

基于CCMP的西北太平洋海面风场特征分析

金铸钰¹, 刘凯^{1,2}, 郭安博宇¹, 宋晓姜¹

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 利用 1988—2018 年 CCMP 10 m 风场资料, 对西北太平洋海表风场的气候态特征、线性变化趋势以及 6 级及以上风力的频率分布特征进行分析。结果表明: 平均风速随季节变化显著, 夏季风速偏小, 冬季风速整体较大。海表风速的线性变化趋势同样呈现出较强的季节性差异, 其中东海南部、台湾海峡、南海东北部以及巴士海峡海域季节平均风速在秋冬两季表现出相反的变化趋势, 这可能与东亚大槽的强度变化以及累积气旋能量的年际变化有关。西北太平洋不同海域大风频率分布特征季节差异性显著, 30°N 以北的北太平洋海域除夏季外, 其他 3 个季节大风过程频发, 南海东北部海域、台湾海峡以及巴士海峡海域大风过程主要集中在秋、冬两季; 南海中西部海域大风过程主要集中在夏、冬两季, 夏季大风过程以西南风为主, 冬季以东北风为主。

关键词: 西北太平洋; 海面风场; 特征分析; 大风过程

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)02-0020-14

1 引言

西北太平洋是指太平洋的西北部, 西临亚洲, 经马六甲海峡与印度洋相连, 北经白令海峡直通北冰洋。黑潮、北太平洋暖流和千岛寒流等洋流流经西北太平洋, 复杂的洋流系统和特殊的地理环境造成西北太平洋海区各类天气系统活动频繁且多变^[1], 其作为热带气旋最活跃的海域之一^[2], 海上大风天气过程频发。随着经济全球化进一步发展, 海上国际贸易往来越来越多, 海上大风过程常常给航运交通带来严重的安全隐患, 造成巨大的经济损失^[3]。西北太平洋潜藏着丰富的风能资源^[4], 对风能资源科学合理的利用可以缓解不可再生能源的消耗, 减少环境污染。因此, 了解西北太平洋海面风场的时空分布特征不仅对海洋防灾减灾以及航海安全保障有重要意义, 还可为风能资源的开发和利用提供参考。

国内外众多专家和学者对西北太平洋海面风

包括我国沿海年平均、季节平均和极值风速的分布特征以及线性变化趋势等方面做了大量的研究^[5-14]。研究发现, 我国沿海海域以及西北太平洋季风区(5°~22.5°N, 105°~160°E)是典型的季风气候^[5], 西北太平洋海面风场具有明显的季节和月变化特征: 夏季主要盛行西南风, 风向多变, 整体平均风速最低, 但仍存在南海大风区, 季节平均风速在 7 m/s; 冬季盛行东北风, 冬季风速偏高。西北太平洋 6 级以上大风频发区域位于南海、台湾海峡和日本岛以东海域, 并且存在显著的季节差异, 冬季发生概率高于其他 3 个季节^[11]。极值风速也有类似分布特征^[12], 西北太平洋海域极值风速的大值区主要位于日本以洋面, 次大值区位于台湾以东、南海北部和渤海海域, 近海的极值风速明显小于大洋。潘静等^[13]利用 1958—2001 年的 ERA-40 海面风场数据对西北太平洋年平均和季节海面风场趋势进行了分析, 发现第一岛链以外的大部分海域呈逐年增加的趋势, 但不同阶段呈现不同的变率, 1958—1974 年

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-05-11。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407001)。

作者简介: 金铸钰(1995-), 男, 硕士在读, 主要从事风场订正工作。E-mail: jzy199510@163.com

通讯作者: 刘凯(1990-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事短期气象预报工作。E-mail: 240275064@qq.com

期间,海表风速的递增趋势较明显,1975—2001年期间,线性变化趋势较为平缓,尤其在1976—1983年期间线性趋势并不明显。

虽然针对西北太平洋风场变化特征的研究成果较多,但是对其不同海域大风过程分布特征和线性趋势变化成因方面的研究相对较少。在以往的研究中,风场数据一般空间分辨率较低或时间序列较短,风场气候态统计特征的稳定性较差。本文将利用偏差较小、分辨率高、适用性强且时间段较长的CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform) 10 m风场再分析资料^[15-17],对西北太平洋风场的气候态特征、大风过程特征和线性趋势变化进行详细梳理,简要分析西北太平洋风场趋势变化和季节差异的可能成因,为详细了解西北太平洋海面风场的分布特征提供参考依据。

2 数据和方法

2.1 数据

本文选用的风场数据为CCMP海面风场资料^[18]。该资料是由美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的物理海洋学分布式存档中心(Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, PO DAAC)提供,以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)的再分析和业务资料为背景场,通过变分同化法融合了SSM/I、Quik SCAT、ADEO-II、AMSR-E、Wind SAT、ASCAT和TRMM TMI等20多种卫星探测资料以及部分船舶和浮标观测资料,是一种通过对卫星微波遥感和仪器观测的海面风数据进行交叉校准和同化得到的合成风场资料。数据要素为10 m的 u 和 v 风场,空间范围为 $78.375^{\circ}\text{S}\sim 78.375^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为6 h,数据下载地址:<http://data.remss.com/>。逐日海平面气压和500 hPa位势高度数据采用ECMWF第五代再分析数据集(ERA-5)^[19],空间范围为 $90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,数据下载地址:<https://cds.climate.copernicus.eu/>。热带气旋资料取自中国台风网(网址:<http://www.typhoon.gov.cn>)的CMA-STI热带气旋最佳路径数

据集,内容包含时间、强度标记、经纬度、近中心最大风速和中心气压等因素。本文采用的所有数据集的时间段均为1988年1月—2018年12月。

2.2 方法

本文利用1988年1月—2018年12月10 m海面风的逐日数据,对西北太平洋($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)年平均海面风场以及季节平均(3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月—次年2月为冬季)的风场特征进行分析。通过计算平均风速和风向来描述平均风场特征^[20],采用气候倾向估计方法统计研究区域内风速的变化趋势^[21],并利用频数统计法统计了西北太平洋4个季节6级(10.8 m/s)及以上风力出现的频率。

平均风速、风向公式:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \quad (2)$$

$$D = \arctan\left(\frac{\bar{U}}{\bar{V}}\right) \quad (3)$$

式中, U_i 与 V_i 分别表示东西和南北方向的风速; n 为时间序列; \bar{U} 与 \bar{V} 分别表示东西和南北方向的平均风速; S 表示平均合成风速; D 表示平均风向。当 $U > 0, V > 0$ 时, D 不变;当 $U < 0, V < 0$ 或者 $U > 0, V < 0$ 时, $D = D + 180^{\circ}$;当 $U < 0, V > 0$ 时, $D = D + 360^{\circ}$;当 $U = 0, V > 0$ 时, $D = 0^{\circ}$;当 $U = 0, V < 0$ 时, $D = 180^{\circ}$;当 $U > 0, V = 0$ 时, $D = 90^{\circ}$;当 $U < 0, V = 0$ 时, $D = 270^{\circ}$ 。

气候倾向率公式:

$$x_t = a_0 + a_1 t \quad (4)$$

$$\frac{dx_t}{dt} = a_1 \quad (5)$$

式中,气候要素的变化趋势用一次线性方程表示, x_t 表示 t 时刻风速值, $t=1, 2, 3 \dots n(a)$, a_0 表示截断常数, a_1 表示倾斜系数, $a_1 \times 10$ 表示气候倾向率^[22],单位为某气象要素/10 a。

频数统计计算方法:

$$\alpha = \frac{n_{s \geq 10.8}}{n} \quad (6)$$

式中, α 表示6级及以上风力的出现频率, $n_{s \geq 10.8}$ 表示风速 ≥ 10.8 m/s发生的次数, n 表示统计总次数。

3 西北太平洋风场的年分布特征

3.1 风速与风向的年平均分布特征

图1为1988—2018年西北太平洋海平面气压和10 m风场的年平均分布特征,西北太平洋的环流形势表现为北低南高,低压中心和高压中心的位置分别为阿留申低压和海上副热带高压(以下称“副高”)的平均位置。对应风场的分布特征,5°~20°N的太平洋洋面上为东北信风带,信风的大值中心位于赤道中太平洋;30°~50°N的北太平洋为北半球中纬度海上西风带,西风的大值中心位于北太平洋中部;年平均风速的另一大值中心在吕宋海峡、台湾海峡以及南海东北部海域,由于狭管效应,平均风速常年较中国近海其他海域偏大。

3.2 海表风速的逐年变化趋势

从西北太平洋年平均风速的变化趋势可以看出(见图2),除北部海域风速呈弱的递减趋势外,中国近海的海面风速大体呈线性增加的趋势,尤其是南海东北部和台湾海峡具有显著的线性增强趋势,大值中心可达0.4 m/(s·10 a)。日本海东北部

和本州岛东部海域也呈线性递增趋势,最强可达0.4 m/(s·10 a)。另一风速递增较明显的海域是赤道中太平洋的无风带海域(0°~10°N,160°~170°E),中心强度可达0.5 m/(s·10 a)。北太平洋中部的西风带(30°~40°N,150°~180°E)海域风速递减趋势较为明显,以-0.1~-0.4 m/(s·10 a)的速度递减。

3.3 大风发生频率的年分布特征

西北太平洋多年平均风场反映了海面风速和风向的一般特征,6级及以上风力出现频率的分布特征可提供极端和灾害性天气过程高发海区的地理分布情况,为气候航线的选择和制定提供更多的参考依据。低纬海域出现6级及以上风力的频率几乎为0(见图3),但这一海域年平均风速相对较大,季节变化差异较小,风向稳定(见图1)。大风频率由低纬到高纬逐渐增加,频率较高的海域主要集中在30°N以北的北太平洋中高纬度海域,这一分布特征主要与该海域海上温带气旋活跃造成的大风过程偏多有关^[23-24];另一可能原因为该海域处于海洋锋区,海温的变化会对大气稳定度产生影响^[25-26]。大陆边缘海域也是出现6级及以上风力频率较高的海域,鄂霍次克海、日本海、东海、台湾海峡、巴士海

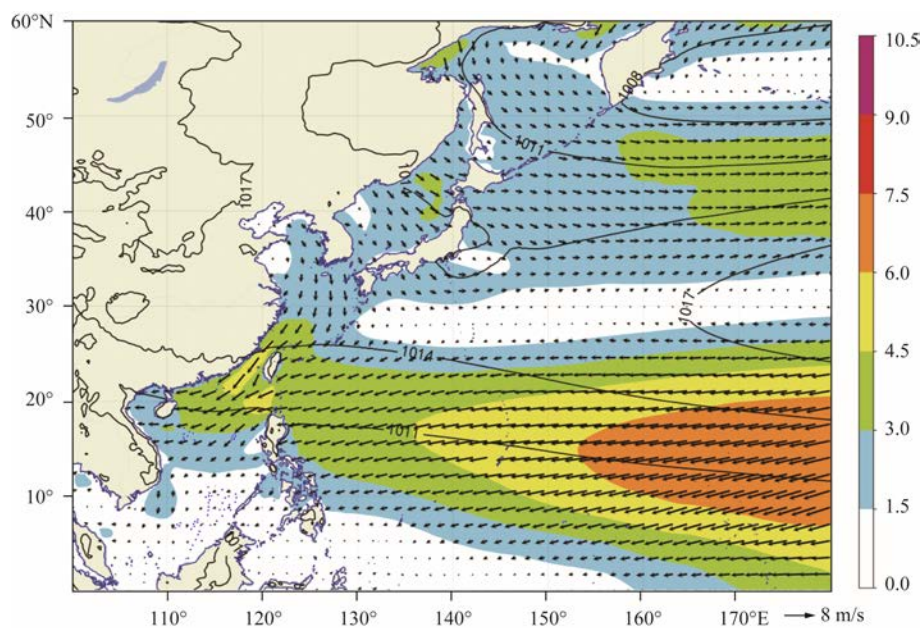


图1 1988—2018年西北太平洋风场和气压场年平均分布特征(填色图:风速/(m/s),等值线:海平面气压/hPa)

Fig.1 Distribution characteristics of annual average wind field and pressure field in the Northwest Pacific from 1988 to 2018 (color map: wind speed/(m/s), isoline: sea level pressure/hPa)

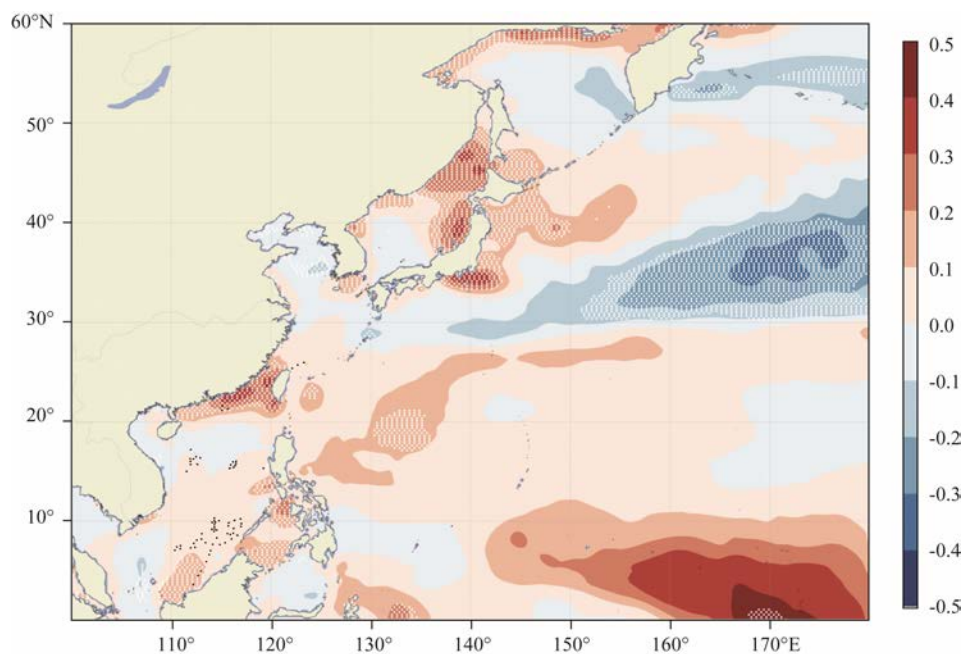


图2 1988—2018年西北太平洋海域海面风逐年线性趋势分布特征(白色圆点表示通过90%的置信度检验区域,单位: $\text{m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$)

Fig.2 Annual linear trend distribution characteristics of sea surface wind in the Northwest Pacific Ocean from 1988 to 2018 (The white dot area represents the area passing the 90% confidence test, unit: $\text{m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$)

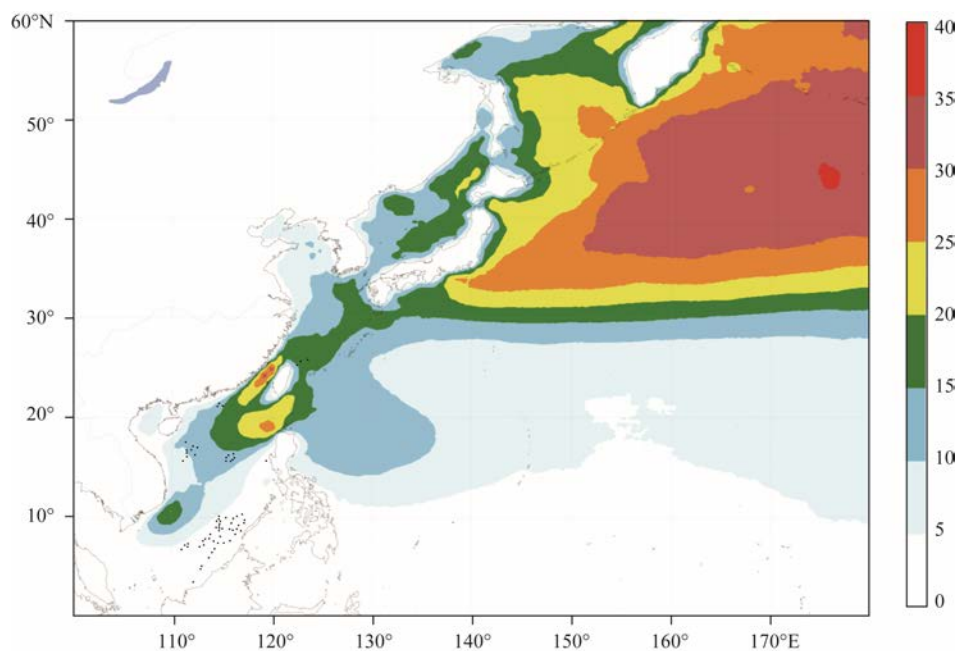


图3 1988—2018年西北太平洋海面多年平均6级以上大风发生频率分布(单位:%)

Fig.3 Frequency distribution of multi-year average gale above level 6 in the Northwest Pacific from 1988 to 2018(unit: %)

峡和南海东北部以及中西部海域发生的频率都在15%以上,尤其是台湾海峡和巴士海峡,达到30%

以上。台湾海峡、巴士海峡和南海东北部海域是较为特殊的海域,年平均风速较大且大风过程频发,

并且具有显著的风速线性增强趋势。

4 西北太平洋风场的季节分布特征

4.1 风速与风向的季节平均分布特征

西北太平洋海域涵盖了全球主要的季风区,即东亚季风区和西北太平洋季风区^[2],西北太平洋风场的变化特征具有显著的季节变化。图4为西北太平洋海面风场的季节分布特征,春季(见图4a)属于

西北太平洋季风风场的过渡季节,海面风速与风向的分布特征与多年平均的分布特征类似(见图1);副高和阿留申低压春季的平均位置与年平均的位置十分接近,副高南北两侧出现风速大值区,北侧平均风速最大接近4.5 m/s,南侧可达9 m/s。我国南海北部、台湾海峡和巴士海峡附近海域盛行东北风,平均风速在3~4.5 m/s左右。夏季副高不断增强,相较春季,副高西伸北抬控制整个西北太平洋洋面,洋面上风速较小(见图4b)。东亚沿岸海域明

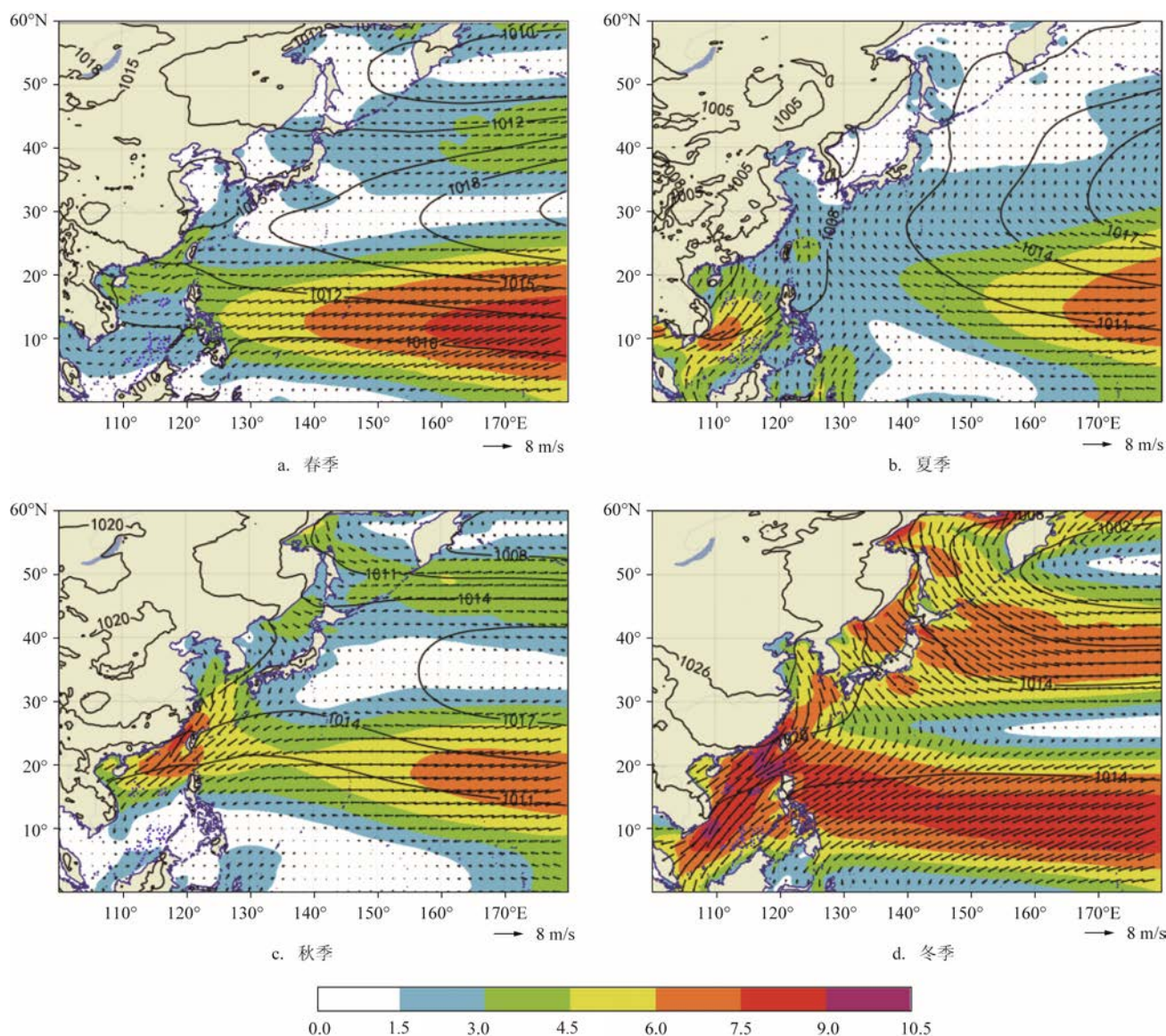


图4 1988—2018年西北太平洋风场季节平均分布(填色图:风速/(m/s),等值线:海平面气压/hPa)

Fig.4 Seasonal average distribution of wind fields in the Northwest Pacific from 1988 to 2018 (color map: wind speed/(m/s), isoline: sea level pressure/hPa)

显受南亚夏季风和东亚夏季风的影响,在中南半岛南部和南海中西部海域出现西南风极大值,平均风速可达7.5 m/s左右。秋季同样为过渡季节,但是海上平均风速分布特征较春季变化更大,海上的副高逐渐东退南落,副高中心位置较春季略偏北,副高南侧的信风强度比春季弱,但秋季陆地冷高压逐渐建立,是冷空气影响逐渐增强的季节,台湾海峡、巴士海峡以及南海东北部海域的东北风风速大于春季。冬季西北太平洋主要受阿留申低压控制,平均风速最大,而陆地上西伯利亚冷高压达到最强,东亚冬季风爆发。鄂霍次克海东部和白令海西北部海域出现西北风大值区,平均风速达到7.5 m/s以上。台湾海峡、巴士海峡和南海中西部海域受东亚冬季风的影响,风速达到全年最强,最大值为10.5 m/s。东北信风区域($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)的风速也在冬季达到最强,平均风速在7.5 m/s以上。

4.2 海表风速的逐季节变化趋势

在分析西北太平洋风场季节分布特征的基础上,采用气候倾向估计法,进一步分析西北太平洋风场季节平均风速的线性变化趋势。采用各季节的中间月份作为代表月^[6],即4月代表春季,7月代表夏季,10月代表秋季,1月代表冬季,这种单月与季节平均的线性趋势分布特征十分相似(图略),但

是线性趋势的季节差异更为明显。如图5所示,海表风速的变化趋势呈现出较大的季节性差异。

春季,我国渤海、黄海以及东海海域风速主要呈线性递减趋势,最大值中心为渤海海峡附近,南海东北部、巴士海峡海域和北太平洋洋面海表风速主要呈显著递增的趋势,大值中心主要位于 40°N 以北的太平洋海域,最大强度可达 $0.9\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$ 。太平洋西风带海域(30°N)存在一个弱的线性递减中心($-0.1\sim -0.3\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$)。西北太平洋平均风速的变化特征与年平均分布相似,其线性变化趋势特征也与年平均变化趋势相似。

与春季相比,夏季西北太平洋海面风的线性变化趋势在多个海域出现相反特征。在我国北部海区出现弱的线性增强趋势($0.1\sim 0.3\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$),而原本在 20°N 附近北太平洋中部出现的线性增强趋势在夏季表现为减弱趋势($-0.1\sim -0.5\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$)。太平洋西风带海域(30°N)风速线性减弱的趋势在夏季变得更为显著($-0.3\sim -0.5\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$)。

秋季,西北太平洋海表风速在高纬度海域(40°N 以北)主要呈递增趋势,大值中心位于鄂霍次克海中西部、白令海西部和北太平洋中部海域,递增速度最大值可达 $0.9\text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$ 。我国南海中北部海域、菲律宾以东的太平洋海域以及以(30°N , 170°E)为中心的东太平洋海域主要呈线性递减趋势($-0.3\sim$

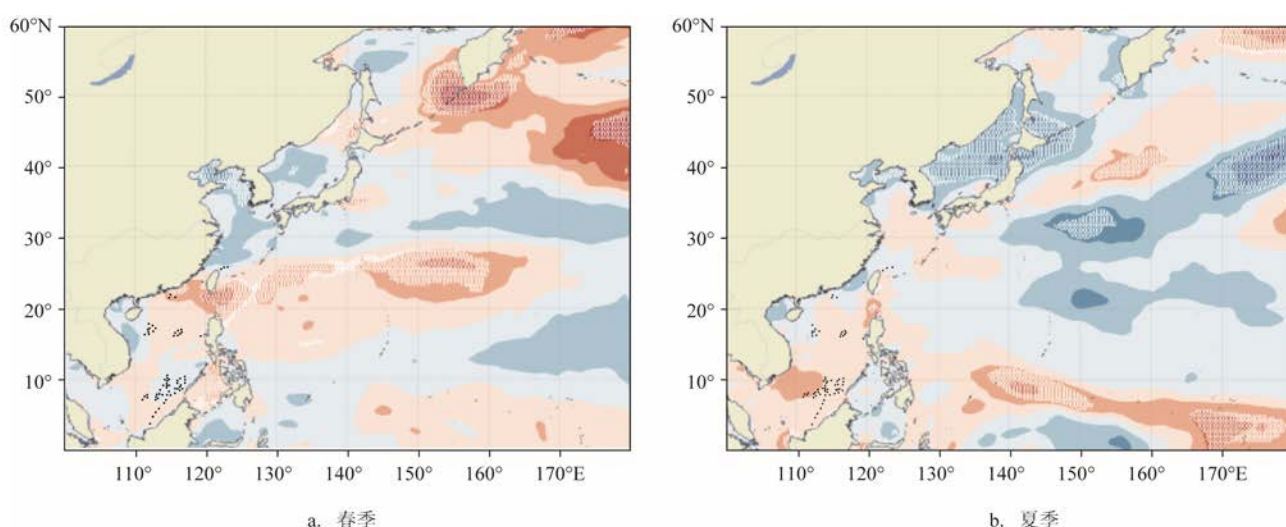


图5 1988—2018年西北太平洋海面逐季节风速线性趋势(白色圆点表示通过了90%的置信度检验,单位: $\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$)

Fig.5 Linear trend of seasonal sea surface wind speed in the Northwest Pacific from 1988 to 2018 (The white dot area represents the area passing the 90% confidence test, unit: $\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{ a})$)

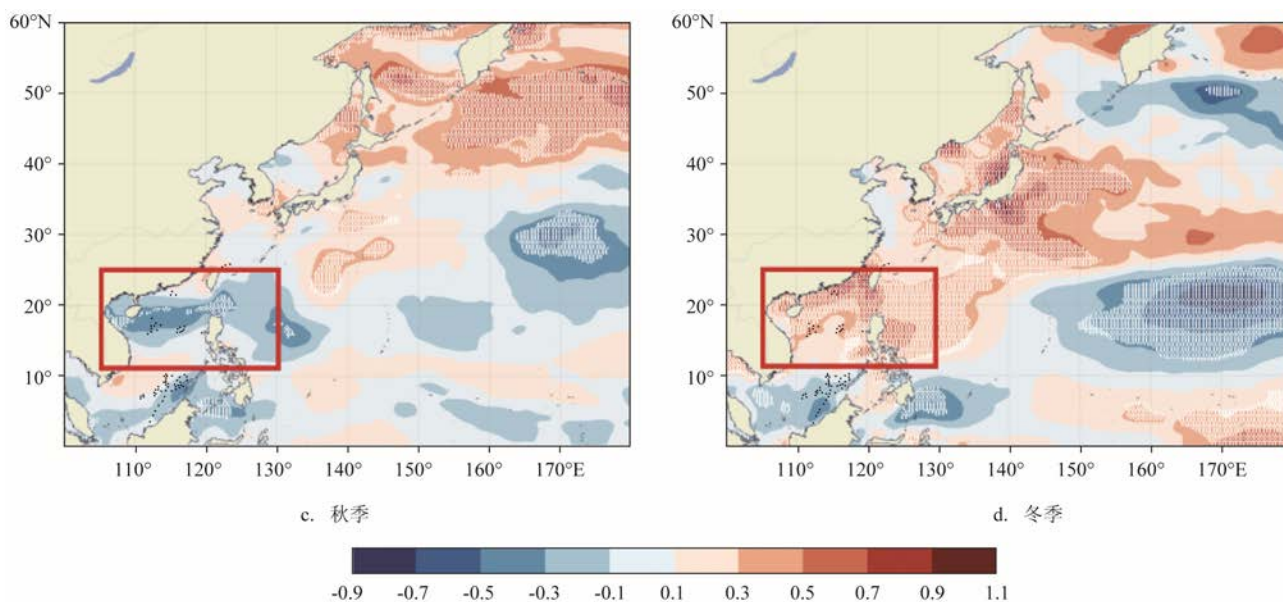


图5 (续)

Fig.5 (Continued)

-0.5 m/(s·10 a))。

冬季,整个西北太平洋海域海面风速线性变化趋势最为显著。受冷空气影响的海域包括我国南海北部海域、台湾海峡、巴士海峡、日本海附近海域以及鄂霍次克海以东的北太平洋海域,海面风呈显著的递增趋势(0.3~1.1 m/(s·10 a))。递减趋势显著的海域主要集中在东北信风带海域(15°~25°N, 150°~180°E),递减速度最大可达-0.9 m/(s·10 a)。

对比图5c和图5d可以发现,西北太平洋秋冬两季风速在大部分海域呈反相位变化趋势,尤其是受季风影响较大的南海北部、东海南部和巴士海峡海域(图中红框标记海域,10°~26°N,105°~130°E,下称“南海北部区域”)。该区域海面风速秋季呈递减趋势,冬季呈递增趋势。受欧亚大陆冷空气影响是这一区域秋冬两季平均风速线性趋势变化的主要因子之一,而秋季该区域还受该海域内热带气旋的影响,后文将针对能够表示热带气旋强度的指数——累积气旋能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE)^[27]作出分析。相关研究指出^[28-32],东亚大槽强度与位置的变化与冷空气的强度和路径存在密切联系,东亚大槽的变深变强有利于冷空气南下,反之则会阻碍。为进一步分析该海域秋冬两季风速线性趋势相反变化的可能成因,对秋冬两季500 hPa

位势高度的线性趋势进行分析(见图6),并按照文献[31]所定义的东亚大槽强度指数(I_{EAT})计算其变化趋势(见图7)。结果发现,在东亚大槽的关键区域(25°~50°N, 110°~150°E),秋季槽底存在显著线性变浅趋势,对应的 I_{EAT} 强度也有减弱趋势,秋季冷空气南下受阻趋势升高,影响到低纬海域,表现为南海北部区域风速有减小趋势;而冬季东亚大槽有加深趋势,其强度指数同样有增加趋势,东亚上下游的阻塞形式稳定少变,欧亚太平洋地区经向环流发展,有利于冷空气向南输送并影响到低纬海域,对应冬季南海北部海域风速的显著增加趋势。

如前文所述,秋季南海北部区域平均风速线性趋势除受冷空气影响外,热带气旋个数与强度也对海面风速的变化存在一定影响。如图8所示,我们统计了秋季ACE的年际变化趋势,结果表明南海北部海域秋季ACE呈逐年降低趋势,大值风速的出现次数与强度整体呈降低趋势。秋季南海北部海域的风速出现线性递减,除由于东亚大槽强度变弱,冷空气向南发展受阻外,也可能与秋季ACE在该海域的年际变化有关。

4.3 西北太平洋大风发生频率的季节分布特征

西北太平洋海面风场的季节特征差异明显,影

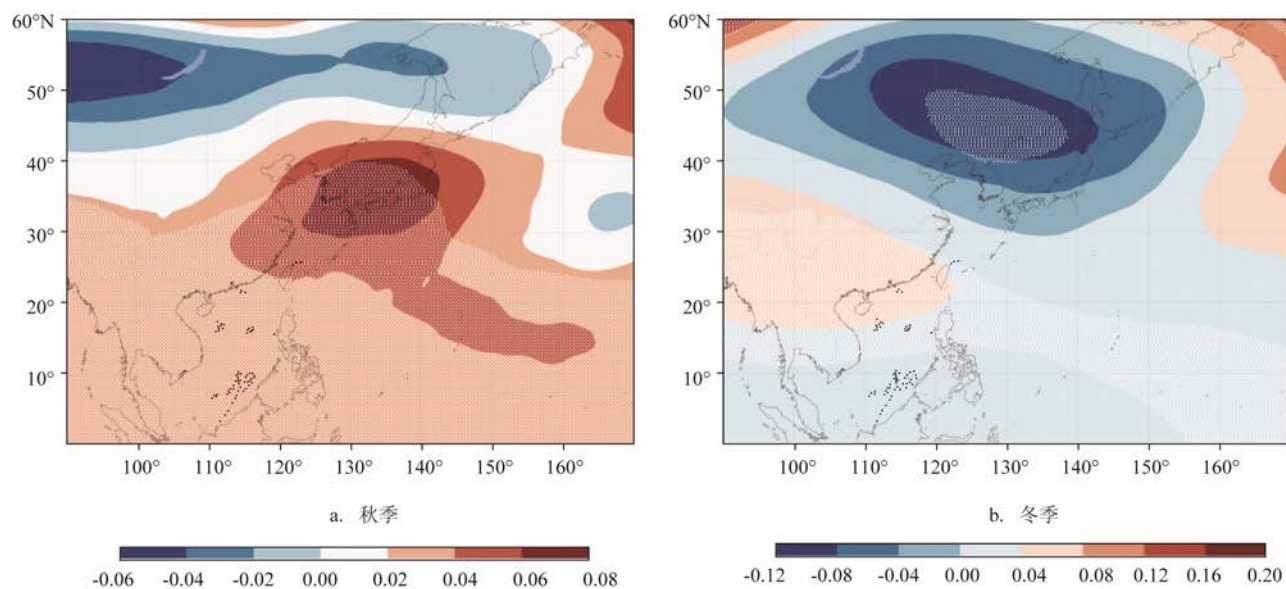


图6 1988—2018年逐季节 500 hPa 位势高度线性趋势场 (白色圆点区域表示通过了 90% 的置信度检验,单位: $\text{m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$)
 Fig.6 Linear trend field of 500 hPa geopotential height from 1988 to 2018 (The white dot area represents the area passing the 90% confidence test, unit: $\text{m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$)

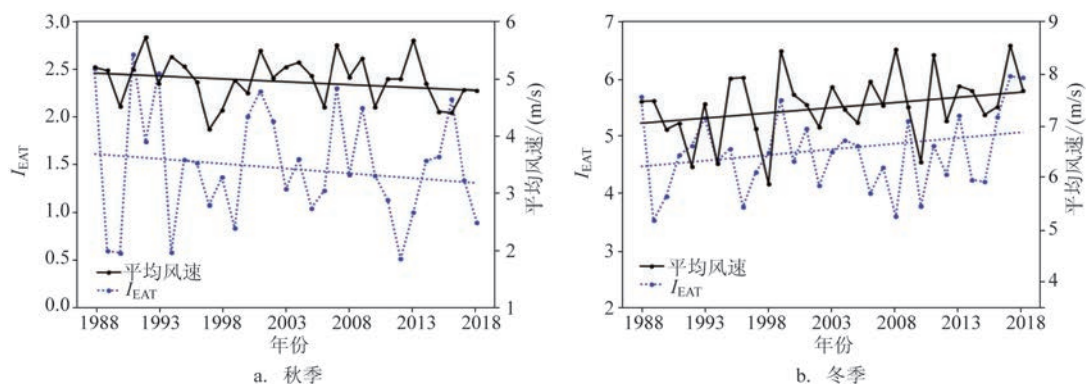


图7 1988—2018年南海北部区域内平均风速与 I_{EAT} 的年际变化
 Fig.7 Interannual variation of average wind speed and I_{EAT} in the northern South China Sea from 1988 to 2018

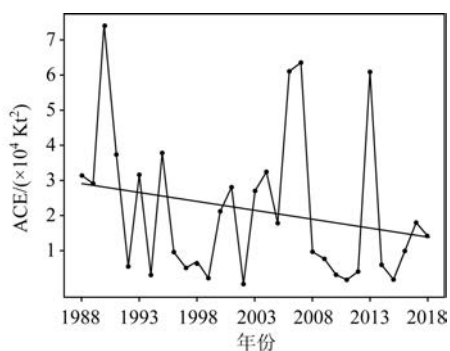


图8 1988—2018年秋季南海北部区域内 ACE 的年际变化
 Fig.8 Interannual variation of ACE in the northern South China Sea from 1988 to 2018

响海面大风过程的环流系统因季节而异,西北太平洋出现 6 级及以上风力(本节简称“大风”)的频率同样具有显著的季节差异(见图 9)。我们根据其空间分布特征,在春、秋两季划分了 3 个关键区(区域一: $17.5^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 127^{\circ} \text{E}$; 区域二: $30^{\circ} \sim 47.5^{\circ} \text{N}$, $121.5^{\circ} \sim 141.5^{\circ} \text{E}$; 区域三: $30^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $141.5^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$),夏、冬两季划分了 4 个关键区(区域 a: $8.5^{\circ} \sim 13.5^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 117.5^{\circ} \text{E}$; 区域 b: $13.5^{\circ} \sim 28.5^{\circ} \text{N}$, $111.5^{\circ} \sim 134^{\circ} \text{E}$; 区域 c: $28.5^{\circ} \sim 47.5^{\circ} \text{N}$, $121.5^{\circ} \sim 141.5^{\circ} \text{E}$; 区域 d: $28.5^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $141.5^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$),以此来分析大风频发海域的主导风向和风速特征。表 1 统计了各季节不同区域风场的最多风向和最多风

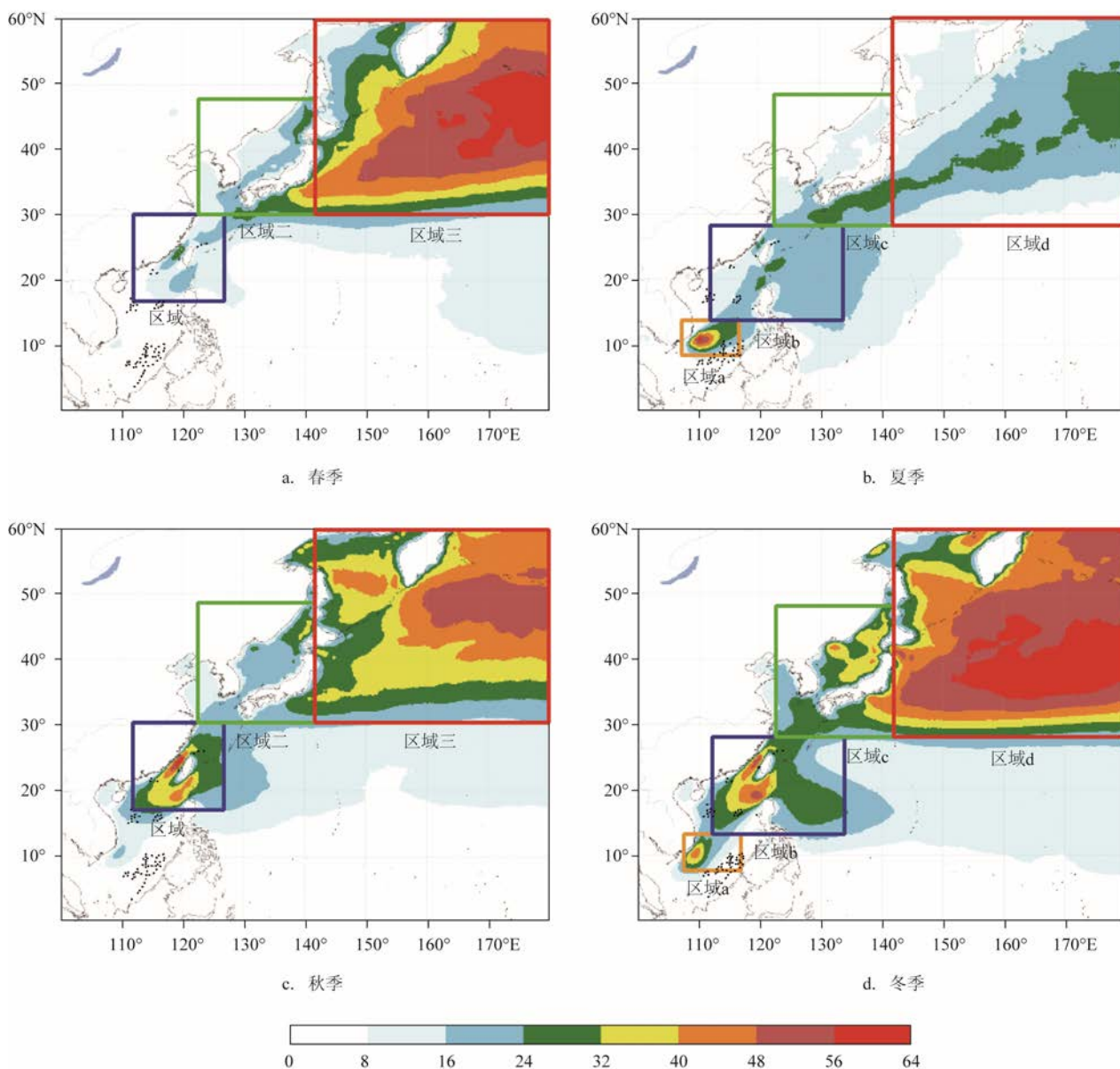


图9 1988—2018年西北太平洋海面季节平均6级以上大风发生频率分布(单位:%)

Fig.9 Frequency distribution of seasonal mean gales above level 6 over the Northwest Pacific Ocean from 1988 to 2018 (unit: %)

力等级,以及大风的风场信息。

图10为不同季节关键区域大风的风向和风速玫瑰图。通过分析发现,4个季节中冬季大风频率中心强度最强,发生海域最广。在 30°N 以北的北太平洋海域,春、秋、冬3个季节发生频率均较高,夏季也是除南海之外的另一个高发海域,但是4个季节平均风场的分布特征(见图4)显示,除冬季该海域存在一个风速较大值中心,其他季节平均风速均较小。说明该海域虽然大风频发,但是风向不固定。

春季大风过程主要分布在 30°N 以北的区域三,发生的频率可达64%(见图9a)。该区域大风过程风向多变,但主要以6~7级西北风为主(见图10c)。造成该区域大风过程的主要影响系统可能是海上温带气旋。区域三位于北半球中高纬度西风急流轴出口区的右侧,有利于出海气旋的爆发性增长^[33],个别强的温带气旋影响时可造成8~9级风(见图10c)。区域二大风过程主导风向也为西北风(见图10b),这可能与春季温带气旋东北向移动路径途径

表1 各季节不同区域的风场信息统计

Tab.1 Statistics of wind field information in different regions in each season

季节	区域	风场概况		大风 (≥6级)		
		最多风向	最多风力/级	最多风向	最多风向占比/%	大风发生频率/%
春季	区域一	NE	3	NE	37.8	4.8
	区域二	SW	3	NW	16.1	4.9
	区域三	WNW	4	WNW	13.4	17.0
夏季	区域a	SW	5	WSW	56.6	5.3
	区域b	SSW	3	SW	20.2	4.4
	区域c	SW	3	SW	11.4	2.3
	区域d	SW	3	SW	8.9	2.5
秋季	区域一	NE	5	NE	42.6	17.4
	区域二	NE	4	NW	14.3	8.1
	区域三	WNW	4	WNW	16.3	17.9
冬季	区域a	NE	5	NNE	63.2	15.8
	区域b	NE	5	NE	47.5	20.3
	区域c	NW	4	NW	27.8	18.3
	区域d	WNW	5	WNW	21.3	36.2

此区域有关^[34],但是大风风速和频率远小于区域三。30°N以南海域除区域一存在弱的频率大值中心外(以东北风6级为主),6级以上大风在低纬海域很少出现。

夏季西北太平洋大风出现频率迅速减小,但南亚夏季风爆发,以10°N,110°E为中心的南海中西部海域(区域a)大风频率增强,中心强度达56%以上(见图9b)。大风过程以6~7级西南风为主(见图10d),主要受热带气旋和西南季风的影响^[35-36],但也有分析指出是长山山脉使得夏季纬向风和冬季经向风明显增大,进而产生大风区^[37]。自低纬10°N,110°E~高纬50°N,180°E海域(区域b—d),大风频率的大值区呈“西南—东北”走向,频率范围在16%~32%,区域b、区域c以及区域d海域的大风过程仍以西南风为主,但风向更为发散,风速以6级风为主。

秋季西北太平洋大风频率较夏季显著增加,北半球中高纬度海域逐渐受到冷空气的影响。高频区主要分布在30°~60°N,140°~180°E的北太平洋广阔海域(区域三),大风频率最高可达到56%(见

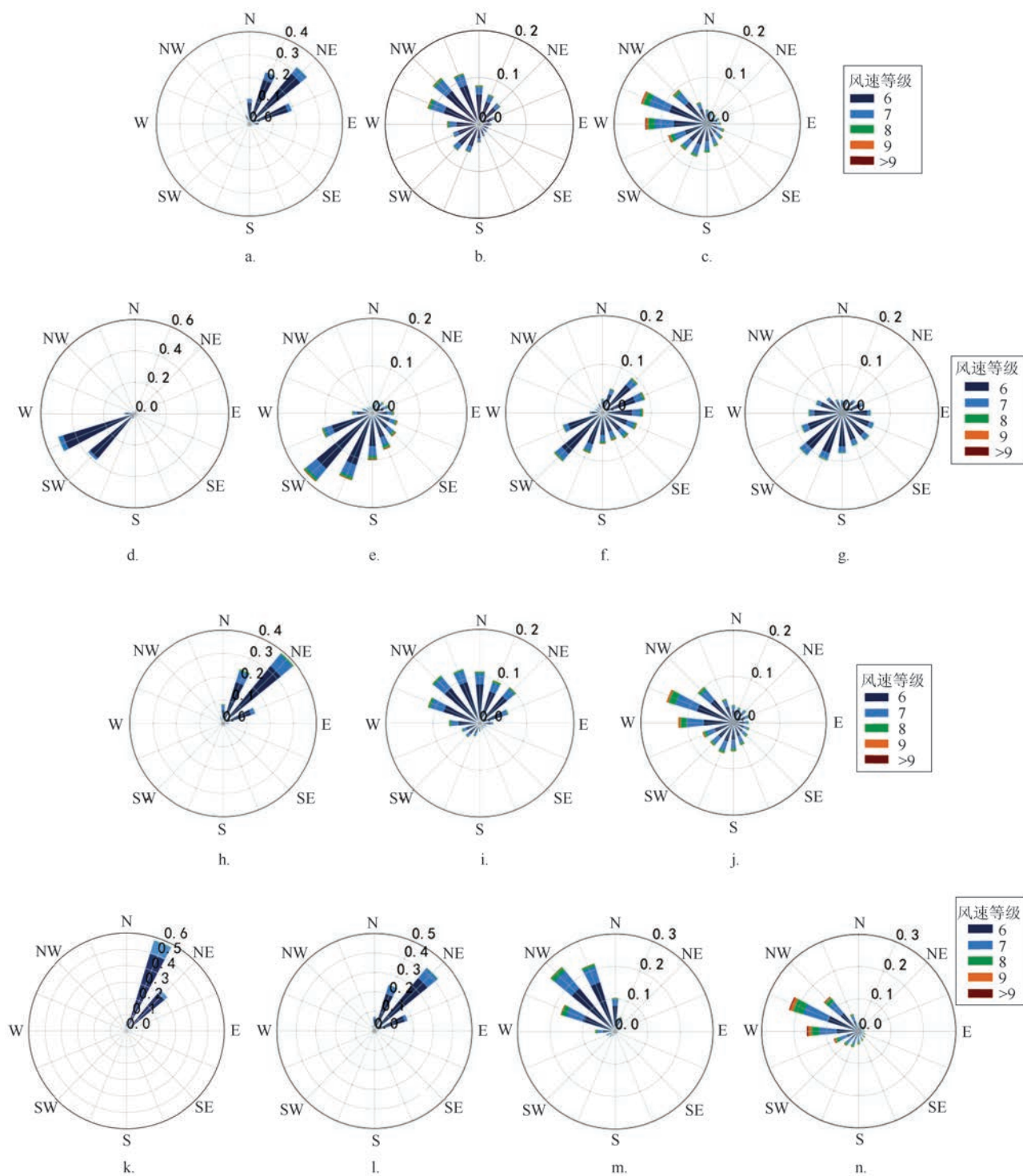
图9c),大风过程以6~8级西—西北风为主,最大风速可达9~10级(见图10j);区域二大风频率明显减弱(见图9c),大风过程风向相对发散,主要为西北风和东北风(见图10i);秋季区域一同样是大风高发海域,最强中心可达64%(见图9c),大风过程以6~7级东北风为主,最大风速达8~9级(见图10h)。

冬季西北太平洋大风频率显著增加,28.5°N以北的太平洋大部分海域发生频率在32%以上。尤其是区域d(见图9d),大风发生频率进一步增加(大值中心达64%),大风过程以7~8级西—西北风为主(见图10n),并且该区域8~10级风出现的频率是4个季节中最高的。区域c大风发生频率的季节分布差异较为显著,冬季发生频率明显高于其他3个季节(见图9),除我国渤海海外,该海域在冬季绝大部分海区的大风频率在24%以上(见图9d),大风过程以6~7级西北风为主,最大风速可达8级(见图10m)。区域b所覆盖的南海东北部海域、台湾海峡以及巴士海峡海域同样是冬季大风过程的高发海域,大风频率最高可达56%,大风过程以6~7级东北风为主(见图10l)。值得关注的是秋季区域一大风频率的大值区强于冬季区域b的大值区,其原因除了秋季受到冷空气影响外,西行的热带气旋同样对该海域产生重要影响,而冬季热带气旋对这一海域的影响概率较小。由于前文提到这一海域平均风速的线性变化趋势在秋冬两季存在明显差异,秋季平均风速表现为线性递减,而冬季表现为线性递增,因此我们也将进一步分析大风频率的线性趋势在这两个季节是否有同样相反的变化特征。区域a大风频率在冬季达到最强,最大在40%以上,主导风向为北—东北风,占比近60%,其次为东北风,风力以6~7级为主。

5 结论与讨论

本文利用1988—2018年CCMP 10 m风场数据,对西北太平洋年平均和季节平均的海面风场分布特征、风速线性变化趋势和6级及以上风力出现频率的季节特征进行了分析。结论如下:

(1)西北太平洋风场分布具有显著的季节差异,平均风速的线性变化趋势同样具有明显的季节差异,最突出的表现为秋季在东海南部、台湾海峡、



a~c代表春季区域一~区域三;d~g代表夏季区域a~区域d;h~j代表秋季区域一~区域三;k~n代表冬季区域a~区域d

图10 西北太平洋逐季节分区域风力风向的分布特征

Fig.10 Distribution characteristics of wind direction in the Northwest Pacific region by season

南海东北部以及巴士海峡海域平均风速具有显著的线性递减趋势,但是冬季该海域的平均风速表现

为线性递增趋势。造成这一现象的可能原因之一为秋季东亚大槽关键区有变浅变弱的趋势, I_{EAT} 有降

低的趋势,在冬季东亚大槽关键区有变深加强的趋势, I_{EAT} 有增加的趋势,导致秋季冷空气强度减弱,而冬季冷空气的影响加强且频繁,平均风速增加。另一重要原因为秋季ACE指数在该区域的线性变化趋势逐年递减,导致秋季大值风速出现的次数与强度整体有所降低,平均风速降低。

(2)我们对4个季节西北太平洋海域6级及以上风力的出现频率进行了统计,并通过划分关键区分析了4个季节不同海域6级及以上风力的主导风向和风力。冬(区域d)、春(区域三)两季频率大值中心强度可达64%,大风过程风向较分散,这与该海域的主要影响系统为温带气旋有关。夏季主导风向也与其他3个季节相反,大风过程以西南风和东南风为主,风力主要为6~7级。日本海和鄂霍次克海海域的6级及以上风力出现频率只在冬季较高,主要受冷空气影响,以西北风6~7级为主。南海东北部海域、台湾海峡以及巴士海峡海域在秋(区域一)、冬(区域b)两季频率均较高,并且秋季频率高于冬季。该海域两季的大风过程主导风向均为东北风,影响系统均以冷空气为主。秋季频率高于冬季可能与该海域在秋季热带气旋影响概率较大有关。南海中西部海域大风过程主要集中在夏(区域a)、冬(区域a)两季,表现出明显的季风分布特征。

我们采用了空间分辨率较高和时间序列较长的CCMP再分析数据对西北太平洋的风场特征进行分析,在后续的工作中应采用多套再分析数据对风速线性变化趋势及其可能的成因进行验证讨论和进一步分析。

参考文献:

- [1] 阎俊岳,陈乾金,张秀芝,等. 中国近海气候[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Yan J Y, Chen Q J, Zhang X Z, et al. Coastal climate of China[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [2] 赵海坤, 吴立广. 西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J]. 气象科学, 2015, 35(1): 108-118.
Zhao H K, Wu L G. Review on climate change of tropical cyclone in the Northwest Pacific[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(1): 108-118.
- [3] Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 163-173.
- [4] 郑崇伟, 潘静. 全球海域风能资源评估及等级区划[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 364-371.
Zheng C W, Pan J. Wind energy resources assessment in global ocean[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 364-371.
- [5] 丁一汇, 刘芸芸. 亚洲—太平洋季风区的遥相关研究[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 670-682.
Ding Y H, Liu Y Y. A study of the teleconnection in the Asian-Pacific monsoon region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(5): 670-682.
- [6] 徐秀枝, 诸裕良, 冯向波, 等. 北太平洋海浪场和风场特征分析[J]. 海洋工程, 2017, 35(1): 112-120.
Xu X Z, Zhu Y L, Feng X B, et al. Analysis of characteristics of the wind and wave fields in the North Pacific[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1): 112-120.
- [7] Gower J F R. Temperature, wind and wave climatologies, and trends from marine meteorological buoys in the Northeast Pacific[J]. Journal of Climate, 2002, 15(24): 3709-3718.
- [8] 徐蜜蜜, 徐海明. 我国近海大风分布特征及成因[J]. 热带气象学报, 2010, 26(6): 716-723.
Xu M M, Xu H M. The characteristic of strong wind distribution in the coastal area of China and its causes[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(6): 716-723.
- [9] 刘志宏, 郑崇伟, 庄卉, 等. 近22年西北太平洋海表风速变化趋势及空间分布特征研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 127-130.
Liu Z H, Zheng C W, Zhuang H, et al. Long-Term trend and special characteristics of sea surface Wind speed in the northwest Pacific ocean during the Last 22 Years[J]. Ocean Technology, 2011, 30(2): 127-130.
- [10] 王慧, 隋伟辉. 基于CCMP风场的中国近海18个海区海面大风季节变化特征分析[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 720-725.
Wang H, Sui W H. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China sea areas with CCMP wind field data[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(4): 720-725.
- [11] 詹思玑, 齐琳琳, 卢伟. 基于CCMP资料和现场观测资料的西北太平洋海面风场特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 10-20.
Zhan S Y, Qi L L, Lu W. Analysis of sea surface wind in Northwest Pacific based on CCMP satellite data[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(2): 10-20.
- [12] 郑崇伟. 基于CCMP风场的近22年中国海海面风场特征分析[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(3): 41-46.
Zheng C W. Sea surface wind field analysis in The China sea during the last 22 years with CCMP wind field[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(3): 41-46.
- [13] 潘静, 郑崇伟. 西北太平洋海域海表风速长期变化趋势研究[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 48-52.
Pan J, Zheng C W. Long-term trend analysis of sea surface wind speed in the Northwest Pacific Ocean[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 48-52.

- [14] 朱苗苗, 贾本凯, 郑崇伟, 等. 西北太平洋海表风速特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(4): 125-128.
Zhu M M, Jia B K, Zheng C W, et al. Characteristics of sea surface wind speed in the northwest pacific[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2013, 30(4): 125-128.
- [15] 韩玉康, 周林, 赵艳玲, 等. 3种海面风场资料在吕宋海峡的比较与评估[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 44-52.
Han Y K, Zhou L, Zhao Y L, et al. Evaluation of three sea surface wind data sets in Luzon Strait[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 44-52.
- [16] 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 等. 3种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 44-53.
Kuang F F, Zhang Y Q, Zhang J P, et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(5): 44-53.
- [17] 刘解明, 熊学军, 宫庆龙, 等. 4种表层风场资料在北半球海域的适用性评估[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 38-50.
Liu X M, Xiong X J, Gong Q L, et al. Applicability evaluation of four surface wind products in the northern hemisphere sea area[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 38-50.
- [18] Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(2): 157-174.
- [19] Hersbach H, Dee D. ERA-5 reanalysis is in production[R]. ECMWF Newsletter, 147, Reading: ECMWF, 2016.
- [20] 吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 风向的统计方法研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 83-89.
Lv M H, Yan J Y, Yao R T, et al. Study on the statistical method of wind direction[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 83-89.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 58.
Wei F Y. Modern climate diagnosis technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 58.
- [22] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
Shi N, Chen J Q, Tu Q P. 4-Phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4): 431-439.
- [23] 孙瑞鹏, 刁一娜. 1979—2017年北半球温带气旋活动时空特征统计分析[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(12): 12-21.
Sun R P, Diao Y N. Statistical analysis of spatial-temporal characteristics of extratropical cyclone activity in the northern hemisphere in 1979-2017[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(12): 12-21.
- [24] Wang X L, Swail V R, Zwiers F W. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR Reanalysis for 1958—2001[J]. Journal of Climate, 2006, 19(13): 3145-3166.
- [25] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报, 1998, 56(2): 119-211.
Zhang Q Y, Tao S Y. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, 56(2): 119-211.
- [26] 徐海明, 王琳玮, 何金海. 卫星资料揭示的春季黑潮海区海洋对大气的影响及其机制研究[J]. 科学通报, 2008, 53(4): 463-470.
Xu H M, Wang L W, He J H. The influence of ocean on atmosphere and its mechanism in kuroshio sea revealed by satellite data in spring[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(4): 463-470.
- [27] Bell G D, Halpert M S, Schnell R C, et al. Climate assessment for 1999[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6): 1328.
- [28] 孙柏民, 李崇银. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系[J]. 科学通报, 1997, 42(5): 500-504.
Sun B M, Li C Y. Relationship between disturbance of east Asian Trough and tropical convective activity in winter[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(5): 500-504.
- [29] Ding Y H, Krishnamurti T N. Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(10): 2428-2449.
- [30] 李峰, 矫梅燕, 丁一汇, 等. 北极区近30年环流的变化及对中国强冷事件的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 209-219.
Li F, Jiao M Y, Ding Y H, et al. Climate change of arctic atmospheric circulation in last 30 years and its effect on strong cold events in China[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 209-219.
- [31] 黄小梅, 管兆勇, 戴竹君, 等. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再分析[J]. 气象学报, 2013, 71(3): 416-428.
Huang X M, Guan Z Y, Dai Z J, et al. A further look at the interannual variations of East Asian trough intensity and their impacts on winter climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(3): 416-428.
- [32] 林雄军. 春季东亚大槽变异与南海夏季风爆发的联系[C]//第31届中国气象学会年会: S15 副热带气象及生态环境影响. 北京: 中国气象学会, 2014: 19.
Lin X J. Association between East Asian trough variation and South China Sea summer monsoon in spring[C]//Proceedings of the 31st Annual meeting of Chinese Meteorological Society: S15. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2014: 19.
- [33] 仪清菊, 丁一汇. 海洋温带气旋发生发展的研究[J]. 大气科学, 1989, 13(2): 238-246.
Yi Q J, Ding Y H. Recent studies of genesis and development of the marine extratropical cyclone[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1989, 13(2): 238-246.
- [34] 秦曾灏, 李永平, 黄立文. 中国近海和西太平洋温带气旋的气候学研究[J]. 海洋学报, 2002, 24(S1): 105-111.
Qin Z H, Li Y P, Huang L W. Climatology of the extratropical

- cyclones over the East China sea and the west Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(S1): 105-111.
- [35] 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 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*, 2013, 37(2): 364-382.
- Feng T, Huang R H, Chen G H, et al. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 364-382.
- [36] 黄菲, 李元妮. 南海夏季风爆发与西北太平洋热带气旋活动[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(8): 1-10.
- Huang F, Li Y N. Relationship between the South China Sea summer monsoon onset and the tropical cyclone activity in the Western North Pacific[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(8): 1-10.
- [37] 吕柯伟, 胡建宇, 杨小怡. 南海及邻近海域海面风场季节性变化的空间差异[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 41-47.
- Lü K W, Hu J Y, Yang X Y. Spatial patterns in seasonal variability of sea surface wind over the South China Sea and its adjacent ocean[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 41-47.

Characteristics analysis of the sea surface wind in the Northwest Pacific based on CCMP satellite data

JIN Zhuyu¹, LIU Kai^{1,2}, GUO Anboyu¹, SONG Xiaojiang¹

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081 China)

Abstract: Using the Cross-Calibrated Multi-Platform 10 m wind field data from 1988 to 2018, the climatic characteristics, linear variation trend and the frequency distribution characteristics of wind force equals or beyond scale 6 are analyzed in this paper. The results show that the average wind speed changes significantly with the seasons, which is smaller in summer and generally larger in summer. The linear change variation trend of sea surface wind speed also shows strong seasonal variation. The most notable feature is that the seasonal mean wind speed in autumn and winter reveals opposite variation trend in the southern part of the East China Sea, the Taiwan Strait, the northeastern part of the South China Sea, and the Bashi Channel, which may be related to the changes in the intensity of the East Asian trough and the inter-annual variation of the Accumulated Cyclone Energy. The gale frequency shows significant seasonal differences in different areas of the Northwest Pacific. The gale processes occur frequently throughout the year except summer in the North Pacific area north of 30°N. The gale processes mainly occur in autumn and winter in the northeastern South China Sea, the Taiwan Strait and the Bashi Channel. The gale processes mainly occur in summer and winter in the central and western South China Sea with southwest gale prevailing in summer and northeast gale prevailing in winter.

Key words: Northwest Pacific; sea surface wind; characteristics analysis; gale process