

# 江苏响水海域海浪谱特性

陶爱峰<sup>1,2</sup>, 金飞<sup>2</sup>, 王瑶<sup>2</sup>, 娄迪<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 2100982; 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 河海大学自 2010 年起在江苏响水、蛎蚜山和大丰分别陆续建立了野外观测基地, 旨在全面系统地认识江苏近海动力环境, 为江苏近海发展提供必要的研究依据。基于响水站 2011 年一整年 8 760 笔波浪浮标资料, 采用快速傅里叶变换法, 基于 Neumann 谱型基本构成, 给出了响水海域的海浪推荐谱, 进而利用 2012 年 1 月的波浪实测资料对该推荐谱进行了对比验证, 明确了该推荐谱的合理性和指导价值。

**关键词:** 海浪谱; 谱估计; FFT; 无因次谱; 江苏响水

海浪谱是研究海浪预报、海岸泥沙运动及海上水工建筑物设计的重要依据。海浪谱的优点在于可以得到海浪的内部结构, 为后续的分析研究工作提供了依据。迄今为止, 国内外已经提出了多种海浪谱, 如 P-M 谱、JONSWAP 谱、莆田谱<sup>[1]</sup>等, 各种谱型都有其适用范围。对于某一特定海区海浪谱的获得通常是基于大量的实测资料得到观测谱, 进而参考经典谱型, 给出具有指导意义的海浪理论谱。有关江苏近海海浪谱的研究成果不多, 比较经典的是华东水利学院(现河海大学)葛明达<sup>[2]</sup>和南京水利科学研究院杨正己<sup>[3]</sup>基于 1979 年连云港海域半年的波浪实测资料, 分别开展了波高统计分布和海浪谱研究。之后虽有学者基于数值模拟等手段重新探讨过江苏近海的海浪特性, 但因缺乏长期连续资料, 尚无江苏近海连云港外其他海域基于实测资料的海浪谱研究成果。自 2009 年江苏沿海发展提升为国家战略起, 有关江苏沿海发展的一系列工程和科研问题逐渐受到了广泛关注。为了给江苏沿海开发提供必要的研究基础, 河海大学自 2010 年起在江苏响水、蛎蚜山和大丰分别陆续建立了野外观测基地。将基于响水基地连续 1 年的波浪浮标实测资料, 采用快速傅里叶变换法<sup>[4]</sup>, 初步探讨该海域无因次海浪谱公式。

## 1 波浪资料情况

使用的波浪资料为江苏近海响水地区的波浪浮标数据, 测波点经纬度为 34°26.2'N, 120°06.0'E, 使用的数据时间为 2011 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日。观测仪器采用 SBF3-1 型波浪浮标, 浮标位于水深 8 m 左右的水域, 每小时采集一次数据, 每次时间为 1 024 s, 约 17 分钟, 采样频率为 4 Hz, 一次样本总量  $N=4\ 096$ 。

## 2 海浪谱分析的原理

假设存在一个基于时间序列的波面记录  $\eta(t)$ , 根据 Fourier 级数,  $\eta(t)$  可以写成下式:

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i\omega t} dt \quad (1)$$

其中,  $X(f)$  是由  $\eta(t)$  的傅里叶变换。注意到欧拉公式  $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ , 式 (1) 可以改写成

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) (\cos \omega t + i \sin \omega t) dt \quad (2)$$

由于波面记录 $\eta(t)$ 为实数,故积分项中的傅氏变换 $X(f)$ 必为复数,故 $X(f)$ 可以写成

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

或

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i\omega t} (\cos \omega t - i \sin \omega t) dt \quad (4)$$

$h(t)$ 通常是一个以固定时间为间隔的离散序列,对其有限长度上的积分相当于累计求和,如下式:

$$X\left(\frac{n}{T_r}\right) = \frac{T_r}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \eta\left(\frac{jT_r}{N}\right) [\cos(2\pi j n / N) - i \sin(2\pi j n / N)] \quad (5)$$

其中, $N$ 是序列中点的个数, $T_r$ 是序列的时间长度, $n$ 为0到 $N-1$ 的自然数,故 $n/T_r=f$ , $T_r/N=dt$ 。

虽然式(5)给出了 $X(f)$ 的解析式,但按其计算很不方便。若利用快速傅里叶变换方法(FFT),能快速和便捷的得到 $X(f)$ 的值。能谱可以表达成如下形式:

$$S(f) = \frac{2}{T_r} |X(f)|^2 \quad (6)$$

### 3 海浪谱估计的方法

采用的是快速傅里叶变换法。随着计算机的普遍使用,FFT法得到广泛的引用。其优点在于运算速度快,高频收敛性好。利用FFT计算出 $X(f)$ ,利用式(6)得到谱粗值。得到的谱粗值需要平滑,本文采用滑动平均法进行平滑。即以频谱值为中心,对一定窗口宽度内的值进行算术平均,并用他作为该中心点的值,然后将此窗口后移,重复取平均的过程。最后得到每一笔数据平滑后的实测海浪谱,如图1的特例所示。

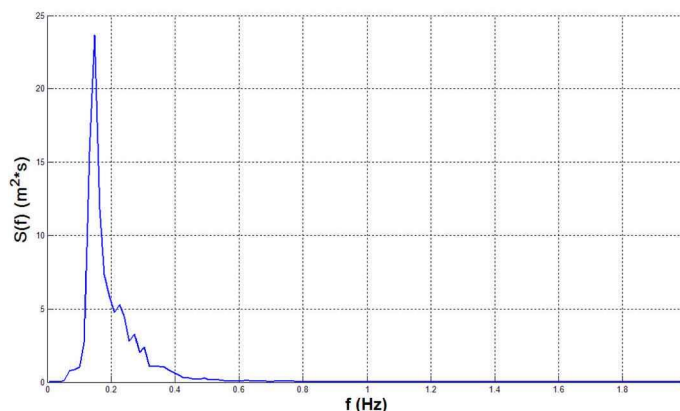


图1 2011年1月1日12时的实测谱

### 4 海浪谱的无因次与推荐谱型

由于实测谱不能得到一个具有代表性的谱形,故通过海浪谱的一般形式进行拟合,得到拟合谱,进而得到能够代表该地区的海浪谱公式。考虑到不同测波资料可能对结果引起的差异,通常对谱值进行无因次化处理,以期得到一个具有平均意义的代表性公式。

目前可供选择的谱形很多, 其中 Neumann 谱的形式为普遍使用, 即:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^p} e^{-\frac{B}{\omega^g}} |X(f)|^2 \tag{7}$$

式中:  $A, B$  为风浪参数,  $p, g$  为谱形参数,  $\omega$  为圆频率,  $f$  为频率。将式 (7) 中的自变量圆频率均除以主频率  $\omega_0$ , 做无因此处理, 并将零阶矩  $m_0$  及平均圆频率  $\bar{\omega} = 2\pi/\bar{T}$  带入合并整理可得无因次频率的海浪谱公式:

$$\frac{S(\omega)\bar{\omega}}{m_0} = g \left(\frac{p}{g}\right)^{\frac{p}{g}} \left\{ \left[ \Gamma\left(\frac{p-3}{g}\right) \right]^{\frac{1}{2}} / \left[ \Gamma\left(\frac{p-1}{g}\right) \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-p} \exp\left[-\frac{p}{g}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-p}\right] \tag{8}$$

当  $\omega/\omega_0 = 1$  时, 得到谱的极大值, 即谱峰, 上式变为:

$$\bar{S}_0 = g \left(\frac{p}{g}\right)^{\frac{p}{g}} \left\{ \left[ \Gamma\left(\frac{p-3}{g}\right) \right]^{\frac{1}{2}} / \left[ \Gamma\left(\frac{p-1}{g}\right) \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \exp\left(-\frac{p}{g}\right) \tag{9}$$

将  $\omega_0$  用  $p, g$  表示可得:

$$\frac{\omega_0}{\bar{\omega}} = \left(\frac{p}{g}\right)^{\frac{1}{g}} \left[ \frac{\Gamma\left(\frac{p-1}{g}\right)}{\Gamma\left(\frac{p-3}{g}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

式 (9) 和 (10) 中的  $\omega_0, \bar{\omega}$  和  $m_0$  均由实测谱中的参数得到, 故联立求解  $p, g$  即可得到谱公式, 表 1 为一组数据的计算实例, 图 2 为该实例所得无因次实测谱与拟合谱式 (11) 的比较图。

表 1 2011 年 9 月 15 日海浪谱的无因次拟合参数

$m_0$	$\bar{\omega}$	$\omega_0(f)$	$\bar{S}_0(f)$	$\omega_0/\bar{\omega}$	$p$	$g$
4.4107	0.18834	0.1167	2.136	0.61961	4.157	4.658

拟合谱无因次公式为:

$$\frac{S(\omega)\bar{\omega}}{m_0} = 5.214 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4.157} \exp\left[-0.892\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4.658}\right] \tag{11}$$

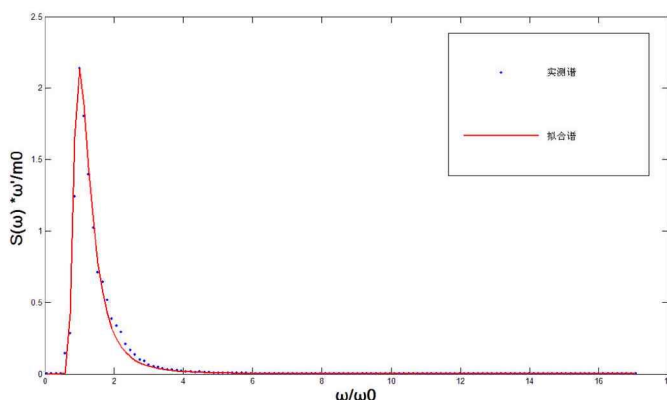


图 2 2011 年 9 月 15 日 无因次实测谱与拟合谱比较

表 2 2011 年 12 个月无因次拟合谱谱形参数

Month	$p$	$g$
1	4.676 755	3.905 882
2	4.789	4.402 55
3	4.718 56	3.282 96
4	4.756 571 429	3.585 892 857
5	4.421 476 19	2.844 380 952
6	5.253 038 462	2.491 576 923
7	4.544 415 385	2.891 819 231
8	4.569 404 167	4.441 058 333
9	4.842 411 538	4.201 084 615
10	4.542 737 931	3.660 975 862
11	4.739 614 815	4.827 640 741
12	4.845 522 222	4.046 927 778
Average	4.7	3.7

具体分析了 2011 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日期间的 8521 个个例谱，将其以天为单位，平均后得到每天的谱形参数，共 355 组。再按月为单位，得到 12 个月的谱形参数（如表 2 所示）。由于参数较为相近，故可以得到一个具有代表性平均谱形式(12)，即为本文的推荐谱公式，其曲线如图 3 所示。

$$\frac{S(\omega)\bar{\omega}}{m_0} = 6.96 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4.7} \exp\left[-1.27\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-3.7}\right] \quad (12)$$

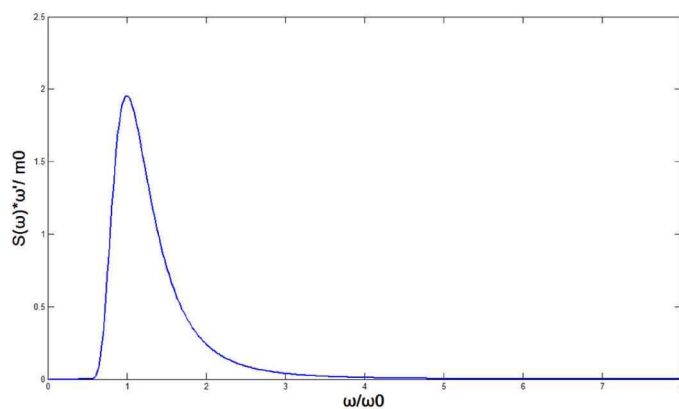


图 3 江苏近海响水站推荐谱

### 5 推荐谱的验证

为了确保推荐谱的可靠性，利用响水测站 2012 年 1 月的波浪实测数据进行了对比验证。首先分析得到一月份的实测谱，然后与推荐谱比较，结果如图 4 所示，可见基于 2011 年整年资料所得推荐谱与 2012 年 1 月的实测谱吻合很好，推荐谱指导价值明确。

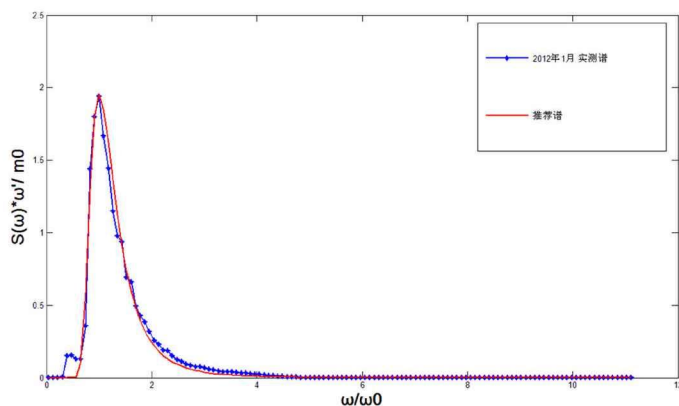


图4 推荐谱与2012年1月实测谱的比较

## 6 结 语

基于江苏近海响水海域 2011 年连续一年的波浪实测资料, 根据 Neumann 谱基本型式, 通过快速傅里叶变换方法给出了该海域的推荐谱, 并通过 2012 年 1 月的实测资料对该推荐谱进行了对比验证, 确保了推荐谱的正确性。然而本结果仅为初步探讨, 为了保证该推荐谱对江苏海域的指导价值, 还将在后续的工作中将该谱型与 Jonswap 谱、莆田谱等经典谱型进行对比分析, 进一步揭示江苏海浪特性及其固有谱型的动力成因。

### 参考文献:

- 1 洪广文. 关于浅水风浪统计性质和统计方法若干问题的探讨续. 华东水利学院学报, 1978(2): 50-71.
- 2 葛明达. 连云港波高波周期统计分布. 海洋工程, 1984(1): 40-50.
- 3 杨正己, 贯辉华. 连云港风浪谱分析. 海洋工程, 1984(3): 46-58.
- 4 杨秉正. 快速傅里叶变换法的海浪谱估计. 重庆交通学院学报, 1985, 12(1): 53-60.