

任惠茹, 李国胜, 郭腾蛟, 等. 1950~2011年渤海地区海表风场的季节特征与多尺度变化分析[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1430-1438. [Ren Huiru, Li Guosheng, Guo Tengjiao et al. Multi-scale Variability of Surface Wind Direction and Speed on the Bohai Sea in 1950-2011. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1430-1438.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.09.016

1950~2011年渤海地区海表风场的 季节特征与多尺度变化分析

任惠茹¹, 李国胜², 郭腾蛟^{2,3}, 张悦^{2,3}, 欧阳宁雷^{2,3}

(1. 国家基础地理信息中心, 北京 100830; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于 1950~2011 年的 NCEP/NCAR 再分析资料, 对渤海 10 m 风场的风速与风向变化进行多尺度分析。利用小波分析、交叉谱分析等方法对渤海海域的海表风速、风向的变化趋势以及周期进行研究。分析发现: 渤海地区海表风的风向与风速除了存在显著的季节性变化特征外, 在年际、年代际的变化尺度上也有明显的周期性。风向存在 1 a、8.7 a、15.8 a 的显著周期, 风速存在 1 a、6.3 a、15 a 的显著周期。风向与风速在时间尺度分别为 20 a、5.71 a、2.67 a 时存在显著共振周期; 共振周期受东亚季风、西太平洋副热带高压的年际、年代际变化的影响呈现出多尺度变化周期。

关键词: 渤海; 风速; 风向; 多尺度周期; 共振周期

中图分类号: P47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)09-1430-09

海表风是海洋学与气象学的基本要素, 它通过调节海气热通量、湿度、水蒸汽以及气溶胶等影响区域以及全球的气候变化, 同时海表风也影响区域海流、波浪、水团等运动, 是研究大气与海洋之间能量交换和物质交换的重要因素^[1,2]。海表风产生的风能与波浪能可以提供绿色能源, 利用与开发风能、波浪能资源是未来研究的热点^[3]。根据渤海沿岸各站实测资料与前人的研究, 渤海海域年内冬季盛行西北季风, 夏季盛行西南季风, 偏南、偏东风也会出现^[4,5]。平均风速也有明显的季节变化, 冬季受南下的冷空气影响, 12 月出现最大值, 平均风速普遍高于 7 m/s; 春季在气旋活动的影响下, 风速仅次于冬季, 4 月风速较大, 平均风速也在 6 m/s 左右; 夏季风速最小, 出现在 8 月^[6,7]。

前人研究主要集中在海表风速、风向的季节变化以及在此变化过程中对波浪的作用、环流的影响, 对于风场的长时间多尺度变化过程研究较少^[8,9]。海表风是海洋上层运动的主要动力来源, 是形成波浪场的直接动力与区域环流场的影响因

素, 风的发展和变化过程决定海区的波浪变化特征^[10]。首先, 在长期气候变化背景下区域风应力场会随着气候变化作长期波动变化, 而波浪的长期变化过程会随着风应力场的长期变化而变化^[11]。其次, 风场本身也是海洋大气动力系统中至关重要的因素, 在波浪、环流、风暴潮等海洋数值模型中, 风场通常首先确定作为输入因子进行模型的构建^[12]。第三, 风场是影响波候的主要因素, 是对航海、海洋资源开发与利用、海洋水文保障、防灾减灾的必要基础^[13]。因此, 海表风场的研究分析是海洋动力过程、海洋能源开发的重要基础。风向和风速是风场研究领域描述风场的主要参数, 尤其是两者的联合分布至关重要。本文尝试对渤海海域海表风场风速、风向进行多尺度变化特征分析, 为研究多尺度的环流运动和动力输沙提供理论基础。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

文中所讨论的风场数据来自美国 NCEP/

收稿日期: 2016-08-31; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271026)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41271026).]

作者简介: 任惠茹(1983-), 女, 河北石家庄人, 博士, 主要从事海岸带演化模拟与海洋环境研究。E-mail: renhr.12b@igsnnr.ac.cn

NCAR 所整理的 1950~2011 年再分析全球月平均 10 m 层风场径向风、纬向风资料,空间水平分辨率为 $1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$,所用时间范围在 1950 年 1 月~2011 年 12 月。将风场径向风(V)、纬向风(U)差分成 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的空间分辨率。原始径向风、纬向风逐月资料进行差分后,与地形数据进行叠加,得到渤海海域内逐月的风场数据。

1.2 分析方法

计算风向的角度,转动角每次都小于 180° 且整个时间段内的总变化量不超过 360° 的情况下,采用单位矢量法计算矢量风向^[14,15],根据数值就可得到平均风向,且与矢量法求得的统计结果基本相同。文中所采用的风向是按照 16 个方位记录的,累计某一个时期(月)内的各个方位风向的次数,并以各个风向发生的次数占该时期内累计各个不同风向的总次数百分率来统计,即风向频率,参见表 1。经过分析得到该月份海域不同风向频率以及各个风向内的平均风速,以 1965 年 4 月的风场为例,其中最大值为 48.9%,即此时渤海海域主导风向为东南风(NW)。

对主导风向范围内的 U 、 V 计算所得风向角度进行平均得到平均风向角度值;主导风向所对应的风速平均后得到主导风向内的平均风速,逐月计算形成该海域的月平均风速、风向 2 个时间序列。利用小波分析、交叉谱分析对时间序列进行多尺度分析。

2 渤海海域风场的季节变化

渤海位于东亚季风区,海表风场表现出明显的季节性特征。冬季风在 11 月份开始,逐渐增强到次年 1 月份达到最值,2 月份又开始减弱,将 11 月至翌年 2 月划分为冬季。夏季风 5 月形成,到 6、7 月份达到最大,8 月份开始逐渐减弱,因此夏季为 5 至 8 月。春、秋季分别为 3、4 月和 9、10 月^[16,17]。将风场月平均数据进行季节划分,按照冬季(11~2 月)、夏季(5~8 月)、春季(3~4 月)、秋季(9~10 月)计算平均值,计算 4 个季节内风场的风向变化与风速的空间分布。

从渤海风场四季变化图(图 1),可以看到:冬季该海域盛行西北风,风向稳定、风速较强,平均风速在 5 m/s 左右,最大风速可达 7.5 m/s,出现在渤海海峡,最小风速出现在渤海湾南部。夏季除了在辽东湾海域出现南风,其他海区盛行东南风;风速相对较小,主要范围在 2~5 m/s。春、秋季属于过渡季节,研究区上空的气压场格局处于转变阶段,风向零乱、多变、不稳定,气旋活动频繁,风速范围在 2~6 m/s。冬季渤海海区风向为西北向,渤海湾西岸的风应力较小,东岸较大,风应力量值由西向东逐渐增大,至渤海海峡范围内风应力达到最大。夏季南部为东南风,北部有转成南风之势,风应力量值由西向东逐渐减小。

分析 62 a 来风向与风速的变化趋势,选取冬、夏季为主要研究对象,是因为冬、夏季风向相对统一,春、秋季风向紊乱。对冬、夏季的风向风速逐年取均值得到年变化时间序列(图 2)。可以发现:冬季风向的变化相对平稳,略有上升,风向角度约 290° 转向 320° 左右,表明风向由原来的西西北逐渐偏向西北,偏转角度在 30° 左右;夏季的风向略有上升且波动明显,1985~1990 年波动较大,风向角度 110° 左右增加到 130° 左右,风向由东风逐渐偏向东南风,偏转角度在 20° 左右。

冬、夏季风速的线性回归均通过了 F 检验极显著,表明冬、夏季平均风速呈现下降趋势,冬季极显著,夏季显著。冬季风速在 1970 年左右有明显的降低趋势,1970 年以后趋于稳定。1950~1958 年和 1960~1968 年冬、夏季风速有明显的波动;1970~2011 年冬季风速相对稳定,波动不如之前剧烈,夏季尤其明显,风速在 4~5.5 m/s 之间。东亚夏季风在 20 世纪 60 年代中期和 70 年代末期分别发生过一次突变,导致了风场出现两次减弱现象^[18,19]。20 世纪 70 年代中后期由于全球气候变暖,中国的临近海区冬、夏季风变弱,从而引起冬、夏季海表风场的风应力减弱,尤其是径向风应力^[20]。

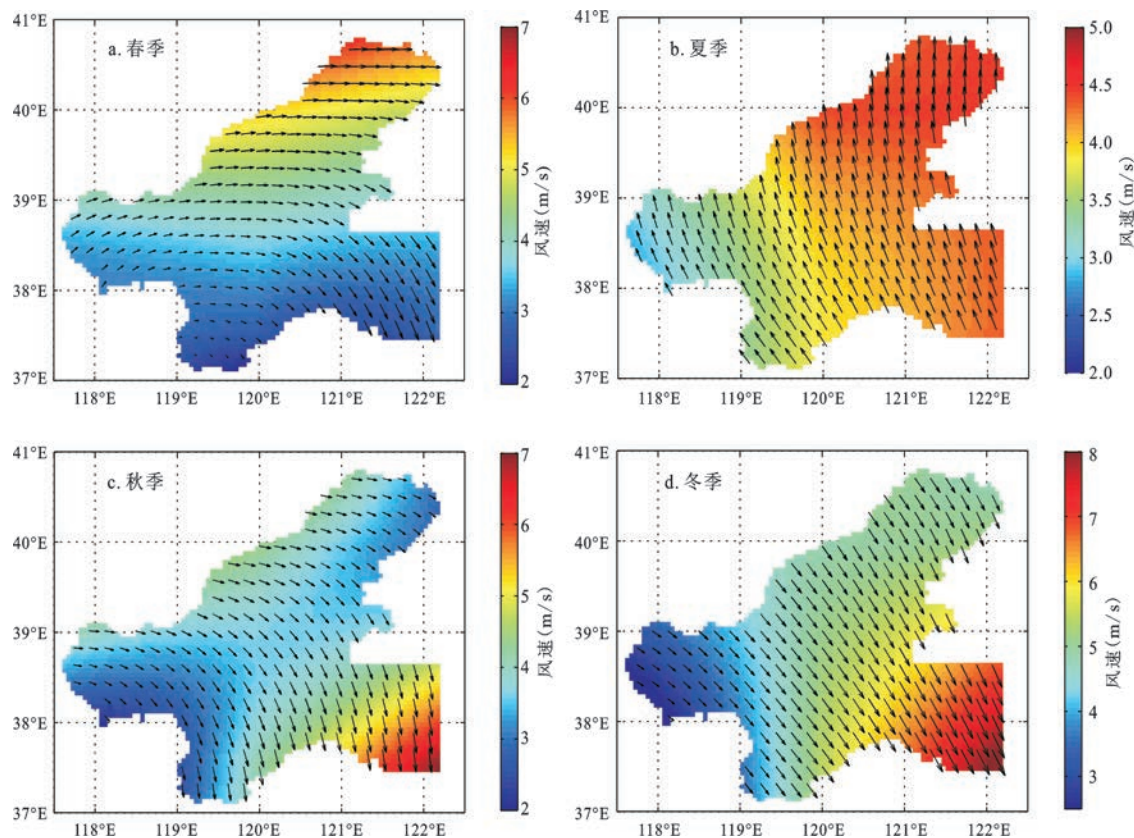
3 渤海海域风场的多尺度分析

对风速、风向 2 个时间序列进行标准化处理,

表1 渤海海域1965年4月风向频率、各风向的风速平均值

Table 1 The data of wind direction frequency, wind speed in the Bohai Sea in April 1965

风向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
风向频率(%)	2.1	2.5	1.7	2.5	6.6	3.3	1.2	2.5	1.6	1.2	1.2	2.1	1.2	10.7	48.9	10.7
风速(m/s)	2.2	2.0	2.0	2.2	2.6	2.9	2.7	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.5	3.7	4.7	4.1



注:填充的等值线图表示风速的空间变化,矢量箭头是风速方向与大小

图1 渤海海域风场的季节变化

Fig.1 Seasonal variation of wind field in the Bohai Sea

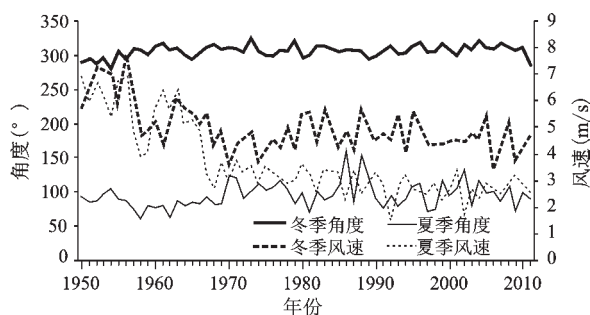


图2 1950~2011年渤海海域冬、夏季风向与速度变化趋势
Fig.2 Long term trend of wind speed and wind direction in summer and winter during 1950-2011

即可生成渤海海域内1950~2011年内的逐月风速、风向时间序列距平数列,见图3。渤海海域内风场的风向与风速的距平标准化可以得到,风向风速呈现较强的年内周期波动,风向整体变化趋势不大,但是风速出现明显的跳跃点。风速与风向角度的时间序列相关系数为 -0.288 , P 值为 0.027 ,呈现显著负相关。

3.1 渤海海域风场风速的小波分析

由图4a可以看到风速在不同时间尺度范围内的强弱分布。其中 $10.8\sim 19.2$ a时间尺度表现最强,发生在1950~1970年之间,振荡中心在1960年左右; $4.2\sim 9.1$ a时间尺度表现较强,振荡中心在1958年左右; $0.2\sim 2$ a时间尺度表现较强,在1950~2011年之间均存在此时间尺度振荡。综合分析风速在不同时间尺度的变化,在1950~1958年变化较强,1960年以后变化相对较弱;年际变化在1950~1965年变化显著,之后变化相对较弱;年代际变化在1980年以前存在明显的波动,1980年以后变化较弱。图4b小波功率谱可以看到,存在3个波峰,即年代际周期为15 a,年际周期为6.3 a,年周期为1 a,其中年代际周期变化小波方差最大,年变化周期次之,年际周期最小,表明在渤海海域风速序列多个尺度周期变化中,年代际变化周期最显著,年周期显著性次之,年际周期的变化显著性最小。

从图4b中可以看出风速存在 $0.5\sim 2$ a、 $4.2\sim 9.1$ a、 $10.8\sim 19.2$ a尺度的变化周期。利用3种时间尺度

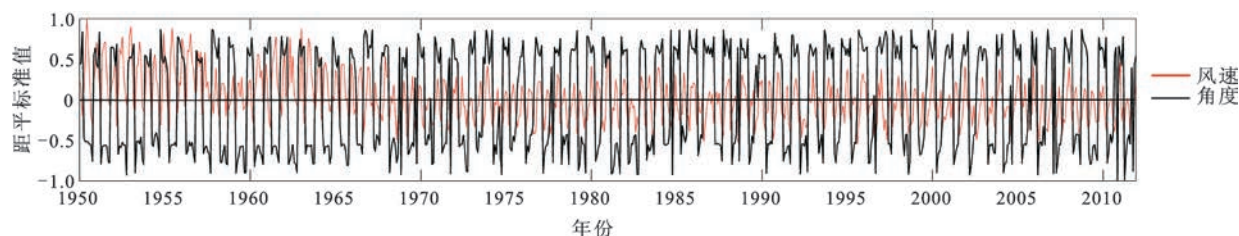
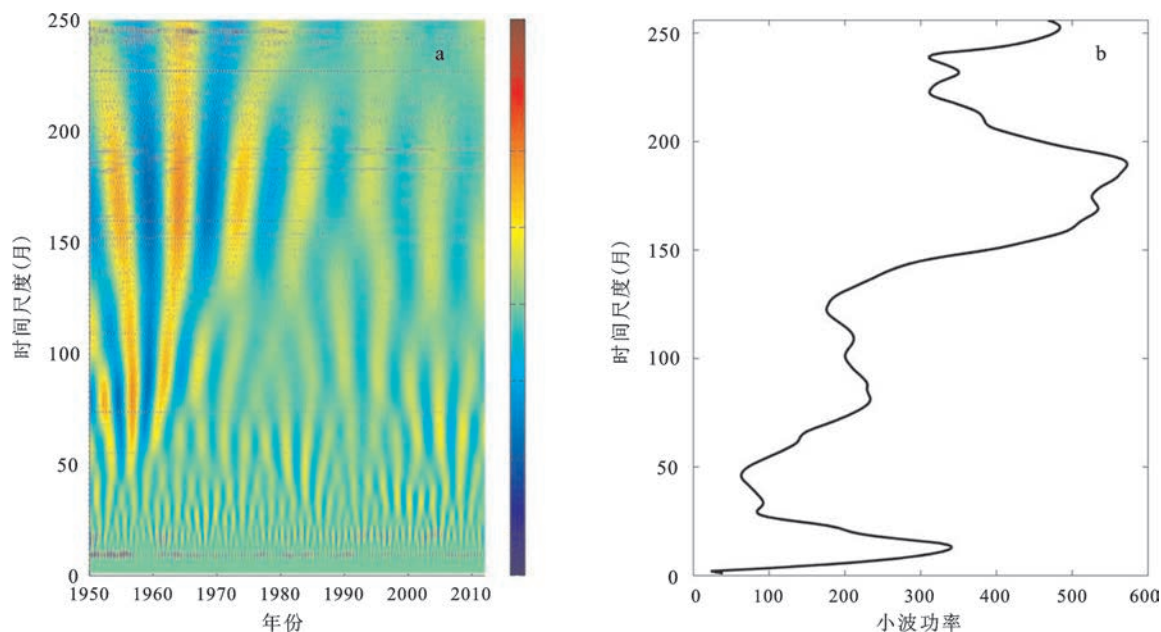


图3 1950~2011年逐月渤海海域风场角度与速度标准化

Fig.3 The standardization of average monthly wind speed and wind direction in 1950-2011



a. 小波变换实部的时频分布;b. 小波功率谱随时间尺度变化

图4 1950~2011年逐月渤海海域风场速度小波分析

Fig.4 Wavelet analysis of month-averaged wind speed of the Bohai Sea in 1950-2011

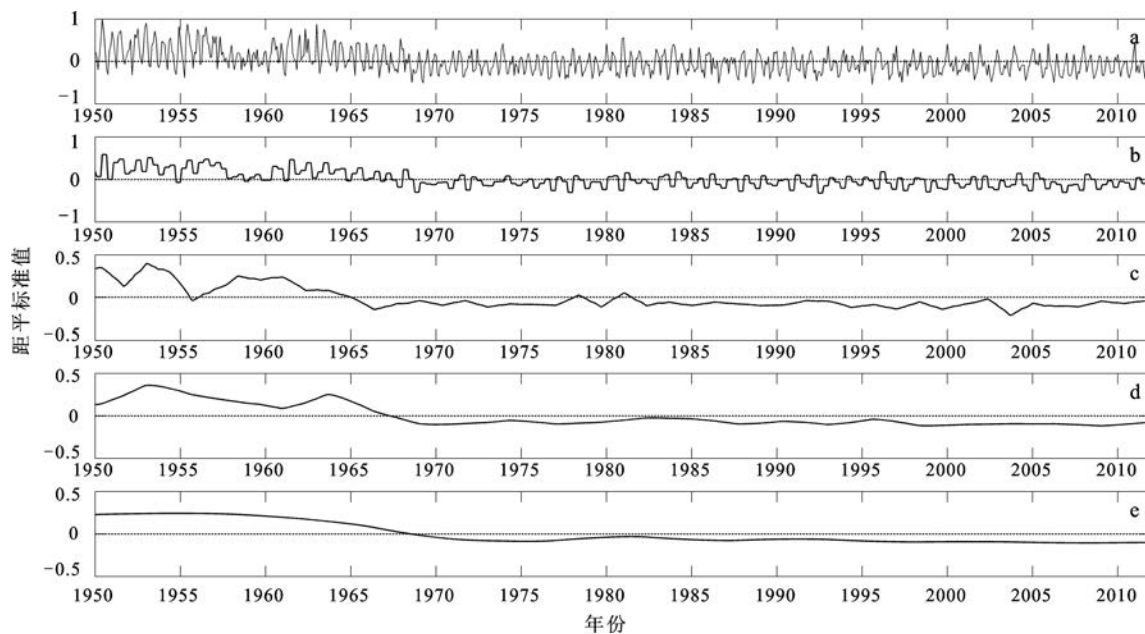
变化成分来重构风速的年变化、年际变化、年代际变化以及利用小波 DB6 重构的趋势变化(图 5)。从整体变化趋势线来看,风速在 1950~2011 年有所下降,在 1967 年之前距平值为正值,1967 年为风速变化的转折点。渤海海域月平均风速在 1950~1960 年与 1960~1967 年这 2 个阶段波动较强,1967 年以后风速略有减少,但总体呈现稳定的变化趋势。

3.2 渤海海域风场风向的小波分析

图 6 是渤海海域风场的风向角度的小波变化系数的时频分布情况。由图 6a 可以看到,风向不同时间尺度变化的强弱分布,其中 0.2~2 a 时间尺度表现最强,发生在整个时间序列内;13.3~18.4 a 时间尺度在 1975~2000 年表现较强,振荡中心在 1990 年前后;6.7~9.2 a 时间尺度主要在 1950~1985

年之间表现较强,振荡中心在 1970 年左右。由图 6b 小波功率谱可以看到,存在 3 个波峰,即年代际周期为 15.8 a,年际周期为 8.7 a,年周期为 1 a,其中年周期变化小波方差最大,年代际变化周期次之,年际周期最小。

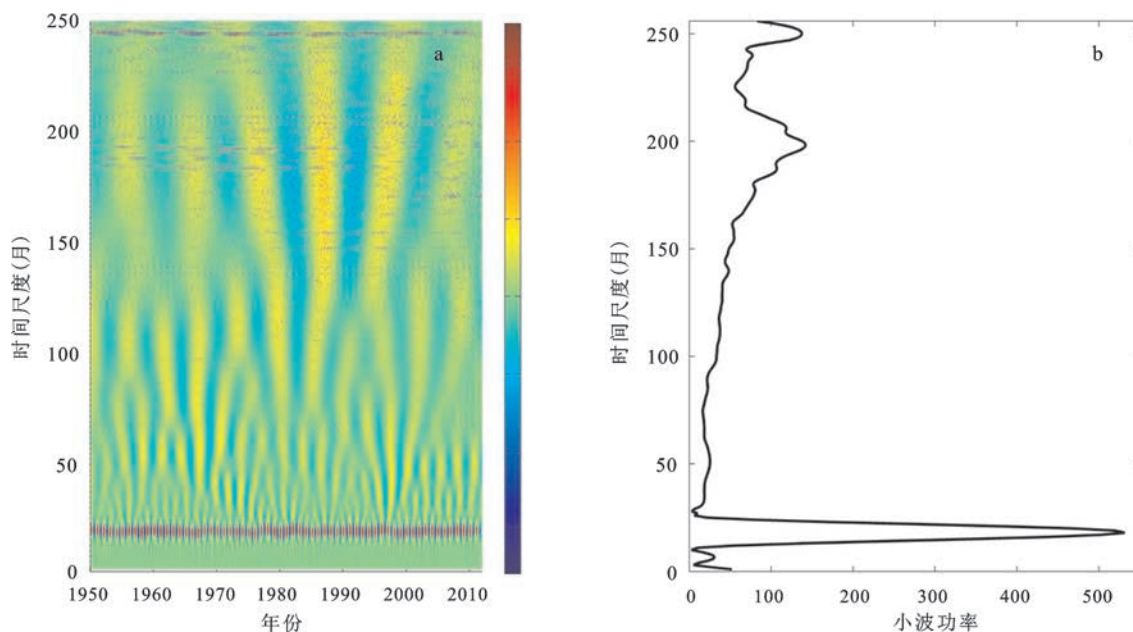
分别利用图 6b 中的时间尺度变化成分重构风向的年变化(0.5~2 a)、年际变化(6.7~9.2 a)、年代际变化(13.3~18.4 a)以及利用小波 db6 重构的趋势变化(图 7)。从整体变化趋势线来看,风向角度在 1950~2011 年间波动变化较强,且呈现上升的趋势(7d)。年代际信号重构中在 1970 年前后有明显的变化。风向重构信号中存在 2 个波谷和 2 个波峰,时段分别为 1953~1965 年、1976~1983 年和 1984~1993 年和 1994~2003 年;周期振荡性呈越来越强的趋势。这是由于东亚季风在 20 世纪 60 年



a. 标准化时间序列; b. 重构的年变化信号; c. 重构的年际变化信号; d. 重构的年代际变化信号; e. 资料序列趋势性变化信号

图5 1950~2011年逐月渤海海域风速的小波重构

Fig.5 Month-averaged wind speed in different scales in 1950-2011



a. 小波变换实部的时频分布; b. 小波功率谱随时间尺度变化

图6 1950~2011年逐月渤海海域风场角度小波分析

Fig. 6 Wavelet analysis of month-averaged wind direction on the Bohai Sea in 1950-2011

代中期、70年代末期还有80年代以及90年代初期的突变引起的^[20]。在年周期的波动基础上,同时具备显著的年代际尺度周期的变化特征。1970年前后是风场风速、风向的变化时间点,在此后,风速

风向进入了新的过程状态。

3.3 渤海海域风向与风速的共振周期

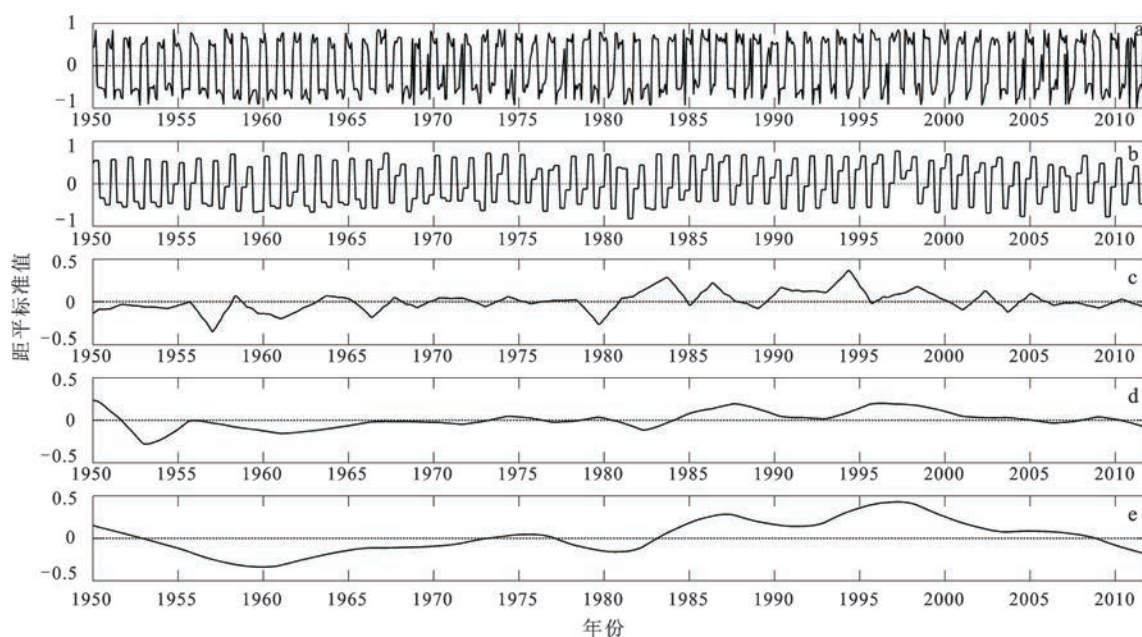
交叉谱是分析2个时间序列来估计其频率结构,找出两者子时域和频域上的关系。表2中依次

表2 1950~2011年渤海海域风速度与角度的交叉谱

Table 2 Cross-spectrum density of wind speed and wind direction in the Bohai Sea from 1950 to 2011

k	f	T	$\tilde{G}_{12}(k)$	$\tilde{Q}_{12}(k)$	$\tilde{R}_{12}(k)$	$\tilde{\theta}_{12}(k)$	$\tilde{L}_{12}(k)$
0	0.00	∞	-0.145	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.16	40.00	-0.166	-0.049	0.219	0.286	1.820
2	0.31	20.00	0.015	0.009	0.659	0.539	1.716
3	0.47	13.33	0.005	0.015	0.249	1.244	2.639
4	0.63	10.00	0.004	0.034	0.412	1.445	2.300
5	0.79	8.00	0.001	0.018	0.434	1.502	1.913
6	0.94	6.67	0.001	-0.007	0.317	-1.396	-1.481
7	1.10	5.71	0.010	-0.006	0.607	-0.578	-0.526
8	1.26	5.00	0.009	0.004	0.234	0.457	0.364
9	1.41	4.44	-0.004	0.009	0.216	-1.126	-0.797
10	1.57	4.00	-0.004	0.002	0.153	-0.552	-0.351
11	1.73	3.64	0.001	-0.002	0.086	-1.027	-0.594
12	1.88	3.33	-0.004	0.002	0.131	-0.373	-0.198
13	2.04	3.08	0.007	0.004	0.465	0.550	0.269
14	2.20	2.86	-0.002	0.001	0.214	-0.560	-0.255
15	2.36	2.67	0.008	-0.003	0.645	-0.332	-0.141
16	2.51	2.50	0.005	-0.008	0.560	-0.998	-0.397
17	2.67	2.35	0.002	-0.007	0.279	-1.304	-0.488
18	2.83	2.22	0.000	-0.002	0.238	1.548	0.548
19	2.99	2.11	0.004	0.000	0.278	-0.049	-0.017
20	3.14	2.00	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

注: $\tilde{G}_{12}(k)$: 协谱; $\tilde{Q}_{12}(k)$: 余谱; $\tilde{R}_{12}(k)$: 凝聚谱; $\tilde{\theta}_{12}(k)$: 位相谱; $\tilde{L}_{12}(k)$: 滞后时间长度谱; k : 波数; f : 频率; T : 时间



a. 标准化时间序列; b. 重构的年变化信号; c. 重构的年际变化信号; d. 重构的年代际变化信号; e. 资料序列趋势性变化信号

图7 渤海海域风场风向角度的小波重构

Fig.7 Month-averaged wind direction in different scales in the Bohai Sea

列出了2个时间序列交叉谱分析的协谱 $\tilde{G}_{12}(k)$ 、余谱 $\tilde{Q}_{12}(k)$ 、凝聚谱 $\tilde{R}_{12}(k)$ 、位相谱 $\tilde{\theta}_{12}(k)$ 、滞后时间长度谱 $\tilde{L}_{12}(k)$ 。由协谱中 $\tilde{G}_{12}(k)$ 在波数 $k=2, 7, 15$ 可以得到3个谱峰(正),对应的周期为20 a, 5.71 a, 2.67 a,其中功率最强的为20 a,其次为5.71 a。凝聚谱表明2个序列在频域上的相关程度,因此需要对凝聚谱进行必要的显著检验。计算自由度 $v=5.7$,给定置信度 $\alpha=0.15$,可计算临界的 v_c 及其相应的临界值 r_c^2 ,计算得 $r_c=0.577$,如果凝聚谱 $\tilde{R}_{12}(k)>r_c$,说明显著相关。表2中波数为2, 7, 15所对应的凝聚谱大于 r_c ,因此上述几个振动周期上的凝聚是显著的,分别是20 a, 5.71 a和2.67 a,即在年波动的基础上,同时具备了年代际尺度周期变化。风速与风向在20 a共振周期上凝聚最高,2.67 a共振周期次之,5.71 a最小。表2中的位相谱 $\tilde{\theta}_{12}(k)$ 和落后长度谱 $\tilde{L}_{12}(k)$ 反应了流量和输沙量在各个周期上两者之间的位相差。在年际变化尺度上,风速变化的位相与风向变化的位相相差不大,可忽略不计;而年代际变化尺度上,风速变化要比风向的变化提前1.82 a。

3.4 渤海海域风场变化的影响因素

渤海海表风速、风向的周期性变化受东亚季风的周期变化影响。东亚季风具有明显的年际和年代际变化特征,一般存在2~9 a、10~14 a、20~30 a、40 a的变化周期以及自1970年以来太平洋海表温度明显变暖的年代际变化特征^[21, 22]。西风环流和副热带高压共同作用对季风气候产生影响^[23]。东亚季风的波动与西太平洋副热带高压异常有关,西太平洋副高的位置以及强度的年代际、年际、季节变化造成了东亚的气候多尺度波动^[24, 25]。

在大尺度上影响或控制东亚夏季风的环流系统有2个,一个是中心位于40°N的东亚夏季高空急流,另一个是位置偏南的西太平洋副热带高压。夏季西太平洋副热带高压的北进存在显著的年际、年代际变化,主要表现在位置的南北移动,周期表现在10~20 a、2~4 a,其中3 a附近最为显著^[26]。由于西太平洋副热带高压的演变具有很大尺度变化,因此东亚夏季风的建立、推进过程与北界都存在显著的年代际变化^[27~29]。20世纪60年代夏季风的建立时间较迟,但北推较快。夏季风推进位置主要在20世纪60年代中期前后存在显著的变化,推进强度在70年代出现突变^[30]。冬季风除了具有长期变化趋势外,还存在2 a、3~4 a、5~6 a的年际周期振荡模态和15~18 a的年代际周期振荡模态^[31]。

东亚季风具有多尺度的振荡周期以及20世纪70年代前后的突变都导致了渤海风场变化,这种振荡变化减弱表现为渤海海域风速的减小与风向的多尺度变化。

4 结论

基于全球NCEP/NCAR再分析资料对1950~2011年渤海海域10 m风场的风速与风向资料进行分析。

1) 渤海海域风场具有明显的季节变化特征:冬、夏季风向相对统一,冬季风速大夏季风速小,风速变化由渤海海峡向渤海湾逐渐减少;春、秋季为过渡时段风向多变。冬季风向由西北风逐渐偏向北西北,最高转向角度达20°,夏季风由东南风逐渐向东转向,最高转向角度达30°;冬、夏季月平均风速在1970年前后出现明显的变化,之前风速大,1970年以后风速有所减弱,尤其是冬季的风速变化明显。

2) 利用小波变化以及重构的方法对62 a来逐月的渤海海域海表风速、风向的变化趋势以及周期进行研究。分析发现:渤海海区的风向与风速除了存在明显的季节性变化外,在年际、年代际变化时间尺度上也有明显的周期性。风速与风向的多尺度变化周期相似,风向存在1 a、8.7 a、15.8 a的显著周期;风速存在1 a、6.3 a、15 a的显著周期。

3) 对渤海地区海表风的风向与风速进行交叉谱分析,发现在20 a、3.07 a、2.67 a这3个时间尺度上存在显著相关关系。风速与风向的多尺度变化受东亚季风的强度、推进的季节、年际、年代际变化影响存在多尺度变化,在20世纪70年代前振荡较强,之后开始减弱。

参考文献(References):

- [1] Chapron B, Collard F, Ardhuin F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005,110(7): 1-50.
- [2] Pattiaratchi C, B Hegge, J Gould et al. Impact of sea-breeze activity on nearshore and foreshore processes in southwestern Australia[J]. *Continental Shelf Research*, 1997,17(13): 1539-1560.
- [3] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 风力发电, 海浪发电[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2015,(9): 7-14.[Zheng Chongwei, Li Chongyin. Development of the islands and reefs in the south China Sea: wind power and wave power generation. *Periodical of Ocean University of China*, 2015,(9): 7-14.]

- [4] 江文胜, 苏健, 杨华, 等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系[J]. 海洋学报, 2002, 24(S1): 212-217. [Jiang Shengwen, Su Jian, Yang Hua et al. The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(S1): 212-217.]
- [5] 万修全, 鲍献文, 吴德星, 等. 渤海夏季潮致-风生-热盐环流的数值诊断计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 41-47. [Wan Xiuquan, Bao Xianwen, Wu Dexing et al. Numerical diagnostic simulation of summertime tide-induced, wind-driven and thermohaline currents in the Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(1): 41-47.]
- [6] 王殿志, 张庆河, 时钟. 渤海湾风浪场的数值模拟[J]. 海洋通报, 2004, 23(5): 10-17. [Wang Dianzhi, Zhang Qinghe, Shi Zhong. Modeling of wind waves in the Bohai Bay, China. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(5): 10-17.]
- [7] 赵保仁, 曹德明. 渤海冬季环流形成机制动力学分析及数值研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(1): 86-96. [Zhao Baoren, Cao Deming. Dynamic analysis and numerical modeling of forming mechanisms of winter circulations in the Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(1): 86-96.]
- [8] Wang H, Yang Z, Saito Y et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950 - 2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- [9] Talke S A, Stacey M T. Suspended sediment fluxes at an intertidal flat: The shifting influence of wave, wind, tidal, and freshwater forcing[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(6): 710-725.
- [10] Toba Y, Iida N, Kawamura H et al. Wave dependence of sea-surface wind stress[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(3): 705-721.
- [11] 王颖, 季小梅. 中国海陆过渡带-海岸海洋环境特征与变化研究[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 129-136. [Wang Yin, Ji Xiaomei. Environmental characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 129-136.]
- [12] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 1-16. [Su Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(1): 1-16.]
- [13] 李训强, 郑崇伟, 苏勤, 等. 1988-2009年中国海波候, 风候统计分析[J]. 中国海洋大学学报(增刊), 2012(sup.), 42(6): 1-9. [Li Xunqiang, Zheng Chongwei, Su Qin et al. Wave climate and wind analysis in the China Sea from 1988 to 2009. *Periodical of Ocean University of China*, 2012(sup.), 42(6): 1-9.]
- [14] 邱传涛, 李丁华. 平均风向的计算方法及其比较[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 94-98. [Qiu Chuantao, Li Dinghua. The calculation algorithms for average wind direction and their comparison. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 94-98.]
- [15] 张丽, 李建平. 风向变化特征在季风模拟评估中的应用[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 53-66. [Zhang Li, Li Jianping. The application of the variation characteristics of wind direction in evaluating monsoon simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 53-66.]
- [16] 王辉, 王为民. 渤海冬季三维环流数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1994, 24(4): 463-470. [Wang Hui, Wang Weimin. Three dimensional numerical simulation in Bohai Sea in winter. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 24(4): 463-470.]
- [17] 许启慧, 苗峻峰, 刘月琨, 等. 渤海湾西岸海风时空演变特征观测分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(1): 9-19. [Xu Qihui, Miao Junfeng, Liu Yuekun et al. Temporal and spatial characteristics of sea breeze over the west coast of Bohai Bay. *Marine Forecasts*, 2013, 30(1): 9-19.]
- [18] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖地的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 141-151. [Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the Tropical Western Warm Pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Scientia Atmospherica sinica*, 1994, 18(2): 141-152.]
- [19] 蔡榕硕, 陈际龙, 黄荣辉. 我国近海和邻近海的海洋环境对最近全球气候变化的响应[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1019-1033. [Cai Rongshuo, Chen Jilong, Huang Ronghui. The response of marine environment in the offshore area of China and its adjacent ocean to recent global climate change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 1019-1033.]
- [20] 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 20-36. [Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong et al. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the Tropical Western Pacific. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(1): 20-36.]
- [21] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences[J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(9): 1139-1161.
- [22] 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 253-280. [Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun et al. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences*, 2013, 37(2): 253-280.]
- [23] 蔡琼琼, 周天军, 吴波, 等. 东亚副热带西风急流及其年际变率的海气耦合模式模拟[J]. 海洋学报, 2011, 33(4): 38-48. [Cai qiongqiong, Zhou Tianjun, Wu Bo et al. The East Asian subtropical westerly jet and its interannual variability simulated by a climate system model FGOALS_g1. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(4): 38-48.]
- [24] 徐建军, 朱乾根, 施能. 近百年东亚季风长期变化中主周期振荡的奇异谱分析[J]. 气象学报, 1997, 55(5): 620-627. [Xu Jianjun, Zhu Qiangen, Shi Neng. The singular spectral analysis of

- periodic oscillation in long-term variation of East-Asian monsoon in recent century. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(5): 620-627.]
- [25] 欧进萍, 刘春厚. 渤海海域的风特性统计分析[J]. 海洋通报, 1997, 16(1): 20-28. [Ou Jinping, Liu Chunhou. Statistical analysis of wind properties in the Bohai Sea. *Marine Science Bulletin*, 1997, 16(1): 20-28.]
- [26] 徐建军, 朱乾根. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 1-8. [Xu jianjun, Zhu Qiangen. Sudden and periodic changes of East Asian winter monsoon in the past century. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(1): 1-8.]
- [27] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(4): 456-465. [Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the convective activities over the Western Tropical Pacific warm pool on the inter-aseasonal variability of the East Asian summer Monsoon. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1994, 18(4): 456-465.]
- [28] 徐袁, 钱维宏. 东亚季风边缘活动带研究综述[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 1-9. [Xu Yuan, Qian Weihong. Research on East Asian summer monsoon: a review. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 1-9.]
- [29] 屈文军, 张小曳, 王丹, 等. 西风带研究的重要意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 125-132. [Qu Wenjun, Zhang Xiaoye, Wang Dan et al. The important significance of Westerly wind study. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(1): 125-132.]
- [30] 江志红, 何金海, 李建平, 等. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 675-686. [Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping et al. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its inter-decadal variations. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 675-686.]
- [31] 陈隆勋, 张博, 张瑛. 东亚季风研究的进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 711-724. [Chen Longxun, Zhang Bo, Zhang Ying. Progress in research on the East Asian Monsoon. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 711-724.]

Multi-scale Variability of Surface Wind Direction and Speed on the Bohai Sea in 1950-2011

Ren Huiru¹, Li Guosheng², Guo Tengjiao^{2,3}, Zhang Yue^{2,3}, Ouyang Ninglei^{2,3}

(1. *National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China*; 2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Multi-scale variability characteristics of ocean surface wind direction and speed from 1950 to 2011 are studied based on NCEP/NCAR reanalysis data. Sea surface wind field shows the seasonal characteristics. Results show that: in past 62 years, large area of wind direction in the Bohai Sea tend to be from northwest to north and wind speed is the most in winter; wind direction tend to be from southeast to easterly winds and wind speed is the least in summer; wind speed has started to decreased since 1970s and reduced significantly in winter. Wavelet analysis and cross-spectral analyzing are used to observe wind direction and speed on the Bohai Sea over the last 62 years. The characteristics of ocean surface wind direction and speed in the Bohai Sea show periodic oscillation at inter-annual and decadal scale. The main periods of wind direction are 1-year, 8.7-year, 15.8-year; whereas the main periods of wind speed are 1-year, 6.3-year, 15-year. The significant resonance periods between wind direction and speed are observed at the following temporal scales: 2.67-year, 5.71-year, 20-year. The resonance periods have relationship with variability of East-Asian Monsoon and Western Pacific Subtropical High.

Key words: the Bohai Sea; wind speed; wind direction; multi-scale periods; resonance periods