

吴彦洁, 黄菲, 许士斌, 等. 秋季西北太平洋热带气旋累积能量的年际变化及其预报[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 19-27.
Wu Yanjie, Huang Fei, Xu Shibin, et al. Interannual variations and prediction of accumulated cyclone energy of tropical cyclones in autumn over western North Pacific[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 19-27. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.003. (in Chinese)

秋季西北太平洋热带气旋累积能量的年际变化及其预报

吴彦洁¹, 黄菲^{1,2}, 许士斌¹, 王宏¹

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100; 2. 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315000)

摘要: 秋季是西北太平洋热带气旋平均强度最强的季节, 热带气旋累积能量(accumulated cyclone energy, ACE)是热带气旋平均强度的表征指标, 基于1979—2015年日本气象厅最佳路径热带气旋数据集, 以及美国冰雪中心海冰数据和哈得来环流中心海温数据, 利用回归分析和多元逐步回归等方法, 对秋季西北太平洋ACE指数进行了分析和预报。研究表明: 秋季西北太平洋ACE指数具有显著的年际变化特征, 与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)有关, 最大和最小值分别出现在1991年的厄尔尼诺年和1999年的拉尼娜年, 在厄尔尼诺发展年的秋季ACE一般较强, 而在拉尼娜衰减年的秋季热带气旋强度则较弱; ACE指数变化受来自北极海冰变化强迫中纬度异常波列的影响及其受到厄尔尼诺海温模态的调制; 由于海冰在波弗特海的异常增多, 强迫对流层高层夏季出现类似北半球环流遥相关型异常波列, 波列正压下传, 使得夏秋季西北太平洋副热带高压东退北移; 副热带高压活动的变化和太平洋海温的异常分布影响了局地的环流, 热带气旋生成源地弱的垂直风切变区域偏东和涡度显著增大有利于热带气旋在暖海洋上发展强盛。最后进行建模预报, 预报效果为0.69。若单独使用海温或海冰作为唯一要素来预报, 预报效果将大大降低。

关键词: 秋季; 西北太平洋; 气旋累积能量; 预报

中图分类号: P457.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0019-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.003

Interannual variations and prediction of accumulated cyclone energy of tropical cyclones in autumn over western North Pacific

WU Yanjie¹, HUANG Fei^{1,2}, XU Shibin¹, WANG Hong¹

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China) of Ministry of Education and Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266100, China; 2. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract The autumn identifies the highest mean intensity of tropical cyclones over western North Pacific and accumulated cyclone energy (ACE) serves as the characteristic index for the mean intensity of tropical cyclones. Based on the tropical cyclone best-track dataset from Japan Meteorological Agency, the sea ice data from National Snow and Ice Data Center, and the SST data from Met Office Hadley Centre from 1979 to 2015, the ACE index in autumn over western North Pacific is analyzed and predicted using regression analysis and multiple stepwise regression. The results show that the ACE index in autumn

收稿日期: 2018-07-02; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41605037, 41575067); 国家重大科学研究计划项目(2015CB953904)

作者简介: 吴彦洁, 女, 博士研究生, 主要从事海洋气象学研究, 592113878@163.com。

通信作者: 黄菲, 女, 博士, 教授, 主要从事海洋气象学研究, huangf@ouc.edu.cn。

over western North Pacific is of obvious interannual variations and is closely related with El Niño-Southern Oscillation (ENSO), and the maximum (minimum) value appeared in 1991 (1999) when El Niño (La Niña) occurred. ACE is generally stronger in autumn of the El Niño developing years and the tropical cyclones are weaker in autumn of the La Niña declining years. ACE anomalies in autumn over western North Pacific are influenced by the forcing of the mid-latitude anomalous wave trains resulting from the change of the Arctic sea ice and by the SST pattern in El Niño. Due to the abnormal increase of sea ice in the Beaufort Sea, anomalous wave trains (similar with Circum-Global Teleconnection in the Northern Hemisphere) appear at the upper troposphere in summer, whose positive pressure makes the subtropical high over western North Pacific move eastward and northward in summer and autumn. The variations of the subtropical high and the abnormal distribution of SST over the Pacific Ocean affected the Walker Circulation. To the east of Philippine Sea, the eastward vertical wind shear is weaker, which is favorable for developing tropical cyclones. At the place where tropical cyclones are generated, the positive vorticity anomalies contribute to strengthen their intensities. Finally, the forecast skill score of the model is 0.69. If SST or the sea ice was used as the only factor, the forecast skill score would be greatly reduced.

Key words autumn; western North Pacific; accumulated cyclone energy; prediction

引言

热带气旋是生成在热带和副热带洋面上的一种剧烈天气系统,被认为是世界上最严重的自然灾害之一。每年5—10月是西北太平洋热带气旋的多发期,也是热带气旋影响我国的高发期。秋季(9—11月)是一年中热带气旋平均强度最强的季节,9月是超强台风发生最多的月份^[1],10月是热带气旋平均强度最强的月份^[2],而近些年来,9月成为了热带气旋平均强度最强的月份。因此,研究秋季热带气旋的活动对防灾减灾具有重要意义。

西北太平洋热带气旋的年际变化受到诸多因子的影响,如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)^[3-4],副热带高压^[5],印度洋海温^[6-7],海冰^[8],西太平洋夏季风^[9-10],哈得来环流^[11]等。因此在台风季节到来之前对热带气旋年际活动变率进行预报具有重要的实际意义。

为了量化表征热带气旋强度,Bell et al.^[12]提出了气旋累积能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE),利用每6h的最大持续风速的平方和来表征一段时间内热带气旋的强度。Emanuel^[13]还提出了一个潜在破坏力指数PDI(Potential Destructiveness Index),利用最大持续风速记录的立方和来表征热带气旋强度,但由于该指数对风速的误差过于敏感,而 v^2 代表着动能的大小,因此更多采用ACE表征热带气旋活动和强度。计算依据下式^[14]:

$$ACE = \sum_{i=1}^N \sum_{t_{oi}}^{t_{fi}} v(t)^2 \quad (1)$$

$v(t)$ 为热带气旋的最大持续风速。即为对已命名的热带气旋,在其生命时间内,对每6h最大持续风速的记录平方和进行累加。 t_{oi} 为TC生成时间, t_{fi} 为TC消亡时间。 $i = 1 \sim N$ 为在选取海域和时间范围内符合筛选条件的TC个数。ACE指数代表着热带气旋的总体风力强度和季节性活动^[12],能较好地反映热带气旋的集合强度和热带气旋生命期的发展。

针对用预报ACE来表征一个海域内未来热带气旋在某个时间段的总体强度,TSR(Tropical Storm Risk)从2000年开始利用5月之前的Nino3指数和SLP预报5—9月的西北太平洋海盆ACE指数。Lea and Saunders^[15]利用7—9月的925 hPa纬向风(加勒比海与热带北大西洋地区)和飓风频发区的海温预报年际ACE指数。上海台风所从2005年开始对年际热带气旋活动和数目进行预报。Klotzbach^[16]利用3—6月2 m气温和200 hPa纬向风预报了北大西洋6—10月的ACE指数。Zhan and Wang^[17]基于CFSv2模式预报的台风季节(5—10月)环流要素,利用海表温度梯度和垂直风切变对西北太平洋热带气旋ACE指数进行预报。上述预报模型中多采用局地海温或大气环流因子,且预报时效较短,多针对台风季节做预报,没有专门针对秋季西北太平洋热带气旋ACE的预报。

热带气旋的强度,不仅与热带海洋热力强迫有关,还与大尺度环境的动力因子有关,特别是与副热带高压的强度有关。有研究表明,西北太平洋副热带高压(简称“西太副高”)的变化,不仅与热带海温有关,还与中高纬度的北大西洋涛动或北极涛动

有联系,可以很好地预报东亚季风和热带气旋的活动^[18]。近年来,随着北极海冰快速融化,对北大西洋涛动的影响显著,进而可能通过影响西太副高而影响热带气旋的活动。北极与热带作为全球热量的源和汇,同时考虑两者的作用,能否提高西北太平洋 ACE 指数的可预报性将是本文探究的目的之一。

1 资料与方法

采用了日本气象厅 (Japan Meteorological Agency) 最佳路径数据集热带气旋资料,时间长度为 1979—2015 年。资料每隔 6 h 一次,包含热带气旋记录时间,所在经纬度,近中心最大风速 (单位: kn),中心最低气压等,部分记录含有 30 kn 和 50 kn 的风圈半径。

使用了 1978 年 12 月—2015 年 11 月期间的以下资料:

1) 海温资料为 HadISST 数据集 (Hadley Center Sea Surface Temperature data set)。格点分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

2) 海冰资料为 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 的海冰密集度 (Sea Ice Concentration) 资料。资料为格点分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的海冰密集度分布和计算得出的月均海冰密集度的面积 (area) 指数。

3) 美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的 NCEP/NCAR Reanalysis 2 月平均资料,格点分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。所用气象要素包括 200 hPa、500 hPa 位势高度、相对湿度、200 hPa 风场、850 hPa 风场。

主要采用了回归分析来探究海冰和海温因素对西北太平洋 ACE 的影响,并通过 t 检验来对回归效果进行显著性检验。在选取了合适的预报因子之后,采用了多元逐步线性回归的方法对 ACE 进行预报,并且使用交叉检验后报的方法对预报方程的可预报性进行检验。

2 秋季西北太平洋 ACE 指数的年际变化

对西北太平洋秋季热带气旋 ACE 指数的年际变化进行分析,计算范围为西北太平洋 (含南海) ($105^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{W}$, $5^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$),时间区间为 1979—2015 年的 9—11 月。

本文计算的 ACE 指数是根据世界气象组织 (WMO) 的强度分级,将热带气旋记录中 6 h 最大持

续风速大于 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的生命期,计入统计分析,最大持续风速低于 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的热带低压及其以下的发展和衰减过程不在本文的研究范围以内。

由西北太平洋秋季热带气旋 ACE 指数的年际变化柱状图 (图 1) 看出,秋季 ACE 指数没有一致的线性变化趋势,但年际、年代际变化显著。ACE 的最大值和最小值分别出现在 1991 年和 1999 年,极大峰值年份多出现在 1982、1987、1991、1992、1994、1997、2004、2009、2013 和 2015 年,这些年多数是厄尔尼诺发展年的秋季,而 ACE 的极小值年份多出现在 1985、1993、1999、2002、2008 和 2011 年,这些年多数为拉尼娜年衰减年的秋季。从滑动平均曲线来看,五年滑动平均 ACE 指数呈年代际振荡,约 11~13 a 为一个变化周期,ACE 从 1979 年开始波动上升,呈现两个波峰,一个在 1991 年前后,另一个在 2004 年前后,波谷在 2000 年和 2010 年前后,且 1991 年前后的波动振幅最大。ACE 在 1999 年达到最小值以后振荡幅度减小,但 2010 年以来秋季 ACE 指数滑动平均略有上升的趋势。

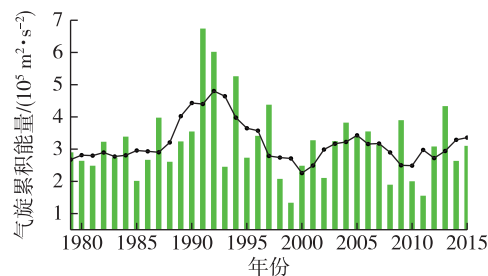


图 1 西北太平洋秋季 ACE 年际变化柱状图 (绿色柱为每年西北太平洋秋季的 ACE 指数,黑色实线为秋季 ACE 五年滑动平均值,单位: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 1 Bar chart of annual variations of ACE in autumn over western North Pacific (the green bar is the ACE index every autumn over western North Pacific and the black solid line is the five-year moving average of ACE in autumn, units: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

3 预报因子的选择及其物理意义的探究

大气的变化是个快过程,而海洋的变化是个慢过程。我们猜想,在大尺度环境对 ACE 指数的影响中,大气的局地信号是能够通过前期海洋的变化预测出来的。对于 ACE 指数的预报,已有很多研究成果,各自采用了不同的要素场进行预报,但随着近年来北极海冰快速融化,其对中低纬度大气环流的影响也越来越重要^[19]。在以往研究中,尚未有将北极海冰作为预报要素场对 ACE 进行预报的研究。

下面的研究将探究对于西北太平洋 ACE 预报过程中,海冰的作用是否重要,能否提升 ACE 的预报效果。

3.1 海温与海冰要素场

图 2 为秋季西北太平洋热带气旋 ACE 指数回归到冬、春、夏、秋四个季节海面温度(SST)的回归场及其显著性检验,在太平洋中央呈现大的“K”型相关区,在东太平洋呈现正相关,在西北太平洋和塔斯曼海及其珊瑚海一带呈现显著负相关,这种 K 型相关区与 Wang et al.^[20] 提出的 Mega-ENSO 型分布类似,在预报因子的选择中,考虑将太平洋海温因素整体作为 Mega-ENSO 指数进行筛选,以验证这一指数能否更好地表征热带太平洋海温对西北太平洋 ACE 的影响。Mega-ENSO 指数是指区别于前人提出的长条形厄尔尼诺各区,而是从 40°S 到 40°N,东西包括整个太平洋的一个新 ENSO 区域,东太平洋为三角区域,西太平洋为 K 型区域,模态分布与 IPO (Inter-decadal Pacific Oscillation) 相似,不同的是 IPO 表现为周期约 11 a 的年代际振荡,而 Mega-ENSO 表现为太平洋年际变化。同时,根据热

带太平洋海温四个季节的变化趋势来看,是由中太平洋的热带暖信号首先发展,东太平洋再开始增暖,因此,参照厄尔尼诺指数各区范围,在预报因子池中加入了 Nino3.4 和 Nino 1+2 指数。另外海温场上,在北大西洋和南大西洋各有不同的显著相关,各个相关区的范围如表 1 所示。除了热带太平洋区域,在靠近南极洲的南大洋区域有一定范围的海水从冬季有微弱暖信号慢慢发展,经过春季的能量累积在北半球夏季达到强盛。在北太平洋,冬季有较强的暖信号海域,到了春季东移减弱,夏季消散,并入 Mega-ENSO 区域的三角形暖区。另外北大西洋、热带大西洋也有小范围的显著相关区域。在前三个季节中,从各个海区不同信号发展来看,夏季的海温信号最为显著且有代表性,因此,我们从海温要素场中选取 JJA (北半球夏季) 月份的海温作为预报场,具体选择区域详见表 1。

由四个季节海冰回归场及其显著性检验图(图 3)可以看出,夏季和秋季在太平洋扇区的波弗特海呈现大面积显著正相关区域,夏季在 50°N 附近的鄂霍次克海区域呈现零星负相关区域。在大

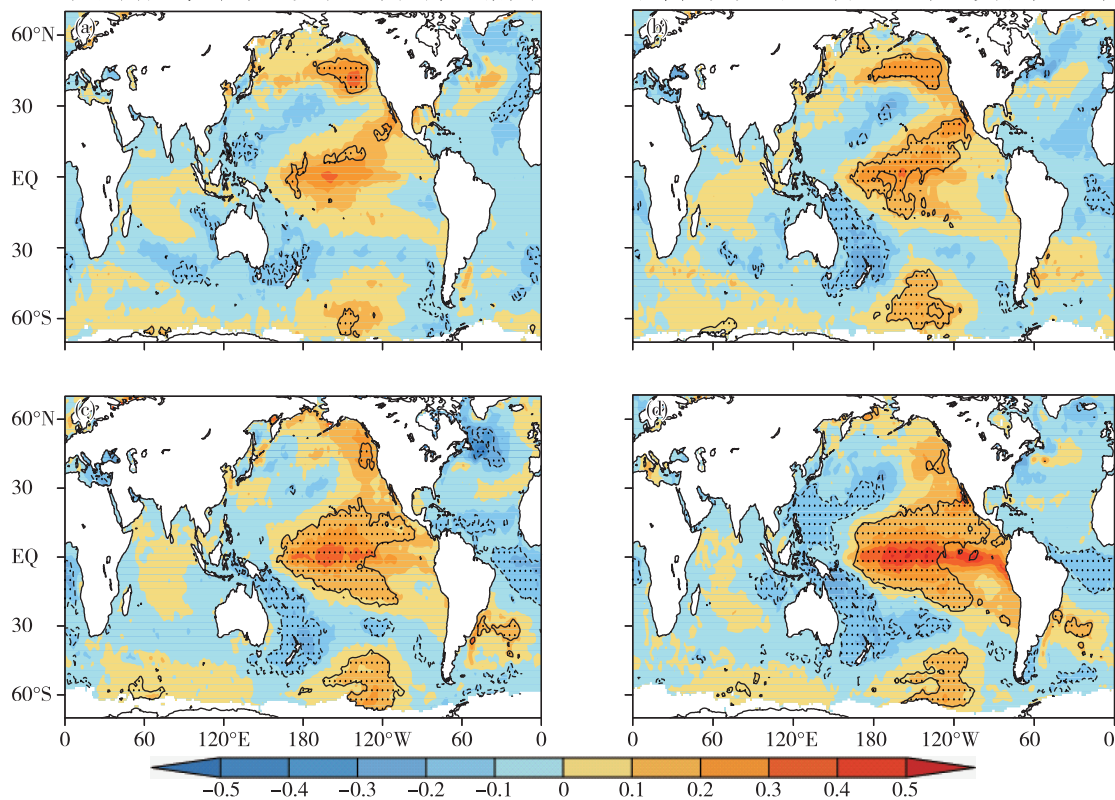


图 2 西北太平洋秋季热带气旋 ACE 指数对冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)四个季节海面温度的回归场及其显著性检验(图中打点区域为通过 95% 显著性检验区域,单位: °C)

Fig.2 SST regression field of ACE index of tropical cyclones in autumn over western North Pacific and the significance test (a. winter, b. spring, c. summer, d. autumn; the area with black points denotes passing the significance test at 95%, units: °C)

西洋扇区的福克斯湾存在显著正相关,而同在大西洋扇区的拉布拉多海盆区域为显著正相关,这一区域常年为大西洋暖流进入北极地区的流入通道。另在太平洋扇区的喀拉海有小范围显著正相关区域,由于此区域是作为我国冷空气的冷源存在,因

此也将此区域考虑预报因子池中。从冬季和春季的回归场及其显著性检验中可以看出,前两个季节的显著区域零散且范围较小。因此,对于海冰场的选择,也考虑 JJA 月份。

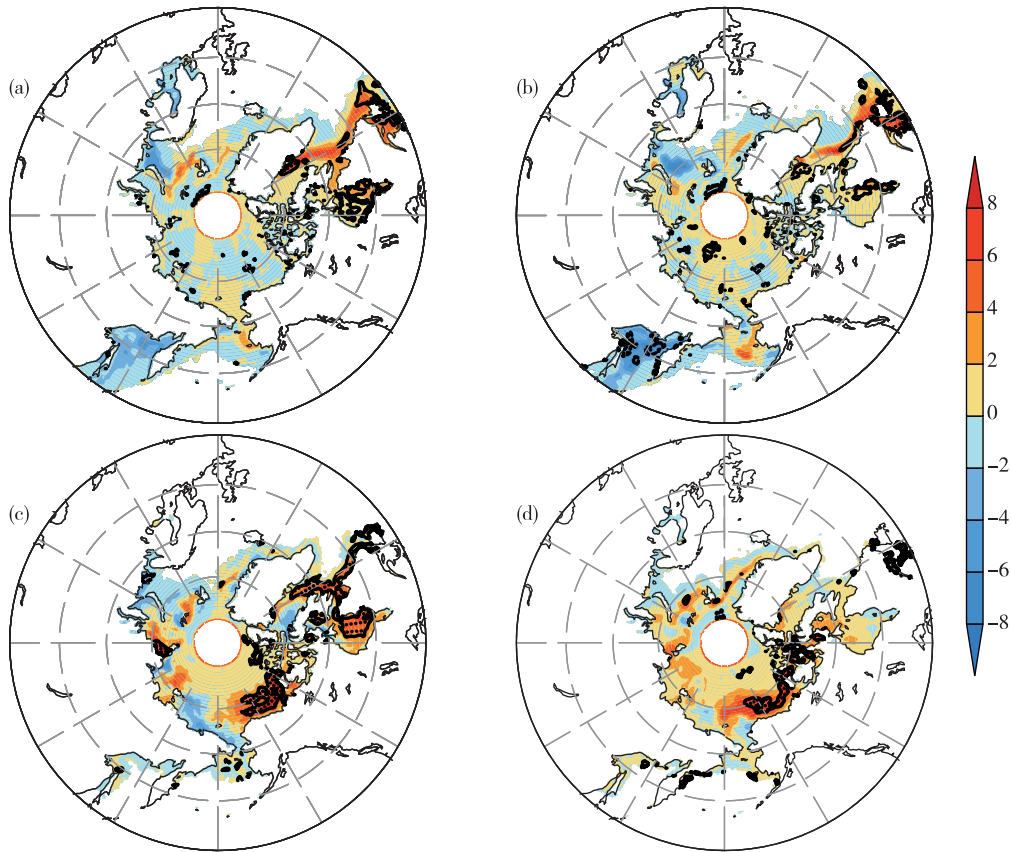


图 3 西北太平洋秋季热带气旋 ACE 指数对冬(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)四个季节海冰密集度的回归场及其显著性检验 (图中打点区域为通过 95%显著性检验区域,单位:%)

Fig.3 SIC (sea ice concentration) regression field of ACE index of tropical cyclones in autumn over western North Pacific and the significance test (a. winter, b. spring, c. summer, d. autumn; the area with black points denotes passing the significance test at 95% , units: %)

3.2 物理意义探究

在对 ACE 指数预报过程中建立预报方程之前,先从物理意义的角度来探究预报因子池中的因子是否具有物理意义。西北太平洋 ACE 指数的变化受到四个因素的影响:西太平洋副热带高压(简称“副高”)偏弱;局地垂直风切变偏弱;低纬地区低空正涡度异常偏东;局地 SST 正异常偏东^[21]。下面将 ACE 指数回归到夏秋季节的西北太平洋范围内各个环境场中探究局地环境因素对 ACE 指数的影响。

由图 4a、b 可以看到,在夏季异常波列的中心位置处于 60°N 附近,在北半球夏季青藏高原、日本上空、太平洋中部洋中槽区域、北美洲东海岸分别有负正负正负的波列存在,北半球为三波结构,到了

秋季,南移到了 45°N 附近。这个模态与前人研究中发现的北半球环球遥相关型 (Circum-Global Teleconnection, CGT)形态相似,北半球环球遥相关型^[22-23]是在北半球夏季存在的中纬度的环球遥相关型,该模态主要存在于年际尺度上的北半球 200 hPa位势高度场。在 Yang et al.^[24]的研究中发现,北极海冰的变化会导致大气环流和北极涛动的异常,从而影响了北冰洋向北大西洋输出冰的量,进而或许影响到了北大西洋海表面温度的变化,且北半球环球遥相关型受到夏秋季太平洋扇区海冰大量融化的影响。

由图 4c、d 可以看到,在夏季西北太平洋副热带高压西部为位势高度负异常,副高东退,在日本上

空为位势高度正异常,副高活动偏北。同样,秋季日本上空的对流层中层有位势高度正异常,在菲律宾海有位势高度负异常,对比夏季这种分布在秋季的表现更为明显,西北太平洋副热带高压活动东退偏北。配合 200 hPa 和 500 hPa 位势高度回归场,可以得到,200 hPa 中纬度波列与 500 hPa 中纬度的异常波列基本上——对应,这表明可能是 200 hPa 中纬度北半球环流遥相关型异常波列的正压下传,并且延续到秋季,造成了西北太平洋秋季副热带高压的异常活动,从而影响了热带气旋的活动。

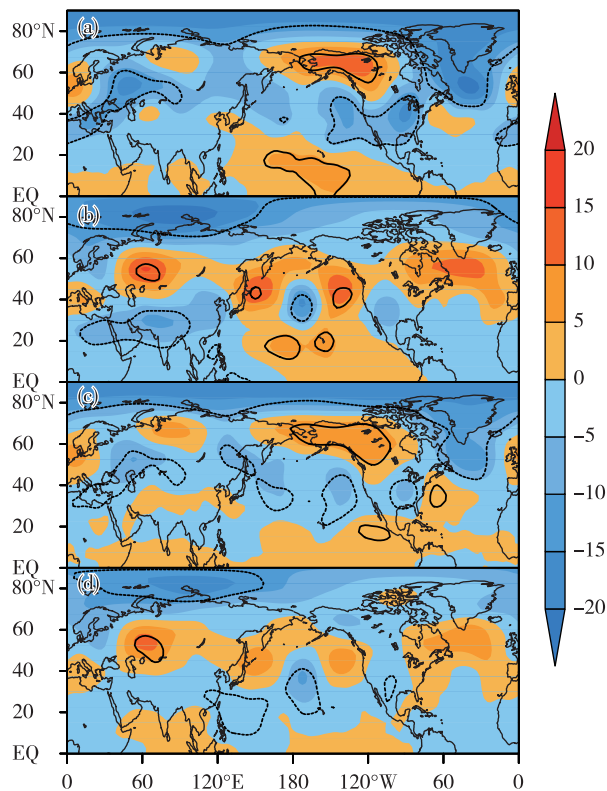


图4 对流层中上层位势高度回归场及其显著性检验 (a.夏季 200 hPa, b.秋季 200 hPa, c.夏季 500 hPa, d.秋季 500 hPa;图中填色区域为回归值,黑色实线为通过 90%正相关显著性检验区域,黑色虚线为通过 90%负相关显著性检验区域;单位:gpm)

Fig.4 Geopotential height regression field and the significance test in middle and high troposphere (a. at 200 hPa in summer, b. at 200 hPa in autumn, c. at 500 hPa in summer, d. at 500 hPa in autumn; the colored area is the regression field, the black solid line denotes passing the significance test of positive correlation at 90%, the black dashed line denotes passing the significance test of negative correlation at 90%; units: gpm)

从局地环境因素来看,由图 5a、b 可以看到,在菲律宾海以东区域,偏东位置垂直风切变(200 hPa 与 850 hPa 风场矢量差的模)偏弱,偏西位置垂直风

切变偏强,这使得在偏东位置易生成热带气旋,这一区域远离群岛和陆地,热带气旋更易发展。这可能是造成西北太平洋气旋累积能量指数偏高的原因之一。由图 5c、d 可以看到,在热带气旋生成源地,有涡度显著偏高,正涡度异常有利于热带气旋强度的发展。

局地环境因素的变化,可能由经向环流或者纬向环流引起,在对哈得来环流和沃克环流的分析中发现:把 ACE 回归到热带地区的 omega 高度垂直场上,在夏季 160°W 附近有异常上升运动,到了秋季,显著的异常上升运动西移到 170°E 附近,而这一区域恰好为秋季沃克环流上升支(图 6)。沃克环流是热带大气由于西太暖池和东太冷舌的存在而受到热力驱动形成的,在厄尔尼诺年份,东太平洋海温偏高,西太平洋海温偏低,使得沃克环流偏强,局地环境涡度偏强,热带气旋生源地垂直风切变在偏东区域异常偏弱。

4 预报方程的建立及其检验

根据上一节的研究结果,将两个要素场中选取的预报因子具体经纬度列在表 1 中。从海冰要素场选取了四个预选预报因子,从海温要素场选取了六个预选预报因子,在海温显著区域中,由于北太平洋暖信号在夏季消散,且其与热带太平洋的相关性较大,因此并未考虑入预报因子池中。

表 1 选取的预报因子

Table 1 Prediction factors selected

时间(要素)	区域	经度	纬度
JJA(SIC)	波弗特海	120°W~170°W	70°N~75°N
JJA(SIC)	福克斯湾	90°W~100°W	55°N~65°N
JJA(SIC)	拉布拉多海	75°W~45°W	45°N~50°N
JJA(SIC)	喀拉海	90°E~115°E	70°N~75°N
JJA(SST)	Mega-ENSO		
JJA(SST)	Nino 3.4	170°E~120°W	5°S~5°N
JJA(SST)	Nino 1+2	90°E~80°W	10°S~0°
JJA(SST)	南大洋	140°W~110°W	60°S~40°S
JJA(SST)	北大西洋	50°W~40°W	40°N~55°N
JJA(SST)	热带大西洋	60°W~0°	40°N~55°N

为了使得预报方程稳定,减少因子之间相关性的干扰,采用逐步线性回归的方法来建立方程,逐步线性回归能较好地使最终入选的预报因子相互独立。最终选取了一个海冰因子和两个海温因子建立了预报方程。如图 2 和图 3 所示,为波弗特海

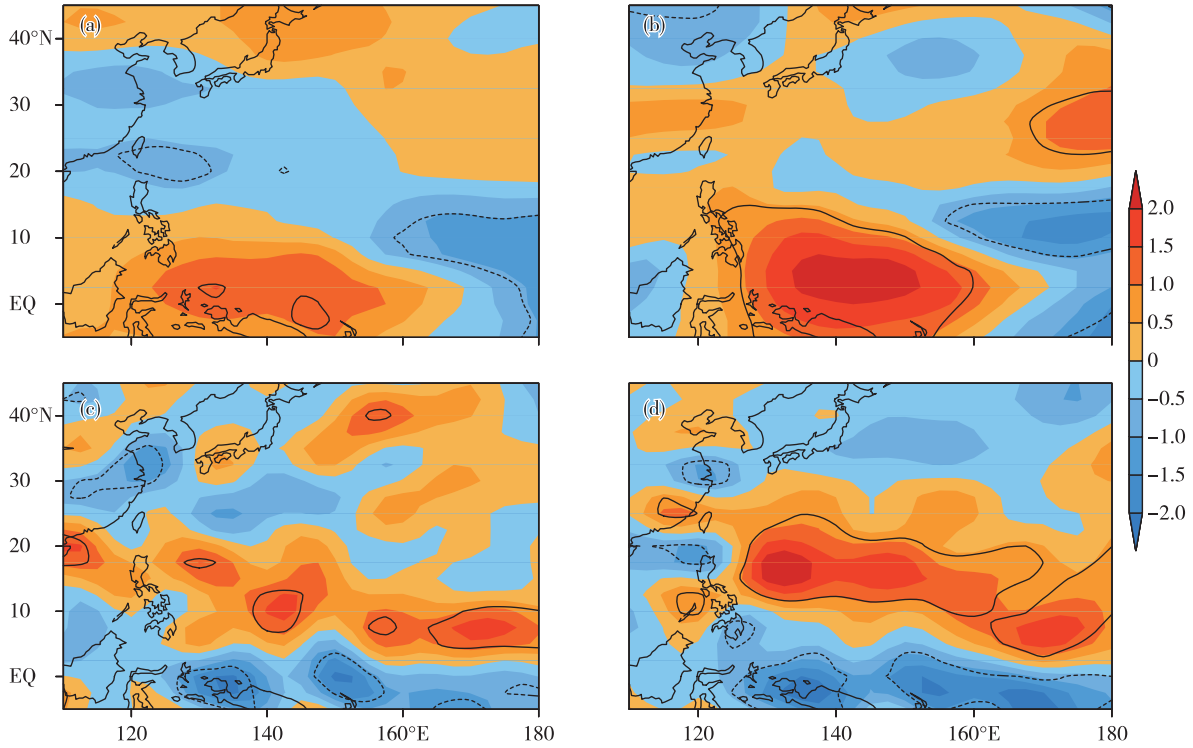


图 5 850 hPa 涡度(单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直风切变(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)回归场及其显著性检验(a.夏季垂直风切变,b.秋季垂直风切变,c.夏季涡度场,d.秋季涡度场;图中填色区域为回归值,黑色实线为通过 95% 正相关显著性检验区域,黑色虚线为通过 95% 负相关显著性检验区域)

Fig.5 Regression fields of the vorticity (units: 10^{-5} s^{-1}) and vertical wind shear (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa and the significance test (a/b. vertical wind shear in summer/autumn, c/d. vorticity in summer/autumn; the colored area is the regression field, the black solid line denotes passing the significance test of positive correlation at 95%, the black dashed line denotes passing the significance test of negative correlation at 95%)

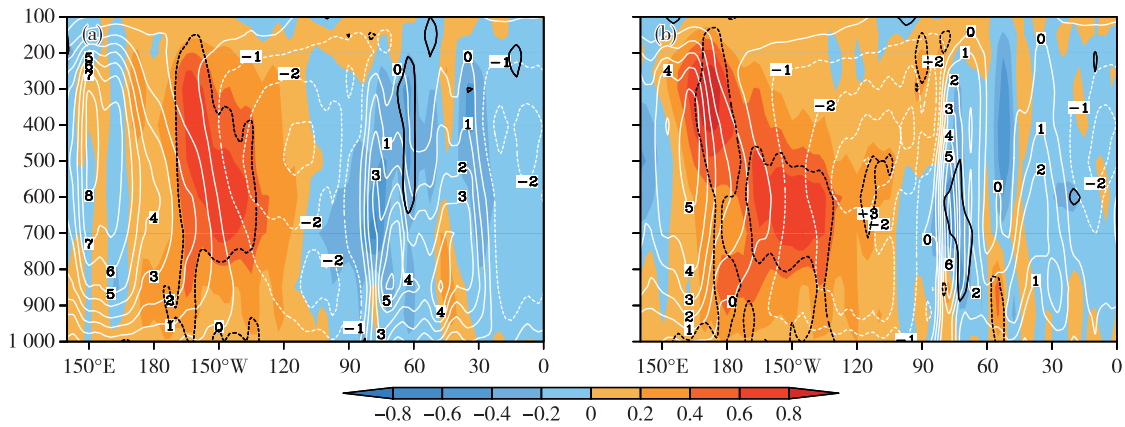


图 6 Omega 气候态、回归场及其显著性检验(a.夏季,b.秋季;图中填色区域为回归值,黑色线为通过 95% 显著性检验区域,白色线为 omega 气候态;单位: $-10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.6 Climatology of omega, the regression field and the significance test (a. summer, b. autumn; the colored area is the regression field, the black line denotes passing the significance test at 95%, the white line is the climatology of omega; units: $-10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

海冰 (BF_I)、Nino 3.4 和南大洋海温 (SO_S), 预报方程如下:

$$ACE = 0.40 \times BF_I + 0.28 \times Nino3.4 + 0.36 \times SO_S \quad (2)$$

在预报因子的选择中, BF_I 与 Nino 3.4, SO_s 相互独立, 而 Nino 3.4 和 SO_s 相关系数为 0.36, 这说明这两个海温因子可能有相互关联或者是同一模态的不同表现方式, 还尚未进行研究得到明确的结论。将这两个因子看做一个要素的话, 那么, 结合上一节对物理机制的探究, ACE 指数的预报就是由 BF_I 和 Nino 3.4 指数主导的。Mega-ENSO 未被采用的原因, 可能是因为在太平洋偏西区域, 负相关不够显著, 而且说明这一分布不是造成 ACE 变化的主要驱动因子。

由秋季 ACE 指数的逐步线性回归预报效果随时间变化曲线(图 7)可以看出, 原始曲线与预报曲线的相关性为 0.69, 通过了 99% 的显著性检验。这说明了预报方程是合理的, 能够从年际变化上稳定地进行预报。对比两个年代段来说, 1997 年后的预报效果更接近实际情况一些。如果单独使用海温或海冰作为唯一要素来预报, 预报效果将大大降低, 单独使用海温预报效果为 0.56, 单独使用海冰要素的预报效果为 0.49。因此选取海温和海冰两个要素场能增强预报效果。若单独使用海温或者海冰进行预报, 预报峰值年份的效果更加不理想。从图 7 中可以看出, 在 1991 年的峰值年份, 预报效果不理想, 结合气候背景, 1991 年菲律宾 Pinatubo 火山喷发, 我们猜测 1991 年之后的两个年份可能受到火山喷发对大气的影 响而没法准确预报, 但具体的原因目前尚未进行研究。有趣的是, 参考各个关键区的贡献, 福克斯湾虽然未入选最终预报因子, 但通过分析福克斯湾的变化曲线发现, 在 1991 年福克斯湾海冰为一个最高值, 这也许也与 Pinatubo 火山的喷发有关, 若在预报方程中加上福克斯湾作为附加预报因子, 则能较好的预报出 1991 年西北太平洋秋季热带气旋的 ACE 最高值。接下来, 进行了交叉检验。交叉检验是为了检测预报方程在年代际变化中的稳定性, 是将预报时间序列中的任意连续三年抽出, 用其余年份来建立预报方程预报这三年, 得到的预报结果称为交叉检验预报。预报方程的交叉检验预报效果是由交叉检验得到的时间序列和原时间序列做相关得到的。最后得到的交叉检验预报效果为 0.68。交叉检验预报曲线和预报方程预报曲线的相关性达到了 0.87, 证明在年代际变化中, 预报因子和预报效果稳定。

5 结论

1) 秋季 ACE 指数没有一致的线性变化趋势, 但

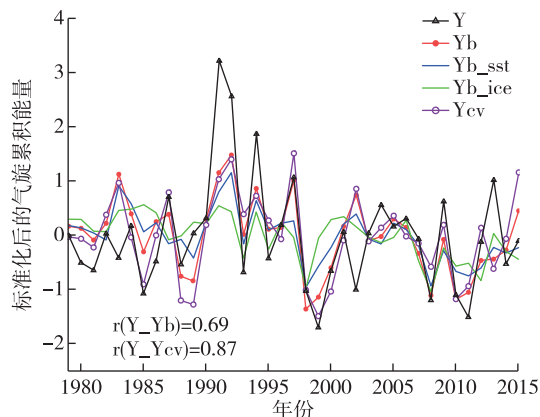


图 7 ACE 指数逐步回归预报效果(黑线为原始 ACE 曲线, 红色实线为预报方程计算得出的 ACE 曲线, 蓝色曲线是仅利用海表面温度作为预报因子建立预报方程得到的预报曲线, 绿色曲线是仅利用海冰作为预报因子建立方程得到的预报曲线, 紫色曲线是交叉检验预报曲线)

Fig.7 Forecast skill scores of ACE index regression (the black line is the original ACE curve, the red line is the ACE curve calculated by the prediction equation, the blue curve is calculated by the prediction equation using SST as the only predictor, the green curve is calculated by the prediction equation using the sea ice as the only predictor, the purple curve is by cross-validation prediction)

年际、年代际变化显著, 最大和最小值分别出现在 1991 年和 1999 年, 在厄尔尼诺发展年的秋季西北太平洋热带气旋强度一般较强, 而在拉尼娜衰减年的秋季热带气旋强度较弱。ACE 指数呈年代际振荡, 1979—2015 年间呈现两个波峰, 一个在 1991 年前后, 另一个在 2004 年前后, 波谷在 2000 年和 2010 年前后, 且近几年有略微增强的趋势。

2) 秋季西北太平洋 ACE 指数变化受来自北极海冰激发中纬度异常波列强迫和厄尔尼诺海温分布的影响。由于海冰密集度在波弗特海的异常增多, 影响了北冰洋对北大西洋的冰输出量, 使得夏季出现北半球环球遥相关异常波列, 波列正压下传, 使得夏秋季西北太平洋副热带高压东退北移。副高活动的变化影响了局地的环流, 配合海温呈厄尔尼诺态分布影响了沃克环流的变化, 热带气旋生成源地垂直风切变负值区域偏东和涡度显著增大使得热带气旋发展强盛。

3) 利用海冰和海温对秋季 ACE 指数进行预报, 预报效果为 0.69。如果单独使用海温或海冰作为唯一要素来预报, 预报效果将大大降低, 单独使用海温预报效果为 0.56, 单独使用海冰要素的预报效

果为 0.49。因此同时选取海温和海冰两个要素场能增强预报效果。

参考文献:

- [1] 黄菲, 许士斌. 西北太平洋超强台风活动特征及其与 ENSO 的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 883-888.
- [2] 炎利军, 黄先香, 于玉斌, 等. 近 58 年西北太平洋热带气旋频数的气候变化特征[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(增刊 I): 63-64, 77.
- [3] Chan J C L. Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon[J]. Mon Wea Rev, 1985, 113(4): 599-606.
- [4] Chan J C L. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events[J]. J Climate, 2000, 13(16): 2960-2972.
- [5] 罗哲贤. 热带气旋对副热带高压短期时间尺度变化的影响[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 549-559.
- [6] Zhan, R, Wang Y, Wu C-C. Impact of SSTa in the East Indian Ocean on the frequency of Northwest Pacific tropical cyclones: A regional atmospheric model study[J]. J Climate, 2011, 24(23): 6227-6242.
- [7] Du Y, Yang L, Xie S-P. Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Nino[J]. J Climate, 2011, 24(1): 315-322.
- [8] Fan K. North Pacific sea ice cover, a predictor for the Western North Pacific typhoon frequency? [J]. Sci Chin Ser D: Earth Sci, 2007, 50(8): 1251-1257.
- [9] Lander M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO [J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(4): 636-651.
- [10] Camargo S J, Emanuel K A, Sobel A H. Sobel. Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis [J]. J Climate, 2007, 20(19): 4819-4834.
- [11] Zhou B T, Cui X, Zhao P. Relationship between the Asian-Pacific Oscillation and the tropical cyclone frequency in the western North Pacific [J]. Sci Chin Ser D: Earth Sci, 2008, 51(3): 380-385.
- [12] Bell G D, Halpert M S, Schnell R C, et al. Climate assessment for 1999 [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81(6): S1-S50.
- [13] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. Nature, 2005, 436(7051): 686-688.
- [14] Kim H-M, Lee M-I, Webster P J, et al. A physical basis for the probabilistic prediction of the accumulated tropical cyclone kinetic energy in the western North Pacific [J]. J Climate, 2013, 26(20): 7981-7991.
- [15] Lea A, Saunders M. Seasonal prediction of total wind energy for tropical storm activity in the Atlantic and North West Pacific [C] // EGS-AGU-EUG Joint Assembly. Nice, France: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003: 853-856.
- [16] Klotzbach P J. Prediction of seasonal Atlantic Basin accumulated cyclone energy from 1 July [J]. Wea Forecasting, 2014, 29(1): 115-121.
- [17] Zhan R, Wang Y. CFSv2-based statistical prediction for seasonal accumulated cyclone energy (ACE) over the western North Pacific [J]. J Climate, 2016, 29(2): 525-541.
- [18] Wang B, Xiang B, Lee J-Y. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions [J]. PNAS, 2013, 110(8): 2718-2722.
- [19] Overland J E, Dethloff K, Francis J A, et al. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic [J]. Nature Clim Change, 2016, 6(11): 992-999.
- [20] Wang B, Liu J, Kim H-J, et al. Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Nino/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation [J]. PNAS, 2013, 110(14): 5347-5352.
- [21] 王功录. 西北太平洋热带气旋累积能量(ACE)时空特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [22] Ding Q, Wang B. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. J Climate, 2005, 18(17): 3483-3505.
- [23] Ding Q, Wang B, Wallace J M, et al. Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability [J]. J Climate, 2011, 24(7): 1878-1896.
- [24] Yang Y, Huang F, Wang H. Dominant modes of geopotential height in the northern hemisphere in summer on inter-decadal timescales [J]. Chin J Oceanol Limnol, 2013, 31(5): 1120-1128.