

西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化 及其机理研究^{*}

黄荣辉 陈光华

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京, 100080

摘 要

利用 JTWC 的热带气旋资料、NCEP/NCAR 再分析的风场资料以及 Scripps 海洋研究所的海温资料分析了西北太平洋热带气旋(TC)移动路径的年际变化及其机理。结果表明,西北太平洋 TC 移动路径有明显的年际变化并与西太平洋暖池热状态有很密切的关系。当西太平洋暖池处于暖状态,西北太平洋上空 TC 移动路径偏西,影响中国的台风个数偏多;相反,当西太平洋暖池处于冷状态,西北太平洋的 TC 移动路径偏东,影响日本的台风个数偏多,而影响中国的台风个数可能偏少。本研究以西太平洋暖池处于冷状态的 2004 年与西太平洋暖池处于暖状态的 2006 年的西北太平洋 TC 移动路径的差别进一步论证了这一分析结果并从动力理论方面分析了在西太平洋暖池不同热状态下,季风槽对赤道西传天气尺度的 Rossby 重力混合波转变成热带低压型波动(TD 型波动)的影响,以此揭示西太平洋暖池的热状态对西北太平洋 TC 生成位置与移动路径年际变化的影响机理。分析结果表明,当西北太平洋暖池处于暖状态时,季风槽偏西,使得热带太平洋上空对流层低层 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的位置也偏西,从而造成 TC 生成平均位置偏西,并易于出现西行路径;相反,当西太平洋暖池处于冷状态时,季风槽偏东,这造成了对流层低层 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的区域,以及 TC 生成的平均位置都偏东,从而导致 TC 移动路径以东北转向为主。

关键词: 热带气旋, 台风, 移动路径, 年际变化, 西太平洋暖池。

1 引 言

今年是谢义炳院士的 90 华诞。谢义炳院士是世界知名的气象学家,他不仅是中国现代大气环流理论和天气动力学研究的开拓者之一,而且也是中国现代大气科学教育的开拓者之一。他一生不仅为国家培养了众多的大气科学专家和气象工作者,而且在全球大气环流理论、湿斜压天气动力学、以及寒潮、锋面、台风与暴雨等研究领域做出了系统而创新性研究,特别在对流层中、上层冷性涡旋的发展理论方面做出了开创性的工作。他为中国大气科学的发展提出了许多有前瞻性、战略性的重大研究方向。他倡议并亲自组织和主持了第一、二届全国大气科学前沿学科研讨会,病重期间还亲自为第二届全国

大气科学前沿学科研讨会的论文集“现代大气科学前沿与展望”^[1]写祝词,他的这个倡议迄今仍然得到大气科学有关院校、研究机构和业务单位的支持,他所提出的中国大气科学重大研究方向还在继续发展,在他仙逝之后又召开了第三、四届全国大气科学前沿学科研讨会。

我作为聆听过谢义炳院士亲自授课的北大地球物理系的一名学子,并长期得到他关心、指导和启发的学生,我和我的学生从 20 世纪 80 年代中期起,致力于西太平洋暖池的热力变化及其对季风和台风活动年际变化的影响机理研究。近年来我们开展了西太平洋暖池热力作用下季风变异对台风活动年际变化的影响及其机理的研究。

中国处于西太平洋的西岸,而全球约三分之一

^{*} 初稿时间:2007 年 6 月 17 日;修改稿时间:2007 年 8 月 16 日。

资助项目:国家“973 计划”项目(2006CB403601)、国家海洋专项(908-02-01-02)和国家重大支撑项目“重大海洋灾害预警及应急技术研究”第 3 课题(2006BAC03B03)。

作者简介:黄荣辉,主要从事行星波动力学、大气环流理论和热带海-气相互作用及对季风、台风影响研究。E-mail hrh@lasg.iap.ac.cn

(年均约 30 个)的 TC 在西太平洋形成,由于受东风带和副热带高压的影响,在西太平洋生成的热带气旋中一大部分移向中国、日本、菲律宾、越南和韩国等地并登陆,给这些国家造成巨大的经济损失和人员伤亡。中国是世界上少数遭受台风灾害最严重的国家之一,平均每年大概有 7—8 个台风登陆中国,最多 12 个左右。一般,每年影响中国(但不一定在中国登陆)的台风有 10 个以上。谢义炳先生早在 20 世纪 50—60 年代就对台风移动路径、赤道辐合带(ITCZ)对于台风发生、发展的动力作用等方面做了重要研究^[2-4]。特别是在有的研究强调台风生成、发展的热力条件时^[5],他毅然在“赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析”一文中提出了赤道辐合带上扰动切变不稳定理论,指出了台风生成、发展的动力条件。随后,中国许多学者对台风的生成、发展和移动路径作了不少研究,如陈联寿、丁一汇^[6]、丁一汇等^[7]和陈联寿等^[8]。近年来李英等^[9-10]、徐亚梅、伍荣生^[11]和 Chan^[12-13]等做了系统的研究。同样,在国际上关于 TC 也有大量研究,Elsberry^[14]、王斌等^[15]对 20 世纪 80—90 年代国际上有关台风的观测事实、动力理论及其数值模拟和台风路径的预报等研究进展作了系统的回顾;并且王斌等^[15]对于国际上热带气旋动力学研究进展也做了深入的综述。

然而,应该看到以前的许多研究主要强调 TC 的天气学方面,如台风的强度、结构、移动路径和登陆后的天气以及台风生成和发展的机理等。相对而言,TC 的气候学研究起步较晚,并且,在 TC 的气候学研究中较多的研究集中讨论 TC 的季节内变化,如 Liebmann 等^[16]、祝从文等^[17]指出西太平洋台风活跃与 30—60 d 振荡(MJO)西风位相有密切关系,Harr 和 Elsberry^[18]、王慧等^[19]指出西太平洋季风活跃对 TC 的活跃有很大影响。最近,围绕着全球变暖背景下台风的强度和生成个数是否增加这个问题,国际上兴起了台风气候学的研究热潮,特别是关于西北太平洋台风活动的年际变化和年代际变化正在吸引着许多学者的关注^[20-22]。

以往关于西北太平洋 TC 年际变化的研究主要集中于考察 TC 活动与赤道中东太平洋海表温度所引起的 ENSO 事件以及热带西太平洋暖池热状况的联系(Chan^[12-13,23],陈光华和黄荣辉^[24-25],吴迪生^[26])。这些研究指出 ENSO 事件与西北太平洋

TC 生成总数之间没有明显的关系,但在 El Niño 年(暖池偏冷年)的夏秋季,西北太平洋东南海域 TC 活动频繁,而西北太平洋的西北海域活动减弱;并且,在 El Niño 年 TC 平均生命史要比 La Nina(暖池偏暖年)年的长。但是,关于西北太平洋 TC 移动路径的年际变化研究较少,并且对 TC 平均生成位置年际变化的机理也还需要进一步研究。西北太平洋 TC 移动路径的年际变化对于登陆中国台风个数的年际变化有重要影响。为此,有必要开展西北太平洋海域 TC 移动路径的年际变化规律和特征的研究,以便提高登陆中国台风个数的跨季度预测水平,减轻台风给中国造成的经济损失和人员伤亡。此外,由于无论 ENSO 循环或亚洲季风都与西太平洋暖池的热力状态密切相关^[27-30],西太平洋暖池的热力状态势必影响西北太平洋 TC 的生成和移动路径。因此,本研究将利用再分析资料和海洋有关的观测资料分析西北太平洋 TC 生成区域和移动路径的年际变化,以及它们与西太平洋暖池热力状态的关系,并从动力理论来分析和讨论西太平洋暖池的热力状态通过热带波动来影响西北太平洋 TC 活动年际变化的机理。

2 数据和资料来源

本文首先利用美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)1959—2006 年 TC 生成位置、强度和移动路径的资料。为简单起见,本文强调具有一定强度 TC 活动的年际变化,故下文中的 TC 指的是热带风暴强度以上的气旋。

本文所用太平洋次表层海洋数据资料取自美国 Scripps 海洋研究所联合海洋环境数据分析中心(JEDA)的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 月平均资料;日本气象厅海洋调查船“启风丸(Keifu Maru)”所观测的 137°E 的西太平洋海温资料。大气环流资料取自 NCEP/NCAR 再分析的逐日数据资料。

3 西北太平洋 TC 移动路径的年际变化及其与西太平洋暖池热力状态的关系

西太平洋暖池是全球海温最高的海域,全球有 95% 海表温度超过 28.5°C 的暖海水集中在此区域,故又称暖池(The Warm Pool)。该区域也是 Walker 环流的上升支,因此,其海域海-气相互作用十分剧烈,强烈的暖湿气流辐合导致该区域出现强烈的

上升气流和对流活动。许多研究都表明此海域的热力状态对于热带西太平洋和东亚、东南亚地区季风的年际变化有很大影响^[27-30];并且,陈光华和黄荣辉^[24-25]的研究表明此海域的热状态对于热带西太平洋热带气旋生成位置有很大影响。因此,此海域的热状态对于西北太平洋 TC 的移动路径也会有很大影响。

3.1 西太平洋暖池热力的年际变化

若把 1959—2003 年西北太平洋热带气旋和台风路径都画在一张图上,可以看到 TC 的路径是杂乱无章,似乎没有规律。然而,我们把这些 TC 的移动路径依西太平洋暖池次表层的热状态划分,则可以得到很有趣的现象。众所周知,某海域海-气相互作用是直接与该海域海洋的热容量(Oceanic Heat Content)密切相关,而海洋热容量异常一般取决于该海域表层和次表层海温的异常。Cornejo-Garrido 和 Stone^[31]的研究表明了西太平洋暖池有很大的热容量,正是由于如此巨大的热容量才造成这一海域上空有强的上升气流,因此,此海域是全球海洋中海-气相互作用最强的区域。

由于西太平洋暖池在次表层的 100—150 m 深的海温有很明显的年际变化^[27-30]。因此,本研究取(0° — 16° N、 125° — 165° E)海域的 120 m 深的海温作为衡量西太平洋暖池热状态的标准。从西太平洋暖池(0° — 16° N、 125° — 165° E)海域 120 m 深 7—10 月平均的海温距平(图 1)可以看到,此海域次表层的海温有很大的年际变化。定义此区域平均的海温距平大于 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 的年份为暖年,小于 -1.5°C 为冷年,则可得到 1970, 1975, 1978, 1998, 1999 和 2000 年为西太平洋暖池的暖年,而 1972, 1982, 1987, 1991, 1993 和 1997 年为西太平洋暖池的冷年。并且,陈光华和黄荣辉^[24-25]的研究结果表明了西北太平洋 TC 生成与 NINO3.4 的 SST 和 SOI 指数相关并不好,未能达到 95% 的信度检验,只有与上述西太平洋暖池区域次表层 120 m 深的 ST 有很好的相关,它们相关超过 95% 的信度检验。

3.2 西北太平洋 TC 的移动路径与西太平洋暖池热力状态的关系

图 2 是本研究所定义西太平洋暖池处于暖年(1970, 1975, 1978, 1998, 1999 和 2000 年)以及处于冷年(1972, 1982, 1987, 1991, 1993 和 1997 年)

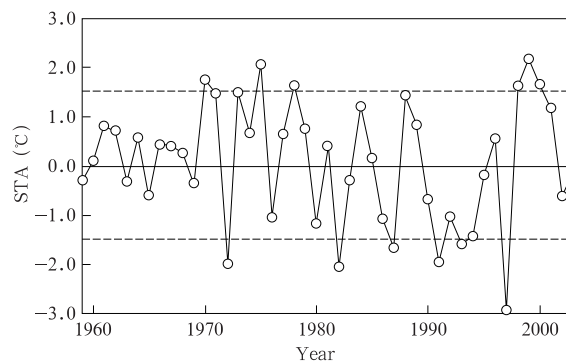


图 1 1959—2003 年西太平洋暖池(0° — 16° N、 125° — 165° E)海域次表层 120 m 深 7—10 月平均海温距平的年际变化(1971—2000 年各月海温的气候平均值取为正常值)

Fig. 1 Interannual variations of the subsurface sea temperature anomaly (relative to the climatological normals of July, August, September and October from 1971 to 2000; $^{\circ}\text{C}$) at 120 m depth averaged over the period from July to October and the West Pacific warm pool area of 0° — 16° N, 125° — 165° E during 1959—2003

7—10 月西北太平洋 TC 移动路径的合成分布。从图 2a 可以看到,当西太平洋暖池处于暖年的夏季和初秋,西北太平洋上空的 TC 移动路径偏西、偏北,其中一大部分 TC 进入 140°E 以西海域,特别是进入中国东南沿海,并常在中国的台湾、福建、浙江等地登陆。然而,从图 2b 可以看到与图 2a 所示有较大差别的西北太平洋 TC 移动路径,即当西太平洋暖池次表层海温处于冷年的夏季和初秋,西北太平洋上空的 TC 移动路径偏东,其中一大部分 TC 在 130° — 140°E 附近就转向日本及日本以东地区移动,并且另有一部分台风向中国华南地区和越南方向移动,这会导致在中国广东省和越南北部登陆的 TC 较多,而在中国东南沿海省份登陆的 TC 较少。

为了更进一步分析西北太平洋 TC 移动路径与西太平洋暖池热力状态的关系,本研究分析了西太平洋暖池次表层热状态处于暖年与处于冷年西北太平洋各区域年平均 TC 活动个数之差(图 3)。从图 3 可以看到,西太平洋暖池的暖年与冷年西北太平洋上空各格点上年平均 TC 活动个数之差的正值位于菲律宾附近、中国东部、南部的沿海地区以及东海和南海一带,而负值位于菲律宾以东的热带西太平洋、日本及以东地区。显然,当西太平洋暖池处于暖

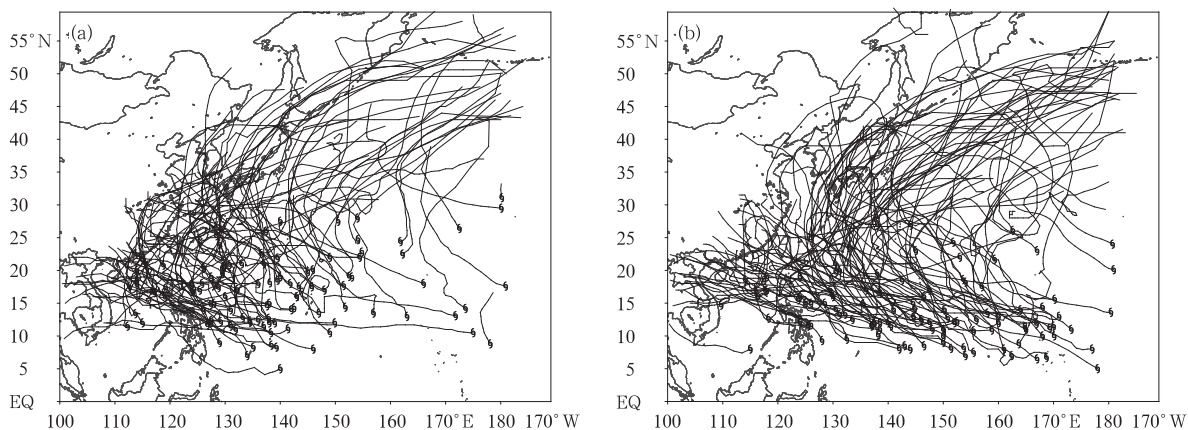


图 2 西太平洋暖池处于暖年(a)和冷年(b)7—10月西北太平洋上空的 TC 移动路径的合成分布

Fig. 2 Composite distributions of the moving track of tropical cyclones (TCs) from July to October over the Northwest Pacific for the warm (a) and cold (b) state years of the West Pacific warm pool

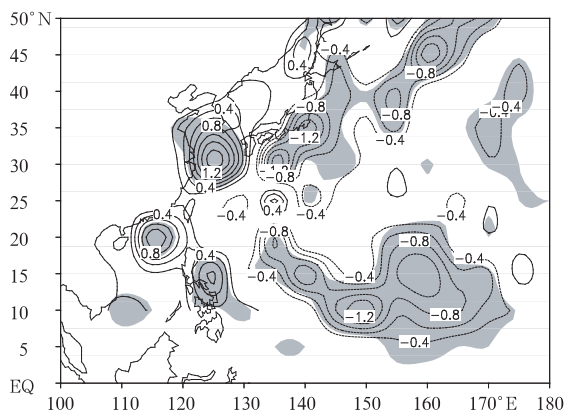


图 3 西太平洋暖池为暖年与冷年的西北太平洋上空各网格点上年平均 TC 活动个数之差
(阴影部分表示显著性检验超过 95% 区域)

Fig. 3 Distribution of the difference of the annual mean number of TC activities from July to October at various grid-points over the Northwest Pacific between the warm and cold state years of the West Pacific warm pool
(The areas over the 95% significance level are shaded)

年时, 正的差值位于西北太平洋的偏西位置, 而负值位于偏东位置。这表明: 当西太平洋暖池处于暖年时, 则西北太平洋 TC 的活动路径偏西, 而西太平洋暖池处于冷年时, 则西北太平洋 TC 的移动路径偏东。因此, 在西太平洋暖池偏暖状态时, 影响菲律宾、中国东南沿海和东部的 TC 可能偏多; 而当西太平洋暖池处于偏冷状态下, 影响中国东南沿海和东部的 TC 可能偏少, 而影响菲律宾以东的热带西太平洋以及日本南部诸岛和日本东部的 TC 偏多。

4 热带西太平洋 TC 生成源地对西北太平洋 TC 移动路径的影响

陈光华和黄荣辉^[24-25]的研究表明西北太平洋 TC 的生成源地依赖于西太平洋暖池的热力状态。当西太平洋暖池处于暖年(图 4a), 由于西太平洋副热带高压偏北, 季风槽位于热带西太平洋偏西、偏北侧, 这使得 TC 容易在热带西太平洋的偏西侧生成; 相反, 当西太平洋暖池处于冷年(图 4b), 由于西太平洋副热带高压偏南, 季风槽位于热带西太平洋偏东、偏南侧, 这使得 TC 容易在热带西太平洋的偏东、偏南侧生成。

为了研究热带西太平洋 TC 生成源地对它们在西北太平洋上空的移动路径的影响(图 4a 和 4b), 本研究把热带西太平洋以 15°N , 150°E 为界依西北、西南、东南和东北象限分别划分成 1, 2, 3 和 4 区。从图 4a 可以看到: 当西太平洋暖池处于暖年, 则 TC 在第 1, 2 区生成多, 而在西太平洋暖池处于冷年, 则 TC 在第 2, 3 区生成多; 并且从图 4a 和 4b 还可以看到, 无论西太平洋暖池处于暖年或冷年, TC 在第 4 区的生成个数少。为此, 在下面只讨论 TC 在 1, 3 和 2 区生成对它们在西北太平洋上空移动路径的影响。

从热带西太平洋 1 区生成的 TC 在西北太平洋上空的移动路径分布(图 5a)可以明显看到, 1 区生成的 TC 较多在西北太平洋上空往西北方向移动, 其中较多的 TC 进入 130°E 以西的西北太平洋, 这导致了较多的 TC 登陆或影响中国。因此, 在 1 区生

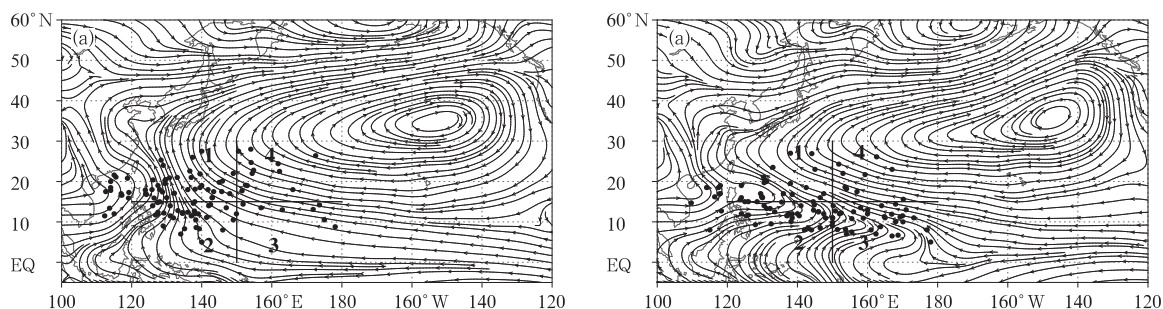


图 4 西太平洋暖池处于暖(a)和冷年(b)时,西北太平洋上空 7—10 月 850 hPa 流场和 TC 生成源地的合成分布

Fig. 4 Composite distributions of 850 hPa stream field and origins (thick black dots) of tropical cyclones in July–October for the warm (a) and cold state (b) years of the West Pacific warm pool

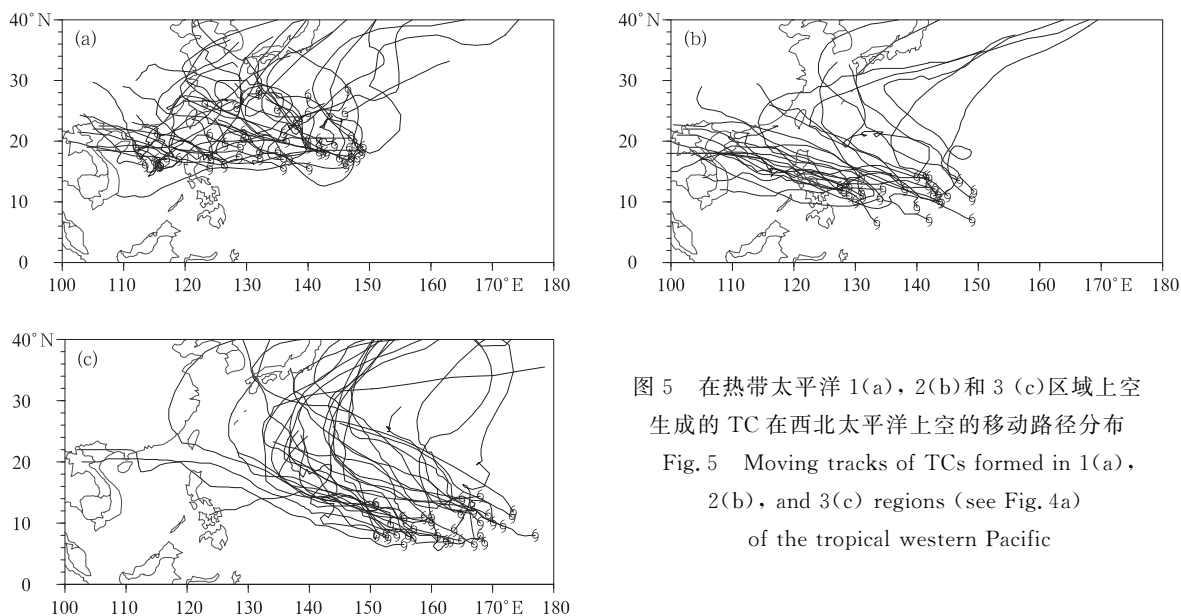


图 5 在热带太平洋 1(a), 2(b)和 3 (c)区域上空生成的 TC 在西北太平洋上空的移动路径分布

Fig. 5 Moving tracks of TCs formed in 1(a), 2(b), and 3(c) regions (see Fig. 4a) of the tropical western Pacific

成的 TC 在西北太平洋移动路径偏西北方向,这种情况下登陆中国的台风个数较多。图 5c 表示在西太平洋暖池处于冷年下 3 区生成的 TC 在西北太平洋上空的移动路径。从图 5c 也可以明显看到,3 区生成的 TC 大部分在西北太平洋上空往西北移动到 140°E 附近就转向东北移动,很少 TC 能移入 130°E 以西海域的上空。因此,在这种情况下,登陆中国的台风个数就偏少,而影响日本及以东地区的台风增多。此外,从 2 区生成的 TC 在西北太平洋上空的移动路径(图 5b)可以看到,在 2 区生成的 TC 在西北太平洋上空大部分往偏西方向移动,经菲律宾进入中国南海、华南地区和越南北部,但也有一部分在西北太平洋上空往西北方向移动,并在 130°E 附近转向东北方向移动。由于在西太平洋暖池处于暖年或冷年下,有一部分 TC 都可以在 2 区生成,因此,

单纯由西太平洋暖池热力状态来预报 TC 在西北太平洋上空的移动路径,对于在 2 区生成的 TC 就会产生一些偏差。然而,不管西太平洋处于暖或冷状态,2 区生成的 TC 大部分在西北太平洋往西方向移动,并经菲律宾进入中国南海和华南地区以及越南北部,这对于预报登陆中国华南地区的 TC 路径是有一定帮助的。

5 2004 年与 2006 年西北太平洋 TC 的移动路径的差别

图 6a 和 6b 分别是由日本气象厅“启风丸”(Keifu Muru)海洋调查船所测得 2004 年 7 月和 2006 年 7 月沿 137°E 西太平洋海温距平的纬度-深度剖面^[32]。从图 6a 可以看到,在 0° — 12°N 的热带西太平洋海洋次表层的海温距平为较大的负值,在 5°N 、

100—150 m 深处的海温约比气候平均值偏低了 7°C , 因此, 可以说 2004 年夏季西太平洋暖池处于冷年。而从图 6b 所示的 2006 年 7 月热带西太平洋的海温距平分布可以看到, 2006 年 7 月西太平洋暖池呈现出与图 6a 相反的海温距平分布, 在 5° —

14°N 纬度带次表层的海温从负变成正, 此纬度 100—150 m 深的海温距平为 2.0°C 以上, 这说明在 2006 年 7 月 5° — 14°N 的热带西太平洋被暖水所控制。因此, 可以说 2006 年夏季西太平洋暖池处于暖年。

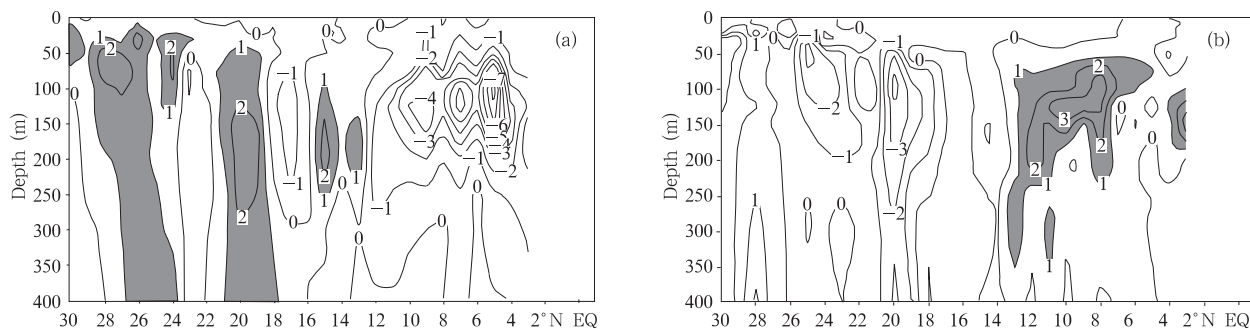


图 6 日本气象厅“启风丸”(Keifu Maru)号海洋调查船测得 2004 年 7 月(a)和 2006 年 7 月(b)沿 137°E 西太平洋海温距平的纬度-深度剖面^[32]

(单位: $^{\circ}\text{C}$, 阴影区表示高于 1.0°C 海温距平)

Fig. 6 Latitude-depth cross sections of the West Pacific subsurface sea temperature anomaly along 137°E in (a) July 2004 and (b) July 2006, observed by the Oceanographic Research Vessel Keifu Maru of JMA^[32]
(The ST anomalies over 1.0°C are shaded; $^{\circ}\text{C}$)

图 7a 和 7b 分别是 2004 和 2006 年的 5—11 月西北太平洋 TC 的移动路径分布。从图 7a 可以看到: 2004 年西北太平洋上空 TC 的移动路径偏东, 大部分 TC 首先往西北方向移动, 到了 130°E 附近转向东北移动, 而进入 130°E 以西洋面的台风较少。因此, 在 2004 年影响日本的台风异常之多, 多达 10 个, 这给日本造成严重的经济损失和不少的人员伤亡, 而登陆中国的台风就较少, 这使得 2004 年中国由台风造成的经济损失和人员伤亡也较少。图 7b 显示出与图 7a 差别较大的 2006 年西北太平洋 TC 的移动路径。从图 7b 可以看到: 2006 年西

北太平洋上空 TC 的移动路径偏西, 大部分 TC 往西或西北方向移动, 并进入 130°E 以西的洋面, 而较少台风在 130°E 以东洋面转向东北移动。因此, 在 2006 年影响中国的台风不仅多, 而且强, 有 8 个台风登陆中国, 其中有 6 个是强台风, 另外还有 5 个未登陆但对中国有影响的台风和登陆中国但已变成热带低压^[26]。这些给中国造成严重的经济损失和重大人员伤亡, 特别是“碧利斯”和“桑美”超强台风给中国带来数百亿的巨大经济灾害, 近 1000 人死亡和失踪。但在 2006 年, 日本因台风造成的损失却不大。

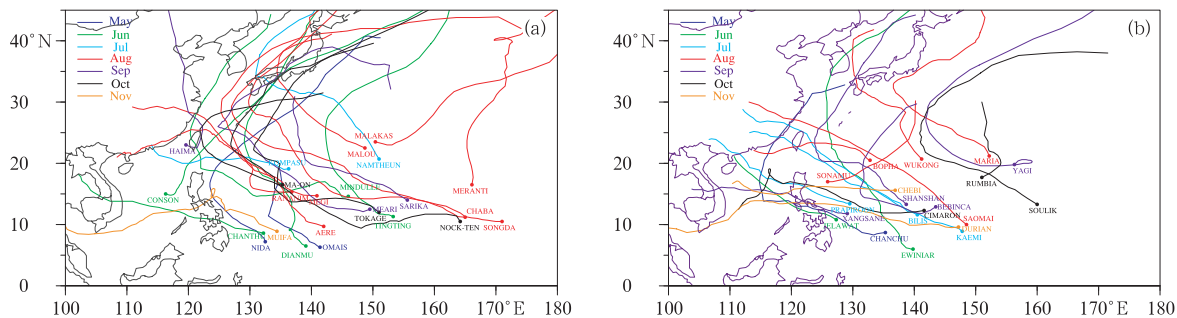


图 7 2004 年(a)和 2006 年(b)的 5—11 月西北太平洋 TC 的移动路径分布

Fig. 7 Tracks of TCs over the Northwest Pacific in the May–November of (a) 2004 and (b) 2006

此外,从图 7a 所示的 TC 生成地点也可以看到,2004 年大部分 TC 在 8° — 12° N、 140° — 165° E 区域生成;而 2006 年(图 7b)大部分 TC 在 10° — 20° N、 130° — 150° E 区域生成。因此,2004 年由于西太平洋暖池处于冷年,使得热带西太平洋 TC 生成源地偏东、偏南;相反,2006 年由于西太平洋暖池处于暖年,使得热带西太平洋 TC 生成源地偏西、偏北。可见 2004 与 2006 年西太平洋暖池热状态的差别以及这两年西北太平洋 TC 移动路径的差别可以证实在第 3、4 节分析所得的结论基本上是正确的。

6 热带太平洋上空季风槽对 Rossby 重力混合波向 TD 型波动转变的作用

在西北太平洋暖池处于暖年,热带西太平洋季风槽位置偏西北,故 TC 生成的地点也偏西北;相反,在西北太平洋暖池处于冷年,热带西太平洋季风槽位置偏东南,故 TC 生成的地点也偏东南。为什么热带西太平洋季风槽的位置对于 TC 生成地点有如此大的影响?这一方面是由于季风槽不仅提供了风场的纬向和经向切变,为低层气旋性环流的发展提供有利的动力条件,而且季风槽强烈的辐合所形成的强烈上升运动和对流活动为 TC 发展提供了有利的动力和热力条件;另一方面,季风槽南边纬向气流的强烈辐合也为热带 Rossby 重力混合波转变为 TD 型波动提供了动力条件。Takayabu 和 Nitta^[33]指出发源于中东太平洋的 Rossby 重力混合波沿赤道西传,在进入热带西太平洋区域后,将逐渐脱离赤道向西北方向传播,并逐渐转变为热带低压型扰动,被称为 TD 型扰动,而 TD 型扰动可以为 TC 生成提供初始涡旋。但是,季风槽区的环流在两类波动的转化过程中所起的作用还不是很清楚,因此有必要从动力学上进一步分析热带西太平洋季风槽对这两类大气高频波动转换的动力作用,从而进一步来揭示西太平洋暖池不同热状态对 TC 生成的影响。

6.1 季风槽区南侧纬向风辐合对 Rossby 重力混合波向 TD 型波动转变的动力作用

根据 Lighthill 的推导^[34],对于一维流体波动的位相函数可写成

$$\theta = kx - \omega_a t \quad (1)$$

其中 k 为波数, ω_a 为波动的绝对频率,它为 k 和 x

的函数,即

$$\omega_a = \omega[k(x), x]$$

由式(1)可知

$$\begin{aligned} k &= \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \omega_a &= -\frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

这样,从式(2)便可得到

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\frac{\partial \omega_a}{\partial x} \quad (3)$$

若一个固有频率为 ω_r 的波动在基本流 $\bar{U}(x)$ 上传播,则此波动的绝对频率 ω_a 可写成为

$$\omega_a = \bar{U}(x)k + \omega_r \quad (4)$$

并且,根据 Matsuno^[35]于 1966 年的推导,在热带地区波数为 k 的 Rossby 重力混合波的固有频率 ω_r 是

$$\omega_r = \frac{1}{2}kC_0 - \sqrt{\left(\frac{1}{2}kC_0\right)^2 + \beta C_0} \quad (5)$$

这样,可得

$$\omega_a = \bar{U}(x)k + \frac{1}{2}kC_0 - \sqrt{\left(\frac{1}{2}kC_0\right)^2 + \beta C_0}$$

上式 C_0 为重力波的相速度,即 $C_0 = \sqrt{gH}$, β 是热带地区的科氏参数随纬度的变化。这样,由式(3)和(4)便可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} &= -\frac{\partial \omega_a}{\partial x}(x, k) = \\ &= -k \frac{\partial \bar{U}(x)}{\partial x} - \bar{U}(x) \frac{\partial k}{\partial x} - \frac{\partial \omega_r}{\partial x} \end{aligned} \quad (6)$$

若定义 $\frac{d_g k}{dt}$ 为波数 k 的波动沿它的群速度 C_g 的随体微商

$$\frac{d_g k}{dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + C_g \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \quad (7)$$

由式(4)可得, $C_g = \frac{\partial \omega_a}{\partial k} = \bar{U}(x) + \frac{\partial \omega_r}{\partial k}$

若把上式和式(6)代入式(7),则可得

$$\begin{aligned} \frac{d_g k}{dt} &= -k \frac{\partial \bar{U}(x)}{\partial x} - \bar{U}(x) \frac{\partial k}{\partial x} - \frac{\partial \omega_r}{\partial x} + \\ &= \left(\bar{U}(x) + \frac{\partial \omega_r}{\partial k}\right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = \\ &= -k \frac{\partial \bar{U}(x)}{\partial x} - \bar{U}(x) \frac{\partial k}{\partial x} - \frac{\partial \omega_r}{\partial x} + \\ &= \bar{U}(x) \cdot \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial \omega_r}{\partial k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = \\ &= -k \frac{\partial \bar{U}(x)}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

Webster 和 Zhang^[36] 对于热带 Rossby 波也得到同样的方程。可见式(8)不仅适合于热带 Rossby 波,也适合于热带 Rossby 重力混合波。由式(8)可知,若在热带西太平洋上空对流层低层纬向风强烈辐合,则波动的波数将增大,波长将缩短。一般,在季风槽区的槽部南侧,它的东边是东风,而西边是西风,这样就有强的 $\frac{d\bar{u}(x)}{dx} < 0$, 即纬向风有强烈的辐合,这使得 Rossby 重力混合波的波数 k 逐渐增大,波长缩短。这说明了波长较长的 Rossby 重力混合波在季风槽区南侧的强辐合区可以产生波性质的转变,演变成波长较短的 TD 型波动。此外,这两类波动的转换过程还伴随有位相波速减缓,波动周期增加的特征。正如文献[3]所述,谢义炳先生早在 20 世纪 60 年初就指出在热带辐合带上可以发展高频波动。

6.2 热带西太平洋上空 Rossby 重力混合波向 TD 型波动的转变

由于热带西传的高频波动的主要周期为 3—6 d。因此,本节对 850 hPa 风场进行 3—6 d 带通滤波,然后利用理论上得到的线性 MRG 频散关系与资料计算所得的结果进行对比,以此考察热带西传高频波动的波数和频率在赤道太平洋上空不同位置的变化特征。

首先利用无基流情况下线性的 MRG 波动频散关系式(5)(其中 $C_0 = \sqrt{gH}$, H 代表大气相当厚度),绘制在不同 H 情况下波数和频率的分布。如果考虑基本纬向气流的情况,则 $\omega_r = \omega_a - \bar{u}(x)k$, 其中 ω_r 为固有频率, ω_a 为多普勒频率。选取赤道上不同经度位置的经向风作为参考点,画出点相关滞后分布图,可以得到赤道不同经度上的多普勒频率 ω_a 和波数 k , 同时根据基本纬向流的大小,通过以上公式可以计算出固有频率 ω_r 。图 8 中点出赤道上 150°E、160°E、170°E、180°、170°W 所计算的频率和波数的位置。从图中可以看出,存在于中太平洋地区(170°E、180°、170°W 作为代表)上空的波动基本满足线性 MRG 波所要求的波数频率条件。随着波动向西移动,波数和频率的分布将趋近于大 H 值所对应的线性 MRG 波数和频率。在 150°E 位置时,所对应的 $H \rightarrow \infty$, 这说明了当赤道波动由中太平洋地区传播到 WNP 后,波动的性质已经由原来的线性 MRG 波向另一类波动类型转变。

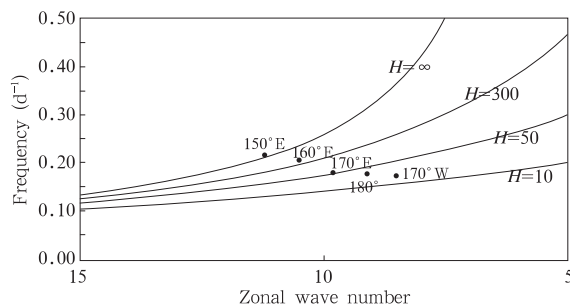


图 8 由式(5)所计算的理论上 Rossby 重力混合波的固有频率 ω_r (实线)与从 3—6 d 带通滤波的观测风场计算而得到的实际 Rossby 重力混合波的固有频率(黑点)

Fig. 8 Comparison between the variations of the eigen-frequency (ω) of the mixed Rossby-gravity waves calculated from theoretical Formula (5) (solid lines) and the 3—6 day filtered observed wind field (black dots)

7 西太平洋暖池不同热状态下热带太平洋上空大气高频波动之间的转变

由于季风槽槽部南侧对流层低层纬向风的强辐合,使得西传 Rossby 重力混合波能转换成 TD 型波动,并偏离热带地区向西北方向移动。然而,由于西太平洋暖池的热状态影响季风槽的位置,从而影响着纬向风辐合区的位置,这将导致热带 Rossby 重力混合波向 TD 型波动转变区域的不同。在西太平洋暖池处于暖年时,季风槽位于偏西、偏北,故流场的辐合区位于热带西太平洋的偏西侧上空;而在西太平洋暖池处于冷年时,季风槽位于热带西太平洋的偏南、偏东侧上空,故流场的辐合区位于热带西太平洋偏东侧上空。因此,很有必要分析在西太平洋暖池不同热状态下热带太平洋上空大气高频波动之间的转变,从而揭示西太平洋暖池热状态影响西北太平洋 TC 活动变化的机理。

由于 OLR 从 1980 年才有较好的资料,故在以下分析中对 1980—2001 年 7—10 月的 850 hPa 风场资料进行带通滤波(只保留 3—6 d 周期的波动),以此来分析暖池处于暖年和冷年时,热带西太平洋 Rossby 重力混合波转换成 TD 型波动的区域差异。

7.1 西太平洋暖池处于暖年

图 9a 是西太平洋暖池处于暖年下,以(0°N、160°E)经向风为参考点线性回归的热带太平洋上空 850 hPa 高频变化风场和 OLR 距平场的分布。从

图 9a 可以看到:超前 1 天回归的 850 hPa 扰动风场呈现出一个以(0°N 、 160°E)为中心的气旋式扰动环流,并且,由负的 OLR 距平区所代表的强对流区并未出现在气旋扰动环流中心,而位于在气旋式扰动风场中心的西南侧,而弱对流区处于中心的西北侧;并且,同时回归的 850 hPa 扰动风场呈现出原先气旋式扰动环流已向西移动,参考点的扰动风场出现一致的南风气流,而它的东侧为反气旋式环流所控制,在气旋和反气旋环流之间的南风气流北侧为

对流活动活跃区,而南侧为对流活动衰减区;落后 1 天回归的 850 hPa 风场和 OLR 距平场呈现出与超前 1 天回归场正相反分布特征。此外,从回归的扰动风场分布还可以看到,这种线性回归得到的扰动风场分布正是相对于赤道成反对称分布。因此,这种扰动风场和对流活动的配置正是与热带 Rossby 重力混合波相关的扰动风场与对流活动的配置相吻合,这也与 Tukayabu 和 Nitta^[33]的分析结果一致。此外,这种波动只限于对流层低层(图略)。

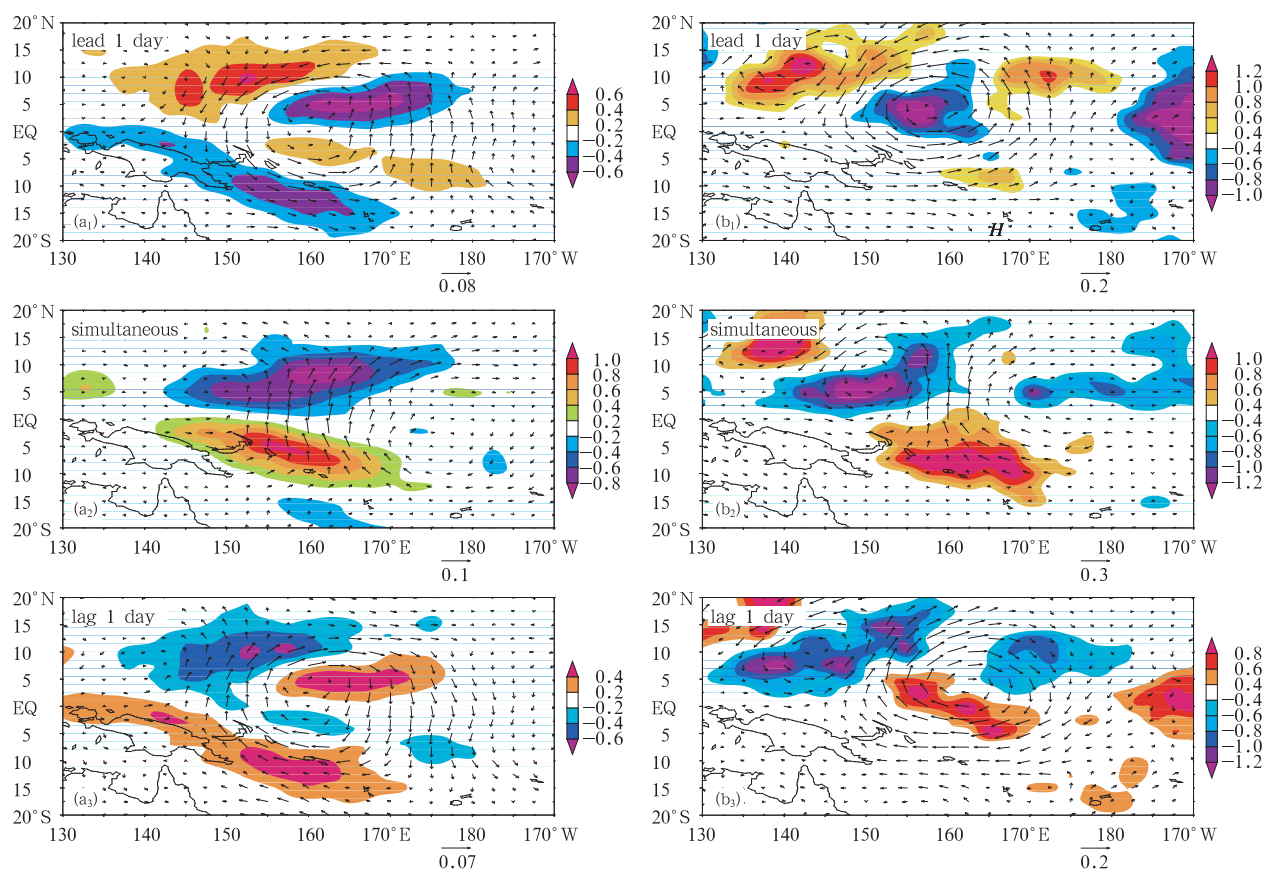


图 9 西太平洋暖池处于暖年(a)和处于冷年(b)下以(0°N 、 160°E)经向风为参考点超前 1 d(a_1 、 b_1),同时(a_2 、 b_2)和落后 1 d(a_3 、 b_3)线性回归的热带太平洋上空 7—10 月 850 hPa 扰动风场和 OLR 距平场的合成分布
(蓝色阴影区表示强对流区)

Fig. 9 Composite distributions of 850 hPa linearly regressed perturbation wind field and OLR anomalies over the period from July to October for the warm (a) and cold (b) state years of the Western Pacific warm pool under the case of taking the meridional component of wind at point (0°N , 160°E) as the reference point

(a_1 , b_1 . lead 1 day, a_2 , b_2 . simultaneous, a_3 , b_3 . lag 1 day; the areas of strong convective activities are shaded with blue color)

从以上分析可以看到,在热带西太平洋暖池处于暖年下,热带西太平洋偏东侧还存在明显热带 Rossby 重力混合波。这也说明,在赤道 160°E 的经度上, Rossby 重力混合波还未转变为 TD 型扰动,而发生传播方向的偏离。

7.2 西太平洋暖池处于冷年

图 9b 是西太平洋暖池处于冷年下,以(0°N 、 160°E)经向风为参考点线性回归的热带西太平洋上空 850 hPa 7—10 月高频风场和 OLR 距平场分布。从图 9b 可以看到,在西太平洋暖池处于冷年时,热

带西太平洋上空的波动特征完全与图 9a 所示的热带太平洋上空的波动特征不同,无论是超前 1 天,或是同时和落后 1 天的 850 hPa 回归扰动风场都呈现出西南—东北倾斜的波动结构特征,并且负的 OLR 距平区所表示的强对流活动中心位于此气旋扰动风场的中心,这与西太平洋暖池处于暖年热带中太平洋 Rossby 重力混合波的强对流偏离气旋扰动环流中心截然不同;并且从图 9b 可以看到这种波动往热带西太平洋的西北方向传播,这种波动的特征呈现出波长较短的热带 Rossby 波特征。这种波动正是 Takayabu 和 Nitta^[33] 于 1993 年提出的 TD 型波动,它在对流层高低层耦合比较紧密(图略)。

上述分析结果清楚表明:当西太平洋暖池处于暖年时,由于热带西太平洋季风槽偏西,季风槽槽部南侧纬向风的强辐合区也偏西,这使得热带西太平洋上空对流层低层的 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的位置也偏西,因此。在这种情况下,在 0°N 、 160°E 附近的高频波动还表现为 Rossby 重力

混合波的特征;而当西太平洋暖池处于冷年时,由于季风槽偏东,季风槽南侧的强辐合区也偏东,这使得热带太平洋对流层低层的 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动也偏东,因此,在这种情况下,在 0°N 、 160°E 附近的高频波动已表现为 TD 型波动了。

8 结论和讨论

本文利用美国 JTWC 的 TC 资料, NCEP/NCAR 的风场再分析资料以及 Scripps 海洋研究所的海温资料和 JMA 的 137°E 海温剖面观测资料系统地分析了西北太平洋上空 TC 移动路径的年际变化及其机理。分析结果表明了西北太平洋上空 TC 移动路径有明显的年际变化,并与西太平洋暖池热状态(特别是次表层海温)有很大关系。当西太平洋暖池处于暖年,西北太平洋上空的 TC 移动路径偏西,影响中国的台风个数偏多(图 10a);相反,当西太平洋暖池处于冷年,西北太平洋的 TC 移动路径偏东,影响日本的台风个数偏多,而影响中国的台风

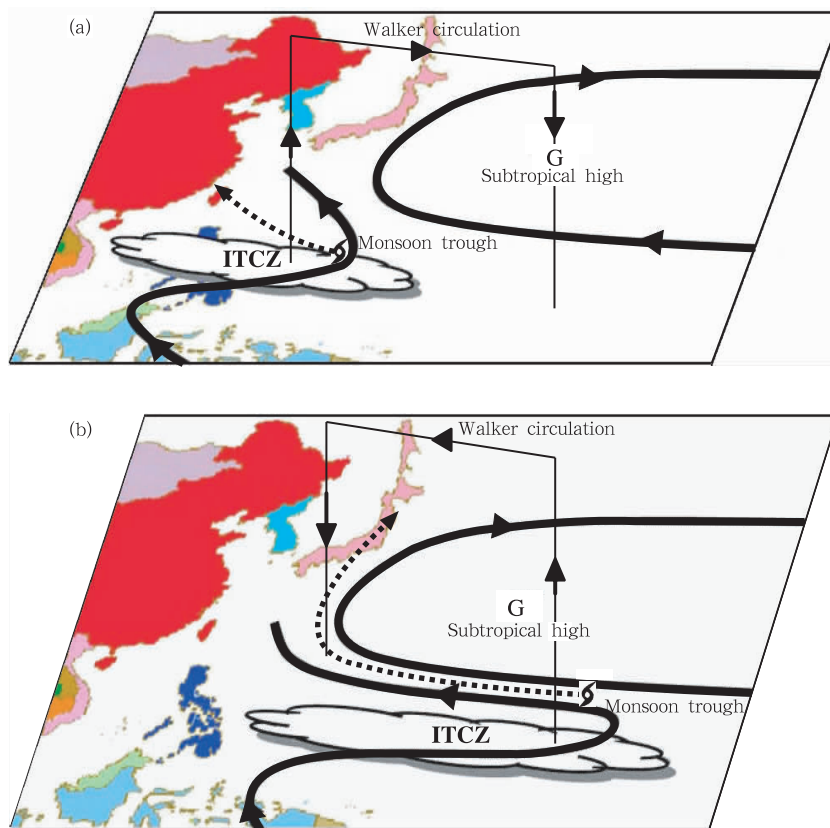


图 10 西太平洋暖池热状态、季风槽、副热带高压与西北太平洋 TC 移动路径的关系
(a. 暖池为暖年, b. 暖池为冷年)

Fig. 10 Schematic diagrams of the relationship among the thermal state of West Pacific warm pool, the monsoon trough, the western subtropical high and moving tracks of TCs over the Northwest Pacific for (a) the warm and (b) cold state years of West Pacific warm pool

个数可能偏少(图 10b)。本研究以西太平洋暖池处于冷年的 2004 年与处于暖年的 2006 年西北太平洋 TC 移动路径的差别进一步论证了这一分析结果。

并且,本研究还进一步从动力理论上分析和讨论了西太平洋暖池的热状态对季风槽及其因此而产生的热带太平洋上空对流层低层的 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的过程,从而揭示西太平洋暖池的热状态对西北太平洋上空 TC 移动路径年际变化的影响机理。分析表明了西北太平洋 TC 移动路径直接与它们的生成位置有关,而它们的生成又与热带西太平洋季风槽的位置有关。当西太平洋暖池处于暖年(图 10a),季风槽偏西,季风槽南侧纬向风的强辐合区也偏西,因此造成了热带太平洋上空对流层低层 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的位置也偏西,这就使得 TC 生成偏西,从而导致它们的移动路径也偏西;相反,当西太平洋暖池处于冷年(图 10b),季风槽偏东,季风槽南侧的纬向风的强辐合区也偏东,因此造成了热带西太平洋对流层低层 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的位置也偏东,这就使得 TC 生成偏东,从而导致它们的移动路径也偏东。

以上结论是针对西太平洋暖池不同热状态而分析的结果。但是,由于无论在西太平洋暖池处于暖年或冷年,热带西太平洋上空的 TC 都有可能在 15° N 以南、 150° E 以西的 2 区生成,对于此区域生成的 TC 移动路径大部分在热带西太平洋上空往西向中国南海、华南地区和越南北部移动。因此,此区域生成的台风不能单纯由西太平洋暖池热状态而决定,还是要进一步从季风槽南侧纬向风的强辐合所在地区和西太平洋副热带高压位置变化来分析。

参考文献

- [1] 谢义炳. 会议贺词//国家自然科学基金委员会等编. 现代大气科学前沿与展望. 北京:科学出版社,1995:3
- [2] 谢义炳,陈受钧. 东南亚基本气流与台风发生的一些事实统计与分析. 气象学报,1963,33:206-217
- [3] 谢义炳,黄寅亮. 赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析. 气象学报,1964,34:198-210.
- [4] 谢义炳,张鐔等. 初论西风带和热带辐合带环流系统的相互作用. 大气科学,1977,2:132-137
- [5] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. Mon Wea Rew, 1968, 96: 669-700
- [6] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京:科学出版社,1979:491pp
- [7] 丁一汇,范惠君,薛秋芳等. 热带辐合区多台风同时发展的初步研究. 大气科学,1977,2(1):89-98
- [8] 陈联寿,徐祥德,解以杨等. 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. 大气科学,1997,21(1):83-90
- [9] 李英,陈联寿,张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征. 热带气象学报,2004,20(1):14-22
- [10] 李英,陈联寿,王继志. 登陆我国热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征. 气象学报,2004,61(2):167-179
- [11] 徐亚梅,伍荣生. 热带气旋碧丽斯(2000)发生的数值模拟:非对称的发展及转换. 大气科学,2005,29(1):79-89
- [12] Chan J C L. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation. Mon Wea Rev, 1995, 123: 2567-2571
- [13] Chan J C L. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific. Meteor Atmos Phys, 2005, 89: 143-152.
- [14] Elsberry R L. Global perspectives on tropical cyclone. WMO, TD-No. 693, 1995, Ch. 4: 106-197.
- [15] 王斌, Elsberry R L, 王玉清等. 热带气旋运动的动力学研究进展. 大气科学,1998,22(4):535-547
- [16] 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 Meteor Soc Japan, 1994, 72: 401-411
- [17] 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 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. 气象学报,2004,62(1):42-50
- [18] Harr P A, Elsberry R L. Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1448-1468
- [19] 王慧,丁一汇,何金海. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响. 气象学报,2006,64(2):345-356
- [20] Webster P J, Holland G H, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science, 2005, 309: 1844-1846
- [21] Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 2005, 436: 686-688
- [22] Chan J C L. Comment on "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment". Science, 2006, 311: 1713-1714
- [23] Chan J C L. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Nino and La Nina events. J Climate, 2000, 13: 2960-2972
- [24] 陈光华,黄荣辉. 西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题的研究. 地球科学进展,2006,21(6):610-616
- [25] 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
- [26] 吴迪生,白毅平,张红梅等. 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,2003,19(3):253-259
- [27] Nitta Ts. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. J Meteor Soc Japan, 1987, 64: 373-390
- [28] 黄荣辉,李维京. 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. 大气科学,1988(特刊):95-107
- [29] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 1992, 70 (IB): 243-256
- [30] Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. Climate variations of the summer monsoon over China//Chang C P. East

- Asian Monsoon. World Scientific Publishing CO. Pte Ltd, 2004:213-270
- [31] Cornejo-Garrido A G, Stone P H. On the heat balance of the Walker circulation. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1155-1162
- [32] Japan Meteorological Agency. Depth-latitude section of sub-surface temperature along 137°E observed by the Research Vessel "Keifu Maru" in July 2004 and July 2006. Monthly Report on Climate System, July 2004 and July 2006, 2
- [33] Takayabu Y Ts, Nitta Ts. 3-5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean. *J Meteor Soc Japan*, 1993, 71: 221-246
- [34] Lighthill J. *Wave in Fluides*. London: Cambridge Univ Press, 1978: 504pp
- [35] Matsuno T. Quasi-geostrophic motion in the equatorial area. *J Meteor Soc Japan*, 1966, 44: 25-42
- [36] Webster P J, Chang H R. Equatorial energy accumulation and emanation regions: Impacts of a zonally varying basic state. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 803-828

RESEARCH ON INTERANNUAL VARIATIONS OF TRACKS OF TROPICAL CYCLONES OVER NORTHWEST PACIFIC AND THEIR PHYSICAL MECHANISM

Huang Ronghui Chen Guanghua

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract

Interannual variations of moving tracks of tropical cyclones (TCs) over the Northwest Pacific during the period of 1959–2003 and their physical mechanism are analyzed by using the typhoon data provided by JTWC, the wind field data from the NCEP/NCAR reanalysis dataset, and the sea temperature data provided by the Scripps Oceanographic Institute, U. S. A.. Analysis results show that interannual variations of the cyclogenesis and track of TCs over the Northwest Pacific are very obvious and closely associated with the thermal states of the Western Pacific, especially with the subsurface sea temperature of Western Pacific warm pool. When the Western Pacific warm pool is in a warm state, then the moving tracks of TCs will shift westward over the Northwest Pacific, thus, the number of typhoons influencing China may be above normal. On the contrary, when the Western Pacific warm pool is in a cold state, then the moving tracks of TCs will shift eastward, thus, the number of typhoons influencing Japan may be above normal, but the number of typhoons influencing China may be below normal. This analysis result is further demonstrated with the difference between the moving tracks of TCs over the Northwest Pacific in 2004 when the warm pool was in the cold state and in 2006 when the warm pool was in the warm state. Moreover, the physical mechanism of the impact of the thermal states of the Western Pacific warm pool on the moving tracks of TCs over the Northwest Pacific is revealed by the dynamical analysis of the influence of the thermal state of the warm pool on the monsoon trough position and the transformation from the mixed Rossby-gravity wave to the tropical depression-type disturbance, i. e., the TD type disturbance over the tropical Pacific. When the Western Pacific is in a warm state, then the monsoon trough shifts westward, thus, the convergent region of zonal wind field in the southern part of the monsoon trough also shifts westward over the Northwest Pacific. Therefore, in this case, the region of the transformation from the mixed Rossby-gravity wave to the TD type disturbance also shifts westward, which leads to the westward shift of TCs geneses and their moving tracks. On the contrary, when the Western Pacific is in a cold state, then the monsoon trough shifts eastward, thus, the convergent region of zonal wind field in the southern part of the monsoon trough also shifts eastward over the Northwest Pacific. Therefore, in this case, the region of the transformation from the mixed Rossby-gravity wave to the TD type disturbance also shifts eastward, which leads to the eastward shift of TCs geneses and their moving tracks over the Northwest Pacific.

Key words: Tropical cyclone, Typhoon, Moving tracks, Interannual variation, West Pacific warm pool.