

# 东海及其外缘海域表层海水温度的谱分析

杜碧兰 张建华 袁小军

(国家海洋局海洋环境预报中心)

## 提 要

应用能谱分析方法对表层海水温度场及其某些影响因子进行了周期分析, 得出了各预报海区表层水温场的主要振动周期: 东海及外缘海域具有显著的6.7年和2.2年周期, 南海东北部有2.3年周期, 东太平洋赤道区有3.8年和3.2年周期, 以及西太平洋副热带高压面积指数的10.7年、3.6年和21.3年的显著周期等。这一结果为海水温度的分析和预报业务提供了重要依据。

## 一、引 言

在表层海水温度预报中, 客观地分析海温时间序列的周期性, 具有重要的理论和实用意

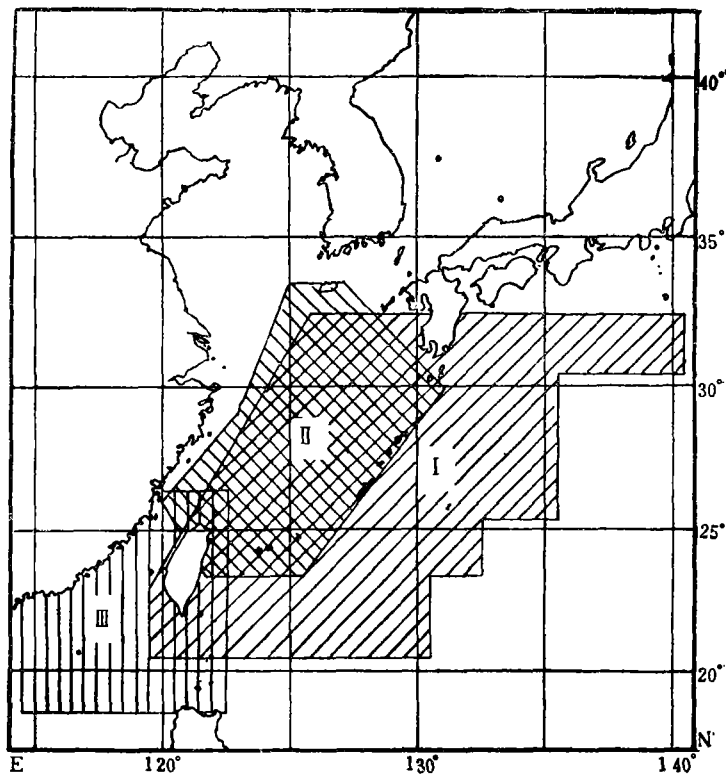


图1、东海及其外缘海域的分析预报海区图

义。目前用于海水温度周期分析的方法有谐波分析、方差分析和周期图等,但这些方法大都受假定波形(如正弦波等)的限制。而采用能谱分析则可避免上述方法的不足之处。

本文通过对东海及其外缘海域三个海区(I、II、III区,图1)的月平均表层海水温度场,以及作为海温预报影响因子的东太平洋赤道区月平均表层水温场和西太平洋副热带高压面积指数的时间序列进行了能谱分析,来探讨这些要素的演变周期性,以求对东海及其外缘海域的表层水温预报业务提供分析依据。

文中进行的上述要素的能谱(一维功率谱)分析所用的资料及其特征如表1所示。分析的资料项目有东海及外缘海域(I区)黑潮主流区36站的月平均表层水温场平均距平,东海(II区)黑潮主干区38站月平均表层水温场平均距平,南海东北部(III区)26站月平均表层水温场平均距平,东太平洋赤道区57点月平均表层水温场平均距平和西太平洋副热带高压面积指数。

表1 用于能谱分析的资料

| 资 料<br>特征          | 海区特点  | 所含站点或格<br>网点数 | 年 代       | 序列长度<br>(月) | 序列值特征        |
|--------------------|---|---------------|-----------|-------------|--------------|
| 东海及外缘海域(I区)月平均表层水温 | 黑潮主流区   | 36            | 1953~1982 | 360         | 36站水温距平平均值   |
| 东海(II区)月平均表层水温     | 黑潮主干区   | 38            | 1953~1982 | 360         | 38站水温距平平均值   |
| 南海东北部(III区)月平均表层水温 | 台湾暖流分支影响区   | 26            | 1967~1982 | 192         | 26站水温距平平均值   |
| 东太平洋赤道区月平均表层水温(•)  | 赤道冷水区<br>( $0\sim 10^{\circ}\text{S}$<br>$90\sim 180^{\circ}\text{W}$ ) | 57            | 1949~1982 | 408         | 57点水温距平平均值   |
| 西太平洋副高面积指数         | 北太平洋西环副高  |               | 1951~1982 | 384         | 588位势什米的网格点数 |

## 二、基本原理和计算方法

能谱(功率谱)分析的基本原理是把某一要素(如海水温度等)的时间序列,看作无数不同周期振动的迭加,而这些振动的波长又是连续的。并由各周期振动的强度对波长组成一个连续的谱,谱值相当于振动的“能量”。能谱分析从数学的角度讲,属于正交分解方法的范畴,但比其它正交分解方法,如自然正交函数、切贝舍夫多项式和球函数等,具有更明确的物理意义,即发现要素时间序列内部各种周期的振动结构。能谱分析侧重于频率域内各种振动的方差结构,把有限时间区间上周期波的迭加推广到无限长的时间区间上,从而使寻找某一周期性振动贡献的分析更加精细。

以富里叶变换形式表达的随机平稳过程的功率谱为[1~3]

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

(•) 此资料由臧恒范同志提供。

式中 $\omega$ 为圆频率,  $\omega = \frac{2k\pi}{T}$ ;  $k$ 为基本周期 $2m$ 内的谐波波数,  $k=0, 1, 2, \dots, m$ ,  $m$ 为最

大时延;  $R(\tau)$ 为自相关函数,  $\tau$ 为时延( $0 \sim m$ )。(1)式为能谱计算的理论公式, 应用时必须将其有限化和离散化, 即求功率谱真值的估计值。利用自相关函数进行功率谱估计的步骤为: [1-3]

### 1. 标准化数据

为了使月平均表层水温序列和副高面积指数序列能消除年变化的影响, 各月的不同水温值( $W$ )能在同一平均值及标准差的水平上进行比较, 对其进行了标准化处理:

$$W_s = \frac{W - \bar{W}}{\sigma_w}$$

式中 $W_s$ 为标准化表层水温变量,  $\bar{W}$ 为月平均表层水温的均值,  $\sigma_w$ 为月平均表层水温均值的

标准差,  $\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2}$ ,  $n$ 为样本容量即水温序列长度。

### 2. 计算落后自相关系数

按下式求取最大时延为 $m$ 的 $m+1$ 个落后自相关系数 $R(\tau)$

$$R(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} \left( \frac{W_i - \bar{W}}{\sigma_w} \right) \left( \frac{W_{i+\tau} - \bar{W}}{\sigma_w} \right) \quad (2)$$

$$\tau = 0, 1, 2, \dots, m.$$

### 3. 求粗功率谱估计值

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_0 &= \frac{1}{2m} [R(0) + R(m)] + \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} R(\tau) \\ \hat{S}_k &= \frac{R(0)}{m} + \frac{2}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} R(\tau) \cos\left(\frac{\pi k \tau}{m}\right) + \frac{1}{m} R(m) (-1)^k \\ \hat{S}_m &= \frac{1}{2m} [R(0) + (-1)^m R(m)] + \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^{m-1} (-1)^\tau R(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

### 4. 计算平滑功率谱

为了使谱能反映出更好的连续性, 并求出要素时间序列的光滑谱估计曲线, 对粗谱序列还需进行平滑, 以消除小波动。通常采用的办法是对时间序列求滑动平均。即求出月平均表层海水温度距平均值时间序列和副高面积指数距平均时间序列的新的滑动平均序列。为此我们对谱采取了不等权重的三点加权滑动平均, 求得的平滑谱估计为

$$\left. \begin{aligned} S_0 &= \frac{1}{2} (\hat{S}_0 + \hat{S}_1) \\ S_k &= 0.23 \hat{S}_{k-1} + 0.54 \hat{S}_k + 0.23 \hat{S}_{k+1} \\ S_m &= \frac{1}{2} (\hat{S}_{m-1} + \hat{S}_m) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 5. 平滑谱的显著性检验

为了确定月平均表层海水温度时间序列隐含的周期性, 计算了时间序列的落后一个时刻

的自相关系数 $r_1$  ( $r_1 = R_1/R_0$ ), 各研究海区(I—Ⅲ区)表层水温场序列的 $r_1$ 值均在0.5~0.6之间变化, 东太平洋赤道区水温和副高面积指数的 $r_1$ 也在0.7~0.8之间变动, 这些 $r_1$ 值均为较大正值, 所以上述各要素的时间序列均具有明显的持续性。故应用红噪声标准谱对谱估计值进行检验:

$$S_k = \bar{S} \left\{ \frac{1 - r_1^2}{1 + r_1^2 - 2r_1 \cos \left( \frac{\pi k}{m} \right)} \right\}$$

式中 $k$ 取0至 $m$ , 其中 $\bar{S}$ 为谱估计值的平均, 其表达式为

$$\bar{S} = \frac{1}{2m} (S_0 + S_m) + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m-1} S_i$$

按谱估计之自由度  $\nu \left( \nu = \frac{2n - m}{2} \right)$  查出 $\chi^2$ 检验表中95%信度的值再除以 $\nu$ 乘以 $S_k$ 便得出置信限为95%的红噪声标准谱上界, 用以检验谱分布中峰值的显著性。由于样本容量 $n$ 与最大时延 $m$ 有关, 若 $m$ 选择不当往往会影响到估计的精度, 本文选用 $m = \frac{n}{3}$ 较为适宜。

### 三、分析结果

对东海及其外缘海域(I—Ⅲ区)、东太平洋赤道区表层水温及西太平洋副高面积指数进行的能谱分析结果的主要周期列表如下(表2):

表2 能谱分析周期表

| 项 目<br>周 期 (年)<br>要 素 | 周 期   | 最大时延<br>(m) |
|-----------------------|---|-------------|
| 东海及其外缘海域(I区)月平均表层水温   | 6.7, (2.5), (2.2), (0.5), (0.4), (0.3), 0.2 | 120         |
| 东海(Ⅱ区)月平均表层水温         | 6.7, (5.0), 2.2, (0.5), (0.4), (0.3), 0.2   | 120         |
| 南海东北部(Ⅲ区)月平均表层水温      | 2.3, (0.5), (0.3), 0.2                      | 64          |
| 东太平洋赤道区月平均表层水温        | 3.8, 3.2, (1.9), 0.4                        | 136         |
| 西太平洋副高面积指数            | 21.3, 10.7, 3.6, 0.3, (0.2)                 | 128         |

注: 括号内周期为接近标准谱上界的周期

从I、Ⅱ区表层海水温度的能谱分布看(图2\*\*和图3), 由于它们同处于强大黑潮暖流的主干区域, 且共有东海的复盖区, 因此, 两者的主要周期很相近, 均以6.7年和2.2年周期以及高频的0.5和0.2年周期较为显著。其中6.7年的周期最为突出, 与黄忠恕所作的长

江中下游汛期平均雨深分析中得到的 7 年周期〔1〕相近。这并非偶然巧合,而是对东海及其外缘海域内黑潮暖流与长江中下游地区汛期降水存在良好统计关系的进一步证实〔5〕。不难设想,黑潮暖流的热效应必然会通过某种大尺度天气系统而影响和制约长江流域的降水过程。

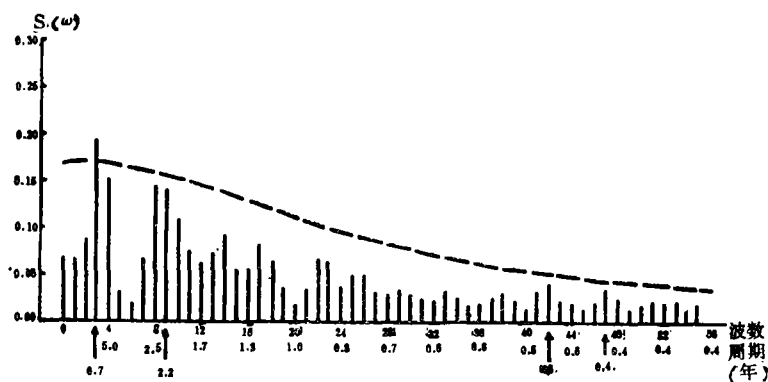


图 2 东海及外缘海域 (I 区) 月平均表层水温场能谱分布

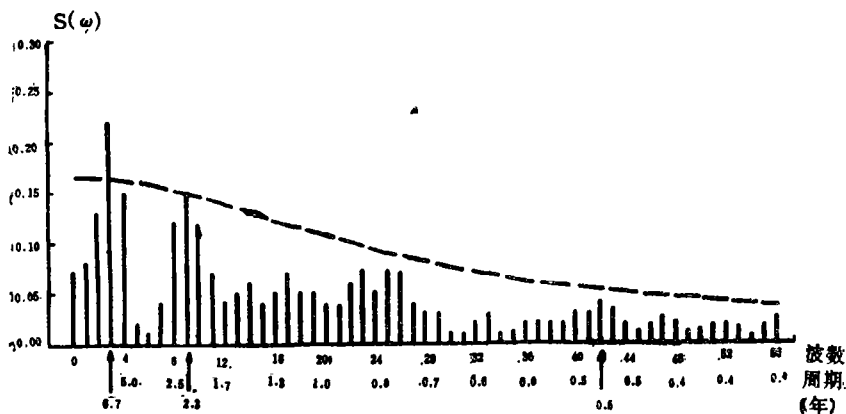


图 3 东海 (I 区) 月平均表层水温场能谱分布

南海东北部 (II 区) 是台湾暖流分支和沿岸流相互作用共同影响的海区,水文条件较为复杂。从其表层水温场的能谱分布 (图 4) 看, 2.3 年的周期最为显著, 其次是高频的 0.5, 0.3 和 0.2 年的周期。

现就 I、II、III 区表层海水温度场所共有的 2.2~2.3 年的周期加以讨论。这种周期称为准两年振荡, 简称 “QBO” (Quasi-Biennial Oscillations), 在水文气象要素中比较常见, 如 Isaacs 得出的北太平洋水温变化的 2 年周期〔6〕等。六十年代以来, 国际上研究较多, 如阿克图斯基研究的世界各地气象要素具有 2.2 年的周期〔1〕。王绍武指出〔4〕: 长达

图 2\*\*~图 6 的诸要素能谱分布中均截取了谱值  $S(\omega)$  的较大者进行了绘制, 其余  $m$  以内的高频波部分的能谱分布图均予舍去。

的自相数百年的气候史料也说明“QBO”存在的时间长且影响范围广,这种变化在我国气候资料中反映强烈。至于它的成因和机制目前还不很清楚,但不少人用海—气相互作用来解释。

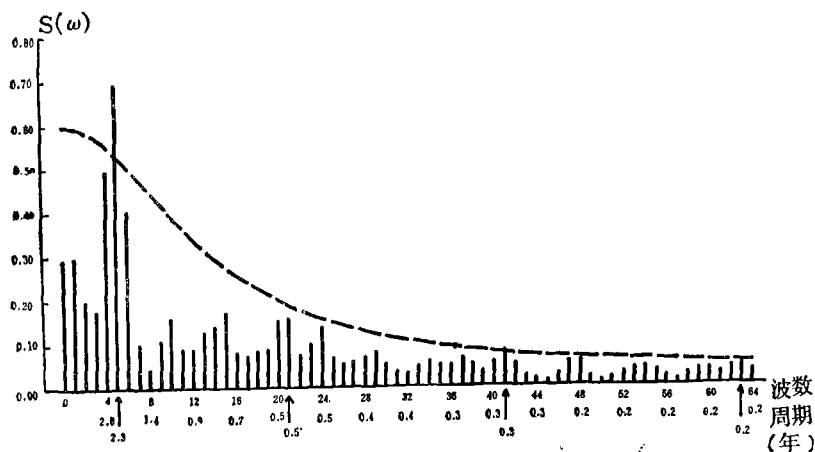


图4 南海东北部(Ⅲ区)月平均表层水温场能谱分布

东太平洋赤道区表层水温场的能谱分布(图5)中较为突出的是3.2~3.8年的周期,其次是1.9和0.4年的周期。而西太平洋副热带高压面积指数的能谱分布(图6)中,最突出的则是10.7年,3.6年和21.3年的周期,其次是高频的0.2~0.3年周期。后两种要素能谱分布中明显的3.2,3.6和3.8年的周期均可视为平均3.5年的周期。这一结果与地理所长期天气预报组得出的太平洋热带海面温度的3.5年周期〔7〕和陈烈庭得出的北太平洋副高和赤道海温共有的3.5年振荡周期〔8〕相吻合。这种振荡周期可能与ElNino现象有关,而且还可能是海—气相互作用中最敏感的一环。〔4〕

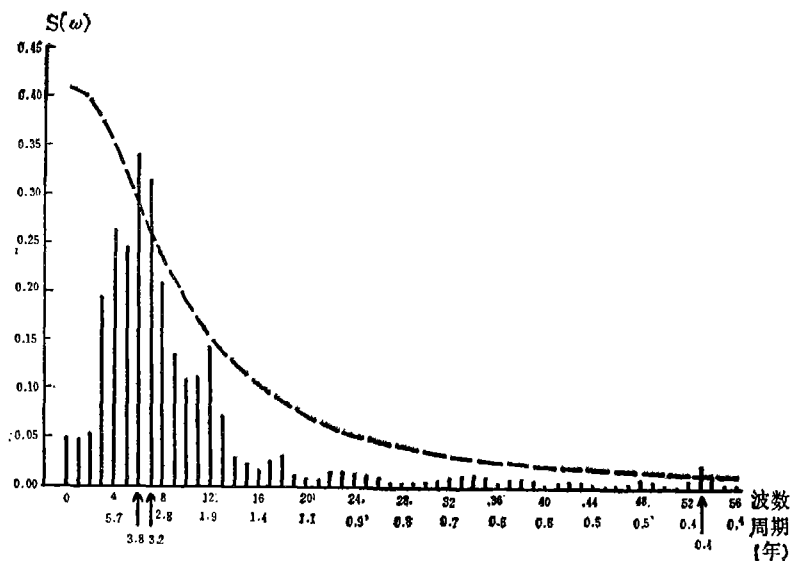


图5 东太平洋赤道区表层水温场能谱分布

北太平洋西环副高面积指数能谱分布中(图6)的另两个已提到的10.7年和21.3年周期,亦可粗视为11年和22年周期。前者称为黑子周期,后者称为海尔周期,至于两者的产生原因,通常都归结于太阳活动,而22年周期又被认为是相邻11年周期磁场的反转〔4〕。然而至今却没有人能提出令人信服的机制,来说明太阳磁场影响大气环流的过程。

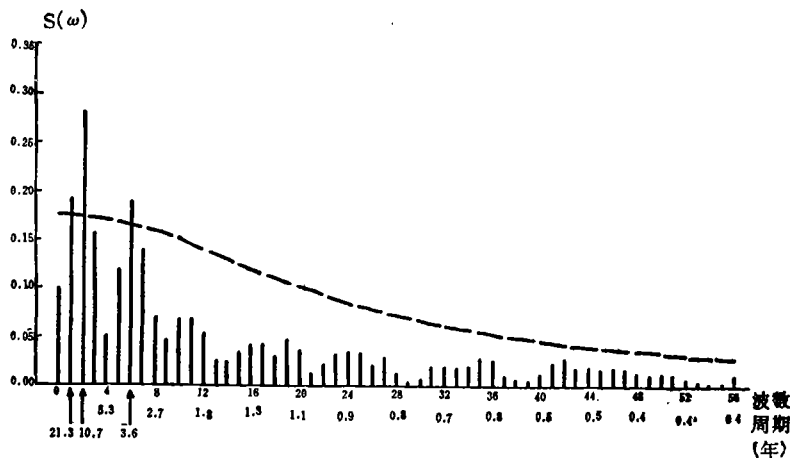


图6 西太平洋副高面积指数能谱分布

综上所述分析结果为:东海及外缘海域和东海区表层水温具有明显的6.7年周期和2.2年周期;南海东北部水温具有明显的2.3年周期;东太平洋赤道区表层水温具有3.8年和3.2年周期;而太平洋副高面积指数则具有显著的10.7年、3.6年和21.3年的周期。由此可见,能谱分析方法不仅能揭示出预报量和因子的中高频周期变化,而且还对东海及其外缘海域的海水温度分析和预报提供了重要的依据。

### 参 考 文 献

1. 黄忠恕 波谱分析方法及其在水文气象学中的应用,气象出版社,1983.
2. 黄嘉佑 气象统计预报试用教材,北京大学地球物理系气象专业
3. 郑治真 波谱分析基础,地震出版社,1983.
4. 王绍武 长期天气过程的尺度、结构及其形成原因,中长期水文气象预报文集第二集,长江流域规划办公室,1981
5. 长江流域规划办公室水文处预报科,西太平洋海表热状况对初夏副高活动的影响及其与长江洞庭、鄱阳两湖地区汛期降水的关系,技术经验交流文集,1975.
6. Isaacs J.D. The North Pacific Study J. Hydronaut, 3, №2, 1969
7. 中国科学院地理所长期天气预报组,热带海洋对副热带高压长期变化的影响及预报试验,全国长期天气预报经验交流会技术材料选编,1976.
8. 陈烈庭 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用,中长期水文气象预报文集,第二集,长江流域规划办公室,1981.

# ENERGY SPECTRUM ANALYSIS OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN EAST CHINA SEA AND THE ADJACENT WATERS

Du Bilan Zhang Jianhua Yuan Xiaojuin

(Marine Environmental Forecasting Center of NBO)

## Abstract

Periodic analysis temperature field and its some affecting factors on the sea surface is carried out by energy spectrum method. The main periods of oscillation of the sea surface temperature in the following areas are obtained: dominant periods of 6.7 years and 2.2 years in the East China Sea and its adjacent waters, 2.3 years dominant period in the northeast part of South China Sea, 3.8 and 3.2 years dominant periods

in the equatorial area of Eastern Pacific Ocean, and there are 10.7, 3.6 and 21.3 years dominant periods to the areal index of subtropical anticyclone in the West Pacific. This periodic analysis provides a important basis for the services of sea temperature analysis and prediction.