

# 冬季山东南部沿海水温 10—20 天的 周期性振动\*

周发秀 付刚 于慎余

(青岛海洋大学物理海洋与海洋气象系, 青岛 266003)

**提要** 使用谱分析和数字滤波等方法,对山东南部沿海冬季的日平均水温、水位、海平面气压和风场等历史资料(1973—1983)做了分析。结果发现,这里的水温和水位存在 10—20 天的振动,这种振动与同期气压场和沿岸风的振动相同,陆架水温和水位的这种天气尺度振动恰好是对冬季风强迫的响应。为证明这一物理过程,设计了一个简单的线性理论模式,并用 Laplace 变换获得了其解析解,证明了上述响应的物理机制。

**关键词** 天气尺度 水温振动 简单模式

地处南黄海的山东南部沿海,海底坡度平缓,水深一般在 30m 以内。自秋季开始,浅海区水温的层化现象迅速消失,由于冷却对流和风混合作用,表层以下水温也随之降低。至冬季(12月—翌年 2 月)上下层水温几乎均匀一致,等水温线大致与等深线平行。冬季,月平均水温逐渐下降,达到一年中的最低值。但在这一降温趋势中,存在天气尺度的振动,这种振动与冷空气活动有关。当冷空气侵入该海区,由于风速强劲,气温很低,空气的水汽压也很小,因此海面大量失去显热和潜热,水温降低;但当冷空气过后,水温又会回升,这种回升所需要的能量不是短暂的南风天气过程所能提供的。那么,原因何在?本文试图分析这种天气尺度水温振动的物理过程。

冬季风具有明显的准周期性振动,除 3—5 天的周期外,还存在 10—20 天的低频振动<sup>[6,7]</sup>,纬向环流的有效位能也存在这一频段的振动<sup>[8]</sup>。冬季大气 10—20 天的振动对于环流调整和东亚温度场的振动起着十分重要的作用。本文将着重讨论 10—20 天的大气振动对山东南部沿海水温的强迫作用。

## 一、资料与方法

山东南部沿海设有石岛、小麦岛、朝连岛、石臼所等几个主要海洋水文气象测站。这些测站的水温各月间的相关性很高;冬季各月尤其高,相关系数可高达 0.90<sup>[2]</sup>。因此,我们以朝连岛的水温资料为依据,分析沿海水温这种天气尺度的振动。朝连岛在青岛东南约 50km 处,水深约 30m,具有很好的代表性。选用该站 1973—1983 年共 10 个冬季的逐日平均表层水温,考虑到冬季上下层混合均匀,因此以下简称水温。除水温外,还使用该

\* 北京气象中心尹尽勇参加了部分资料分析工作。本文完成后曾与孙文心就理论分析问题做过有益讨论,谨此志谢。

接受日期: 1991 年 5 月 21 日。

站的海平面气压和风的资料。

水温的振动是指在气候平均值上的振动。逐日的水温气候均值是用 10 年平均获得的, 为使其更具有代表性, 又使用了 1954—1983 年 30 年的旬平均水温做了订正, 订正后的逐日气候均值十分平滑。水温的气候均值从 12 月 1 日到 2 月初直线下降, 其后下降缓慢, 2 月 20 日后开始缓慢回升(图略)。水温对于气候均值的距平值是我们讨论的对象。

为了获得水温的周期性振动特征, 对其距平值做谱估计, 采用对自相关系数进行 Fourier 变换的间接估计方法<sup>[6]</sup>, 时间序列长度为 90 天, 最大后延  $\tau = 30$  天。为滤出特定频段上水温随时间的振动, 采用了 Butterworth 4 极点低通滤波方法<sup>[7]</sup>, 并以此比较水温振动与气象场的关系。

## 二、主要结果

### 1. 冬季水温的谱特征

谱分析的结果表明, 水温谱密度分布的共同特征是能量主要集中在 10 天以上的低频段(超过  $\alpha = 0.01$  的信度)。其谱密度函数的结构大体上可分为两种: 一种具有 10—20 天的明显峰值, 如 1974—1975, 1978—1979, 1979—1980 等冬季(图 1a); 另一种虽然不显含 10—20 天的峰值, 但仍隐含这一周期的振动, 如 1973—1974, 1975—1976, 1981—1982 等冬季(图 1b)。

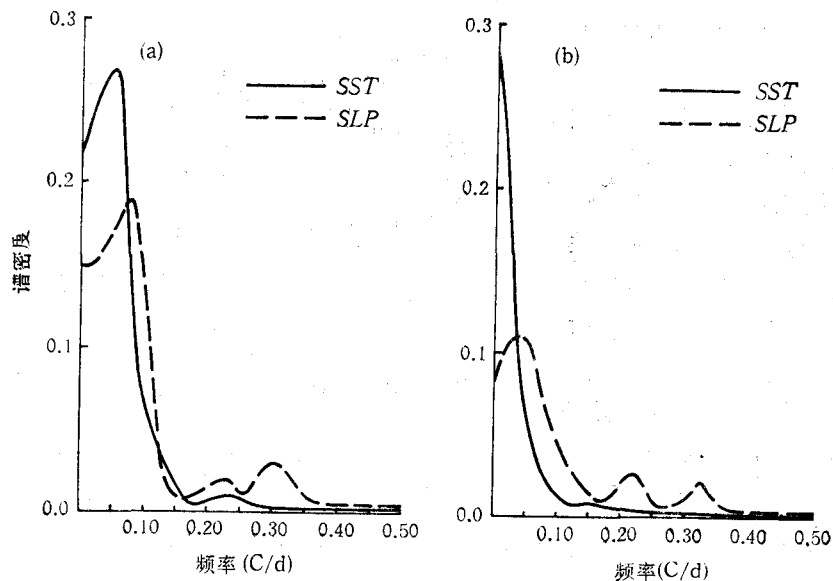


图 1 朝连岛水温(实线)和海平面气压(断线)的谱密度

Fig. 1 The spectrum density of SST and SLP at Chaoliandao Station  
a. 1978—1979 年; b. 1975—1976 年。

### 2. 海平面气压的谱特征

冬季风的振动, 集中地表现在气压场和气温场的振动上, 冷空气活动都伴随着冷高压, 冷高压过程伴有强风。因此沿海水温必定对冬季风强迫做出响应。海平面气压的谱

估计(图 1)清楚地显示出具有与水温类似的谱结构。此外,气压还存在 3 或 5 天的振动,但水温却没有这一频段的显著振动。

### 3. 水温振动与气压场的关系

单站气压的谱结构已经显示出水温振动与气压振动的相似性。为了更清楚地说明这一关系,我们采用 FGGE 期间冬季风指标  $P_i$ , 该指标是以香港与 ( $30^\circ\text{N}$ ,  $115^\circ\text{E}$ ) 之

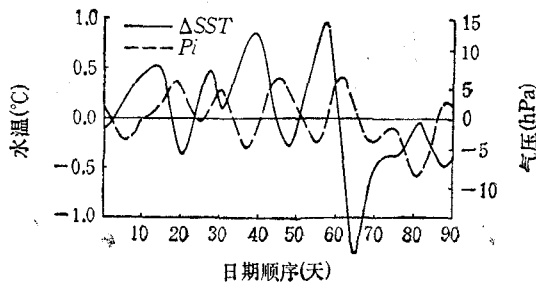


图 2 1978—1979 年冬朝连岛水温与东亚季风指数  $P_i$  的关系

Fig. 2 Relationship between SST at Chaoliandao Station and  $P_i$ , the index of winter monsoon in East Asia (1978—1979)

间的海平面气压差定义的(资料引自 [4]), 可以用来表示东亚气压场的振动。

为了获得水温和气压场 10—20 天的振动, 考虑到谱函数的结构, 采用 Butterworth 4 极点低通滤波

$$\left( \text{截断频率 } F_0 = \frac{1}{9} \text{ 日}^{-1} \right),$$

这样可以更有效地观察低频振动。

1978—1979 年冬季水温和  $P_i$  经滤波处理后的时间序列, 大体成反位

相, 但水温落后于气压场的振动约 2 天左右, 这意味着高压过后约 2 天水温才降到最低, 然后回升(图 2)。水温的振幅为  $\pm 0.5$ — $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 。

采用本站气压也可以得到相同的结论(图 3)。1975—1976 年冬季, 水温的谱函数虽然只显示出低频振动的趋势, 但在时间序列上却显示出在更长周期上叠加着 10—20 天的振动。该季水温振幅在  $\pm 1.0^\circ\text{C}$  之间变化。

上述事实表明, 山东南部沿海水温对于冬季风 10—20 天的振动具有显著的响应。在整个冬季, 水温虽然处在降低趋势中, 但有 10—20 天的振动, 其振幅可达  $1.0^\circ\text{C}$ 。冷空气过后, 水温又会回升。

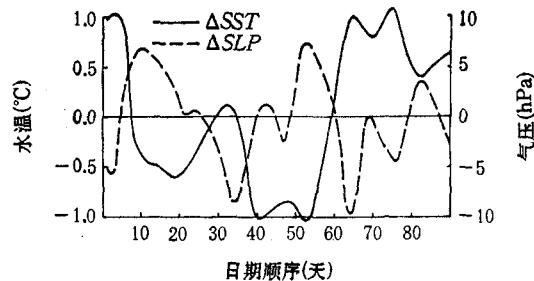


图 3 1975—1976 年冬朝连岛水温与海平面气压之间的关系

Fig. 3 Relationship between SST and SLP at Chaoliandao Station in 1975—1976 winter

## 三、讨论与结语

### 1. 水温与水位间的关系

10—20 天的天气过程同样对海平面的振动有着直接影响, 而且日平均水位的振动显示出与水温振动相同的周期和位相。为了证实这一结论, 使用石臼所 1978—1979 年冬季的日平均水位(因资料所限)资料, 经与上述同样的低通滤波之后, 与朝连岛的水温做比较

(图 4), 可以清楚地看出水位与水温具有相似的振动, 水位振幅平均约  $\pm 20\text{cm}$ 。考虑到天气系统自北而南的影响, 可能是石臼所水位的位相稍落后于朝连岛水温的原因之一。

## 2. 水位与顺岸风的关系

山东南部沿海, 平行于海岸的风应力传递给低频水位的能量最大<sup>[1]</sup>。为了证明这一结论在 10—20 天的振动中仍然成立, 使用朝连岛每日 4 次的测风报告, 按顺岸和离岸风分解。分析表明, 顺岸风与水位之间有很高的相关性, 二者在低频振动中具有相同的周

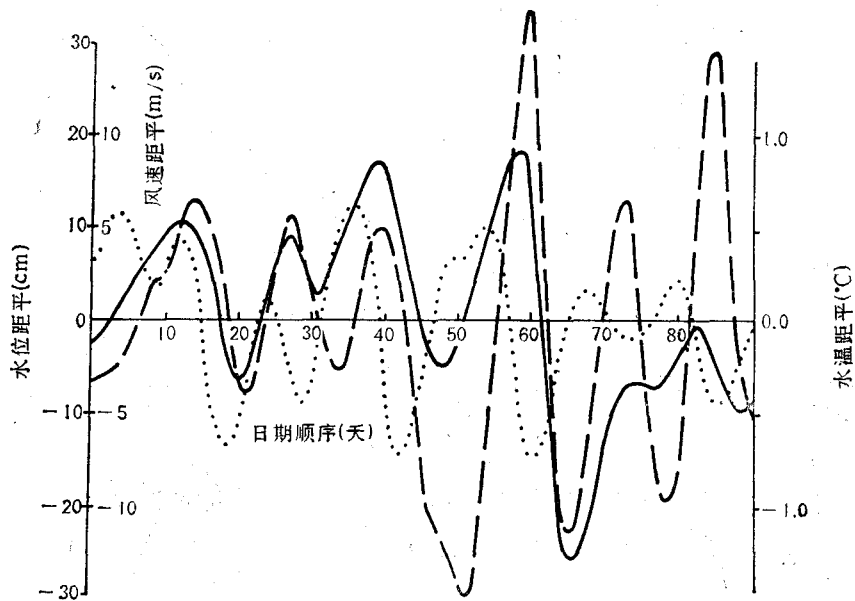


图 4 水温、水位和顺岸风的关系

Fig. 4 Relationship among SST, sea level and the along shore wind speed  
——水温; ---水位; .....顺岸风。

期, 但水位有 3—4 天的位相落后(图 4)。然而离岸风与水位的相关性极小, 这一结论与 [1] 相同。这说明水位的低频振动主要是顺岸风强迫引起的。水位落后于风强迫的时间是水位调整的时间。

## 3. 理论分析

利用水温与水位、水位与顺岸风强迫的关系, 间接分析水温振动的物理过程, 这会使问题简单化。对于水温上下均匀的浅海区, 可以使用一个线性动力系统来描述水位的变化, 而水位的变化主要由顺岸风强迫所致, 考虑到低频水位变化的谱峰主要是风强迫所提供的能量<sup>[1]</sup>, 在该动力系统中略去静压作用。

考虑如图 5 所示的模型,  $x$  轴沿海岸走向,  $y$  轴垂直于海岸, 风应力  $\vec{r}$  与  $x$  轴成  $\theta$  角, 其圆频率为  $\omega$ 。设海的深度  $h$  为常数, 且不考虑摩擦作用, 使用全流方程组

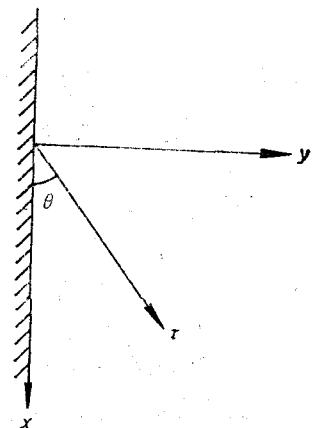


图 5 坐标

Fig. 5 The coordinates

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} - fV + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} = 0 & (3.1) \\ \frac{\partial V}{\partial t} + fU + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} = 0 & (3.2) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 & (3.3) \end{cases}$$

式中,  $U, V$  为全流速;  $\zeta$  为强迫水位; 而风应力

$$\vec{\tau} = (\tau_x, \tau_y) = \tau_0 \sin \omega t (\cos \theta, \sin \theta) \quad (3.4)$$

令  $x$  方向无界, 且根据低频水位变化与强迫力近乎一致<sup>[1]</sup>, 设  $x$  方向的物理量分布均匀, 由 (3.1)–(3.4) 式稍加变化就可以简化成下列的定解问题:

$$\begin{cases} V_{tt} = c_0 V_{yy} - f^2 V + q(t) & (3.5) \\ V|_{t=0} = 0, V_t|_{t=0} = \text{常数} & (3.6) \\ V|_{y=0} = 0 \quad (0 < y < +\infty) & (3.7) \end{cases}$$

式中,  $c_0^2 = gh$

$$q(t) = \frac{\tau_0}{\rho} (\omega \cos \omega t \sin \theta - f \sin \omega t \cos \theta)$$

用 Laplace 变换求解上述数学问题, 定义

$$\tilde{u} = \int_0^{+\infty} e^{-pt} V(y, t) dt$$

对 (3.5)–(3.7) 式进行 Laplace 变换, 为简单令 (3.6) 式中的常数为零, 则有

$$\begin{cases} \tilde{u}_{yy} - \frac{p^2 + f^2}{c_0^2} \tilde{u} = -\frac{\tau_0}{c_0^2 \rho} \left( \omega \sin \theta \frac{p}{p^2 + \omega^2} - f \cos \theta \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) & (3.8) \\ \tilde{u}|_{y=0} = 0 \end{cases}$$

于是有通解:

$$\begin{aligned} \tilde{u} = c_1 e^{\frac{y}{c_0} \sqrt{p^2 + f^2}} + c_2 e^{-\frac{y}{c_0} \sqrt{p^2 + f^2}} + \frac{\tau_0}{\rho(p^2 + f^2)} \left( \omega \sin \theta \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right. \\ \left. - f \cos \theta \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

由于  $y \rightarrow +\infty$  时,  $\tilde{u}$  有界, 所以  $c_1 = 0$ , 因而  $\tilde{u}$  在边界附近的解为:

$$\tilde{u}|_{y=0} = c_2 + \frac{\tau_0}{\rho(p^2 + f^2)} \left( \omega \sin \theta \frac{p}{p^2 + \omega^2} - f \cos \theta \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) = 0$$

$$\therefore c_2 = -\frac{\tau_0}{\rho(p^2 + f^2)} \left( \omega \sin \theta \frac{p}{p^2 + \omega^2} - f \cos \theta \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right)$$

于是得到

$$\tilde{u} = \frac{\tau_0}{\rho(p^2 + f^2)} \left( \omega \sin \theta \frac{p}{p^2 + \omega^2} - f \cos \theta \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) (1 - e^{-\frac{y}{c_0} \sqrt{p^2 + f^2}}) \quad (3.10)$$

我们关心的是靠近边界的水位振动, 则在  $y \simeq 0$  处, (3.10) 式右侧因子

$$(1 - e^{-\frac{y}{c_0} \sqrt{p^2 + f^2}})$$

展开的高阶项可以忽略。经反演则有

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\tau_0}{\rho} \omega \sin \theta \frac{y}{c_0} \int_0^t \cos \omega(t-\tau) J_0(f\tau) d\tau \\
 &\quad - \frac{\tau_0}{\rho} f \cos \theta \frac{y}{c_0} \int_0^t \sin \omega(t-\tau) J_0(f\tau) d\tau
 \end{aligned} \quad (3.11)$$

式中,  $J_0(f\tau)$  是零阶 Bessel 函数。

当  $t$  充分大时, (3.11) 式中的两个积分<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned}
 \int_0^t J_0(f\tau) \cos \omega(t-\tau) d\tau &\simeq \frac{\cos \omega t}{\sqrt{f^2 - \omega^2}} \\
 \int_0^t J_0(f\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau &\simeq \frac{\sin \omega t}{\sqrt{f^2 - \omega^2}}
 \end{aligned}$$

于是

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial V}{\partial y} = - \frac{\tau_0 \omega}{c_0 \rho \sqrt{f^2 - \omega^2}} \sin \theta \cos \omega t + \frac{\tau_0 f}{c_0 \rho \sqrt{f^2 - \omega^2}} \cos \theta \sin \omega t$$

积分  $\zeta$  并令  $t=0, \zeta=0$ ,

$$\therefore \zeta = \frac{\tau_0 f \cos \theta}{c_0 \rho \omega \sqrt{f^2 - \omega^2}} (1 - \cos \omega t) - \frac{\tau_0}{c_0 \rho} \frac{\sin \theta}{\sqrt{f^2 - \omega^2}} \sin \omega t \quad (3.12)$$

由 (3.12) 式可知:

- (1) 强迫水位与风强迫和地转有关, 其振动频率由风强迫频率所决定。
- (2) 当顺岸风时,  $\theta=0$ ,

$$\zeta = \frac{\tau_0 f \omega \zeta \theta}{c_0 \rho \omega \sqrt{f^2 - \omega^2}} (1 - \cos \omega t)$$

因而当  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  时,  $\zeta$  的增大最大。而  $\frac{1}{4}$  周相当于 3—4 天, 这也正是水位落后于风应力的时间(图 4)。

这是一个简单的线性理论模型, 用它可以基本上描述在顺岸风强迫下, 水位的低频变化。正是由于这种长波振动可以把远离海岸的较高温度的水输送到近岸; 这种输送过程成为冷空气过后, 近岸水温得以回升的主要原因。当下一次冷空气到达时, 水温再度降低, 冷空气过后水温再有所回升, 这样便导致了在冬季水温下降的趋势中, 存在 10—20 天的水温振动。而且这一频段的振动是对大气强迫的最重要的响应。

#### 4. 结语

冬季风存在 10—20 天的周期性振动。在风强迫下, 陆架水文状态必定做出响应。对山东南部沿海的水温和水位的历史资料分析表明, 这里的水文要素的确存在 10—20 天的周期性振动。这种振动是因大气强迫而产生的一种陆架长波所造成的, 这种长波可以把远离海岸温度较高的水输送到近岸, 因而导致冬季日平均水温在下降的总趋势中具有 10—20 天的周期性振动。为了证明这一结论, 本文设计了一个简单的线性模式, 从理论上定性的讨论了冬季陆架水温 10—20 天振动的可能机制。不过, 这一理论模式是根据观测事实, 只考虑了顺岸风的强迫条件, 并假定在  $x$  方向水文特征均匀, 这是对实际情况的简单近似。再说, 本文也只讨论了沿岸附近的水位振动特征, 并没有涉及这种陆架长波的

空间结构,这是有待进一步研究的问题。

### 参 考 文 献

- [1] 山东省科学技术委员会,1989,山东近海水文状况,山东省地图出版社,107—113。
- [2] 于慎余、周发秀,1988,黄海陆架与黑潮流域表层水温低频振动的相似性,海洋预报,5(2): 8—14。
- [3] 王竹溪、郭敦仁,1979,特殊函数概论,科学出版社,494。
- [4] 周发秀、H.-L. Pan, 1987, 冬季东亚主要行星尺度环流分量的时空特征及其相互作用, 山东海洋学院学报, 17(2): 27—36。
- [5] 黄嘉佑,1984,气象中的谱分析,气象出版社,1—318。
- [6] McGuirk, J. P. and Reiter, E. R., 1976, *J. Atmos. Sci.*, 33: 2079—2093.
- [7] Murakami, T., 1979, Winter Monsoonal surge over east and southeast Asia, *J. Meteor. Soc., Japan*, 57: 133—158.
- [8] Murakami, M., 1979, Large-scale aspects of deep convective activity over GATE area, *Mon. Wea. Rev.*, 107: 994—1013.

## THE 10—20 DAY SST OSCILATION OF THE SOUTHERN COAST OF SHANDONG PENINSULA IN WINTER

Zhou Faxiu, Fu Gang and Yu Shenyu

(Dept. of Physical Oceanology and Marine Meteorology, Ocean University of Qingdao 266003)

### ABSTRACT

The methods of spectrum analysis and numerical filtering are employed to analyse sea temperature, sea level, sea level pressure and sea level wind of the ocean stations at the southern coast of Shandong Peninsula in winter time. The results show that there is a kind of 10—20 day oscillation of sea surface temperature and sea level in the continental shelf of Shandong peninsula which is the same as the oscillation of sea level pressure and the wind field. The low frequency oscillation of the synoptic scale might be a response to the atmospheric impact in winter time. In order to prove the conclusion mentioned above a simple linear model whose analytic resolution is obtained by using Laplace transformation has been designed to discuss the oscillation and the resonant mechanism.

**Key words** Synoptic scale, SST Oscillation, Simple model.