

风浪频谱的成长模型

三参量的风浪频谱随风区的成长关系*

王 鑫^{1,2} 侯一筠¹

(1.中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2.中国科学院研究生院 北京 100049)

提要 为研究三参量风浪频谱随风浪的成长关系,从而直观地描述风浪频谱成长过程中的超射现象,并证明三参量谱谱型的合理性。基于已得到的谱参量随风区的变化关系,对三参量风浪频谱以及风浪频谱成长过程中存在的“超射”现象作深入的研究,得到三参量风浪频谱随风区的成长关系:

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B) = \frac{\tilde{m}_0(\tilde{x})}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})B(\tilde{x})} \left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-p(\tilde{x})} \exp \left[-\frac{p(\tilde{x})}{q(\tilde{x})} \left(\left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-q(\tilde{x})} - 1 \right) \right]$$

在此基础上,得到无因次风区:300、500、2000、5500、10000、15000下,风浪频谱的谱线,从而直观地描述了风浪频谱成长过程中的“超射”现象,并认为在风浪频谱的成长过程中确实存在着“超射”现象,但是该现象并不如 Hasselmann 等提出的理论中阐述的那样存在于风浪频谱成长的全过程,而是仅存在于风浪频谱成长的初期。随着风浪的不断成长,“超射”现象逐渐减弱,直到风浪接近充分成长,“超射”现象也随之逐渐消失。经过不同风区下实测数据的检验,证明 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 、 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ 、 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta)$ 以及 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta)$ 四种形式的三参量风浪频谱谱型是合理的,同时也进一步证明了谱的零阶矩、谱的峰频率、谱宽度、波高、周期、波陡和波龄随风区变化关系的正确性。

关键词 风浪频谱, 三参量谱, 超射现象

中图分类号 P731.21

侯一筠等(1990)基于传统风浪频谱,通过引进谱宽度参量,建立了普遍形式的风浪频谱——三参量风浪频谱,并且证明了目前所常用的频谱是该谱形的某种特例。该成果因其在理论研究以及实际应用中的重要作用,受到较为普遍的重视。本文的目的是将谱参量随风区的变化关系代入该三参量谱,得出三参量风浪频谱随风区的变化关系,从而更加细致地刻画风浪频谱随风参量的成长方式与规律。在此基础上,描述风浪频谱成长过程中的“超射”现象,并阐述其在风浪成长初期发生以及在后期消失的过程,改进前人的“超射”现象理论。利用实测数据,对三参量谱进行分析验证,证明三参量谱理论结果的正

确性与先进性,并以此说明将该理论应用于风浪预报以及海洋工程等实际之中的可行性。

1 四种形式的三参量谱

侯一筠等(1990)将谱宽度引入 Neumann 谱,得到以谱的零阶矩、谱的峰频率和谱宽度为参量的三参量风浪频谱

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B) = \frac{\tilde{m}_0}{\tilde{\omega}_0 B} \left(\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0} \right)^{-p} \exp \left[-\frac{p}{q} \left(\left(\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0} \right)^{-q} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

此谱亦可以表示成为以波高,周期及谱宽度为参量的三参量谱

* 国家自然科学基金资助项目,40476018号。王鑫, E-mail: wolaiye_2004_renmen@126.com

通讯作者: E-mail: yjhou@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2007-04-04, 收修改稿日期: 2008-04-08

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{H}, \tilde{T}, B) = \frac{\tilde{H}^2 \tilde{T} R(B)}{4\pi^2 B} \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, B)} \right) \cdot \exp \left[-\frac{p}{q} \left(\left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, B)} \right)^{-q} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

另外, 利用谱宽度与波陡的关系 $B-\delta$ 及谱宽度与波龄的关系(侯一筠等 1993) $B-\beta$ 还可以得到分别以波高、周期、波陡和波高、周期、波陡为参量的三参量谱

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta) = \frac{\tilde{H}^2 \tilde{T} R[B(\delta)]}{4\pi^2 B(\delta)} \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, \delta)} \right) \cdot \exp \left[-\frac{p}{q} \left(\left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, \delta)} \right)^{-q} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta) = \frac{\tilde{H}^2 \tilde{T} R[B(\beta)]}{4\pi^2 B(\beta)} \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, \beta)} \right) \cdot \exp \left[-\frac{p}{q} \left(\left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_0(\tilde{T}, \beta)} \right)^{-q} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

2 三参量谱随风区的变化关系与“超射”现象

将王鑫等(2008)中得到的各谱参量随风区的变化关系

$$\begin{aligned} B &= 5.68 \times 10^{-3} \tilde{x}^{9.48 \times 10^{-1} - 4.66 \times 10^{-2} \ln \tilde{x}} \\ \tilde{m}_0 &= 1.36 \times 10^{-8} \tilde{x}^{2.37 - 1.10 \times 10^{-1} \ln \tilde{x}} \\ \tilde{\omega}_0 &= 4.08 \times 10^1 \tilde{x}^{-7.62 \times 10^{-1} + 3.71 \times 10^{-2} \ln \tilde{x}} \end{aligned}$$

代入(1)式; 将 p, q 视为变量, 并对其作 λ -替换, λ

从 1 变至 1.25, $p = \frac{\lambda}{\lambda-1}$, $q = \frac{1}{\lambda-1}$, 并根据 B 与 p 、

q 的关系 $B = \frac{1}{q} \left(\frac{q}{p} \right)^{\frac{p-1}{q}} \Gamma \left(\frac{p-1}{q} \right) e^{\frac{p}{q}}$, 得到 $B = \frac{\lambda-1}{\lambda} e^{\lambda}$,

再由 B 随无因次风区的变化关系, 就可以得到 λ 随风区的变化关系, 进而就可以得到 p, q 随风区的变化关系, 将该关系同样代入(1)式, 就可以得到三参量谱随无因次风区的变化关系

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B) = \frac{\tilde{m}_0(\tilde{x})}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x}) B(\tilde{x})} \left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-p(\tilde{x})} \cdot \exp \left[-\frac{p(\tilde{x})}{q(\tilde{x})} \left(\left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-q(\tilde{x})} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

代入不同的风区值, 可以看到(图 1): 随着风区的成长, 谱的极值不断成长, 峰值频率逐渐向低频率方向推移; 直到风浪达到充分成长 ($\tilde{x} \approx 15000$), 谱的极值停止增长, 其峰值频率亦不再变化。另外, 更重要的是, 由图 1 可以发现, 在风浪成长初期, 组成波在一段时间内成长至大于其平衡值的现象, 即“超射”现象文圣常等(1984)对于这种现象的初步解释为: 现象的出现与各组成波间的能量交换以及高频率波破碎所致能量消耗有关; 随着风浪的不断成长, “超射”现象逐渐减弱; 直到风浪成长到一定程度, 接近充分成长, “超射”现象也随之逐渐消失。自 JONSWAP 试验之后, Hasselmann 等于 1973 年根据 JONSWAP 谱提出谱相对于风区的成长过程中存在着超射现象, 改进了 Ijima 于 1957 年提出的谱的成长方式(Ijima 的理论中未涉及超射现象的内容), Hasselmann 等的理论提出后在相关领域得到了广泛的接受, 即普遍认为风浪频谱随风区成长的整个过程中都存在着“超射”现象。作者在三参量风浪频谱的理论基础之上, 结合试验结果(图 1—图 4), 提出了有别于前人的观点, 认为在风浪频谱的成长过程中确实存在着超射现象, 但是该现象并不如 Hasselmann 等提出的理论中阐述的那样存在于风浪频谱成长的全过程, 而是仅存在于风浪频谱成长的初期; 随着风浪的不断成长, “超射”现象逐渐减弱; 直到风浪成长到一定程度, 接近充分成长, “超射”现象也随之逐渐消失。此观点改进了传统的“超射”现象理论。

同样, 将波高、周期随无因次风区的变化关系 (Wu *et al*, 2004) 以及谱宽度随无一次风区的变化关系

$$\tilde{H} = 2.64 \times 10^{-3} \tilde{x}^{5.42 \times 10^{-1} - 1.25 \times 10^{-2} \ln(\tilde{x})}$$

$$\tilde{T} = 4.40 \times 10^{-1} \tilde{x}^{3.39 \times 10^{-1} - 0.91 \times 10^{-2} \ln(\tilde{x})}$$

$$B = 5.68 \times 10^{-3} \tilde{x}^{9.48 \times 10^{-1} - 4.66 \times 10^{-2} \ln \tilde{x}}$$

代入(2)式, 可以得到该形式的三参量谱随无因次风区的变化关系(图 2)。另外, 根据波陡、波龄与谱宽度的关系

$$\delta = 2.14 \times 10^{-2} B^{-1.05 - 4.26 \times 10^{-1} \ln B} \quad (6)$$

$$\beta = 1.26 B^{1.28 + 1.97 \times 10^{-1} \ln(B)} \quad (7)$$

将对应的特征波参量随无因次风区的变化关系

$$\delta = 8.57 \times 10^{-2} \tilde{x}^{-1.35 \times 10^{-1} + 5.7 \times 10^{-3} \ln(\tilde{x})}$$

$$\beta = 7.0 \times 10^{-2} \tilde{x}^{3.39 \times 10^{-1} - 9.1 \times 10^{-3} \ln(\tilde{x})}$$

分别代入式(3)、(4), 同样可以得到另两种形式的三参量谱随无因次风区的变化关系(图 3、图 4)。从图 3、图 4 中不难看出, 随着风区的成长, 谱的峰值的变化

以及“超射”现象的发生与消失的过程, 均与先前依观测结果描述的风浪的随风区的成长过程相稳合。

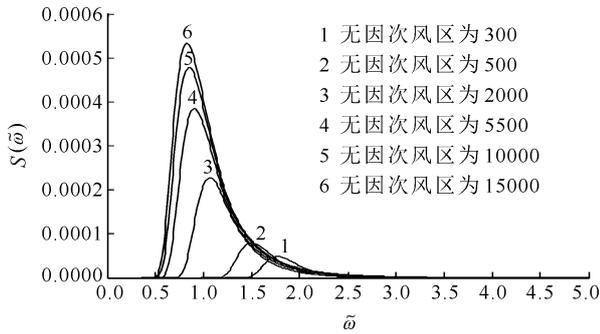


图 1 三参量频谱 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 随风区的成长关系
Fig.1 The growth relation of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ with dimensionless fetch

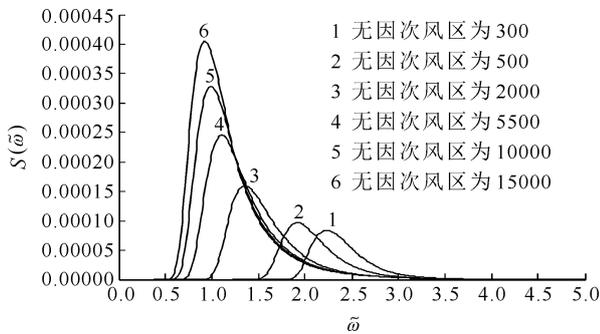


图 2 三参量频谱 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ 随无因次风区的变化关系
Fig.2 The growth relation of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ with dimensionless fetch

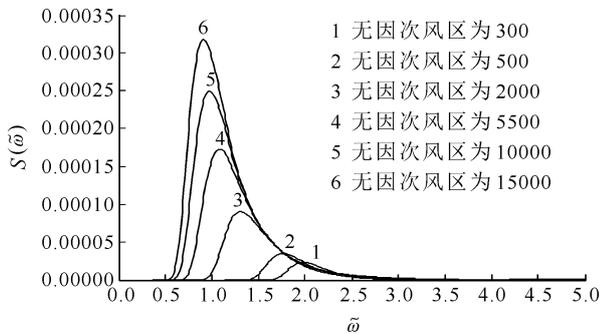


图 3 三参量频谱 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta)$ 随无因次风区的变化关系
Fig.3 The growth of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta)$ with dimensionless fetch

3 实测资料检验

参考国家海洋局所属海洋站的观测资料(海洋站观测资料, 1978、1979 和 1982), 考虑需要风区参量, 选取了渤海、黄海、东海的部分海洋站的观测数据(所选海洋站为千里岩、塘沽、连云港、大鹿岛、滩浒岛、台山和长白山)。由于本文中提出的各谱参量是随无

因次风区的变化而变化的, 因此按照无因次风区的不同将所选的数据进行分组, 将数据较少以及数据的观测条件不适合的组舍去, 最后选取有代表性的 3 组数据, 每组对应的无因次风区的大小及数据个数如表 1 所示。

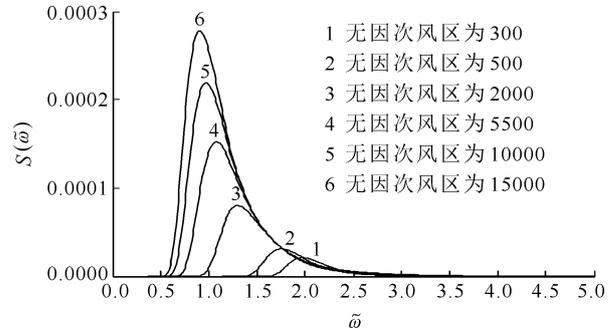


图 4 三参量频谱 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta)$ 随无因次风区的变化关系
Fig.4 The growth of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta)$ with dimensionless fetch

表 1 实测数据
Tab.1 In situ date

各组实验数据的性质		
个 例	无因次风区 \tilde{x}	个 数
1	3.06×10^3	133
2	3.56×10^3	96
3	4.09×10^3	203

从三组数据中先后选出部分数据对式(1)形式(图 5—图 7)和式(2)形式(图 8)进行验证, 图 5—图 8 中, 实线表示本文中得到的理论谱线, 实心点表示选出的各数据点, 虚线表示由所选数据得到的实测谱线。由图 5—图 8 可见, 理论谱线与实测谱线拟合良好。

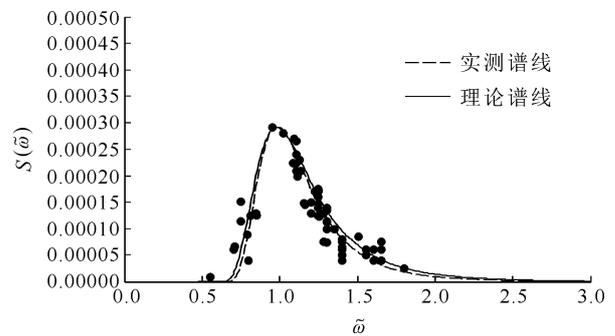


图 5 无因次风区取 $\tilde{x} = 3.06 \times 10^3$ 时对三参量谱 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 的实测验证

Fig.5 Comparison of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ with the observed result at dimensionless fetch of 3.06×10^3

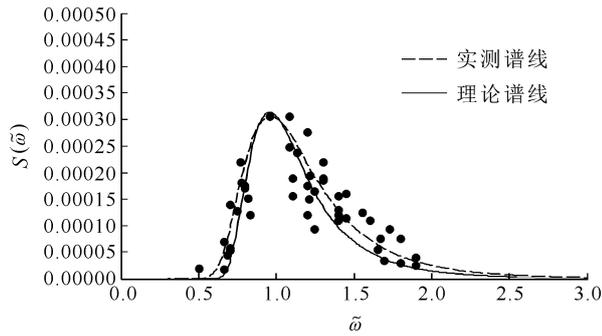


图6 无因次风区取 $\tilde{x} = 3.56 \times 10^3$ 时对三参量谱 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 的实测验证

Fig.6 Comparison of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ with the observed result at dimensionless fetch of 3.56×10^3

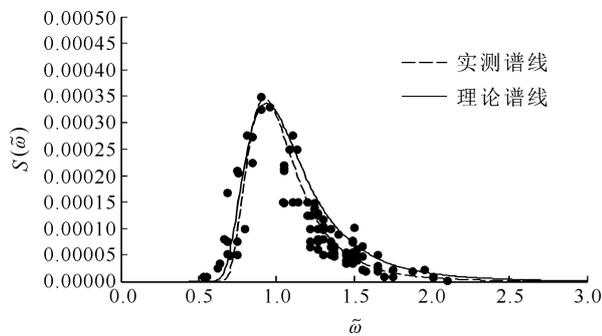


图7 无因次风区取 $\tilde{x} = 4.09 \times 10^3$ 时对三参量谱 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 的实测验证

Fig.7 Comparison of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ with the observed result at dimensionless fetch of 4.09×10^3

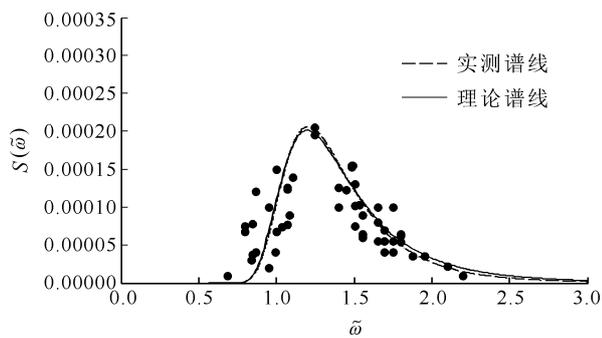


图8 无因次风区取 $\tilde{x} = 3.56 \times 10^3$ 时对三参量谱 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ 的实测验证

Fig.8 Comparison of three-parameter spectra $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ with the observed result at dimensionless fetch of 3.56×10^3

首先, 验证结果表明, 将谱参量随风区的变化关系引入三参量频谱, 进而得到该谱随风区的变化关系, 从而将理论结果应用于实际计算和预报的方法是可行且有实际意义的; 另一方面, 三参量风浪频谱的理论结果在实际中的成功应用, 又可以从另一个方面证明理论结果的合理性与先进性。

4 结语

通过分别建立各谱参量的动力学控制方程, 得到其随风浪成长关系, 进而获得 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$ 、 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta)$ 、 $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta)$ 、 $S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$ 四种形式的三参量风浪频谱随风浪的变化关系, 从而更加细致地刻画了风浪频谱的成长方式及规律, 直观地描述了风浪频谱的成长过程中的超射现象, 并阐述其在风浪成长初期发生以及在后期消失的过程; 通过实测数据的验证, 证明了三参量谱型的合理性以及先前得到的谱参量随风区变化关系的正确性, 并以此说明了将该理论应用于风浪预报以及海洋工程等实际之中的可行性。此外, 还应该看到, “超射”现象在风浪成长初期的发生以及后期的消失, 必然受着其相关动力学机制的控制, 进一步完善动力学理论的研究, 揭示“超射”现象背后的动力学机制, 应该是下一步更加深入研究的方向。最后需要指出, 本文中针对风区参量的研究方法对于风时参量同样适用。

参 考 文 献

- 文圣常, 余宙文, 1984. 海浪理论与计算原理. 北京: 科学出版社, 430—437
- 王鑫, 侯一筠, 2008. 风浪频谱的成长方式研究. 谱参量随风区的变化关系. 海洋与湖沼, 39(5): 433—438
- 侯一筠, 文圣常, 1990. 三参量风浪频谱. 海洋与湖沼, 21(6): 495—504
- 侯一筠, 王涛, 1993. 风浪频谱中的特征量. 海洋与湖沼, 24(6): 126—131
- Hasselmann K, 1973. Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deut Hydr Zeit, A8(12): 1
- Wu Shuping, Hou Yijun, Yin Baoshu et al, 2004. Relationship between wave steepness and wave age in the course of wind wave growth. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 22 (4): 340—343

THE GROWTH MODEL OF WIND WAVE SPECTRUM . RELATIONSHIP BETWEEN WIND WAVE SPECTRA OF THREE PARAMETERS AND FETCH

WANG Xin^{1,2}, HOU Yi-Jun¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract Growth relationship between wind wave spectra of three parameters and wind wave is studied, with which overshoot that appears during the wind wave spectra development can be described more clearly. The growth relationship between spectrum parameter and fetch were studied, from which three parameters and overshoot phenomenon that appears during wind wave spectra developing were tested, and an equation describing the growth of three-parameter spectra with wind wave was obtained:

$$S(\tilde{\omega}; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B) = \frac{\tilde{m}_0(\tilde{x})}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})B(\tilde{x})} \left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-p(\tilde{x})} \exp \left[-\frac{p(\tilde{x})}{q(\tilde{x})} \left(\left[\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0(\tilde{x})} \right]^{-q(\tilde{x})} - 1 \right) \right]$$

With the equation, the spectra of wind waves were obtained at zero-dimensional fetches of 300, 500, 2000, 5500, 10000, and 15000, and the overshoot was described more clearly. However, the overshoot does not exist in the whole process of wind wave spectrum development as stated previously by Hasselmann, but in the early stage of the development only, extenuates with wave growth and then disappears when the wave fully grows. Tested against observational data, four different three-parameter wind wave spectra ($S(\omega; \tilde{m}_0, \tilde{\omega}_0, B)$, $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, B)$, $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \delta)$, $S(\omega; \tilde{H}, \tilde{T}, \beta)$) were proved reasonable. Meanwhile, the growth relationships between fetch and spectrum variance, peak frequency, spectrum width, wave height, wave period, wave steepness, and wave age were also validated.

Key words Wind wave spectrum, Spectra with three parameters, Overshoot