

冬季黄、东海中国沿岸水位的低频波动*

赵保仁 曹德明

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 本文选用黄、东海中国沿岸9个水位站的水位、气压、风速资料分析冬季水位变化的基本特征,结果表明黄海及东海北部沿岸水位的变化主要与NNW-SSE向的风有关,该方向大体同黄海海槽的伸展方向一致;东海南部沿岸水位的低频变化同E-W向风有关,这一方向同该海域的岸线约有 60° 的交角。水位低频波动的主要周期是2,3和5天左右,东海还有6—7天的波动。水位变化的振幅为北部大、南部小,西海岸大、东海岸及岛链地区小。水位波动自北向南传播,其波速在黄海北部沿岸约为18—20 km/h,东海北部沿岸逐渐增至30—40 km/h。东海南部的低频波速几乎是频率的线性函数。水位对风的响应时间尺度约13—28小时,自北向南逐步增加。中国沿岸还存在周期约为2,3和5天的自由波动向南传播,其波速约为30—60 km/h。

黄海是一个半封闭的陆架浅海,冬季有周期约为几天左右的冷空气频频南下,因海面冷却造成的垂直对流可直达海底。黄海又是一个径流和外海洋流输入较小的海区之一,冬季该海区的降水量也较少。东海有很宽的大陆架,大尺度的海岸线比较规则。因此,研究海洋对大气强制力的响应及传播问题,黄、东海是一个十分理想的实验海区。

中国沿岸水位的低频波动问题,国内学者已有一些研究。例如李坤平等^[2]曾以日平均水位资料指出,渤海存在着周期为5天和3天的低频振动;沿岸方向的风应力是其主要能量来源。刘凤树等人对渤海水位振动也得到过类似的结果^[3],此外还就潮汐预报的余差值讨论了渤海风暴潮振动问题^[4]。Hsueh等^[7]指出:冬季,黄、东海沿岸的低频波动同南下的冷锋移动有关,在冷锋过境之后,朝鲜西岸自南向北还存在着正压的自由 Kelvin 波的传播现象。

本文利用我国沿岸的水位和气象资料讨论冬季黄、东海我国沿岸水位的低频波动特征及其同大气强制力的响应问题。

一、资料及处理方法

为了便于同 Hsueh 的结果进行对照,本文分析1980年12月1日至1981年3月31日冬季沿岸水位的低频变化。从辽东半岛沿岸的小长山至台湾海峡的平潭,共选用9个水位站的水位、风速和气压资料进行分析。水位站的位置及研究海区的水深如图1所示。所选用的水位站远离河口,濒临大海,对沿岸水位变化有较好的代表性。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1337号。

收稿日期: 1986年6月15日。

计算中首先用 Thompson 给出的跨度为 240 小时的低通滤波器^[8], 对每小时水位进行低通滤波。该滤波器能够完全抑制 M_2 , S_2 等 7 个主要半日和全日分潮及惯性振动, 而对周期大于 1.7 天的低频信号几乎全部通过, 滤波器的频率响应曲线非常平直。

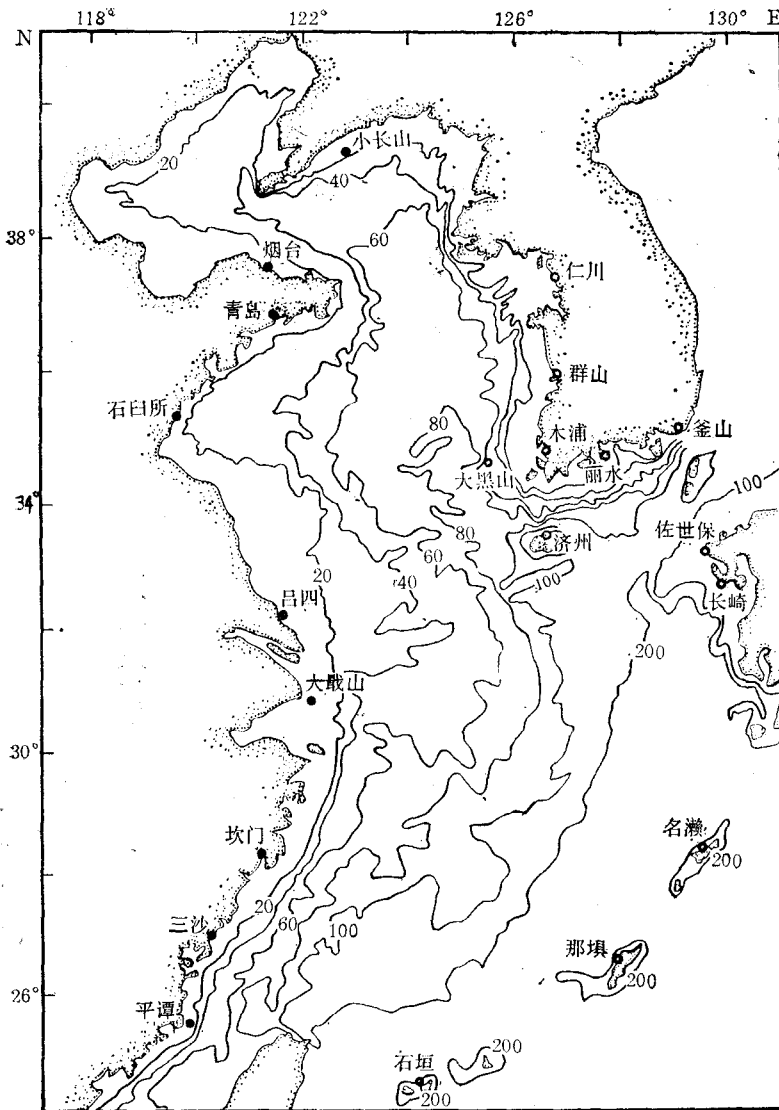


图 1 水位站及研究海区的水深分布图

Fig. 1 The location of sea-level stations and isobath

●本文水位站; ○文献[7]水位站。

气压和风速(风向取来向)资料每天只有 4 次观测, 间隔 6 小时, 在滤波之前首先用三点线性内插求得每小时风速分量和气压值, 然后再作滤波运算。水位资料在滤波前都经过静压校正。文中用快速福氏变换进行谱分析, 所用程序同文献[1]基本一致。

二、水位和风速资料的滤波结果

图 2a 给出经低通滤波后的一段气压校正水位过程曲线。由图可见, 各站水位的低频

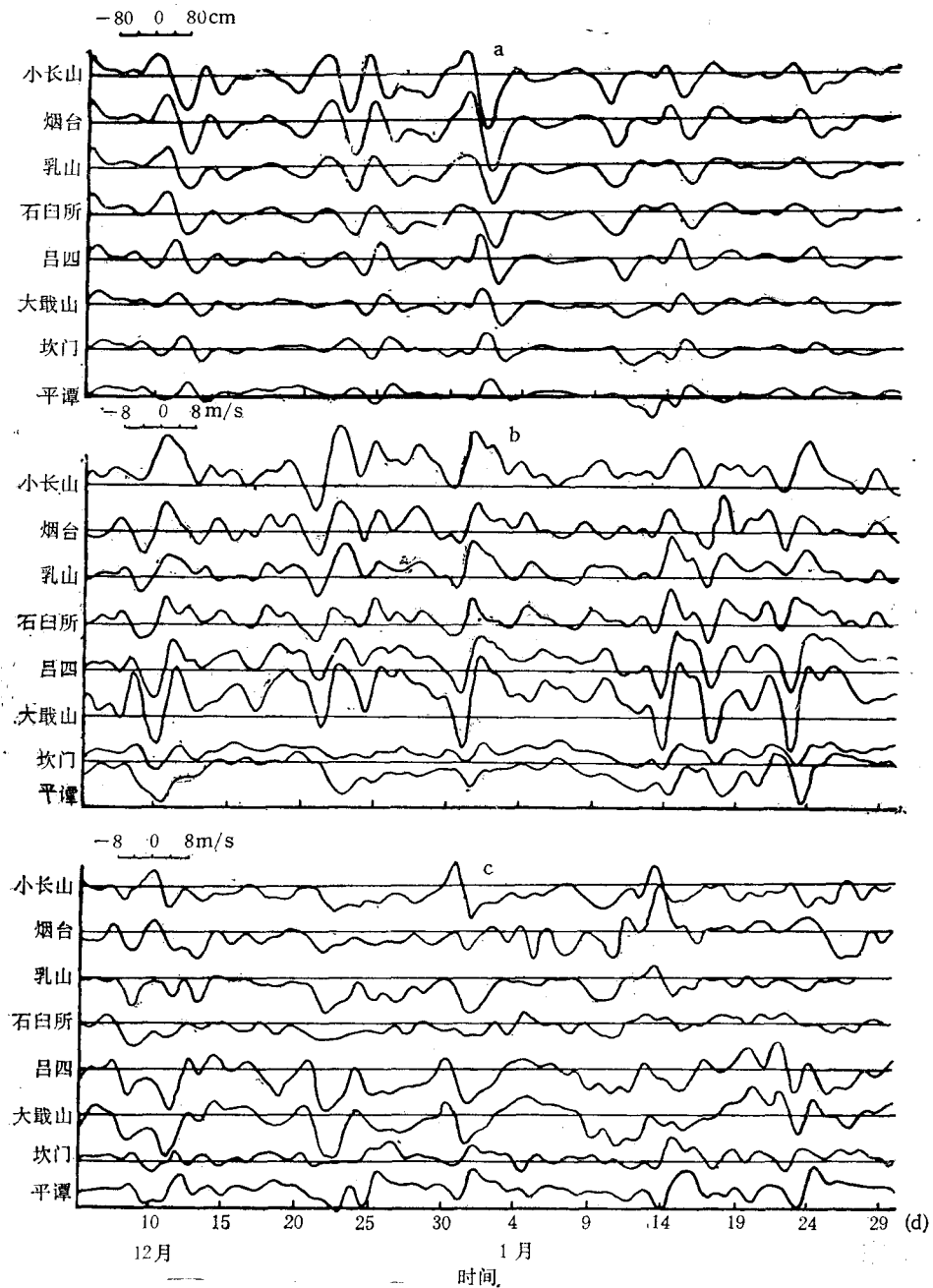


图 2 各站气压校正水位: (a) 及风速北分量(b)和东分量(c)过程曲线
(图中未绘出三沙站的过程曲线)

Fig. 2 A section of time series: (a) adjusted sea-level; (b) north wind component; (c) east wind component

变化十分相似,低频振动的时间尺度多数在一周之内,水位变化的幅度自北向南逐渐变小,位相依次推迟。直观地看,就天气时间尺度而言,小长山站的水位波动大约与大戢山和坎门站的位相相反。从水位振动的变幅来看,黄海北部的小长山和烟台两站最大可达170cm以上,东海南部的水位变幅(坎门至平潭)一般不超过70cm。

表1左侧给出本文计算各站水位变化的标准偏差值。作为比较,表中还给出了Hsueh等^[7]的计算结果。由表1可知,沿岸各站水位标准偏差变化的基本特点是:北部大、南部小,海区西岸大、东岸及岛弧地区小。这意味着,就低频波动的振幅而言,是北部大、南部小,海区西岸大、东岸及岛弧地区小。

表1 各站水位及风速分量的标准偏差值

Tab. 1 Standard deviations of sea-level and wind components for every station in this paper and Hsueh's one

站 名	水位 (cm)		风速北分量 (m/s)		风速东分量 (m/s)		站 名	水位 (cm)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差		平均值	标准偏差
小长山	180.6	31.8	3.42	4.82	-1.80	3.44	仁 川	440	17.0
烟台	190.3	30.4	0.76	3.82	-1.10	3.44	群 山	325	17.2
乳山	214.6	24.8	1.67	3.71	-1.73	2.53	大黑山岛	179	11.5
石臼所	239.3	25.4	1.59	3.23	-0.43	2.38	木 浦	204	11.2
吕四	15.5	21.4	2.38	4.49	-0.67	4.34	济 州	141	10.9
大戢山	242.8	16.6	4.18	6.68	0.33	4.48	佐世堡	260	12.7
坎门	381.5	14.3	2.53	2.30	1.16	2.16	长 崎	274	12.4
三沙	483.6	14.6	5.93	4.31	3.15	2.92	名 瀨	239	9.5
平潭	372.1	13.5	8.75	4.94	4.13	3.39	那 坝	254	9.2
							石 垣	173	8.9

除坎门至平潭站外,各站风速北分量过程曲线基本相似(在图2b,c中风速取来向为正),自北向南,位相依次落后。直观地看,从最北的小长山站到最南的平潭站,风速北分量间的位相差一般不超过180°。各站风速东分量的变化一致性较差(图2c),其中只有小长山与烟台、乳山与石臼所、吕四与大戢山、坎门与平潭等站对风速变化比较一致。这同文献[7]的地转风结果较一致。将水位过程曲线同风速过程曲线略加比较,就可以看出:从小长山至大戢山,各站水位的变化主要与风速北分量有关,即刮北风时各站水位依次降低,刮南风时各站水位依次升高。坎门至平潭各站(其中三沙站的过程曲线没有绘出)水位变化与风速东分量的关系更为密切。

三、水位和风速分量谱

图3分别给出各站水位(a)和风速分量(b,c)的自谱曲线。需要指出,在图3a中还增

添了同期仁川港的水位谱¹⁾。水位自谱曲线表明: 各谱都有下列周期的谱峰: 1.9, 2.3—2.4, 2.9—3.4 和 4.5—4.7 天; 从石臼所往南, 低频段中逐渐显现周期为 6.1—7.8 天的谱峰, 吕四站以南又增加了一个周期约为 28 天的谱峰。在周期为几天的波动中, 2.9—3.4 天, 4.5—4.7 天的水位波动能量最大, 吕四以南, 周期为 6—7 天的水位波动也有较大的能量。各站谱峰对应的周期值列于表 2。

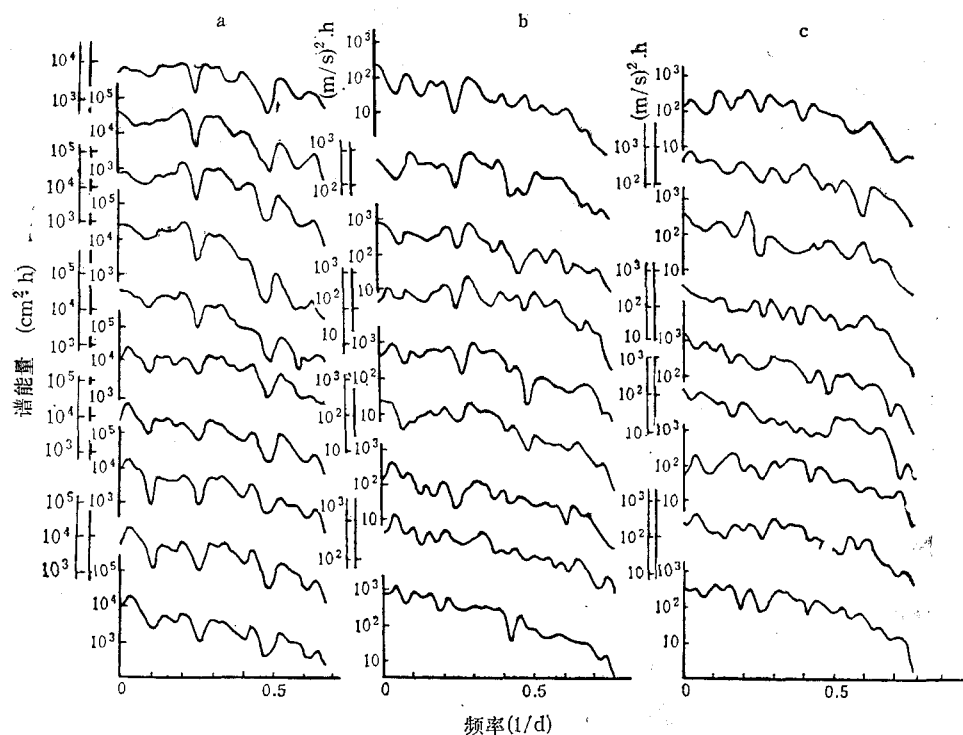


图 3 各站水位(a)及风速北分量(b)、东分量(c)的自谱曲线

Fig. 3 Auto-spectra of sea-level (a) and north and east wind components (b,c)

表 2 各站水位波动的主要周期值(单位: 天)

Tab. 2 The main periods of sea-level fluctuations (day)

小长山	—	—	4.5	3.4	2.4	1.9	大戢山	28.4	6.1	4.7	3.3	2.3	1.9
烟台	—	—	4.5	3.4	2.3	1.9	坎门	28.4	7.8	4.7	2.9	2.3	1.9
乳山	—	—	4.5	3.4	2.4	1.9	三沙	28.4	7.1	4.7	3.3	2.3	1.9
石臼所	—	—	4.7	3.4	2.4	1.9	平潭	28.4	7.1	4.7	3.3	2.3	1.9
吕四	28.4	7.8	4.7	3.3	2.3	1.9							

各站风速分量谱有较多的峰值, 但能量不如水位谱那样集中。在风速北分量谱中, 周期为 1.9—2.0, 2.8—3.4, 4.5—4.7, 9.5—10.7 天的振动是各站共有的。吕四以南各站还增

1) 仁川港的水位值未经气压的静压校正。

加了周期为 6.1—6.6 和 28.4 天的振动。在风速东分量谱中, 周期为 1.9—2.0, 2.8—3.4, 4.5—5.0 天的振动是各站所共有的。以上这些周期的风速波动, 除 10 天左右的振动外, 其它波动在水位谱中都有其相应的振动周期。

四、各站水位之间的传播关系

为了弄清各水位站低频波动的传播特征, 我们计算了各站水位之间的凝聚函数和相位函数。图 4 给出 6 对有代表性的观测站对的水位凝聚和相位函数。由图可知, 在水位谱峰值处, 水位之间的凝聚值相当高, 远远超过 90% 的零相关水平。如果两水位站间的距离不太远, 那么在整个低频段, 水位几乎都凝聚(图 4a, b)。从相位函数可知, 水位的低频波动都是由北向南传播的。对周期小于 4 天的波动, 小长山处的扰动, 传到坎门站附近, 位相差达 180° 左右, 这同图 2 完全一致。

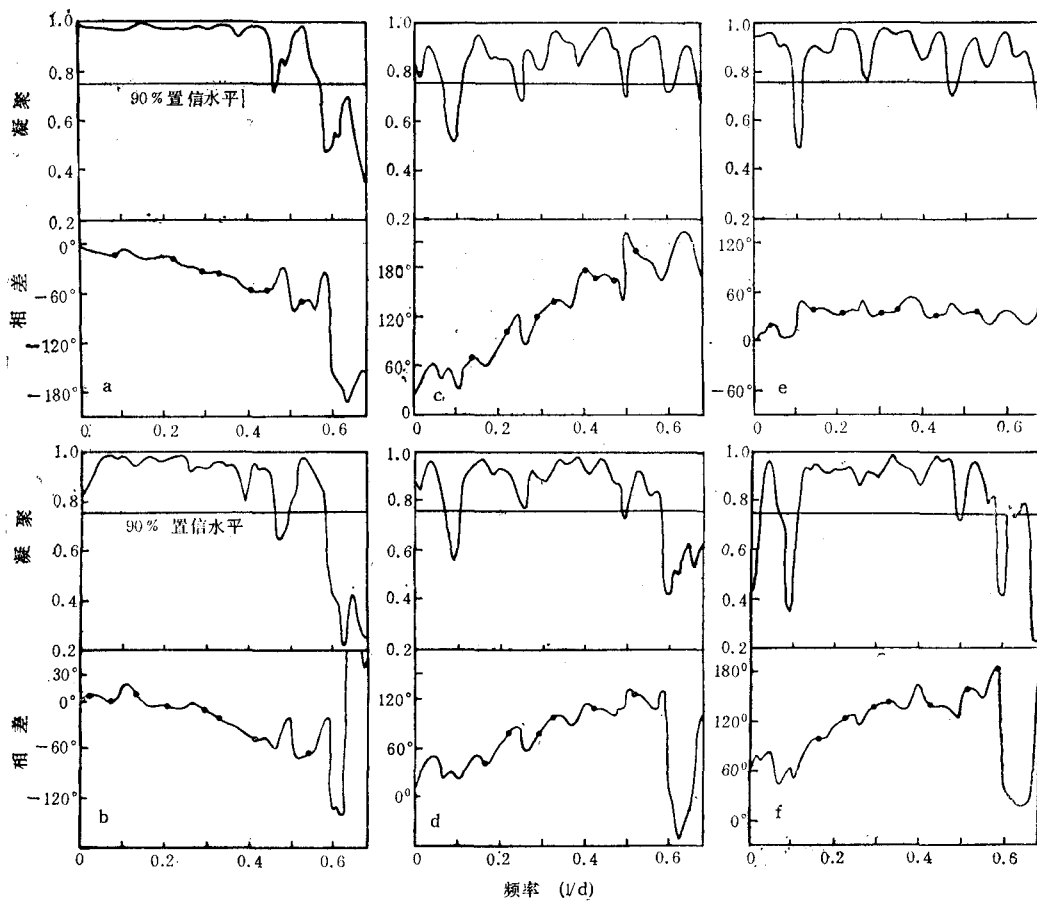


图 4 各水位站之间的凝聚和相角函数

a. 乳山—小长山; b. 乳山—仁川; c. 小长山—大戢山;
d. 乳山—大戢山; e. 坎门—平潭; f. 乳山—平潭。

Fig. 4 The coherence and phase functions of sea-level between two stations

还需指出,相位函数表明,小长山处的水位扰动,首先传到仁川,而后依次传到乳山、石臼所和吕四等水位站。在冬季,黄海区域的水位变化主要受到 NNW-SSE 向风的影响。各站间的相位差表明,整个黄海的海水,表现为南北方向的振荡。在偏北风的作用下,厄克曼形式的海水输送关系,在水位记录中表现不明显。

从图 4 还可以看出,不同频率波动的相位滞后值,在相位函数图上差不多可以用一条直线来代替,并且从小长山至大戢山,相位函数图中的这条直线几乎都接近原点,但是,从大戢山再往南,这条直线就明显偏离原点了。

由相位函数值和两站间的距离可以求出不同周期的波动传播速度。图 5 给出几个水位站对间不同周期的波速与频率之间的关系。由图可知,在小长山和大戢山之间,除周期为 28 天左右的波速明显偏小之外,其它各周期的波速在相邻两站对之间几乎可以看成是常数(见图 5a)。但是,大戢山以南各站,不同周期的波速显然不再是常数。随着频率的增大,波速几乎线性增加(5b)。对周期约为 3 和 3 天以下的波动,波速已超过 40 km/h;而周期大于 6 天的波动,其波速小于 20 km/h。这就是说,不同周期的波动,在这一海区出现类似波散的现象。

图 5 表明,就平均情况而言,各种波动的传播速度是南部大、北部小,在黄海北部沿岸,平均波速约为 18—20 km/h,在南黄海和东海北部沿岸约为 30—40 km/h。

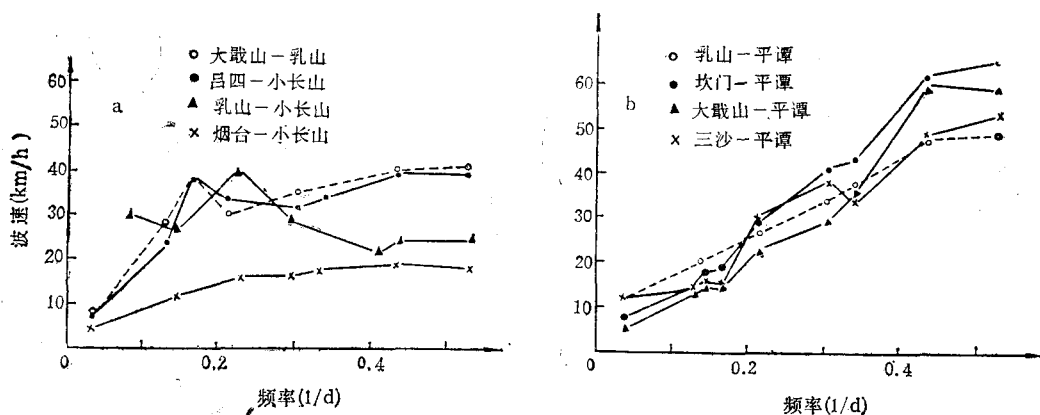


图 5 波速和周期之间的关系图

a. 黄海及东海北部沿岸; b. 东海南部沿岸。

Fig. 5 Relationship between Wave Speed and Period

五、水位对风速变化的响应

1. 引起水位低频变化的主风向

首先计算各站气压校正水位与不同方向的投影风速之间的互谱。风速投影的方位角以北方向为零,顺时针方向增加为正,每隔 10 度计算一次互谱,然后根据计算结果绘制各水位站的凝聚函数的等值线图(图 6)。计算表明,水位站不同,其出现最大凝聚值所对应的方向各有不同;即使同一站,不同周期的凝聚最大值出现的方向也不尽相同。但从总的

趋势来看(见图 6 及表 3),小长山到大戢山各站最大凝聚值出现的方向平均约为 160° ;而在大戢山以南,坎门至平潭各站,最大凝聚出现的方向平均约为 90° (表 3)。上述事实表明:(1)在黄海及东海北部风对水位变化影响最大的风向为 NNW-SSE 向,这一方向大体同朝鲜半岛及黄海海槽的伸展方向一致。在朝鲜西岸,Hsueh 等的计算结果表明,最大凝聚值所对应的风向也是 NNW-SSE 向(见文献[7]图 1,2)。相反,在东海南部,海岸线已转成 SSE 走向,风对水位变化影响最大的风向差不多同海岸线之间约构成 60° 的交角。这是一个令人费解的现象,或许底摩擦和其它尚未被揭示的因素起着某种影响作用。

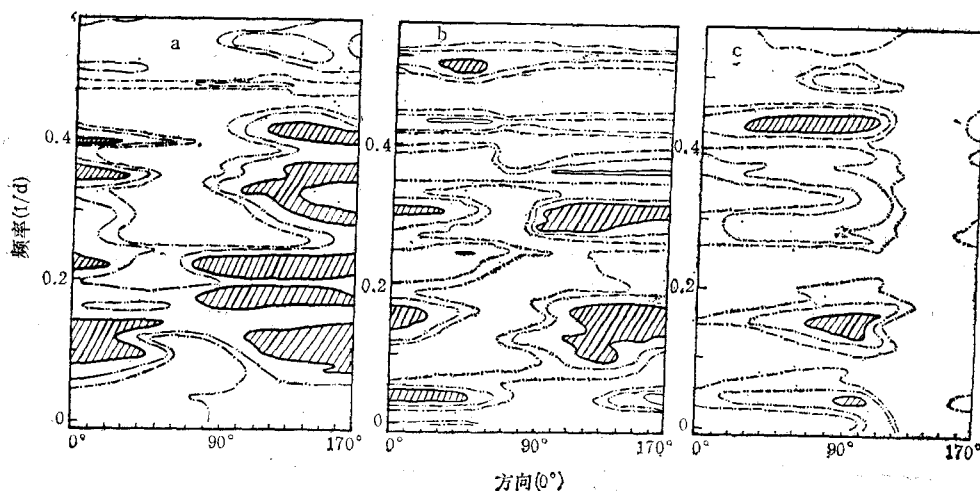


图 6 风速与水位间的凝聚函数的分布图(取北方向为零,按顺时针方向旋转)

a. 小长山; b. 大戢山; c. 三沙。
— · — 0.7; — · · — 0.8; ——— 0.9。

Fig. 6 Contours of coherence as a function of direction and frequency taking north as zero and clockwise

2. 水位对风的响应时间尺度

考虑水位对风速变化的响应时间尺度,即达到稳定状态所需要的时间尺度(亦即旋转增强时间尺度, spin-up time) 是很有意义的。图 7 给出有代表性的 4 个水位站风与水位的凝聚关系,其中小长山、乳山和大戢山三站的风取 160° 方向,三沙站取 90° 方向。在相位函数图中的粗线表示与零相关水平超过 90% 时的凝聚值所对应的相位函数。图中圆点表示相应的风速谱中的峰值频率。对凝聚水平较高的各频段,相位函数都沿直线分布。为叙述方便,我们称它为相差直线。有趣的是,从小长山至大戢山各站,相差直线几乎都经过原点(以图 7a, b, c 为代表),而坎门至平潭各站,相差直线远离原点(以 d 为代表),并且在这一海区低频段的相位函数为负值,即水位波动反而超前于风速波动。

可以看出,当相差直线经过原点时,在不同频段水位对风速变化的响应时间尺度为常值。而当相差直线不经过原点时,则随频率而异。表 4 给出小长山至大戢山各站水位对风速变化的响应时间尺度。由表可见,黄海北部的小长山响应时间尺度约为 13 小时左右,向南响应时间尺度逐渐增加,到东海北部的大戢山站,约增至 28 小时左右。由此可

表 3 不同周期的凝聚最大值所对应的风向

Tab. 3 The maximum of coherence with its wind direction

站名	频带 (周期)	极大值 频率 (周期)	凝聚 值 (r)	风向 (θ)	站名	频带 (周期)	极大值 频率 (周期)	凝聚 值 (r)	风向 (θ)	站名	频带 (周期)	极大值 频率 (周期)	凝聚 值 (r)	风向 (θ)
小长山	12.2—6.6	9.5	0.99	170	石臼所	21.3	21.3	0.93	140	坎门	21.3—17.1	17.1	0.91	60
	5.7—5.0	5.3	0.96	120		9.5—7.1	7.8	0.86	130		7.1—4.3	5.3	0.93	130
	4.5—4.1	4.3	0.97	140		5.7—4.1	4.3	0.93	150		3.2	3.2	0.81	90
	3.6—3.0	3.3	0.97	160		3.3—3.2	3.2	0.97	140		2.3—2.2	2.2	0.88	60
	2.8—2.7	2.8	0.96	170		2.8—2.7	2.7	0.92	0				平均	85
	2.4—2.3	2.4	0.94	150		2.2—2.1	2.2	0.92	150		21.3—17.1	21.3	0.91	100
			平均	152				平均	148		7.1—5.7	6.1	0.95	90
烟台	9.5—8.5	9.5	0.98	10	吕四	21.3—17.1	21.3	0.96	0	三沙	3.6—3.2	3.3	0.86	70
	5.3—5.0	5.0	0.91	150		7.8—5.3	6.6	0.97	150		2.8—2.4	2.5	0.85	60
	4.3—3.9	4.1	0.95	160		4.5—4.3	4.3	0.92	20		2.2	2.2	0.96	80
	3.3—3.2	3.2	0.95	140		3.4—3.2	3.3	0.97	120		2.0—1.9	2.0	0.89	90
	2.7	2.7	0.93	170		2.2	2.2	0.93	170				平均	82
	2.3—2.2	2.2	0.93	140				平均	164		21.3—17.1	17.1	0.86	40
			平均	158		21.3—17.1	17.1	0.97	10	平潭	7.1—6.6	6.6	0.91	100
乳山	9.5—6.6	7.1	0.95	150	大戢山	9.5—5.3	6.1	0.98	160		4.7—4.3	4.5	0.86	110
	5.3—4.1	5.0	0.97	130		3.4—3.0	3.2	0.96	130		3.7—3.2	3.3	0.92	110
	3.2—2.7	2.8	0.96	150		2.7	2.7	0.91	130		2.7—2.4	2.6	0.90	110
	2.4—2.2	2.4	0.86	170		2.3—2.2	2.2	0.91	40		2.3—2.2	2.2	0.85	100
			平均	150				平均	166				平均	95

知,在这一海区风能输入的时间常数大体在半天至一天略多的时间尺度之内。

表 4 旋转增强时间(小时)

Tab. 4 The response time scales of sea-level to wind (hour)

小长山	烟台	乳山	石臼所	吕四	大戢山
12.7	21.5	18.0	23.4	27.7	28.6

由响应时间尺度,根据线性理论可进一步估算厄克曼数 ($E^{1/2} = 2/(f\tau)$, f 为科氏参数),其值为 0.55—0.26,再根据平均水深可进一步估算厄克曼层的厚度 ($\delta E = E^{1/2}H$) 和阻力系数 ($r = \frac{1}{2} E^{1/2}Hf$)^[7]。取 $\tau = 13$ 小时,水深变化于 20—50 m 时,得 $\delta E = 11—$

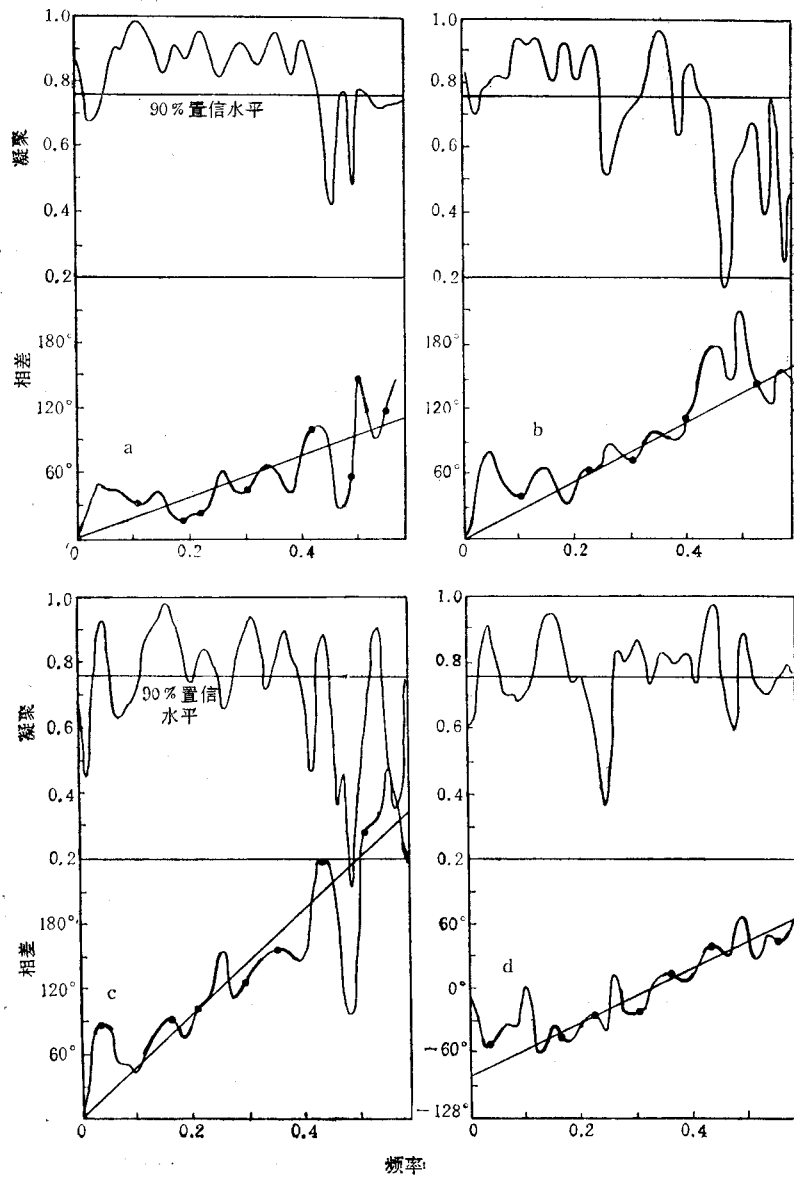


图7 主风向上风与水位之间凝聚函数

a. 小长山; b. 乳山; c. 大戢山; d. 三沙。

Fig. 7 The coherence and phase functions between sea-level and wind on the principal acting direction

28m, $\gamma = 0.043-0.11$ C. G. S.。当 $\tau = 28$ 小时, 同样的水深变化范围得 $\delta E = 5-13$ m, $\gamma = 0.020-0.050$ C. G. S.。上述关于厄克曼层厚度的估算值, 同作者从实测海流资料得到的结果大致接近^[5,6]。

六、低频自由波动

按照随机函数的输入输出理论,在气压校正水位谱中扣除风的直接影响部分,可得水位的自由振动部分。为了简化计算,我们在此仅对水位变化影响最大的方向上的风应力作为输入因子。据此可得到各站余水位的自谱。余水位谱的能量一般只有原有水位谱能量的 $1/4-1/15$ 。在本文讨论的频带中,余水位谱中能量显著的波动周期为 5,3 和 2 天左右。

根据余水位的福氏变换,可计算各站之间余水位的互谱。计算所得自由波的传播速度不如强制波那样有规律地变化(表 5),这可能是由谱估计的误差造成的,因为余水位的互谱估计很复杂,它涉及 4 个随机过程的自谱和互谱估计。由表 5 可知,计算得到的自由波速绝大多数在 30—60 km/h 之间变化,这一传播速度差不多相当于在 10—30 m 深的水域中的 kelvin 波波速。当然剩余水位波动是否具有 kelvin 波的性质,这是需要进一步探讨的一个论题。

表 5 自由波波速

Tab. 5 Speed of free waves at different frequencies

站名	周期 (d)	迟角 (°)	波速 (km/h)	站名	周期 (d)	迟角 (°)	波速 (km/h)	站名	周期 (d)	迟角 (°)	波速 (km/h)
小 长 山 — 烟 台	5.69	13.2	27.6	小 长 山 — 吕 四	4.74	22.9	97.0	乳 山 — 吕 四	5.02	23.9	59.1
	4.27	88.7	5.5		3.41	55.7	55.4		3.41	48.8	42.6
	3.56	19.1	30.4		2.75	136.7	28.0		3.05	70.6	36.2
	3.16	13.0	50.4		2.44	158.5	27.2		2.75	87.4	32.4
					2.08	168.9	30.0				
乳 山 — 大 戢 山	5.02	73.2	27.1	坎 门 — 平 潭	5.69	—14.9	—55.6*	大 戢 山 — 平 潭	4.06	76.1	27.8
	3.41	68.9	42.5		4.49	31.2	33.6		3.05	70.6	39.9
	3.05	82.7	39.5		3.41	33.2	41.6		2.31	68.6	54.2
	2.67	107.3	34.8		3.05	37.5	41.2				
	2.37	119.7	35.2		2.37	45.1	44.1				
	2.08	106.4	45.1		2.03	33.7	68.8				

参 考 文 献

- [1] 中国电子、仪器仪表学会信号处理学会“数字信号处理程序”编译组,1983。数字信号处理程序库。清华大学出版社,1—699 页。
- [2] 李坤平、杨克奇,1983。渤海湾非周期性水位变化与风和气压的关系。海洋科学 2: 12—15。
- [3] 刘凤树、房德风,1983。渤海潮汐余差谱的初步分析。海洋湖沼通报 3: 1—8。
- [4] 刘凤树、王喜年,1984。渤海风暴潮的初步探讨。海洋科学集刊 23: 1—17。
- [5] 赵保仁,1982。局地风对黄海和东海近岸浅海海流影响的研究。海洋与湖沼 13(6): 479—490。
- [6] 赵保仁,1986。东海北部气旋型涡旋区的海流结构。海洋与湖沼论文集。科学出版社,31—42 页。
- [7] Hsueh, Y. and R. D. Romea, 1983. Wintertime winds and coastal sea-level fluctuations in Northeast China Sea, Part I: Observations. *J. Physical Oceanograph* 13(11): 2091—2106。
- [8] Thompson, Rory. O. R. Y., 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *J. Physical Oceanography* 13(6): 1077—1083。

WINTERTIME LOW FREQUENCY FLUCTUATIONS OF CHINESE COASTAL SEA-LEVEL IN THE HUANGHAI SEA AND THE EAST CHINA SEA*

Zhao Baoren and Cao Deming

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

In this paper low frequency fluctuations of the wintertime (Dec., 1, 1980—March, 31, 1981) coastal sea-level in Huanghai Sea and East China Sea are analysed based on the pressure, wind and sea-level data at nine coastal stations, using Thompson filter and spectra technique. Following results are obtained: low frequency fluctuations of sea-level are strongly influenced by rapidly moving of the cold air cross the seas. The principal direction of wind inducing the fluctuation of the sea-level in the Huanghai Sea and Northern East China Sea is about NNW-SSE direction, which is almost the same as that of the stretching of Korea Peninsula and Huanghai Sea Trough. In the Southern East China Sea the principal direction of wind is about E-W direction, which intersects the coast line of this area by 60° . The main low frequency fluctuations are in the bands centered at about 2, 3 and 5 days. However, fluctuation with period of 6—7 days also exists in the East China Sea. The amplitudes of the fluctuations are greater in the north part than in the southern part, greater along the west coast than along the east coast and the is 1 and train. The fluctuations of sea-level forced by wind propagate from north to south with increasing speed from 18—20 km/h along the coast of the Northern Huanghai Sea to 30—40 km/h along the coast of the Northern East China Sea. In the Southern East China Sea the propagating speed of the low frequency varies with frequency. For the waves with three or less than periods of three days their speed is greater than 40 km/h and for the waves with periods greater than 6 days their speed is less than 20 km/h. The response time scales of sea-level to wind also increase from north to south, being 13 hours at Xiaochangshan station and 28 hours at Dajishan station. South to Dajishan station the response time scales vary with frequency. The spectra of residual sea-level show that there exist free waves with periods of about 2, 3 and 5 days, propagating along the coast from north to south at speed of 30—60 km/h which roughly equals to that of kelen waves in these areas.

* Contribution No. 1337 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.