

黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展 [J]. 大气科学, 40 (5): 877–896.
Huang Ronghui, Huangfu Jiangliang, Liu Yong, et al. 2016. Progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 877–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15251.

西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展

黄荣辉¹ 皇甫静亮^{1,3} 刘永¹ 冯涛² 武亮¹ 陈际龙¹ 王磊¹

¹ 中国科学院大气物理所季风系统研究中心, 北京 100190

² 南京大学大气科学学院, 南京 210093

³ 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘 要 本文回顾和综述了近年来关于西太平洋暖池对西北太平洋热带气旋和台风 (TCs) 活动影响过程及其机理的研究进展。文中首先简单回顾了近年来关于西太平洋暖池热状态和菲律宾周围对流活动变化特征及其对与 TCs 活动有关的南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压的季节内、年际变异的影响过程和机理的研究; 然后, 本文系统地回顾了近年来关于西太平洋暖池热状态通过西北太平洋季风槽影响 TCs 活动年际和年代际变化的影响过程及其机理的研究。此外, 文中还指出了关于西太平洋暖池对西北太平洋上空季风槽和 TCs 活动变异的热力和动力作用需进一步深入研究的科学问题。

关键词 西太平洋暖池 季风槽 热带气旋 台风

文章编号 1006-9895(2016)05-0877-20

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15251

Progress in Recent Research on the Processes and Physical Mechanisms Involved in the Influence of the Western Pacific Warm Pool on the Monsoon Trough and Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific

HUANG Ronghui¹, HUANGFU Jingliang^{1,3}, LIU Yong¹, FENG Tao², WU Liang¹,
CHEN Jilong¹, and WANG Lei¹

¹ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

² Institute of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

³ Institute of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract This paper synthesizes and reviews progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone and typhoon (TCs) activity over the western North Pacific. Specifically, recent studies on the characteristics of the variation in the western Pacific warm pool thermal state and convective activity around the Philippines, along with the processes and physical mechanisms influencing the effect of this variation on the South China Sea summer monsoon onset and intraseasonal and interannual variabilities of the western Pacific subtropical high, are summarized. Then, recent studies on the processes and

收稿日期 2015-08-18; **网络预出版日期** 2015-12-10

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 主要从事季风和台风以及气候动力学研究。E-mail: hrh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重大研发计划项目 2016YFA0600603, 国家自然科学基金项目 41375065、41230527、41461164005

Funded by Key Research and Development Program (Grant 2016YFA0600603), National Natural Science Foundation of China (Grants 41375065, 41230527, 41461164005)

physical mechanisms by which the western Pacific warm pool thermal state influences the interannual and interdecadal variabilities of TCs activity over the western North Pacific via the monsoon trough are also systematically reviewed. Finally, a number of scientific problems requiring further study are highlighted, related to the thermal and dynamical effects of the western Pacific warm pool on the monsoon trough and TC activity over the western North Pacific.

Keywords Western Pacific warm pool, Monsoon trough, Tropical cyclone, Typhoon

1 引言

热带西太平洋是全球海洋温度最高的海域, 全球约 90% 的暖海水集中在此海域, 故此海域称为暖池 (warm pool), 它是全球海—气相互作用最剧烈的区域, 也是全球大气中潜热释放的一个重要源区 (Cornejo and Stone, 1977; Hartmann et al., 1984)。由于西太平洋暖池具有很高的海温, 此海域上空是 Walker 环流的上升支, 并且是气流和水汽的强辐合区, 这导致了此区域有很强的对流活动和降水。许多研究表明: 西太平洋暖池不仅对热带太平洋 ENSO 循环的发生起着关键作用 (McCreary and Anderson, 1984; Schopf and Suarez, 1988; 张人禾和黄荣辉, 1998; 李崇银和穆明权, 1999; 巢清尘和巢纪平, 2001), 而且对东亚夏季风系统的季节内和年际变异有很重要的影响 (Nitta, 1987; Huang and Li, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988; Kurihara, 1989; Huang and Lu, 1989, Huang, 1992; Huang and Sun, 1992; Huang et al., 2004); 并且, 最近不少研究也表明了它对西北太平洋热带气旋和台风 (TCs) 活动也起着直接的热力和动力作用 (Gray, 1968; 陈联寿和丁一汇, 1979; Elsberry, 1995; 王斌等, 1998; Chan, 2005; 黄荣辉和陈光华, 2007)。当然热带太平洋 ENSO 循环也影响西太平洋暖池上空的大尺度环流和对流活动以及东亚夏季季风环流 (Huang and Sun, 1992; Zhang et al., 1996, 1999; Lu, 2001; Huang et al., 2012)。

受西太平洋暖池热力变化的影响, 西北太平洋季风槽和 TCs 活动有明显的季节内、年际和年代际变异, 使得我国东南沿海地区台风等重大天气灾害频繁发生, 造成了巨大的经济损失和重大的人员伤亡。因此, 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和 TCs 活动的影响过程及其机理是我国大气科学研究中一个很重要的科学问题。

鉴于西北太平洋上 TCs 给我国和其他有关国家和地区造成严重灾害, 许多学者对于西北太平洋上 TCs 的生成、结构、发展和移动路径做出了系统

研究 (陈联寿和丁一汇, 1979; 王斌等, 1998; Chan, 2005)。然而, 相对而言, 关于西北太平洋上 TCs 活动的气候学研究较少。最近, 围绕全球变暖背景下 TCs 生成个数是否增加这个问题, 国际上兴起 TCs 气候学的研究热潮, 特别是全球变暖背景下 TCs 活动的年际和年代际变化正在吸引许多学者的关注 (Chan, 2005; Webster et al., 2005; Emanuel, 2005)。受西太平洋暖池热力的影响, 西北太平洋是全球 TCs 生成主要区域之一, 全球约 1/3 的 TCs 在此区域生成, 因此, 西北太平洋上空 TCs 活动的年际和年代际变化特征、机理及其与暖池热力变化关系的研究也受到我国学者和有关科学家的重视。

近年来, 鉴于夏季台风等天气灾害给我国造成经济损失的严重性, 成因的复杂性以及预测的困难性, 我国大气科学开展了西太平洋暖池热力变异特征及其对西北太平洋季风槽和 TCs 活动 (包括生成和移动路径) 影响的研究, 并取得一些研究成果。本文主要回顾和综述近年来关于西太平洋暖池热力变异及其对西北太平洋季风槽和 TCs 活动的影响过程及其机理等方面的研究进展, 由于南海夏季风的爆发和西太平洋副热带高压与西北太平洋季风槽和 TCs 活动有关, 因此, 本文也简单回顾西太平洋暖池热力对南海夏季风和西太平洋副热带高压的影响。文中也涉及了国内外一些重要的相关研究。由于作者学识有限, 本文主要回顾和综述作者所熟悉的有关研究, 可能挂一漏百。

2 关于西太平洋暖池热力和菲律宾周围对流活动年际和年代际变异特征的研究

西太平洋暖池虽然海表温度很高, 但它变化很小, 一般在 1.0°C 之内。然而, 它的海温变化最大信号位于次表层, 研究表明: 暖池次表层温度有很大的年际和年代际变化, 在 $50\sim 250\text{ m}$ 深次表层的海温方差很大, 最大位于 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$, 120 m 深, 在夏季可达 4.0°C , 而在冬季达 3.0°C 以上 (叶

笃正等, 1996)。受此影响, 菲律宾周围的西太平洋暖池上空的对流活动也有很明显的年际和年代际变异。

2.1 西太平洋暖池热力变异特征

由于西太平洋暖池的热力变异 (Variability) 特征可以从它的次表层海温更明显看到, 因此, 分析西太平洋暖池次表层海温异常对于揭示西太平洋暖池热力的年际和年代际变异特征是很重要的 (Huang and Sun, 1992)。Huang and Sun (1992) 利用沿 137°E 实测的海温剖面资料并利用功率谱分析方法分析了西太平洋暖池 20 世纪 70~80 年代海温的年际变异特征, 指出了西太平洋暖池夏季次表层海温的年际变化具有 2~3 a 周期。最近, 作者应用更长的观测资料分析了夏季西太平洋暖池次表层海温的年际和年代际变化 (见图 1)。从图 1a 和图 1b 还可以看到, 西太平洋暖池从 1999 年之后有明显增暖的趋势。并且, 从图 1a 和图 1c 也可以看到, 在 90 年代初之前夏季西太平洋暖池次表层海温的年际变化从 2~3 a 的周期逐渐变成 4~5 a 的周期。而从 90 年代初之后, 特别在 90 年代中期以及从 2003 年之后, 西太平洋暖池次表层夏季海温 2~3 a 周期的年际变化有所增强, 并且 8~12 a 周期的变化也变得显著。

西太平洋暖池在 1990 年代末的热力变异也可以从暖池 SST 的变异看到, 图 2a 和图 2b 分别是 1979~1998 年与 1999~2013 年夏季平均的西太平洋暖池 SST 28.5°C 和 29.5°C 的等温线分布。从图 2a 可以看到, 西太平洋暖池面积向它的周围扩展, 特别是向东扩展。这个特征更明显反映在图 2b, 从图 2b 可以清楚看到, 西太平洋暖池超过 29.5°C 的 SST 向暖池的东部和南部扩展了。

从上述研究可以清楚看到, 从 1999 年之后西太平洋暖池 (特别在热带中太平洋偏西海域) 的热力处于增暖时期, 因此可以认为, 从 1999 年之后热带太平洋经历了一个“类似于 ENSO-modoki 型增温”的年代际时期。

2.2 西太平洋暖池上空对流活动的年际和年代际变化特征

Huang and Sun (1992) 研究了此海域上空 (特别是菲律宾周围) 夏季对流活动的年际变化特征, 指出了菲律宾周围的对流活动年际变化具有 2~3 a 的周期, 即准两年周期振荡; 并且, 他们还指出

了在西太平洋暖池偏暖的夏季, 菲律宾周围对流活动强, 对流活动的季节内变化也明显。最近, 作者应用更长时间 (1979~2013 年) 的对外长波辐射 (OLR) 资料, 分析了热带太平洋上空对流活动的年际和年代际变化 (图 3)。从图 3a 和图 3b 可以看到, 受热带太平洋“类似于 ENSO-modoki 型的年代际增温”的影响, 从 1999 年之后, 热带西太平洋对流活动有明显增强的趋势, 如图 3b 所示, 在 (16°N, 140°E) 附近的西太平洋暖池上空对流活动有非常显著的增强。作者进一步进行了菲律宾周围 (0°~20°N, 115°~140°E) 的西太平洋暖池上空夏季 OLR 的 EOF 分析 (图略), 结果表明了西太平洋暖池上空对流活动变异有两个主模态, 即全区一致变化型 (PC1) 和南北振荡型 (PC2), 他们的方差贡献分别为 44.8% 和 24.81%。并且, 利用滑动 t 检验 (MT) 方法对 PC1 进行检验, 结果表明菲律宾周围对流活动在 1999 年发生了一次年代际跃变, 在 1999 年之后, 菲律宾周围及以东的西太平洋暖池上空对流活动变异呈全区一致型加强。此外, 从 OLR 的 EOF 分析还显示了在 20 世纪 90 年代初到后期西太平洋暖池上空对流活动变异主模态呈现 2~3 a 周期的年际变化, 但从 1999 年之后, 两个主模态 2~3 a 周期的年际变化变得不明显, 而是呈现 4~5 a 周期的变化。

从上可见, 在 1999 年之前西太平洋暖池上空对流活动比较弱, 其年际变异呈准两年周期的年际变化, 且空间分布主要呈南北振荡, 而从 1999 年之后西太平洋暖池上空 (特别是菲律宾周围) 对流活动明显增强, 并呈现全区一致变化, 准两年周期的年际变化变得不明显。西太平洋暖池上空对流活动这些变化对南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压的年际和年代际变异将产生一定影响。

3 关于西太平洋暖池热力状态对南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压变异影响的研究

西太平洋暖池的热状况及其上空对流活动不仅在维持热带纬圈 Walker 环流起着重要作用 (Webster et al., 1998), 而且在经向上对北半球副热带大气环流的变化也有很大作用, 特别是对南海夏季风的爆发 (黄荣辉等, 2005) 和西太平洋副热带高压的变异有显著的影响 (Nitta, 1987; 黄荣辉

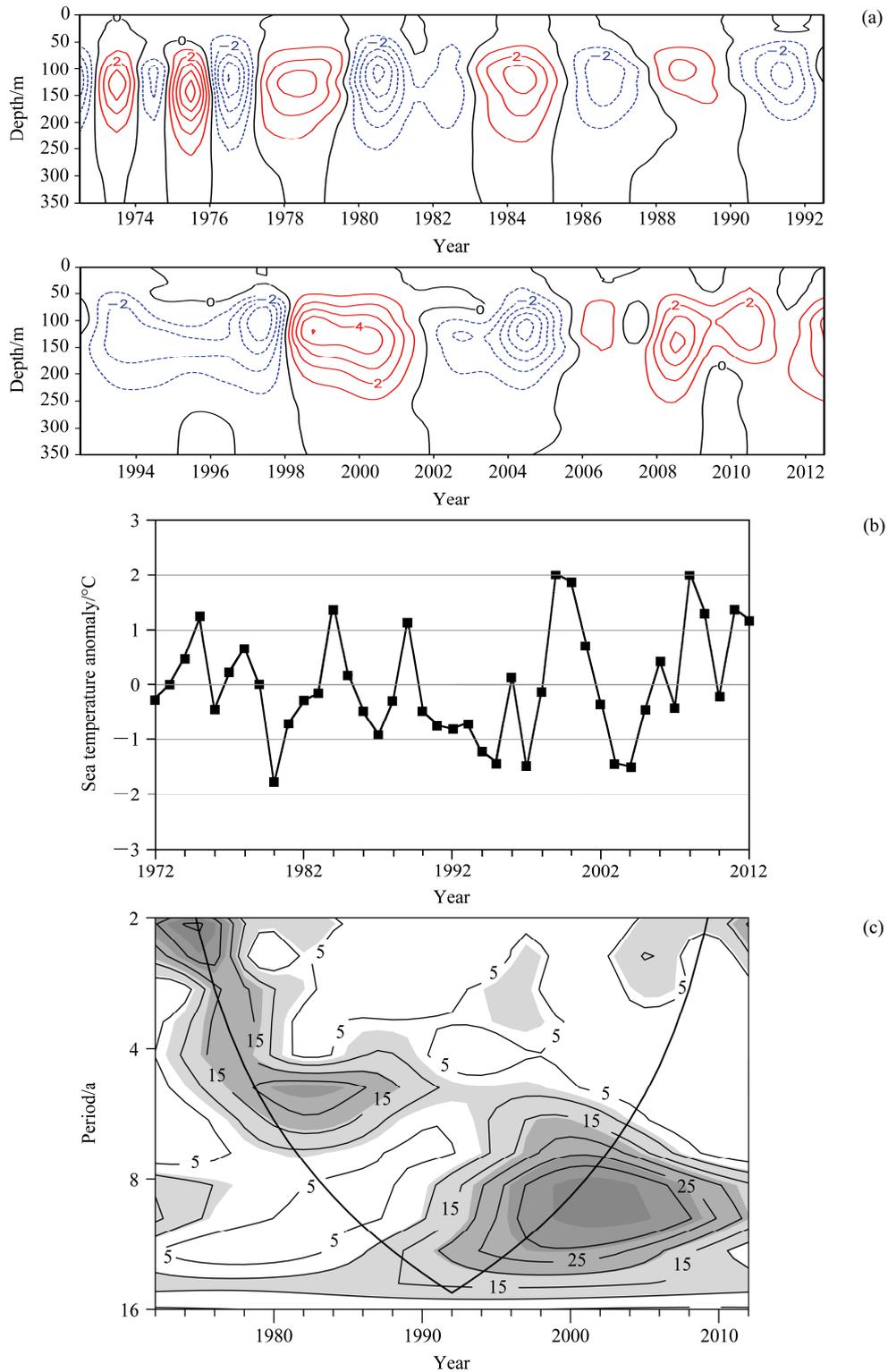


图1 西太平洋暖池沿 137°E 从 5°N 到 10°N 平均的 (a) 夏季海温距平时间—深度剖面、(b) 125 m 深夏季海温距平 (单位: °C) 及其 (c) 小波分析。图 1a 中实、虚线分别表示正、负距平, 图 1c 中阴影区表示信度超过 90%。海温资料取自日本气象厅“Ryofu-Marui”海洋研究考察船
Fig. 1 (a) Time–depth cross section of the summertime sea temperature anomalies and (b) their values at a depth of 125 m averaged from 5°N to 10°N along 137°E of the western Pacific warm pool, and (c) their wavelet analysis. Solid and dashed lines in Fig. 1a indicate positive and negative anomalies, respectively; areas above 90% confidence level are shaded in Fig. 1c. Sea temperature data are from the Observational Research Vessel “Ryofu-Marui” of JMA (Japan Meteorological Agency)

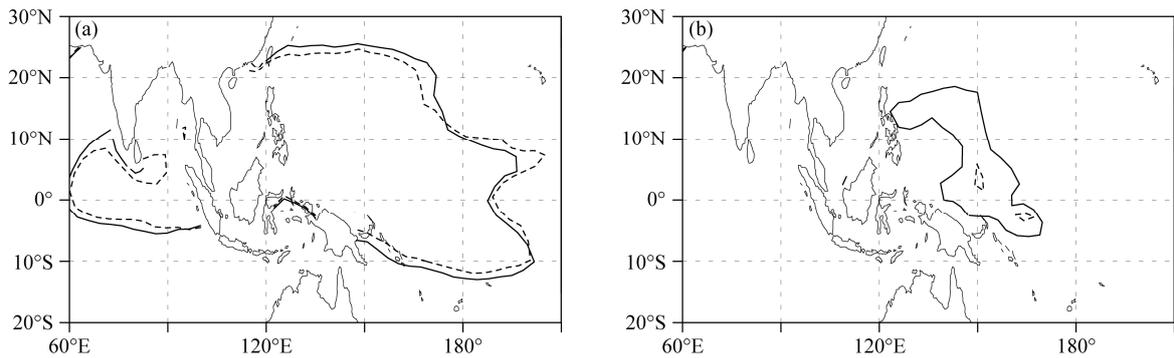


图 2 1979~1998 年 (虚线) 与 1999~2013 年 (实线) 期间夏季平均的西太平洋暖池 SST (a) 28.5°C 和 (b) 29.5°C 的等温线分布。海表温度资料取自 HadISST1 资料集

Fig. 2 Distributions of the (a) 28.5°C and (b) 29.5°C isothermal lines of the western Pacific warm pool SST averaged for the summers of 1979–1998 (dashed line), and 1999–2013 (solid line), respectively. Sea surface temperature data are from the HadISST1 dataset

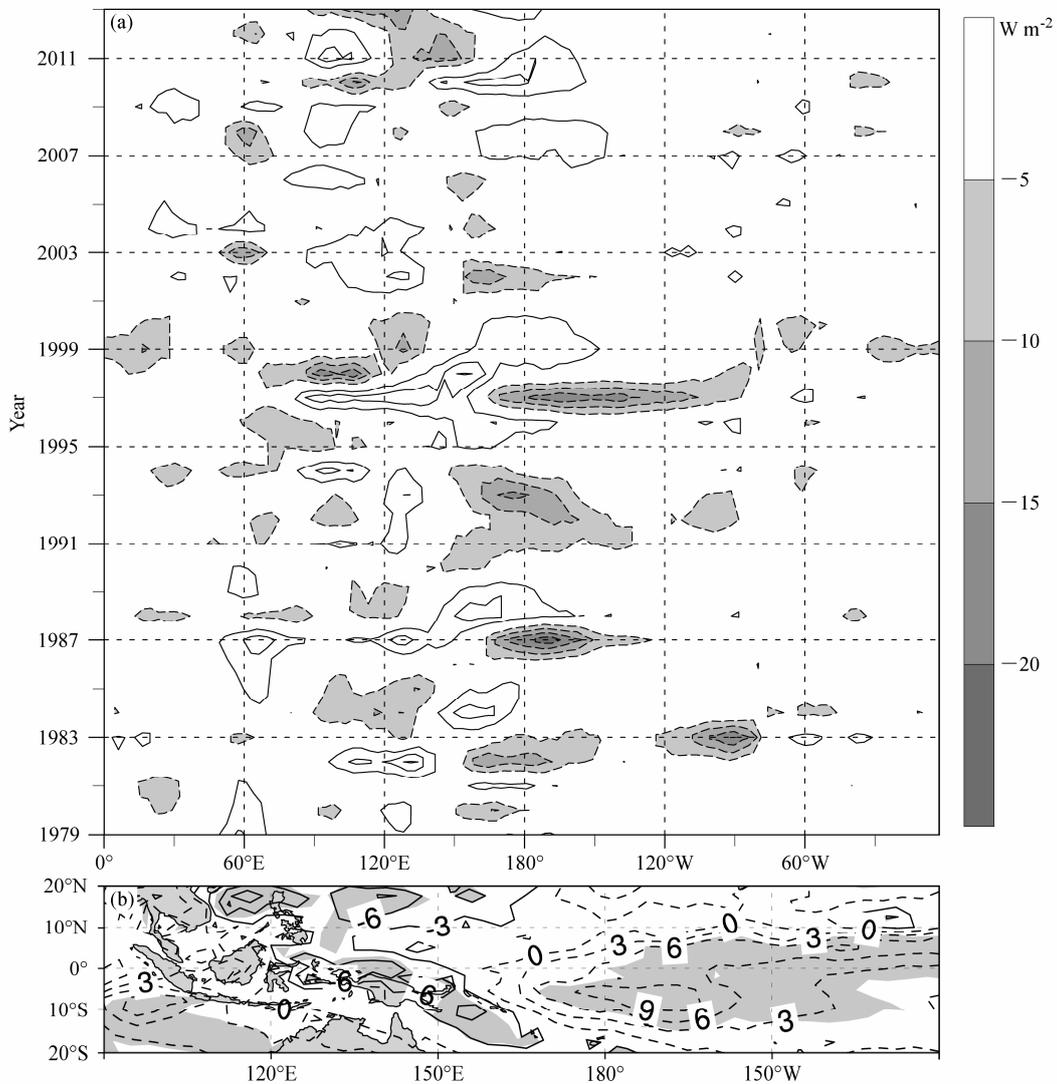


图 3 (a) 1979~2013 年夏季 (6~8 月) 热带太平洋 (10°S~10°N) 平均 OLR 距平 (单位: $W m^{-2}$) 的时间—经度剖面; (b) 1999~2013 年与 1979~1998 年夏季热带西太平洋上空 OLR 之差 (单位: $W m^{-2}$), 阴影区表示通过 90% 的信度水平。OLR 资料取自美国大气海洋管理局 OLR 资料集

Fig. 3 (a) Time–longitude cross section of the summertime (June–August) OLR anomaly (units: $W m^{-2}$) averaged for 10°S–10°N over the tropical Pacific, and (b) the difference between the summertime OLR averaged for 1999–2013 and that averaged for 1979–1998. Areas greater than the 90% confidence level are shaded in Fig. 3b. OLR data are from the OLR dataset of NOAA

和李维京, 1988; Kurihara, 1989)。由于南海夏季风和西太平洋副热带高压对西北太平洋季风槽和 TCs 活动有密切关联, 因此, 本文首先综述关于西太平洋暖池热力对南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压变异的影响。

3.1 对南海夏季风爆发的影响

Tao and Chen (1987) 提出亚洲夏季风最早在南海爆发, 故又把此时的季风称为南海夏季风。南海夏季风爆发早晚不仅对于东亚夏季风降水异常和我国夏季旱涝分布有着重要影响 (黄荣辉等, 2005), 而且对于西北太平洋季风槽的形成也会产生影响 (Elsberry, 2004)。然而, 由于对南海夏季风爆发的定义不同, 因此由不同定义所反映的亚洲夏季风最早爆发地区和日期也有所不同 (Wang et al., 2004; Ding and He, 2006)。黄荣辉等 (2005) 和 Huang et al. (2006) 采用了梁建茵和吴尚森 (2002) 所提出的南海夏季风的爆发定义分析研究了西太平洋暖池热状态对南海夏季风爆发早晚的影响。他们的研究表明: 南海夏季风一般于 5 月第 4 候爆发, 并有很大的年际变化, 最早可在 4 月下旬爆发, 而最晚到 6 月初才爆发, 这依赖于西太平洋暖池的热力状态。当西太平洋暖池偏暖, 菲律宾附近对流活动强, 则南海夏季风爆发早; 反之, 当西太平洋暖池偏冷, 菲律宾附近对流活动弱, 则南海夏季风爆发晚。

最近, Kajikawa and Wang (2012) 指出, 从 1990 年代中期之后南海夏季风爆发日期有提前的趋势, 并认为是由于热带低频振荡作用的结果。然而, Chen (2015) 的研究表明了从 1990 年代中期之后南海夏季风爆发日期提前并不是由于低频振荡作用的结果。最近, 从 Huangfu et al. (2015, 2016) 的研究结果可以看到, 从 1990 年代末之后南海夏季风爆发日期提前很可能是由于从 1990 年代末之后西太平洋暖池升温和暖池上空对流活动增强所致, 并引起西北太平洋 TCs 生成的年代际变化。

3.2 对西太平洋副热带高压变异和南海夏季风爆发过程的影响

西太平洋副热带高压是夏季西北太平洋上空主要的大尺度环流系统之一。东亚夏季风向北推进的季节内变化主要依赖于西太平洋副热带高压的向北推进 (Tao and Chen, 1987)。然而, 每年夏季西太平洋副热带高压的向北推进过程却有不同

特征, 这对东亚夏季降水异常的分布有很大影响。

西太平洋暖池的热力状态及其上空对流活动对西太平洋副热带高压向北推进和南海夏季风爆发有很大影响。Huang and Sun (1992) 研究了西太平洋暖池的热力状态及其上空对流活动对西太平洋副热带高压和东亚夏季风向北推进的影响过程和机理; 并且, 黄荣辉等 (2005) 和 Huang et al. (2006) 利用再分析资料以及西太平洋暖池有关海温资料系统地分析了夏季西太平洋暖池热状态和菲律宾附近的对流活动对南海夏季风爆发早晚的影响。他们的研究表明: 西太平洋暖池热力状态、菲律宾周围的对流活动、南海季风爆发、西太平洋副热带高压、江淮流域夏季风降水变异之间有很好的关系。如图 4a 所示, 当春季西太平洋暖池处于暖状态, 菲律宾周围对流活动强, 在这种情况下, 西太平洋副热带高压偏东、偏北, 南海上空对流层下层存在着气旋性距平环流, 并在 5 月上旬或中旬在热带印度洋和苏门答腊以西海域将出现气旋对, 这使得此海域盛行西风加强, 从而使得南海夏季风爆发早。并且, 根据 Huang and Sun (1992) 的研究, 在这种暖池处于暖状态下的夏季, 如图 4a 所示, 西太平洋副热带高压向北推进时, 在 6 月中旬和 7 月初存在着明显的二次向北突跳, 从而使得东亚夏季风雨带在 6 月中旬明显由华南和江南往北突跳到江淮流域, 并于 7 月初由江淮流域北跳到黄河流域、华北和东北地区。由于季风雨带在江淮流域停滞的时间很短, 从而引起江淮流域夏季风降水偏少, 并往往发生干旱, 而黄河流域、华北和东北地区夏季风降水正常或偏多。

相反, 如图 4b 所示, 当西太平洋暖池春季处于冷状态, 菲律宾周围对流活动弱, 在这种情况下, 西太平洋副热带高压偏西、偏南, 致使南海上空和中印半岛对流层下层存在着反气旋性距平环流。在这种大尺度环流背景下, 在 5 月上、中旬热带印度洋和苏门答腊以西海域上空将不可能出现气旋对, 而出现反气旋对, 只是到了 5 月下旬或 6 月初, 西太平洋副热带高压东撤, 在孟加拉湾和热带东印度洋上空才出现气旋对, 这才使得西风加强, 从而使得南海季风爆发晚。并且, 在西太平洋暖池冷状态的夏季, 如图 4b 所示, 西太平洋副热带高压北进时, 在 6 月中旬或 7 月初向北突跳

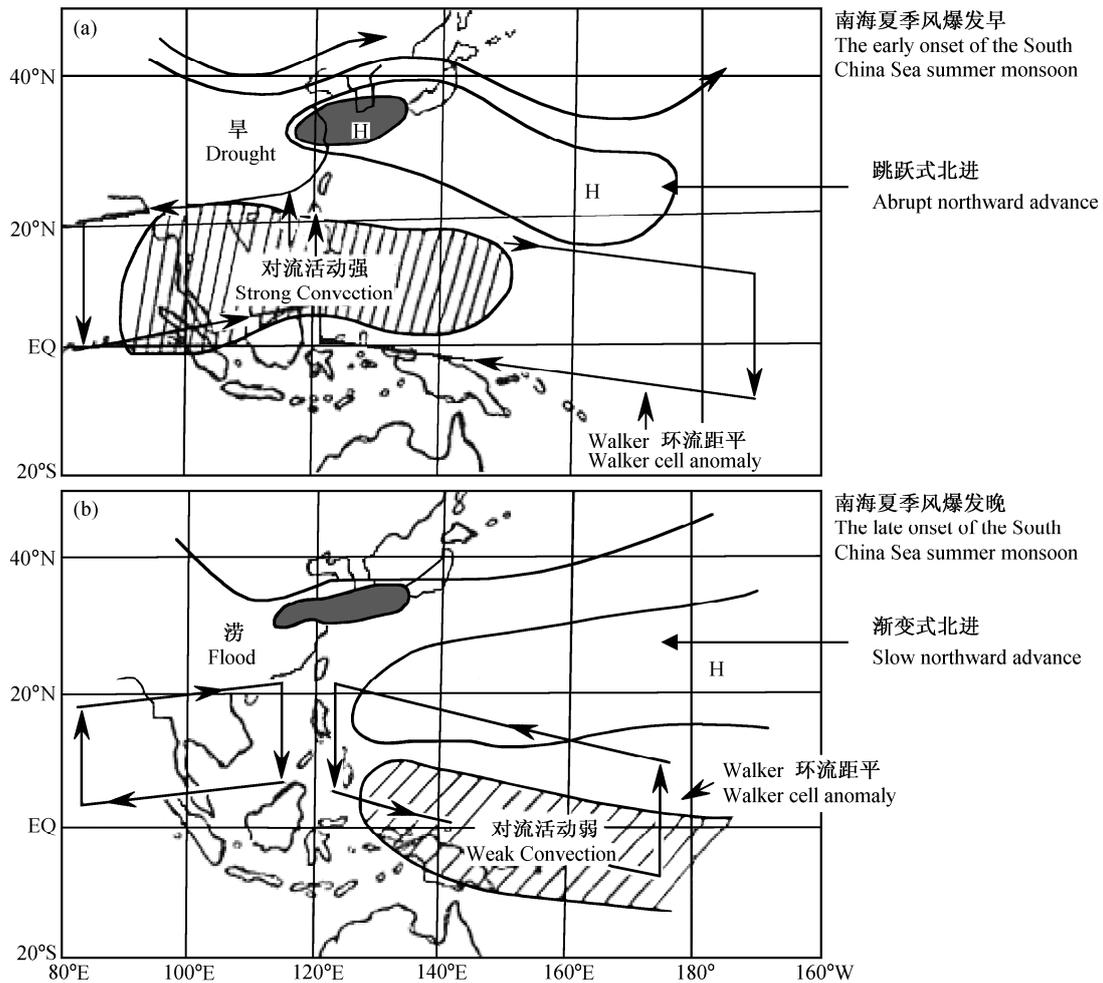


图 4 西太平洋暖池 (0°~14°N, 130°~150°E) 的春季热力状态、菲律宾对流活动、南海夏季风爆发早晚、西太平洋副热带高压与江淮流域夏季风降水异常分布之间的关系示意图：(a) 暖池处于暖状态；(b) 暖池处于冷状态

Fig. 4 Schematic maps of the relationships among the thermal states of the western Pacific warm pool (0°~14°N, 130°~150°E) in spring, the convective activity around the Philippines, the western Pacific subtropical high, the onset of the South China Sea summer monsoon, and the summer monsoon rainfall anomaly in the Yangtze River and Haihe River valley in the (a) warming and (b) cooling states of the western Pacific warm pool

不明显，而是以渐进式向北移动。由于东亚夏季风雨带一直维持在长江流域和淮河流域，从而引起长江、淮河流域夏季风降水偏多，经常发生洪涝，而华北地区往往发生干旱。

Huang and Sun (1992) 以及 Huang et al. (2004) 的研究表明：西太平洋暖池热力状态及其上空对流活动不仅对西太平洋副热带高压的季节内变异有重要影响，而且对于西太平洋副热带高压的年际变异也有很大作用。在西太平洋暖池偏暖的夏季，西太平洋副热带高压的位置偏北，而在西太平洋暖池偏冷的夏季，西太平洋副热带高压的位置偏南、偏西。

上述研究清楚表明了西太平洋暖池热力状态及

其上空对流活动对于南海夏季风的爆发以及西太平洋副热带高压的季节内和年际变异有很重要的影响。

4 关于西太平洋暖池热力状态对西太平洋副热带高压变异影响的机理

4.1 东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相关

西太平洋暖池热力状态通过什么途径来影响西太平洋副热带高压的变异，这一直吸引许多学者的关注。Nitta (1987) 从观测事实首先提出菲律宾周围的热带西太平洋上空与日本周围上空的大气环流异常存在着反相振荡，即 P-J 振荡，指出了菲律宾周围对流活动的变化将影响日本附近

的环流异常。与此同时, Huang and Li (1987) 和黄荣辉和李维京 (1988) 不仅从观测事实分析了这一遥相关的波列分布, 而且根据 Hoskins and Karoly (1981) 所提出的球面大气 Rossby 波传播从动力理论研究了北半球夏季菲律宾周围热力异常所引起 Rossby 波列在北半球的传播特征; 并且, 他们还应用一个 34 层准地转数值模式 (Huang and Gambo, 1982) 对夏季菲律宾周围热源异常所引起的北半球大气环流异常的分布进行了数值模拟, 从而指出夏季菲律宾周围的热源异常将会激发从菲律宾周围经东亚传播到北美的准定常 Rossby 波的波列, 即 EAP 型遥相关波列; 此外, Huang and Lu (1989) 还利用大气环流数值模式 (Zeng et al., 1986) 对菲律宾周围的西太平洋暖池海域 SST 偏高所引起北半球大气环流异常进行了数值模拟, 其数值模拟结果也表明了菲律宾周围加热会引起一系列从菲律宾周围经东亚到北美的 Rossby 波波列分布 (图略), 通过数值模拟进一步证明了这一遥相关波列的存在。

4.2 西太平洋副热带高压变异与东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相关的关系

黄荣辉和李维京 (1988) 以及 Huang and Sun (1992) 的研究指出了西太平洋副热带高压与西太平洋热力变异和菲律宾周围的对流活动有密切关系; 并且, Huang et al. (2007) 利用 EAP 型遥相关解释了我国东部夏季降水异常型的成因, 指出了西太平洋副热带高压活动有关的东亚夏季风在年际变化具有准两年周期可能是由于西太平洋暖池上空热源强迫所产生的 Rossby 波列在东亚上空的传播 (即 EAP 型遥相关) 所致。

为了能够反映 EAP 型遥相关对西太平洋副热带高压和东亚夏季风系统年际变化的影响, Huang (2004) 从 EAP 型遥相关波列的分布定义了一个 EAP 型指数。这个指数不仅与我国长江、淮河流域夏季风降水有很好的负相关, 而且与华北和华南夏季降水也有正相关, 这表明了这个指数可以很好地描述西太平洋副热带高压的年际变化。并且, EAP 指数的小波分析的结果表明了, 在 1990 年代末以前这个指数也呈现 2~3 a 周期的年际变化 (黄荣辉等, 2015), 这可以说明 EAP 型遥相关对西太平洋副热带高压和东亚夏季风降水的 2~3 a 周期的年际变化可能起着重要作用。

黄荣辉等 (2006) 从西太平洋暖池的海表面和

次表层海温的年际变化研究了我国夏季风降水的准两年周期振荡的成因和过程, 指出了由于西太平洋暖池上空海—气相互作用的准两年周期振荡通过 EAP 型遥相关对东亚夏季风系统的年际变化起着重要作用, 特别是对于东亚和西北太平洋的水汽输送的准两年周期振荡有重要影响, 并提出东亚夏季风系统的准两年周期振荡的物理过程。正如图 5 所示, 当某一年冬、春季西太平洋暖池海温上升, 即处于偏暖状态, 这就会使得第二年春、夏季菲律宾周围对流活动偏强, 由于 EAP 型遥相关波列的影响, 将会使得东亚和北半球上空夏季出现似图 4a 所示的环流异常, 西太平洋副热带高压偏北, 这将导致我国长江、黄河流域、日本和韩国的夏季降水偏少; 另一方面, 从海洋方面看, 由于第二年夏季西太平洋暖池上空强对流活动所产生的强辐合将会造成了西太平洋暖池的海水上翻 (upwelling) 加强, 从而导致秋、冬季此海域海温开始下降, 并使此海域的冬季及以后海表和次表层海温偏低。这样, 由于第三年春夏季西太平洋暖池处于冷状态, 这就会使得春季菲律宾周围对流活动就减弱, 夏季出现与图 4b 所示的环流异常, 西太平洋副热带高压偏南, 从而引起我国长江、淮河流域、日本和韩国的夏季降水偏多; 另一方面, 从海洋方面看, 由于第三年春夏季西太平洋暖池上空对流活动弱, 西太平洋副热带高压偏南, 这样造成西太平洋暖池上空出现反气旋距平环流分布, 从而引起热带西太平洋的海水上翻减弱, 这就导致秋冬季此海域海温开始上升, 并使第三年春夏季此海域的海表和次表层海温又变成偏高。这样, 西太平洋暖池海—气耦合系统的变化经历了一个循环, 这个循环周期大约为 2~3 a 左右。

上述研究结果清楚表明了西太平洋暖池热力状态的变异通过沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关对西太平洋副热带高压的年际变异有重要影响。

5 关于西太平洋暖池热力状态对西北太平洋季风槽及热带气旋和台风 (TCs) 活动年际变异的影响及其机理研究

西太平洋暖池热力状态不仅对西太平洋副热带高压的季节内、年际变异有重要影响, 而且对西北太平洋上空季风槽和 TCs 活动的年际变异也有

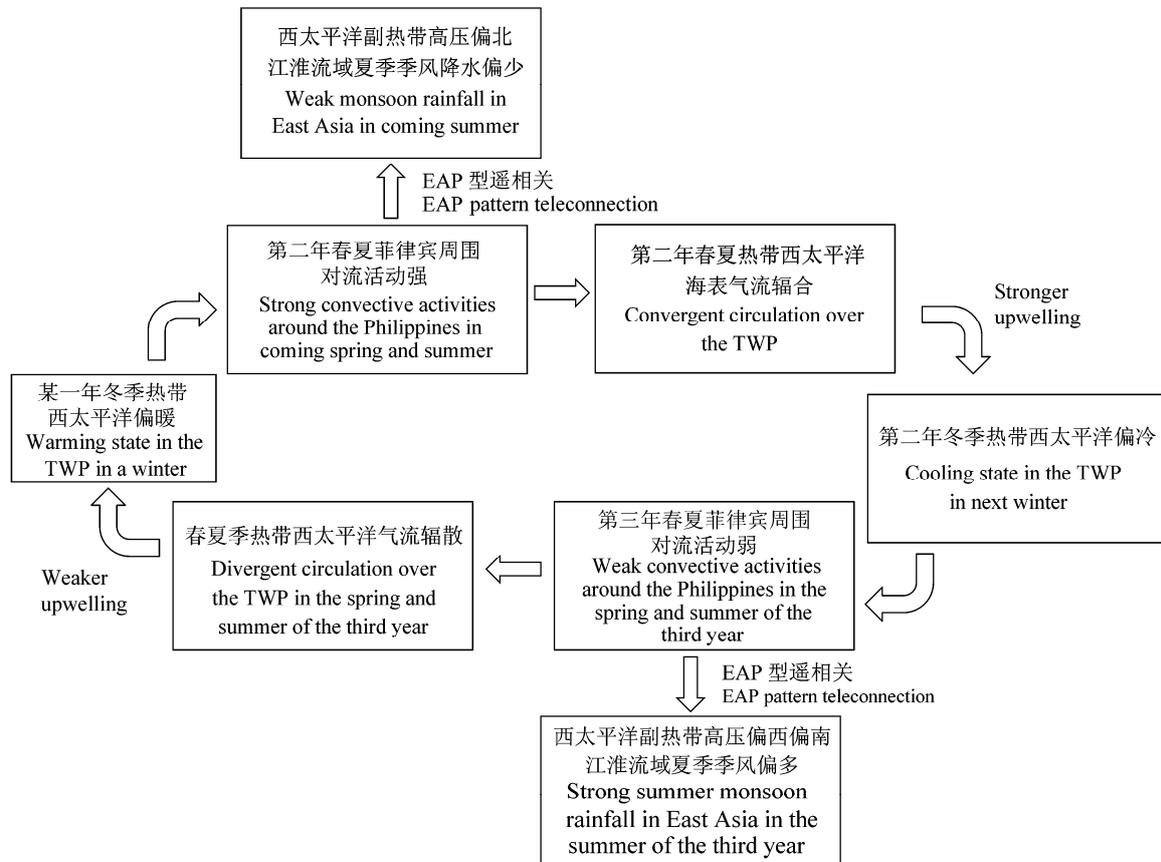


图 5 东亚夏季风系统准两年周期振荡与西太平洋暖池海—气耦合系统关联的概念图

Fig. 5 Conceptual diagram of the quasi-biennial oscillation of the East Asian summer monsoon system related to the atmosphere–ocean coupling system over the western Pacific warm pool. TWP represents the tropical western Pacific

直接的作用。以前的研究特别强调热带太平洋 ENSO 循环的不同位相相对于西北太平洋上空 TCs 活动年际变异的影响 (Chan, 2000)。然而, 热带太平洋的 El Niño 和 La Niña 事件发生的最强信号在冬季, 而西太平洋暖池表层和次表层海温变异的强信号一般领先于热带东太平洋 3~5 月出现, 这正是西北太平洋上空 TCs 生成的最盛期。因此, 西北太平洋上空 TCs 活动的年际变异可能更依赖于西太平洋暖池的热力状态 (黄荣辉和陈光华, 2007)。最近, Lin et al. (2014) 指出海洋次表层海温对超强台风“Haiyan”发展的作用; 并且, Huang et al. (2015) 研究表明了在全球变暖背景下, 海洋次表层海温的变异将会影响 TCs 的强度。这些研究都表明了海洋次表层的热力状态对 TCs 活动有重要影响。

5.1 西太平洋暖池热力状态对西北太平洋季风槽和 TCs 活动年际变异的影响

全球 TCs 约 75% 以上在季风槽中生成 (McBride,

1995)。为什么西北太平洋上空是 TCs 易于生成的区域? 这不仅是由于西太平洋暖池海域的 SST 一般都超过 28.5°C, 满足 TCs 生成的热力条件, 而且在夏季西太平洋暖池上空经常是西北太平洋季风槽所在之处 (图 6)。由于西北太平洋季风槽可以为 TCs 生成提供低层大气的辐合和气旋性相对涡度、较小的垂直风切、充足的水汽以及高层的辐散 (Lander, 1994; Briegel and Frank, 1997; Ritchie and Holland, 1999; 冯涛等, 2013)。因此, 西北太平洋季风槽是利于 TCs 生成的大尺度环流系统 (Ritchie and Holland, 1999; Chen et al., 2004; Feng et al., 2014)。

如图 6 所示, 西北太平洋季风槽是西北太平洋对流层低层夏秋季一个重要的环流系统。当亚洲夏季风爆发以后, 从南半球吹来的偏南气流到了北半球由于科氏力的作用就形成了偏西气流, 这样, 在西北太平洋离赤道 8 个纬距和偏北之处对流

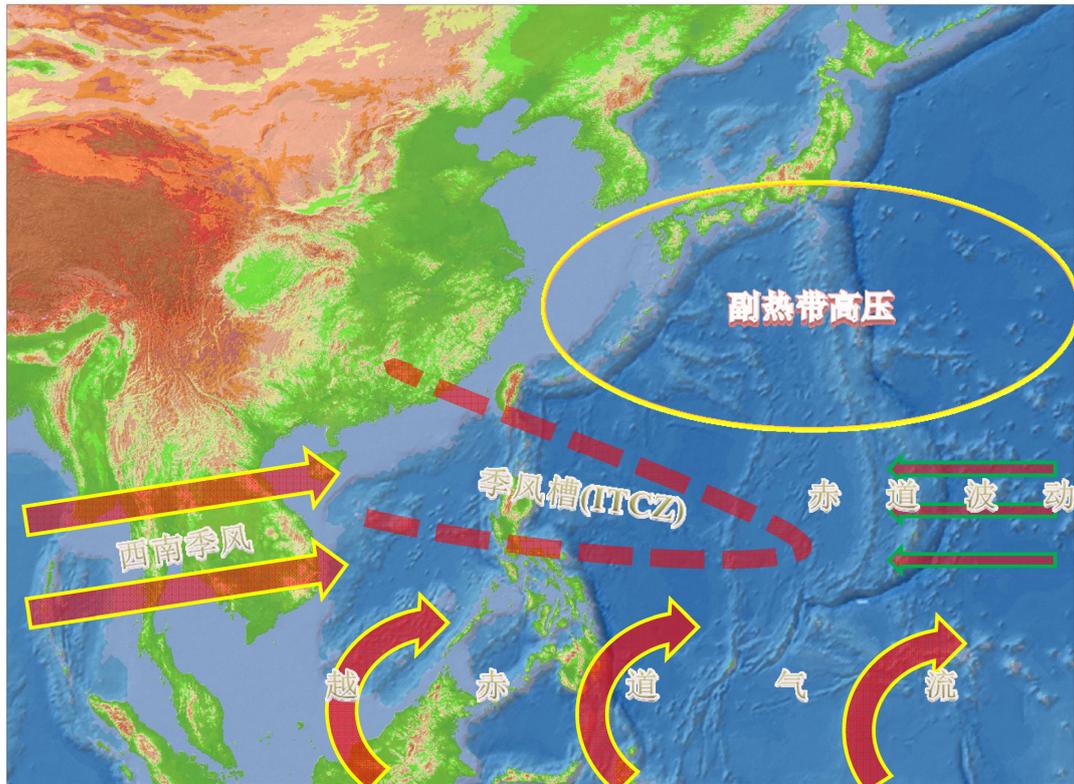


图 6 西北太平洋上空对流层低层主要环流系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the main circulation system in the lower troposphere over the western North Pacific

层低层就会出现西风；而从热带东、中太平洋上空对流层低层吹来的信风（东风）将沿西太平洋副热带高压的南部向西北方向吹，这就在西北太平洋上空对流层低层形成一个如图 6 所示的与亚洲季风有关的槽，即季风槽 (Elsberry, 2004)。关于亚洲季风槽的形成、结构及其对亚洲天气气候的影响，潘静和李崇银 (2006)、李崇银和潘静 (2007) 已做了深入的研究。

西北太平洋季风槽有很大的年际变化。黄荣辉和陈光华 (2007), Chen and Huang (2008a, 2008b) 分析了西太平洋暖池次表层热力对西北太平洋上空季风槽和 TCs 生成和移动路径的年际变化的影响。他们的分析结果表明：西北太平洋上空季风槽和 TCs 生成和移动路径有明显的年际变异，并与西太平洋暖池热状态的年际变化有很密切的关系。当西太平洋暖池处于暖状态，如图 7a 所示，西北太平洋上空季风槽位置偏西、偏北，西北太平洋上空 TCs 生成区域和移动路径偏西、偏北，从而造成影响我国的台风个数偏多；相反，当西太

平洋暖池处于冷状态，如图 7b 所示，西北太平洋上空季风槽位偏东、偏南，西北太平洋的 TCs 生成区域偏东、偏南，其移动路径偏东，且易于在 130°E 转向，从而造成影响日本和韩国的台风个数偏多，而影响我国的台风个数可能偏少。

此外，研究还表明：西北太平洋上空季风槽的年际变异不仅受西北太平洋暖池的影响，而且还受热带西太平洋越赤道气流 (冯涛等, 2014) 和热带印度洋热力的影响 (Wang et al., 2013)。

5.2 关于西太平洋暖池热力对西北太平洋季风槽 TCs 生成年代际变化的影响

西太平洋暖池的热力变化不仅对西太平洋季风槽的年际变化有着重要影响，而且对西北太平洋季风槽的年代际变化也有明显影响。图 8a 和 8b 分别是 1979~1999 年与 1999~2013 年 6~8 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 的流线分布。从图 8a 可以看到：在 1979~1998 年期间的夏季，西北太平洋季风槽位于西北太平洋偏东、偏南上空，TCs 生成也位于西北太平洋的偏东、偏南

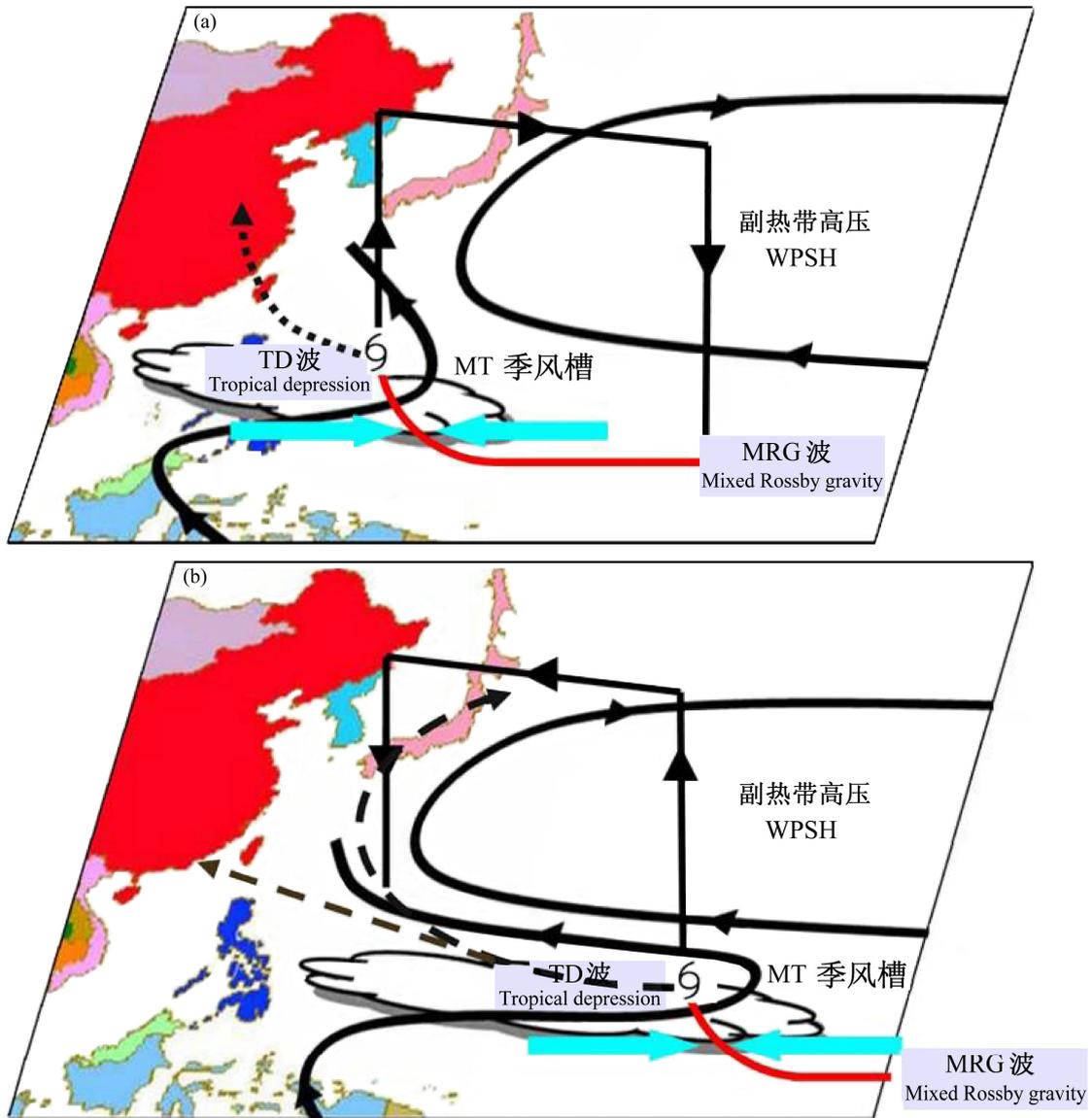


图 7 西太平洋暖池热状态、季风槽、副热带高压与西太平洋热带气旋和台风移动路径之间关系示意图：(a) 暖池处于热状态；(b) 暖池处于冷状态
Fig. 7 Schematic diagrams of the relationship among the western Pacific warm pool thermal state, the monsoon trough (MT), the western Pacific subtropical high (WPSH), and moving tracks of tropical cyclones (TCs) over the western North Pacific for the (a) warming state and (b) cooling state of the western Pacific warm pool

侧上空；而在 1999~2013 年期间的夏季，如图 8b 所示，西北太平洋季风槽位于西北太平洋偏西、偏北上空，TCs 生成也位于西北太平洋偏西、偏北海域上空。正如在 2.1 节所述，在 1979~1999 年期间的夏季，西太平洋暖池偏冷，而在 1999~2013 年期间的夏季，西太平洋暖池偏暖。由此可见，在 1999 年之后由于热带太平洋出现了“类似于 ENSO-modoki 型的年代际增温”。西太平洋暖池偏暖，它导致了西太平洋季风槽位于西北太平洋偏西、偏北上空，这使得 TCs 也易于在西北太平洋偏西、偏北侧上空生成。

从上述研究可以看到：夏季西太平洋暖池的热力状态不仅影响西北太平洋季风槽和 TCs 活动的年际变化，而且还影响西北太平洋季风槽和 TCs 活动的年代际变化，特别是从 20 世纪 90 年代末之后热带太平洋热力变异呈现“类似于 ENSO-modoki 型的年代际增温”，西太平洋暖池偏暖，这对西北太平洋季风槽和 TCs 活动产生很大影响。

5.3 西北太平洋 TCs 在我国登陆地点与 EAP 型遥相关的关系

正如在 3.2 节所述，西太平洋暖池的热力状态对西太平洋副热带高压有重要影响。当西太平洋

暖池偏暖，则西太平洋副热带高压位置偏北；相反，当西太平洋暖池偏冷，则西太平洋副热带高压位置偏南。EAP 指数不仅可以描述东亚夏季风降水的异常分布，而且还可以很好反映西太平洋副热带高压的位置 (Huang, 2004)。当 EAP 指数为正，则西太平洋副热带偏北；相反，当 EAP 指数为负，则西太平洋副热带高压偏南。由于西北太平洋 TCs 移动路径直接受西太平洋副热带高压的控制，因此西北太平洋 TCs 移动路径与 EAP 指数

应该有很好的关系。黄荣辉和王磊 (2010) 分析了登陆我国台风最多的 7~9 月份西北太平洋上生成的 TCs 在我国厦门以北的登陆频次变化与夏季(6~8 月) EAP 指数之间的关系，结果表明了他们之间有很好的正相关 (图 9)，相关系数达到 0.53，超过 99% 信度水平。从图 9 可以看到：当 6~8 月份 EAP 指数为正，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 TCs 登陆厦门以北的频次偏多；相反，当 6~8 月份 EAP 指数为负，则

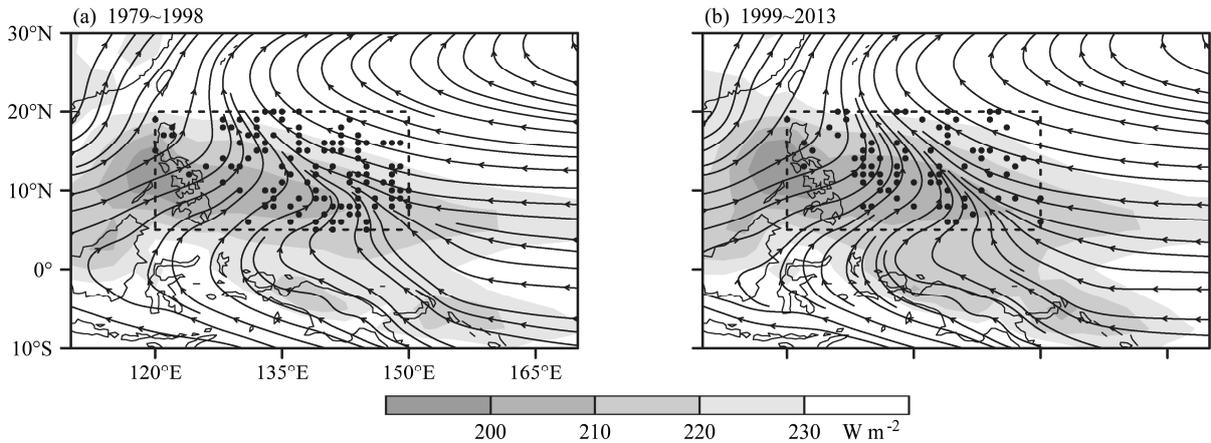


图 8 (a) 1979~1998 年和 (b) 1999~2013 年夏季 (6~8 月) 平均西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 上流线和 OLR (阴影, 单位: $W m^{-2}$) 分布。图中虚线框表示季风槽关键区域, • 表示 TCs 生成位置, 风场资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Simmons et al., 2007), 热带气旋 (TCs) 资料取自 IBTrACS 资料集

Fig. 8 Distributions of the streamline and OLR (units: $W m^{-2}$) at 850 hPa in the lower troposphere over the western North Pacific averaged for the summers (June–August) of (a) 1979–1998 and (b) 1999–2013. The boxes in Fig. a and Fig. b denote the key area of the monsoon trough. Cyclogenesis locations of TCs are marked by the symbol “•”, wind field data are from ERA-Interim reanalysis (Simmons et al., 2007), TCs data are from the IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship) dataset

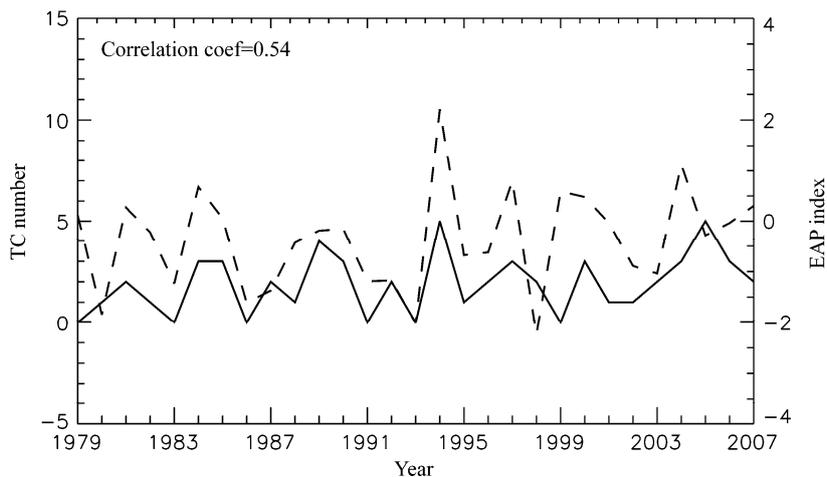


图 9 1979~2007 年夏季 (6~8 月) EAP 指数 (虚线) 与 7~9 月登陆我国厦门以北 TCs 频次 (实线) 的际变化。计算 EAP 指数所用高度场资料取自日本气象厅的 JRA-25 再分析资料, 登陆热带气旋和台风 (TCs) 资料取自 JTWC (Joint Typhoon Warning Center)

Fig. 9 Interannual variation in summertime (June–August) East Asia/Pacific (EAP) index (dashed line) and the numbers of landfalling TCs (solid line) to the north of Xiamen during 1979–2007. Height field data used in the calculation of the EAP index are from JRA-25 reanalysis, landfalling TCs data are from the JTWC (Joint Typhoon Warning Center)

7~9 月份西太平洋副热带高压偏南，从而引起西北太平洋 TCs 登陆厦门以北的频次偏少。这个研究为我国台风登陆地点的季度预测提供了科学依据。

从上述研究可以看到，西太平洋暖池的热力状态不仅影响西北太平洋季风槽，从而影响西北太平洋 TCs 生成，而且通过 EAP 型遥相关影响西太平洋副热带高压，从而影响西北太平洋 TCs 的移动路径。

6 关于西北太平洋暖池热力状态对西北太平洋 TCs 生成的影响机理研究

西太平洋暖池表层海温一般都在 28.5°C 以上，它总是满足 TCs 生成所要求的热力条件，然而，西北太平洋 TCs 生成却有很大的年际变化，这是值得研究的一个问题。根据黄荣辉和陈光华（2007）的研究，这可能是由于西太平洋暖池的热力状态对利于 TCs 生成的大尺度环流系统季风槽的位置和强度变化有重要影响的原因。由于西北太平洋 TCs 主要在季风槽中生成，因此，分析西太平洋暖池热力状态对西北太平洋季风槽的变化及 TCs 生成的影响过程和机理是很重要的。

6.1 西太平洋暖池热力状态通过季风槽变异对利于 TCs 生成大尺度环境因子的影响

Feng et al. (2014) 系统地分析了西北太平洋季风槽对西北太平洋 TCs 生成的影响，表明了西北太平洋季风槽对西北太平洋 TCs 生成的大尺度环境因子有重要影响。他们指出：西太平洋暖池上空季风槽为西北太平洋 TCs 生成提供了对流层下层强的气旋性相对涡度、对流层上层强的辐散、小的垂直风切变和对流层中层充足的水汽；并且，他们还提出了西北太平洋上空利于 TCs 生成有五类大尺度环流型：季风切变型（MS），季风辐合型（MC），季风倒槽型（RMT），季风涡旋型（MG）以及热带东风环流型（TE），而其中在与季风槽有关的前三类环流型中生成的 TCs 约占在这五类环流型中生成 TCs 总数的 80%。

最近，冯涛等（2016）分析和比较了西太平洋暖池处于暖状态和冷状态时西北太平洋季风槽位置和强度的差别及其利于 TCs 生成大尺度环境因子的差别。并且，他们以 2004 年与 2006 年 7~9 月西北太平洋暖池热力状态不同所导致季风槽位置

和结构和西北太平洋 TCs 生成特征的差异为例来说明西太平洋暖池热力状态对季风槽和利于 TCs 生成大尺度环境因子的影响。他们指出：2004 年 7~9 月西北太平洋暖池偏冷，导致了季风槽位置位于西北太平洋上空的偏东、偏南侧，这样，在季风槽东端有强的纬向风辐合，因而在 2004 年 7~9 月西北太平洋上空对流层低层大尺度环流型主要为季风辐合型（即 MC 型）。在这种环流型作用下，在西北太平洋的偏东、偏南侧上空为 TCs 生成提供强的低层气旋性相对涡度、强的高层辐散、小的垂直风切和充足的水汽等利于 TCs 生成的大尺度环境因素。因此，如图 10a 所示，在 2004 年 7~9 月有较多强的 TCs 在西北太平洋偏东、偏南侧生成。在 2004 年 7~9 月期间，西北太平洋上空计生成 14 个 TCs，其中有 9 个 TCs 生成在 140°E 以东的 MC 型中，仅 8 月份就有 6 个 TCs 生成在 MC 型中。

而 2006 年 7~9 月西太平洋暖池偏暖，导致了季风槽的位置位于西北太平洋略偏西、偏北上空，这样在季风槽的东端呈现强的纬向风切变，在 2006 年 7~9 月西北太平洋上空对流层低层的大尺度环流型主要为季风切变型（即 MS 型）。在这种环流型的作用下，在西太平洋暖池的偏西、偏北侧上空为 TCs 生成提供较强的低层气旋性相对涡度、较强的高层辐散、较小的垂直风切变和充足的水汽等利于 TCs 生成的大尺度环境因素。因此，如图 10b 所示，2006 年 7~9 月 TCs 主要在西北太平洋上空略偏西、偏北侧生成。在 2006 年 7~9 月期间，西北太平洋上计生成 14 个 TCs，其中有 8 个 TCs 在 140°E 以西生成，而在 140°E 以东区域生成的 TCs 很少，其中有 5 个 TCs 在 MS 环流型生成，但 2006 年 7~9 月西北太平洋上生成的 TCs 强度要比 2004 年 7~9 月生成的 TCs 弱。

为了更好地比较西太平洋暖池处于暖状态和冷状态时西北太平洋季风槽位置和强度及其利于 TCs 生成的大尺度环境因子的差别。我们利用合成方法分别分析了暖池处于暖状态和冷状态时西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 的相对涡度、对流层上层 200 hPa 的散度、200 hPa~850 hPa 之间的风速的垂直切变以及 700 hPa~500 hPa 平均的水汽分布（图 11 和 12）。从图 11 可以看到：在西太平洋暖池处于偏暖的夏季，850 hPa 强的辐合、200 hPa 强的辐散，小的风速垂直切变以及对流层中、

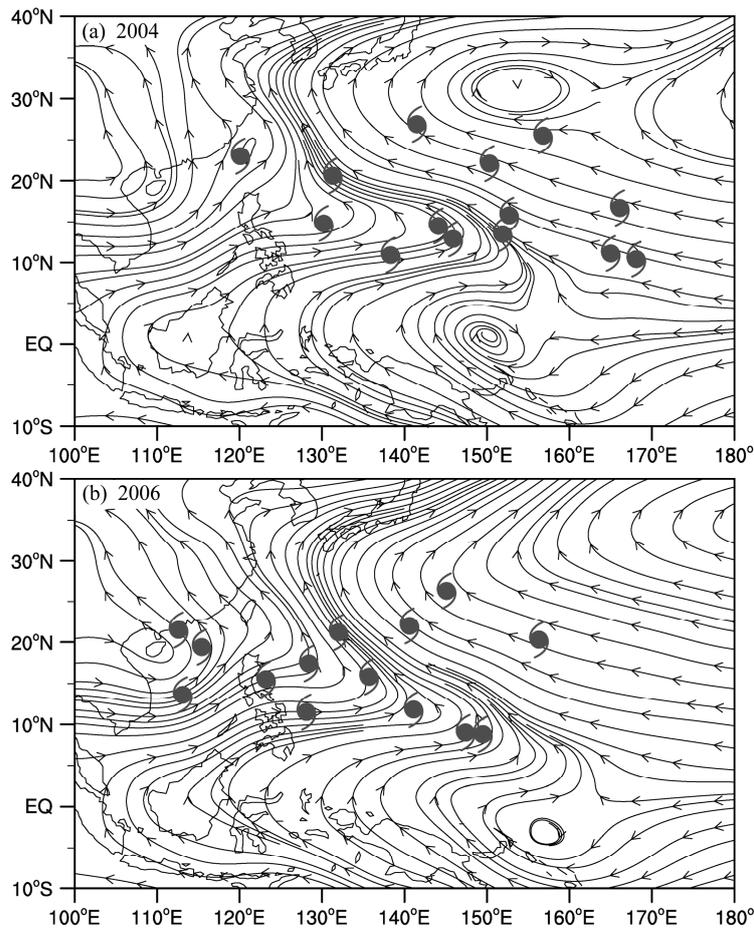


图 10 (a) 2004 年和 (b) 2006 年 7~9 月的西北太平洋上空 850 hPa 流线及 TCs 生成位置 (以 ⚡ 标志)。风场资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996), TCs 资料取自 JTWC

Fig. 10 Streamlines at 850 hPa averaged for July–September in (a) 2004 and (b) 2006, with locations of TCs (marked by the symbol “⚡”) over the western North Pacific. Wind field data are from the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay et al., 1996), TCs data are from the JTWC

低层大的湿度等利于 TCs 生成的大尺度环境因子区域都位于西北太平洋偏西、偏北侧的上空；相反，如图 12 所示，在夏季西太平洋暖池处于偏冷时，上述利于 TCs 生成的大尺度环境因子区域都位于西北太平洋偏东、偏南侧的上空。

从上分析结果，我们可以给出西太平洋暖池热力状态与利于西北太平洋 TCs 生成的大尺度环境因子的影响示意图 (图 13)。

6.2 西太平洋暖池热力状态通过季风槽对热带波动的影响

西北太平洋季风槽不仅提供利于 TCs 生成的大尺度环境因子，而且为热带 Rossby 重力混合波 (MRG) 转化为热带低压型 (TD 型) 波动提供动力条件，而 TD 型波动为西北太平洋上 TCs 生成提供初始扰动条件。黄荣辉和陈光华 (2007), Chen and Huang (2008a, 2008b) 从动力理论分析了在西

太平洋暖池不同热力状态下，西北太平洋季风槽对热带西传 Rossby 重力混合波转变成 TD 型波动的影响，揭示了西太平洋暖池的热状态通过季风槽对西北太平洋 TCs 生成位置年际变化的影响机理。他们的分析结果表明：当西北太平洋暖池处于暖状态时，如图 7a 所示，西北太平洋季风槽偏西，使得热带西太平洋上空对流层 MRG 波转变成 TD 型波动的位置也偏西，从而造成西北太平洋 TCs 生成的位置位于西北太平洋偏西、偏北侧上空，并易于出现西行路径；相反，当西太平洋暖池处于冷状态时，如图 7b 所示，西北太平洋季风槽偏东、偏南，这造成了热带西太平洋上空对流层 MRG 波转变成 TD 型波动的区域偏东、偏南，从而导致西北太平洋 TCs 的生成位置位于西北太平洋偏东、偏南侧上空，其移动路径偏东且易于 130°E 附近向东北方向转向。

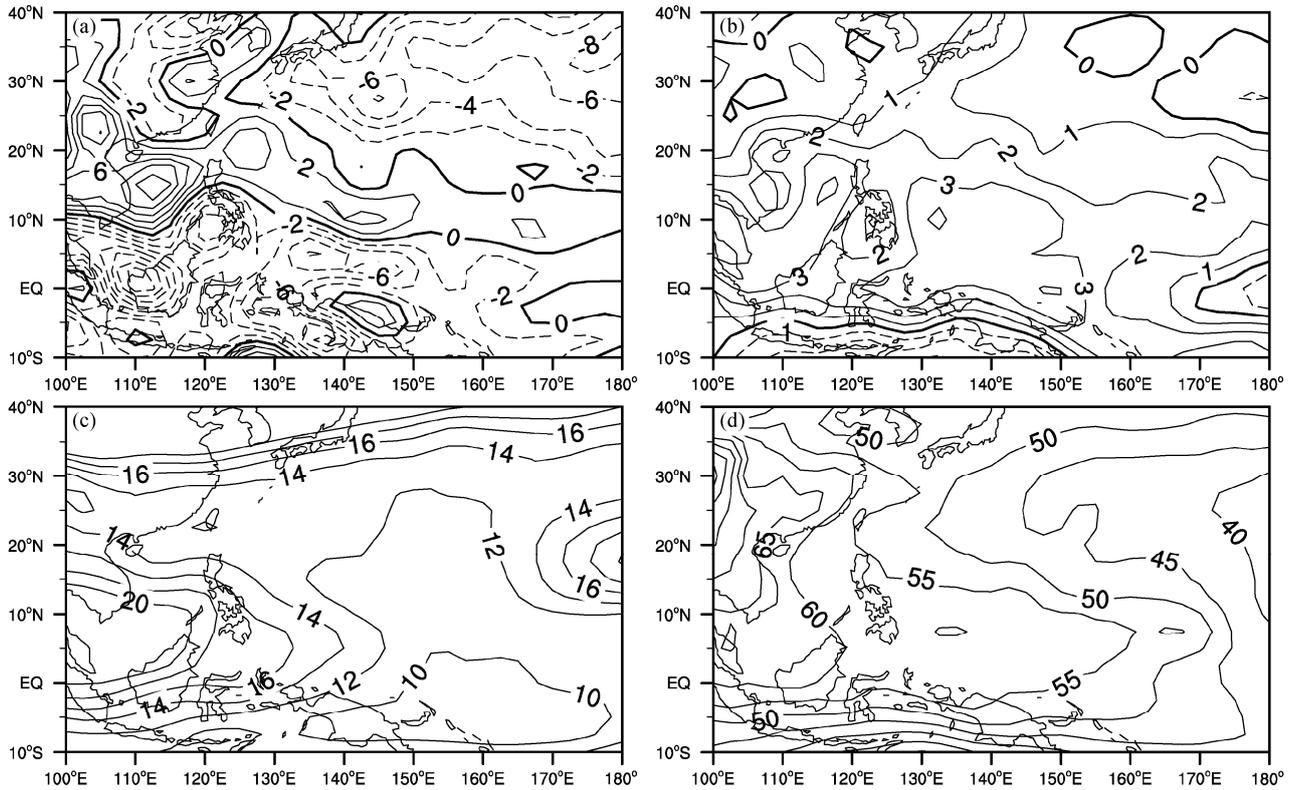


图 11 在西北太平洋暖池偏暖的 7~9 月, 西北太平洋上空 (a) 对流层低层 850 hPa 的相对涡度 (单位: 10^{-6} s^{-1})、(b) 对流层上层 200 hPa 散度 (单位: 10^{-6} s^{-1})、(c) 200 hPa~850 hPa 之间风速的垂直切变 (单位: m s^{-1}) 以及 (d) 700 hPa~500 hPa 平均相对湿度 (%) 的合成分布。风场和湿度资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996)

Fig. 11 Composite distributions of the (a) relative vorticity (units: 10^{-6} s^{-1}) at 850 hPa in the lower troposphere, (b) divergence (units: 10^{-6} s^{-1}) at 200 hPa in the upper troposphere, (c) vertical shear of wind fields (units: m s^{-1}) between 200 hPa and 850 hPa, and (d) relative humidity (%) averaged from 700 hPa to 500 hPa for July–September in the warming state of the western Pacific warm pool. Wind and humidity data are from the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay et al., 1996)

6.3 季风槽对西北太平洋 TCs 生成的影响机理

西北太平洋季风槽对 TCs 生成的动力作用主要通过热带波动的转化为 TCs 生成提供初始扰动。Wu et al. (2012, 2014, 2015a, 2015b) 从动力理论和简单的数值模拟深入研究了西北太平洋上空季风槽对热带 MRG 波转化成 TD 型波动的动力作用和物理过程。他们利用正压能量转换方程和浅水波数值模式探讨了西太平洋暖池上空三种西传热带波动, 即 MRG 波、TD 型波动和西传 Rossby 波的演变与西北太平洋季风槽的关系。他们的分析和数值模拟的结果都表明: 季风槽是影响西北太平洋上空热带波动演变和 TCs 生成的重要大尺度环流系统, 季风槽东伸加强, 更有利于西北太平洋西传热带波动的活动; 并且, 如图 14 所示, 季风槽大尺度环流为西北太平洋上空对流层低层扰动能量增长提供能量, 使得扰动强度增强, 季风槽大尺度气流的纬向辐合和经向切变使

得扰动的尺度收缩, 扰动的结构发生改变。这些作用有利于 MRG 波向水平尺度较小的 TD 型波动转变, 从而为西北太平洋 TC 生成提供初始扰动条件。

最近, 冯涛等 (2016) 的研究结果表明: 在西太平洋暖池偏冷情况下, MRG 波转化成 TD 型波动经常位于西北太平洋偏东、偏南侧上空, 从而导致了在西北太平洋偏东、偏南侧上空不断出现 TD 型波列, 这些波列为 TCs 生成提供先兆扰动; 相反, 在西北太平洋偏暖情况下, MRG 波转化成 TD 型波动往往位于西北太平洋偏西、偏北侧, 从而导致了在西北太平洋偏西、偏北侧上空经常出现 TD 型波列, 为 TCs 生成提供初始扰动, 而在西北太平洋偏东、偏南侧上空很少有 TD 型波列出现。

上述研究清楚表明了西太平洋暖池热力状态不仅通过影响季风槽位置和强度而影响利于西北太平洋 TCs 生成的大尺度环境因子, 而且还通过影

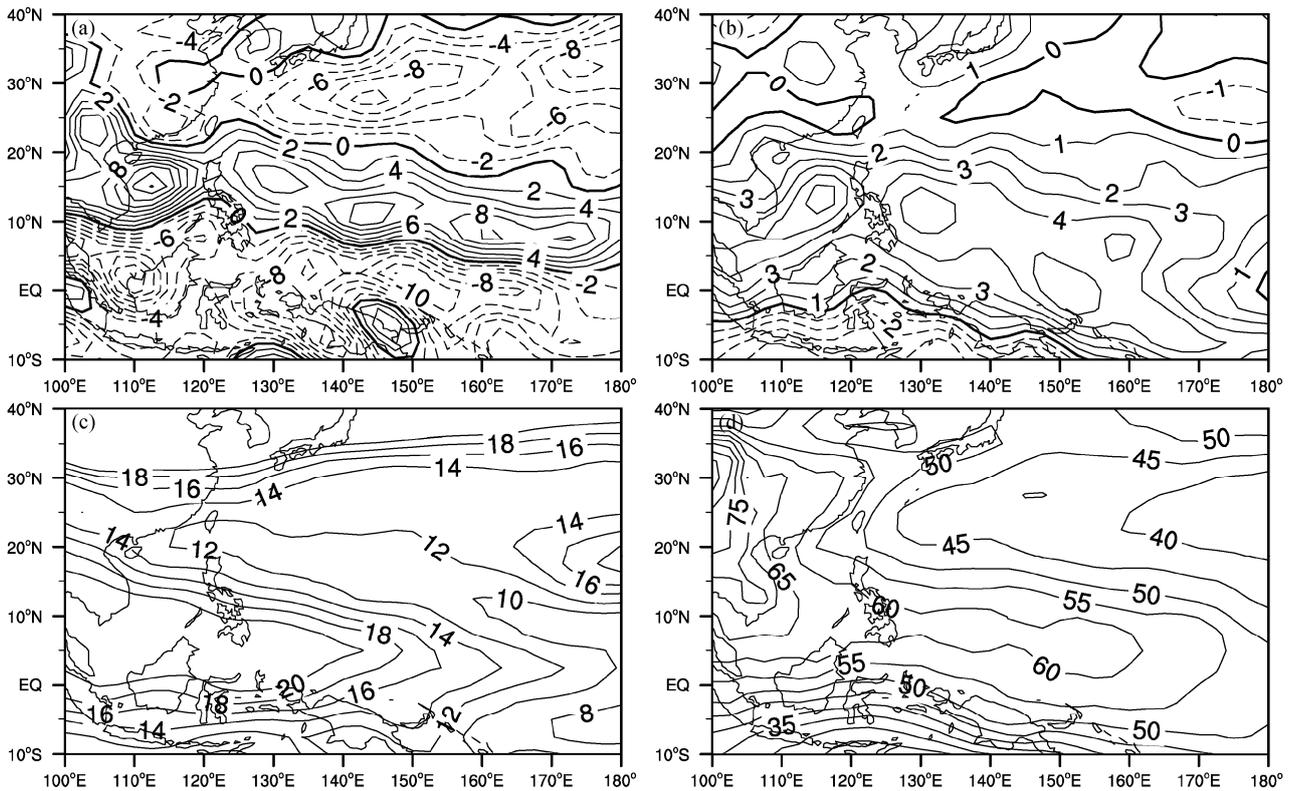


图 12 同图 11, 但为西太平洋暖池偏冷的 7~9 月
 Fig. 12 As in Fig. 11, but for July–September in the cooling state of the western Pacific warm pool

响 MRG 波向 TD 型波动转化来影响为西北太平洋上空 TCs 生成提供初始扰动的 TD 型波列。

7 总结及今后需进一步研究的科学问题

本文回顾和综述了近年来关于西太平洋暖池热力状态和上空对流活动的变异特征及其对西太平洋副热带高压以及西北太平洋季风槽和 TCs 活动的影响过程和机理的研究进展。文中指出：近年来在关于西太平洋暖池热力和上空对流活动的年际和年代际变化及其对西太平洋副热带高压、西北太平洋季风槽和 TCs 活动影响的研究取得明显进展。这些研究不仅表明了西太平洋暖池热力通过 EAP 型遥相关对与西北太平洋 TCs 活动有关的南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压的变异有重要影响，而且还表明了西太平洋暖池热力通过季风槽对西北太平洋 TCs 生成和移动路径产生影响。

尽管近年来在关于西太平洋暖池热力和上空对流活动的年际和年代际变异的研究，以及在关

于西太平洋暖池对西太平洋副热带高压和西太平洋暖池上空 TCs 活动影响过程及其机理方面的研究取得重要进展，但是还有许多科学问题亟须进一步深入研究。其主要的科学问题如下：

(1) 在 1999 年以前，西太平洋暖池海—气相互作用的年际变化存在着明显的准两年周期振荡，特别是西太平洋暖池次表层海温的年际变化存在着准两年周期的振荡。然而，在 1999 年之后，西太平洋暖池海—气相互作用准两年周期并不明显，其原因尚不清楚，这是应该进一步深入研究的科学问题。

(2) 西太平洋暖池热力的年代际变异对南海夏季风爆发和西太平洋副热带高压的变异有很重要的影响。然而，此影响的动力过程至今还不清楚，这也是今后应该从动力理论、数值模拟进行系统研究的科学问题。

(3) 西太平洋暖池热力的变化将引起西北太平洋上空大尺度大气环流的变化，而环流的变化一方面引起对流活动和热带低频振荡 (ISO) 的变化，这将影响西北太平洋上空的季风槽和 TCs 活动的季

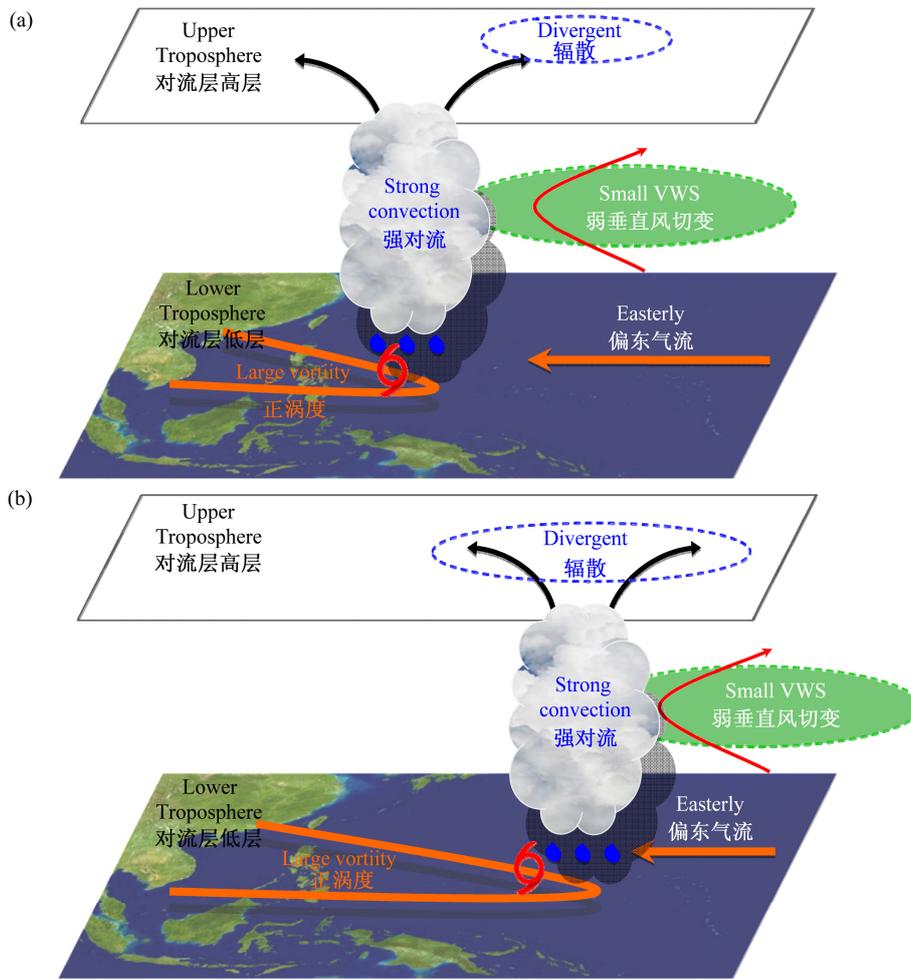


图 13 夏季西太平洋暖池热力状态对利于西北太平洋 TCs 生成大尺度环境因子的影响示意图：(a) 暖池处于暖状态；(b) 暖池处于冷状态

Fig. 13 Schematic diagrams of the influence of the western Pacific warm pool thermal state on the large-scale environmental factors conducive to TCs genesis over the western North Pacific in summer: (a) Warming state and (b) cooling state. VWS represents vertical wind shear

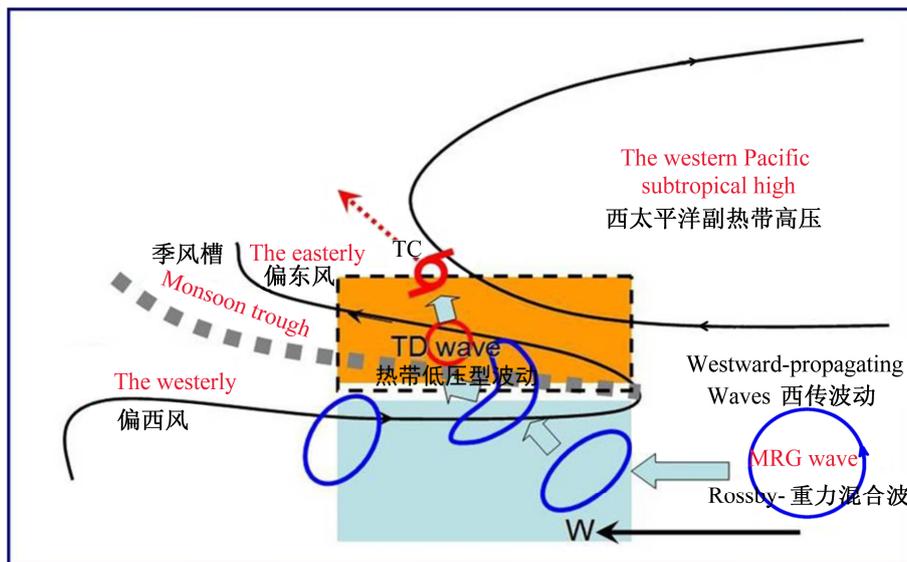


图 14 在西北太平洋季风槽作用下 MRG 波向 TD 型扰动转化的动力过程概念图

Fig. 14 Conceptual diagram of the dynamical process involved in the transition from the MRG wave to TD-type disturbance in the effect of the monsoon trough over the western North Pacific

节内变化和南海夏季风的爆发；另一方面，由菲律宾周围夏季对流加热所产生的准定常行星波通过 EAP 遥相关波列将引起西太平洋副热带高压的变化。因此，西太平洋暖池热力状态、菲律宾周围的对流活动、热带 ISO、西北太平洋上空季风槽和 TCs 活动、西太平洋副热带高压的相互作用过程及其机理应从观测事实、动力理论和数值模拟进一步进行深入研究。

(4) 西太平洋暖池海温影响着西北太平洋季风槽的位置和强度，而季风槽的位置和强度直接影响着热带对流耦合波动及西北太平洋上空 TCs 的生成和移动路径。然而，关于这方面的研究还不多，特别是关于季风槽对热带对流耦合波动的影响过程及其机理的研究还不深入，因此，西太平洋暖池的热力状态影响季风槽的位置和强度的动力和热力过程以及季风槽影响西北太平洋 TCs 活动的过程及机理亟待进一步深入研究。

为了能够深入开展上述亟须研究的科学问题，今后应加强对西太平洋暖池海况和上空大气状况的观测资料的收集和整编，特别是全球海洋地转探测阵列 (Argo) 的海洋探测资料的同化和应用，加强对西太平洋暖池区域海—气相互作用及其对西北太平洋上空季风槽和 TCs 活动和西太平洋副热带高压影响的过程和机理的分析及动力理论研究，发展高分辨率的海—气耦合模式，从而可以更好地对西太平洋暖池海—气相互作用及其对西太平洋副热带高压和西北太平洋 TCs 活动变异的影响过程和机理进行深入而系统的研究和数值模拟。

参考文献 (References)

- Briegel L M, Frank W M. 1997. Large-scale influences on tropical cyclogenesis in the western North Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (7): 1397–1413, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1397:LSIOTC>2.0.CO;2.
- 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 (16): 2960–2972, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2960:TCAOTW>2.0.CO;2.
- Chan J C L. 2005. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 89 (1–4): 143–152, doi:10.1007/s00703-005-0126-y.
- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响 [J]. *自然科学进展*, 11 (12): 1293–1300. Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. Influence of the western tropical Pacific and the eastern Indian Ocean on the development of ENSO [J]. *Progress in Natural Science*, 11 (12): 1293–1300, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2001.12.010.
- Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2008a. Influence of monsoon over the warm pool on interannual variation on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (2): 319–328, doi:10.1007/s00376-008-0319-7.
- Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2008b. Role of equatorial wave transitions in tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 1 (1): 64–68.
- Chen Guanghua. 2015. Comments on “Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset” [J]. *J. Climate*, 28 (22): 9029–9035, doi:10.1175/JCLI-D-14-00732.1.
- 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 West Pacific Typhoon (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 491pp.
- 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 (4): 776–785, doi:10.1175/1520-0434(2004)019<0776:ROTMGI>2.0.CO;2.
- Cornejo-Garrido A G, Stone P H. 1977. On the heat balance of the Walker circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (8): 1155–1162, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1155:OTHBOT>2.0.CO;2.
- Ding Yihui, He Chun. 2006. The summer monsoon onset over the tropical eastern Indian Ocean: The earliest onset process of the Asian summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23 (6): 940–950, doi:10.1007/s00376-006-0940-2.
- Elsberry R L. 1995. *Global perspectives on tropical cyclone* [R]. WMO, TD-NO. 693, Geneva, Switzerland: WMO, 106–197.
- Elsberry R L. 2004. *Monsoon-related tropical cyclones in East Asia* [M]// Chang C P. *East Asian Monsoon (World Scientific Series on Meteorology of East Asia Vol. 2)*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 463–498.
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 436 (7051): 686–688, doi:10.1038/nature03906.
- 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. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307.
- 冯涛, 沈新勇, 黄荣辉, 等. 2014. 热带西太平洋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*, 30 (1): 11–22. Feng Tao, Shen Xinyong, Huang Ronghui, et al. 2014. Influence of the interannual variation of cross-equatorial flow on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *J. Tropical Meteor. (in Chinese)*, 30 (1): 11–22, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.01.002.
- 冯涛, 黄荣辉, 杨修群, 等. 2016. 2004 年与 2006 年 7~9 月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响 [J]. *大气科学*, 40 (1): 157–175. Feng Tao, Huang Ronghui, Yang Xiunqun, et al. 2016. Differences between the large-scale circulations and synoptic-scale waves in July–September 2004 and those in 2006 and their impacts on tropical cyclogenesis over the Western North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (1): 157–175, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14162.
- Feng Tao, Chen Guanghua, Huang Ronghui, et al. 2014. Large-scale circulation patterns favourable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversions [J]. *Int. J.*

- Climatol., 34 (1): 216–227, doi:10.1002/joc.3680.
- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 96 (10): 669–700, doi:10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2.
- Hartmann D L, Hendon H H, Houze Jr R A. 1984. Some implications of the mesoscale circulations in tropical cloud clusters for large-scale dynamics and climate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41 (1): 113–121, doi:10.1175/1520-0469(1984)041<0113:SIOTMC>2.0.CO;2.
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38 (6): 1179–1196, doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2.
- Huang Ronghui. 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6 (1): 25–37.
- Huang Gang. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41–52, doi:10.1007/BF02915679.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// *Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia*. Chengdu, 10–15 April 1987, 40–51.
- Huang R H, Gambo K. 1982. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60: 78–108.
- 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*, 12 (特刊): 107–116.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12(S): 107–116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08.
- Huang Ronghui, Lu Li. 1989. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6 (2): 202–214, doi:10.1007/BF02658016.
- Huang Ronghui, Sun Fengying. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1B): 243–256.
- 黄荣辉, 陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年度变化及其机理研究 [J]. *气象学报*, 65 (5): 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(5): 683–694, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.05.004.
- 黄荣辉, 王磊. 2010. 台风在我国登陆地点的年度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 (5): 853–864. Huang Ronghui, Wang Lei. 2010. Interannual variation of the landfalling locations of typhoons in China and its association with the summer East Asia/Pacific pattern teleconnection [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 853–864, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.01.
- Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. 2004. Climate variations of summer monsoon over China [M]// Chang C P. *World Scientific Series on Asia–Pacific Weather and Climate: East Asian Monsoon*. World Scientific Publisher, 213–270.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. *大气科学*, 29 (1): 20–36. Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 20–36, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.04.
- Huang Ronghui, Gu Lei, Zhou Liantong, et al. 2006. Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on onset date and process of the South China Sea summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23 (6): 909–924, doi:10.1007/s00376-008-0319-7.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. *大气科学*, 30 (4): 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (4): 545–560, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.01.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 993–1023, doi:10.1007/s00376-007-0993-x.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Wang Lin, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (5): 910–942, doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- 黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2015. 从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展 [J]. *大气科学*, 40 (1): 3–21. Huang Ronghui, Huangfu Jingliang, Liu Yong, et al. 2015. Development from the theory of energy dispersion of Rossby wave to the study on dynamics of quasi-stationary planetary waves [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (1): 3–21, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14298.
- Huang P, Lin I I, Chou C, et al. 2015. Change in ocean subsurface environment to suppress tropical cyclone intensification under global warming [J]. *Nature Communications*, 6: 7188, doi:10.1038/ncomms8188.
- Huangfu Jingliang, Huang Ronghui, Chen Wen. 2015. Influence of tropical western Pacific warm pool thermal state on the interdecadal change of the onset of the South China Sea summer monsoon in the late 1990s [J]. *Atmos. Oceanic. Sci. Lett.*, 8 (2): 95–99.
- Huangfu Jingliang, Huang Ronghui, Chen Wen. 2016. Interdecadal increase of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific in May [J]. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.4760.
- Kajikawa Y, Wang B. 2012. Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset [J]. *J. Climate*, 25 (9): 3207–3218, doi:10.1175/JCLI-D-11-00207.1.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kurihara K. 1989. A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western northern Pacific [J]. *Geophys. Mag.*, 43: 45–104.

- 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 (4): 636–651, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0636:AEAOTR>2.0.CO;2.
- 李崇银, 穆明权. 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. *大气科学*, 23 (5): 513–521. Li Chongyin, Mu Mingquan. 1999. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (5): 513–521, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.01.
- 李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1049–1058. Li Chongyin, Pan Jing. 2007. The interannual variation of the South China Sea summer monsoon trough and its impact [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1049–1058, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.02.
- 梁建茵, 吴尚森. 2002. 南海西南季风爆发日期及其影响因子 [J]. *大气科学*, 26 (6): 829–844. Liang J Y, Wu S S, 2002. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (6): 829–844, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.11.
- Lin I I, Pun I P, Lien C C. 2014. “Category-6” supertyphoon Haiyan in global warming hiatus: Contribution from subsurface ocean warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41 (23): 8547–8553, doi:10.1002/2014GL061281.
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (3): 771–783, doi:10.2151/jmsj.79.771.
- McBride J L. 1995. Tropical cyclone formation. Chapter 3 Global Perspectives on Tropical Cyclones [R]. Tech. Doc. WMO/TD No. 693. Geneva, Switzerland: WMO, 63–105.
- McCreary J P, Anderson D L T. 1984. A simple model of El Niño and the southern oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112 (5): 934–946, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0934:ASMOEN>2.0.CO;2.
- 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 (3): 373–390.
- 潘静, 李崇银. 2006. 夏季南海季风槽与印度季风槽的气候特征之比较 [J]. *大气科学*, 30 (3): 377–390. Pan Jing, Li Chongyin. 2006. Comparison of climate characteristics between two summer monsoon troughs over the South China Sea and India [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (3): 377–390, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.02.
- Ritchie E A, Holland G J. 1999. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (9): 2027–2043, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<2027:LSPAWT>2.0.CO;2.
- Schopf P S, Suarez M J. 1988. Vacillations in a coupled ocean–atmosphere model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45 (3): 549–566, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<0549:VIACOM>2.0.CO;2.
- Simmons A S, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. *ECMWF Newsletter*, 110: 25–35.
- Tao Shiyun, Chen Longxun. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press.
- 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 (4): 535–547. Wang B, Elsberry R L, Wang Y Q, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Sci. Atmos. Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 535–547, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.15.
- Wang B, Lin H, Zhang Y S, et al. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 699–710, doi:10.1175/2932.1.
- Wang Lei, Huang Ronghui, Wu Renguang. 2013. Interdecadal variability in tropical cyclone frequency over the South China Sea and its association with the Indian Ocean sea surface temperature [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (4): 768–771, doi:10.1002/grl.50171.
- Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, 103 (C7): 14451–14510, doi:10.1029/97jc02719.
- Webster P J, Holland G H, Curry I A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 309: 1844–1846, doi:10.1126/science.1116448.
- Wu Liang, Wen Zhiping, Huang Ronghui, et al. 2012. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (1): 140–150, doi:10.1175/MWR-D-11-00078.1.
- Wu Liang, Wen Zhiping, Li Tim, et al. 2014. ENSO-phase dependent TD and MRG wave activity in the western North Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 42 (5–6): 1217–1227, doi:10.1007/s00382-013-1754-4.
- Wu Liang, Wen Zhiping, Wu Renguang. 2015a. Influence of the monsoon trough on westward-propagating tropical waves over the western North Pacific. Part I: Observations [J]. *J. Climate*, 28 (18): 7108–7127, doi:10.1175/JCLI-D-14-00806.1.
- Wu Liang, Wen Zhiping, Wu Renguang. 2015b. Influence of the monsoon trough on westward-propagating tropical waves over the western North Pacific. Part II: Energetics and numerical experiments [J]. *J. Climate*, 28 (23): 9332–9349, doi:10.1175/JCLI-D-14-00807.1.
- 叶笃正, 黄荣辉, 郭裕福. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 387pp. Ye Duzheng, Huang Ronghui, Guo Yufu. 1996. Research on the Regularity and Cause of Drought and Flood in the Yangtze River and the Yellow River Valleys (in Chinese) [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 387pp.
- Zeng Qingcun, et al. 1986. A global grid point general circulation model, short- and medium-range numerical weather prediction [C]// Collection of Papers Presented at the WMO/TUGG NWP Symposium. Tokyo, 424–430.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (1): 49–62.
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用. I 资料诊断和理论分析 [J]. *大气科学*, 22 (4): 587–599. Zhang Renhe, Huang Ronghui. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (4): 587–599.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16 (2): 229–241, doi:10.1007/BF02973084.