

# 太湖北岸风浪谱的特征分析\*

逢 勇 濮培民·胡维平

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

乔 树 梁

(南京水利科学研究院, 南京 210005)

**提要** 利用1992年在太湖北岸马迹山地区测得的浅水风浪资料, 采用FFT方法求算风浪频谱, 对谱结构特征的分析表明, 观测到的风浪谱在平衡范围谱值按 $-4.0$ 幂指数衰减, 风浪谱形状与文圣常给出的理论结果比较接近。另外, 分析以风要素为参量得到的无因次化频谱可以看出, 观测谱基本满足谱的相似律。

**关键词** 太湖 风浪谱 特征分析

目前国内对湖泊内小风区风浪谱的研究不多, 乔树梁等(1987)曾对东太湖进行了风浪谱的研究得出了一些有益的结论。为配合改善太湖局部水体水质的研究工作(濮培民等, 1993), 1992年7月—10月在太湖北岸进行了波浪观测, 以了解这一地区的风浪谱结构, 为进一步开发和利用太湖资源奠定基础。

## 1 资料处理及计算方法

### 1.1 资料来源

本文资料取自无锡马迹山水厂离湖岸约50m的水域, 测点水深为1.5m, 测点位置见图1。

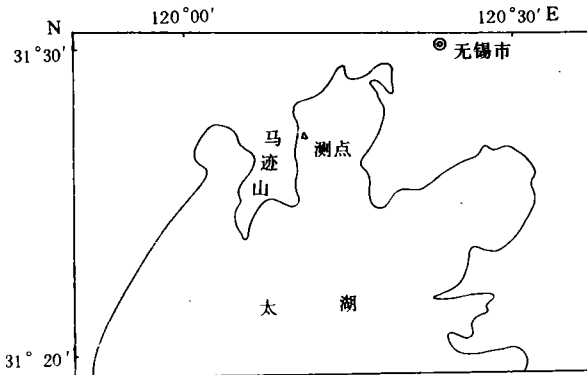


图1 测站位置示意图

Fig. 1 Observation station location

\* 博士学位论文。逢勇, 男, 出生于1958年3月, 博士, 讲师, 现工作单位: 河海大学水文系, 南京 210024。  
收稿日期: 1994年1月3日, 接受日期: 1995年12月23日。

测量仪器为电容式浪高仪, 取样频率为 10 次 /s, 观测到的平均波高约 30cm, 平均周期 2.0s, 在波浪仪观测期间, 同时用电解式风向、风速仪进行风向、风速的测量。这一期间东北风出现的频率较多, 在东北风作用时, 测点风区约为 10km, 属小风区。本文对几组属小风区, 同一风向作用时间较长的波浪资料进行了计算分析。

## 1.2 资料处理方法

为提高资料质量, 在计算前, 对原始资料进行了一些必要的处理, 以使计算所输入的数据既要真实反映实测波浪状况, 又能很好地满足计算和分析的需要。

**1.2.1 剔除野点** 由于野点缺乏共同的规律性, 难以找到一种通用, 有效的自动鉴别, 剔除野点的方法, 大都是根据原始数据的特点及计算上的要求, 采用不同的剔除野点方案, 本文用下述方法剔除野点(曹文俊等, 1993): 对原始资料序列  $x_1, x_2 \cdots x_n$  取  $\bar{x}_m = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 x_{m+j}$ , 计算第  $m$  个数据的涨落方差  $\sigma_m = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 (x_{m+j} - \bar{x}_m)^2$ , 其中  $\bar{x}_m$  为以第  $m$  个数据为中心, 依序向前、向后各取 5 个数据, 共 11 个数据的平均值,  $\sigma_m$  为第  $m$  个数据在所取的 11 个数据中的涨落方差。以  $x_m \pm 5\sigma_m$  为差别区间, 对于  $x_m \in (x_m - 5\sigma_m, x_m + 5\sigma_m)$  的数据, 认为是正常数据, 否则视为野点, 用前面相邻数据替代。

**1.2.2 数据截取** 用 FFT 计算谱密度时, 其高频端截止频率受观测采样频率限制, 低频端截止频率则与资料序列长度有关, 为加大计算的谱带宽度, 将资料以 4096 个数据长度为单位顺序截取, 每个观测时次资料截取 4 段, 分别计算每段的谱分布, 然后将对应相等频率的谱密度值求平均, 得到该观测时次高频区域的估计谱。将没有经过分段截取的资料以 4 个数据为单位求出一个平均值, 得到一个新的数据序列, 对新序列进行计算, 得到该时次的低频区域的估计谱, 将高频和低频合并即得所需要的风浪谱。

## 1.3 计算方法

假定  $x(t)$  是一次海浪观测记录, 观测的时间区间为  $(0, T)$ , 则功率谱密度函数可以近似的表示为(范顺庭, 1979):

$$\tilde{G}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{2}{T} \left| \int_0^T x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2$$

在进行数值计算时, 需要对观测记录进行离散化处理, 假定离散化的时间间隔为  $\Delta t$ , 并且  $T = N\Delta t$ , 记离散化的观测值为  $x_i, i=0, 1, 2, \dots, N-1$ , 于是

$$\tilde{G}(\omega) = \frac{\Delta t}{N\pi} \left| \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\omega i \Delta t} \right|^2,$$

在计算单边功率谱密度函数时, 离散频率值  $\omega_k$  取为

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N\Delta t}, k=0; 1, 2, \dots, \frac{N}{2},$$

所以,

$$\tilde{G}_k = \tilde{G}(\omega_k) = \frac{\Delta t}{N\pi} \left| \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}} \right|^2,$$

令

$$x_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}}$$

则 
$$\tilde{G}_k = \frac{\Delta t}{N\pi} |x_k|^2 \quad k=0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \tag{1}$$

$x_k$  称为  $x(t)$  的离散傅里叶分量，所以计算功率谱密度函数的离散值就归结为计算傅里叶分量  $x_k$ 。为了得到  $x_k$ ，采用 FFT 方法，具体见文献(范顺庭，1979)。

由式(1)算得的功率谱密度函数值  $\tilde{G}_k$  称为  $G(\omega)$  的原始谱估计值或周期图。要想得到比较稳定的谱估计值  $\hat{G}_k$ ，必须对原始谱  $\tilde{G}$  进行平滑处理，采用算术平均法进行平滑处理。另外，为了尽可能减少由于有限观测资料所产生的谱的泄漏影响，在计算过程中采用汉宁窗对计算谱  $\hat{G}_k$  进行了加权处理，窗函数的形式为

$$w(l) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi l}{N}\right) & l \in [1, N] \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

### 2 风浪谱特征分析

对 1992 年 9 月 — 10 月的在不同风速下的小风区风浪资料进行了计算分析。

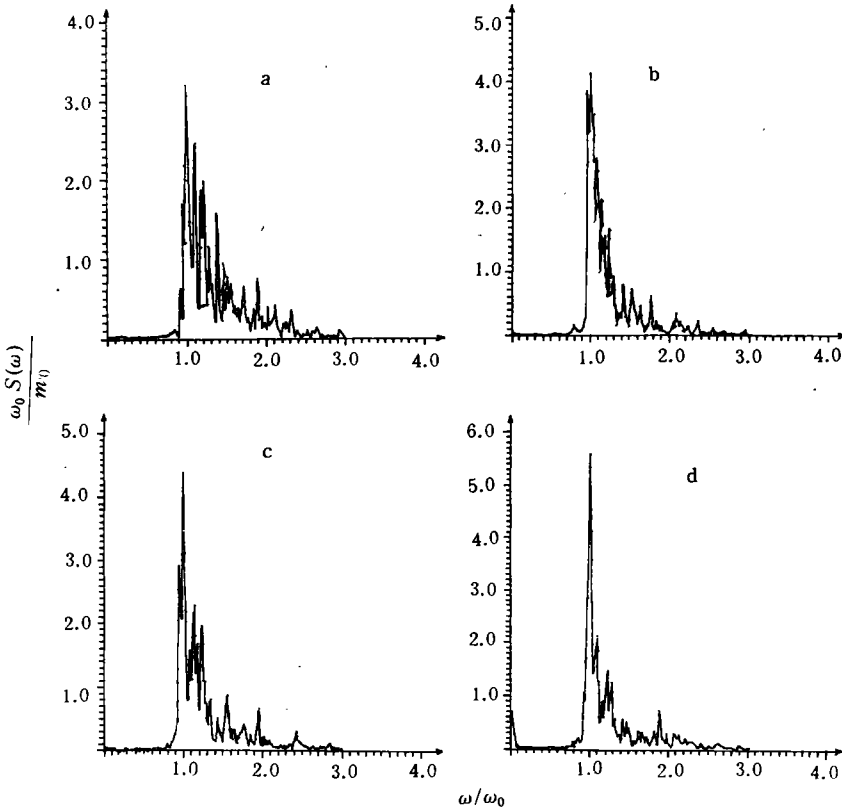


图 2 不同风速下的实测无因次风浪频谱

Fig. 2 The observed nondimensional wind wave spectra at different wind speed

a.  $u=4.0\text{m/s}$ ; b.  $u=5.0\text{m/s}$ ; c.  $u=6.0\text{m/s}$ ; d.  $u=9.1\text{m/s}$ .

## 2.1 谱形特点

图2和图3分别是以零阶矩  $m_0$  以及风速为参量得到的在不同风速下的4组无因次风浪频谱,从图3可以看出,太湖的风浪谱图比  $P-M$  谱的图形窄而高,这主要是由于湖泊的成浪条件造成的。湖泊的风区短,风要素的变化明显,风浪特性随风速变化而变化,产生该风浪的风要素对谱结构的影响占绝对优势,使能量集中在某一频率附近,结果谱密度曲线陡高而狭窄。

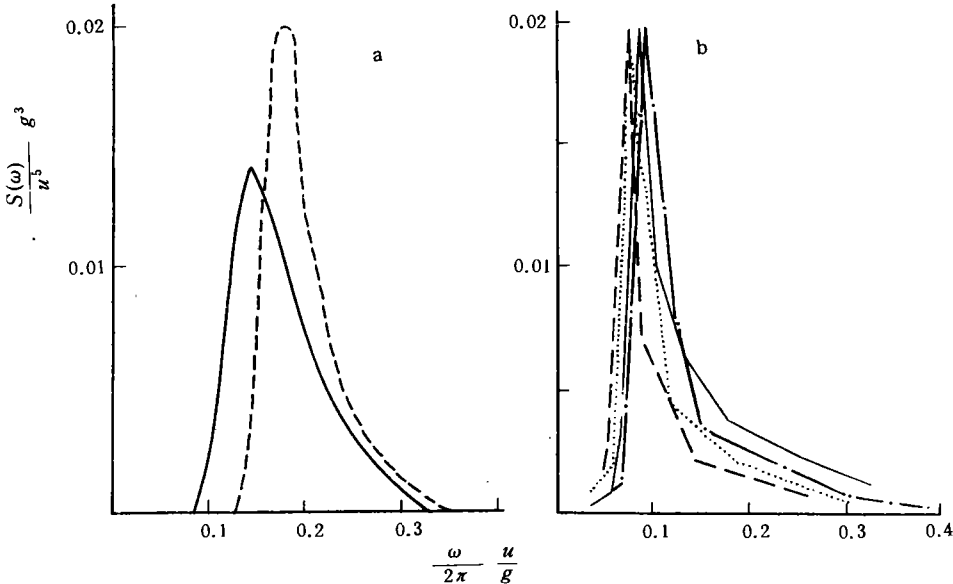


图3 不同风速下观测资料的无因次风浪外包络谱

Fig. 3 Outline of nondimensional wind wave spectra at different wind speeds

a. --- 式(4)计算谱; —  $PM$  谱; b. - · - 6.0m/s, ..... 5.0m/s, — 4.0m/s, - - - 9.1m/s.

## 2.2 风浪频谱的平衡域

风浪频谱的平衡域指的是风浪谱的高频部分在风的作用下,其通过风摄取与由于破碎而消耗的能量能很快趋于平衡,从而谱的低频部分虽继续成长,高频部分几乎不再随风变化而处于饱和状态,谱的这一部分称为平衡域。

在深水区进行因次分析后可得平衡域的谱密度表达式为:  $S(\omega) = ag^3\omega^{-5}$ , 式中,  $a$  为无因次常数;  $g$  为重力加速度;  $\omega$  为圆频率。

在浅水区,由于要考虑深度  $d$  的影响,进行无因次分析后得到的平衡域谱密度表达式为:  $S(\omega) = \frac{a}{2} g d \omega^{-3}$ , 对观测资料(图2)中的平衡域部分在双对数坐标纸上点绘后(图4)可知,平衡范围谱值按  $-4.0$  的幂指数衰减,这与理论分析以及乔树梁(1987)在东湖的观测结果基本一致。

## 2.3 风浪频谱的计算公式

目前有多种风浪频谱的计算公式,对这些公式比较后发现,本文观测谱符合

文圣常(1990)提出的改进的理论风浪频谱的计算公式。文圣常(1990)给出的风浪频谱公式在 $\omega = 1.15\omega_0$ 处分两段给出,将 $\omega \leq 1.15\omega_0$ 范围内的谱取为如下形式:

$$\tilde{S}(\tilde{\omega}) = P \exp[-f(\tilde{\omega} - 1)^{12/5}] \quad 0 \leq \tilde{\omega} \leq 1.15 \quad (2)$$

式中,

$$\tilde{S}(\tilde{\omega}) = \frac{\omega_0 S(\omega)}{m_0} \quad \tilde{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0},$$

$S(\omega)$ 为有因次的频谱, $f$ 为一正量, $P$ 为尖度因子,

$P = \frac{\omega_0 S(\omega_0)}{m_0}$ ,  $\omega_0$ 为峰频率,  $m_0$ 为零阶矩。在 $\tilde{\omega} \geq 1.15$ 处采用下述理论谱:

$$\tilde{S}(\tilde{\omega}) = (1.307 - 1.426\eta) \frac{6.77 - P}{5.813 - 5.137\eta} \frac{1.15^m}{\tilde{\omega}^m} \quad \tilde{\omega} \geq 1.15 \quad (3)$$

式中, $\eta$ 为水域深度参数; $\eta = \frac{\bar{H}}{d}$ ;  $H$ 为平均波高;  $d$ 为水域深度。在 $\tilde{\omega} = 1.15$ 处,

(2)式与(3)式给出的谱值应相等,故可得:  $f = 95 \ln \frac{P}{\tilde{S}(1.15)}$ 。

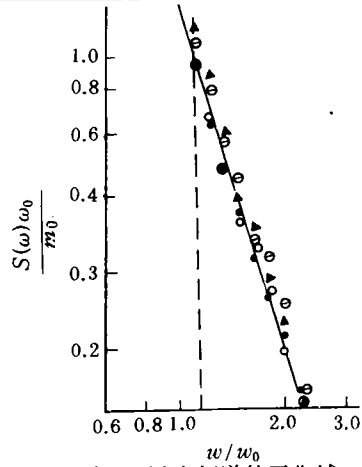


图4 风浪频谱的平衡域  
Fig.4 The balance range of the wind wave spectra  
○ 6.0m /s; ▲ 9.1m /s; □ 5.0m /s; · 4.0m /s.

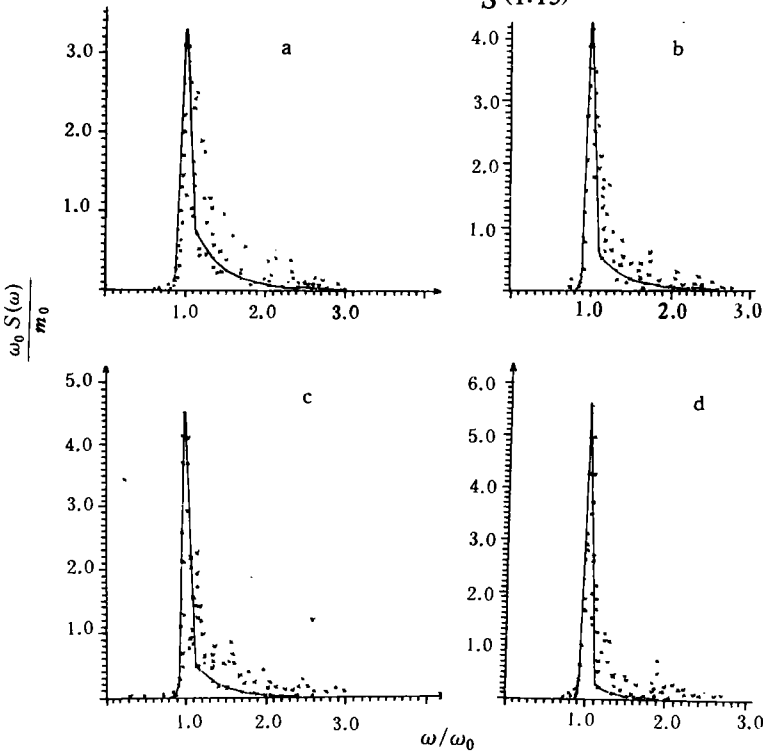


图5 无因次风浪谱的计算值与实测值的比较

Fig. 5 The comparison between observed and computed nondimensional wind wave spectra  
a.  $u=4.0\text{m/s}$ ; b.  $u=5.0\text{m/s}$ ; c.  $u=6.0\text{m/s}$ ; d.  $u=9.1\text{m/s}$ . —— (2)和(3)式的计算谱; × 观测谱。

对本文 4 组风浪谱观测资料通过谱矩可分别计算出  $P$ ,  $\eta$  以及  $m=2(2-\eta)$ , 将计算出的  $P$ ,  $\eta$ ,  $m$  代入(2), (3)式, 即可得到计算谱线的离散点值。从图 5 可以看出, 计算值与实测值符合较好。

#### 2.4 风浪频谱的相似律

参考 Pierson (1964) 的处理方法, 本文对上述不同风速下的资料计算了以风要素为参量的无因次频谱, 结果见图 3。从图 3 可以看出, 不同风速下的频谱在无因次化后成为一组很接近的谱, 从而证实本文观测谱具有类似于文献(Pierson, 1964)所述的风浪频谱的相似律。图 3 中的谱曲线可近似地以下面的解析形式表示:

$$\frac{S(\omega)g^3}{u^5} = 3.80 \times 10^{-2} \left( \frac{u\omega}{g} \right)^{-5} \exp \left[ -0.74 \left( \frac{u\omega}{g} \right)^{-12} \right] \quad (4)$$

式(4)即为不同风速下观测资料的无因次风浪外包络谱。

### 3 结论

- 3.1 太湖北岸风浪谱曲线比在海洋中观测到的 P-M 谱曲线陡高而狭窄。
- 3.2 在平衡范围谱值按 -4.0 幂指数衰减。
- 3.3 观测谱与文圣常给出的理论公式的计算值比较接近。
- 3.4 当以风要素为参量对观测谱无因次化后可知, 谱的相似律基本成立。

### 参 考 文 献

- 文圣常等, 1990, 海洋学报, 12(3): 271—283。  
 文圣常、余宙文, 1984, 科学出版社(北京): 403—429。  
 乔树梁, 1987, 海洋湖泊科学文集, 农业出版社(北京): 54—63。  
 范顺庭, 1979, 海洋湖沼通报, 2: 6—11。  
 曹文俊、朱汶、逢勇等, 1993, 南京气象学院学报, 16(2): 201—207。  
 濮培民等, 1993, 湖泊科学, 5(2): 171—180。  
 Pierson, W. J., Jr. Moscowitz, 1964, *J. Geophys. Res.*, 69(24): 5 181—5 190.

## ANALYSIS OF THE WIND WAVE SPECTRUM CHARACTER IN THE NORTH BANK OF TAIHU LAKE

Pang Yong<sup>†</sup>, Pu Peimin, Hu Weiping

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica Nanjing 210008*)

Qiao Shuliang

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210005*)

**Abstract** A wave height instrument for obtaining wind wave data was placed about 1.5m below water surface and 50m from the bank of Taihu Lake in Majishan district, Wuxi in 1992. The sampling time was 0.1s and the observed mean wave height was about 30cm, the mean cycle time was about 2.0s. During the wave observation, wind direction and speed were also observed with an electrolytic wind instrument placed 10m above the ground. The wind data computed and analysed in this study were basically short-distance wind range and long-time constant wind direction data. Analysis of wind wave spectra computed with FFT method show that: 1) the spectrum curves are more narrow and steeper than that of P-M spectra observed in the ocean area; 2) the spectrum value in the balance range decreases according to a  $-4.0$  power exponential function; 3) the spectrum outline is similar to that in the theory proposed by Wen Shengchang; and 4) the observed spectra obey the analogous law of wind wave spectra.

**Key words** Taihu Lake Wind wave spectra The character analysis

<sup>†</sup> Present address: Hehai University, Nanjing 210024.