

波群内单个波的波陡分布与波破碎

高志一¹, 文凡², 李洁¹

(1. 国家海洋环境预报中心 海洋灾害预警报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266003)

摘要: 对波群内单个波的波陡分布和波破碎进行了实验研究。研究结果是, 波群中波动的最大振幅出现在波群前部而不是出现在波群中央, 这种不对称性导致波群前部单个波出现大波陡的概率大于后部单个波出现大波陡的概率; 进一步的波破碎统计发现波群前部单个波破碎的频率是后部单个波破碎频率的 4 倍。因此认为, 波群结构的不对称性能够导致单个波发生破碎的位置出现在波群前部, 这对风浪研究具有重要意义。

关键词: 波群; 波陡; 波破碎

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)09-0096-11

波破碎的研究是当今海浪研究中的热题。近年研究表明波群是影响波破碎的重要因素^[1-4]。波群由一连串波高超过某一临界值的波构成, 而波群中单个波的最大振幅出现位置对波的破碎具有重要影响。Banner 等^[5]研究认为: 波群中单个波的振幅和波陡在波群中央达到最大, 当单个波振幅超过临界值时, 该波发生破碎。最大振幅的波出现在波群中央, 意味着波群具有某种对称性。但如果波群结构前后不对称, 波群前侧波动振幅将可能大(小)于后侧波动的振幅, 在这种情况下, 波群中最大波高可能出现在波群前(后)部, 而不是在波群中央, 波群前侧波动的波破碎率就大(小)于后侧。基于这种设想, 本文对波群结构和波群中单个波的位置以及其对波破碎的影响进行了实验研究。研究中依据波包络线理论^[6]研究波群, 分析风浪波包络时间导数分布的结果表明: 波群结构是不对称的, 波群中波动的最大振幅出现在波群前部而不是波群中央, 波群的这种不对称性导致波群前部单个波出现大波陡的概率大于后部单个波出现大波陡的概率。波群前部与后部单个波波陡的差异随谱宽度和平均波陡增大而增大, 实验研究表明: 波群前部单个波的波陡大于后部单个波波陡, 因此导致波群中单个波在波群前部发生破碎的概率较大。由于波破碎对风浪成长等具有重要意义, 而波发生破碎的位置与波群结构的不对称性有关, 因此本文结果对风浪研究具有重要意义。

1 风浪实验

1.1 实验设置

实验室观测在中国海洋大学物理海洋实验室大型风浪槽中进行。风浪槽长 65 m, 宽 1.2 m, 高 1.2 m。在风浪槽中取 10 个观测点观测风浪波面高度。观测点位置为 7, 10.7, 14.35, 18, 21.7, 25.4, 29.05, 32.75, 36.4, 41 m。在 4 种平均风速下进行实验: 4, 6, 8, 10 m/s(由设置在风浪槽 47 m 处的风杯式风速计测得), 同时各个观测点进行同步的风场观测。实验时水深 0.73 m。观测波面高度时采样间隔为 0.0308 s, 每个波浪观测记录长度为 5 min。本文实验中录制了实验室风浪视频资料, 以便于研究波群中单个波发生破碎的频率。

1.2 波陡的计算

本文以 ak 表示波群中单个波的波陡, a 为该波的波峰高度, k 为该波的波数 $k=2\pi/L$ 。 $L=gT^2/2\pi$ ^[7], 是单个波的低阶近似波长, 周期 T 是相邻波谷之间的时间间隔。平均波陡为 $ak_0=a_0k_0$, 其中 $a_0=(2m_0)^{1/2}$, 其中 m_0 为 0 阶谱矩, 平均波数 k_0 是谱峰频率对应的波

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2011-07-15

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划(NCET-08-0509); 国家自然科学基金(40576007)

作者简介: 高志一(1980-), 男, 北京人, 国家海洋环境预报中心研究实习员, 博士, 目前从事风浪波群的研究, 电话: 010-62105736, E-mail: zhiyi_gao@yahoo.com.cn

数。用平均波陡对单个波的波陡进行归一化。

1.3 波龄的观测

实验中在各个观测点采用皮托管式风速计观测瞬时风速，皮托管风速计与测波仪固定于同一支架上，并由计算机控制可以上下移动、定位，定位间隔 2 cm，最低测点距下垫波浪浪尖约 2 cm，由下至上共观测 15 层，每层风速采样 200 次，采样间隔 0.02 s。使用最小二乘法拟和对数风速廓线并求出粗糙度和摩擦风速

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

其中 z_0 为粗糙度， U_* 为摩擦风速， z 为高度， κ 为 Karman 常数，取 0.4。再以上述公式计算 $z=10$ m 高度处的风速 U_{10} ，由下式计算波龄 σ 。

$$\sigma = C_p / U_{10} \quad (2)$$

其中 C_p 为谱峰频率波动的相速。

1.4 谱宽度的定义

本文中采用一般的谱宽度参数 ε ^[8]

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)^{1/2} \quad (3)$$

其中 m_i 为频率谱的 i 阶矩。

1.5 波包络的计算

实验研究中采用 Hilbert 变换方法求波包络，求波包络时滤波截断频率取 0.5~1.5 倍谱峰频率^[6]。计算得到的波包络如图 1 中虚线所示。

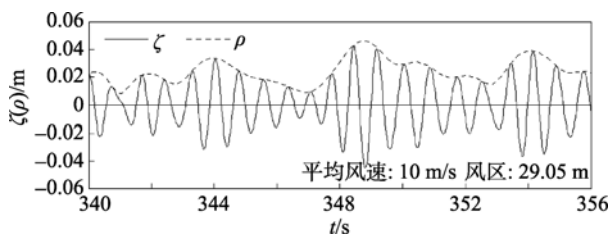


图 1 由 Hilbert 变换方法得到的波包络

Fig. 1 The envelope calculated by Hilbert transformation

1.6 波群定义

本文中采用 Kimura 的波群定义^[9]：波高超过某一临界高度的单个波构成波群。实验中将波峰高度超过水平 ρ_0 的波浪序列定义为波群，临界水平取值为 $\rho_0=(2m_0)^{1/2}$ 。同时对波群内单个波编号，如图 2 为一个连长 3 的波群，即该波群包含 3 个单个波，

按从左至右的顺序将它们编为第 1, 2, 3 号波动。

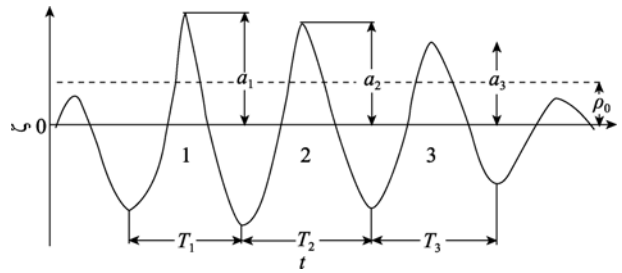


图 2 连长为 3 的波群

Fig. 2 A wave group with three individual waves

1.7 波破碎

以波破碎产生的气泡作为波动发生破碎的示踪物(如图 3)。如果测波探头前后半个主导波波长范围内出现气泡，则认为发生一次破碎事件，同一个单个波的波峰出现多个气泡仍然记为一个破碎事件。将波破碎率 B 定义为发生破碎的波峰个数与单个波总个数之比。实验室产生的风浪具有明显的群性，容易从视频资料中统计波群中单个波发生破碎的频率。

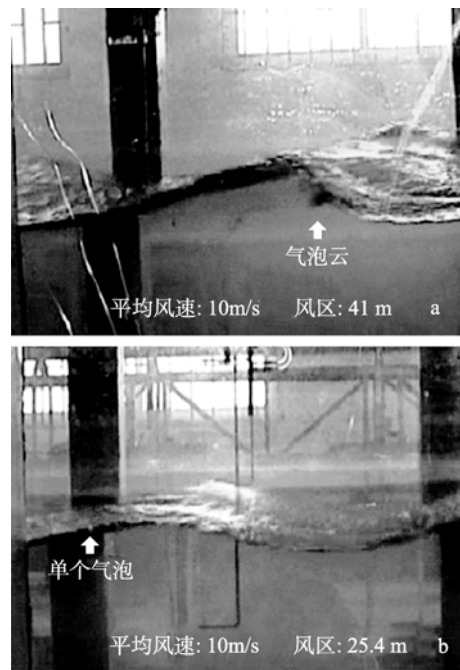


图 3 波破碎形成的气泡

Fig. 3 The bubble(s) generated in the process of wave breaking

2 波包络时间导数分布的研究

迄今 Longuet-Higgins^[6], Nolte 和 Hsu^[10], Ew-

ing^[11]等依波包线理论对海浪波群的统计性质进行了大量研究, 如对波群平均历时长度、平均连长以及波群波包络上跨水平数的研究等。前人在其研究中一般都假定波群包络线具有对称结构, 未注意波群包络线的不对称性问题。本节依波包线理论来研究波群结构, 研究结果表明波群具有不对称结构, 即波群前部单个波振幅大于波群后部单个波振幅。

图 4 为波群前部和后部的波包络时间导数 ρ_t^f 和 ρ_t^r 。从图中容易看出, 如果波群前部振幅较大, 波群前部波包络的坡度也比较大, 即波群前部波包络时间导数比后部波包络时间导数大 $|\rho_t^f| > |\rho_t^r|$, 且波群包络线振幅达到最大值之前的历时时间小于最大值之后的历时时间。所以本文研究采用 ρ_t 的统计分布偏离对称分布的程度来刻画波包络线的不对称性。若波包络时间导数在正数(负数)区间的概率低于(高于)0.5, 且在大值区间 $|\rho_t^f|$ ($|\rho_t^r|$) 的概率高于(低于)对称分布, 那么风浪波群统计上应该具有图 4 所示的不对称结构。

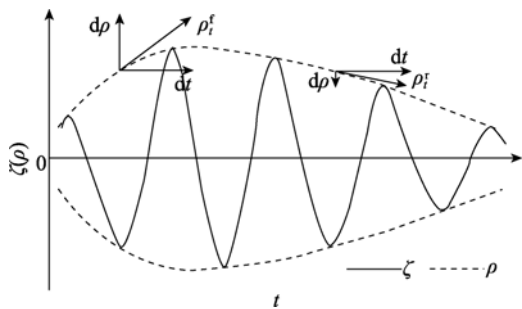


图 4 波群前部和后部波包络的时间导数 ρ_t^f 和 ρ_t^r

Fig. 4 The time derivatives of the envelope in the front of and in the rear of a wave group (ρ_t^f and ρ_t^r)

按 Hilbert 变换方法求出包络线 ρ 之后, 采用线性差分计算波包络线时间导数 ρ_t

$$\rho_t^{(i)} = \frac{\rho^{(i)} - \rho^{(i-1)}}{\Delta t} \quad (4)$$

其中 Δt 为采样时间间隔, 使用 ρ_t 的均方根 σ_{ρ_t} 将 ρ_t 归一化。

本文采用 Gram-Charlier 级数^[12]拟合波包络时间导数的分布, Gram-Charlier 级数为

$$f(x) = \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \left\{ 1 + \frac{1}{6} \lambda_3 [x^3 - 3x] + \frac{1}{24} \lambda_4 [x^4 - 6x^2 + 3] \right\} \quad (5)$$

其中 $x = \rho_t / \sigma_{\rho_t}$, σ_{ρ_t} 为 ρ_t 的均方根, 偏度因子 λ_3 和峰度因子 λ_4 为可调参数。 λ_3 大于 0 时级数曲线向左偏离对称分布, λ_3 越大级数曲线偏离对称分布的程度

越大。实验研究中以偏度因子 λ_3 来刻画波群前后的不对称性的程度。

图 5 为根据实验数据拟合得到的归一化波包络

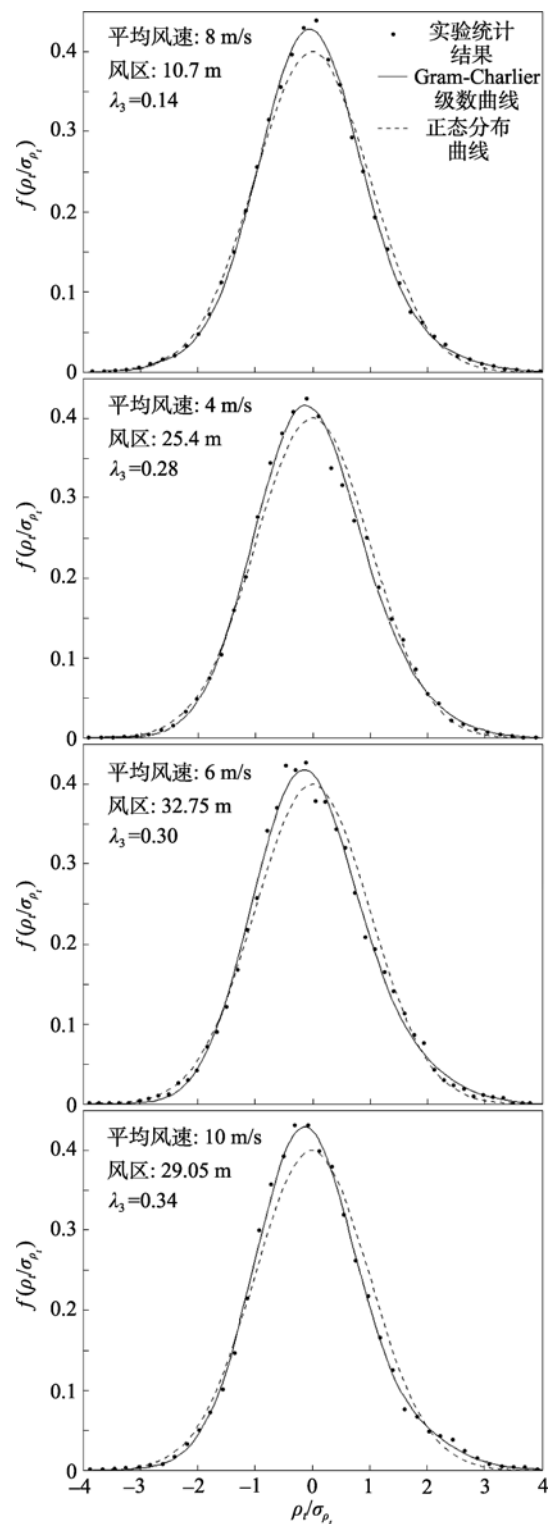


图 5 归一化的波包络时间导数分布

Fig. 5 The distributions of the normalized time derivative of wave envelope

线时间导数分布。实测波包络时间导数分布系统地向左偏离正态分布，概率密度最大值出现在 $-1\sim 0$ 之间。 $0\sim 2$ 之间的概率密度低于正态分布曲线， $2\sim 4$ 的概率密度高于正态分布； $-1.5\sim 0$ 的概率密度高于正态分布， $-3\sim -1.5$ 的概率密度低于正态分布。大量实验结果都具有上述特征，这表明波群具有前后不对称的结构(波群前部包络线陡峭，后部包络线平缓)。

研究结果还表明波群结构的不对称性程度随谱宽度和平均波陡增大而增大。

图 6 和图 7 分别为偏度因子与谱宽度和平均波陡之间的关系。从图中可以看出偏度因子随谱宽度和平均波陡增大而增大(除圆圈圈出的点外)。对实验数据进行分析发现，被圈出的点对应的波浪有较高的破碎率，波破碎造成波群前部单个波振幅变小，因而波群前部波包络线振幅下降，造成波包络线不对称程度减小，因此这些点的偏度因子 λ_3 值偏低。

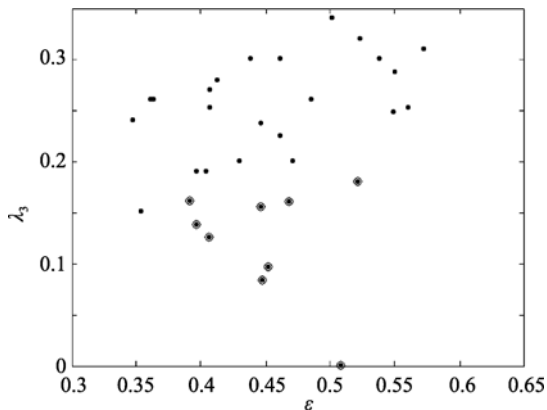


图 6 偏度因子 λ_3 与谱宽度 ε 之间的关系

Fig. 6 The relation between the skewness λ_3 and spectral width ε

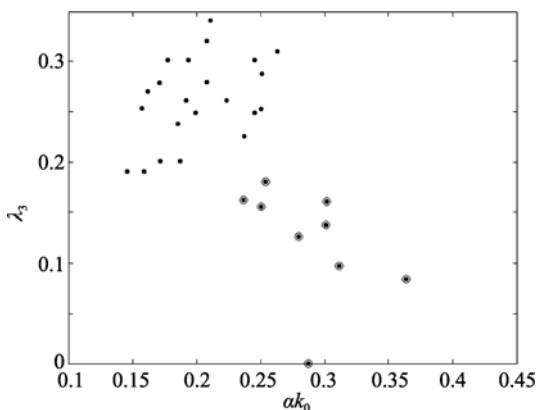


图 7 偏度因子 λ_3 与平均波陡 ak_0 之间的关系

Fig. 7 The relation between skewness λ_3 and the mean wave steepness ak_0

波包络时间导数分布系统地向左偏离对称分布表明波群的包络线前部陡峭后部平缓，而不是前后对称的(如图 4)。这对波群中最高单个波出现的位置有重要影响，从图 4 容易看出最大波高出现在波群前部。由于波动的波高与波陡之间存在密切联系，波群内最高单个波出现在波群前部可能造成波群内单个波波陡的累积概率分布与单个波在波群中的次序有关。

3 波群内单个波波陡分布的研究

研究结果表明，波群具有不对称结构，波群前部单个波振幅较大。又已知波群中单个波的振幅与波陡之间存在密切联系，这就引出一个问题：波群结构的不对称性对波群中单个波的波陡分布有什么影响？为研究这一问题需要研究波群中不同位置上单个波的波陡分布。这项研究对深入了解波破碎现象也具有重要意义^[13-14]。

研究结果表明，波群前部单个波出现大波陡的概率大于后部单个波出现大波陡的概率；单个波的波陡分布与单个波在波群内的位置有密切关联；波群前部和后部的单个波波陡累积概率分布的差异(单个波波陡累积概率分布曲线的“张角”)随谱宽度和平均波陡增大而增大。

3.1 单个波波陡分布次序性的研究

对波群内不同序号单个波的波陡分布进行研究。结果表明，波群前部单个波出现较大波陡的概率大于波群后部单个波出现较大波陡的概率。

将同一波面记录上全部连长为 N 的波群分为一组，分别对第 1 到 N 号(编号方式见图 2)单个波的波陡进行统计。统计结果如图 8 所示。图 8 为波群内单个波的波陡累积概率分布。从图中明显可以看出，序号越大的单个波出现大波陡的概率越小。大量实验结果都具有上述特征，这表明波群内单个波的波陡分布与单个波的序号有关。下面的分析将看到，单个波序号对波陡分布的影响与波龄的影响相当。

图 8 中显示波群内不同序号单个波的波陡分布曲线形式相似，单个波的序号越小其波陡分布曲线的位置越高(波群前部和后部单个波的波陡分布曲线之间的张角 θ 越大)，这意味着序号越小的单个波的平均波陡越大，这将导致波群前部单个波的破碎率较大。

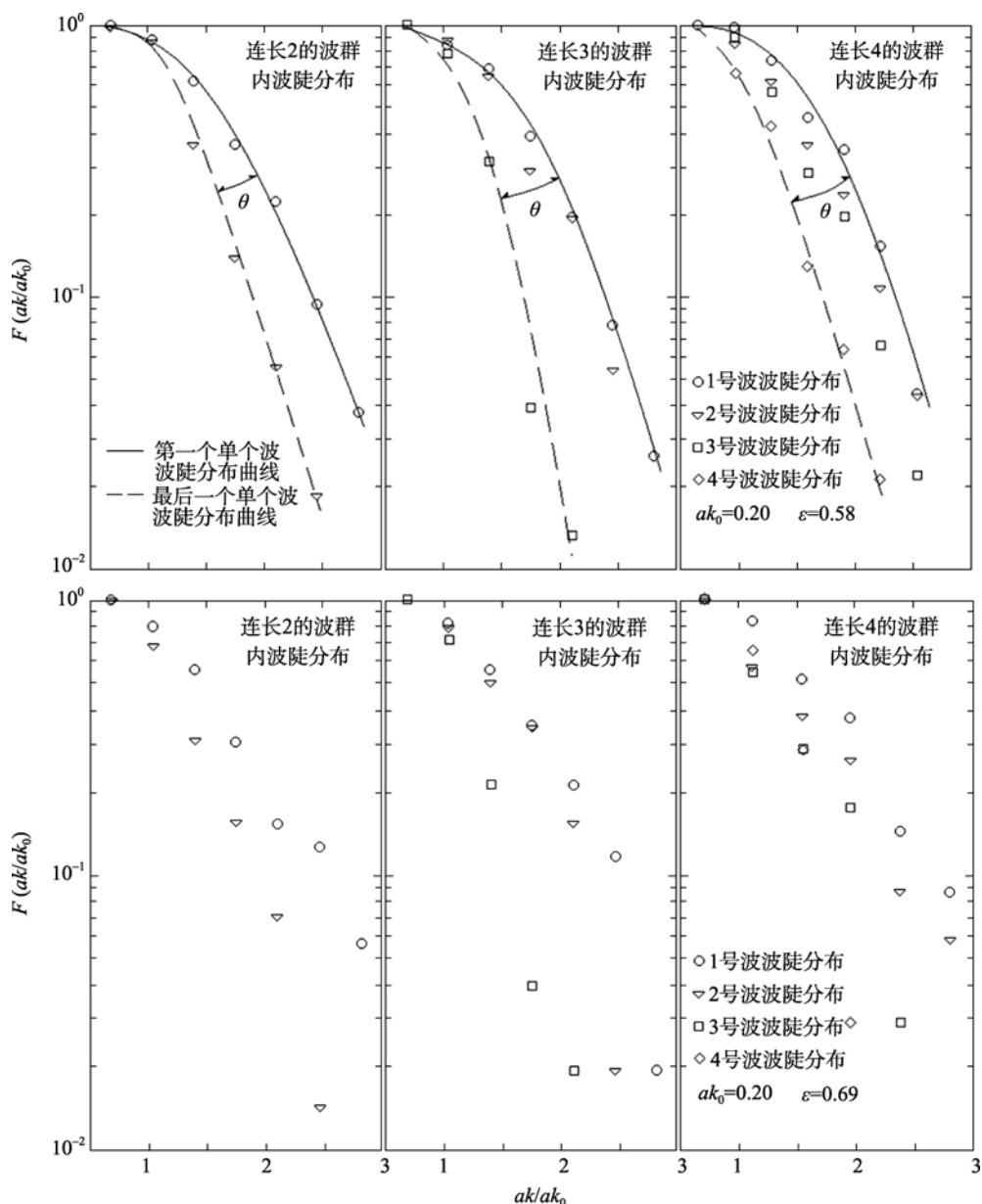


图 8 单个波在波群中的次序与单个波波陡分布的关系

Fig. 8 The relation between the steepness distribution of individual waves and the position of the waves

3.2 单个波波陡分布与序号关系的研究

研究发现, 单个波波陡分布与单个波在波群中的序号(编号方式见图 2)有密切关联。单个波序号对单个波波陡分布的影响是不可忽略的。

图 9 为波群内单个波序号和波龄与单个波波陡分布的关系。图 9 上图为同一风浪场中连长分别为 2, 3, 4 的波群中 1 号和 2 号单个波的波陡累积概率分布, 图 9 下图为谱宽度相同波龄不同的两种风浪场

波群内 1 号单个波的波陡累积概率分布。比较上下两组图可以发现, 连长 2 和 3 的波群内单个波的序号对波陡累积概率分布的影响大于波龄对波陡累积概率分布的影响, 连长 4 的波群内单个波的序号对波陡累积概率分布的影响与波龄对波陡累积概率分布的影响相当。图 10 采用了与图 9 不同的观测数据, 得到的结论是相同的。大量实验结果表明, 单个波序号对波陡分布的影响与波龄的影响相当, 甚至超过波龄的影响。

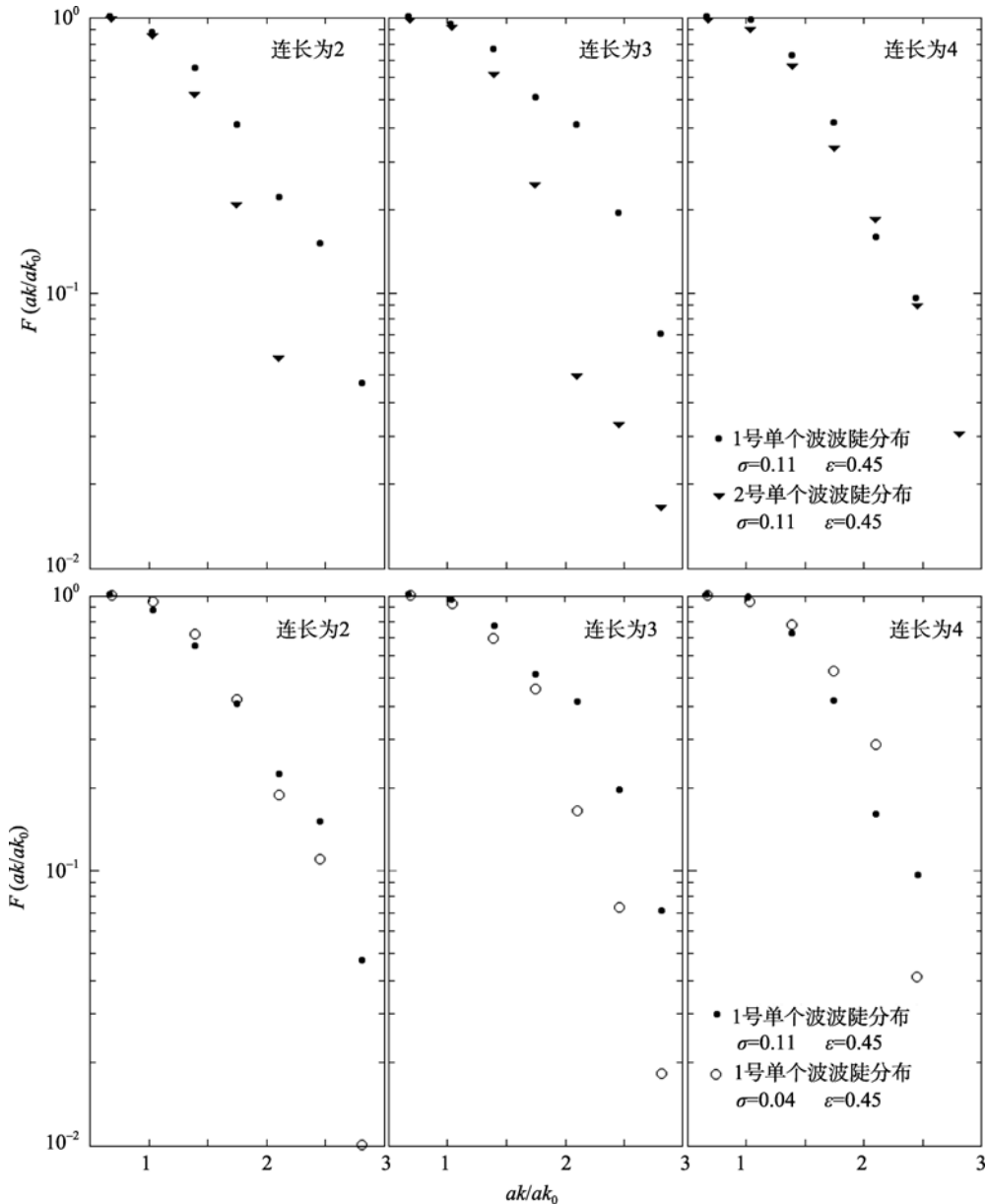


图 9 单个波次序和波龄对单个波波陡分布影响

Fig. 9 The influences of the position of the individual wave and wave age on the steepness distribution

3.3 谱宽度和平均波陡对单个波波陡分布影响的研究

实验结果表明波群结构不对称性的程度随谱宽度和平均波陡增大而增大，也就是说波群前部和后部单个波的振幅差异随谱宽度和平均波陡增大而增大。研究发现，波群前部和后部单个波波陡累积概率分布曲线的差异也随谱宽度和平均波陡增大而增大。

图 11 为平均波陡相同条件下谱宽度对单个波波陡分布的影响。从图中可见，谱宽度较大的波群中首个波波陡分布与末尾单个波波陡分布的差别(波

群内单个波波陡分布曲线的张角 θ) 较大。大量实验结果都具有上述特征，这表明波群前后单个波陡分布的差异随谱宽度增大而增大。

图 12 为平均波陡较小情况下平均波陡对单个波波陡分布的影响。从图中可以看出平均波陡较小时(波破碎影响较小)，平均波陡较大的波群中首个波波陡分布与末尾单个波波陡分布的差别(波群前部和后部单个波波陡分布曲线的张角 θ) 较大。

由于波破碎率随平均波陡增大而增大，波群前部单个波发生破碎的频率较大使该波的波陡减小。

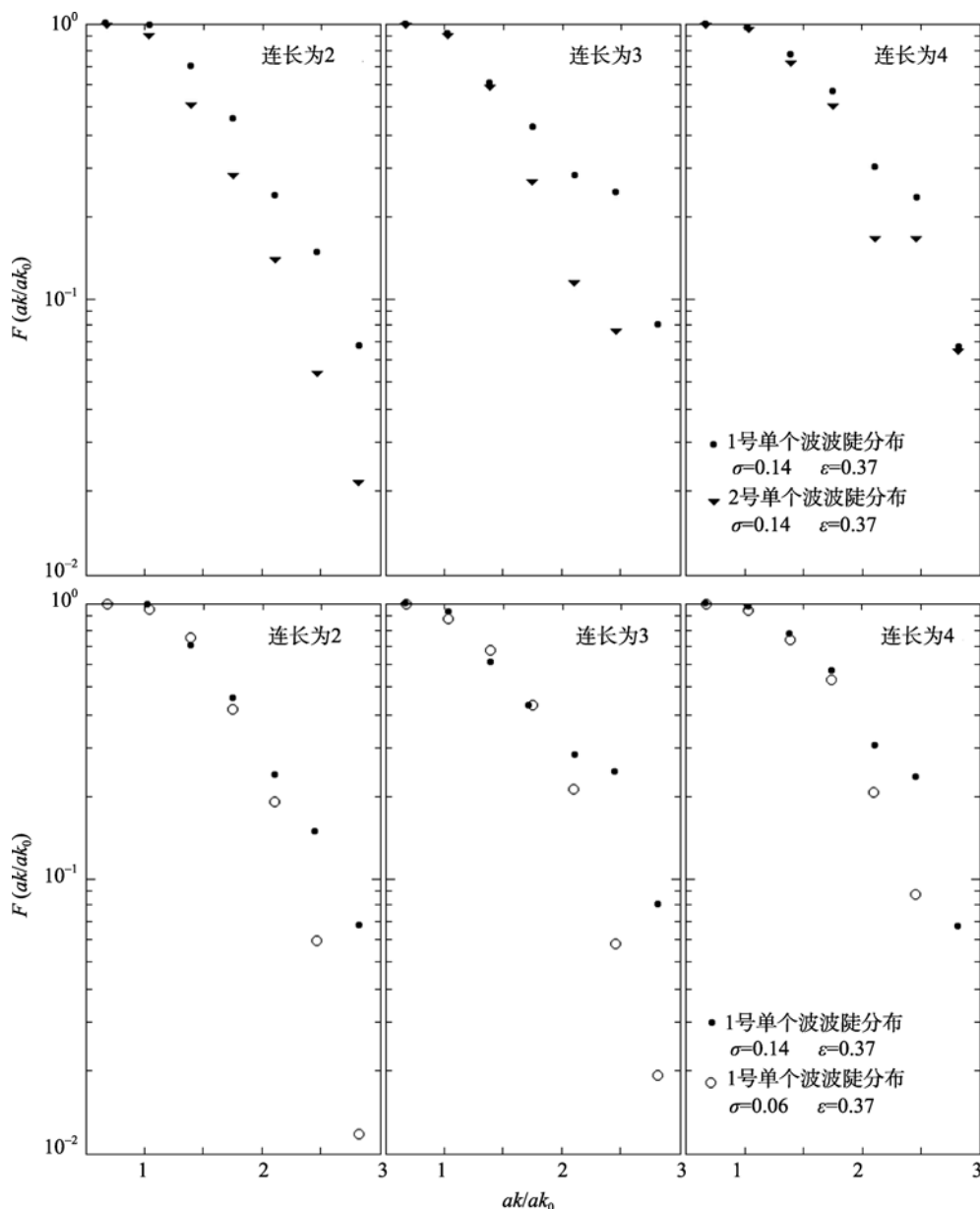


图 10 单个波次序和波龄对单个波波陡分布影响

Fig. 10 The influences of the position of the individual wave and wave age on the steepness distribution

因此平均波陡增大时波群前后单个波波陡分布的差异不增大反而减小(如图 13 所示)。

图 13 为平均波陡较大(破碎率较大)情况下平均波陡对单个波的波陡分布的影响。从图中可以看出平均波陡较大时(波破碎影响较大),平均波陡较大的波群中首个单个波波陡分布与末尾单个波波陡分布的差别(波群前部和后部单个波波陡分布曲线的张角 θ)较小。

大量实验结果都具有上述特征。这表明平均波陡较小时(波破碎影响较小),波群前部和后部单个波波陡分布的差别随平均波陡增大而增大;平均波

陡较大时(波破碎影响较大),波群前部和后部单个波波陡分布的差别随平均波陡增大而减小。

3.4 单个波波陡分布信息熵的研究

将信息熵概念应用于波群内单个波波陡分布的研究,发现相同连长的波群中不同序号单个波波陡分布的信息熵不同。

3.4.1 波陡分布的信息熵

Shannon 将 Boltzmann 熵的概念加以推广,引入信息熵的概念,用以表征随机过程中事件的不确定性程度。在某随机过程中若各事件发生的概率为 p_1 ,

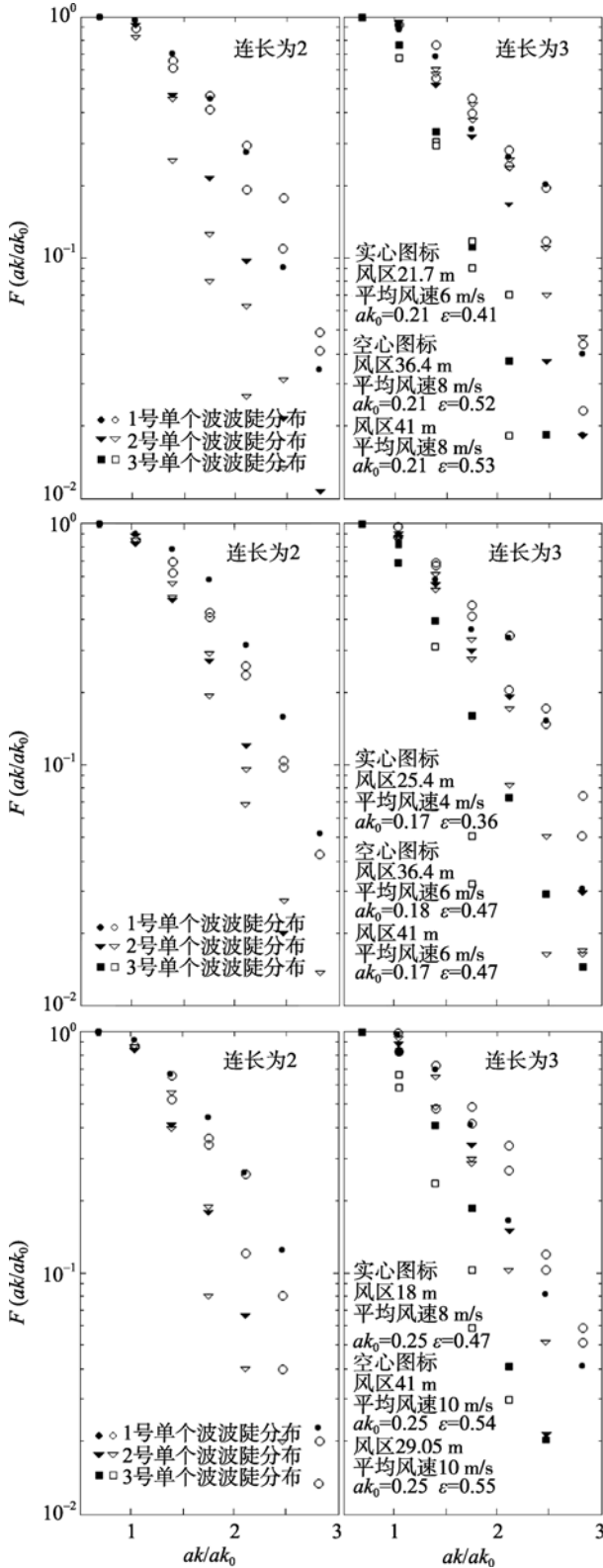


图 11 谱宽度对单个波波陡分布的影响

Fig. 11 The influence of spectral width on the distributions of individual wave steepness

p_2, \dots, p_n 信息熵定义^[15]为

$$S = S(p_1, \dots, p_n) = -\sum_{j=1}^n p_j \log p_j \quad (6)$$

信息熵(6)通过概率分布 p_j 定量地表征随机过程中事件发生的不确定性的程度。信息熵的值越大, 事件发生的不确定性程度越高。

将实测的归一化波陡 ak/ak_0 的取值范围划分为多个取值区间, 统计归一化波陡在各个区间出现的概率(ak/ak_0 的取值范围为 0.5~3, 将其划分成 10 个取值区间)。 ak/ak_0 出现在第 j 个取值区间的概率即为(6)式中的 p_j 。 根据(6)式计算出同连长波群单个波波陡分布的信息熵。

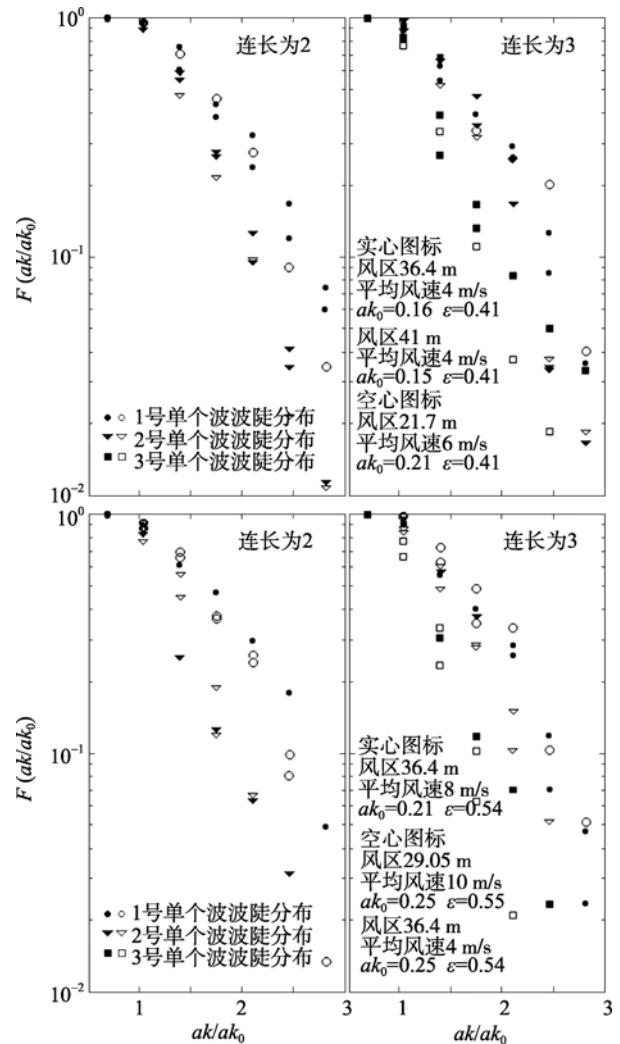


图 12 平均波陡较小时其对单个波波陡分布的影响

Fig. 12 The influence of the mean wave steepness (with smaller values) on the individual wave steepness distribution

3.4.2 不同序号单个波波陡分布的信息熵

图 14 为连长 2 和连长 3 的波群内单个波归一化

波陡 ak/ak_0 分布的信息熵与谱宽度 ε 的关系。从总体趋势上看, 连长为 2 的情况中 1 号单个波波陡分布的信息熵大于 2 号; 连长为 3 的情况中 1 号单个波波陡分布的信息熵最大, 2 号次之, 3 号最小。由图 14 的结果可知, 同样连长的波群中不同位次单个波波陡的统计分布是不同的。

生在波群内。Dold 和 Peregrine^[16]发现, 波群内包含的单个波越多, 发生波破碎的临界波陡越小。Banner 等^[5]提出, 波破碎判据中应包含与波群性质有关的参量。然而迄今对波群中波破碎发生位置这一问题研究较少。

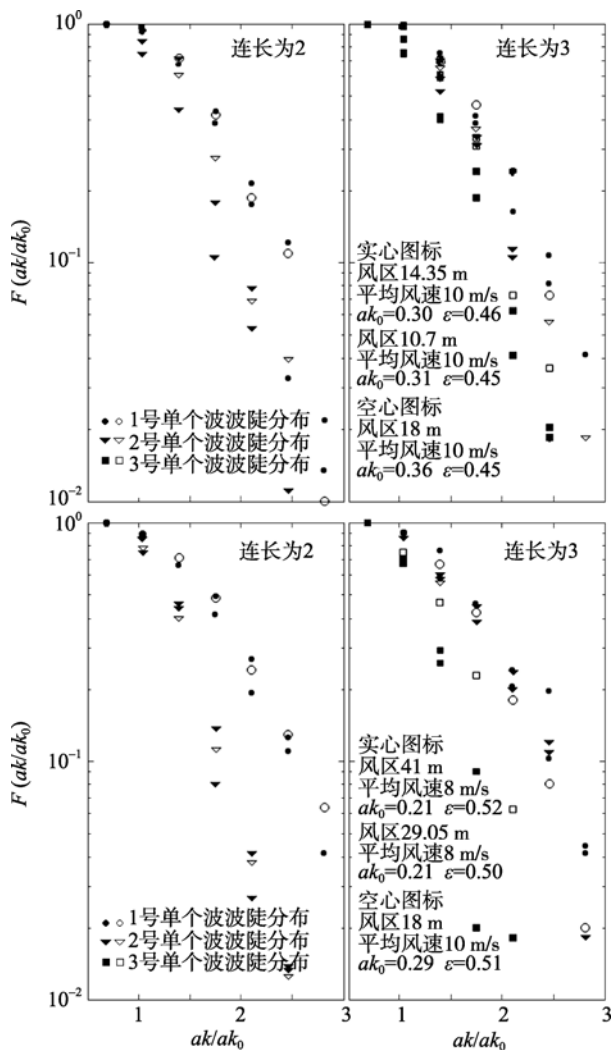


图 13 平均波陡较大时其对单个波波陡分布的影响

Fig. 13 The influence of the mean wave steepness (with larger values) on the steepness distribution of steepness

4 波群中波破碎的研究

波破碎对大气-海洋之间热量和动量交换以及波浪谱的演化都有重要影响, 对波破碎的研究具有重要理论和应用意义。近年对波破碎的研究结果表明, 波群是影响波破碎发生的重要因素。Donelan 等^[1]和 Holthuijsen^[4]在外海观测时发现多数波破碎事件发

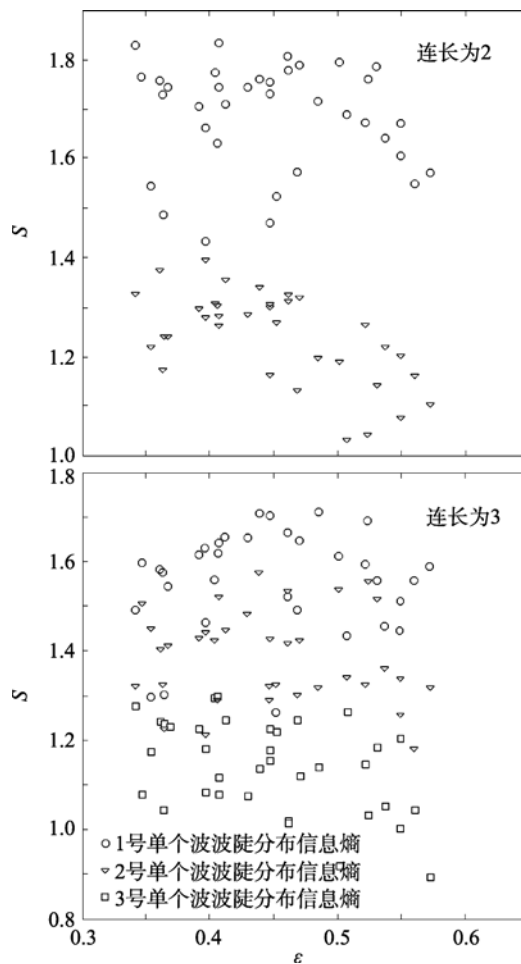


图 14 连长 2 和 3 的波群内单个波波陡分布的信息熵与谱宽度的关系

Fig. 14 The relation between information entropies of the individual wave steepness distributions in wave groups and spectral width

实验结果表明, 波群结构的不对称性(波群前部单个波的振幅较大)导致波群前部单个波出现大波陡的概率大于后部单个波出现大波陡的概率, 也就是说波群内序号较小的单个波的平均波陡较大。由于波破碎与波陡密切相关, 这意味着波群内的波破碎率很可能与波群内各波的序号(即各波在波群中的位置)有关。对这一问题进行研究的结果表明, 波群前部单个波更容易发生破碎, 波

群前部单个波发生破碎的频率为后部单个波的 4 倍。这一结果对深入了解波破碎现象具有重要意义。

实验中首先研究破碎率 B 与平均波陡之间的关系，实验结果表明波破碎率随平均波陡增大而增大(如图 15)，这与前人研究结果一致^[5]。接下来研究波群中波动发生破碎的位置。统计波群内不同序号单个波发生破碎的次数，结果表明在各种连长的波群内波群前部单个波的破碎数高于后部单个波的破碎数(如表 1)。其中连长 2 的波群内 1 号单个波破碎数为 2 号波的 1.3 倍，连长 3 的波群内 1 号单个波破碎数为 3 号波的 4 倍。这意味着波群前部的波动更容易发生破碎。

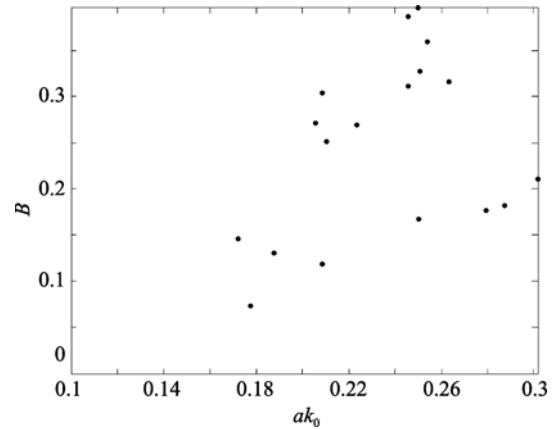


图 15 破碎率 B 与平均波陡 ak_0 的关系

Fig. 15 The relation between probability of wave breaking B and mean wave steepness ak_0

表 1 波群中单个波发生破碎的次数

Tab. 1 Breaking times of individual waves in wave groups

波群连长	波群中破碎波动总个数	各序号单个波破碎次数							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	24	24	—	—	—	—	—	—	—
2	59	33	26	—	—	—	—	—	—
3	68	40	17	11	—	—	—	—	—
4	18	7	4	3	4	—	—	—	—
5	14	6	2	4	1	1	—	—	—
6	10	3	2	2	1	1	0	—	—
7	7	1	1	1	1	1	1	1	—
8	7	2	1	2	0	0	0	1	1

波群前部单个波发生破碎的频率较大导致图 6 和图 7 中的数据散落。图 16 为波群前部单个波破碎率较大对波群结构不对称性程度的影响。图中所示波群内第一个单个波发生破碎，将该波的波峰削去

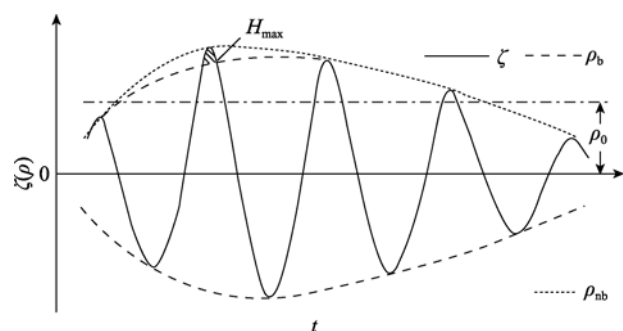


图 16 波破碎对波包络线振幅的影响

Fig. 16 The influence of wave breaking on the envelope amplitude

阴影部分表示波破碎削去的波峰

The hatched part represents the wave peak cut in the process of wave breaking

(如图 16 中阴影部分所示)。本文实验中采用电容式测波仪观测波浪，该仪器只能记录水位的升降，波破碎事件在波面记录上就表现为波面高度下降。由这种波面高度记录计算得到波包络为图中长虚线 ρ_b 所示，若没有波破碎的影响波包络应为图中短虚线 ρ_{nb} 所示。容易看出波破碎造成波群结构的不对称性程度减小。这样便解释了图 6 和图 7 中的数据散落现象。同样道理可以解释图 13 中平均波陡增大波群前后单个波波陡分布差异减小的现象(波陡分布曲线张角 θ 减小)。

5 结语

本文研究了波群结构对波群中单个波波陡分布和波破碎的影响。实验结果表明，波群具有不对称结构，波群内最高单个波出现在波群前部而不是波群中央；波群的这种不对称性导致波群前部单个波出现较大波陡的概率较大，且波群前部和后部单个波

波陡分布的差异随谱宽度和平均波陡增大而增大;波破碎视频统计结果表明,由于波破碎与波陡密切相关,波群前部和后部单个波的波陡的差异导致波群前部的单个波更容易发生破碎(波群前部单个波破碎的频率是后部单个波破碎频率的4倍),而不是波群中央的单个波更容易发生破碎。由于波破碎是风浪成长理论中的重要问题,而波破碎更容易发生在波群前部,因此本文结果对风浪研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] Donelan M A, Longuet-Higgins M S, Turner J S. Whitecaps [J]. *Nature*, 1972, 239: 449-451.
- [2] Thorpe S A, Humphries P N. Bubbles and breaking waves [J]. *Nature*, 1980, 283: 463-465.
- [3] Su M Y. Large, steep waves, wave grouping and breaking [C]//Webster W C. Proc 16th Symposium on Naval Hydrodynamics. Berkeley: ONR, 1986.
- [4] Holthuijsen L H, Herbers T H C. Statistics of breaking waves observed as whitecaps in the open sea [J]. *J Phys Oceanogr*, 1986, 16: 290-297.
- [5] Banner M L, Babanin A V, Young I R. Breaking probability for dominant waves on the sea surface [J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 3145-3160.
- [6] Longuet-Higgins M S. Statistical properties of wave groups in a random sea state [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 1984, 312(A): 219-250.
- [7] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [8] Cartwright D E, Longuet-Higgins M S. The statistical distribution of the maxima of a random function [J]. *Proc Roy Soc London*, 1956, 237(1209): 212-232.
- [9] Kimura A. Statistical properties of random wave groups [C]// Billy L E. Proc 17th Int Conf on Coastal Eng. Sydney Australia, New York: ASCE 1980.
- [10] Nolte K G, Hsu F H. Statistics of larger waves in a sea state [J]. *J Waterway, Port, Coastal Ocean Div*, 1972, 105: 389-404.
- [11] Ewing J A. Mean length of runs of high waves [J]. *J Geophys Res*, 1973, 78(12): 1933-1936.
- [12] Huang N E, Long S R. An experimental study of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves [J]. *J Fluid Mech*, 1980, 101: 179-200.
- [13] Banner M L, Gemmrich J R, Farmer D M. Multiscale measurements of ocean wave breaking probability [J]. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 3364-3375.
- [14] Svendsen I A, Veeramony J. Wave breaking in wave groups [J]. *J Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2001, 127(4): 200-212.
- [15] Guiasu S. Information theory with applications [M]. London: Mc-Graw-Hill Inc, 1977: 1-439.
- [16] Dold J W, Peregrine D H. Water-wave modulations [C]//Billy L E. Proc 20th Int Conf Coastal Eng. Taipei Taiwan, New York: ASCE 1986.

The steepness distributions and break of individual waves in wave groups

GAO Zhi-yi¹, WEN Fan², LI Jie¹

(1. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Institute of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Mar., 23, 2010

Key words: wave group; wave steepness; wave breaking

Abstract: In this paper, the steepness distributions and breaking of individual waves in wave groups have been studied. The maximum amplitude of individual waves occurs in the front of a wave group rather than in the middle. Such asymmetry of a wave group structure makes it more probable that larger steepness occurs on the individual waves in the front of the wave group than those in the rear. In other words, the average steepness of the individual waves at the beginning of a wave group is larger, resulting in higher probability that the individual waves in the front of the wave group break according to the statistics of wave breaking (the breaking probability of the individual waves in the front of a wave group is about four times of that in the rear of the wave group). Since wave breaking plays very important role in wind wave growth, these results are important for further study of wind wave.

(本文编辑: 刘珊珊)