

张翔, 武亮, 皇甫静亮, 等. 2017. 西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 418–434. Zhang Xiang, Wu Liang, Huangfu Jingliang, et al. 2017. Seasonal and interannual variability of the western North Pacific monsoon trough and its relationship to large-scale environmental factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 418–434, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16065.

西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系

张翔¹ 武亮² 皇甫静亮² 范广洲¹ 黄荣辉²

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

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 利用 ERA-Interim 再分析资料分析了夏秋季西北太平洋季风槽的气候特征以及季节和年际变化特征及其对西北太平洋热带气旋和台风 (TCs) 生成大尺度环境因子的影响。研究结果表明了西北太平洋季风槽有很明显的季节变化, 在 6~7 月, 季风槽和强对流活动区在 5°N~15°N 的南海和西北太平洋西侧上空, 并逐渐东伸; 到了 8~9 月, 季风槽和强对流活动区向北移动、并向东扩展, 一般位于 10°N~20°N 的南海和西北太平洋西侧、中部上空, 有的年份可东伸到西北太平洋东侧, 强度加强; 到了 10~11 月, 季风槽迅速减弱, 并成为涡旋, 强对流活动区也向南移和向西收缩。同时, 研究还表明了西北太平洋季风槽有明显的年际变化。在季风槽强的年份, 季风槽和强对流活动区可以从南海经西北太平洋西侧和中部东伸到西北太平洋的东侧上空; 而在季风槽弱的年份, 季风槽和强对流活动区主要位于南海和西北太平洋西侧和中部上空, 季风槽强度的年际变化对它的季节变化也有重要影响。此外, 研究还表明了随着季风槽的季节和年际变化, 西北太平洋 TCs 生成的大尺度环境因子分布也发生很明显的变化。

关键词 西北太平洋 季风槽 季节变化 年际变化

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0418-17

中图分类号 P425.4.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16065

Seasonal and Interannual Variability of the Western North Pacific Monsoon Trough and Its Relationship to Large-Scale Environmental Factors

ZHANG Xiang¹, WU Liang², HUANGFU Jingliang², FAN Guangzhou¹, and HUANG Ronghui²

¹ School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

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

Abstract The seasonal and interannual variability of boreal summer and autumn monsoon trough in the western North Pacific (WNP) and their influence on the large-scale environmental factors of tropical cyclone (TC) formation are examined using the ERA-Interim reanalysis data during 1979–2012. The results suggest that a pronounced seasonal variability of monsoon trough over the WNP is shown. During June–July, the monsoon trough and deep convection over the South China Sea (SCS) and the western WNP in the 5°N–15°N latitudinal band, and are extended eastward. In August

收稿日期 2016-03-30; 网络预出版日期 2016-05-23

作者简介 张翔, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事西北太平洋季风槽的研究. E-mail: 249829197@qq.com

通讯作者 武亮, E-mail: wul@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2014CB953902, 国家自然科学基金 41475077、41461164005、41230527、41375065

Funderd by National Basic Research Program of China (Grant 2014CB953902), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475077, 41461164005, 41230527, and 41375065)

and September, the monsoon trough and deep convection shift toward the north and extend eastward and are located over the SCS and the western and central Pacific in the 10°N–20°N latitudinal band. In October and November, the weakened monsoon trough retreats westward and southward. There is an interannual variability in the monsoon trough over the WNP. During the strong (weak) monsoon trough years, the monsoon trough extends eastward (retreats westward). Seasonal monsoon trough activity is influenced by interannual monsoon trough variability. The change of large-scale environmental factors coincides with seasonal and interannual variability of the monsoon trough.

Keywords Western North Pacific, Monsoon trough, Seasonal variation, Interannual variation

1 引言

西北太平洋是全球高海温的海域之一, 其上空也是全球热带气旋和台风 (TCs) 主要生成区域之一, 据统计全球约 1/3 TCs 在此海域上空生成 (Elsberry, 2004)。在西北太平洋上生成的 TCs 中一大部分向西和西北方向移动, 并在中国、菲律宾、越南、日本和韩国登陆, 并给这些国家造成严重的经济损失和重大人员伤亡。我国是世界上遭受 TCs 灾害最严重的国家之一。据统计, 平均每年有 7~8 个 TCs 登陆我国东南沿海地区, 个别年份可达到 12 个之多, 给我国造成 200 多亿元人民币的经济损失和数百人的人员伤亡 (黄荣辉和陈光华, 2007)。

西北太平洋上空为什么是 TCs 易于生成的区域, 这不仅是由于西北太平洋表层和次表层海温很高, 满足 TCs 生成的热力条件, 而且在夏秋季西北太平洋上经常是季风槽所在之处。西北太平洋季风槽不仅可以为 TCs 生成提供低层气流的辐合和气旋性相对涡度、高层气流的辐散, 较小的垂直风切变以及充足的水汽等大尺度环境条件 (Briegel and Frank, 1997; Ritchie and Holland, 1999; 曹西等, 2013; 冯涛等, 2013; Cao et al., 2014), 而且可以为 TCs 生成提供初始扰动和动力条件 (Wu et al., 2012, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b)。

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。当亚洲西南季风爆发以后, 从南半球吹来的偏南气流到了北半球, 由于科里奥力的作用就会向东偏, 并与亚洲西南季风叠加, 从而在西北太平洋上空形成强的西南气流, 因此, 在热带西北太平洋上空对流层低层就会出现西南季风气流; 并且, 此西南季风气流在南海和西北太平洋上空与从热带东、中太平洋对流层低层吹来的偏东气流相遇时, 将与东风气流合并沿西太平洋副热带高压的南部向西北方向吹, 这就在南海和西北太平洋上空对流层低层形成季风槽。潘静和李崇

银 (2006) 以及李崇银和潘静 (2007) 对南海季风槽和孟加拉季风槽的形成、结构及其对天气气候的影响做了深入研究。Feng et al. (2014) 和冯涛等 (2014) 分析了西北太平洋季风槽年际变化对 TCs 生成大尺度环境因子变化的影响。并且, 黄荣辉和陈光华 (2007) 以及 Wu et al. (2012) 和 Chen and Huang (2008) 分析了西北太平洋季风槽的年际变化及其对 TCs 活动的影响。最近, 皇甫静亮 (2016) 研究了西北太平洋季风槽在 20 世纪 90 年代末发生的年代际跃变及其对 TCs 生成的影响。并且, 黄荣辉等 (2016) 研究西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和 TCs 生成年际和年代际变化的影响及其机理。

以上关于西北太平洋上空季风槽变化的研究主要集中讨论季风槽年际和年代际的变化, 但关于它的季节变化研究还较少。年际变化方面的研究也主要是分析和比较一些典型年份的季风槽位置不同及其对 TCs 活动的影响, 而关于它的强度的年际变化则研究较少。为此, 本文利用 ERA-Interim 再分析资料分析西北太平洋季风槽的气候学特征以及它的强度季节和年际变化特征。

2 西北太平洋季风槽的气候特征

2.1 季风槽的气候特征

正如引言中所述, 西北太平洋季风槽是亚洲西南季风、跨赤道气流与西太平洋副热带高压南沿的偏东气流在热带西北太平洋汇合形成的一个大尺度气旋性环流系统。图 1 是利用 ERA-Interim 再分析的风场资料和美国海洋大气管理局 (NOAA) 的对外长波辐射 (outgoing longwave radiation, OLR) 资料所分析的 1979~2012 年 6~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 流线分布和 OLR 分布。从图 1 可以看到, 西北太平洋季风槽从我国南海上空经菲律宾向东南延伸到 145°E 附近的西北太平洋上空, 在槽的南边盛行西南季风气流, 而在槽的北边盛行

东南气流,在季风槽区有较强的对流活动,特别沿季风槽的槽线有明显的强对流活动中心。

2.2 季风槽与 TCs 生成大尺度环境因子的关系

由于季风槽会使西北太平洋上空对流层环流

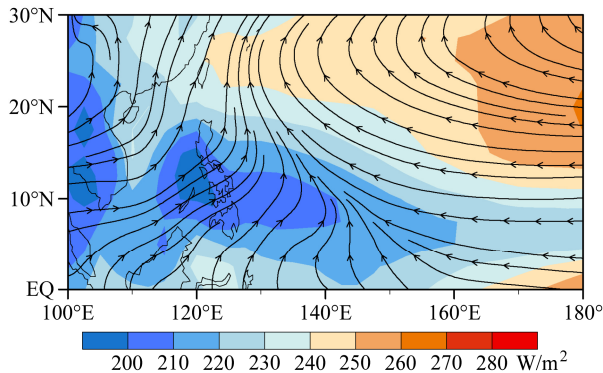


图1 1979~2012年6~11月平均的西北太平洋上空850 hPa流线和OLR(彩色)分布。风场资料取自ERA-Interim再分析资料(Dee et al., 2011),OLR资料取自NOAA的OLR资料集(Liebmann and Smith, 1996)
Fig. 1 1979–2012 climatological means of 850-hPa stream field and outgoing longwave radiation (OLR, shaded) over the western North Pacific during the period of Jun–Nov. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

和水汽以及垂直风切变产生重要变化,因此,分析季风槽与这些大尺度环境因子的关系是很有必要的。图2a~d分别是1979~2012年6~11月平均的西北太平洋上空850 hPa气流的相对涡度、200 hPa气流的散度、700~500 hPa平均的相对湿度以及200~850 hPa垂直风切变。这些大尺度环境因子参照Feng et al. (2014)中所用计算公式而得到。从图2a可以清楚看到:在6~11月我国南海上空对流层低层有一个较强的正相对涡度中心,而在西北太平洋(5°N~20°N, 120°E~145°E)区域对流层低层上空有东西向带状正相对涡度的分布,这与图1所示季风槽位置相吻合;并且,从图2b~d也可以分别看到:在我国南海和西北太平洋(5°N~20°N, 120°E~145°E)上空200 hPa有较强的正散度分布,在对流层中、下层有较大的相对湿度,即充足的水汽,对流层低层与对流层上层之间有较弱的垂直风切变。这表明西北太平洋季风槽会使西北太平洋上空对流层低层气流辐合加强、对流层高层气流辐散加强、对流层中、下层水汽充足、弱的垂直风切变,这些大尺度环境是利于西北太平洋上TCs的生成。

为了更好地理解西北太平洋季风槽所在区域

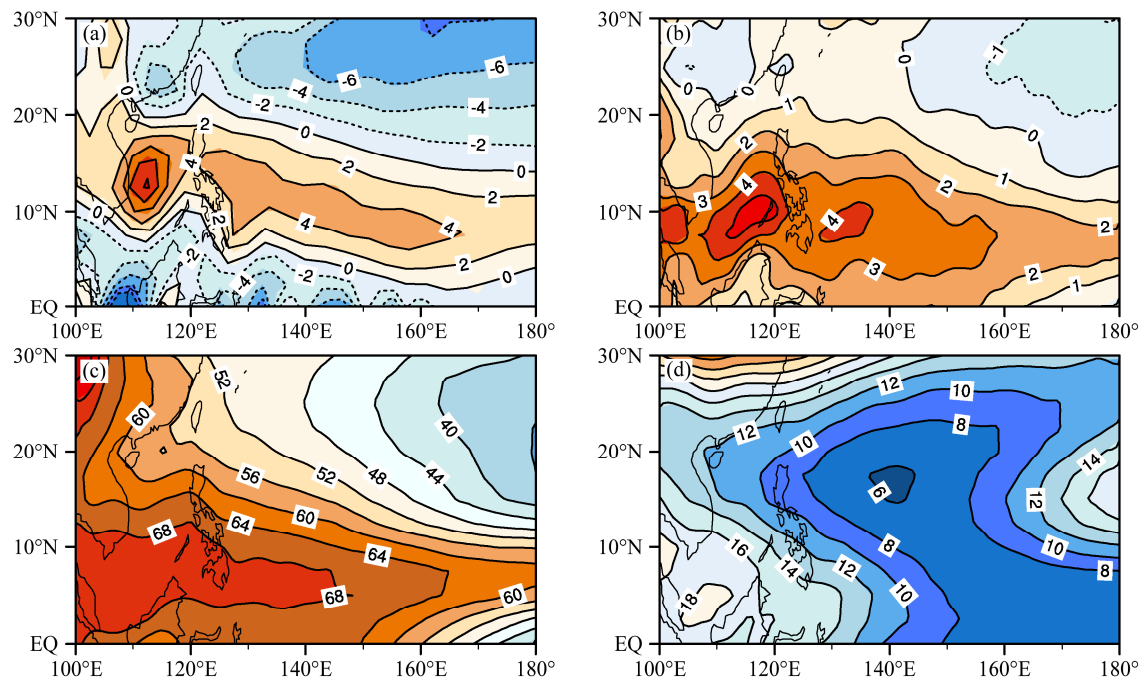


图2 1979~2012年6~11月平均的西北太平洋上空(a)对流层低层850 hPa的相对涡度(单位: 10^{-6} s^{-1}), (b)对流层上层200 hPa散度(单位: 10^{-6} s^{-1}), (c)700~500 hPa平均相对湿度(%)以及(d)200~850 hPa之间风速的垂直切变(单位: m s^{-1})分布。风场和湿度资料取自ERA-Interim再分析资料(Dee et al., 2011)

Fig. 2 1979–2012 climatological means of (a) 850-hPa relative vorticity (10^{-6} s^{-1}), (b) 200-hPa divergence (10^{-6} s^{-1}), (c) 500–700-hPa relative humidity (%), and (d) vertical wind shear (m s^{-1}) between 200 and 850 hPa over the western North Pacific during the period of Jun–Nov. Wind and humidity data are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011)

上空的环流的垂直分布情况, 本文分析了沿 $5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均的西北太平洋涡度、散度以及垂直运动随经度和高度的分布 (见图 3)。从图 3a 可以看到: 在南海和西北太平洋上空 500 hPa 以下的对流层中、下层是正的相对涡度, 而在对流层 300 hPa 以上的上层有负的相对涡度分布, 即此区域上空对流层中、下层气流是气旋性, 而在对流层上层气流则是反气旋性, 这表明季风槽主要位于南海和西北太平洋上空对流层的中、下层; 并且, 从图 3b 可以看到: 在南海和西北太平洋上空对流层 400 hPa 以下的对流层中、下层有负的散度分布, 即此区域对流层中、下层气流有较强的辐合, 而在此区域上空 300 hPa 以上的对流层上层有正的散度分布, 即在南海和西北太平洋上空对流层上层有较强的辐散, 这表明了 6~11 月南海和西北太平洋上空对流层低层有强的季风槽, 从而引起了此区域对流层中、下层气流辐合, 而在对流层上层气流辐散。此外, 从图 3c 还可以看到, 在南海西部和西北太平洋上空从 850~250 hPa 分别有明显的上升运动, 特别在南海和西北太平洋季风槽区从 700~250 hPa 大气有很强的上升运动, 其最强的中心位于 140°E 上空 400 hPa 附近, 这与在图 3a 和图 3b 所示的环流涡度和散度分布相吻合。

上述分析结果表明: 正如图 4 所示, 从 6~11 月南海和西北太平洋上空的季风槽是从东南亚吹来的西南季风和从南半球吹来的跨赤道气流与从热带东、中太平洋上空沿西太平洋副热带高压南边吹来的东风气流相交汇而形成的一个对流层中低层的气旋性大尺度环流系统。它于 6~11 月在 $5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 附近的西北太平洋上空的维持, 使得该区域对流层出现强的低层辐合和高层辐散、中、下层充足的水汽和弱的垂直风切变。这些为西北太平洋上空 TCs 生成提供有利的大尺度环境条件。

3 西北太平洋季风槽的季节变化特征

3.1 季风槽的季节变化特征

一般把 6~11 月称为西北太平洋 TCs 生成季节, 又称为台风季。然而, 西北太平洋季风槽随着亚洲西南季风和从南半球来的跨赤道气流在西北太平洋的加强, 在台风季有很明显的季节变化。为此, 本节利用再分析资料分析西北太平洋季风槽的季节变化情况。

图 5a~c 分别是热带西太平洋上空 1979~2012 年 6~7 月、8~9 月、10~11 月平均的对流层低层 850 hPa 水平流场和 OLR 分布。从图 5a 可以看到: 在 6~7 月, 随着亚洲西南季风的爆发和来自南半球的跨赤道气流的北上, 在南海和西北太平洋上空西太平洋副热带高压的西南部季风槽建立并发展东伸, 槽线位于 $5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$, 并呈西北—东南倾斜, 季风槽可伸展到 135°E 附近, 这期间在季风槽控制的 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 区域有小的 OLR 值, 即有较强的对流活动, 此时期正是西北太平洋 TCs 生成进入发展期; 并且, 从图 5b 可以看到: 到了 8~9 月, 随着亚洲西南季风向西北太平洋中部或东侧上空伸展以及来自南北球的跨赤道气流继续北上和西太平洋副热带高压往北移动, 这时期季风槽不仅向北移动, 而且继续向东伸展, 它控制了 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域, 其槽线位于 15°N 附近, 并呈西北—东南倾斜, 在季风槽控制的区域 OLR 值比 6~7 月更小, 这表明此时期西北太平洋上空有更强的对流活动在发展, 即西北太平洋 TCs 生成进入旺盛期。此外, 从图 5c 可以看到: 到了 10~11 月, 由于来自南半球的跨赤道气流向南半球撤退, 并且东亚冬季风 (东北季风) 南下到了南海, 与图 5a 和图 5b 所示的季风槽相比, 西北太平洋上空的季风槽衰减, 并变成涡旋和辐合带, 除了南海南部外, 西北太平洋上空 OLR 值变大, 这表明此时期西北太平洋对流活动变弱, 西北太平洋 TCs 生成进入衰减期。

3.2 季风槽的季节变化对 TCs 生成大尺度环境因子变化的影响

西北太平洋季风槽的季节变化对利于西北太平洋上 TCs 生成的对流层低层环流的涡度、对流层上层环流的散度、对流层中、下层的水汽和垂直风切变等大尺度环境因子会造成重要影响。为此, 本节利用 1979~2012 年 ERA-Interim 再分析资料分析 6~7 月、8~9 月和 10~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 的相对涡度、上层 200 hPa 的散度, 700~500 hPa 平均的相对湿度以及 200 hPa 与 850 hPa 之间的垂直风切变。

从图 6a 可以看到: 在 6~7 月, 随着季风槽的建立和逐渐东伸, 在 $5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的西北太平洋上空对流层下层出现较强的气旋性相对涡度, 这表明了此时期在季风槽控制区域上空对流层低层的大尺度环流存在着利于 TCs 生成的大尺度气旋性相对涡

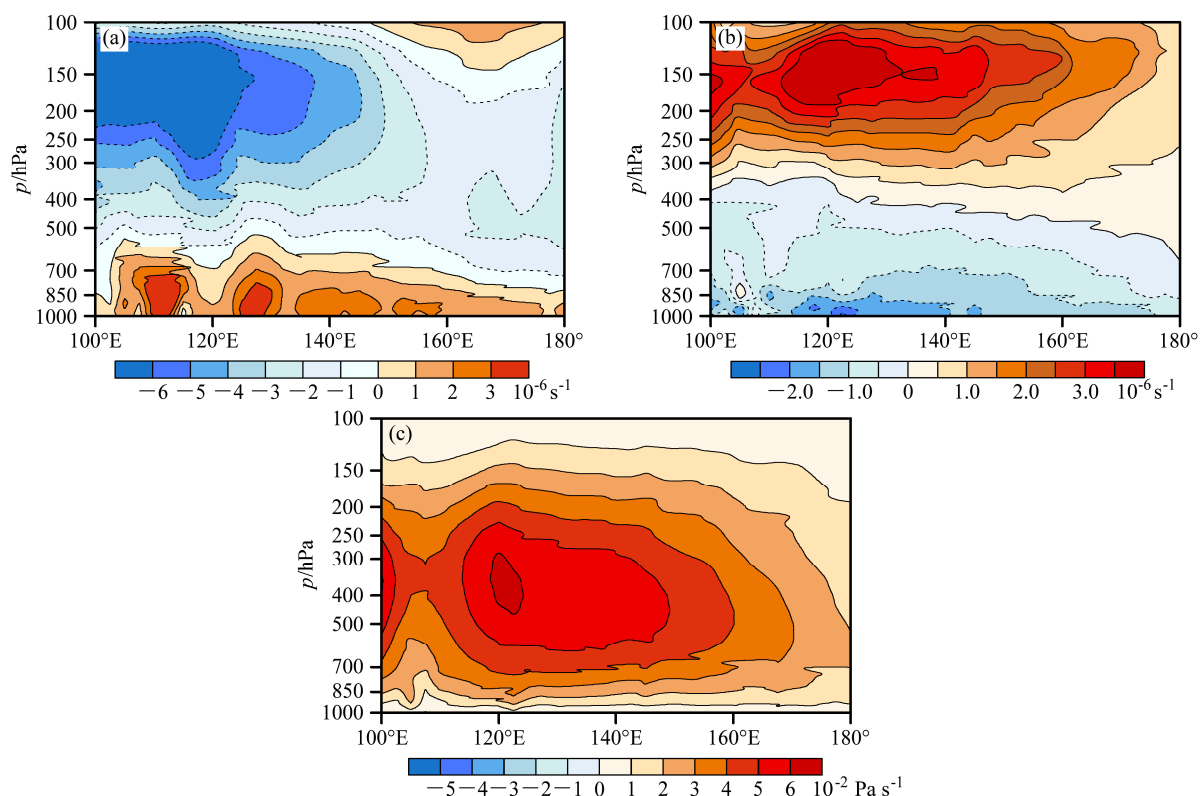


图3 1979~2012年6~11月5°N~20°N平均的(a)850 hPa相对涡度、(b)200 hPa散度、(c)垂直速度的经度—高度剖面。风场资料取自ERA-Interim再分析资料 (Dee et al., 2011)

Fig. 3 Longitude-height cross sections of (a) 850-hPa relative vorticity, (b) 200-hPa divergence, and (c) the vertical velocity averaged along 5°N–20°N during Jun–Nov of 1979–2012. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis (Dee et al., 2011).

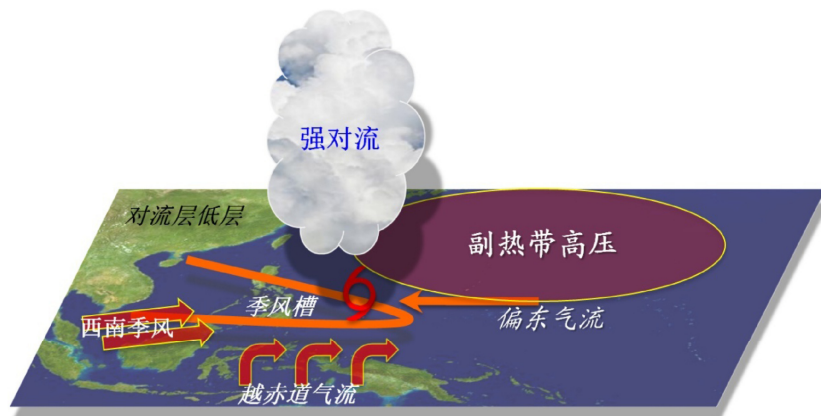


图4 西北太平洋季风槽及其周围环流特征示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the monsoon trough in the western North Pacific and its relationship to the background circulation

度；并且，图6b显示了在赤道至15°N的西北太平洋上空对流层上层出现较大的正散度，这表明了此时期在季风槽控制区域上空对流层上层的大尺度环流存在着利于TCs生成的大尺度辐散；同时，在图6c也显示了在赤道至15°N的西北太平洋、南海和我国东南沿海上空对流层中、下层有充足的水

汽，这可以为西北太平洋上空TCs生成提供充足的水汽；此外，从图6d可以看到，在南海和西北太平洋上空沿西太平洋副热带西南部以及西部的对流层存在着小的垂直风切变，这表明在沿西太平洋副热带高压西南侧的季风槽区域可以为TCs生成提供大尺度的风场垂直切变条件。

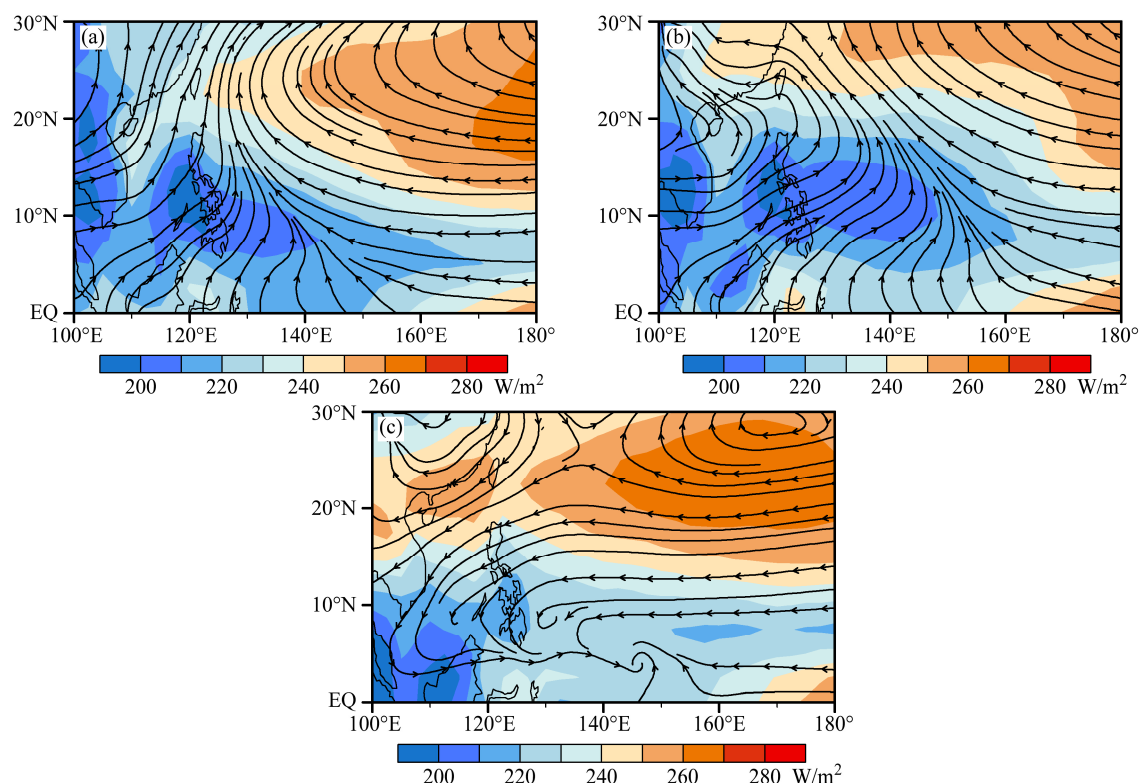


图5 1979~2012年(a)6~7月、(b)8~9月、(c)10~11月平均的西北太平洋上空850 hPa流线和OLR(彩色)分布。风场资料取自ERA-Interim再分析资料(Dee et al., 2011), OLR资料取自NOAA的OLR资料集

Fig. 5 1979–2012 climatological means of 850 hPa stream field and OLR (shaded) over the western North Pacific in (a) Jun–Jul, (b) Aug–Sep, and (c) Oct–Nov. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and the OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

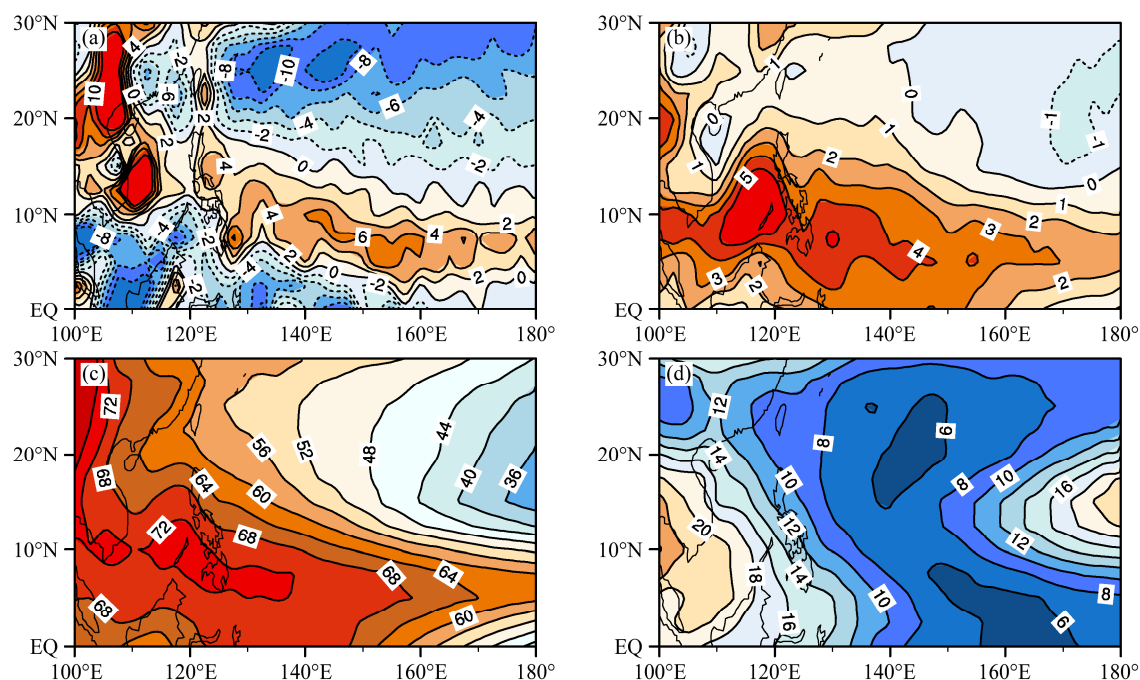


图6 1979~2012年6~7月平均的西北太平洋上空(a)对流层低层850 hPa的相对涡度(单位: 10^{-6} s^{-1})、(b)对流层上层200 hPa的散度(单位: 10^{-6} s^{-1})、(c)对流层700~500 hPa平均的相对湿度(%) 和(d)对流层850~200 hPa之间的垂直风切变(单位: m s^{-1})分布。风场和水汽资料取自ERA-Interim再分析资料(Dee et al., 2011)

Fig. 6 1979–2012 climatological means of (a) 850-hPa relative vorticity (10^{-6} s^{-1}), (b) 200-hPa divergence (10^{-6} s^{-1}), (c) 700–500-hPa relative humidity (%), and (d) vertical wind shear (m s^{-1}) between 200 and 850 hPa averaged over Jun–Jul. Wind and humidity fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011)

上述分析结果表明：在 6~7 月，随着亚洲西南季风的爆发和来自南半球跨赤道气流的北上，在我国南海和西北太平洋上空对流层低层会形成一个季风槽大尺度环流系统。在此时期，西北太平洋季风槽位于（5°N~15°N，110°E~140°E）的南海和西太平洋上空。季风槽控制区域不仅有较强的对流层低层气旋性相对涡度和较强的对流层上层辐散，而且对流层中、下层有充足的水汽以及较小的垂直风场切变。这些为此区域 TCs 生成提供有利的大尺度环境条件，从而使西北太平洋上空 TCs 生成在 6~7 月进入发展期。

把图 7a-d 与图 6a-d 相比较，其结果表明了到了 8~9 月，随着季风槽的向北推进，西北太平洋上空对流层低层强的气旋性相对涡度、对流层上层强的水平辐散以及对流层中、下层水汽含量充足的区域不仅向北移动到 10°N~20°N 区域，而且向东也有所伸展；并且，较弱的垂直风切变区域也向北、向西移动。这表明 8~9 月西北太平洋上 TCs 生成区域也向北推移，这正是西北太平洋 TCs 生成的旺盛期。此外，到了 10~11 月，正如图 8a-d 所示，随着季风槽的衰减，西北太平洋上空对流层低层较强的气旋性相对涡度、对流层上层较强的水平辐散以及对流层中、下层水汽含量较大的区域明显向南撤退到 5°N~10°N 区域，强度也明显减弱；并且，较弱的垂直风切变也向南撤退。这表明 10~11 月西北太平洋 TCs 生成区域也向南撤退，此时期，西北太平洋上空 TCs 生成数量很少，可以说是西北太平洋 TCs 生成的衰减期。

从上述分析可以看到：西北太平洋季风槽有很明显的季节变化，它引起了西北太平洋上 TCs 生成的大尺度环境因子也相应有很大的季节变化，从而使西北太平洋 TCs 生成也相应有明显的季节变化。

4 西北太平洋季风槽强度的年际变化及其对西北太平洋 TCs 生成大尺度环境因子的影响

受亚洲西南季风、跨赤道气流和西北太平洋副热带高压的影响，西北太平洋季风槽有很大的年际变化。黄荣辉和陈光华（2007）以及 Chen and Huang（2008）指出：在西太平洋暖池偏暖时，西北太平洋季风槽位于西北太平洋的偏西、偏北侧，则西北太平洋上 TCs 生成的位置也在西北太平洋上空的偏

西、偏北侧；而在西太平洋暖池偏冷时，西北太平洋季风槽位于西北太平洋的偏东、偏南侧，则西北太平洋上 TCs 生成的位置也在西北太平洋上空的偏东、偏南侧。并且冯涛等（2016）以 2004 年和 2006 年西北太平洋 TCs 生成位置、强度和热带波动特征不同为例，说明了西北太平洋季风槽位置不同对西北太平洋上 TCs 生成的影响。这些研究主要聚焦于季风槽位置的年际变化。本节着重研究西北太平洋季风槽强度的年际变化。

4.1 西北太平洋季风槽强度定义及其年际变化

为了研究西北太平洋季风槽的年际变化，定义季风槽强度指数是很有必要的。为此，本节提出一个西北太平洋季风槽强度指数，即定义西北太平洋季风槽强度指数（简称 MTI，记为 I_{MT} ）为某年 6~11 月西北太平洋上空（5°N~20°N，135°E~165°E）区域平均的对流层低层 850 hPa 相对涡度 ζ 与 1979~2012 年 6~11 月此区域 850 hPa 相对涡度气候平均值 $\bar{\zeta}$ 之差与此区域 6~11 月平均的 850 hPa 相对涡度的均方差 $\sqrt{\sigma^2}$ 之比，即 MTI 可定义为下式：

$$I_{MT} = \frac{\zeta - \bar{\zeta}}{\sqrt{\sigma^2}}, \quad (1)$$

从上式可看到：若 $I_{MT} > 0$ ，则西北太平洋季风槽偏强；相反，若 $I_{MT} < 0$ ，则西北太平洋季风槽偏弱。

图 9 是应用上述定义和利用 ERA-Interim 再分析资料所计算的 1979~2012 年西北太平洋季风槽强度指数 MTI 的年际变化，从图 9 可以看到：1979 年、1980 年、1982 年、1986 年、1987 年、1989 年、1990 年、1991 年、1992 年、1993 年、1994 年、1997 年、2001 年、2002 年、2003 年、2004 年、2006 年、2009 年 MTI 为正，即西北太平洋季风槽偏强；而 1981 年、1983 年、1984 年、1985 年、1988 年、1995 年、1996 年、1998 年、1999 年、2000 年、2005 年、2007 年、2008 年、2010 年、2011 年、2012 年 MTI 为负，即西北太平洋季风槽偏弱。特别是 1982 年、1990 年、1991 年、1997 年、2002 年、2004 年、2009 年 MTI 为较大正值，即西北太平洋季风槽较强，这些年份的 6~11 月热带中东太平洋次表层海温偏暖，处于 El Niño 事件的发展期；相反，1984 年、1988 年、1998 年、2007 年、2008 年、2010 年 MTI 为较大负值，即西北太平洋季风槽较弱。这些年份的 6~11 月热带中东太平洋次表层海温偏冷，处于 La Niña 事件的发展期。

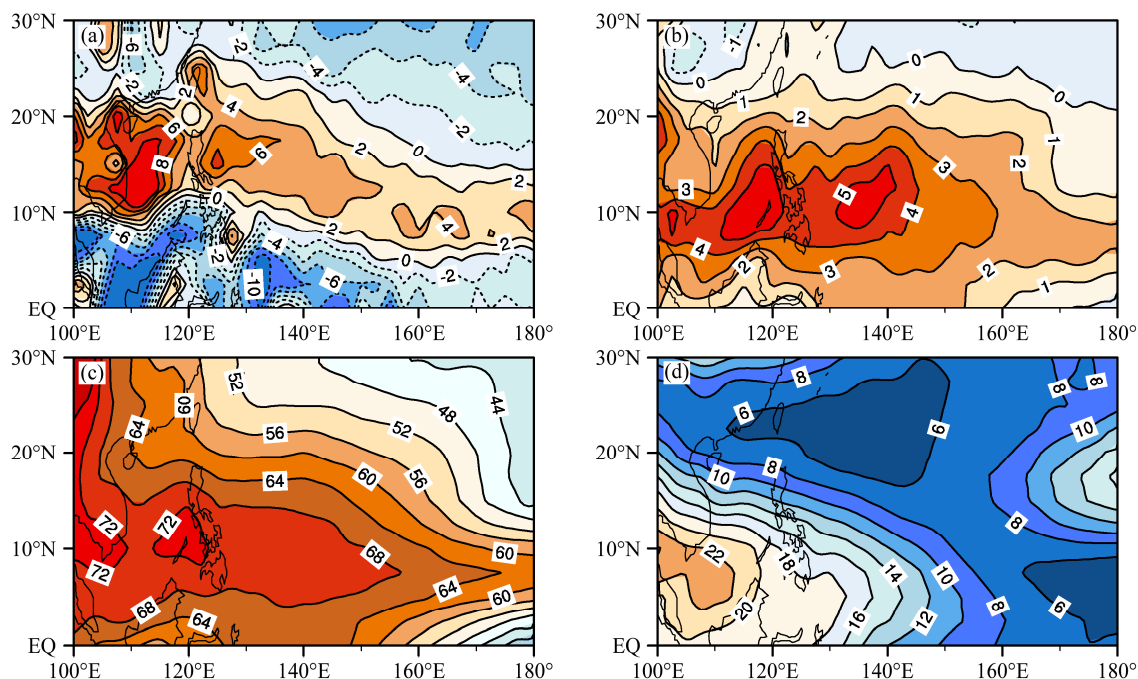


图7 同图6, 但为8~9月的平均

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the period of Aug-Sep

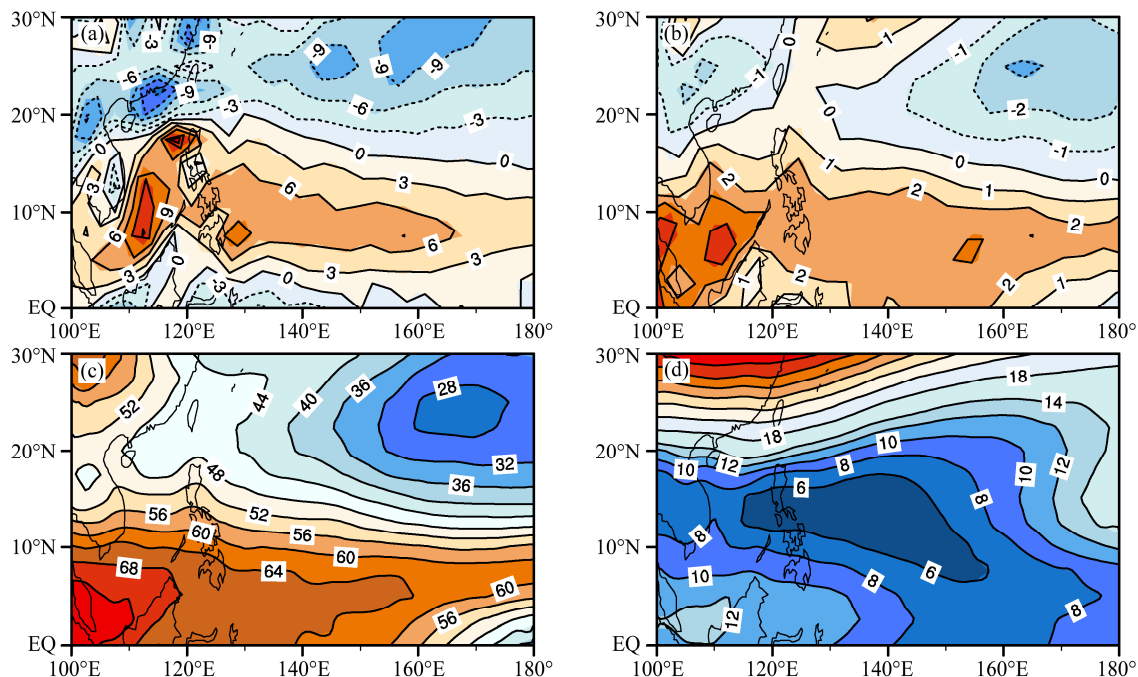


图8 同图6, 但为10~11月的平均

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the period of Oct-Nov

4.2 季风槽强度的年际变化特征

正如图9所示, 西北太平洋季风槽强度有很大的年际变化。为了研究与西北太平洋季风槽强度的年际变化相应的季风槽环流和对流活动的年际变

化, 本节分别对 $I_{MT} > 0$ (见图10a) 和 $I_{MT} < 0$ (见图10b) 的年份6~11月西北太平洋上空对流层低层850 hPa流场和OLR做合成分析。从图10a所示的流线和OLR分布分别可以看到: 在季风槽偏

强的年份的 6~11 月, 季风槽从南海上空对流层低层向东伸到西北太平洋东侧 160°E 附近上空的对流层低层, 季风槽位置偏南并东伸, 强对流活动分布也东伸到西北太平洋东侧; 并且, 从图 10b 所示的流线和 OLR 分布分别可以看到: 在季风槽偏弱年

份的 6~11 月, 季风槽向西北太平洋西北侧收缩, 从南海上空对流层低层只东伸到西北太平洋 135°E 附近上空的对流层低层, 强对流活动分布主要位于南海和西北太平洋西侧上空。

上述所分析的西北太平洋季风槽偏强与偏弱

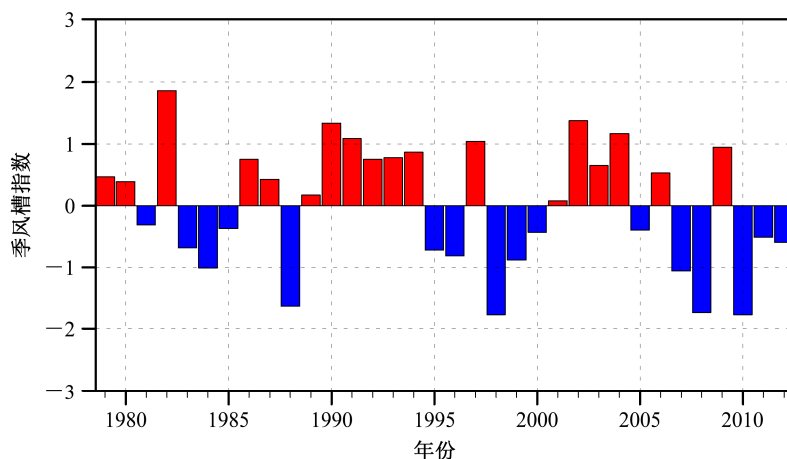


图 9 西北太平洋季风槽指数 (MTI) 的年际变化

Fig. 9 Time series of the monsoon trough index (MTI) in the western North Pacific

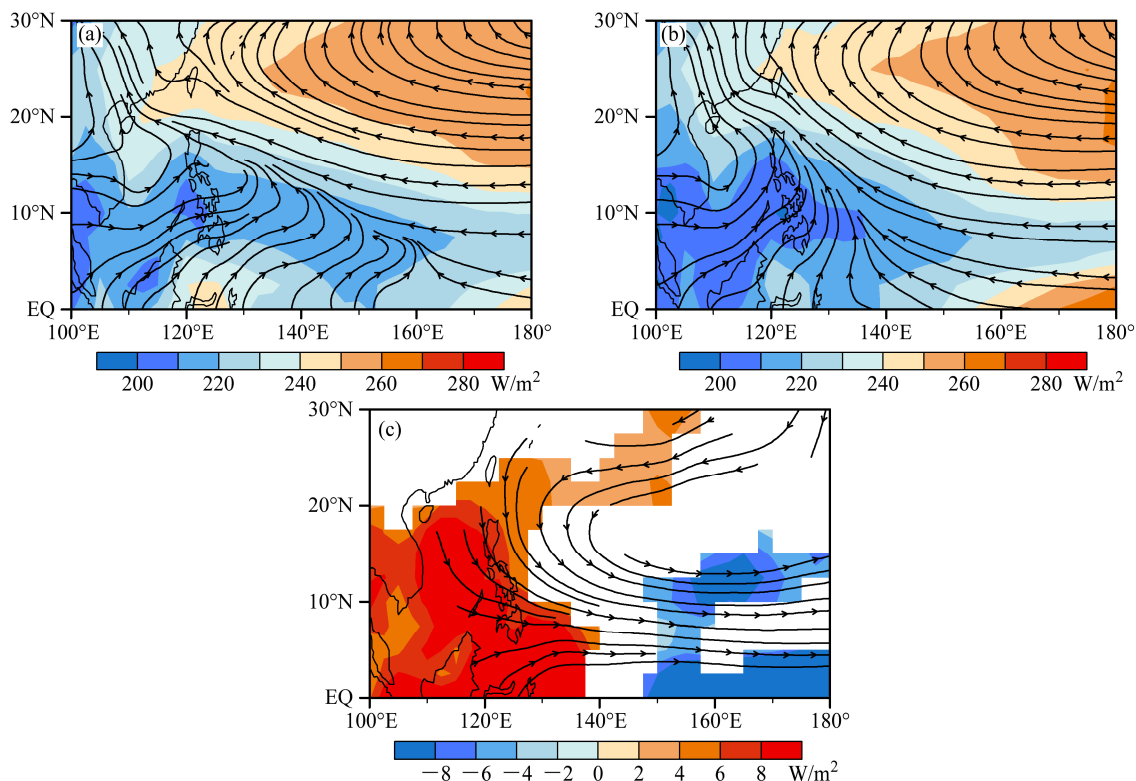


图 10 对于季风槽 (a) 偏强年和 (b) 偏弱年 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 水平流场和 OLR (彩色) 合成分布以及 (c) 它们之差 (彩色区域表示超过 90% 的显著性检验)。风场资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011), OLR 资料取自 NOAA 的 OLR 资料集 (Liebmann and Smith, 1996)

Fig. 10 850-hPa stream field and OLR (shaded) averaged over (a) strong monsoon trough years, (b) weak monsoon trough years, and (c) their differences during Jun–Nov. Colored areas in (c) indicate the difference exceeds the 90% confidence level. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and the OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

年季风槽环流和对流活动分布的差别可以从图 10c 看到。正如图 10c 所示, 在季风槽强年, 由于季风槽东伸, 即亚洲西南季风偏强, 东伸到西北太平洋中、东侧上空, 故在热带西太平洋上空对流层低层两种情况环流之差值为西风, 并由于在西太平洋副热带高压西部和南部高压偏弱, 故存在气旋性环流之差值; 并且, 从图 9c 还可以看到: 在季风槽强年, 由于西北太平洋季风槽所引起的强对流活动分布可东伸到西北太平洋东侧, 因此在西北太平洋东侧上空两种情况 OLR 的差值为负值, 这表明了西北太平洋东侧上空强季风槽年的对流活动要比弱季风槽年的对流活动强。

为了更好地说明西北太平洋季风槽的年际变化特征, 本节以 1990 年代西北太平洋季风槽强年的 1990 年和季风槽弱年的 1998 年 (图 9) 为例分析了这两年 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层大尺度环流和 OLR 的分布。图 11a 和图 11b 分别是 1990 年和 1998 年 6~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 流场和 OLR 的分布。从图 11a 和图 11b 分别可以看到: 在季风槽强的 1990 年 6~11 月, 季风槽环流从南海上空东伸到西北太平洋东侧的 160°E 附近上空, 位置偏南, 小的 OLR 分布 (即强的对流活动) 也东伸到西北太平洋东侧; 相反, 在季风槽弱的 1998 年 6~11 月, 季风槽环流向西北太平洋西部上空收缩, 从南海上空向东只伸展到西北太平洋西侧上空, 位置偏北, 小的 OLR 分布 (强的对流活动) 也主要位于西北太平洋西侧上空。这些差别更加清楚表明了西北太平洋季风槽年际变化是很明显的。

上述分析结果表明: 西北太平洋季风槽强度有很大年际变化, 在季风槽强的年份、季风槽和强对流活动区位置偏南, 并东伸到西北太平洋东侧上空, 而在季风槽弱的年份, 季风槽和强对流活动区位置偏北, 并主要位于南海和西北太平洋西侧上空。

4.3 季风槽强度年际变化对西北太平洋 TCs 生成大尺度环境因子的影响

西北太平洋季风槽强度的年际变化对于西北太平洋上空对流层低层的相对涡度、对流层上层的散度、对流层中、下层的水汽以及垂直风切变等 TCs 生成的大尺度环境因子有重要影响。为此, 本节利用再分析资料分别分析季风槽强年和弱年上述西北太平洋 TCs 生成的大尺度环境因子的差别。

图 12a-c 分别是对于季风槽强年和弱年 6~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 气流相对涡度的合成分布以及它们之间的差值。从图 12a 可以看到: 在季风槽强的年份, 与图 10a 所示的季风槽环流相对应, 从南海到西北太平洋东侧上空的对流层低层气流有很强的气旋性相对涡度; 并且, 若把图 12b 与图 12a 相比较, 可以明显看到: 在季风槽弱的年份, 与图 10b 所示的季风槽环流相对应较强的气旋性相对涡度只分布在南海和西北太平洋西侧上空, 在西北太平洋中、东侧上空只有较弱的气旋性相对涡度分布。这两种情况相对涡度分布的差别可以明显反映在图 12c, 正如图 12c 所示, 这两种情况在西北太平洋中、东侧有很强的气旋性相对涡度的差异。这可以说明在强季风槽的年份西北太平洋从中部到东侧上空对流层低层气流具有比季风槽弱年强的气旋性相对涡度, 这也反映了在强季风槽年份西北太平洋从中部到东侧上空对流层低层的气流辐合比季风槽弱年的气流辐合强。

图 13a-c 分别是对于季风槽强年和弱年 6~11 月平均的西北太平洋上空 200 hPa 环流的散度合成分布以及它们之间的差值。从图 13a 可以看到: 在季风槽强的年份, 与图 10a 所示的季风槽环流相对应, 从南海到西北太平洋东侧上空对流层上层的气流有很强的水平辐散; 并且, 若把图 13b 与图 13a 相比较, 可以明显看到: 在季风槽弱的年份, 与图 10b 所示的季风槽环流相对应, 较强的水平辐散主要分布在南海和西北太平洋西、中部上空, 而在西北太平洋东侧上空其环流的水平辐散要比季风槽强年份的环流辐散弱。这两种情况的差异可以反映在图 13c。正如图 13c 所示, 这两种情况在西北太平洋东侧上空有正的散度差异, 这表明在强季风槽年份, 从南海经西北太平洋西侧和中部到东侧上空对流层上层的环流有很强的辐散。

图 14a-c 分别是对于季风槽强年和弱年 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层中、下层的相对湿度分布以及它们之间的差值。从图 14a 可以看到: 在季风槽强的年份, 与图 10a 所示的季风槽环流相对应, 从南海经西北太平洋西、中部到西北太平洋东侧上空的对流层中、下层有较大的相对湿度, 这表明此区域上空的对流层中、下层有充足的水汽; 并且, 若把图 14b 与图 14a 相比较, 可以看到: 在季风槽弱的年份, 与图 10b 所示的季风槽环流相对应, 较大的相对湿度只分布在南海和西北太平洋西

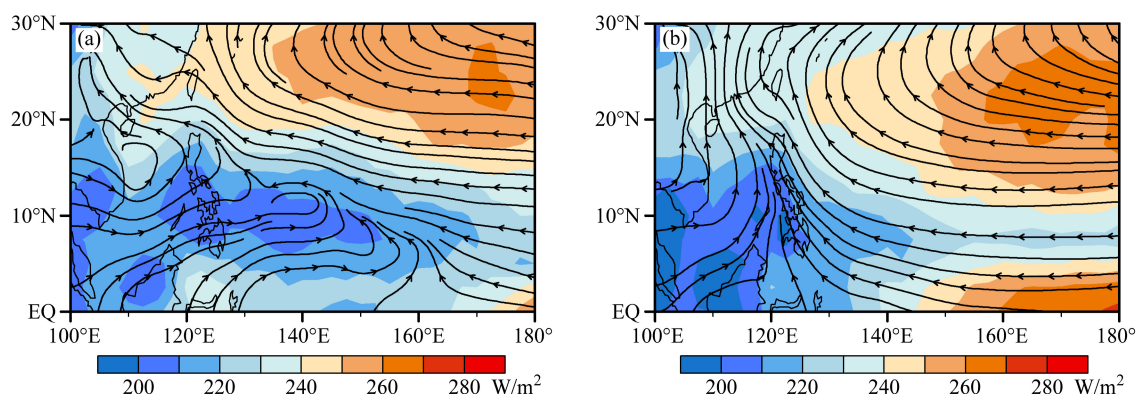


图 11 (a) 1990 年和 (b) 1998 年的 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 水平流场和 OLR (彩色) 分布。风场资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011), OLR 资料取自 NOAA 的 OLR 资料集 (Liebmann and Smith, 1996)

Fig. 11 850-hPa stream field superimposed on OLR (shaded) for averages of (a) the year 1990 and (b) the year 1998 during Jun–Nov. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and the OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

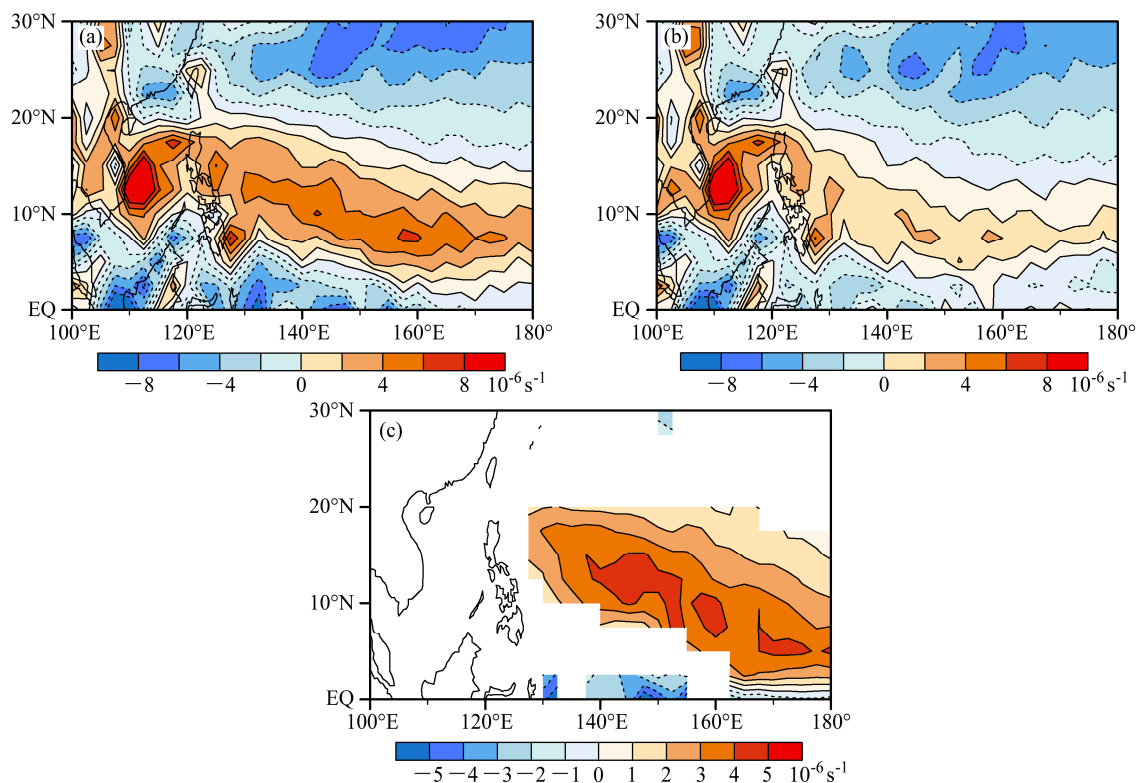


图 12 对于季风槽 (a) 偏强年和 (b) 偏弱年的 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 环流的相对涡度合成分布以及 (c) 它们之差 (彩色区表示通过 90% 的信度检验)。资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011)

Fig. 12 Horizontal distributions of 850-hPa relative vorticity during (a) strong monsoon trough years and (b) weak monsoon trough years and (c) their differences [shaded areas in (c) indicate the differences are significant above the 90% confidence level]. The data are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011)

侧和中部上空的对流层中、下层,而在西北太平洋东侧上空对流层中、下层的相对湿度并不大,这表明在这种情况下,从南海到西北太平洋西侧和中部上空对流层中、下层有充足的水汽,而在西北太平洋东侧上空对流层中、下层并没有充足的水汽。此外,

从图 14c 不仅可以看到,这两种情况的相对湿度在西北太平洋东侧上空有正的差值,在南海和西北太平洋西侧上空有负的差值,这说明在季风槽弱的年份西北太平洋东侧上空对流层中、下层的水汽比季风槽强的年份水汽含量小,但在西侧上空对流层

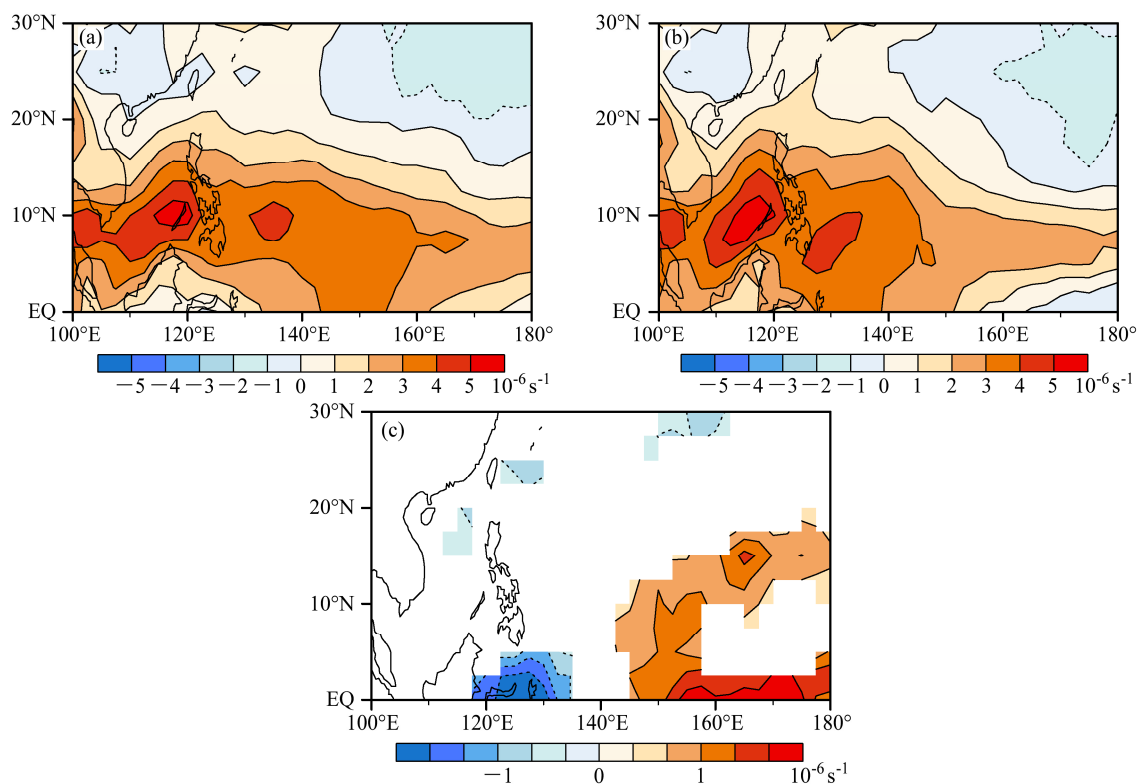


图 13 同图 12，但为西北太平洋上空对流层上层 200 hPa 环流的散度

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for 200-hPa divergence

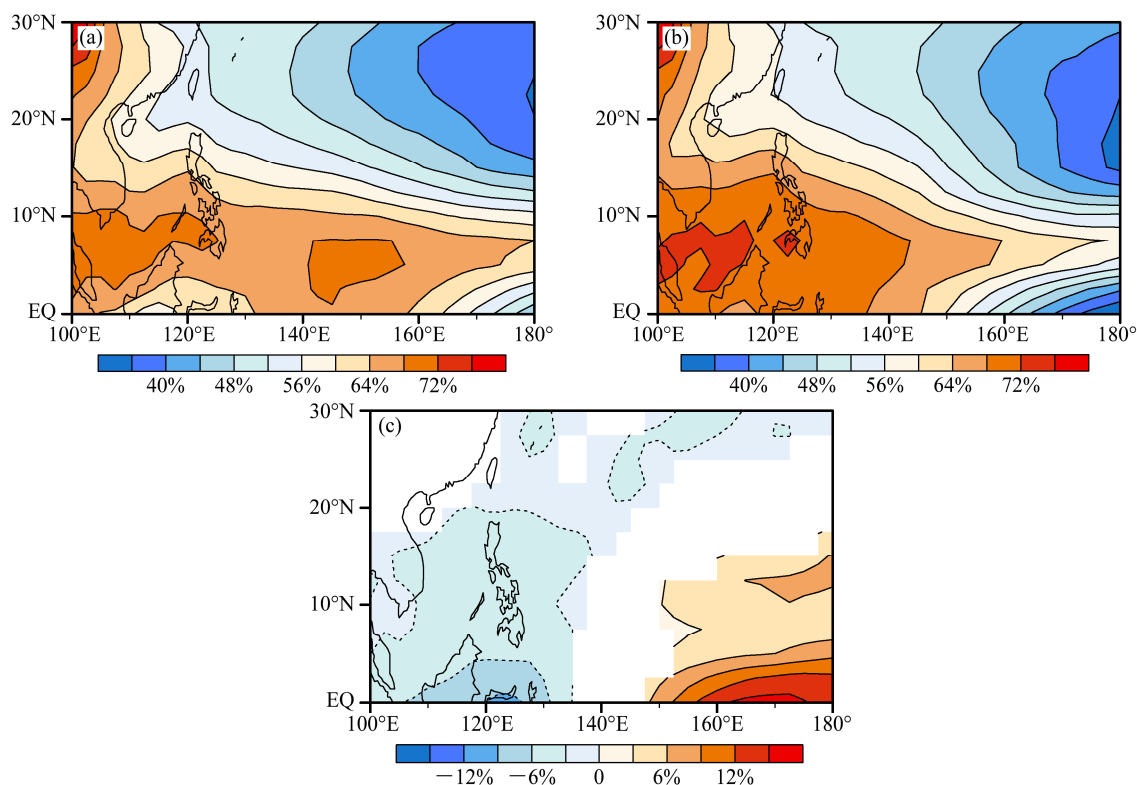


图 14 同图 12，但为西北太平洋上空对流层 700~500 hPa 的平均相对湿度

Fig. 14 Same as Fig. 12, but for 700–500-hPa relative humidity

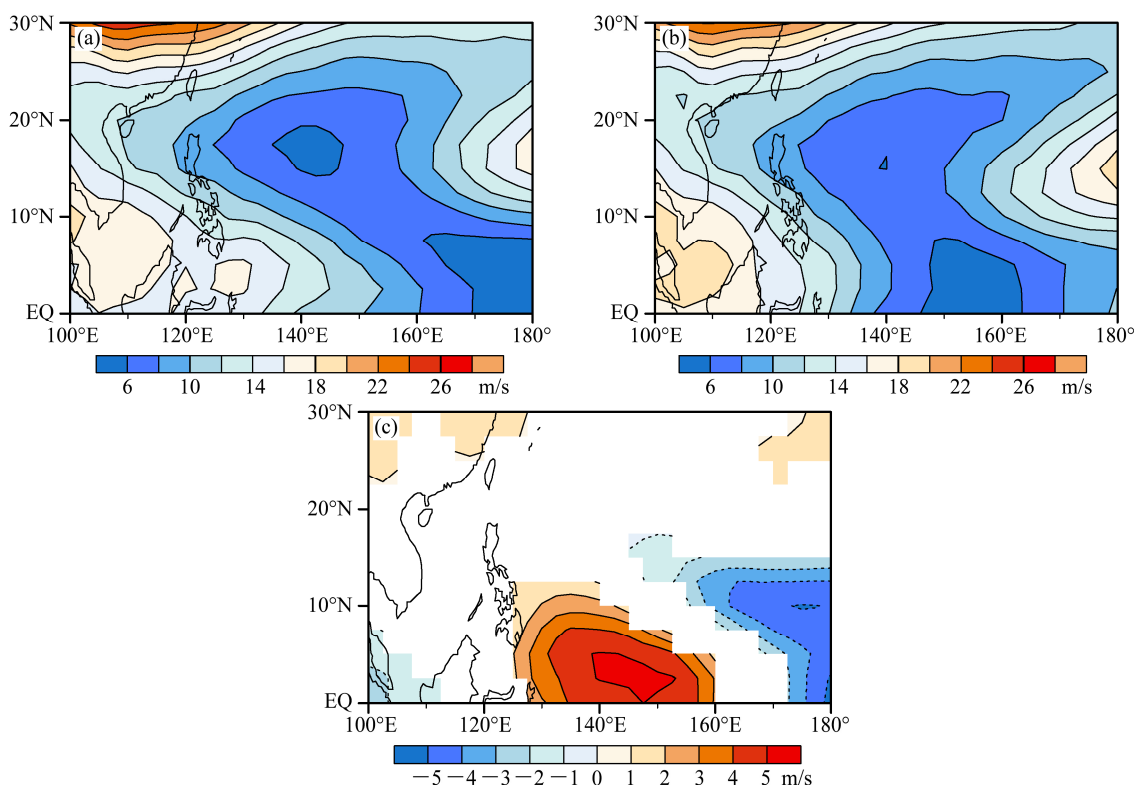


图 15 同图 12, 但为对流层 200 hPa 与 850 hPa 风场的垂直切变

Fig. 15 Same as Fig. 12, but for vertical wind shear between 200 and 850 hPa

中、下层大气的水汽含量比季风槽强的水汽含量大。

图 15a-c 分别是对于季风槽强年和弱年 6~11 月平均的西北太平洋上空对流层 850 hPa 与 200 hPa 之间的风场垂直切变的合成分布以及它们之间的差值。从图 15a 可以看到: 在季风槽强的年份, 从西北太平洋上空西北侧到东南侧的对流层上、下层有较小的风场垂直切变; 并且, 若把图 15b 与图 15a 相比较, 可以看到: 在季风槽弱的年份, 较小的风场垂直切变主要分布在西北太平洋西北侧和中部上空。此外, 从图 15c 可以更加明显看到这两种情况的差别, 如图 15c 所示, 两者在西北太平洋中部上空有正的差值, 而在西北太平洋的东南侧上空有负的差值, 这表明了, 在季风槽弱的年份, 小的风场垂直切变主要位于西北太平洋的西北侧和中部上空。

上述分析结果表明了西北太平洋季风槽强度的年际变化将会带来此区域上空对流层低层的相对涡度和对流层上层的散度、对流层中、下层的水汽以及风场垂直切变的年际变化, 从而造成了西北太平洋 TCs 生成的年际变化。

5 西北太平洋季风槽强度年际变化对其季节变化的影响

在本文第 3 节分析结果表明了西北太平洋季风槽有明显的季节变化。但是, 受季风槽强度年际变化的影响, 在季风槽强的年份与弱的年份, 季风槽的季节变化特征是有所差别的。为此, 本节将分析季风槽强度年际变化对季节变化的影响。

5.1 强季风槽的情况

正如在本文第 4 节所述, 在 1979 年、1980 年、1982 年、1986 年、1987 年、1989 年、1990 年、1991 年、1992 年、1993 年、1994 年、1997 年、2001 年、2002 年、2003 年、2004 年、2006 年、2009 年西北太平洋季风槽偏强, 下面分析在季风槽偏强年份季风槽的季节变化特征。

图 16a-c 分别是对于季风槽偏强年份 6~7 月、8~9 月以及 10~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 流线和 OLR 的合成分布。从图 16a 可以看到: 在季风槽强的年份, 6~7 月季风槽已从南海向东伸展到西北太平洋中部上空, 位于 5°N~15°N 之间,

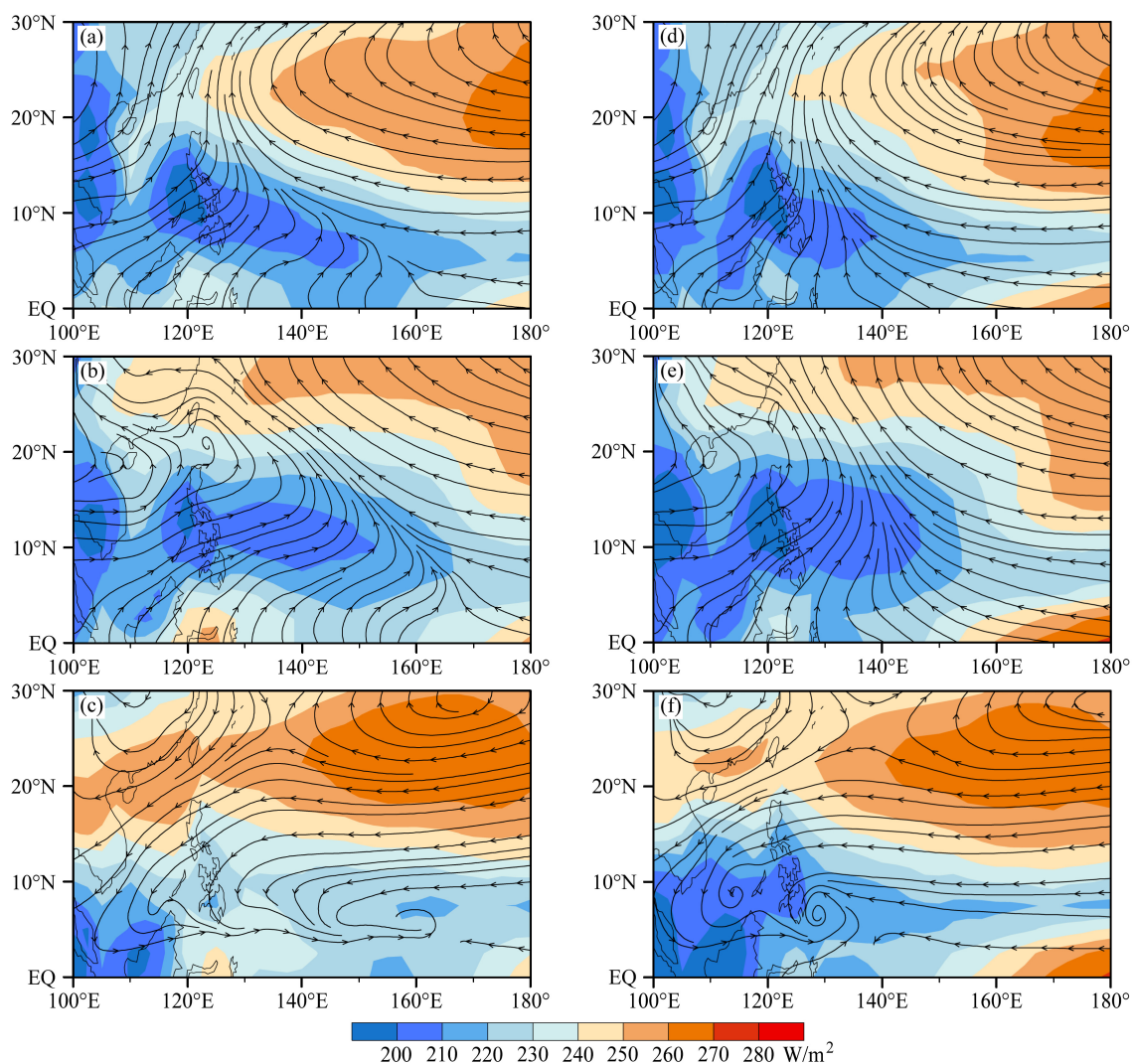


图 16 对于强季风槽年份 (a) 6~7 月、(b) 8~9 月和 (c) 10~11 月平均的西北太平洋上空对流层低层 850 hPa 流线和 OLR (彩色) 的合成分布。(d) - (f) 同 (a) - (c), 但为弱季风槽的情况。风场资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011), OLR 资料取自 NOAA 的 OLR 资料集 (Liebmann and Smith, 1996)

Fig. 16 850-hPa stream field and OLR (shaded) over the western North Pacific averaged over strong monsoon trough years for (a) Jun-Jul, (b) Aug-Sep, and (c) Oct-Nov. (d) - (f) are the same as (a) - (c) but for averages over weak monsoon trough years. Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and the OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

在此区域有较强的对流活动; 并且, 从图 16b 可以看到: 到了 8~9 月, 季风槽不仅明显向北移动到 $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ 的南海和西北太平洋上空, 而且向东伸展到 160°E 附近的西北太平洋东侧上空, 与此相对应, 强的对流活动区域也随之北移到 ($10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$) 的南海和西北太平洋上空。此外, 从图 16c 可以看到: 到了 10~11 月, 由于跨赤道气流向南撤退和偏东气流向西扩展, 季风槽减弱南移, 并变成气旋性涡旋, 其中心位于 (8°N , 160°E) 附近的西北太平洋上空, 在此区域上空有

较弱的对流活动分布。

5.2 弱季风槽的情况

根据本文第 4 节对季风槽强度的定义, 1981 年、1983 年、1984 年、1985 年、1988 年、1995 年、1996 年、1998 年、1999 年、2000 年、2005 年、2007 年、2008 年、2010 年、2011 年、2012 年西北太平洋季风槽偏弱。下面分析在季风槽偏弱年份季风槽的季节变化特征。

图 16d-f 分别是对于季风槽偏弱年份 6~7 月、8~9 月和 10~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa

流线和 OLR 的合成分布。从图 16d 可以看到：在季风槽弱的年份 6~7 月季风槽主要位于 $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 的南海和西北太平洋西侧上空，并在此区域有较强的对流活动；并且，从图 16e 可以看到：到了 8~9 月，季风槽不仅向北移动到 $10^{\circ}\text{N}\sim 22^{\circ}\text{N}$ 的南海和西北太平洋上空，而且向东伸展到 145°E 附近的西北太平洋中部上空，强的对流活动区域也随之北移到 $(10^{\circ}\text{N}\sim 22^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E})$ 的南海和西北太平洋上空。此外，从图 16f 可看到：到了 10~11 月，由于跨赤道气流向南撤退，偏东气流沿西太平洋副热带高压的南沿向西扩展，季风槽减弱南移，并已变成涡旋，其中心位于 $(8^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E})$ 附近的西北太平洋西侧上空，并在此区域有较强的对流活动分布。

5.3 强与弱季风槽季节变化的差异

从上述可以明显看到：强季风槽年份与弱季风槽年份，季风槽的季节变化有些差异。在季风槽强的年份，6~7 月和 8~9 月季风槽东伸明显，强对流活动区域可以东伸到西北太平洋东侧 160°E 附近；而在弱季风槽年份，季风槽向西收缩，主要位

于南海和西北太平洋的西侧上空，强对流活动区域也主要位于南海和西北太平洋的西侧上空。并且，到了 10~11 月，随着跨赤道气流的南撤和偏东气流沿西太平洋副热带高压的南沿西伸，季风槽已消失，并变成了涡旋，无论是强季风槽年份或是弱季风槽年份，对流活动变弱并向西北太平洋西侧上空收缩。

为了更清楚看到强季风槽年份与弱季风槽年份其季节变化的差别，本节还进行了两者差异分析。图 17a~c 分别是对于 6~7 月、8~9 月和 10~11 月平均的强与弱季风槽年西北太平洋上空 850 hPa 环流差值和 OLR 差值的合成分布。从图 17a~c 可以看到：从 6~11 月强与弱季风槽年西北太平洋上空对流层低层环流的差值均为西风。在 6~9 月期间，由于西北太平洋西南季风处于强盛，因此图 17a 和 17b 所示的西风差值反映了在强季风槽年的 6~9 月西北太平洋上空对流层低层的亚洲西南季风强。然而，到了 10~11 月，由于西南季风从西北太平洋上空撤退，这时期的西风差值反映了在强季风槽年的偏东气流弱；并且，从图 17a~c 还可以

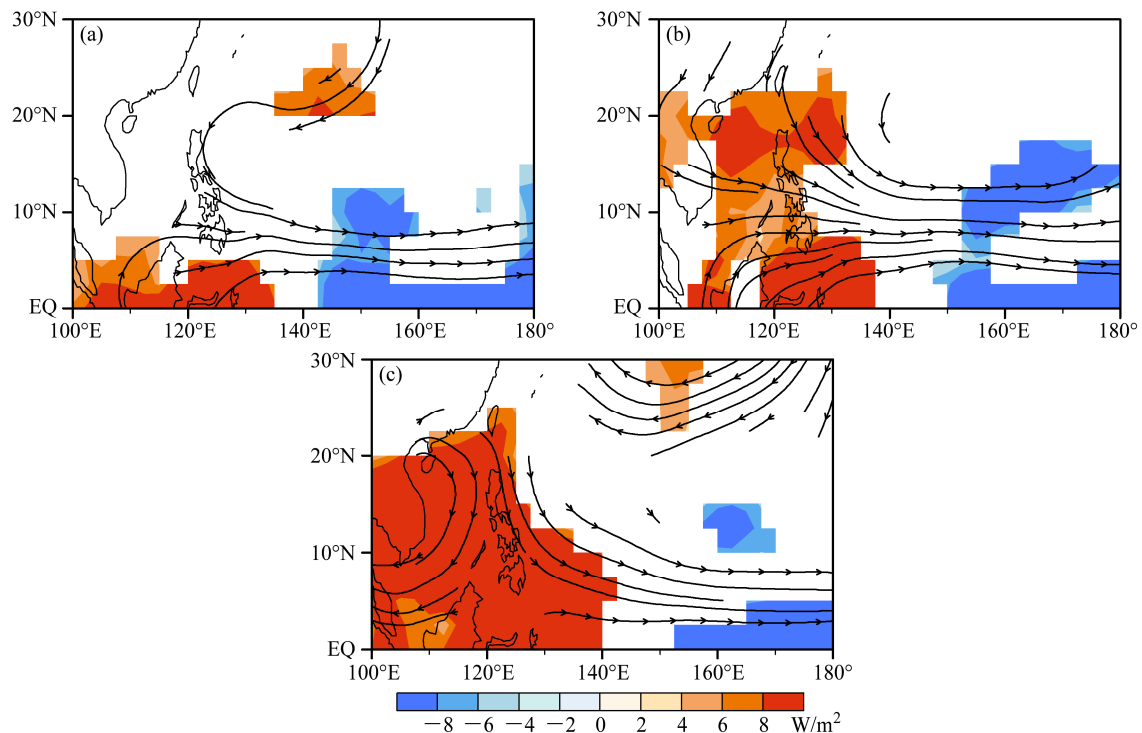


图 17 对于强与弱季风槽年的 (a) 6~7 月、(b) 8~9 月、(c) 10~11 月平均的西北太平洋上空 850 hPa 环流和 OLR (彩色) 差值的合成分布。阴影超过 90% 显著性检验，风场资料取自 ERA-Interim 再分析资料 (Dee et al., 2011)，OLR 资料取自 NOAA 的 OLR 资料集 (Liebmann and Smith, 1996)

Fig. 17 Composite differences in 850 hPa stream field and OLR (shaded) over the western North Pacific between the strong and weak monsoon trough years for (a) Jun-Jul, (b) Aug-Sep, and (c) Oct-Nov. Differences that exceed the 90% confidence level are shown in (c). Wind fields are extracted from the ERA-Interim reanalysis data (Dee et al., 2011), and the OLR data are from NOAA (Liebmann and Smith, 1996)

看到: 从 6~11 月上述两种情况的 OLR 差值在西北太平洋的东侧上空为负, 而在西北太平洋的西侧为正, 这表明了强季风槽年的 6~11 月西北太平洋的东侧上空对流活动比弱季风槽年的对流活动强, 而在西北太平洋的西侧上空对流活动却比弱季风槽年的对流活动弱, 特别是在弱季风槽年的 10~11 月, 西北太平洋西侧上空的对流活动要比强季风槽年的对流活动强的多。

6 总结和讨论

本文利用 ERA-Interim 再分析资料分析了 6~11 月西北太平洋季风槽的气候特征、季节和年际变化特征及其对西北太平洋 TCs 生成大尺度环境因子的影响。分析结果表明:

(1) 在 6~11 月受亚洲西南季风、跨赤道气流和西太平洋副热带西南部偏东气流的影响, 在 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$) 的南海和西北太平洋上空对流层中、下层存在一气旋性环流, 即季风槽。西北太平洋季风槽可以为西北太平洋 TCs 生成提供对流层低层的气旋性相对涡度和辐合、对流层上层的辐散、对流层中、下层充足的水汽以及弱的垂直风切变等 TCs 生成的大尺度环境条件。

(2) 西北太平洋季风槽有很明显的季节变化。在 6~7 月, 随着亚洲季风爆发和跨赤道气流的北上, 季风槽和强对流活动区在 $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 的南海和西北太平洋西侧上空并逐渐东伸; 到了 8~9 月, 随着亚洲西南季风和跨赤道气流的加强和向北、向东伸展, 季风槽和强对流活动区也向北、向东扩展, 一般位于 $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 的南海和西北太平洋西侧、中部上空, 有的年份可东伸到西北太平洋东侧, 强度加强; 到了 10~11 月, 随着跨赤道气流的南撤和减弱, 偏东气流的西伸, 季风槽迅速减弱, 并成为涡旋, 强对流活动区也向南移和向西收缩; 随着季风槽的季节变化, 西北太平洋上空 TCs 生成的大尺度环境因子也有很大的季节变化。

(3) 西北太平洋季风槽也有明显的年际变化。在季风槽强的年份, 季风槽和强对流活动区可以从南海经西北太平洋西侧和中部东伸到西北太平洋的东侧上空; 而在季风槽弱的年份, 季风槽和强对流活动区主要位于南海和西北太平洋西侧和中部上空, 相对而言, 在季风槽弱的年份, 季风槽和强

对流活动区位置比强季风槽时更偏北一些, 南海和西北太平洋西侧上空的对流活动也更强一些; 随着季风槽的年际变化, 西北太平洋上空 TCs 生成的大尺度环境因子分布也发生很明显的年际变化。此外, 研究还表明了季风槽强度的年际变化对于季风槽的季节变化也有一定影响。

上述研究表明了西北太平洋季风槽有明显的季节和年际变化, 这些变化受亚洲西南季风和跨赤道气流的影响, 因此, 亚洲西南季风和跨赤道气流如何影响西北太平洋季风槽的季节和年际变化还有待于进一步深入研究。

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.
- 曹西, 陈光华, 黄荣辉, 等. 2013. 夏季西北太平洋热带辐合带的强度变化特征及其对热带气旋的影响 [J]. *热带气象学报*, 29 (2): 198–206.
- Cao Xi, Chen Guanghua, Huang Ronghui, et al. 2013. The intensity variation of the summer intertropical convergence zone in western North Pacific and its impact on tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 29 (2): 198–206, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2013.02.003.
- Cao X, Li T, Peng M, et al. 2014. Effects of monsoon trough interannual variation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41 (12): 4332–4339, doi: 10.1002/2014GL060307.
- Chen G H, Huang R H. 2008. Influence of monsoon over the warm pool on interannual variation on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (2): 319–328, doi: 10.1007/s00376-008-0319-7.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (656): 553–597, doi: 10.1002/qj.828.
- Elsberry R L. 2004. Monsoon-related tropical cyclones in East Asia [M]//Chang C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 463–498.
- 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.
- Feng T, Chen G H, Huang R H, et al. 2014. Large-scale circulation patterns favourable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversions [J]. *International Journal of Climatology*, 32 (1): 216–227, doi: 10.1002/joc.3680.
- 冯涛, 沈新勇, 黄荣辉, 等. 2014. 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*, 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]. *Journal of Tropical Meteorology* (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 Xiuquan, 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.
- 皇甫静亮. 2016. 20 世纪 90 年代末热带西太平洋夏季对流活动的年代际变化及其对热带气旋 (TCs) 生成的影响 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 113pp. Huangfu Jingliang. 2016. Influence of the interdecadal change of tropical Western Pacific convective activities on tropical cyclogenesis in the Western North Pacific in the late-1990s [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 113pp.
- 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 (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, 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*, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15251. Huang Ronghui, Huangfu Lingliang, Liu Yong, et al. 2016. Progress in recent research on the process and physical mechanism of influence of the west Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15251.
- 李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季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.
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 1275–1277.
- 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.
- Wu L, Wen Z P, Huang R H, 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 L, Wen Z P, Li T, et al. 2014a. 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 L, Chou C, Chen C T, et al. 2014b. Simulations of the present and late-twenty-first-century Western North Pacific tropical cyclone activity using a regional model [J]. *J. Climate*, 27 (9): 3405–3424, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00830.1.
- Wu L, Wen Z P, Wu R G. 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 L, Wen Z P, Wu R G. 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.