

# 海洋白浪寿命的定义及测量结果\*

楼顺里 曹露洁 田纪伟

(青岛海洋大学物理海洋实验室 青岛 266003)

**提要** 通过对国内外白浪研究和应用的分析,首次提出了有效白浪寿命的定义,给出了计算白浪寿命的公式及测量方法和结果,并报告了以此方法在渤海实测的结果,得到了白浪寿命  $T_L$  与海面风速  $U_{10}$  的关系为:  $T_L = 0.26U_{10}$  以及白浪寿命概率分布近于瑞利分布等。

**关键词** 白浪 白浪寿命 现场测量

**学科分类号** P731.22

在海气相互作用研究中,破碎波以及由此产生的白浪,尤其在高海况下是海气交换的主要机制,是确定海气交换量(包括:动量、热量、质量等)的重要因素。借助于建立起来的经验公式,可以利用遥感测量的海上白浪覆盖率推得海面风速及海面阻力系数等,由于白浪的重要意义,对其测量与研究日益引起重视,70年代以来,已成为国际热门研究课题之一。近年来随着海洋遥感测量技术的迅速发展和应用,海洋白浪作为一个重要的海洋遥感物理参量越来越受到重视,使白浪成为海洋遥感特别关注的重要研究内容。因此波浪破碎与白浪的研究已成为发展上层海洋动力学和空间海洋学的关键性前沿研究课题之一。

## 1 白浪的研究方法

由于白浪与海面风场有密切关系,因此许多研究者试图找出海上破碎波、白浪与海面风速之间的定量关系,如: Munk(1947), Blanchard(1963), Monahan(1969,1971,1980), Wu Jin (1979,1988), Longuet-Higgins *et al* (1983), 王伟等(1990)等。以上方法是测出不同风速  $U_{10}$  下的破碎波发生率  $P$  或白浪覆盖率  $W_c$ , 然后进行拟合适配,计算出系数  $\alpha, \beta$ , 其表达式为:

$$P = \alpha U_{10}^{\beta}, \quad W_c = \alpha U_{10}^{\beta} \quad (1)$$

Cardone (1969)从 Milles-Phillips的不稳定机制出发,通过计算在风作用下波浪的增长率,采用充分成长的 P-M谱,得出了白浪覆盖率与波谱充分成长部分的能量转换率之间的关系,给出了一个极为复杂的白浪覆盖率计算模型,随后 Ross等(1974)利用海上实测资料进行了验证。结果表明风速在 10—17m/s 之间与资料非常一致,而与几组高风速(20—27m/s)下的资料则相差很大。他们认为这是由于海浪本身没有充分成长所致,从而提出了白浪与风区、风时的依赖关系。Wu Jin (1979)则认为,从风到波的能量转换率

\* 国家自然科学基金资助项目, 49376254, 19332010号。楼顺里, 男, 出生于1961年1月, 中国科学院海洋研究所博士生, 副教授。E-mail: bblou @ udel. edu

收稿日期: 1995-03-20, 收修改稿日期: 1997-08-21

是不确定的,而风浪生成机制本身是有争议的。Wu Jin 根据风浪充分成长时波浪破碎能量消耗与风的能量输入应达到平衡(能通量守恒时)的观点认为白浪覆盖率  $W_c$  与单位面积上风的能量输送率  $E$  有关,再利用一些经验关系式得出  $\beta = 3.75$ 。

在白浪理论研究中,Phillips (1985), Huang 等 (1986), 袁业立等 (1988) 等分别利用风浪统计理论和建立的破碎波统计模型导出了计算白浪覆盖率的关系式,这些结果对白浪的研究起到了积极的推动作用。

总之,在白浪研究与资料分析方面,自从 Blanchard (1963) 首次给出白浪覆盖率  $W_c$  的经验关系以来,白浪的测量至今已有 30 年历史,但其研究的中心问题仍然仅限于寻找  $W_c$  与  $U_{10}$  的关系,而且测得的数据相当分散,以至于不同的研究者适配的关系差异很大,适配的幂指数的取值从 2 到 3.75。这种情况源于两方面原因:一是白浪覆盖率测量的困难性;二是由于采用不同的测量方法和分析方法。既使不考虑测量的困难和方法上的缺陷等因素,白浪覆盖率也只是一个反映白浪空间分布特征的统计量,并不能直接反映白浪的时间特征,而白浪的时间特征量往往具有重要的理论和应用价值。本文的研究正是对白浪的时间特征进行探讨与研究,从个别白浪寿命的测量出发找出其与风速的关系。

## 2 海上观测

海上观测是在渤海中部 8 号采油平台 (119°42' E, 39°09' N) 进行的 (见图 1)。8 号平台周围水深为 27m,对一般风浪可视为深水。1989 年 10 月至 11 月间和 1991 年 7 月至 1992 年 5 月份夏、秋、冬、春四个季节进行了海上观测。测量仪器安装在平台东侧的烽火台支架上,该支架仰角 45°,最高点距海面 48m,距平台水平距离 38m,如图 1 所示。

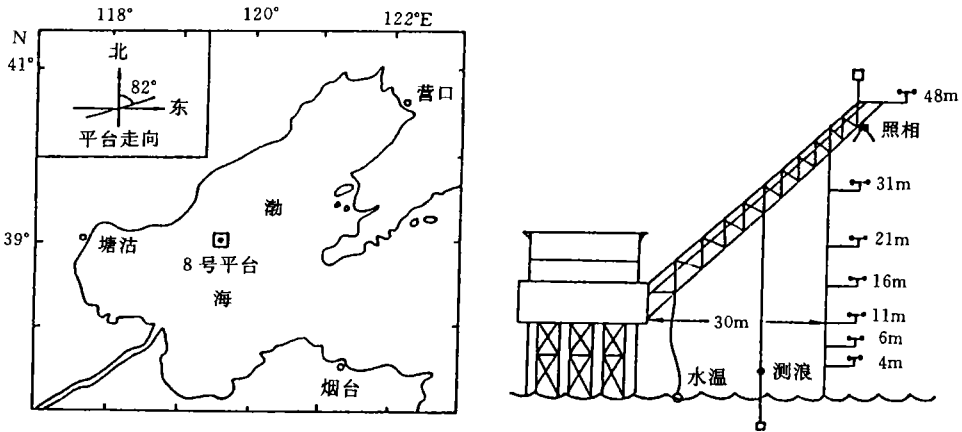


图1 渤海8号平台位置及仪器安装示意图

Fig.1 Location of platform 8 and an installation diagram of instruments in the Bohai Sea

风速梯度测量,采用了青岛海洋大学研制的 DF-1型多通道智能风速测量仪,选用了 75M-1型风杯式传感器(精度 2%),分 7 层垂直安装在烽火台支架上,距平台东侧水平距离 30m 远(见图 1)。除西风和偏西风外,其它风向的风速均可进行订正后使用,其准确性和可靠性已经刘文通等 (1990) 的模型实验所证实。

波浪观测采用电容式垂线测波仪,安装在烽火台支架上,距平台 20m 处,基本上避免

了平台影响(除西向传播的波浪),数据记录在磁带机上,每次记录 30min,其中部分记录配合同步录相,录相画面对准测波仪处,与波浪记录同步进行,在资料处理中可参照录相观察波浪破碎情况。另外还同时记录了水温、气温、湿度等环境参量。

### 3 实验观测方法及资料分析

#### 3.1 白浪和泡沫寿命的定义及计算公式

白浪的发生、发展和消衰过程大体如下:几乎与风浪破碎(主要发生在陡波波峰附近)的同时产生白浪,随着波浪破碎的发展和消衰,白浪面积从小到大而后又完全变成泡沫而消衰。从白浪发生至发展到成熟这段时间里,白浪是随所在波的传播而一起前进的,但从开始消衰之时起,白浪逐渐落后于所在波的传播,转化成为泡沫随风漂流缓慢运动。将白浪从开始发生的一刹那起到完全衰变为泡沫之前的时刻止,这一段时间称为个别白浪寿命。随后测量的时间至泡沫消失停止,定为泡沫寿命。

显然,个别白浪寿命是一个随机变量,只测得一个或几个个别白浪寿命并不能说明什么,大量个别白浪寿命的平均值,才有确定的统计意义,观测点在距海面 17m 高的平台甲板上,在用眼睛盯住距平台约 100m 远处的一块面积大约为 50m × 50m 的海域,在 30min 内用秒表记录下发生于此海面内的 20 个(相当于 500—600 个波)比较显著的白浪寿命,限制在 30min 内观测 20 个白浪有二重意义:第一,使每次观测总时间不能太长(从而海面状态可视为平稳的),且又使观测到白浪个数比较多(基本上具有统计意义);第二:由于时间和个数上的限制,既不允许去选择那些寿命特别长的白浪,也来不及不分巨细地把那些寿命极短的白浪寿命记下来。最后记下来的 20 个只能是比较显著的白浪,如此定义的特征白浪寿命,实际上是海上比较显著的那部分白浪的平均寿命或可称为特征白浪寿命。

根据破碎波的特点,可把波浪破碎看成波峰处的破碎水体自由向前抛落,下抛时间  $T_p$  与波高  $H$  的关系可表示为

$$T_p = \sqrt{2H/g} \quad (2)$$

则破碎水体水平抛射距离(即白浪的宽度)  $X_L$  为

$$X_L = C_b \cdot T_p = 1.1\sqrt{LH/\pi} \quad (3)$$

其中  $C_b$  为破碎波波速,  $C = \sqrt{gL/2\pi}$  为波的相速,根据 Longuet-Higgins (1975) 的数值计算结果  $C_b \approx 1.1C$ ,  $L$  为波长。由此,可以得到白浪寿命  $T_L$  与波周期  $T$  的关系为

$$T_L = X_L / L \cdot T = 1.1\sqrt{R/\pi} \cdot T \quad (4)$$

推导上式应用了破碎波判据  $R = AK$ ,  $A$  为波振幅,  $K = 2\pi/L$  为波数。从式(4)中可看出  $T_L$  比例于波周期,比例系数与波陡有关,对实际情况而言是合理的。但在实际应用时必须要考虑破碎水体水平抛射距离与波面漂移运动速度  $q$  之间的关系,因此(4)式改为

$$X_L = (C_b + q) \cdot T_p = (C_b + q)\sqrt{2H'/g} \quad (5)$$

式中  $H' = H\cos(2\pi X_L/L)$ 。

#### 3.2 观测结果

在观测期间,共测得 29 组数据,风速范围为 3.0m/s—18.5m/s,各组数据的平均值及其对应的风速等列于表 1 中。从图 2 可以看出特征白浪寿命与海面风速的关系。图 2a 中连接数值点的垂线是对应该组数据的标准差(2 倍)。从图 2a 中可看出特征白浪寿命  $T_L$  与  $U_{10}$  距平均海面 10m 风速有良好的线性关系,图 2a 中与适配线偏差较大的几个点都是

在转风向或风速急骤变化情况下测得的(见表1),用最小二乘法适配的关系式如下:

$$T_L = -0.076 + 0.259U_{10} \approx 0.26U_{10} \quad U_{10} \geq 3m/s \quad (6)$$

在  $3m/s$  以下的风速时很少出现白浪,这个结果不同于风速达到  $5-6m/s$  时才出现明显破碎之说(Monahan, 1971),但与 Blanchard(1963)的结果接近。

表1 白浪和泡沫寿命

Tab.1 The measured results of whitecaps and foam lifetime

序号	观测个数	白浪寿命 (s)	泡沫寿命 (s)	风速 (m/s)	风向	摩擦风速 (m/s)	水气温度 ( $^{\circ}C$ )
01	14	4.00	44.57	12.7	N	55.04	16.94—11.72
02	20	4.06	45.10	13.5	NE	70.63	16.95—12.04
03	21	2.37	35.65	9.5	NE	44.32	16.86—12.92
04	20	0.69	26.10	3.0	N	9.40	16.72—12.58
05	20	0.88	20.65	3.5	WNW	12.52	16.85—13.92
06	20	1.80	25.15	5.6	WSW	10.90	16.78—14.40
07	20	1.76	26.90	7.5	SSW	21.90	16.51—15.90
08	20	1.10	24.15	6.0	SW	17.94	16.60—16.19
09	20	1.00	19.60	5.8	E	14.53	16.52—15.00
10	19	3.13	43.55	16.1	NE	74.01	16.22—12.72
11	19	4.18	43.32	17.0	NE	75.02	16.30—12.85
12	20	4.16	43.70	17.2	NE	74.91	16.30—12.90
13	19	4.22	41.70	17.1	NE	70.20	15.90—12.00
14	20	4.40	46.40	17.3	NNE	78.61	16.00—12.10
15	20	4.81	43.16	17.3	NNE	78.61	16.11—12.22
16	20	5.15	51.50	18.5	NE	80.21	16.21—12.25
17	20	3.19	52.40	15.6	NNE	72.34	15.80—10.47
18	20	3.41	55.40	12.9	NNE	61.31	15.80—9.42
19	20	3.45	56.30	12.5	NNE	58.56	15.58—9.58
20	20	3.20	48.75	12.0	NNE	48.34	15.83—10.20
21	20	2.72	43.35	9.4	NNE	40.86	15.80—10.90
22	20	2.16	52.80	8.6	NNE	36.04	15.79—10.40
23	20	2.03	58.75	9.0	NNE	36.65	15.80—10.90
24	20	3.10	65.65	12.8	NNE	46.54	15.50—9.32
25	20	3.10	64.60	12.2	NNE	45.54	15.52—9.43
26	20	2.90	62.65	12.0	NNE	50.64	15.56—9.45
27	20	2.64	56.90	10.7	NNE	42.17	15.56—9.50
28	20	2.52	52.60	10.3	NNE	40.27	15.60—9.66
29	20	2.16	52.68	8.9	NNE	36.65	15.58—9.83

从图 2b 给出的  $U_{10}$  与泡沫寿命的关系中,明显看出泡沫寿命随  $U_{10}$  的变化不是单调的。在  $7m/s$  风速处有一拐点,当风速小于  $7m/s$  时,泡沫寿命几乎不随风速变化。当大于  $7m/s$  时泡沫寿命迅速增加,而超过  $14m/s$  时有所减低,最后趋于平稳。这一现象是

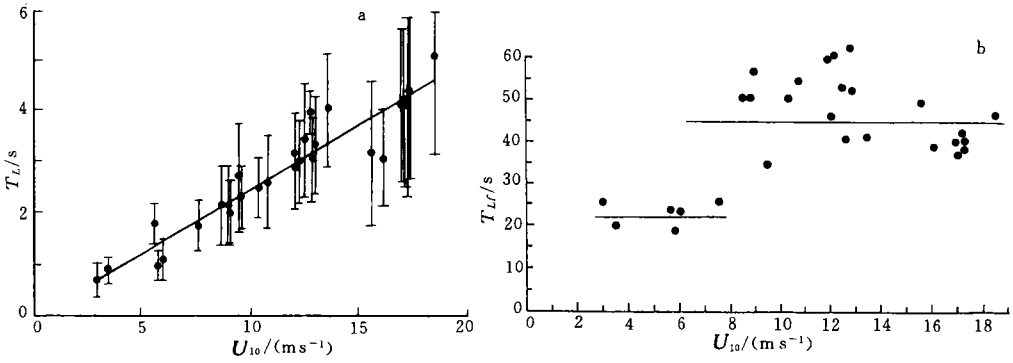


图2 白浪寿命 (a)和泡沫寿命 (b)

Fig.2 Whitecap lifetime (a) and Foam lifetime (b)

因为在高风速下,海面风漂流速度增大,泡沫很容易扩散,所以高风速下泡沫寿命会随风速增大而减小。

$U_{10}$ 与泡沫寿命的关系,恰好与气泡的垂直下潜特征长度与风速的关系相吻合 (Wu Jin, 1988),这一现象也与风应力系数和大气表面层粗糙度与风速的关系有共同点 (Wu Jin, 1969, 1981)。从这里也可以看出海面风应力系数和海表气层粗糙度与破碎波形成的泡沫有直接关系。

根据图 2b,可以将泡沫寿命  $T_f$  与风速的关系表示为

$$T_f = \begin{cases} 23 & U_{10} < 7\text{m/s} \\ 50 & U_{10} \geq 7\text{m/s} \end{cases} \quad (7)$$

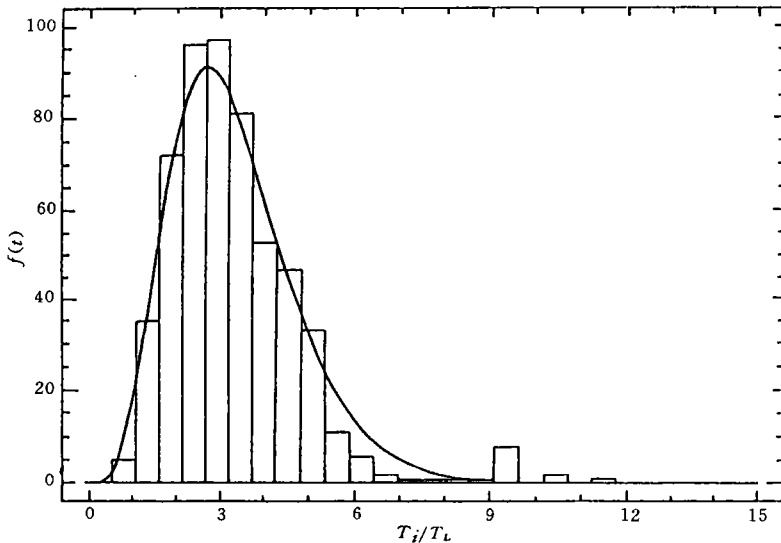


图 3 白浪寿命分布

Fig.3 Distribution of whitecap lifetime

这说明泡沫寿命随风速跳跃变化。从物理意义上讲,泡沫随风速变化与白浪寿命不同,白浪持续时间直接与波浪尺度有关,即大波破碎持续时间长,小波破碎持续时间短。而泡沫持续的时间与很多环境因素有关,水质、表面张力、波浪破碎时卷入的空气量及其下潜深度等,但这些因素与风速变化不是线性增长的关系,这种变化恰恰具有泡沫寿命随风速变化的关系。 $7\text{ m/s}$ 和 $14\text{ m/s}$ 风速可能是泡沫持续时间的跳跃点。

另外,将资料进行统计, $X$ 轴取: $t = T_i / T_L$  (8)  
 $T_i$ 是每组的个别白浪寿命, $T_L$ 对应每组的平均值, $y$ 轴是概率密度(见图3),近于瑞利分布。

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 0.5\pi t \exp(-\pi^2 t^2 / 4) & t \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

## 4 结语

4.1 有效白浪寿命与风速的关系非常有规律(图2a),这在一定程度上表明,本文提出的特征白浪寿命的定义和测量方法是合理可行的。

4.2 用空间和时间两方面的特征统计量去反映一个海洋现象,这在物理海洋学及其它学科中都是常见的。与白浪覆盖率的测量相对照,特征白浪寿命的测量不仅较容易且较准确,故此量很有可能成为与白浪覆盖率相对应的另一白浪特征统计量而被广泛地应用于白浪测量和研究中。

4.3 特征白浪寿命是从测量方法上定义的,其确切的统计意义的确定还有待进一步研究,通过进一步的海上测量和理论分析,寻求白浪寿命的分布函数,不仅对确定有效白浪寿命的准确统计含意,而且对白浪的进一步研究都具有重要意义。

4.4 白浪覆盖率与特征白浪寿命是一个现象两方面的统计特征量,两者之间必有确定的关系。在这里本文提出一种简便的计算白浪覆盖率的经验公式。从整体考虑并作为一种近似,试给出以下表达式:

$$W_c = PT_L / T \quad (10)$$

式中, $W_c$ 为白浪覆盖率; $P = n_b / n$ 为破波概率; $T_L$ 为平均白浪寿命; $T$ 是平均波周期。

本文用同一地点观测得到的白浪覆盖率结果(王伟等,1990)进行了比较,取了三种代表性风速计算结果(表2)。从比较结果看,风速越大,两者的差距越大,原因在于分析和处理资料方法上的差异造成,但总的来看结果还是比较接近的,因此也可以用白浪寿命和波浪记录计算 $W_c$ ,这种方法简单可行,避免了处理白浪照片的困难。如果能找出白浪寿命与白浪覆盖率之间的关系,对白浪研究将具有重要意义。有关这方面的讨论有待进一步研究。

表2 白浪覆盖率结果比较

Tab.2 The results of whitecap coverage

$U(\text{m/s})$	$W_c = f_b T_L / T(\%)$	$W_c = 1.53 \times 10^{-5} U_{10}^{2.98}(\%)$
6.0	0.29	0.32
9.0	0.84	1.07
15.6	4.06	5.50

**致谢** 本研究得到了青岛海洋大学物理海洋重点实验室“上层海洋动力学研究”课题组其他同志的协助, 谨志谢忱。

### 参 考 文 献

- 王伟 徐德伦 楼顺里, 1990. 海洋白浪与海面摩擦速度的直接同步测量及结果分析. 海洋与湖沼, 21(6): 516—521
- 刘文通 楼顺里等, 1990. 海上石油平台对周围风场的影响. 青岛海洋大学学报, 20(3): 39—48
- 袁业立等, 1988. 破碎波统计及其在上层大洋动力学中的应用. 中国科学(B), 10: 1 084—1 091
- Blanchard, D C, 1963. The electrification of the atmosphere by particles from bubbles in the sea. Progress in Oceanography, 1: 71—202
- Cardone, V J, 1969. Specification of wind field distribution in the marine boundary layer for wave forecasting. Rep. TR9—1, Geophys Sci Lab New York University
- Huang, N E *et al*, 1986. An analytical model for oceanic whitecap coverage. J Phys Oceanogr, 16: 1 597—1 604
- Longuet-Higgins, M S, 1975. Integral properties of periodic gravity waves of finite amplitude. Pro Roy Soc, Lond, A 16: 157—174
- Longuet-Higgins, M S, Smith, N D, 1983. Measurement of breaking waves by a surface jump meter. J Geophys Res, 88 (c14): 9 823—9 831
- Monahan, E C, 1969. Fresh water whitecaps. J Atmos Sci, 26: 1 026—1 029
- Monahan, E C, 1971. Oceanic whitecaps. J Phys Oceanogr, 1: 139—144
- Monahan, E C, I O'muirchedtraigh. 1980. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed. J Phys Oceanogr, 10: 2 094—2 099
- Munk, W H, 1947. A critical wind speed for air-sea boundary processes. J Marine Res, 6: 203—218
- Phillips, O M, 1985. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. J Fluid Mech, 156: 505—531
- Ross, D B, Cardone, V, 1974. Observations of oceanic whitecaps and their relation to remote measurement of surface wind speed. J Geophys Res, 79: 444—452
- Wu Jin, 1969. Wind stress and surface roughness at air-sea interface. J Geophys Res, 74: 444—455
- Wu Jin, 1979. Oceanic whitecaps and sea state. J Phys Oceanogr, 7: 1 064—1 068
- Wu Jin, 1981. On critical roughness Reynolds numbers of the atmospheric surface layer. J Geophys Res, 86: 6 661—6 665
- Wu Jin, 1988. Variation of whitecaps coverage with stress and water temperature. J Phys Oceanogr, 18: 1 448—1 453

## DEFINITION AND MEASUREMENT OF OCEANIC WHITECAP LIFETIME

LOU Shun-li, CAO Lu-jie, TIAN Ji-wei

(Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

**Abstract** Oceanic whitecaps, resulting from wave breaking play an important role in affecting air-sea fluxes and marine remote sensing. So far, measurements of whitecap have been limited to establishing the relationship between whitecap coverage and wind speed. In present study, the authors proposed a definition of average whitecap lifetime and the method of its measurement in time and space for the first time, and also presented the method for calculating the whitecap lifetime  $T_L$ , for comparison with results from actual measurements in the Bohai Sea. Oct. 31 to Nov. 7, 1989 observations were conducted from a platform at  $39^{\circ} 09' N$ ,  $119^{\circ} 42' E$  in the Bohai Sea. The observer followed 20 whitecaps for roughly 30 min intervals at certain in the studied sea area to measure their 20 lifetimes and defined their average as significant whitecap lifetime. The field experiment, during which wind speeds were 3 to 18.5 m/s, yielded 2 data sets.

This study showed that whitecap lifetime,  $T_L$ , increases linearly with wind speed  $U_{10}$ , according to the relationship,  $T_L = 0.26U_{10}$ , while foam lifetime varies with wind velocity (with the separating point at 7m/s), and increases sharply at roughly  $U_{10} = 7\text{m/s}$ , maximizing at about  $U_{10} = 15\text{m/s}$ , and then decreases with wind velocity. The foam lifetime  $T_{LF} = 23\text{ s}$  when wind velocity  $U_{10} > 7\text{m/s}$  and = 50s when  $U_{10} < 7\text{m/s}$ . It is noteworthy that the abrupt increase of foam lifetime at about  $U_{10} = 7\text{m/s}$  as shown in Figure 2b is consistent with the variation of the characteristic length of bubble vertical entrainments pointed out by Wu (1988). The possible explanation is that the foam consists of bubbles and hence its behavior has close relation with the bubble.

The whitecap lifetime follows Rayleigh distribution, the results of a simple empirical algorithm based on wave breaking probability and whitecap lifetime to calculate whitecap coverage were compared with Wang (1990)'s results obtained in the same place.

**Key words** Whitecap Whitecap lifetime Actual measurement

**Subject classification number** P731.22