



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：渤海、黄海斯托克斯漂流时空分布特征及其与风场、波浪场的关联分析
作者：李若鹏，袁承仪
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20230227
收稿日期：2023-12-03
网络首发日期：2024-11-06
引用格式：李若鹏，袁承仪. 渤海、黄海斯托克斯漂流时空分布特征及其与风场、波浪场的关联分析[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20230227>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20230227

渤海、黄海斯托克斯漂流时空分布特征及其与风场、波浪场的关联分析

李若鹏, 袁承仪

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 斯托克斯漂流对上层海洋动力过程有至关重要的影响。本研究利用欧洲哥白尼海洋服务中心的波浪再分析数据以及欧洲中期天气预报中心的风场数据, 研究 1993—2021 年渤海、黄海斯托克斯漂流的时空分布特征, 并且通过矢量经验正交分解(VEOF)方法探究了斯托克斯漂流与风场、波浪场的关联性。结果表明: 渤海、黄海表层斯托克斯漂流的速度为 0.03~0.08 m/s, 在春夏季斯托克斯漂流速度方向是南向占主导, 在秋冬季是北向占主导。斯托克斯漂流的第一模态表现出西北向传播的特征, 方差贡献率为 49.1%, 与风场、风浪向和涌浪向的第一模态特征一致, 时间系数的相关系数分别为 0.96、0.83 和 0.78, 说明斯托克斯漂流与风场、风浪和涌浪的分布都有很好的关联性; 第二模态表现出渤海东北向传播, 黄海顺时针旋转的特征, 方差贡献率为 20.4%, 与风场和风浪向的相关性较弱, 而与涌浪向的第二模态近似, 相关系数为 0.65, 反映的是受涌浪影响所表现的特征。渤海、黄海水域的斯托克斯漂流流向与风向更接近而与浪向相差较大, 表明表层斯托克斯漂流方向受风场的影响更大。

关键词: 斯托克斯漂流; 矢量经验正交分解(VEOF); 表面风场; 波浪场

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)00-0000-00

Analysis of Temporal and Spatial Distribution of Stokes Drift and Its Correlation with Wind and Wave Field in the Bohai Sea and Yellow Sea

LI Ruopeng, YUAN Chengyi

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Stokes drift has a critical influence on upper ocean dynamical processes. This research makes use of the wave reanalysis data from the Copernicus Marine Services, as well as wind data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts to investigate the temporal and spatial distribution of Stokes drift and the correlation between Stokes drift, wind field and wave field in Bohai Sea and Yellow Sea in 1993–2021 through vector empirical orthogonal function(VEOF). The results show that the surface Stokes drift velocity in Bohai Sea and Yellow Sea that ranges from 0.03~0.08 m/s is characterized by southward in autumn, winter and northward in spring, summer. The first mode of Stokes drift shows the characteristic of northwestward propagation, with a variance contribution of 49.1%, and the time series has a ten-year periodical change, which is consistent with the first mode of wind field, wind-wave direction and swell direction, and the correlation coefficients are 0.96, 0.83 and 0.78, respectively, indicating that Stokes drift has a very good correlation with the distribute on of the wind field, wind-wave and swell-wave; the second mode shows the characteristic of north-eastward propagation of the Bohai Sea and clockwise rotation of the Yellow Sea, with a variance contribution of 20.4%, and the correlation is weaker with the wind field and wind wave, while the correlation is similar with the second mode of the

收稿日期: 2023-12-03; 修回日期: 2024-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41606028); 天津市科技计划项目(14JCQNJ09900; 19JCYBJC22000)

作者简介: 李若鹏(1997—), 男, 山西晋城人, 硕士研究生; 通信作者: 袁承仪, 副教授, cyuan@tust.edu.cn

swell-wave with a correlation coefficient of 0.65, reflecting the characteristics exhibited by the influence of swell-wave. The Stokes drift direction in the Bohai Sea and Yellow Sea is closer to the wind direction and more different from the wave direction, indicating that the surface Stokes drift direction is more influenced by the wind field.

Key words: Stokes drift; vector empirical orthogonal function(VEOF); surface wind field; wave field

斯托克斯漂流通常被定义为平均拉格朗日流和平均欧拉流之差^[1-2]。斯托克斯漂流改变了上混合层的能量输入和流场结构,加强了混合层的湍流效应^[3-5],对海洋混合层的动力过程起着至关重要的影响^[6-11]。此外,斯托克斯漂流与海洋漂浮污染物的输运也有密切的关系^[12-13]。Dobler 等^[14]通过敏感性实验研究斯托克斯漂流对南大洋微塑料输运的影响,发现加入斯托克斯漂流以后的模拟结果与浮标漂移轨迹类似,证明斯托克斯漂流对微塑料轨迹漂移确实会产生影响。Isobe 等^[15]研究濑户内海的塑料污染物分布特征,提出斯托克斯漂流导致了塑料向岸输运。Iwasaki 等^[16]运用数值模型研究日本海漂浮塑料的运动轨迹,研究结果表明斯托克斯漂流对中尺度塑料的向岸输运确实起到了很大的作用。因此,开展斯托克斯漂流的研究,对海洋动力学和海洋生态保护都有重要的理论意义和实际应用价值。

斯托克斯漂流的计算方法通常分为两种,即通过海浪谱计算与通过近似公式计算^[17-18]。张晓爽等^[19]利用斯托克斯漂流的单频深水波近似公式计算了全球斯托克斯漂流的分布特征。王京富等^[20]利用斯托克斯漂流的单频深水波近似公式研究中国近海的斯托克斯漂流速度分布,结果表明东中国海斯托克斯漂流速度在秋季和冬季较大,而在春季和夏季较小。除了采用海浪参数近似公式计算斯托克斯漂流以外,海浪谱方法是一种更加准确的模拟斯托克斯漂流的方法。Tamura 等^[21]对比了两种计算方法的结果,发现单频深水波近似公式的结果比海浪谱计算结果低。Sayol 等^[22]提出单频深水波忽略了高频风浪的影响,并将斯托克斯漂流速度分解为由风引起的和由涌浪引起的两部分,发现在大部分海区风引起的斯托克斯漂流成分远远大于涌浪引起的成分,而在近岸海区涌浪引起的斯托克斯漂流会变大。

综上所述,前人已经研究了全球斯托克斯漂流的时空分布,但是关于斯托克斯漂流与风场、浪场的关系还需要进一步探讨。本研究对渤海、黄海斯托克斯漂流的时空分布特征进行分析,并且给出了斯托克斯漂流与表面风场、波浪向的特征模态,以便进一步探讨它们之间的关联性。这些研究有助于

揭示影响斯托克斯漂流分布的因素,帮助我们对渤海、黄海的海洋动力过程有更全面的认识,从而为微塑料等海洋污染物的模拟研究提供良好的科学基础。

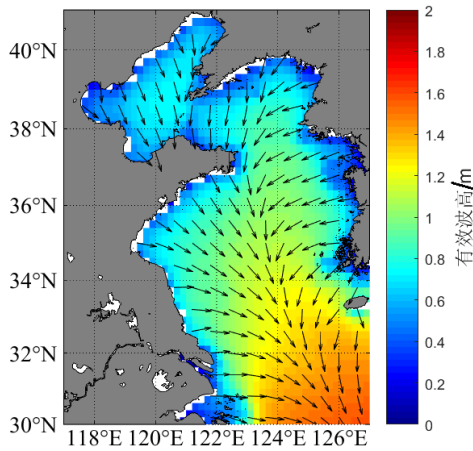
1 数据与方法

1.1 数据来源

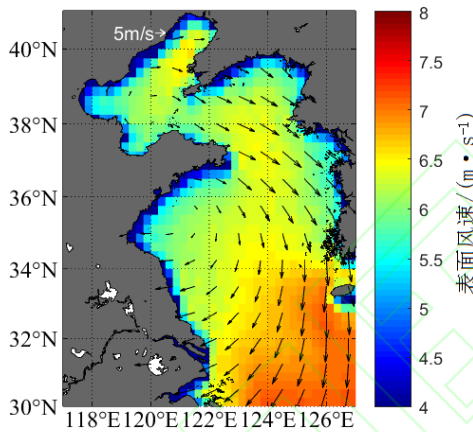
采用欧洲哥白尼海洋监测服务中心(European Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)提供的全球海浪再分析数据产品(https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIIYEAR_WAV_001_032/download),该数据集包含了与波浪相关的各种要素,比如有效波高、波浪周期、平均波浪向等。空间分辨率为 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$,时间分辨率为3 h,时间范围从1993年1月1日至2021年12月31日。本文选取的空间范围是 $30^{\circ}N-41^{\circ}N$, $117^{\circ}E-127^{\circ}E$ 的渤海、黄海区域。图1(a)为渤海、黄海区域海浪场的气候态平均分布。渤海、黄海有效波高为0~2.0 m,呈现出随着纬度减小而增大的特点。渤海的有效波高为0~0.8 m,黄海的有效波高为0.6~2.0 m,可以看出黄海的有效波高大于渤海。从浪向来看,渤海、黄海气候态平均浪向总体呈现东南向分布。

利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA5 逐时风场数据作为渤海、黄海表面风场数据的来源 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>)。该数据时间跨度为1940年至今,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本文中选取的参数为纬向风 u_{10} 和经向风 v_{10} 。选取的时间跨度为1993—2021年,研究区域为 $30^{\circ}N-41^{\circ}N$, $117^{\circ}E-127^{\circ}E$ 的渤海、黄海区域。图1(b)为渤海、黄海区域风场的气候态平均分布。黄海大部分海区气候态风场的主导风向为偏北风,黄海西北部为西北风,黄海西南部为东北风,黄海南部为正北风,在黄海的海州湾区域呈现顺时针旋转的风向分布特征。在渤海海域气候态风场分布比较不规则,

在渤海湾和莱州湾为南风,在渤海北部则偏西风和西南风。渤海、黄海平均风速大小为 5.0~8.0 m/s,并且黄海风速大于渤海。



(a) 波浪场



(b) 风场

图1 渤海、黄海的风场与浪场的气候态分布

Fig. 1 Distribution of wind and wave field on climate states in the Bohai Sea and Yellow Sea

1.2 研究方法

经验正交函数(EOF)方法是海洋和气象资料分析中被广泛采用的一种多元统计技术,其基本原理是将原始的三维变量场(经度、纬度、时间)分解为时间维和空间维的二维变量场,并将时间序列分解为正交函数的线性组合,构成几个不相关的典型模态,描述原始变量场的变化特征,并且使每个模态都含有尽量多的原始场的信息。EOF分解技术在大气、海洋研究中得到了广泛应用。传统的EOF方法主要应用于标量要素的分析,对风场这样的矢量要素来说,仅仅计算风速大小模态并不能完整地表现出风场的方向变化特征。针对传统EOF方法在分析矢量要素方面的缺陷,Hardy等^[23]在经验正交分解的

基础上提出矢量经验正交分解(VEOF)的方法,将风矢量数据两个方向分量(经向风速 U , 纬向风速 V)的矩阵拼接成一个新矩阵,使其可以分析矢量要素。Zhang等^[24]利用VEOF方法分析了南海风场的特征模态。本文利用VEOF的方法对表面风场的南北方向两个分量进行经验正交分解,得出矢量场的特征模态。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 代表待分解的物理场, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别代表经向风速和纬向风速。

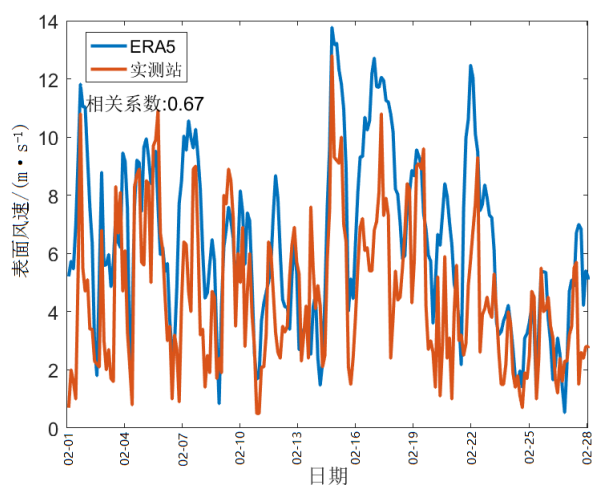
将上述公式应用到对斯托克斯漂流的分析中,波浪向也可以分解为向东和向北的两个方向的量,因此可以使用VEOF方法进行分析。浪向中包括了风浪向和涌浪向,为了更清晰地探究斯托克斯漂流与波浪场的关系,本文对风浪向和涌浪向分别进行分析。本文对斯托克斯漂流、风场和浪向的分析均采用平均值的距平值。

2 结果与分析

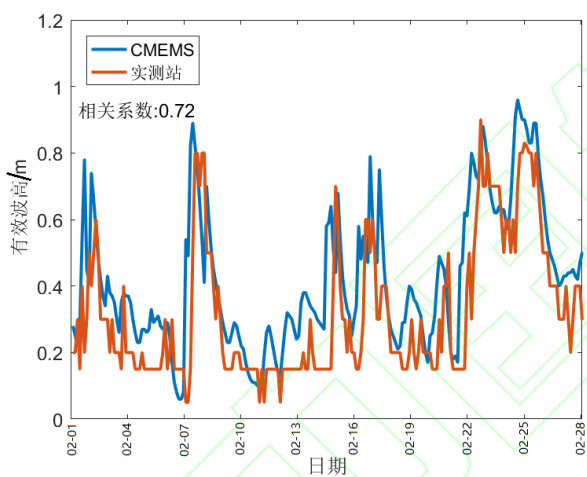
2.1 数据验证

为了验证本文所用的再分析数据在渤海、黄海的准确性,将再分析数据与实测数据进行对比验证。选取的站点为连云港站(119.4°E, 34.8°N),时间为2021年2月,实测站数据来源于国家海洋科学数据中心(<https://mds.nmdis.org.cn/>),验证结果如图2所示。连云港站2月份实测风速与再分析数据风速大小分别为5.5 m/s和6.2 m/s,可见再分析数据略大于实测数据。从时间系数图来看,两者的变化趋势相近,相关系数为0.67,有正相关性。在有效波高方面,实测站有效波高与再分析数据分别为0.38 m和0.43 m,再分析数据略大于实测数据,两者相关系数为0.72,也有显著的正相关性。

Fig. 2 Comparison of reanalysis data with observation data of wind speed and significant wave height at Lianyungang station in February 2021



(a) 表面风速



(b) 有效波高

图 2 2021 年 2 月连云港站风速和有效波高再分析数据与实测值的比较

斯托克斯漂流现象与海浪有密切的关系，因此首先需要对渤海、黄海波浪分布特征进行分析与验证。谢冬梅等^[25]利用 WAVE MODEL(WAM)海浪模式，模拟了东中国海在 60 年间的有效波高分布，结果表明春季和夏季渤海、黄海有效波高大部分小于 1.0 m，秋季高于夏季，渤海大部分海区有效波高不足 1.0 m，黄海有效波高为 0.8~1.2 m。冬季平均有效波高最大，黄海有效波高为 1.1~1.4 m。本文所用数据集中渤海、黄海气候态有效波高分布情况如图 3 所示。渤海的年有效波高在 0.8 m 以下，渤海中部和渤海海峡附近波高较高，渤海湾波高最低。黄海波高呈现随着纬度减小而变大的特征，东南部出现了有效波高的高值区，在 1.2 m 以上，而黄海北部有效波高普遍在 1.0 m 以下。从季节变化来看，冬季波高最大，黄海大部分地区可达 1.0 m 以上，黄海南部最高，可达 1.6 m 以上，渤海可达 0.8 m 以上。秋季次之，黄海中北部波高小于 1.0 m，其他地区与冬季接近。春季有效波高平均较低，黄海北部和渤海普遍小于 1.0 m，黄海南部大于 1.0 m。夏季渤海有效波高最低，普遍低于 0.6 m。这一结果与谢冬梅等^[25]的研究结果比较接近。在波向的研究方面，孙湘平^[26]综合了前人的研究，研究结果表明渤海、黄海冬季和秋季盛行偏北向浪，春季和夏季盛行偏南向浪。图 3 中也表现了数据集中平均浪向的分布特征。平均波向在秋季、冬季的分布方向与冬季风向一致，渤海和黄海北部是西北向占主导，黄海南部是北向占主导。春季、夏季的分布特征与夏季风向一致，由东南向占主导。综上所述，可以佐证数据集在渤海、黄海的准确性。

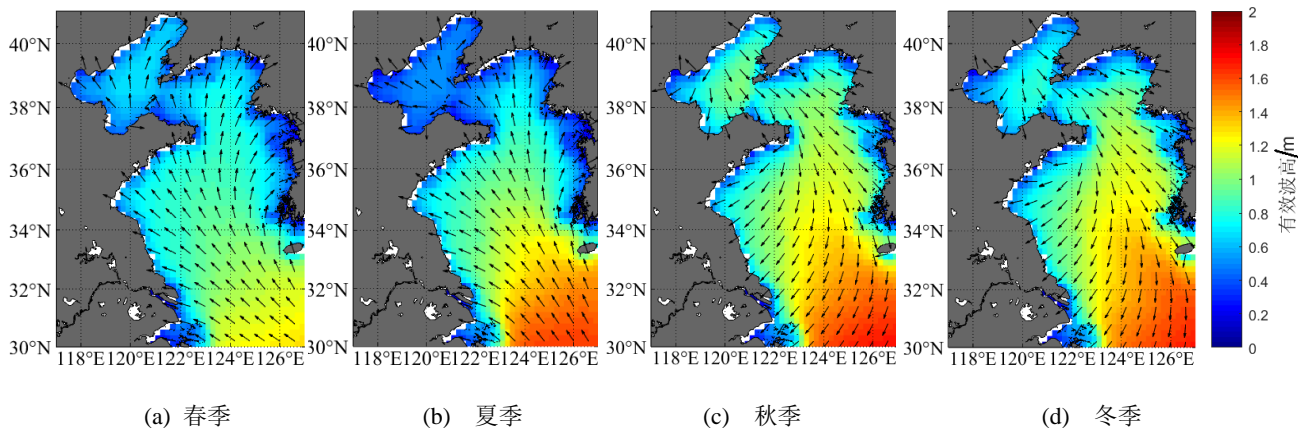


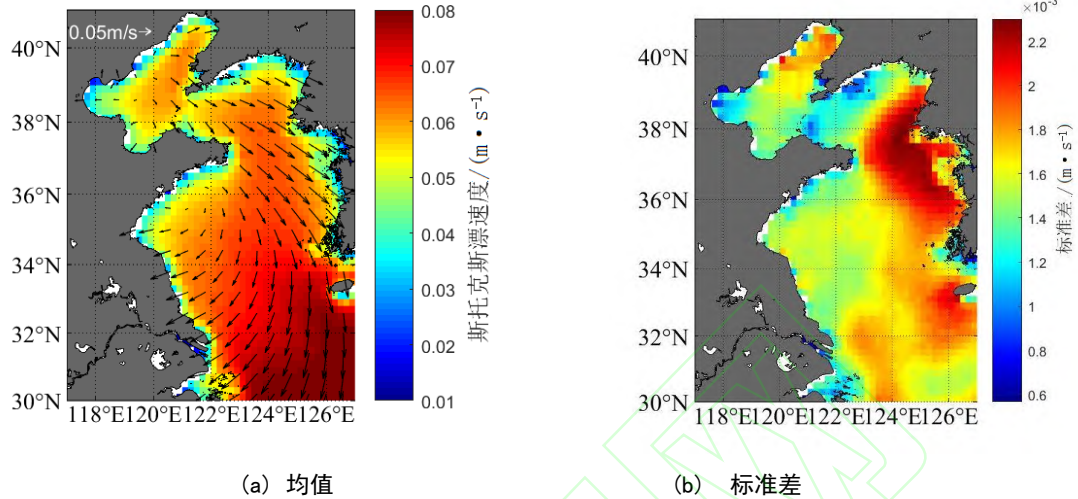
图 3 渤海、黄海波高与波向的季节分布

Fig. 3 Seasonal distribution of mean wave direction and wave height in the Bohai Sea and Yellow Sea

2.2 渤海、黄海斯托克斯漂流分布特征

为了更直观地认识渤海、黄海斯托克斯漂流的分布特征,计算了渤海、黄海区域的斯托克斯漂流

气候态平均值以及标准差,结果如图4所示,其中箭头方向表示速度方向,箭头长度表示速度大小。

**图4 渤海、黄海斯托克斯漂流气候态均值与标准差****Fig. 4 Mean value and standard deviation of Stokes drift on climate states in the Bohai Sea and Yellow Sea**

渤海、黄海托克斯漂速度为 0.03~0.08 m/s。与前文所述有效波高和风速的分布特征相近,斯托克斯漂流也呈现出渤海小于黄海的特征。在黄海南部,斯托克斯漂流速度达到最大值,可达到 0.08 m/s 以上。而在渤海的大部分海域,斯托克斯漂流速度在 0.06 m/s 以下。从方向来看,斯托克斯漂流速度方向总体呈现由北向南传播的特征,与渤海、黄海气候态风向分布一致。渤海、黄海年平均的斯托克斯漂流速度的标准差分布(图4(b))显示,渤海海峡附近年变化率小,斯托克斯漂流年际变化并不显著。渤海北部,黄海东北部沿岸区域和济州岛附近海区年变化率较大,斯托克斯漂流速度年际的变化幅度较大。

从季节变化来看(图5),在春、夏两季的主导方向是由南向北传播,秋、冬两季是由北向南传播,与渤海、黄海季风变化特征一致。从大小上看,冬季的斯托克斯漂流速度最大,可达 0.08 m/s 以上,秋季渤海斯托克斯漂流速度与冬季相似。春季渤海、黄海斯托克斯漂流速度较小,为 0.05~0.06 m/s。夏季最低,大部分区域低于 0.05 m/s,但是在黄海南部较高,可达 0.08 m/s。各季节斯托克斯漂流速度最大值均出现在黄海南部,最小值均出现在渤海。在夏季,斯托克斯漂流速度在黄海南部最大,渤海最小,随着纬度减小而增加的特征非常明显。曹育^[27]利用经验公式计算了渤海夏季斯托克斯漂流的分布情况,结果表明夏季渤海斯托克斯漂流方向是由南向

北传播,大小为 0.04~0.10 m/s,本文结果与其研究结果相近。

2.3 斯托克斯漂流影响因素

利用 VEOF 方法探讨风、浪之间的关联性,前人已有很多相关的研究。裘沙怡等^[28]利用 VEOF 方法分析了南海表面风场的分布特征并探究了风场与波浪场的相关性,证明了季风是影响南海有效波高变化的重要因素。本研究利用再分析数据对 1993—2021 年的年平均斯托克斯漂流、风场以及浪向进行 VEOF 分析,可以得到更加详细的海表斯托克斯漂流速度、海表面风场以及浪向的分布特征。表1是各个海洋要素前两个模态的方差贡献率。图6给出了斯托克斯漂流、表面风场、风浪向和涌浪向的空间分布和第一模态时间系数变化。斯托克斯漂流的第一模态方差贡献率为 49.1%,是斯托克斯漂流的主要特征模态。从时间系数来看,高值年份出现在 1997 年、2006 年、2018 年和 2021 年,低值年份出现在 1995 年、2005 年和 2017 年,时间系数周期性不明显。第一模态的空间分布表现了该模态时间系数的变化对空间尺度上的影响范围和强度。当时间系数为正值时,斯托克斯漂流速度方向是由东南向主导,表明了斯托克斯漂流矢量向北分量增强,向东分量减小的特征。速度大小增加的高值区出现黄海南部,济州岛附近。

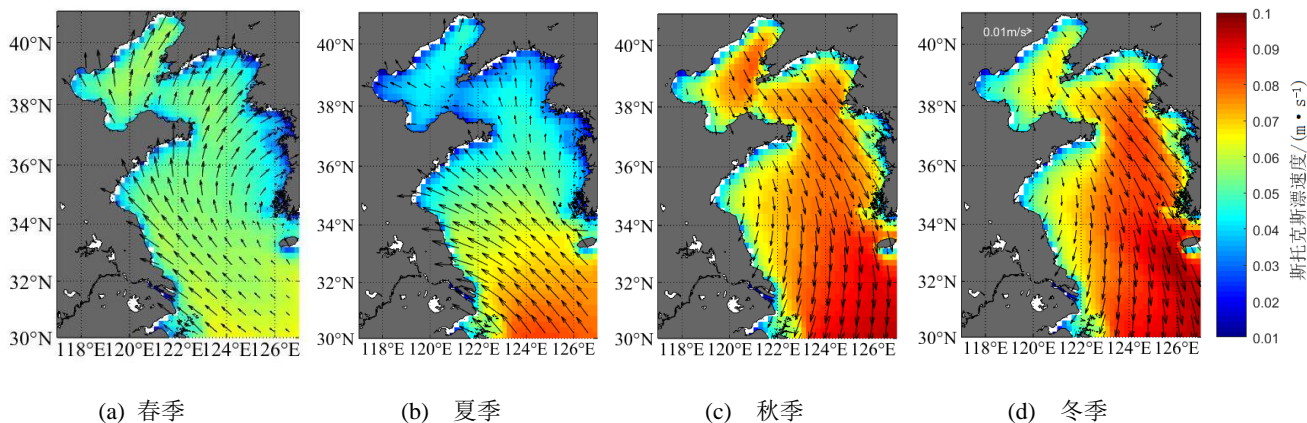


图5 渤海、黄海斯托克斯漂流的季节分布

Fig. 5 Seasonal distribution of Stokes drift in the Bohai Sea and Yellow Sea

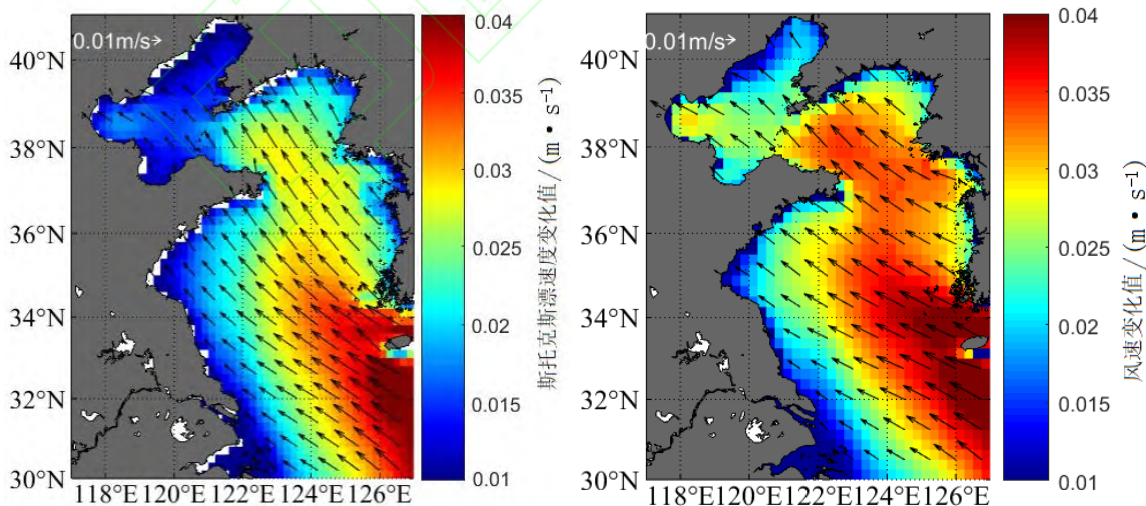
表1 前两个 VEOF 模态的方差贡献率

Tab. 1 Variance contributions by the first two leading VEOF modes

海洋要素	方差贡献率/%	
	第一模态	第二模态
斯托克斯漂流	49.1	20.4
风场	44.2	19.6
风浪向	50.2	16.3
涌浪向	60.6	9.1

风场 VEOF 第一模态分布特征分析结果表明：当时间系数为正值时，风场的距平场为东南季风，主导方向是由东南向西北，说明风的向北分量有增加的趋势，向南分量有减小的趋势。当时间系数为

负值时则相反，风场距平场为西北季风。风场第一模态的方差贡献率为 44.2%，是渤海、黄海表面风场的主导特征模态，反映了整个渤海、黄海海区受东亚季风影响的特征。陈心一等^[29]利用 VEOF 方法分析冬中国海表面风场特征，表明中国近海风场的典型特征是冬-夏振荡类型，赵喜喜^[30]也有相似的结果。与斯托克斯漂流第一模态对比可知，风场方向和斯托克斯漂流速度方向变化一致。风场时间系数出现高值和低值的年份与斯托克斯漂流一致，两者时间系数的相关系数为 0.96 (表 2)，有很强的正相关性。这表明第一模态风场是影响斯托克斯漂流的重要因素。



(a) 斯托克斯漂流空间分布

(b) 表面风场空间分布

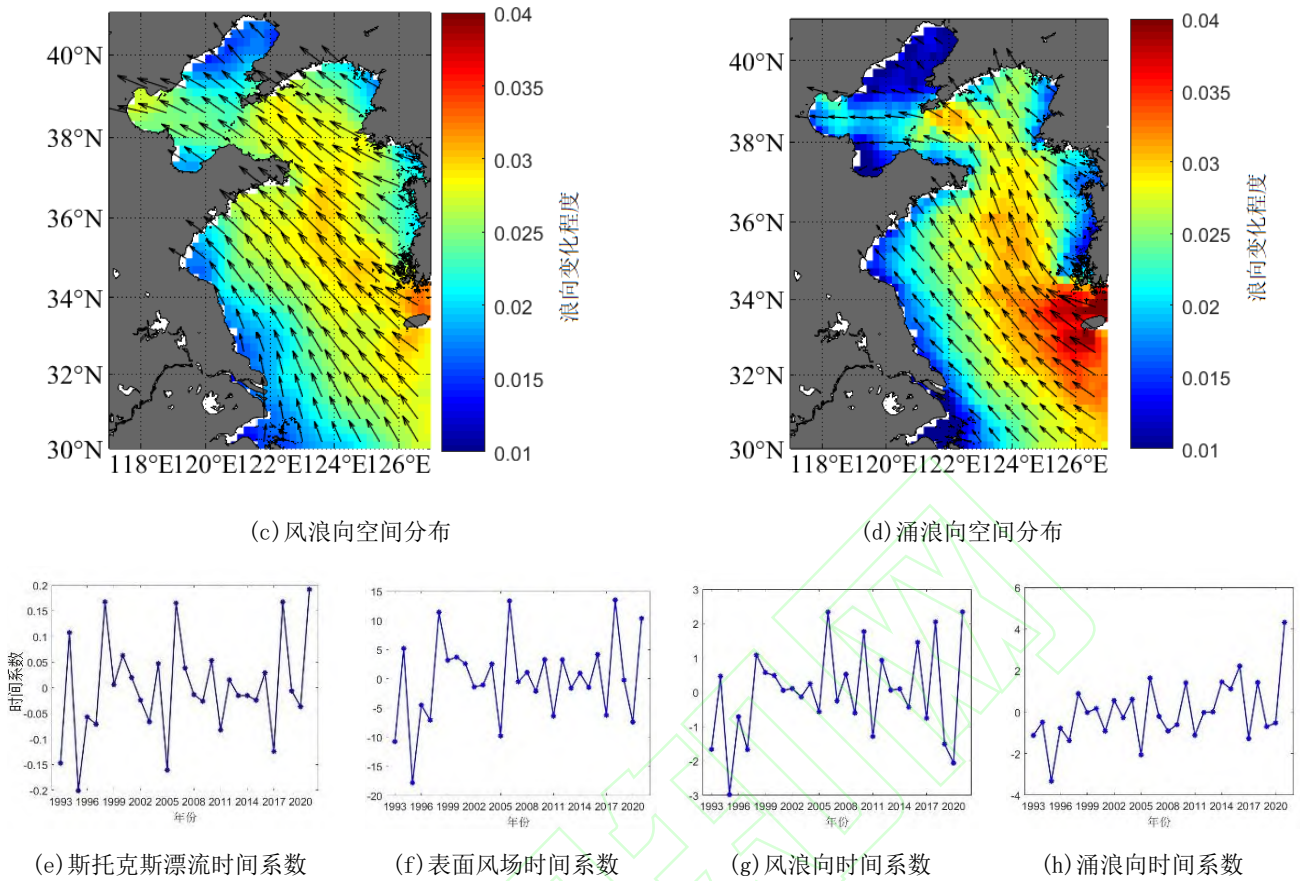


图6 斯托克斯漂流、风场、风浪向和涌浪向第一模态的空间分布与时间系数

Fig. 6 Spatial distribution and time coefficients of the first mode of Stokes drift, wind field, wind-wave direction, and swell direction

表2 各海洋要素时间序列与斯托克斯漂流时间序列的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between the time series of the different oceanographic elements and the Stokes drift time series

海洋要素	相关系数	
	第一模态	第二模态
风场	0.96	-0.72
风浪向	0.83	-0.45
涌浪向	0.78	0.65

风浪向第一模态和涌浪向第一模态方差贡献率分别为 50.2%和 60.6%。与斯托克斯漂流相似,风浪向和涌浪向的第一模态都表现出东南向占主导的特征。从大小来看,在黄海东南部济州岛附近海区存在高值区,与斯托克斯漂流的特征一致。时间系数方面,风浪向与斯托克斯漂流的相关系数为 0.83,涌浪向为与斯托克斯漂流的相关系数为 0.78,都有很强的正相关性。说明第一模态斯托克斯漂流分布特征与风场、浪场都有很强的关联性。

斯托克斯漂流的第二模态表现出与第一模态不

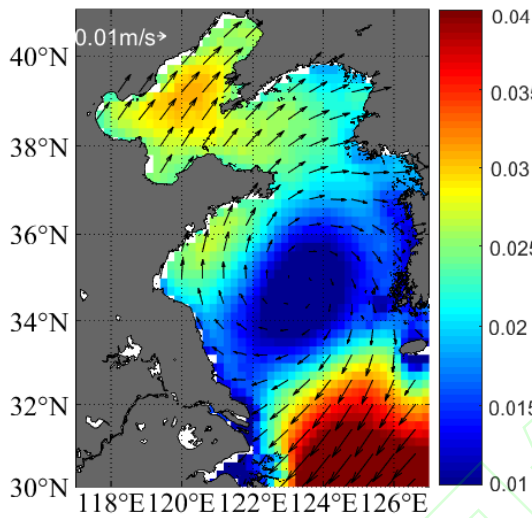
同的特征(图 7)。从空间分布来看,在渤海和黄海北部,主导方向是由西南向东北传播,渤海北部和北黄海有高值区。在南黄海中部出现低值区,并且呈现顺时针运动的特点。时间系数总体呈现增大的趋势。反映出渤海北部、黄海北部斯托克斯漂流速度变化较为剧烈,而黄海南部变化较小的特征。风场第二模态高值区出现在渤海西北部和黄海南部,低值区出现在黄海北部。在渤海,方向是东北向占主导,在黄海是西南向占主导。高值区出现在渤海北部和黄海南部,低值区在黄海北部。方差贡献率为 20.4%。从时间系数来看,第二模态的风场与斯托克斯漂流的时间序列变化特征不一致,两者的相关系数是-0.72,有负相关性。风浪向的第二模态空间分布与风场相似,其时间系数与斯托克斯漂流对应的时间系数的相关系数为-0.45,相关性不显著。以上结果表明风场的第二模态以及由风场引起的相应风浪要素并不是影响斯托克斯漂流第二模态分布的主因,因此进一步探究涌浪对斯托克斯漂流的作用。

涌浪向的第二模态空时间系数与斯托克斯漂流的相关系数为 0.65,有正相关性。从空间分布来看,

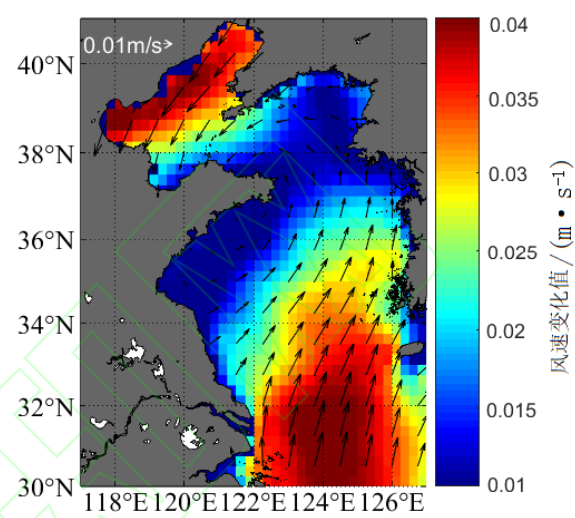
在渤海出现了高值区，方向是东北向占主导，在黄海东南部也出现了顺时针运动的特征，与斯托克斯漂流相似。综合风场、风浪和涌浪的第二模态可知，涌浪要素是影响斯托克斯漂流第二模态的主要因素。

综上所述，斯托克斯漂流的第一特征模态的空间分布和时间系数与风场、风浪向和涌浪向都有很强的一致性。风场的时间系数与斯托克斯漂流的相

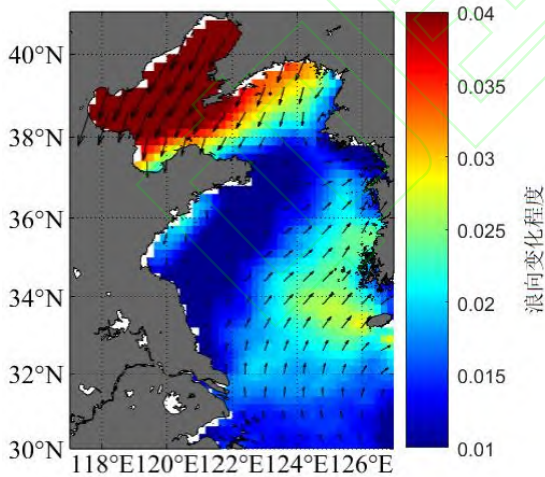
关性最强，可以得出第一模态的斯托克斯漂流的特征主要受风场的影响。而在第二特征模态中风场和风浪向的分布特征与斯托克斯漂流速度并不一致，且时间系数也没有明显的关联性，而涌浪向的分布特征与斯托克斯漂流有更多的相似点，两者的时间系数是正相关性，证明斯托克斯漂流第二模态的特征主要受涌浪影响。



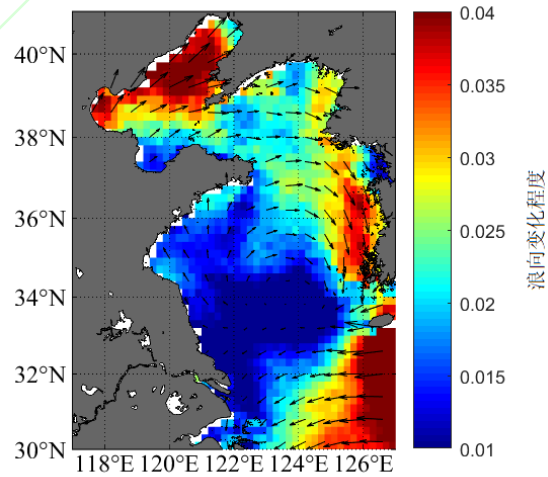
(a) 斯托克斯漂流空间分布



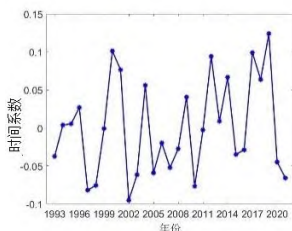
(b) 表面风场空间分布



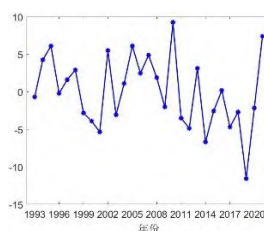
(c) 风浪向空间分布



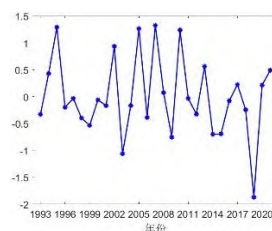
(d) 涌浪向空间分布



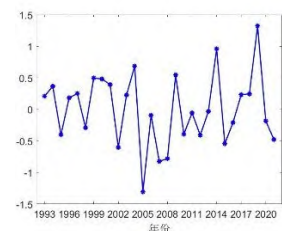
(e) 斯托克斯漂流时间系数



(f) 表面风场时间系数



(g) 风浪向时间系数



(h) 涌浪向时间系数

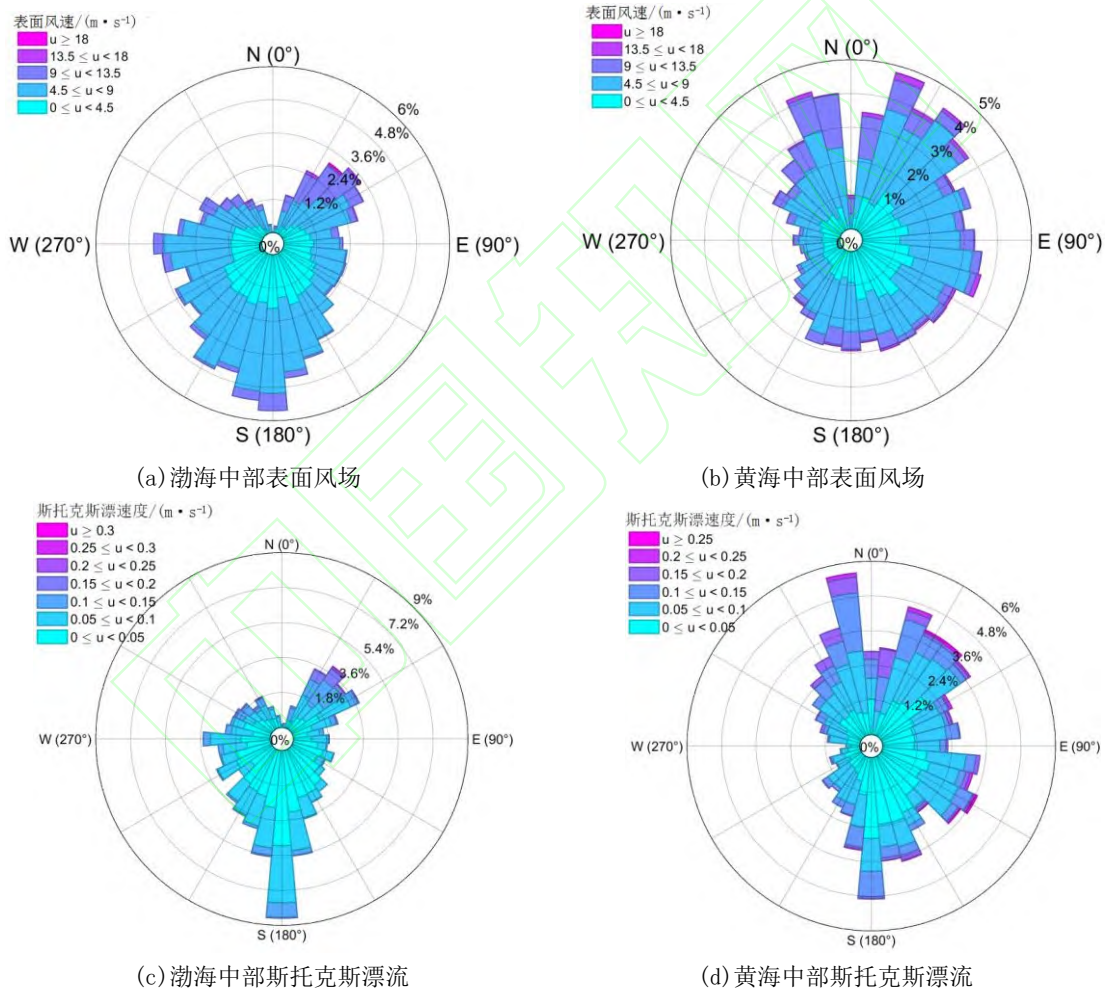
图7 斯托克斯漂流、风场、风浪向和涌浪向第二模态的空间分布与时间系数

Fig. 7 Spatial distribution and time coefficients of the first mode of Stokes drift, wind field, wind-wave direction, and swell direction

2.4 斯托克斯漂流方向

斯托克斯漂流是由风场和波浪场共同主导的一种海洋现象，关于斯托克斯漂流的方向研究也应当从这两个因素着手。因为中央海区海浪发展比较充分，受海岸地形影响较小，所以本文分别选取了位于渤海和黄海海区中央的两个区域(38°N—39°N, 119°E—120°E和33°N—34°N, 123—124°E)，对2019年全年的方向进行统计，结果如图8所示。从图8中可以得出，表层斯托克斯漂流速度方向和风向在两个区域都有相似分布特征，而与浪向相差

较大。关于斯托克斯漂流和风向的关系，前人已经有相关研究并给出了解释。Tuomi等^[31]分析了波罗的海斯托克斯漂流速度方向与表面风场方向的关系，表明在波罗的海区域，表层斯托克斯漂流速度方向与表面风向是一致的。Webb等^[32]提出因为斯托克斯漂流对海浪谱的高频部分更敏感，所以表层斯托克斯漂流速度方向和风向有很强相关性。综合本文的研究可以得出，渤海和黄海海区内斯托克斯漂流方向受风场的影响更大。



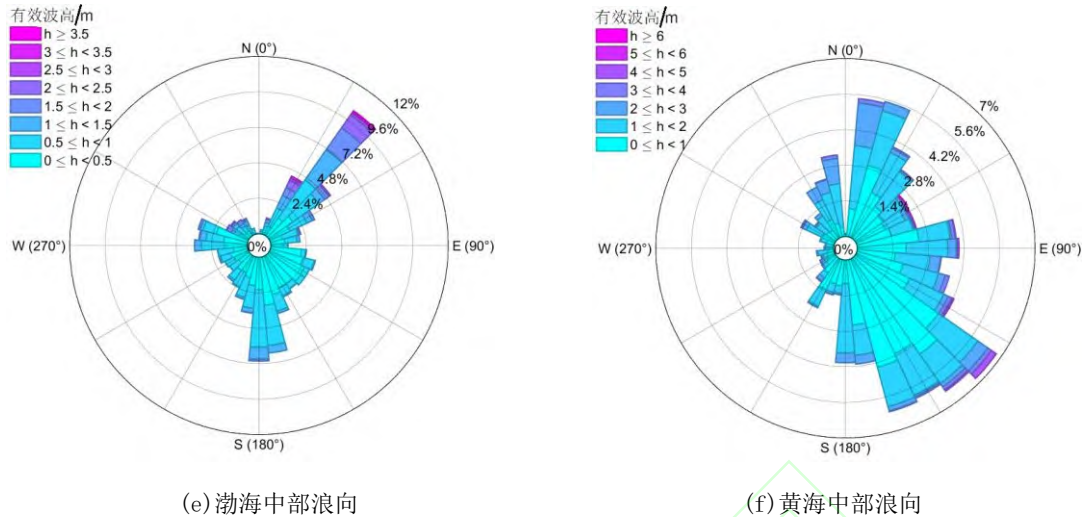


图 8 表面风、斯托克斯漂流和浪玫瑰图

Fig. 8 Rose diagrams of the surface wind, Stokes drift and surface wave

3 结论

本文对渤海、黄海表面斯托克斯漂流速度的年平均分布和季节平均分布特征进行分析，并且采用 VEOF 方法分别对风、斯托克斯漂流和浪向时间序列进行分解，探讨了表层斯托克斯漂流速度与风场、波浪场之间的关系。

渤海、黄海表层斯托克斯漂流速度为 0.03~0.08 m/s，总体呈现黄海大于渤海的特点。秋冬季斯托克斯漂流速度是北向占主导，春、夏两季是南向占主导，与渤海、黄海盛行风向一致。风场、风浪向和涌浪向与斯托克斯漂流的第一特征模态的空间分布和时间系数都有很强的一致性，且风场与斯托克斯漂流的相关性最强。在第二特征模态中，风场、风浪向的分布特征与斯托克斯漂流不一致，而涌浪向的分布特征与斯托克斯漂流有更多的相似点，且两者的时间系数呈正相关。综上可以证明斯托克斯漂流是由风和海浪共同主导的一种海洋物理现象，斯托克斯漂流的第一模态特征受表面风场、风浪和涌浪的共同影响，而第二模态反映出受涌浪影响的特征。通过对渤海、黄海中部斯托克斯漂流方向，风向和平均浪向的对比得出，斯托克斯漂流速度方向的分布特征与风向有更强的一致性。

斯托克斯漂流对海洋表层流产生了重要贡献，建立风场、风浪和涌浪对斯托克斯漂流的统计回归关系，有利于对斯托克斯漂流的形成机制有更清晰的认识，明确不同的海洋要素在斯托克斯漂流形成中的作用。在实际应用中，准确模拟斯托克斯漂流的数值显得尤为重要，定量评估风、浪要素在斯托

克斯漂流模拟中的作用将是未来的研究重点。

参考文献:

- [1] VAN DEN BREMER T S, BREIVIK Ø. Stokes drift[J]. Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences, 2017, 376(2111):20170104.
- [2] WEBB A, FOX-KEMPER B. Wave spectral moments and Stokes drift estimation[J]. Ocean modelling, 2011, 40(3/4): 273-288.
- [3] PERRIE W, TANG C L, HU Y, et al. The impact of waves on surface currents[J]. Journal of physical oceanography, 2003, 33(10): 2126-2140.
- [4] POLTON J A, LEWIS D M, BELCHER S E. The role of wave-induced Coriolis-Stokes forcing on the wind-driven mixed layer[J]. Journal of physical oceanography, 2005, 35(4): 444-457.
- [5] 张坤兰. 北太平洋波浪输运和西边界流的季节变化[D]. 青岛:中国海洋大学,2008.
- [6] 肖林,史剑,蒋国荣,等. Stokes 漂流对全球海表面温度模拟的影响[J]. 海洋通报,2018,37(1):55-62.
- [7] 回贞立. 波浪对表层海流以及 Ekman 层风能输入的影响研究[D]. 青岛:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2017.
- [8] 史剑,朱超,刘经东,等. 台风过程中浪致 Stokes 漂流对海洋上层温度影响的数值模拟 [J]. 海洋与湖沼,2019,50(6):1209-1222.
- [9] 董祥晖,吴克俭,李瑞,等. 南大洋 Stokes 漂流在厄尔尼诺

- 衰退过程中的降温作用[J]. 海洋科学进展,2022,40(2):175-186.
- [10] LIU G Q, PERRIE W A, HE Y J. Ocean surface Stokes drift from scatterometer observations[J]. International journal of remote sensing, 2014, 35(5): 1966-1978.
- [11] CRAIK A D D, LEIBOVICH S. A rational model for Langmuir circulations[J]. Journal of fluid mechanics, 1976, 73(3): 401-426.
- [12] 任春平,白玉川. 规则波导斯托克斯漂流对污染物输移的影响[J]. 水科学进展,2017,28(4):605-613.
- [13] YANG Y Q, LI Y, LI J, et al. The influence of Stokes drift on oil spills: Sanchi oil spill case[J]. Acta oceanologica sinica, 2021, 40: 30-37.
- [14] DOBLER D, HUCK T, MAES C, et al. Large impact of Stokes drift on the fate of surface floating debris in the South Indian Basin[J]. Marine pollution bulletin, 2019, 148: 202-209.
- [15] ISOBE A, KUBO K, TAMURA Y, et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 89(1/2): 324-330.
- [16] IWASAKI S, ISOBE A, KAKO S, et al. Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: a numerical model approach in the Sea of Japan[J]. Marine pollution bulletin, 2017, 121(1): 85-96.
- [17] 仇颖. 不同 Stokes 漂流公式选取对模拟海洋上层 Langmuir 环流影响的大涡模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [18] BREIVIK Ø, JANSSEN P A E M, BIDLOT J R. Approximate Stokes drift profiles in deep water[J]. Journal of physical oceanography, 2014, 44(9): 2433-2445.
- [19] 张晓爽, 王智峰, 王斌, 等. 全球 Stokes 漂流的时空分布特征[J]. 海洋科学,2015,39(1):93-103.
- [20] 王京富,陶爱峰,解淑亚,等. 中国邻近海域 Stokes 漂流速度分布特性研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版):1-11[2024-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20240304.1010.002.html>.
- [21] TAMURA H, MIYAZAWA Y, OEY L Y. The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2012, 117:C08021.
- [22] SAYOL J M, ORFILA A, OEY L Y. Wind induced energy-momentum distribution along the Ekman-Stokes layer. Application to the Western Mediterranean Sea climate[J]. Deep sea research part I: oceanographic research papers, 2016, 111: 34-49.
- [23] HARDY D M, WALTON J J. Principal components analysis of vector wind measurements[J]. Journal of applied meteorology and climatology, 1978, 17(8): 1153-1162.
- [24] ZHANG G S, XU Q, GONG Z, et al. Annual and interannual variability of scatterometer ocean surface wind over the South China Sea[J]. Journal of ocean university of China, 2014, 13: 191-197.
- [25] 谢冬梅,陈永平,张长宽. 东中国海波浪分布特征研究[J]. 水运工程,2015(2):189-196.
- [26] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京:海洋出版社,2006:170-175.
- [27] 曹育. Stokes 漂流对渤海夏季海洋动力过程的影响[D]. 天津:天津大学,2019.
- [28] 裘沙怡,梁楚进,董昌明,等. 南海海面风、浪场时空变化特征及其关系分析[J]. 海洋学研究,2013,31(4):1-9.
- [29] 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.
- [30] 赵喜喜. 中国海散射计风、浪算法研究及海面风场、有效波高的时空特征分析[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2006.
- [31] TUOMI L, VÄHÄ-PIIKKIÖ O, ALENIUS P, et al. Surface Stokes drift in the Baltic Sea based on modelled wave spectra[J]. Ocean dynamics, 2018, 68: 17-33.
- [32] WEBB A, FOX-KEMPER B. Impacts of wave spreading and multidirectional waves on estimating Stokes drift[J]. Ocean modelling, 2015, 96: 49-64.