

温灿, 王志雄, 邹巨洪, 等. 基于 CCMP 的台湾海峡海面风场时空特征变化分析[J]. 海洋学报, 2024, 46(4): 65–78, doi:10.12284/hyxb2024023

Wen Can, Wang Zhixiong, Zou Juhong, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface wind field in Taiwan Strait based on CCMP[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(4): 65–78, doi:10.12284/hyxb2024023

基于 CCMP 的台湾海峡海面风场时空特征变化分析

温灿¹, 王志雄^{1,2*}, 邹巨洪^{2,3}, 冯倩^{2,3}

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 利用 1993–2022 年最新版交叉标定多平台风场资料 (CCMP V3.1), 针对台湾海峡海面风场的年、季、月、日变化特征进行了分析。结果表明: 台湾海峡及台湾岛周边海域风场具有明显的空间分布特征, 地形效应导致不同海域出现风速极大值区和极小值区。其中台湾海峡中部受“狭管效应”的影响, 在冬季风速最大, 风向基本与海峡走向平行; 夏季风速低于海峡外部的风速, 无“狭管效应”。此外, 海面风场还具有明显的季、月变化特征, 冬季盛行东北风, 风速为全年最高; 夏季盛行西南风, 风速最低; 春、秋两季风场特征相似, 皆盛行东北风; 冬季风比夏季风盛行期长, 约占全年的四分之三。对风场的年际变化分析时, 结果表明夏季风向易发生较大角度的偏转; 年平均风速保持基本平缓的线性趋势, 在一些年份的异常偏高或偏低与海气相互作用现象厄尔尼诺–南方涛动的发生相关。研究日变化特征时发现, 在夜间 20 时风速和风向波动最大; 风速一天内存在周期性变化; 风向日变化夏季偏转最明显。

关键词: CCMP; 台湾海峡; 海面风场; 时空特征

中图分类号: P714^{+.2}

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)04-0065-14

1 引言

海面风场是海洋与大气相互作用的结果, 对海洋环境和气候系统具有重要影响。卫星遥感以大面积同步测量、获取速度快、覆盖范围大、时空分辨率高、可连续观测等优点而成为全球风矢量观测的主要手段^[1]。使用卫星遥感获取海面风场观测数据, 研究海面风场的时空特征变化, 不仅有助于评估全球气候变化对风力资源、风能潜力以及相关的海洋和陆地生态系统的影响, 而且对海洋防灾减灾、海上军事活动和研究海气相互作用等有重要价值^[2]。

在提取海面风场时空特征变化方面, 国内外许多

学者进行了相关的研究。金铸钰等^[3]利用 CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) (V2.0 版) 风场资料, 分析了西北太平洋海表风场的气候态特征、线性变化趋势以及 6 级以上风力的频率分布特征, 得出海面风场季节差异性显著的结论。陈心一等^[4]利用连续 26 a 的多源卫星融合数据, 用经验正交函数方法分析了中国近海海面风场的时空特征情况, 分解的 3 个模态揭示了中国近海风场的季节和季节内变化特征。沈春等^[5]利用 QuikSCAT (Quick Scatterometer) 散射计风场资料分析, 发现在南海风速季节变化最为明显, 增速最快的区域是台湾海峡以南区域和北部湾。潘卫华和林毅^[6]利用 ASCAT (Advanced Scatterometer) 海

收稿日期: 2023-11-22; 修订日期: 2024-03-04。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3104901)。

作者简介: 温灿 (1999—), 女, 山西省吕梁市人, 研究方向为海洋微波遥感。E-mail: wen839309413@163.com

* 通信作者: 王志雄 (1987—), 男, 陕西省榆林市人, 博士, 副教授, 研究方向为卫星海洋遥感、极地遥感、卫星资料同化。E-mail: wangzhixiong@nuist.edu.cn

面风场数据和气象观测资料,通过经验正交分解(Empirical orthogonal function, EOF)统计方法综合分析台湾海峡海面风场 10 a 的时空模态变化特征,发现该海域的“狭管效应”在海面风场上呈现明显的季节性特征。海面风场时空特征变化的研究,国内大部分学者聚焦于季节和年的长时间序列变化,而一些国外学者从已有的季节和年变化切入,研究海面风场日变化的特征。Giglio 等^[7]用最小二乘拟合的谐波分析分离出单日风变化信号,通过对 U 、 V 分量日振幅年平均的相关计算,统计日峰值的时间,发现热带地区风场经向风和纬向风存在着很大差异。由于风速和它的经向和纬向分量之间的关系是非线性的, Turk 等^[8]将微波辐射计和散射计观测到的数据使用向量重构法合并为观测时间的函数,生成一个多年数据集的日风变率,在经向风分量中能够表现出更多的变率。Lang 等^[9]使用 RapidScat(Rapid Scatterometer)和 CCMP 数据计算并对比了月平均风速和旋度以及它们各自的异常,两种数据都观察到菲律宾附近海域海面矢量风从冬季信风到夏季信风出现戏剧性逆转,日间陆上和夜间离岸流影响菲律宾吕宋岛以西约 200 km 风的日变化,推断该海域的日变化与海陆风紧密相关。Tang 等^[10]假设日循环信号存在于每个传感器上升和下降轨道的测量与日平均值的偏差中,基于 OSCAT(Oceansat-2 Scatterometer)、WindSat(Wind Satellite Scatterometer)和 ASCAT 3 种散射计数据,使用蒙特卡洛模拟技术来估计不确定性,发现很强的日信号发生在沿海地区和热带海洋。

台湾海峡地处我国福建省和台湾省之间,两侧陆上均有东北-西南走向的山脉,海峡水域面积呈南宽北窄的喇叭形,连通东海和南海,具有极其重要的地理位置和战略意义^[11]。北回归线从台湾海峡南部通过,具有典型的热带、亚热带季风气候特点^[12]。在海峡两岸地形和天气系统的共同作用下,海域风场呈现显著的“狭管效应”,东北季风影响期间平均风速较大,成为我国近海冬季的最大风区之一^[6,13]。台湾海峡时空特征变化具有多变性和复杂性,是典型的海面风场研究区域,在以往研究中使用的风场资料时空分辨率较低,其特征变化的研究较少,且未开展过对风场日变化的研究。随着海洋遥感技术的不断发展,卫星获取的海面风场资料分辨率有了很大提高。本文将利用 CCMP V3.1 版本风场资料,分析台湾海峡海面风场的时空特征变化。本文的工作将进一步提高对台湾海峡海面风特征的定量化认识,从而为该海域海面风场的相关研究和卫星数据资料的改进提供一定的参考。

2 数据与方法

2.1 数据介绍

海洋矢量风在时间和空间尺度上不断演变,因此研究海面风场时空特征变化需要高质量、长时间和高空间分辨率的无间隙海洋表面风数据。常用的海面风场资料有浮标观测数据、散射计数据、雷达观测数据和模式数据等,但分辨率都较低,时间序列较短,观测区域的覆盖范围有限。本文选用由美国遥感研究团队(Remote Sensing System, RSS)研制并发布的 CCMP V3.1 版本海面风场融合数据集,是一种可以提供全球海洋矢量风的 L4 级网格产品。该资料是对 2022 年发布的 V3.0 版本数据集的优化,2023 年开始在官网更新,二者使用相同的处理系统, Mears 等^[14]进行了详细描述。以欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA5) 10 m 中性稳定风(Neutral Stability, NS)作为背景场,采用变分分析的方法融合了 QuikSCAT、ASCAT-A(Advanced Scatterometer for MetOp-A)散射计,以及 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager)、SSMIS(Special Sensor Microwave Imager Sounder)、TMI(Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager)、GMI(Global Precipitation Measurement Microwave Imager)、AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)、AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)、WindSat 辐射计遥感海面风场数据,这种将卫星和再分析数据相结合的方法可以确保卫星有反演和无反演区域之间风场的平稳过渡。由于背景风场的存在,该资料同时包含海面风场和陆上风场,在后续研究海面风矢量的过程中需要对陆地上的数据掩膜,以提高风场精度。CCMP V3.0 数据相比 V2.0 版本的准确性有所提高,尤其是在风速超过 15 m/s 高风速的情况下,风场的长期趋势更加可靠;CCMP V3.1 和 V3.0 在 2012 年 7 月 2 日前完全相同,在这个时间点之后对 OSCAT、ASCAT-A、ASCAT-B(Advanced Scatterometer for MetOp-B)、AMSR2 的版本作了调整。

CCMP V3.1 数据集中包含纬度(latitude)、经度(longitude)、时间(time)、海洋表面 10 m 风速(ws)、 U 分量(uwnd)、 V 分量(vwnd)和观测数据量(nobs),目前已涵盖了 1993 年 1 月 2 日至 2023 年 7 月 30 日的风场数据,后续还将持续更新。该资料时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,空间覆盖范围为

80°S~80°N, 0°~360°E。本文选择的时间段为 1993 年 1 月 2 日至 2022 年 12 月 31 日, 研究范围覆盖了台湾海峡及台湾岛周边海域 20°~28°N, 115°~125°E。

此外, 本文选用最常用的 Niño 3.4 指数分析海面风场变化特征与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 事件的关联性, 该指数来源于亚太数据研究中心 (Asia-Pacific Data-Research Center, APDRC)。

海洋气象浮标观测资料由台湾省气象机构提供, 目前可在网上免费获取。2000 年前后, 中央气象局陆续投放海洋气象浮标, 以满足对波浪、海流、海面风、海温、气温等海洋要素观测的需求。本研究采用由七美浮标站观测的海面风资料, 该站位于七美屿东 22 km 和东吉屿西南 6.5 km 交汇处, 水深 49.65 m, 该浮标在以投放位置为中心且半径为 110 m 的范围内活动。浮标上安装的风速风向计仪器为 Young 05106 和 GILL WindObserver II, 安装高度为 2 m 和 3 m, 通过对每小时测定的 10 min 风速、风向值加以平均, 可以得到该小时的平均风速和风向。因此, 浮标观测数据时间分辨率为 1 h。该资料从 2015 年 7 月 16 日开始记录, 但由于资料缺失, 本文只选用 2019 年、2020 年和 2022 年全年完整记录的数据作进一步研究。

2.2 研究方法

本文利用 1993 年 1 月 2 日至 2022 年 12 月 31 日共 30 a 的 CCMP 10 m 海面风场逐日数据, 每日包含 4 个时刻 (00:00、06:00、12:00、18:00)。选取台湾海峡及周边海域和台湾海峡风速大值区作为研究区域, 通过计算月、季平均风场和年平均风速方差分析空间变化特征, 时间上分析了年和日的长时间序列变化特征。根据气象学中的定义, 将该海域季节划分为春季 (3-5 月)、夏季 (6-8 月)、秋季 (9-11 月) 和冬季 (12 月至翌年 2 月) 4 个季节, 并且使用平均风速和风向描述平均风场^[3]。

平均风速、风向公式:

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

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}, \quad (2)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}, \quad (3)$$

$$D = \arctan \frac{\bar{U}}{\bar{V}}, \quad (4)$$

式中, U_i 和 V_i 分别表示经向和纬向风速, 风速值的正负代表方向。海洋学中把风前进的方向定义为风向, 当 U_i 和 V_i 为正值时, 风的方向为正东和正北方向; 当 U_i 和 V_i 为负值时, 风的方向为正西和正南方向。 n 表示天数的时间序列; \bar{U} 和 \bar{V} 分别为经计算求得的经向和纬向的平均风速, 同样正负值表示方向; S_i 表示逐日的海面风速; \bar{S} 表示计算求得的平均风速。吕明华等^[15]指出, 目前风向常用的计算方法有算术平均法、滑动平均法、矢量平均法和频率最高法。其中, 算术平均法和滑动平均法需要修正过零风向, 而矢量平均法和频率最高法则不需要。本文使用矢量平均法计算平均风向, 即 D 表示根据经向和纬向平均分量合成的平均风向, 可以代表风向随时间和空间变化的实际情况。为便于后续平均风向的相关分析, 在计算过程中需将风向转换为气象学中所定义的风向, 即风吹来的方向。当 $U > 0, V > 0$, 则 D 不变; $U < 0, V < 0$ 或 $U > 0, V < 0$, 则 $D = D + 180^\circ$; $U < 0, V > 0$, 则 $D = D + 360^\circ$; $U = 0, V > 0$, 则 $D = 0^\circ$; $U = 0, V < 0$, 则 $D = 180^\circ$; $U > 0, V = 0$, 则 $D = 90^\circ$; $U < 0, V = 0$, 则 $D = 270^\circ$; $U = 0, V = 0$, 则 D 不存在。

平均方差公式:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (5)$$

式中, x_i 表示实际风速; \bar{x} 表示平均风速; n 是时间序列; s^2 为计算得到的平均方差。

由于全球各个地方被太阳照射时的入射角不同, 在对台湾海峡海域海面风场的时间变化特征进行分析时, 需要考虑当地时间。Zhang 等^[16]在研究热带暖池区海表面温度日变化的季节特征时提到了协调世界时和地方太阳时之间的转换。地方太阳时计算公式:

$$\text{LST} = \text{UTC} + \text{round} \left(\frac{\text{longitude}}{15^\circ} \right) \text{h}, \quad (6)$$

式中, LST (Local Solar Time) 表示地方太阳时; UTC (Coordinated Universal Time) 表示协调世界时; round 指数学中的四舍五入取整, 最终计算得到的数值以小时为单位。经计算, CCMP 资料中 4 个时刻和台湾海峡当地时间的转换如表 1 所示。

一元线性回归是一种常用的统计分析方法, 用于研究两个连续变量之间的线性关系, 它可以用一条直线近似表示数据的趋势变化。若 n 组数据中自变量 $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与因变量 $Y (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 之间线性相关, 构建一元线性方程:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (7)$$

式中, β_0 是截距, 表示当自变量为 0 时, 因变量的值;

表1 UTC与LST时间转换表
Table 1 UTC and LST time conversion

UTC	LST
00:00	8:00(早晨)
06:00	14:00(中午)
12:00	20:00(夜间)
18:00	2:00(+1)(次日凌晨)

β_i 是斜率,表示自变量每增加一个单位时,因变量的变化量; ε 是误差项,表示模型无法解释的随机误差。在本文中年份作为自变量,年平均海面风速作为因变量,讨论风速的变化趋势。

皮尔逊相关可以衡量两个连续信号如何随时间共同变化,是量化两个时间序列之间相关性最简单的方法,通过计算皮尔逊相关系数来反映相关程度。其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

式中, r 是皮尔逊相关系数,介于-1到1之间,绝对值越大表明相关性越强,接近0时关系较弱,可视为近似不相关; x_i 和 y_i 是两个变量的第*i*个观测值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别是 x 和 y 的均值。下文将海面风速和Niño 3.4指数分别作为 x 和 y 的值计算二者的相关性。

对于海面风场日变化特征的研究则需要计算距平来反映一天内4个时刻的微小变化,计算公式如下:

$$\text{anomaly} = \text{actual} - \text{average}, \quad (9)$$

其中,anomaly表示异常值;actual为式(3)和式(4)经计算求得各个时刻的实际平均风速和风向;average是某月实际平均风速或风向4个时刻的平均值。

在将浮标测量值与卫星数据比较前,通常采用一种简单的方法将浮标观测风转换到10 m的标准高度。当高度为 z 时,即 $z = 10$ 时,风速 $U(z)$ 的计算公式:

$$U(z) = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \times U(z_m), \quad (10)$$

式中, $U(z_m)$ 为 z_m 高度处测得的风速,文中表示浮标在2 m高度处测得的风速,该高度获取的资料更完整; z_0 为粗糙度长度,表示 $U = 0$ 时距地面的高度,这个参数取决于表面的性质,通常是经验确定,海洋表面取 $z_0 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{[17]}$ 。

3 海面风场的空间特征变化分析

3.1 海面风场季节变化特征

将CCMP资料的陆地风场掩膜后,对台湾海峡及台湾岛周边海域1993–2022年30 a海面风场按月份进行累计平均处理,图1为该海域多年月平均海面风场的空间分布特征。

由图1可见,1–3月(图1a至图1c)与10–12月(图1j至图1l)为冬季风盛行期,海面风场的空间分布特征相似,大部分海域月平均风速在9 m/s以上。图中台湾岛北部吹来的东北大风受台湾岛中央山脉的阻挡而分成两部分。一部分被阻隔在台湾岛北部,导致所处海域海面气压梯度被迫增大,形成风速较强的“角流”;另一部分顺势进入台湾海峡,在经过台湾海峡时,由于空气质量不能大量堆积,于是加速通过,到达海峡中部时风速达到最大值11~13 m/s,在12月(图1l)冬季风最盛行的时期,海峡中部海面风速可以达到14 m/s以上。东北大风流出较狭窄的海峡中部,到达台湾海峡南部海域后风速有所减弱。台湾岛东部海域的偏东风同样被中央山脉阻挡吹向西南方向,当吹到台湾岛南端的海域时由于受到了地形倒槽作用气压梯度增大,形成11 m/s左右的高风速“角流”,而台湾岛西南海域处于背风槽,产生低风速的“尾流”,成为这片海域风速最小的区域,为8~9 m/s。

由图1可见,4–9月(图1d至图1i)整个海域的海面风速处于5~7 m/s,风速值较低。其中,4月(图1d)由冬季风过渡为夏季风,风速随后开始减弱;9月(图1i)由夏季风过渡为冬季风,风速随后逐渐增强。这两个月的海面风速大值区域同样出现在台湾海峡中部,但仅有7~8 m/s,低于冬季风时期。5–8月(图1e至图1h)处于夏季风盛行时期,海域整体风速偏低,台湾海峡峡内风速低于外部风速,“狭管效应”并不显著。翁国玲和唐寒秋^[18]研究发现,夏季盛行的西南风平均风力较弱,为东北风的三分之一左右,不管有无热带气旋,狭管效应都不显著。根据图1中所表现出的规律可以得出,在台湾海峡海域,狭管效应作为一种地形效应,受季风影响有一个显著的季节变化。

台湾岛东北部冬季风期间盛行东北风,4月开始过渡为偏东风,直到夏季6月转为偏南风,9月重新过渡回东北风;台湾岛东部同样大部分时期盛行东北风,3–5月吹偏东风,6–8月转成偏南风,9月仍然过渡回东北风。台湾岛周边海域连接太平洋,风向变化机制较复杂,在此不作过多讨论。

台湾海峡具有明显的季风气候特征,冬季受到来自西伯利亚或蒙古冷气流的影响盛行东北季风,夏季则受热带天气系统的影响盛行西南季风,春、秋两季一般为季风转换期,季风影响相对较弱。台湾海峡海域的风向与台湾岛地形偏东北~西南的走向基本平

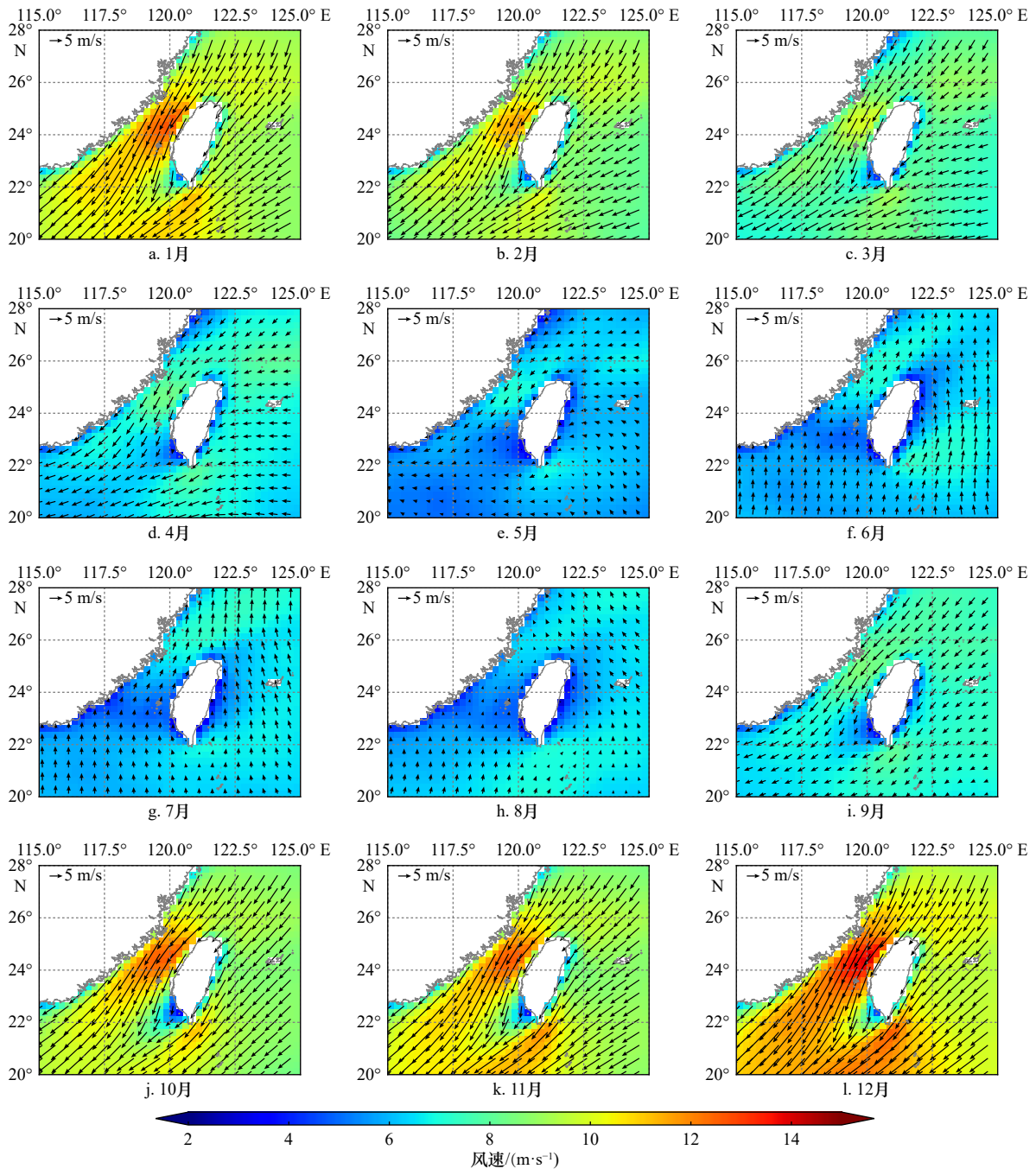


图1 多年月平均海面风场的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the monthly mean sea surface wind field for many years

行。除6-8月夏季风期间盛行西南风外,其余月份皆盛行东北风,冬季风盛行期长,6月由东北风转换为西南风,9月由西南风转换为东北风。夏季风盛行期间,由于风速较小,风向容易受到台风、东海气旋和反气旋等天气系统的交替影响而发生改变。

在月平均海面风场的基础上,进一步划分4个季节,得到如图2所示的台湾海峡及台湾岛周边海域多年季节平均海面风场的空间分布特征。秋季(9-11月,图2c)和冬季(12月至翌年2月,图2d)季节平均

海面风场的空间分布特征相似。秋季开始进入冬季风时期,盛行东北风,海面风速强于夏季(6-8月,图2b),基本保持在9 m/s以上。台湾海峡中部受“狭管效应”的影响,风速可以达到11 m/s,成为该海域风速最大的地方。受地形影响,台湾岛南部和西南部分别出现10 m/s的高风速“角流”区和6 m/s的低风速“尾流”区。冬季时,冬季风达到盛行期的峰值,海面风速进一步增强,平均风速为10~11 m/s,海峡中部区域风速最高为13 m/s,在台湾岛南部同样出现了“角流”和

“尾流”。第二年春季(3-5月, 图 2a), 冬季风开始减弱并逐渐向夏季风转换, 海面风速逐渐减小到 6~7 m/s, 海峡中部风速相对较高, 约 8 m/s。但由于东北风变弱, “狭管效应”“角流”和“尾流”相比秋冬季表现并不明显, 在台湾岛东部海面风向发生了变化, 由东北大风变为了偏东风。夏季开始进入夏季风时期, 海域风向整体为偏南风。夏季风风速较弱, 海面风速

为 5~6 m/s, 台湾海峡中部风速低于海峡外部, 无明显的“狭管效应”。夏季风盛行期较短, 结束后再次进入秋季并迅速转换成冬季风。四季更替, 不断循环。分析表明, 台湾海峡及周边海域海面风场冬季盛行东北风, 夏季盛行西南风。冬季风风力强于夏季风, 并且持续时间长, 台湾海峡中部在冬季风盛行期间由于“狭管效应”成为风速大值区, 夏季为最小值区。

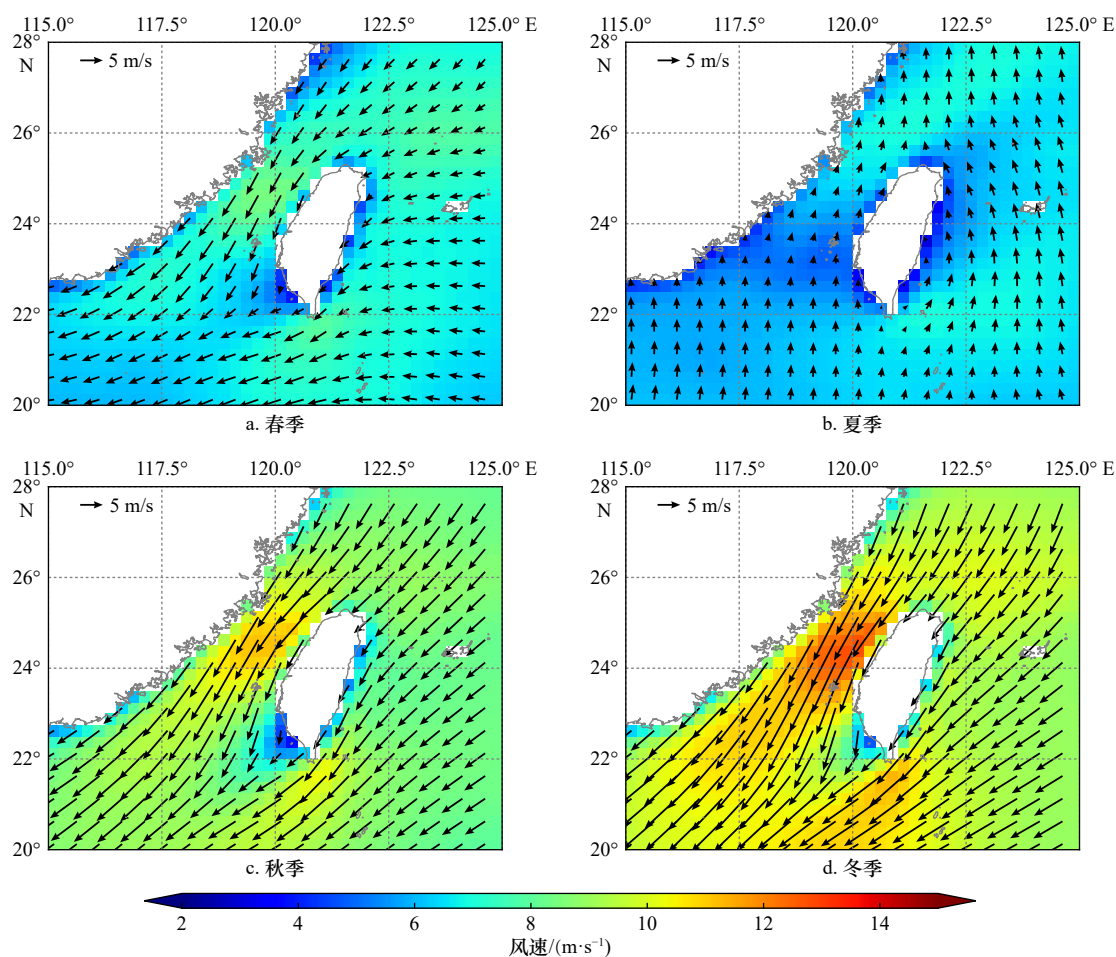


图 2 多年季节平均海面风场的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the seasonal mean sea surface wind field for many year

3.2 海面风场空间分布特征

根据海面风场多年月、季平均变化特征可知, 台湾海峡及台湾岛周边海域不同空间的海面风速有所不同, 存在高风速和低风速区域。高成志等^[19]通过计算研究海域多年平均海面风速揭示了风速大值区, 风速均值可用于衡量风速的空间变化特征。另外, 标准差也可以表现风速空间变化的剧烈程度。考虑到研究所用的数据时间尺度跨度大, 为更好地表现海面风场的空间分布特征, 在本文中计算了 30 年间海面风速的方差, 方差可以更直观地反映出实际风速相对于平均风速的变化程度。图 3 即为海面风速多年平均方差的空间分布, 黑色虚线为等值线, 图中表明台湾

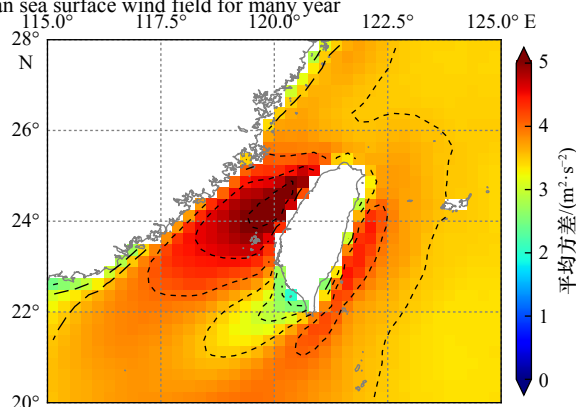


图 3 海面风速多年平均方差空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of sea surface wind speed mean variances for many years

岛东部、南部和台湾海峡中部方差变化较为强烈。台湾海峡中部“狭管效应”海域变化最大, 方差可达 $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上; 其次是台湾岛东部和南部, 开阔海域吹来的偏东风遇到台湾岛中央山脉阻挡, 使得方差变化达到 $4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 左右; 台湾岛西南部由于背风地形倒槽作用, 方差约为 $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

图4以1993–2022年30a的平均海面风场为背景, 结合图3表现的方差特征, 选取台湾海峡中部($24^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, $119^\circ\sim 120^\circ\text{E}$, 图中红色方框内)作为下一节的研究区域, 进一步分析台湾海峡海面风场的时间变化特征。已有的研究资料表明, 台湾海峡是中国近海主要的大风区之一, 有着很强的地域性特点, 是海面风场时空特征变化典型的研究区域。另外, 图4中符号“x”标识了本文使用到的固定气象站的位置。

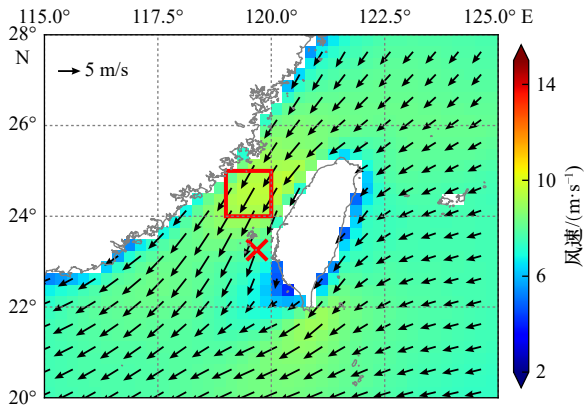


图4 研究区域选取
Fig. 4 Study area selection

4 海面风场的时间特征变化分析

4.1 海面风场的年际变化

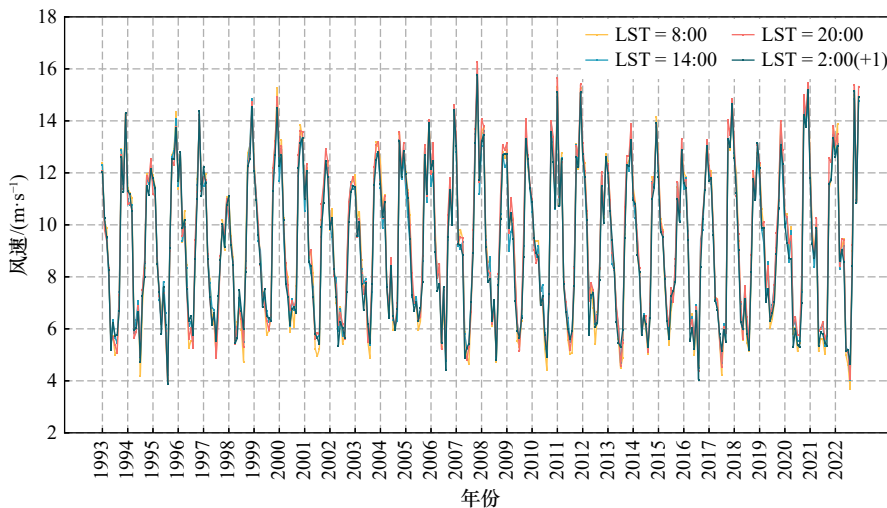


图5 月平均风速的年际变化
Fig. 5 Interannual variation of monthly mean wind speed

对上一节选取的台湾海峡中部海域区域平均得到月平均海面风速与风向。图5表示1993–2022年长时间序列的月平均海面风速变化曲线, 4条颜色不同的曲线代表一天中的4个时刻, 整体风速值在 $4\sim 16 \text{ m/s}$ 范围内波动, 季节变化显著。1月、2月处于冬季风时期, 风速为 $11\sim 12 \text{ m/s}$; 3月、4月冬季风力减弱, 开始向夏季风过渡; 6–8月进入夏季风时期, 风速为 $4\sim 6 \text{ m/s}$, 达到全年最低值; 9月夏季风向冬季风过渡, 风力开始急剧增强; 随后在11月、12月风速达到最大, 为 $12\sim 14 \text{ m/s}$, 个别年份的风速甚至高达 $15\sim 16 \text{ m/s}$ 。由此表明, 台湾海峡中部由于“狭管效应”的作用, 全年海面风速偏高, 风速变化主要与季风变化和地形效应有关。

将1993–2022年台湾海峡中部海面风速进行逐年平均, 得到图6所示的逐年年平均风速变化曲线, 4条颜色不同的折线依然代表4个时刻。海峡中部年平均风速为 $8\sim 10 \text{ m/s}$, 30a的年平均值为 9.2468 m/s , 由黑色虚线表示。海表风速常使用线性回归方法分析多年整体的线性趋势^[20–23]。本文采用一元线性回归方法得到图6中黑色实线表示的逐年年平均风速线性变化趋势线及其线性回归方程。线性相关系数为 0.1086 , 回归系数为 0.0043 , 即近30年间, 风速以每年增加 0.0043 m/s 的速度保持基本平缓的线性趋势, 但年际变化幅度显著。沈春等^[5]得到的结果表明, 台湾海峡风速以每年 0.05 m/s 呈现缓慢增大的趋势, 郑崇伟^[23]计算出台湾海峡以每年 $0.06\sim 0.15 \text{ m/s}$ 的风速呈显著性逐年线性递增的趋势, 这与本文得到海表风速呈平缓的线性趋势不一致。一方面, 这可能由于使用风场资料的分辨率和精度不同, 新版CCMP V3.1

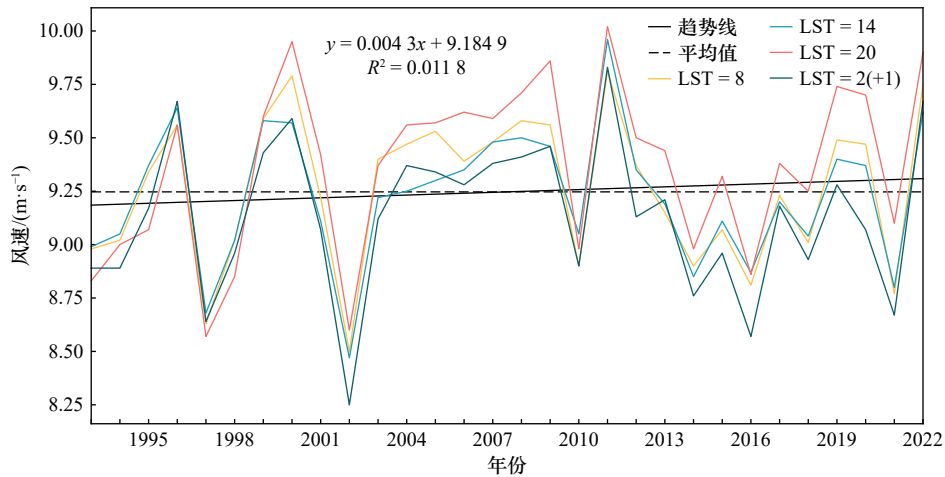


图 6 年平均风速的逐年线性趋势

Fig. 6 The linear trend of annual mean wind speed

数据是经过多次改进得到的,相比先前文献中用到的卫星数据更加可靠。另一方面,本研究选取的研究海域与上述参考文献的研究范围存在一定差异,本文研究范围包含于上述参考文献研究范围(整个台湾海峡)。另外,图 6 直观地表现出一年所对应的 4 个时刻存在明显的波动,平均风速的变化幅度为 0.5~2 m/s, 后文将对日变化作进一步分析。

前人的研究指出海面风速变化受气象系统内部因素和人类活动影响,林刚^[22]认为风速变化主要由大气环流、季风变化、气旋、厄尔尼诺现象等导致,可以排除人为因素的影响。冬季风盛行期比夏季风长,11 月、12 月份全年风速值达到最大。对图 5 中 1993–2022 年冬季(11 月、12 月)风速作横向比较,1998 年、1999 年、2007 年、2010 年、2011 年、2017 年、2020 年和 2022 年风速较其他年份异常偏高,1994 年、1997 年、2002 年、2008 年、2012 年、2018 年风速异常偏低,

猜测风速异常年的出现与 ENSO 的发生有关。使用皮尔逊相关系数计算 30 a 的月平均海面风速和 Niño 3.4 指数的相关性,得到 r 值为 -0.1646 ,二者存在较弱的负相关。文中的研究区域在海峡内部,受大尺度气候效应的影响小,故相关性不够明显。使用郑崇伟^[23]分析中国海海表风场与 El Niño 相关性的方法,对照赵宗慈等^[24]统计的厄尔尼诺和拉尼娜事件时间表,风速异常偏大年发生拉尼娜事件,异常偏小年发生厄尔尼诺事件。因此认为在大气环流的背景下,ENSO 与风速变化之间存在复杂的海气相互作用,ENSO 的发生是导致风速异常变化的因素之一。反之,风场异常对气象条件会产生长期影响,其发生机制还有待进一步探究。

图 7 为 1993–2022 年台湾海峡中部区域平均后得到的月平均风向长时间序列变化曲线。1–5 月和 9–12 月冬季风期间,平均风向为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$,即盛行东

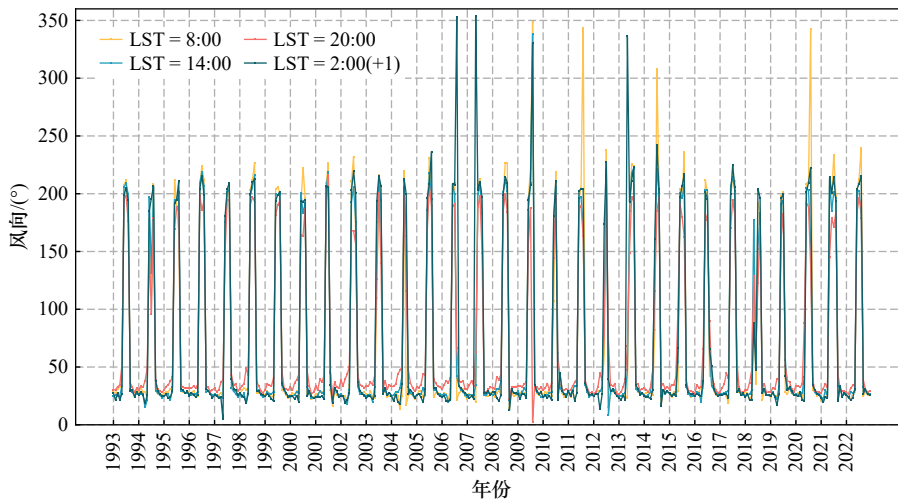


图 7 月平均风向的年际变化

Fig. 7 Interannual variation of monthly mean wind direction

北风,盛行时间长;夏季6-8月风向值约 200° ,盛行西南风。台湾海峡地区夏季风向发生异常偏转的年份较多,包括2006年、2007年、2009年、2013年凌晨和2011年、2014年、2020年早晨。因此,台湾海峡中部风向同样与季风变化有关,有显著的季节差异,夏季风向多变。

4.2 海面风场的日变化

CCMP 获取的日数据分为4个时刻,可以反映出一天内风速和风向的日变化情况,在对图中日变化的情况进行描述时,将使用转换后的当地时来表达。图8分别为台湾海峡中部多年月平均风速和风向的日变化。图8a中,4个时刻风速的变化在 0.5 m/s 左右,日变化较微小。4-9月一天内风速随时间变化而逐渐增大,在第三个时刻即夜间20时风速值达到最

大,随后次日凌晨2时基本不变或略微减小。1-3月和10-12月在第二个时刻下午14时风速有所减小,接着继续增大,至夜间20时达到最大,次日凌晨开始减小。风速一天内表现出一定的周期性变化,尤其在冬季风风速偏强时期更加明显。图8b中,风向在1-5月和9-12月冬季风盛行期间变化较小,整体在大约 5° 范围内波动,下午14时后风向朝东北方向偏,夜间20时达到偏转最大幅度,之后朝相反的偏北方向回转,次日凌晨2时与早晨8时方向一致。风向日变化主要发生在夏季6-8月,在盛行西南季风的背景下,白天风向偏向南,夜间20时之后开始向西偏。所以风场的日变化主要体现在夏季下午14时到凌晨2时。

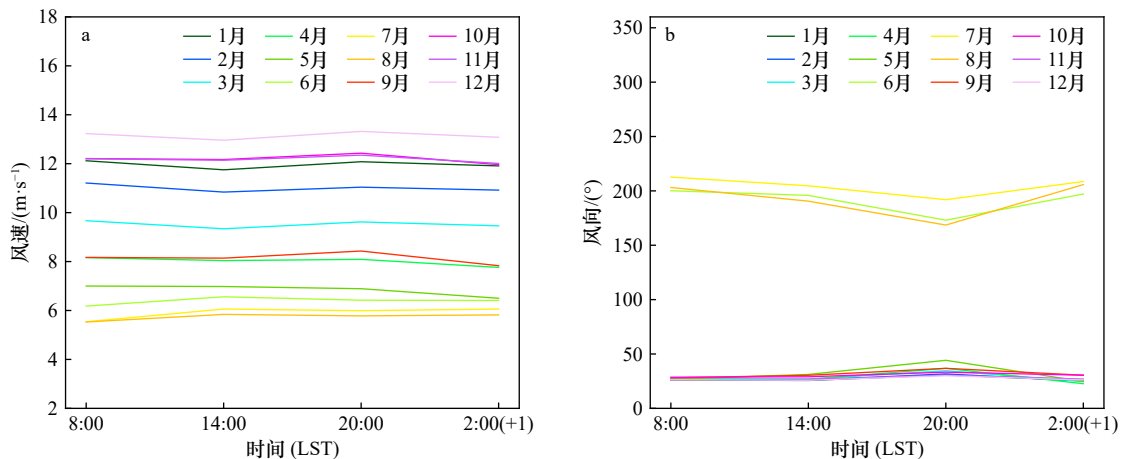


图8 多年月平均风速和风向的日变化

Fig. 8 Diurnal variation of mean monthly wind speed and direction for many years

距平即通常所说的异常,是指一系列数值中的某个值相对于平均值的偏差,距平变量的数据随时间的变化可以反映变量异常状态随时间变化的情况。在分析风速日变化时引入距平的概念,有助于了解它的变化幅度与变化规律。求取每个月4个时刻的平均值,各时刻相对均值的偏差即为距平,如图9所示,正值的蓝色柱形表示风速值大,负值的黄色柱形表示风速值小。早晨8时(图9a),夏季6-8月风速偏低,其他3个季节风速偏高;次日凌晨2时(图9d),变化规律刚好与早晨8时相反,夏季偏高,其他季节偏低;下午14时(图9b),4-8月风速偏高,1-3月和10-12月偏低,9月该时刻的风速接近该月4个时刻的均值;夜间20时(图9c),所有月份的风速全部偏高。由此推断,风速的日变化情况受季节变化影响。夏季的早晨风速最低,下午和凌晨达到最大,夜晚风速处于平均水平;春、秋、冬季早晨和夜间风速偏大,下午和

凌晨偏小。

在分析月平均风向的日变化时,使用风玫瑰图能够更直观地反映4个时刻的风向变化,如图10所示。风玫瑰图16个方位用来表示不同的方向,半径为风速。整体风向以季风为主,春秋冬三季主导风向为东北风,夏季西南风。1-4月(图10a至图10d)和10-12月(图10j至图10l),4个时刻风向重合度较高,表明一天内日变化小,白天风向顺时针偏转,到夜间20时略偏向东,凌晨2时恢复为主导风向;5月(图10e)和9月(图10i)季风过渡时期,白天的3个时刻相比冬季风时期变化偏大。夏季6-8月(图10f至图10h)风向日变化明显,早晨8时开始风向逆时针偏转,在夜间20时偏转达到最大,风向变为偏南风,随后在凌晨2时反方向偏转回主导风向。吴滨等^[25]研究福建沿海地区海陆风的时空分布特征时发现,该地区海陆风日的风向转换时角度变化较小。当海风偏

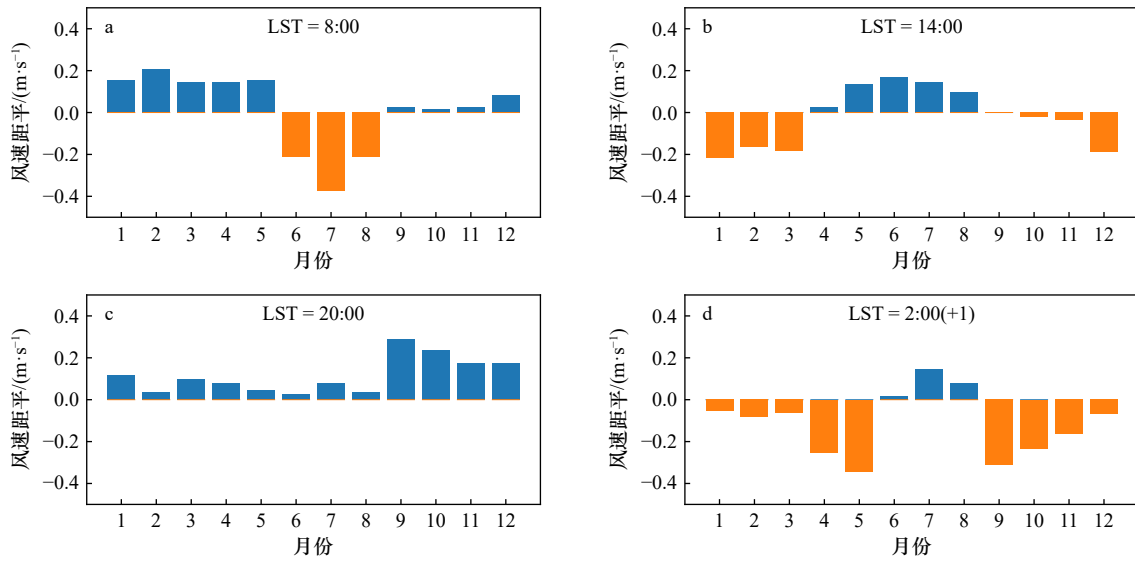


图9 风速日变化距平

Fig. 9 Anomalies in the diurnal variation of wind speed

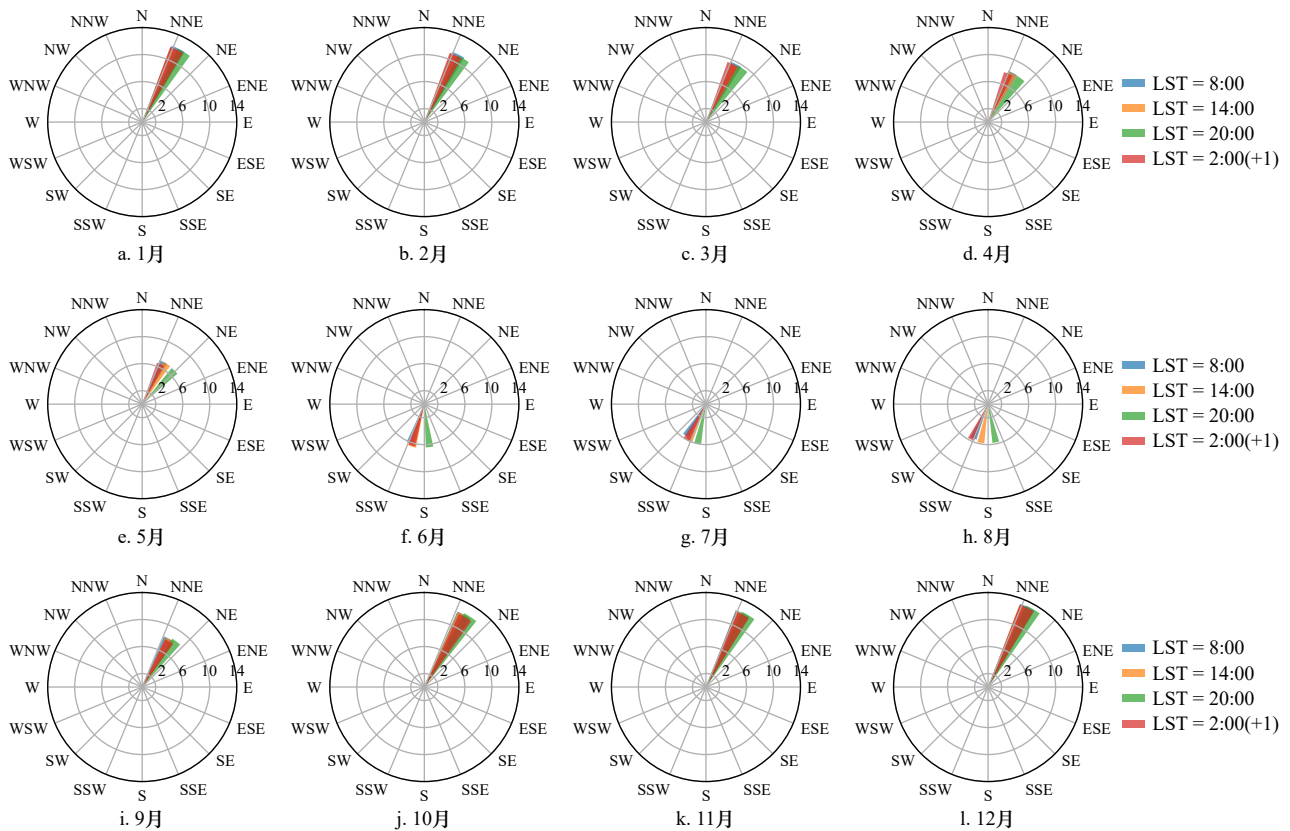


图10 风向日变化的分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of diurnal variation of wind direction

北风时,即冬季风盛行期间,白天陆风变海风时风向顺时针偏转,夜间海风变陆风逆时针偏转;当盛行夏季风时刚好相反。Short 等^[26]提出在近海岸风的日变化与海陆风、日降水等的关系,并且日变化还会受到附近岛上风辐合等的影响,机制复杂。台湾海峡中部海域两岸为福建省和台湾省,考虑海陆风是风向发生

日变化的影响因素之一,但该地区日变化还可能受到其他多种因素的共同作用。

海洋气象浮标相比 CCMP 资料可以观测到更多时次的海面风速和风向,观测值更加准确,但浮标资料容易缺失,无法形成较长时间序列的数据集。本研究选取了一个固定浮标站点(有关信息详见前文

2.1 节; 浮标位置参见图 4), 该浮标位于台湾海峡中部偏南, 尽管在本文研究区域偏南约 100 km 处, 但该浮标数据的分析结果仍具有一定的参考价值。该浮标有 3 年(2019 年、2020 年、2022 年)完整记录的风场数据, 风速经计算转换为海面 10 m 风后作月平均处理, 得到如图 11a 所示的风速日变化。各月风速一天内变化幅度在 0.5~1 m/s。0-12 时无显著变化, 12 时后开始逐渐增大, 下午 16-18 时左右风速值达到

最大, 随后逐渐减小。日变化规律与图 8a 相似, 傍晚风速值最大, 日变化在冬季风期间更加明显。图 11b 表示风向的日变化, 风向在凌晨 2-3 时、下午 13-16 时和晚上 19-21 时容易发生偏转, 夏季月份偏转明显。浮标观测到的风场日变化与 CCMP 日变化结果的总体一致性较好, 但存在差异。浮标和 CCMP 卫星遥感海面风场数据及其他数据源之间的误差特征不同, 它们揭示的日变化的一致性有待进一步研究。

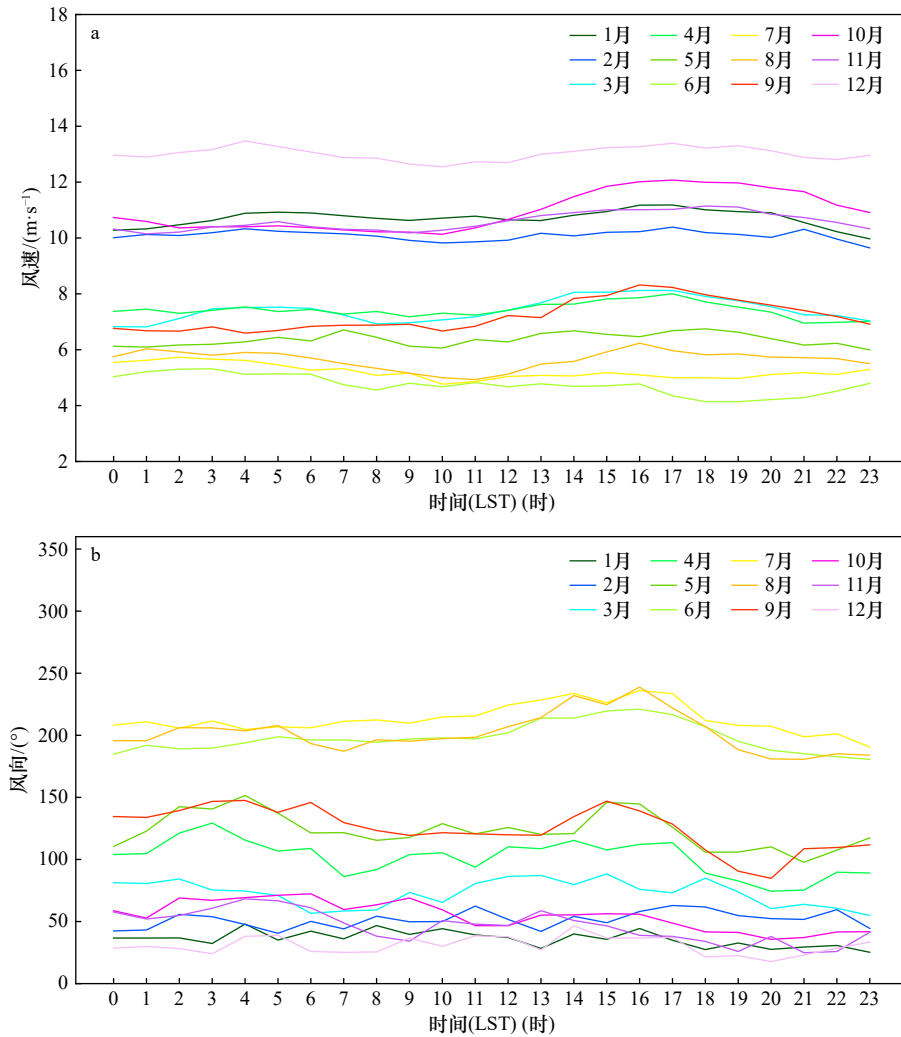


图 11 浮标观测的风速和风向日变化

Fig. 11 Observations of diurnal variations in wind speed and direction at buoy

5 结论与讨论

本文利用 1993-2022 年共 30 a 的 CCMP V3.1 版本海面风场资料, 对台湾海峡月、季平均海面风场空间分布特征和风场长时间序列的年际、日变化特征进行了分析。得出如下结论:

(1) 台湾海峡及台湾岛周边海域月平均和季节平均风场季节差异明显, 各季风速按递减的顺序排列依

次为: 冬季、秋季、春季、夏季。春、秋、冬季盛行东北风, 盛行期长; 夏季盛行西南风, 盛行期短; 冬季风强于夏季风。4 月和 9 月为季风转换的过渡时期。

(2) 台湾海峡及台湾岛周边海域风场表明其存在比较显著的空间分布特征。东北方向吹来的大风到达台湾岛北部时, 被中央山脉的阻隔形成风速较强的“角流”; 进入台湾海峡的风经过海峡中部, 受地形“狭管效应”的影响, 冬季风速最大值超过 14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 是

该海域的风速大值区,风向平行于两岸地形走向,夏季风速低于海峡外部,无“狭管效应”;流出海峡后风速减小;台湾岛东部的大风同样受山脉阻挡而向南吹,受地形倒槽和背风槽影响,台湾岛南部和西南处分别形成高风速的“角流”和低风速的“尾流”。通过计算方差能够反映出不同海域风速的变化幅度,选择台湾海峡中部作为时间特征分析的研究区域。

(3)时间上分析了 1993–2022 年台湾海峡中部月平均风场长时间序列的年际变化,除表现出显著的季节性变化外,发现 30 年间,海峡中部年平均风速呈现较平缓的线性趋势。一些年份风速出现异常偏大或偏小的情况,通过计算风速和能够反映海表温度变化的 Niño 3.4 指数之间的相关性,并结合文献记载,推断风速异常变化与 ENSO 的发生有关,但海峡内部受大尺度气候效应较小,二者相关性较弱。夏季风向容易发生偏转。

(4)本文的创新性研究在于对风场日变化的探索,利用 CCMP 资料的 4 个时刻研究日变化特征,并使用海洋气象浮标资料对其验证。日特征的变化极其微小,风速一天内表现出较小的周期性变化,但其在季风背景的影响下难以捕捉,仍然隐藏着一定的季节性变化。文章中用到正负距平和风玫瑰图表现日风速和风向的变化。日风速在夜间 20 时略微增强且为一天内的最大值,但变化幅度较小。夏季偏转程度最大,主要发生在白天的 3 个时刻;冬季偏转主要在夜间 20 时。海陆风作为影响日变化的因素之一,是否为该海域日风向发生偏转的主要原因仍需进一步研究。

文章中使用高时空分辨率的 CCMP 数据研究了台湾海峡海面风场的时空特征变化,其中对于风场日变化的研究,后续将采用多源卫星数据作进一步的分析 and 对比。

参考文献:

- [1] 林明森, 邹巨洪, 解学通, 等. HY-2A 微波散射计风场反演算法 [J]. *中国工程科学*, 2013, 15(7): 68–74.
Lin Mingsen, Zou Juhong, Xie Xuotong, et al. HY-2A microwave scatterometer wind retrieval algorithm[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(7): 68–74.
- [2] 詹思琦, 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 Siyu, Qi Linlin, Lu Wei. Analysis of sea surface wind in Northwest Pacific based on CCMP satellite data[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(2): 10–20.
- [3] 金铸钰, 刘凯, 郭安博宇, 等. 基于 CCMP 的西北太平洋海面风场特征分析 [J]. *海洋预报*, 2022, 39(2): 20–33.
Jin Zhuyu, Liu Kai, Guo Anboyu, et al. Characteristics analysis of the sea surface wind in the Northwest Pacific based on CCMP satellite data[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(2): 20–33.
- [4] 陈心一, 郝增周, 潘德炉, 等. 中国近海海面风场的时空特征分析 [J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 1–10.
Chen Xinyi, Hao Zengzhou, Pan Delu, et al. Analysis of temporal and spatial feature of sea surface wind field in China offshore[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(1): 1–10.
- [5] 沈春, 蒋国荣, 施伟来, 等. 南海 QuikSCAT 海面风场变化特征分析 [J]. *海洋预报*, 2012, 29(3): 1–8.
Shen Chun, Jiang Guorong, Shi Weilai, et al. Characteristic analysis of the variability of QuikSCAT wind in the South China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2012, 29(3): 1–8.
- [6] 潘卫华, 林毅. 近 10 年台湾海峡海面风场的时空特征变化动态分析 [J]. *热带气象学报*, 2019, 35(3): 296–303.
Pan Weihua, Lin Yi. Spatial feature and seasonal variability characteristics of sea surface wind field in Taiwan Strait from 2007 to 2017[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(3): 296–303.
- [7] Giglio D, Gille S T, Cornuelle B D, et al. Annual modulation of diurnal winds in the tropical oceans[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 459.
- [8] Turk F J, Hristova-Veleva S, Giglio D. Examination of the daily cycle wind vector modes of variability from the constellation of microwave scatterometers and radiometers[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(1): 141.
- [9] Lang T, Xu Weixin, Rutledge S. Investigating the seasonal and diurnal cycles of ocean vector winds, precipitation, and lightning near the philippines[C]//International Ocean Vector Winds Science Team Meeting. San Diego, CA, United States: Sponsors: Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies (COAPS), 2017.
- [10] Tang Wenqing, Liu W T, Stiles B, et al. Detection of diurnal cycle of ocean surface wind from space-based observations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(14): 5328–5341.
- [11] 伍伯瑜. 台湾海峡的气候特征 [J]. *台湾海峡*, 1982, 1(2): 14–18.
Wu Boyu. Climatic characteristics of the Taiwan Strait[J]. *Taiwan Strait*, 1982, 1(2): 14–18.
- [12] 郭婷婷, 高文洋, 高艺, 等. 台湾海峡气候特点分析 [J]. *海洋预报*, 2010, 27(1): 53–58.
Guo Tingting, Gao Wenyang, Gao Yi, et al. Analysis of climate characteristics in Taiwan Strait[J]. *Marine Forecasts*, 2010, 27(1): 53–58.
- [13] 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 Fangfang, Zhang Youquan, Zhang Junpeng, et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(5): 44–53.
- [14] Mears C, Lee T, Ricciardulli L, et al. Improving the accuracy of the Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) ocean vector winds[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4230.
- [15] 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.
Lü Minghua, Yan Jiangyu, Yao Renta, et al. Study on the statistical method of wind direction[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, 28(3): 83–89.
- [16] Zhang Haifeng, Beggs H, Wang Xiaohua, et al. Seasonal patterns of SST diurnal variation over the Tropical Warm Pool region[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(11): 8077–8094.
- [17] Ricciardulli L, Foltz G R, Manaster A, et al. Assessment of Saildrone extreme wind measurements in Hurricane Sam using MW satellite sensors[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2726.
- [18] 翁国玲, 唐寒秋. 台湾海峡狭管效应引起的大风增强 [J]. *数字化用户*, 2019, 25(27): 222–224.
Weng Guoling, Tang Hanqiu. Increased winds caused by the narrow tube effect in the Taiwan Strait[J]. *Digitization User*, 2019, 25(27): 222–224.
- [19] 高成志, 郑崇伟, 陈璇. 基于 CCMP 风场的中国近海风能资源的长期变化分析 [J]. *海洋预报*, 2017, 34(5): 27–35.
Gao Chengzhi, Zheng Chongwei, Chen Xuan. Long-term trend analysis of wind energy resource in the China Sea and adjacent waters based on the CCMP wind data[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(5): 27–35.
- [20] 张磊, 郑崇伟, 李庆红. 1988–2009 年北印度洋海域气候统计分析 [J]. *海洋通报*, 2012, 31(5): 575–580.
Zhang Lei, Zheng Chongwei, Li Qinghong. Wind climate analysis for the North Indian Ocean from 1988 to 2009[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(5): 575–580.
- [21] 潘静, 刘铸飘, 郑崇伟, 等. 1958–2001 年全球海域海表风速变化趋势 [J]. *气象科技*, 2014, 42(1): 104–109.
Pan Jing, Liu Zhupiao, Zheng Chongwei, et al. Analysis of global ocean sea surface wind speed over recent 44 years[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(1): 104–109.
- [22] 林刚. 南中国海风场和海浪场统计分析及其应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Lin Gang. Statistical analysis and application of wind field and sea wave field in South China Sea[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [23] 郑崇伟. 基于 CCMP 风场的近 22 年中国海海表风场特征分析 [J]. *气象与减灾研究*, 2011, 34(3): 41–46.
Zheng Chongwei. 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.
- [24] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖和厄尔尼诺事件 [J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(5): 663–666.
Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. Global warming and El Niño events[J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(5): 663–666.
- [25] 吴滨, 林长城, 文明章, 等. 福建沿海地区海陆风的时空分布特征 [J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(1): 125–132.
Wu Bin, Lin Changcheng, Wen Mingzhang, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of sea-land breeze over the Fujian coast[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(1): 125–132.
- [26] Short E, Vincent C L, Lane T P. Diurnal cycle of surface winds in the Maritime Continent observed through satellite scatterometry[J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(6): 2023–2044.

Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface wind field in Taiwan Strait based on CCMP

Wen Can¹, Wang Zhixiong^{1,2}, Zou Juhong^{2,3}, Feng Qian^{2,3}

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: The annual, seasonal, monthly and diurnal variations of sea surface wind field over the Taiwan Strait were analyzed based on the new version of Cross-Calibrated Multi-Platform Version 3.1 (CCMP V3.1) wind data from 1993 to 2022. The results showed that the wind field in the Taiwan Strait and the water around Taiwan Island had obvious spatial distribution characteristics, the topographic effect leads to the maximum and minimum wind speed regions in different sea areas. Because the central Taiwan Strait was affected by the “narrow tube effect”, the

wind speed was the highest and the wind direction was basically parallel to the strait in winter; the wind speed in summer was lower than the speed outside the channel, and there was no “narrow tube effect”. In addition, the sea surface wind field also had obvious seasonal and monthly variation characteristics. The northeast wind prevailed in winter, and in this season the wind speed was the highest in the whole year; the southwest wind prevailed in summer with the lowest wind speed; the characteristics of spring and autumn monsoon fields were similar, both prevailing northeast wind; winter monsoon last longer than summer monsoon, accounting for about three quarters of the year. The analysis of the inter-annual variation of wind field showed that the wind direction tended to deflect at a large angle in summer. The annual mean wind speed maintained a basically flat linear trend, and the abnormal high or low in some years was related to the occurrence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO). When the diurnal variation characteristics were studied, it was found that the wind speed and direction fluctuated most at 20 PM. The wind speed varied periodically within a day. The diurnal variation of wind direction deflection was most obvious in summer.

Key words: CCMP; Taiwan Strait; sea surface wind field; temporal and spatial characteristics