepted.
- 冯涛, 沈新勇, 黄荣辉, 等. 2012. 热带西太平洋越赤道气流的年际变化对西北太平洋热带气旋生成的影响 [J]. *热带气象学报*, 已接收. Feng Tao, ShenXinyong, Huang Ronghui, et al. 2012. Influence of the interannual variation of cross-equatorial flow on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, Accepted.
- 冯涛, 黄荣辉, 沈新勇, 等. 2013. 2004 年与 2006 年 7~9 月西北太平洋上空大尺度环流型及其对热带低压型波列和热带气旋生成影响的差别 [J]. *大气科学*, (即将投稿). Feng Tao, Huang Ronghui, ShenXinyong. 2013. Differences between large-scale circulation patterns and their impacts on tropical depression type wave-train and tropical cyclogenesis over the western North Pacific during July–September in 2004 and those in 2006 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, (to be submitted).
- Frank W M. 1987. Tropical Cyclone-Formation: A Global View of Tropical Cyclone [M]. Elsberry R L, Ed., Office of Naval Research, 53–90.
- Fu B, Li T, Peng M S, et al. 2007. Analysis of tropical cyclogenesis in the western North Pacific for 2000 and 2001 [J]. *Wea. Forecasting*, 22: 763–780.
- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbance and storms [J]. *Mon. Wea. Res.*, 96: 669–700.
- Gray W M. 1975. Tropical Cyclone Genesis [M]. Dept. of Atmos. Sci., Paper Bo. 282. Colorado State University, Ft. Collins, CO, 121pp.
- Harr P A, Elsberry R L. 1991. Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 1448–1468.
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21: 41–52.
- 黄平, 黄荣辉. 2010. El Niño 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理 [J]. *大气科学学报*, 33, 20–26. Huang P, Huang R H. 2010: Effects of the El Niño events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33, 20–26.
- Huang P, Huang R H. 2011. Climatology and interannual variability of convectively coupled equatorial waves activity [J]. *J. Climate*, 24: 4451–4465.
- Huang P, Chou C, Huang R H. 2011a. Seasonal modulation of the tropical intraseasonal oscillations on the tropical cyclogenesis in the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 24: 6339–6352, doi: 10.1175/2011JCL14200.

- Huang P, Chou C, Huang R H. 2011b. The activity of convectively coupled equatorial waves in CMIP3 global climate models [J]. *Theor. Appl. Climatol.* (accepted)
- Huang P, Chou C, Chung C H, et al. 2012. Delayed seasonal transition of tropical wave activity in the CMIP3 global climate models [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. (accepted)
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, (S1): 95–107.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), (S1): 95–107.
- 黄荣辉, 陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究 [J]. *气象学报*, 65: 683–694.
- Huang Ronghui, Chen Guanghua. 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65: 683–694.
- 黄荣辉, 王磊. 2010. 台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系 [J]. *大气科学*, 34: 853–864.
- Huang Ronghui, Wang Lei. 2010. Interannual variation of the landfalling location of typhoons in China and its association with the summer East Asian/Pacific pattern teleconnection [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34: 853–864.
- Huang R H, Wu L, Chen G H. 2011a. Interannual variations of the activities of tropical cyclones over the Northwest Pacific and their association with the tropical western Pacific thermal states [C] // *Proceedings of XXV IUGG General Assembly*. Melbourne, Australia, 2011.
- Huang R H, Wang L, Chen G H. 2011b. Interannual variations of the tracks and landfalling locations of tropical cyclones over the Northwest Pacific and their trend under the global warming [C] // *Proceedings of the 8th Annual Meeting of AOGS*. Taipei, China, 2011.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93: 1631–1643.
- Kiladis G H, Wheeler M C, Haertel P T, et al. 2009. Convectively coupled equatorial waves [J]. *Rev. Geophys.*, 47: RG2003, doi: 10.1029/2008RG000266.
- Lander M A. 1994. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm-formation in the western North Pacific and ENSO [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 636–651.
- Landsea C W, Nicholls N, Gray W M, et al. 1996. Downward trends in the frequency of intense at Atlantic hurricanes during the past five decades [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 1697–1700.
- 李宪之. 1956. 台风生成的综合学说 [J]. *气象学报*, 27: 87–100.
- Li Xianzhi. 1956. Comprehensive theory of typhoon genesis [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27: 87–100.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004a. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. *热带气象学报*, 20: 14–22.
- Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004a. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20: 14–22.
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2004b. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征 [J]. *气象学报*, 62: 167–179.
- Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004b. The diagnostic analysis on the characteristics of large-scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62: 167–179.
- 李曾中, 程民虎, 杨振斌, 等. 2004. 1998 年台风与飓风异常成因分析 [J]. *热带气象学报*, 20: 161–166.
- Li Zengzhong, Cheng Minhu, Yang Zhenbin, et al. 2004. Analysis on the annual frequency of typhoon and hurricane in 1998 [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20: 161–166.
- 刘向文, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2009. 105°E 和 125°E 越赤道气流与南北半球变化的关系 [J]. *大气科学*, 33: 443–458.
- Liu Xiangwen, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2009. Connection of 105°E and 125°E cross-equatorial flow with the southern and Northern Hemispheric circulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33: 443–458.
- Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44: 25–42.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64: 373–390.
- Ren F M, Wu G X, Dong W J, et al. 2006. Changes in tropical cyclone precipitation over China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L20702, doi: 10.1029/2006GL027951.
- Ritchie E A, Holland G J. 1999. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 2027–2043.
- Sadler J C. 1967. On the origin of tropical vortex [C] // *Proceedings of Working Panel on Tropical Dynamic Meteorology*. Norfolk, VA: Naval Weather Research Facility, 39–54.
- Takayabu Y N, Nitta T. 1993. 3–5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71: 221–245.
- Trenberth K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming [J]. *Science*, 308: 1753–1754.
- 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展 [J]. *大气科学*, 22: 535–547.
- Wang Bin, Elsberry R L, Wang Yuqing, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 22: 535–547.
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响 [J]. *气象学报*, 64: 345–356.
- Wang Hui, Ding Yihui, He Jinhai. 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64: 345–356.
- 王继志, 莱夫特维奇 P W. 1984. 夏季 110°E 附近的低空越赤道气流与西北太平洋台风活动 [J]. *大气科学*, 8: 443–449.
- Wang Jizhi, Leftwich P W. 1984. A major low-level cross-equatorial current at 110°E during the northern summer and its relation to typhoon activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 8: 443–449.
- Wang L, Huang R H. 2013. Interdecadal variability of tropical cyclones over the South China Sea and its association with the sea surface temperature of Indian Ocean [J]. *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2013GL055123.

- 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 2009a. 近 30 年登陆我国的西北太平洋热带气旋活动的时空变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 32: 182–188. Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009 Spatio-temporal distributive characteristics of tropical cyclone activities over the Northwest Pacific in 1979–2006 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 33: 182–188.
- 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 2009b. 影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析 [J]. 大气科学, 33: 916–922. Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Quantitative analysis on large-scale circulation system modulating landfalling tropical cyclone activities in the diverse Chinese regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33: 916–922.
- 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 2009c. 西北太平洋大气准双周振荡对热带气旋活动的影响 [J]. 大气科学, 33: 416–424. Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. The modulation of quasi-biweekly oscillation on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33: 416–424.
- Webster P J, Chang H R. 1988. Equatorial energy accumulation and emanation regions: Impacts of a zonally varying basic state [J]. J. Atmos. Sci., 45: 803–828.
- 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, 39: 1844–1846.
- Wheeler M, Kiladis G N. 1999. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain [J]. J. Atmos. Sci., 56: 374–399.
- Wu L G, Wang B. 2004. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks [J]. J. Climate, 17: 1686–1698.
- Wu L G, Wang B, Braun S A. 2005. Impacts of air–sea interaction on tropical cyclone track and intensity [J]. Mon. Wea. Rev., 133: 3299–3314.
- Wu L, Wen Z P, Huang R H. 2011. A primary study of the correlation between the net air–sea heat flux and the interannual variation of western North Pacific tropical cyclone track and intensity [J]. Acta Oceanologica Sinica, 30: 27–35.
- Wu L, Chou C, Chen C T, et al. 2012a. Simulations of the present and projected western North Pacific tropical cyclone activities using a regional model [J]. J. Climate. (submitted)
- Wu L, Wen Z P, Huang R H. 2012b. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 140: 140–150.
- Wu L, Wen Z P, Wu R G, et al. 2012c. The monsoon trough and the evolution of westward-propagating synoptic-scale disturbance in the western North Pacific. Part I: Observations [J]. Mon. Wea. Rev. (submitted)
- Wu L, Wen Z P, Wu R G, et al. 2012d. The monsoon trough and the evolution of westward-propagating synoptic-scale disturbance in the western North Pacific. Part II: Theory and idealized numerical simulations [J]. Mon. Wea. Rev. (submitted)
- Wu L, Wen Z P, Huang R H, et al. 2012e. ENSO-phase dependent TD-MRG wave activity in the western North Pacific [J]. Clim. Dynam. (submitted)
- 肖文俊. 1987. 1982 年低空越赤道气流通道与台风发生的初步分析 [J]. 海洋学报, 9: 115–120. Xiao Wenjun. 1987. A preliminary analysis of low-level cross-equatorial flow and typhoon occurrences [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 9: 115–120.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22: 730–747.
- 谢义炳, 黄寅亮. 1964. 赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析 [J]. 气象学报, 34: 198–210. Hsieh Yibing, Huang Yinliang. 1964. A preliminary theoretical study about the instability of the waves along the intertropical convergence zone [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34: 198–210.
- 谢义炳, 陈受钧, 张爱良, 等. 1963. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实统计与分析 [J]. 气象学报, 33: 206–217. Hsieh Yibing, Chen Shoujun, Zhang Ailiang, et al. 1963. A preliminary statistic and synoptic study about the basic currents over southeastern Asia and the initiation of typhoons [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 33: 206–217.
- Yang G Y, Hoskins B, Slingo J. 2007a. Convectively coupled equatorial waves. Part I: Horizontal and vertical structure [J]. J. Atmos. Sci., 64: 3406–3423.
- Yang G Y, Hoskins B, Slingo J. 2007b. Convectively coupled equatorial waves. Part II: Propagation characteristics [J]. J. Atmos. Sci., 64: 3424–3437.
- 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: 42–50. Zhu Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian–western Pacific Ocean by Madden–Julian oscillation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62: 42–50.

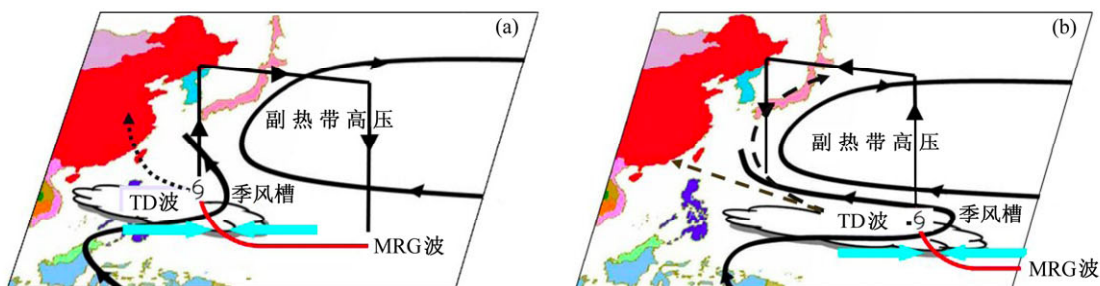


图3 西太平洋暖池热状态、季风槽、西太平洋副热带高压与西北太平洋上空 TCs 和 TCs 移动路径之间的关系示意图:(a) 暖池处于热状态;(b) 暖池处于冷状态

Fig. 3 Schematic diagrams of the relationship among the western Pacific warm pool thermal state, the monsoon trough, the western Pacific subtropical high, and moving tracks of TCs over the western North Pacific for (a) the warm state and (b) the cold state of the western Pacific warm pool

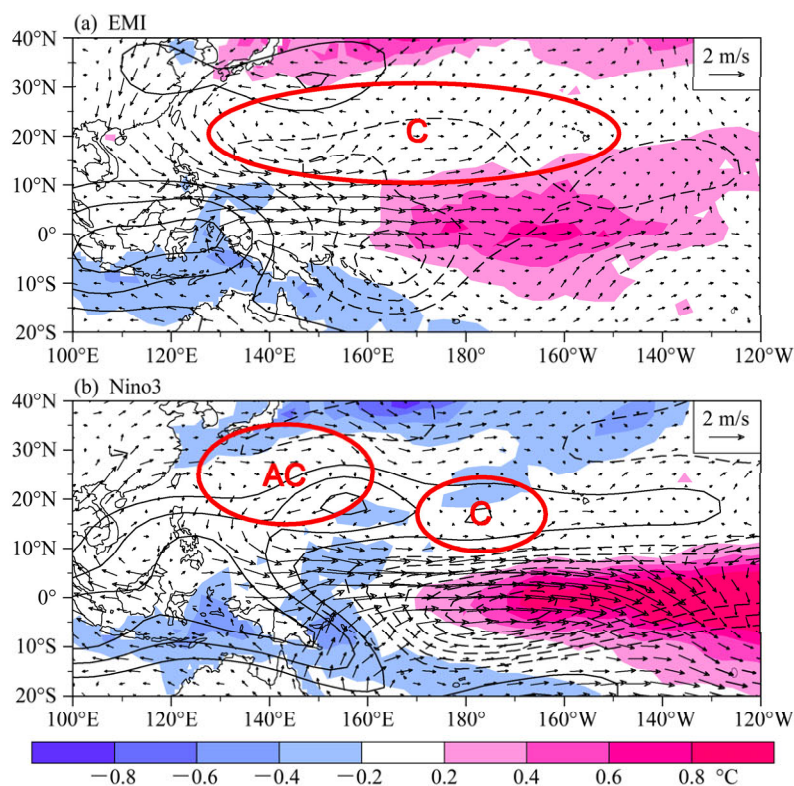


图6 两类 ENSO 事件发生年的夏季热带太平洋海表温度 (SST) 距平 (阴影), 850 hPa 距平风场 (矢量) 和对外长波辐射 (OLR) 距平 (实、虚线 单位: W/m^2) 合成分布:(a) 东太平洋增温型 El Niño 事件;(b) 中太平洋增温型 El Niño 事件 (El Niño Modoki)

Fig. 6 Composite distributions of SST anomalies (shading), 850-hPa wind anomalies (arrows) and OLR anomalies (dashed/solid contours indicate negative/positive values, units: W/m^2) in the tropical Pacific in summer (JJA) for two kinds of ENSO events: (a) The El Niño years with the tropical eastern Pacific warming pattern; (b) the El Niño years with the tropical central Pacific warming pattern (El Niño Modoki)