

## 海面阻力系数与白浪覆盖率的关系\*

王 伟 徐德伦 楼顺里

(青岛海洋大学)

吴述礼 宋 珊

(渤海石油公司, 天津)

**摘要** 基于海上平均风速廓线和白浪覆盖率的同步测量结果,首次建立海面阻力系数  $C_{10}$  与白浪覆盖率  $W_C$  的经验关系式为  $C_{10} \times 10^3 = 4.13 W_C^{2.15}$ 。将此关系式与 Garratt 和 Wu 的海面阻力系数与平均风速关系式作了间接比较,符合良好。还就此关系式对海面阻力系数的变化以及此关系式在海洋遥感中的意义作了讨论。

海面阻力系数是计算海-气动量、热量和质量通量的重要参量,在海-气相互作用和海浪动力学研究中有重要作用。长期以来,许多研究者对它的量值和变化规律作了大量的海上测量、实验研究和理论研究。新近的研究发现,阻力系数不仅是风速的函数,而且与大气稳定度等,特别与海面波浪状况有关。作为海面风速、大气稳定度和海面波浪状况综合表征的海洋白浪覆盖率显然应与海面阻力系数有密切的关系,建立两者之间的关系式,在理论和应用上无疑有重要意义,这是因为:(1)这种关系不仅能更全面地反映海面阻力系数的变化规律,而且有助于进一步研究海面“阻力”形成的机制;(2)用海洋遥感技术容易获得任一海区的白浪覆盖率,借助于已建立的关系式,可换算为海面阻力系数。

本文报道了海上测量方法和结果以及由此结果适配的阻力系数与白浪覆盖率之间的关系式,并就此关系式对海面阻力系数的变化规律进行一些讨论。

## 一、海上测量及数据处理

海上测量是 1989 年 1 月 11 日至 27 日于“渤中 8 号”采油平台上进行的。

海面风廓线的测量采用了青岛海洋大学研制的 DF-1 型多通道智能风速仪。其启动风速为 0.7m/s,最大测量误差为 0.2m/s,可自动测量多层次设定时间内的平均风速,并打印在纸带上。为了减小平台对测点风速的影响(这是测量成败的关键之一),我们将风杯(传感器)安装在距平台 30m 远的一条铅直钢丝绳上。此绳上端固定在平台东侧以 45° 仰角伸出的废气燃管支架上,下端系一重物并沉于海底。由于平台所在的渤海中部海区冬季盛行偏北风,这样安装使测得的风速受平台的影响很小。共安装了 7 层风杯,各层距平均海面分别为 4, 6, 11, 16, 21, 31 和 48m。各层风杯的输出信号经前置放大和滤波后由长 100m 的同芯电缆传送到控制室的主机,主机按设定的时间每小时记录一次。

\* 本文系国家自然科学基金资助项目《风浪破碎的测量及破碎在海-气交换中作用的研究》成果的一部分。  
收稿日期: 1989 年 8 月 17 日。

将海上平均风速廓线认为服从对数律,若考虑到大气稳定度的影响,风廓线的形式为<sup>[1]</sup>:

表 1 主要观测结果

Tab. 1 Observational data

编号	日期(日)	时间(时分)	风速 $U_{10}$ (m/s)	摩擦风速 $u_*$ (cm/s)	白浪覆盖 率 $W_c$ (%)	阻力系数 $C_{10}$ ( $\times 10^{-3}$ )	气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	风区 (km)	照片 (张数)
1	10	09 00	13.98	53.67	3.483	1.47	-3.1	3.9	285	4
2	10	12 00	13.85	50.28	3.657	1.35	-2.2	4.2	285	4
3	10	14 00	13.97	53.31	5.781	1.46	-2.0	4.0	285	4
4	10	16 00	13.46	50.49	3.028	1.42	-1.8	3.9	285	4
5	11	08 00	14.57	60.42	4.867	1.72	-4.0	3.8	285	4
6	11	09 00	14.13	61.20	6.386	1.87	-4.0	3.8	285	4
7	11	11 00	12.40	51.38	2.617	1.72	-3.8	3.9	285	3
8	11	13 00	12.64	49.71	2.862	1.55	-3.8	3.9	285	5
9	11	15 00	11.59	46.22	1.732	1.59	-3.6	3.9	285	4
10	12	08 30	8.51	37.69	0.865	1.96	-5.1	3.7	285	3
11	12	09 10	7.87	36.35	0.667	2.13	-4.6	3.7	285	4
12	12	10 00	8.69	35.81	1.123	1.69	-4.3	3.9	285	3
13	12	12 00	6.21	25.31	0.571	1.66	-4.0	4.0	285	4
14	13	12 00	8.41	33.80	0.875	1.61	-0.8	3.0	285	4
15	13	14 00	6.60	22.39	0.451	1.15	-0.6	3.2	240	5
16	13	16 00	5.34	20.11	0.242	1.42	-0.4	3.4	240	3
17	21	09 00	10.94	45.17	1.584	1.70	-0.5	3.3	285	4
18	21	11 00	11.35	54.77	2.300	2.33	-0.4	3.4	240	4
19	21	12 00	9.64	44.89	1.202	2.17	-0.3	3.4	240	4
20	21	12 45	9.00	31.20	1.005	1.19	-0.3	3.4	240	7
21	21	14 00	10.51	40.12	2.213	1.46	-0.4	3.3	240	4
22	21	15 00	11.20	49.01	1.650	1.91	-0.5	3.3	285	4
23	21	16 00	10.90	48.35	2.133	1.97	-0.6	3.3	240	4
24	23	11 40	11.73	48.25	2.503	1.69	-4.6	3.0	285	5
25	23	12 00	12.04	48.26	2.704	1.61	-4.5	3.0	285	8
26	26	08 00	8.31	32.34	0.975	1.51	-2.8	2.6	285	3
27	26	10 00	8.60	25.80	0.696	0.90	-2.6	2.8	70	4
28	26	11 00	8.30	25.81	0.964	0.96	-2.3	2.9	70	4
29	26	12 00	8.04	26.12	0.871	1.06	-2.2	3.0	70	4
30	26	13 00	7.96	26.64	0.728	1.12	-2.1	3.0	65	4
31	26	14 00	7.93	25.74	0.562	1.05	-2.1	3.0	70	6
32	26	15 00	7.35	23.12	0.602	0.99	-2.3	3.0	65	5
33	26	16 00	9.87	41.37	1.145	1.76	-2.5	2.9	65	4
34	26	17 00	9.92	40.32	1.375	1.65	-3.0	2.9	65	4
35	27	08 00	9.29	23.34	1.533	0.63	-4.7	2.7	70	3
36	27	09 00	9.24	32.26	1.098	1.22	-4.5	2.7	85	4
37	27	10 00	5.51	14.29	0.321	0.67	-4.5	2.9	70	4
38	27	11 00	5.69	12.95	0.183	0.52	-4.3	3.1	70	4
39	27	12 00	7.26	17.71	0.291	0.59	-3.8	3.3	70	4
40	27	13 00	5.88	14.70	0.417	0.62	-3.8	3.3	70	5

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} [\ln(z/z_0) - \phi_0] \quad (1)$$

式中,  $U_z$  为距海面高度为  $z$  处的平均风速;  $u_*$  为海面摩擦风速;  $\kappa$  为卡门常数;  $z_0$  为海面粗糙长度;  $\phi_0$  为稳定性函数。考虑到测量时水与气温差不大(见表 1), 大气稳定度的影响与实际测量误差相比并非重要, 在计算中取  $\phi_0 = 0$ , 即认为贴水大气近似为中性的, 于是式(1)简化为

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (2)$$

按此式, 将测得的各层平均风速相对于高度在半对数坐标中作线性回归处理, 就得到  $u_*$ , 然后按式

$$C_{10} = u_*^2 / U_{10}^2 \quad (3)$$

计算出距海面 10m 高处平均风速  $U_{10}$  对应的海面阻力系数  $C_{10}$ 。

白浪覆盖率的测量采用了照相方法。相机是改装的 NIKON FE-2 型。为扩大视角, 选配了 NIKON 15mm 特广角镜头。选用的底片为 KODAK ASA100 彩色反转底片, 拍摄点的高度约 30m, 拍摄时镜头向下并与铅直线成一小仰角, 以保证拍摄的面积足够大但图象又足够清晰可辨。一般每小时与风速记录时刻同步拍摄一次, 每次拍片 4—10 张, 共拍 40 个时刻, 获 234 张底片。

底片的处理采用了 Monahan<sup>[3]</sup> 和 Toba<sup>[4]</sup> 的方法, 先将底片冲洗并制成幻灯片, 再用幻灯机将底片投影在  $60 \times 80\text{cm}$  质地均匀的白纸上, 就纸上的画面用笔将白浪覆盖部分一一圈画出来。然后, 将圈画的部分剪下, 最后用分析天平称量(准确至万分之一克)出白浪覆盖部分的重量和纸的总重量, 两者之比即为白浪覆盖率。为了避免单张底片的偶然性, 把从同一次拍摄的多张底片上获得的数据进行平均作为一个数据。为了减小镜头视角所致的变形造成的误差, 我们对幻灯投影作了合理的剪裁: 将距离过远和过近以及变形较大的两侧部分裁除, 只保留变形率大体一致的中间部分。这部分对应的海面面积约为  $200 \times 300\text{m}^2$ 。表 1 列出了本次测量的各种风速下的白浪覆盖率以及由同步测得的  $U_{10}$  和  $u_*$  按式(3)计算的阻力系数  $C_{10}$ 。

## 二、阻力系数与白浪覆盖率的经验关系

对表 1 所列的海面阻力系数  $C_{10}$  和白浪覆盖率  $W_c$  的数据, 在双对数坐标中用线性回归法进行适配, 得两者的关系式(如图 1 中的直线所示)为:

$$C_{10} \times 10^3 = 4.13 W_c^{0.255} \approx 4.13 W_c^{1/4} \quad (4)$$

式中,  $W_c$  的单位为  $10^{-6}$ 。

由于这是首次给出的海面阻力系数与白浪覆盖率的关系式, 目前还找不到类似的关系作直接比较。但与已有的一些有关结果作间接的比较显示了良好的一致性。Garratt<sup>[2]</sup> 通过分析归纳 18 组独立测量的海面阻力系数和平均风速的数据后, 给出了如下经验关系:

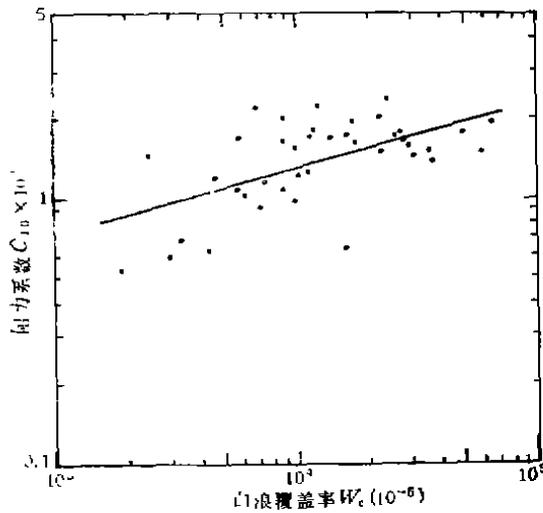


图 1 海面阻力系数与白浪覆盖率的关系  
Fig. 1 Variation of the drag coefficient  $C_{10}$  with whitecap coverage  $W_c$

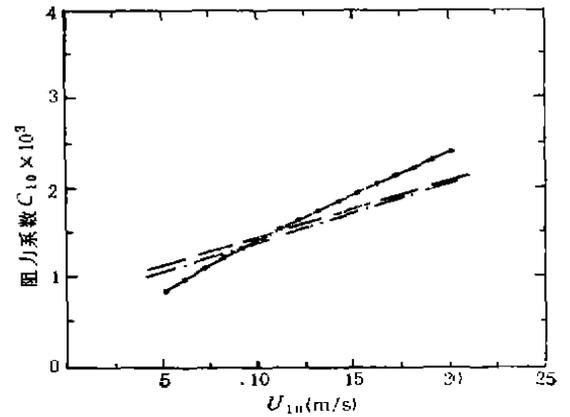


图 2 按 3 种不同的关系式由  $U_{10}$  计算的  $C_{10}$   
Fig. 2 Variation of the drag coefficient with wind speed  
—— Wu 关系式[式(6)];  
- - - Garratt 关系式[式(5)];  
- · - · - 本文关系式[式(4)和(7)]。

表 2 各种阻力系数的比较结果

Tab. 2 Comparison of the drag coefficients

$U_{10}$ (m/s)	$W_c$ (%) [按式(7)]	$C_{10} \times 10^3$		
		按式(7)和(4)	按式(6)	按式(5)
5	0.1852	0.83	1.08	1.12
6	0.3188	0.95	1.15	1.19
7	0.5047	1.07	1.21	1.25
8	0.7514	1.19	1.28	1.32
9	1.0674	1.30	1.35	1.38
10	1.4611	1.41	1.42	1.45
11	1.9411	1.51	1.49	1.51
12	2.5156	1.61	1.55	1.58
13	3.1933	1.71	1.62	1.65
14	3.9825	1.81	1.69	1.71
15	4.8915	1.91	1.76	1.78
16	5.9288	2.00	1.82	1.84
17	7.1028	2.10	1.89	1.91
18	8.4217	2.19	1.96	1.97
19	9.8941	2.28	2.02	2.03
20	11.5282	2.38	2.09	2.10

$$C_{10} \times 10^3 = 0.75 + 0.067U_{10} \quad (5)$$

Wu<sup>[3]</sup> 分析归纳了 33 组独立测量的数据, 给出作为平均结果的关系式为

$$C_{10} \times 10^3 = 0.8 + 0.065U_{10} \quad (6)$$

本文作者曾给出白浪覆盖率与海面平均风速的经验关系<sup>[2]</sup>

$$W_c = 1.53 \times 10^{-5} U_{10}^{2.78} \quad (7)$$

此关系式所依据的数据与式(4)的相同。将给定的风速值代入式(7)计算出  $W_c$ , 然后将  $W_c$  代入式(4)计算出此风速下的阻力系数, 再就同一风速分别按式(5)和(6)计算出阻力系数, 这样就得到按三种不同关系式计算的阻力系数  $C_{10}$ 。表 2 列出如此计算的各种风速下的三种  $C_{10}$  值; 相应的曲线绘于图 2。由表 2 和图 2 可以看出, 由三种关系式给出的海面阻力系数总的说来相当一致。但在较高风速 ( $U_{10} > 10\text{m/s}$ ) 和较低风速 ( $U_{10} < 10\text{m/s}$ ) 下, 式(4)给出的阻力系数分别略高和略低于式(5)和(6)给出的。究其原因, 一方面可能因为式(4)是在贴水大气处于稳定状态下得到的, 而另外两式是中性稳定度下的平均结果; 另一方面, 这或许正是反映了在高风速下以白浪为表征的风浪破碎对海面阻力系数的影响; 在低风速下海面阻力系数对风浪破碎不敏感。

### 三、讨论与结语

既然海面阻力系数和白浪覆盖率都不仅是风速的函数, 而且与大气稳定状况和海面波动状况等诸多因素有关。那么, 将白浪覆盖率作为单一的变量并与阻力系数连系起来, 看来能较好地反映阻力系数的变化规律。而且, 白浪覆盖率较容易通过海洋遥感获得, 这就为遥感测海面阻力系数提供了可能: 按已建立的关系式由白浪覆盖率推算海面阻力系数。

由于本文报告的测量结果是在特定的海域和季节获得的, 其代表性如何, 尚需进一步与海上和实验室测量结果作比较。

### 参 考 文 献

- [1] 张淮水、刘安国、宋澍等, 1989。海面风的特征分析。青岛海洋大学学报 19(2): 48—54。
- [2] 王伟、徐德伦、楼顺里, 1990。海洋白浪与海面摩擦风速的直接同步测量及结果分析。海洋学报 12(5): 640—649。
- [3] Garratt, J. R., 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Wea. Rev.* 105: 915—928.
- [4] Monahan, E. C., 1971. Oceanic whitecaps. *J. Phys. Oceanogr.* 1: 139—144.
- [5] Toba, Y. and M. Chean, 1973. Quantitative expression of the breaking waves on the sea surface. *Records Oceanogr. Works Japan* 12: 1—11.
- [6] Wu, J., 1980. Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions—A revisit. *J. Phys. Oceanogr.* 10: 727—740.

## RELATIONSHIP BETWEEN DRAG COEFFICIENT OF SEA SURFACE AND WHITECAP COVERAGE

Wang Wei, Xu Delun, Lou Shunli  
(*Ocean University of Qingdao*)

Wu Shuli and Song Shan  
(*Oil Company of Bohai Sea, Tianjin*)

### ABSTRACT

Based on synchronous measurement of wind profiles over the sea and whitecap coverage, a relationship between the drag coefficient  $C_{10}$  and the whitecap coverage  $W_c$  was formulized as  $C_{10} \times 10^3 = 4.13W_c^{0.255}$ . Comparing the formulation with those relating the drag coefficient and the average wind-speed given by Garratt and Wu respectively shows a good agreement. Variation of the coefficient with wind speeds was discussed on the basis of the formulation, and significance of the formulation in oceanic remote sensing was also explained.