唐颢苏, 胡开明, 黄刚. 2019. El Niño衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 525−536. Tang Haosu, Hu Kaiming, Huang Gang. 2019. Characteristics and mechanisms of sub-seasonal evolution of Northwest Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 525−536. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18156

El Niño衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制

唐颢苏[1,2]　胡开明[1,3,4]　黄刚[1,3]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 全球变化研究协同创新中心，北京 100875
4 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　基于多种再分析资料和观测资料，分析El Niño衰退年北半球夏季西北太平洋异常反气旋（NWPAC）季节内演变特征及其机制。结果表明，较之El Niño衰退年6月，NWPAC在7月与8月北移，且其强度在7月与8月显著增强。NWPAC通过影响对流层低层水汽通量散度对东亚夏季季节内降水产生影响，使东亚夏季异常雨带随NWPAC北移而逐渐北移；与NWPAC相伴随的降水异常减弱与入射太阳短波辐射增强，可引起夏季中南半岛、菲律宾及我国南部地区地表气温正异常，且随着NWPAC北移，东亚地表气温异常也随之北移。局地海气相互作用过程可能是NWPAC夏季季节内北移的成因之一。NWPAC北侧短波辐射的减弱和海表潜热与感热释放的增强会造成其下海温负异常，而海温负异常有利于NWPAC的维持。与之相反，NWPAC南侧短波辐射的增强与海表潜热与感热释放的减弱会造成其下海温正异常，而海温正异常可能会激发对流不利于NWPAC的维持。

关键词　西北太平洋异常反气旋　季节内演变　局地海气相互作用
文章编号　1006-9585(2019)04-0525-12　　**中图分类号**　P466　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18156

Characteristics and Mechanisms of Sub-seasonal Evolution of Northwest Pacific Anomalous Anticyclone during the El Niño Decaying Summer

TANG Haosu[1,2], HU Kaiming[1,3,4], and HUANG Gang[1,3]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Joint Center for Global Change Studies*, *Beijing* 100875
4 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190

Abstract　Characteristics and mechanisms of the sub-seasonal evolution of the Northwest Pacific Anomalous Anticyclone (NWPAC) phenomenon during a decaying El Niño in summer were analyzed based on a variety of reanalysis data and observation data. The results showed that the NWPAC had a more northern shift and increased

收稿日期　2018-12-10；**网络预出版日期**　2019-04-05
作者简介　唐颢苏，男，1996年出生，硕士研究生，主要从事海气相互作用研究。E-mail: hstang@foxmail.com
通讯作者　胡开明，E-mail: hkm@mail.iap.ac.cn
资助项目　中国科学院战略性先导科技专项资助XDA20060502，国家自然科学基金41425086、41775086
Funded by　the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20060502), National Natural Science Foundation of China (Grants 41425086 and 41775086)

intensity in both July and August compared with June during a decaying El Niño in summer. NWPAC affects precipitation in East Asia during boreal summer by influencing the divergence of water vapor fluxes in the low-level troposphere. The abnormal rain belt in East Asia shifts northward along with the NWPAC. The anomalous precipitation decline and increase in incidental solar short-wave radiant flux under the ridge of the NWPAC can result in positive surface air temperature anomalies in the Indochina Peninsula, the Philippines, and southern China during a decaying El Niño in summer. With the northward shift of the NWPAC, the positive surface air temperature anomalies in East Asia also shift northwards. Local air–sea interaction processes may be one of the causes of NWPAC's northern jump during a decaying summertime El Niño. Increased short-wave radiant fluxes and reduced upward sensible and latent heat fluxes on the southern side of the NWPAC can cause anomalous positive sea surface temperature anomalies (SSTAs), and positive SSTAs, in turn, could be detrimental to NWPAC's maintenance by inducing convective instability. In contrast, weakened short–wave radiation fluxes and increased upward sensible and latent heat fluxes on the northern side of NWPAC can cause negative anomalous SSTAs, which favors the maintenance of NWPAC.

Keywords Northwest Pacific Anomalous Anticyclone, Sub-seasonal evolution, Local air–sea interaction

1 引言

ENSO（El Niño–Southern Oscillation）是热带海气耦合年际变率最主要的模态，对全球气候异常产生深远影响。在El Niño事件期间，西北太平洋对流异常减弱激发出冷的Rossby波，在其西北侧对流层低层850 hPa形成西北太平洋异常反气旋（Northwest Pacific Anomalous Anticyclone，NWPAC）(Wang et al., 2000)，该异常环流从El Niño年秋季开始发展，可以一直持续至次年夏季，是El Niño影响东亚气候的重要纽带(Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000, 2003; Yang et al., 2007; Xie et al., 2009; Chen et al., 2012; Hu et al., 2014)。关于其持续机制，Wang et al.(2000)最早提出北半球冬半年东北信风背景下的风—蒸发—海温（Wind–Evaporation–SST, 以下简称WES）正反馈机制可造成其在冬季与次年春季的持续。Xie et al. (2009)则进一步指出El Niño衰退年夏季热带印度洋（Tropical Indian Ocean, TIO）增暖激发出东传Kelvin波在西北太平洋对流层低层引起Ekman辐散减弱对流活动，进而造成夏季NWPAC，北印度洋在上述过程中起重要作用（黄刚和胡开明，2008）。

研究表明，El Niño事件主要通过NWPAC对次年夏季东亚大气环流、降水和气温产生影响。黄荣辉等(1998)指出El Niño衰退年夏季NWPAC能够通过激发准定常行星波影响东亚中高纬度大气环流。在El Niño衰退年夏季，NWPAC西北侧异常西南风能够加强背景西南季风，并通过加强副热带高压与增加向北水汽输送，导致我国长江中下游地区梅雨雨带降水增加(Zhang et al., 1996; Chang et al., 2000；黄平和黄荣辉，2010)。Hu et al.(2011)指出夏季TIO增暖激发NWPAC对中国夏季地表气温造成显著影响，即与NWPAC相伴随的降水减弱与下沉运动会造成中国南部地表气温偏高，而与NWPAC北部低层异常气旋相伴随的上升运动会造成中国东北部地表气温偏低。

已有研究多关注NWPAC形成和维持机理，且多关注其季节、年际与年代际时间尺度演变特征，而对于其季节内尺度演变特征特别是夏季季节内尺度演变特征分析较少。El Niño衰退年夏季NWPAC具有显著季节内尺度演变特征，其位置演变对同时期的东亚降水具有显著影响。Hu et al.(2012)指出NWPAC在夏季存在显著北移特征。NWPAC西北侧的异常西南风带来来自南海与西北太平洋的大量水汽，对应水汽通量辐合区。NWPAC北侧大尺度水汽通量辐合能够造成局地降水正异常，并且随着NWPAC北移，对应的降水正异常也随之北移。Hu et al.(2017)采用更高精度站点资料进一步分析指出夏季NWPAC季节内北移导致El Niño衰退年夏季中国东部降水季节平均与前期ENSO关系并不显著。目前，研究El Niño衰退年夏季东亚地表气温异常逐月演变机制的工作较少。

在季节内时间尺度上，热带大气可与其下海面温度（Sea Surface Temperature, SST）发生相互作用。Wang et al.(2012)指出夏季北太平洋黑潮续流区SST季节内变化能对其上空大气施加显著的反馈作用。Ren et al.(2013)指出夏季西北太平洋SST季节内变化对其上副热带高压的纬向振荡具有重要作用。Wang et al.(2018)指出夏季西北太平洋SST季

节内变化能够引导北半球夏季季节内振荡（Intraseasonal Oscillation, ISO）北传。目前，El Niño衰退年夏季NWPAC位置季节内尺度演变机制尚不清楚，本文将重点从局地海气相互作用角度揭示其成因。

需要注意的是，本文所涉及的季节内尺度演变过程并不是指传统意义上的季节内振荡。在之前的研究中发现，NWPAC在夏季位置不是固定不动的，而是在季节内尺度上存在向北推进和向南撤退(Hu et al., 2011)，它和传统的季节内变率存在一定差别，不同El Niño事件所导致的NWPAC位置在各个夏季月份不是随机的，而是存在共同的推进和撤退规律。为了方便表述，我们将其称之为NWPAC的季节内演变过程。

2 资料与方法

2.1 数据资料

本文使用了NECP/NCAR 1980～2017年月平均风场、地表2 m气温、潜热通量、感热通量、向外长波辐射通量（Outgoing Long-wave Radiation, OLR）等资料，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）(Kalnay et al., 1996)。潜热和感热通量正（负）值表示海表向大气释放潜热和感热通量减弱（增强）。全球气候态降水计划的降水资料(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)1980～2017年月平均降水资料，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）(Adler et al., 2003)。

同时，本文使用了NECP/NCAR 1980～2017年逐日风场、向下太阳短波辐射通量、潜热通量、感热通量等资料，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）(Kanamitsu et al., 2002)。NOAA逐日OLR资料，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）(Liebmann and Smith, 1996)。NOAA最优插值逐日SST数据集，水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）(Reynolds et al., 2002)。

由于El Niño对印度洋—西太平洋及东亚气候影响在20世纪70年代末期发生年代际调整(Huang et al., 2010; Xie et al., 2010)，本文所选取数据均从1980年起。

2.2 研究方法

为去除逐日数据中的高频振荡，在分析之前，本文首先对逐日数据序列进行9点滑动平均。此外，由于本文第3小节中所计算的水平温度平流为非线性量，逐月水平温度平流采用先计算逐日水平温度平流再求月平均的方法得到。

本文选取1979～2016年冬季（11月至次年1月，简称NDJ）Niño3.4海温指数来代表ENSO变率，共38年时间序列。相关系数达到0.27（0.32、0.41）即通过90%（95%、99%）的信度检验。本文中风场检验为对回归所得风场的u、v分量分别进行t检验，其中任一分量通过显著性检验即认为该处风场通过显著性检验。

3 El Niño衰退年夏季西北太平洋异常反气旋逐月演变特征

图1给出了1980～2017年夏季（6～8月）逐月以及季节平均的850 hPa风场对前冬NDJ(0) Niño3.4指数的回归分析，以及降水与前冬NDJ(0) Niño3.4指数的相关分析。由850 hPa逐月异常风场演变可见，NWPAC位置、强度在El Niño衰退年夏季存在显著季节内变化。在位置上，NWPAC在夏季存在显著向北移动的特征，其最北端从6月的25°N左右北移至7月与8月的35°N左右；同时，较之6月，NWPAC在7月与8月有所西伸。在强度上，较之6月，NWPAC在7月与8月显著增强。该增强可能是由NWPAC与印度洋海温海盆一致模（Indian Ocean Basin Mode, IOBM）间的正反馈作用所导致（Du et al., 2009; Kosaka et al., 2013; Xie et al., 2016）。在经向方向上，NWPAC北侧伴随着一异常气旋，其强度也在7月与8月显著增强，并与NWPAC组成PJ（Nitta, 1987）/EAP（Huang and Wu, 1989）型遥相关波列。

由东亚夏季降水相关分布的逐月演变可见，El Niño对次年夏季东亚降水的影响同样表现出明显阶段性。6月我国南方地区及日本南部海域出现显著降水正异常，该正异常能够加强从我国东部延伸至日本东南部的梅雨雨带降水(Xie et al., 2016)；到7月该正异常北移至我国长江中游地区，而位于NWPAC脊线附近下沉气流区的我国东南沿海、菲律宾北部及中南半岛东部地区出现显著降水负异常；到8月，随着NWPAC北移，显著降水正异常区也北移至我国黄淮流域、日本中部地区，强度增强，影响范围更广，而显著降水负异常出现在我国长江以南的东部地区，对应着该地区进入伏旱天

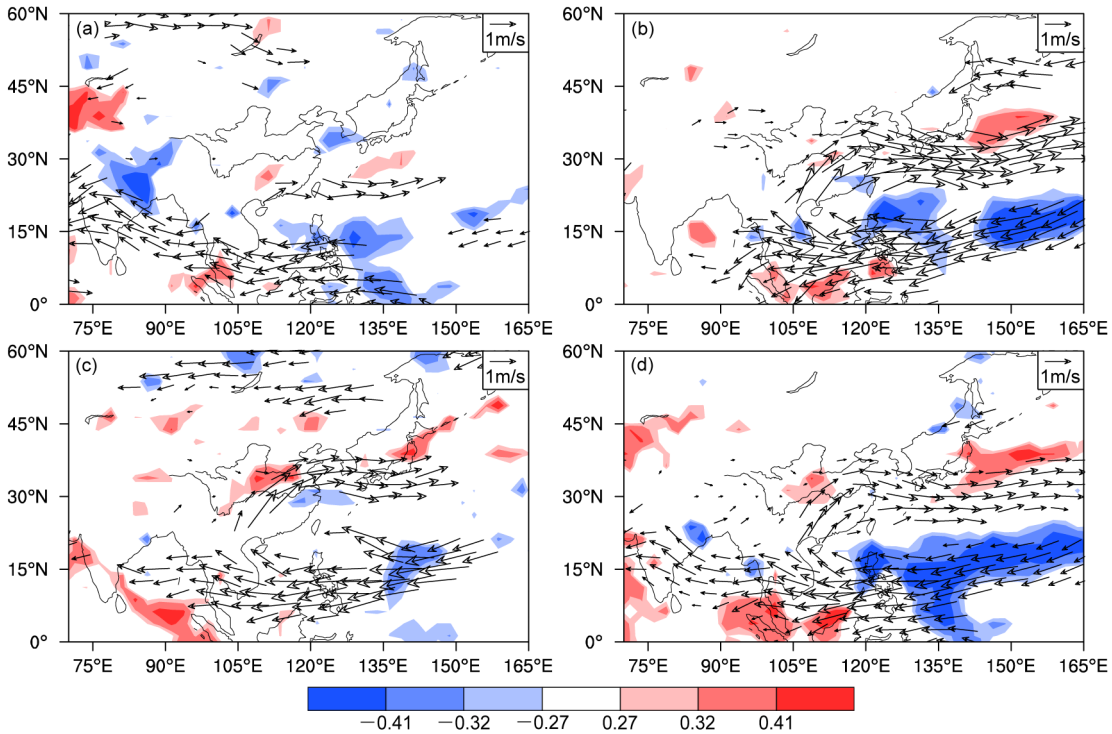

图1 1980～2017年（a）6月、（b）7月、（c）8月以及（d）夏季平均850 hPa风场对前冬NDJ(0) Niño3.4指数的回归（矢量，只显示通过90%信度检验的风场）及降水与前冬NDJ(0)Niño3.4指数的相关（红色代表正相关、蓝色代表负相关，由浅到深阴影分别表示通过90%、95%、99%显著性检验）

Fig. 1 Regression of NDJ(0) Niño3.4 index on wind at 850 hPa (vectors, shown only exceeding the 90% confidence level) and correlation of NDJ (0) Niño3.4 index with precipitation (blue and red denote negative and positive, respectively; shadings from light to dark indicate the 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively) in (a) Jun, (b) Jul, (c) Aug, and (d) the JJA mean from 1980 to 2017

气。NWPAC西北侧的异常西南风带来来自南海与西北太平洋的大量水汽，对应水汽通量辐合区，而NWPAC脊线所在区域存在下沉气流，对应水汽通量辐散区。因此降水异常会随着NWPAC向北移动而北移。就夏季平均而言，整个东亚地区呈现出中国中部地区与日本东南部海域降水偏多，西北太平洋（Northwest Pacific，以下简称NWP）地区降水偏少。

图2展示了东亚夏季地表2 m气温与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关分布的逐月演变。从图可见，在6月，我国浙江沿海地区出现显著地表气温负异常，而整个东亚南部地区出现大片显著地表气温正异常；到7月，这种经向偶极子型地表气温异常分布位置北抬且东移，且显著地表气温负异常区范围扩大，即中国东北地区、日本北部地区出现大片显著地表气温负异常；到8月，东亚地区地表气温负异常大幅减弱，仅在我国内蒙古、甘肃一带存在小片显著地表气温负异常区，日本南部海域地表气温正异常区进一步北抬，其最北端由7月的30°N以南北抬至30°N以北。就夏季平均而言，地表气温异常主要表现出西北太平洋地区地表气温偏高、日本中部及北部地区地表气温偏低的经向偶极子型特征。

图3给出了1980～2017年夏季（6～8月）OLR和1000～850 hPa平均水平温度平流与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关分布的逐月演变。次年6月，菲律宾以东存在大片对流异常显著减弱区，其北部海域存在对流异常显著增强区，而东亚大陆无显著对流异常区。至次年7月，对流异常显著区域北移，并进一步扩大增强，继续呈现西北太平洋—日本偶极子型。日本东南部海域出现对流异常显著增强区，与副热带北太平洋地区异常气旋相伴随的上升运动对应；中南半岛、菲律宾附近海域出现对流异常显著减弱区，与NWPAC相伴随的异常下沉运动对应。上升（下沉）运动会造成云量增多（减少），进而减弱（增强）入射太阳辐射，进一步引起当地地表气温负（正）异常。次年8月，热带西北太平洋地区对流异常显著减弱区消散，日本中部及东部海域维持着一对流异常显著增强区，进而通

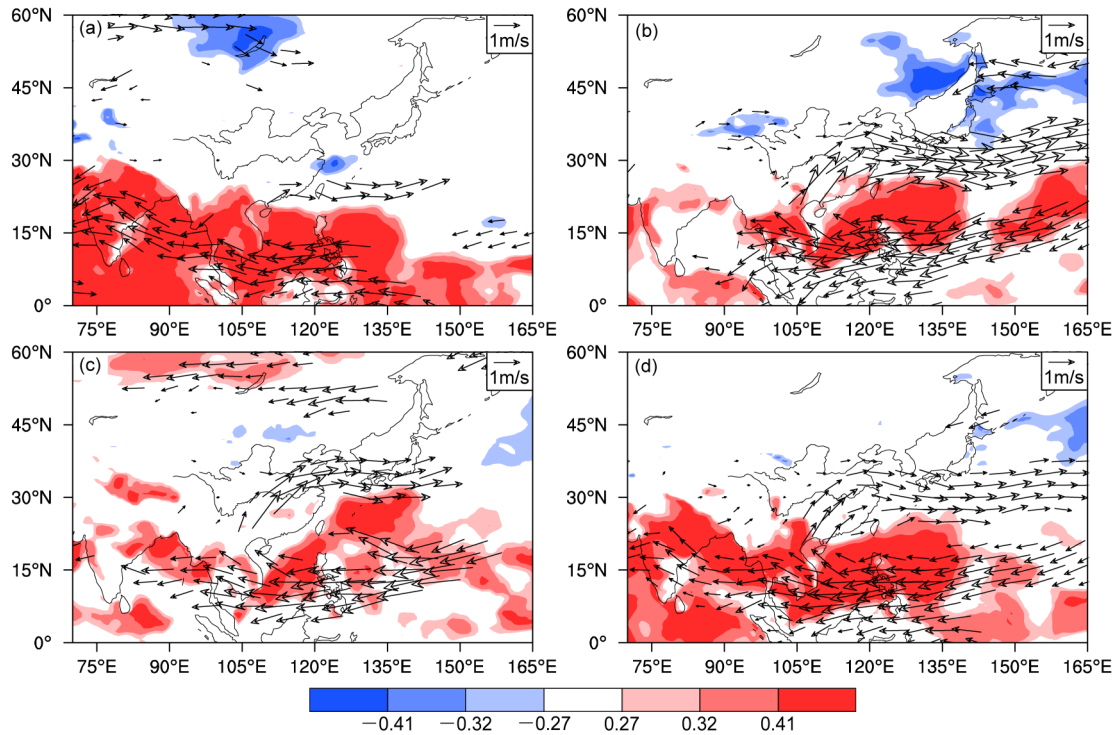

图2　同图1，但阴影为地表2 m气温与前冬NDJ(0)Niño3.4指数的相关

Fig. 2　Same as in Fig. 1, but shadings for correlation of NDJ(0) Niño3.4 index with surface 2-m air temperature

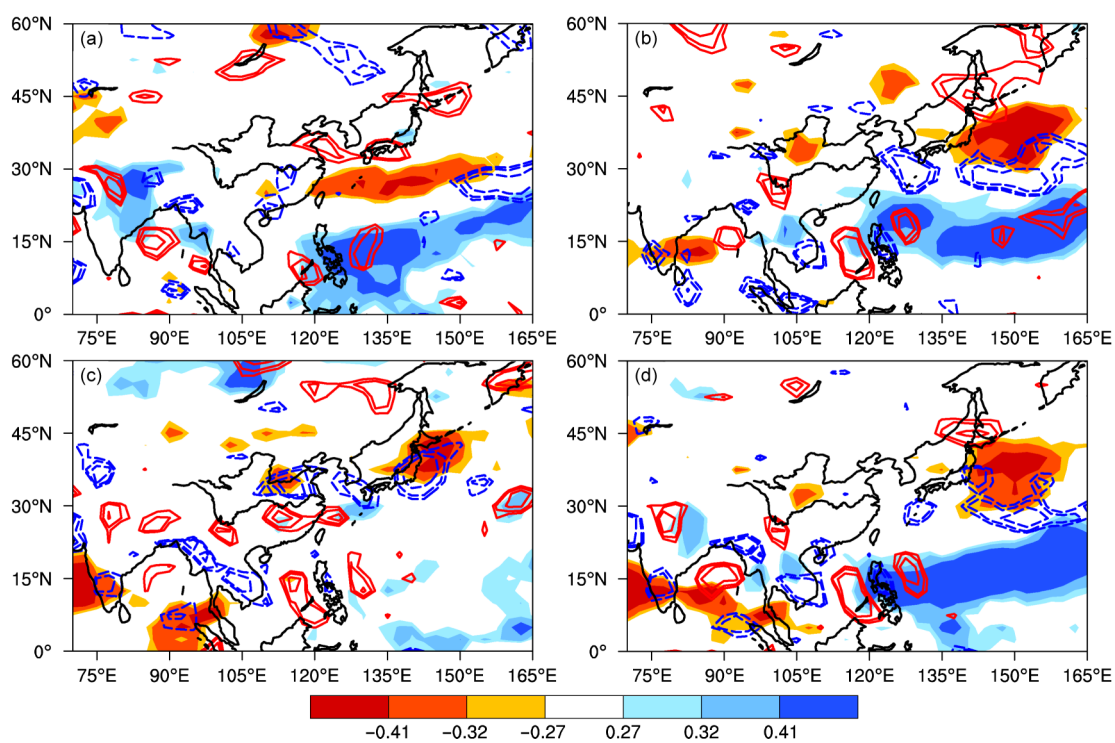

图3　1980～2017年前冬NDJ(0) Niño3.4指数分别与（a）6月、（b）7月、（c）8月以及（d）夏季平均向外长波辐射（OLR，填色）以及1000～850 hPa平均水平温度平流（等值线；红色实线为正，蓝色虚线为负，等值线间隔0.05，仅显示通过90%信度检验的等值线）的相关系数

Fig. 3　Correlation of NDJ(0) Niño 3.4 index with the outgoing long-wave radiation (OLR, colors) and 1000–850 hPa horizontal averaged temperature advection (contours: red solid lines indicate positive correlation, blue dashed lines indicate negative correlation, and contour intervals at 0.05 in correlation; shown only passing 90% confidence level in (a) Jun, (b) Jul, (c) Aug, and (d) the JJA mean from 1980 to 2017

过减弱太阳短波辐射的方式造成当地地表气温负异常。由此可见，由NWPAC及其北部异常气旋组成的遥相关波列是造成El Niño衰退年夏季东亚地表气温南北差异的重要原因。此外，El Niño衰退年夏季6月、7月及8月在菲律宾附近海域均存在显著暖平流，这可能是造成El Niño衰退年夏季东亚南部地表气温正异常的原因之一。

4 El Niño衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内尺度演变机制

4.1 El Niño衰退年夏季NWPAC逐日演变特征

为了进一步探讨El Niño衰退年夏季NWPAC位置季节内尺度演变特征，图4给出了850 hPa逐日风场（110°E～150°E经向平均）对前冬NDJ(0) Niño3.4指数回归、西北太平洋逐日海温和OLR（110°E～150°E经向平均）与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关的时间—纬度图。可以看出，反气旋式风场异常在6月中旬、7月中旬及8月初均存在一次显著北移，其最北端从6月中旬的27°N左右北移至7月中旬的35°N左右，并于8月初北移至38°N左右，其北移时间并不与历月完全重合。NWPAC中心位置对应OLR正异常，该正异常中心同样存在明显北移，且在8月初在纬向范围上显著扩展，其北部OLR负异常中心随正异常中心北移而北移。西北太平洋局地海温异常呈北负南正经向偶极子型分布，且同样存在明显北移趋势。表现在异常正海温场中心位置从6月中旬15°N以南北移至8月初25°N以北，并且强度显著增强。同样的，异常负海温场中心位置从6月中旬30°N以南北移至8月初40°N附近。反气旋式风场异常在经向空间分布上位于正海温异常中心以北，同时位于负海温异常中心以南，这暗示了NWPAC与其下西北太平洋局地海温异常可能存在相互作用。

根据图4中反气旋式风场异常最北端纬向位置选取出3个时间段：6月16～25日（时段1）、7月7～16日（时段2）、7月26日至8月5日（时段3），进一步分析夏季NWPAC季节内尺度演变特征。图5给出了850 hPa逐日风场对前冬NDJ(0) Niño3.4指数回归，西北太平洋逐日海温与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关在上述3个时段的平均，以及前后两段时间平均的差值。从图5d可以看出，西北太平洋海温差值呈现南暖北冷的分布型，即表明30°N以南西北太平洋在时段2较时段1增暖，30°N以北西北太平洋在时段2较时段1变冷。与海温变化相伴随的风场演变表现为自南向北气旋式风场与反气旋式风场交错分布，即时段2的反气旋式风场较时段1明显北移，且在经向范围上延伸更广。从图5e可以看出，32°N以南西北太平洋在时段3较

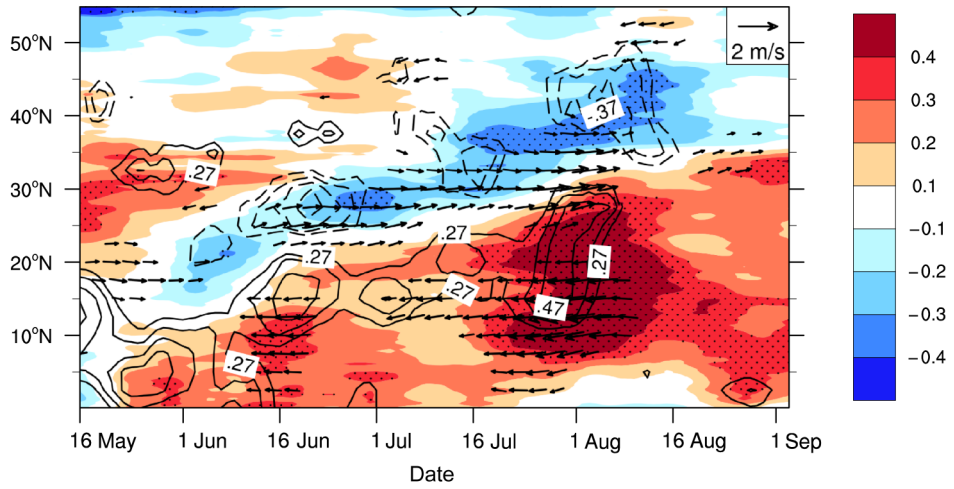

图4 1980～2017年前冬NDJ(0) Niño 3.4指数与110°E～150°E纬向平均的850 hPa逐日风场的回归系数（矢量，只显示通过90%信度检验的异常风场）以及与110°E～150°E纬向平均的西北太平洋逐日海温的相关系数（填色，带点区域通过90%信度检验）和与OLR的相关系数（等值线，只显示通过90%信度检验的等值线）

Fig. 4 Regression of longitudinal averages of 850-hPa wind (wind vectors denote the 90% confidence level) over 110°E−150°E on NDJ(0) Niño3.4 index and correlation of longitudinal averages of SST (color, stippling indicates >90% confidence level) and OLR (passing 90% cofidence level) over 110°E−150°E with NDJ(0) Niño3.4 index from 1980−2017

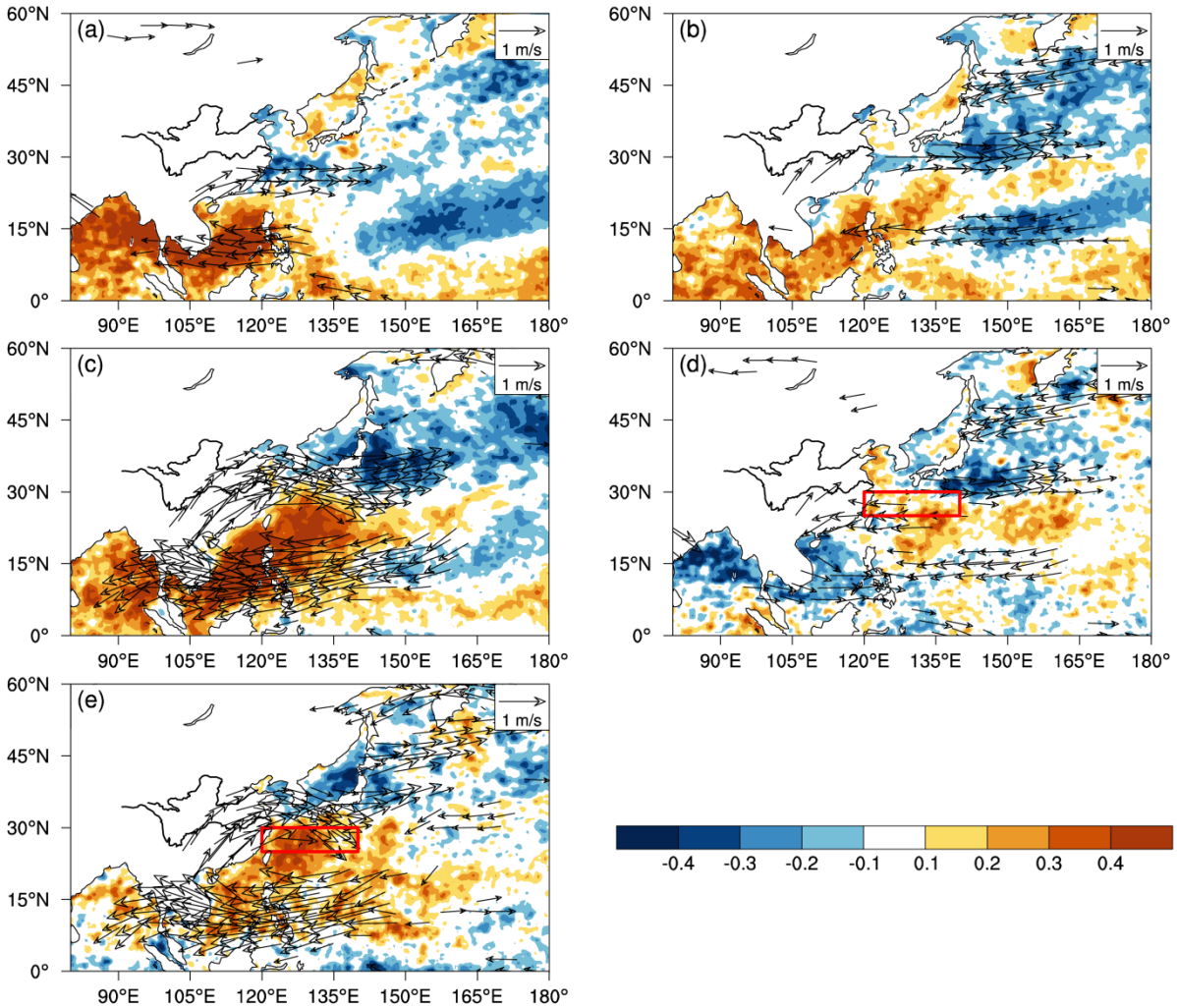

图5　1980～2017年前冬NDJ(0) Niño 3.4指数与（a）6月16～25日、（b）7月7～16日、（c）7月26日至8月5日平均850 hPa风场的回归系数（矢量）以及与西北太平洋海温的相关系数（填色）；（d）图5b和图5a的差值、（e）图5c和图5b的差值。红色方框区域表示海温显著增强区

Fig. 5　Regression of 850-hPa wind (vectors) and correlation of Northwest Pacific SST (shadings) with NDJ(0) Niño3.4 index averaged over (a) 16–25 Jun, (b)7–16 Jul, (c) 26 Jul–5 Aug, (d) the differences between Fig. 5b and Fig. 5a, and (e) the differences between Fig. 5c and Fig. 5b. The hatched area indicates significant SST enhancement zone

时段2显著增暖，32°N以北西北太平洋在时段3较时段2显著变冷。在风场强度演变上，NWPAC在时段3较时段2强度显著增强。在风场位置演变上，NWPAC在时段3较时段2在西北太平洋北移，且在纬向范围上延伸更广。框选出区域（25°N～30°N，120°E～140°E）作为本文重点关注的区域，可以发现，在该区域，海温在3个时段逐渐增强。

4.2　NWPAC夏季季节内演变如何影响西北太平洋局地海温

局地海温季节内变化与其上大气强迫关系密切(Wang et al., 2012, 2018)。为了进一步分析NWPAC其下西北太平洋局地海温季节内变化的成因，图6给出了西北太平洋逐日入射太阳短波辐射通量（110°E～150°E经向平均）与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关的时间—纬度图。入射太阳短波辐射通量场与OLR场有非常好的对应性，即OLR正（负）异常中心对应入射太阳短波辐射通量正（负）异常。这表明NWPAC可以通过抑制对流增加入射太阳短波辐射，而其北部的异常气旋可以通过增强对流减弱到达海表的入射太阳短波辐射，进而引起NWPAC北（南）侧海温负（正）异常。

图7给出了西北太平洋逐日潜热、感热通量（110°E～150°E经向平均）与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关以及1980～2017年气候态纬向风场的时

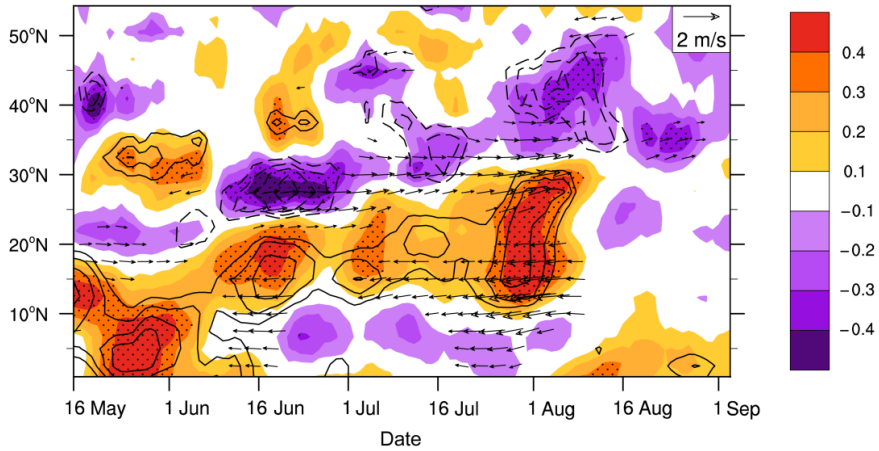

图6 同图4，但填色表示入射太阳短波辐射通量与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关

Fig. 6 Same as in Fig. 4, but colors for correlation of incident solar radiant fluxes with NDJ(0) Niño3.4 index

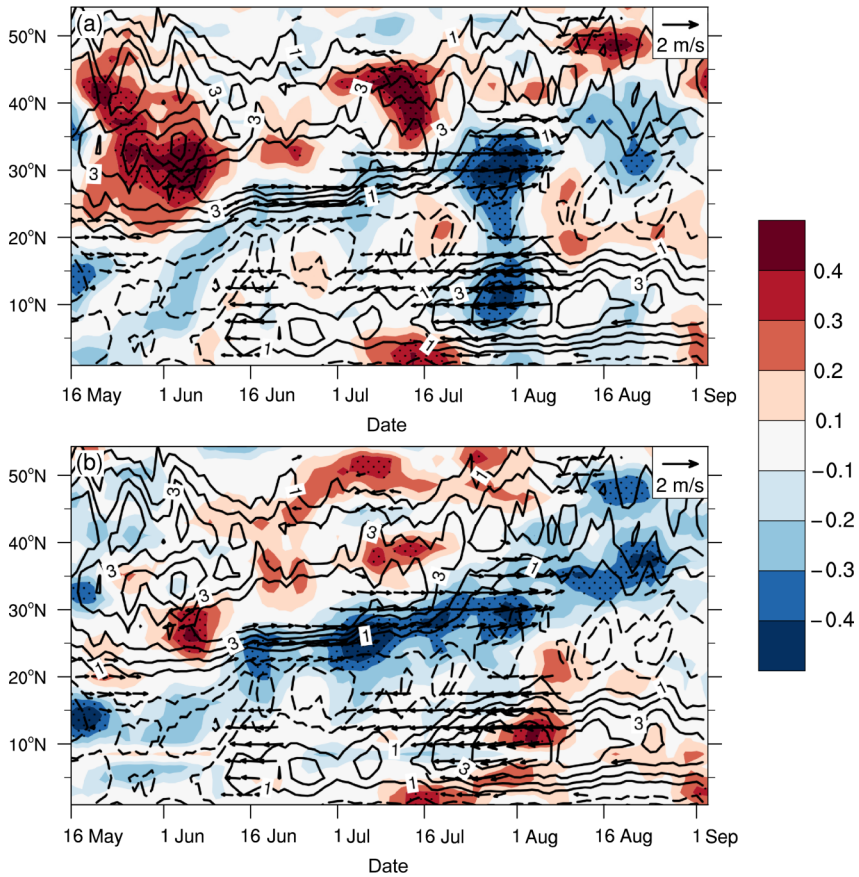

图7 (a)110°E～150°E纬向平均逐日潜热通量与前冬NDJ(0) Niño3.4指数的相关系数(填色，带点区域通过90%信度检验)；(b)110°E～ 150°E纬向平均感热通量与前冬NDJ(0) Niño3.4指数的相关系数(填色，带点区域通过90%信度检验)。矢量为110°E～150°E纬向平均逐日风场与前冬NDJ(0) Niño3.4指数的回归系数分布(矢量只显示通过90%信度检验)，等值线为110°E～150°E纬向平均逐日气候态纬向风场分布(单位：m/s，实线为正，虚线为负)

Fig. 7 (a) Correlations of longitudinal averages of latent heat fluxes (colors, stippling indicates >90% confidence level) over 110°−150°E with NDJ (0)Niño3.4 index; (b) correlation of longitudinal averages of sensible heat fluxes (colors, stippling indicates >90% confidence level) over 110°−150° E with NDJ(0)Niño3.4 index. The vectors show the regression of longitudinal averages of 850−hPa wind (showed only the 90% confidence level) over 110°−150°E on NDJ(0)Niño3.4 index and the contours show the longitudinal averages of zonal wind climatology (units: m/s, solid lines indicate the westerly and dash lines indicate the easterly)

间—纬度图。由图可见，夏季西北太平洋地区基本为西南季风所控制，NWPAC北（南）侧异常西（东）风与背景西风相叠加，增大（减小）了海表面气候态风速。这种风速的变化有可能造成潜热与感热通量负（正）异常，进一步引起海温负（正）异常。图7a中8月初NWPAC南侧出现显著潜热通量负异常可能是由于海温异常对潜热通量异常的负反馈作用。前期正海温异常能够增加海气温度、湿度差，增加向上潜热通量，进而造成潜热通量负异常。

综上所述，NWPAC北侧潜热、感热通量负异常，可以与其北部异常气旋对应的短波辐射的减弱共同作用，引起海温负异常。而NWPAC南侧潜热、感热通量正异常，可以与其对应的短波辐射的增强共同作用，引起其下海温正异常。

4.3 西北太平洋局地海温如何影响NWPAC夏季季节内演变

对流不稳定可以由相当位温（θ_{se}）的垂直变化来描述，$\partial\theta_{se}/\partial z>0$表示大气处于对流稳定状态。将850 hPa的$\theta_{se}$与1000 hPa的$\theta_{se}$相减得到对流不稳定参数$\Delta\theta_{se}$，将其作为衡量大气不稳定度的指标，$\Delta\theta_{se}$为正（负）值对应大气稳定（不稳定）。图8给出了850 hPa逐日风场（110°E～150°E经向平均）对前冬NDJ(0) Niño3.4指数回归、西北太平洋逐日对流不稳定参数$\Delta\theta_{se}$（110°E～150°E经向平均）与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关的时间—纬度图。由图可见，NWPAC北（南）侧大气区域稳定（不稳定），且这种对流不稳定分布的北移可能会引导NWPAC夏季季节内北移。具体机制可能是NWPAC北（南）侧负（正）海温异常能够减小（增加）海气温度、湿度差，使海表潜热与感热通量释放减弱（增强），进而增大（减弱）对流层低层大气层结稳定度，抑制（引起）对流发展，有（不）利于NWPAC的维持。

4.4 NWPAC夏季季节内北移中的海气相互作用过程

计算4.1小节所给出时段3内框选区域区域平均的对流不稳定参数$\Delta\theta_{se}$与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关分别为0.137（时段1）、0（时段2）、−0.237（时段3），可知El Niño衰减年夏季框选区域其上大气由时段1的对流稳定状态逐渐转为时段3的对流不稳定状态，即随着框选区域海温增暖，其上大气不稳定度逐渐加强。时段1（6月16～25日）框选区域为冷海温，其上大气稳定，此时框选区域在NWPAC主体北部，框选区域大气稳定可能引导NWPAC北移；时段2（7月7～16日）框选区域在NWPAC主体内北部，此时由于NWPAC所引起的短波辐射的增强、海表潜热与感热释放的减弱，框选区域海温将会上升，可能会引起对流不稳定，不利于NWPAC的维持，而框选区域北部的冷海温能够进一步引导NWPAC北移；时段3（7月26日至8月15日）框选区域在NWPAC主体中心，框选区域海温将进一步上升，对流不稳定可能会进一步增强。该过程是一个复杂的海气相互作用过程，时段1过程主要体现局地海温如何影响其上大气，时段2和3过程主要体现大气如何影响其下海温，同时海温对其上大气也会存在负反馈作用。

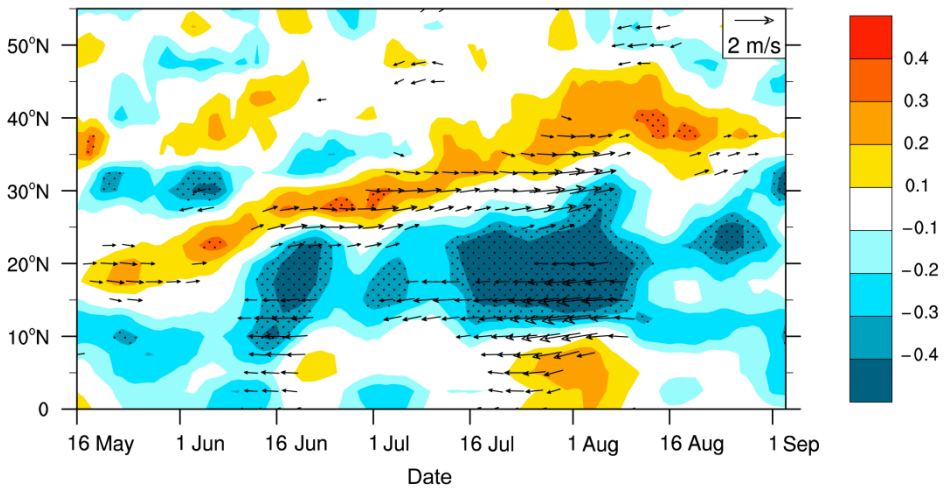

图8 同图4，但填色表示对流不稳定参数$\Delta\theta_{se}$与前冬NDJ(0) Niño3.4指数相关

Fig. 8 Same as in Fig. 4, but colors for correlation of convective instability parameters $\Delta\theta_{se}$ with NDJ(0) Niño3.4 index

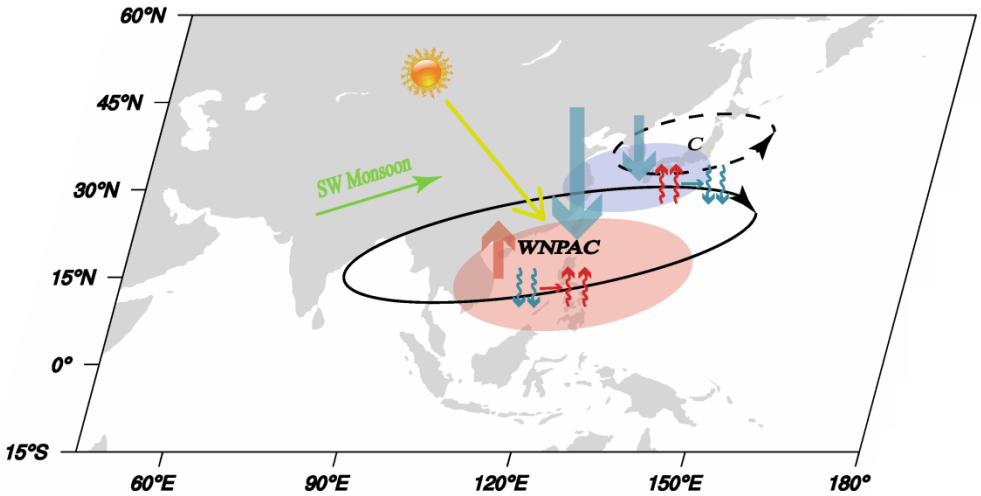

图9 El Niño衰退年夏季NWPAC季节内北移中海气相互作用过程示意图。反气旋式（气旋式）黑色箭头代表西北太平洋上的反气旋式（气旋式）风场异常。红色和蓝色阴影分别代表正和负的海温距平。黄色箭头代表入射太阳短波辐射通量。绿色箭头代表对流层低层夏季西南风。向下蓝色粗箭头（向上红色粗箭头）代表下沉（上升）运动。向下蓝色细箭头（向上红色细箭头）代表向下（向上）潜热与感热通量异常

Fig. 9 Schematic diagram illustrating the air-sea interaction process involved in NWPAC's sub-seasonal northern jump during a decaying summertime El Niño. "NWPAC" ("C") with anticyclonic (cyclonic) dark arrow represents the anticyclonic (cyclonic) wind anomalies over the WNP. Red and blue shadings represent positive and negative SSTA, respectively. Yellow arrows represent incident solar radiant fluxes. Green arrow represents lower level southwest summer monsoon. Downward blue thick arrows and upward red thick arrows represent the downdraft and updraft, respectively. Downward blue (upward red) thin arrows represent the downward (upward) latent and sensible heat fluxes

图9给出了NWPAC夏季季节内北移中海气相互作用机制示意图。NWPAC北侧异常西风与背景西南季风（绿色箭头）相叠加，增强气候态风场，使NWPAC北侧海表向大气潜热、感热释放增强（向上红色细箭头），与其北部异常气旋对应的短波辐射的减弱共同作用，引起海温负异常。而海温负异常能够减小海气温度、湿度差，使海表潜热与感热通量释放减弱（向下蓝色细箭头），可能会增大对流层低层大气层结稳定度，抑制对流活动，有利于加强和维持大气低层反气旋环流（向下蓝色短粗箭头）。而与之相反，NWPAC南侧异常东风与背景西南季风（绿色箭头）相叠加，减弱气候态风场，使NWPAC南侧海表向大气潜热与感热释放的减弱（向下蓝色细箭头），与NWPAC对应的短波辐射的增强共同作用，引起海温正异常。海温正异常能够增加海气温度、湿度差，使海表潜热与感热通量释放增强（向上红色细箭头），可能会引起大气层结不稳定，有利于对流发展，从而减弱大气低层反气旋环流（向上红色短粗箭头）。因此，与NWPAC相伴随的海温异常场北负南正的经向偶极子型分布可能是造成El Niño衰退年夏季NWPAC季节内北移的原因之一。

5 结论与讨论

本文基于NECP/NCAR逐月再分析资料、GPCP逐月降水资料等，分析了El Niño衰退年夏季NWPAC季节内演变特征及其对东亚降水、地表气温的影响。同时，本文还从局地海气相互作用的角度探讨了El Niño衰退年夏季NWPAC位置季节内演变机制，得出主要结论如下：

（1）El Niño衰退年夏季NWPAC存在显著季节内变化。在位置上，较之El Niño衰退年6月，NWPAC在7月与8月北移；在强度上，NWPAC在7月与8月显著增强。NWPAC通过影响对流层低层水汽通量散度对东亚夏季季节内降水产生影响，使东亚夏季雨带随NWPAC北移而逐渐北移；与NWPAC相伴随的降水异常减弱与入射太阳短波辐射增强，可以引起El Niño衰退年夏季中南半岛、菲律宾及我国南部地区地表气温正异常；而与NWPAC北部异常气旋相伴随的降水异常增多及入射太阳短波辐射减弱，可以引起我国东北地区、日本大部地区地表气温负异常。且随着NWPAC夏季季节内北移，东亚地表气温异常也随之向北移动。

（2）NWPAC在6月中旬、7月中旬及8月初均

存在一次显著北移，其北移时间并不与历月完全重合。NWPAC与其下西北太平洋局地海温异常存在相互作用。El Niño衰退年夏季NWPAC北侧短波辐射的减弱与海表潜热、感热释放的增强能够造成其下海温负异常，而海温负异常又将增大对流层低层大气层结稳定度，抑制对流发展，有利于大气低层反气旋的维持。与之相反，NWPAC南侧短波辐射的增强与海表潜热、感热释放的减弱能够造成其下海温正异常，而海温正异常能够引起对流层低层大气层结不稳定，对流异常发展不利于大气低层反气旋的维持。这种局地的海气相互作用过程可能是NWPAC夏季季节内北移成因之一。

除了降水与地表气温， NWPAC夏季季节内变化能够造成一系列更为广泛的影响，其对东亚夏季风、西北太平洋台风活动等的影响还有待进一步研究。此外，夏季东亚气候系统中的南亚高压、副热带急流、副热带高压以及季风雨带也存在着明显的北移现象。东亚气候系统的北移和El Niño衰退年夏季NWPAC的北移可能存在关联。本研究主要从西北太平洋局地海气相互作用角度来讨论及解释El Niño衰退年夏季NWPAC北移成因，其它可能的解释机制有待于进一步研究。

参考文献（References）

Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. Journal of Hydrometeorology, 4: 1147–1167. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2

Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. J. Climate, 13: 4310–4325. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4310:IAIVOT>2.0.CO;2

Chen W, Park J K, Dong B W, et al. 2012. The relationship between El Niño and the western North Pacific summer climate in a coupled GCM: Role of the transition of El Niño decaying phases [J]. J. Geophys. Res., 117: D12111. doi:10.1029/2011JD017385

Du Y, Xie S P, Huang G, et al. 2009. Role of air–sea interaction in the long persistence of El Niño–induced North Indian Ocean warming [J]. J. Climate, 22: 2023–2038. doi:10.1175/2008JCLI2590.1

Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. J. Climate, 24: 5365–5377. doi:10.1175/2011JCLI4152.1

Hu K M, Huang G, Qu X, et al. 2012. The Impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern Yangtze River Valley in late summer [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29: 91–100. doi:10.1007/s00376-011-0209-2

Hu K M, Huang G, Zheng X T, et al. 2014. Interdecadal variations in ENSO influences on Northwest Pacific–East Asian early summertime climate simulated in CMIP5 models [J]. J. Climate, 27: 5982–5998. doi:10.1175/JCLI-D-13-00268.1

Hu K M, Xie S P, Huang G. 2017. Orographically anchored El Niño effect on summer rainfall in central China [J]. J. Climate, 30: 10037–10045. doi:10.1175/JCLI-D-17-0312.1

黄刚, 胡开明. 2008. 夏季北印度洋海温异常对西北太平洋低层反气旋异常的影响 [J]. 南京气象学院学报, 31: 749–757. Huang Gang, Hu Kaiming. 2008. Impact of North Indian Ocean SSTA on Northwest Pacific lower layer anomalous anticyclone in summer [J]. Journal of Nanjing Institute Meteorology (in Chinese), 31: 749–757. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.06.001

Huang G, Hu K M, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An atmospheric GCM study [J]. J. Climate, 23: 5294–5304. doi:10.1175/2010JCLI3577.1

黄平, 黄荣辉. 2010. El Niño事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理 [J]. 大气科学学报, 33: 513–519. Huang Ping, Huang Ronghui. 2010. Effects of El Niño events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33: 513–519. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.05.001

Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6: 21–32. doi:10.1007/BF02656915

黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. 气候与环境研究, 3: 300–313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River Basin during the summer of 1998 and causes exploration [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3: 300–313. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.02

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1631–1644. doi:10.1175/BAMS-83-11-1631

Kosaka Y, Xie S P, Lau N C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110: 7574–7579. doi:10.1073/pnas.1215582110

Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 1275–1277.

Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65: 373–390. doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373

Ren X J, Yang X Q, Sun X G. 2013. Zonal oscillation of western

Pacific subtropical high and subseasonal SST variations during Yangtze persistent heavy rainfall events [J]. J. Climate, 26: 8929−8946. doi:10.1175/JCLI-D-12-00861.1

Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. J. Climate, 15: 1609−1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2

Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific−East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517−1536. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1517: PEATHD>2.0.CO;2

Wang B, Wu R G, Li T. 2003. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian−Australian monsoon variation [J]. J. Climate, 16: 1195−1211. doi: 10.1175/1520-0442(2003)16<1195: AOIAII>2.0.CO;2

Wang L, Li T, Zhou T J. 2012. Intraseasonal SST variability and air−sea interaction over the Kuroshio Extension region during boreal summer [J]. J. Climate, 25: 1619−1634. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00109.1

Wang T Y, Yang X Q, Fang J B, et al. 2018. Role of air−sea interaction in the 30−60-day boreal summer intraseasonal oscillation over the western North Pacific [J]. J. Climate, 31: 1653−1680. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0109.1

Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo−western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22: 730−747. doi:10.1175/2008JCLI2544.1

Xie S P, Du Y, Huang G, et al. 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo−Western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. J. Climate, 23: 3352−3368. doi:10.1175/2010JCLI3429.1

Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33: 411−432. doi:10.1007/s00376-015-5192-6

Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L02708. doi:10.1029/2006GL028571

Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74: 49−62. doi: 10.2151/jmsj1965.74.1_49