

活跃破碎的图像识别*

张冲¹ 类淑河^{1,2} 管长龙² 周西龙¹

(1. 中国海洋大学数学科学学院 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋实验室 青岛 266100)

提要 破碎波峰线长度的速度谱 $\Lambda(c)$ 及其高阶矩是研究破碎能量耗散、动量通量等关键问题的有效工具。活跃破碎的图像识别是正确计算 $\Lambda(c)$ 的一个关键前提。Kleiss 等 2011 年给出了一种基于对数累积灰度函数(L)的导函数区分活跃破碎与尾迹的阈值方法,但阈值的确定仍存在一定的主观性,得到的破碎阈值可能偏低。我们通过对渤海海域拍摄的白冠破碎观测资料的分析,发现 L 函数的二阶导数往往存在稳定的次峰,次峰所对应的灰度值正可作为区分活跃破碎与尾迹的灰度阈值,由此提出一种基于 L 函数二阶导数次峰的阈值确定方法。

关键词 白冠破碎; 活跃破碎; 破碎尾迹; 图像识别

中图分类号 P731.22 **doi:** 10.11693/hyhz20121220001

海浪破碎在海气相互作用过程中发挥着重要作用,它使海气间的动量、能量传输和物质交换大大加强。破碎产生的气泡为慢可溶性气体从大气转移到海洋提供了重要的途径(Asher *et al.*, 1996)。气泡的破裂以及破碎产生的飞沫会进入空气中,转化成海盐气溶胶,可以影响低层气体的组成结构,从而缓和温室效应的影响(Grini *et al.*, 2002; Liao, 2004)。此外,海浪破碎研究对海洋遥感、沿海与海洋工程、导航和其它实际应用也有重要的作用(Melville, 1996)。

破碎强度的度量一直是海浪破碎研究的焦点,它通常用破碎引致的波浪场能量耗散来表达。Phillips 等(1985)提出了一个有效度量破碎强度的统计量 $\Lambda(c)$,即单位海面上速度范围 $(c, c+dc)$ 内破碎波峰线平均长度,其一阶矩正比于破碎概率,四阶矩正比于波浪动量通量,五阶矩则正比于破碎造成的能量损失(Phillips, 1985)。Gemrich 等(2008)利用海上拍摄的录像资料,通过计算 $\Lambda(c)$ 的四阶矩和五阶矩来估计破碎波造成的动量损失与能量耗散率,并重新给出相关的参数范围。Kleiss 等(2011)利用等高线法(Contour method)对海表面图像进行识别来确定 $\Lambda(c)$ 以及破碎概率 R 的分布,用 $\Lambda(c)$ 定量描述破碎耗散,

从而更好的理解破碎造成的海气间动量能量转移和物质交换等过程(Kleiss, 2009)。显然, $\Lambda(c)$ 及其高阶矩提供了研究海浪破碎引致的能量耗散、动量转移等关键问题的一个有效途径。

在这一研究模式中,白冠破碎图像的识别与处理技术是一个关键前提。Monahan 等(1969)通过对美加边界五湖地区的白冠破碎的观测研究,提出了可通过人工选定的方法得到一个灰度阈值,高于阈值的部分为破碎白冠,低于阈值的部分为背景海洋。随着计算机技术和数码摄像技术的发展,白冠图像识别方法向着高效、一致、自动的方向发展。Massouh 等(1999)运用数值计算法判别了图像封闭的连通区域轮廓,封闭区域内的认为是破碎白冠,从而区分破碎白冠与背景海洋。之后,Callaghan 等(2009)在总结前人灰度阈值理论的基础上,提出了一种利用灰度变化率函数及其导函数计算灰度阈值的自动识别白冠技术。

事实上,破碎白冠一般由两部分组成:活跃破碎产生的白冠(active whitecap)及破碎尾迹(old foam patch)(Monahan *et al.*, 1993)。随着破碎过程的演变,两部分的比例在不断变化:从最初的活跃破碎开始,尾迹部分所占比例不断增加,直至白冠消失。显然,

* 国家自然科学基金, 41276010 号。张冲, E-mail: king_chong123@163.com

通讯作者: 类淑河, 副教授, E-mail: shuhelei@ouc.edu.cn

收稿日期: 2012-12-20, 收修改稿日期: 2013-04-28

$\Lambda(c)$ 定义中所指的破碎应该是活跃破碎部分。要正确计算 $\Lambda(c)$ 及其高阶矩, 首先需要有效区别图像中的活跃破碎部分和破碎尾迹部分, 然而这方面的研究目前还很少(Melville *et al*, 2002; Kleiss *et al*, 2011)。Kleiss(2009)提出了一套关于活跃破碎的阈值选取的方法(简称 Kleiss 方法), 首先将 RGB 彩色图转换为灰度图, 记 $p(n)$ 表示图像中灰度为 n 的所有像素点个数。记 $W(i) = \sum_{n=i}^{256} p(n)$, 称为灰度累积函数, 即灰度高于 i 的所有像素点个数。令 $L = \ln(W(i))$, 简记为 L , 并记其二阶导数为 L'' 。Kleiss(2011)通过 10 名志愿者对 82 幅随机挑选的图像确定人工阈值, 将人工结果与 L'' 曲线进行比较, 得出 L'' 最大值的 20% 对应的灰度值作为阈值, 用以区分活跃破碎与尾迹。

借助我们在渤海海域的录像资料, 发现 Kleiss 方法确定活跃破碎阈值结果偏低, 有些明显的破碎尾迹会被误判为活跃破碎。实际上, 活跃破碎与尾迹在灰度上也存在明显的变化, 这个变化应该由 L'' 曲线特征反映出来。本文通过对多幅白冠破碎图像资料的分析, 考察 L'' 曲线的变化特征, 给出区分活跃破碎与尾迹的更合理的阈值。

1 活跃破碎与破碎尾迹的次峰阈值确定方法

活跃破碎与破碎尾迹在图像上有各自的特点,

尾迹灰度介于背景海洋与活跃破碎的灰度值带之间。活跃破碎的灰度值范围相对比较集中。我们在渤海地区航海期间进行了航拍录像观测。图 1 为我们观测录像中选取的 2 帧图像(拍摄海域: 123°9.858'E, 38°44.527'E), 图 1a 的中间和图 1b 的右上方各有一部分是破碎发生之后留下的尾迹。

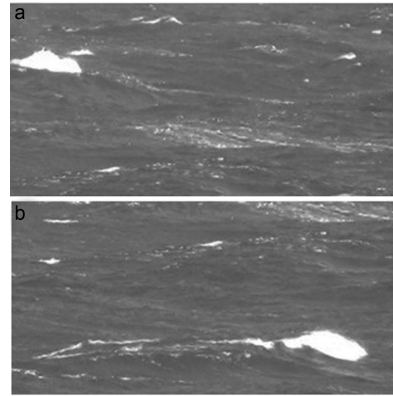


图 1 白冠破碎图像示例
Fig.1 Images of active whitecaps

为了更清楚地看清活跃破碎、破碎尾迹以及背景海洋 3 者灰度值的分布情况, 图 2 给出了部分活跃破碎、破碎尾迹以及背景海洋 3 类像素点的灰度值分布散点图, 3 类像素点基于肉眼判断, 只选取明显容易判断的像素点, 舍弃不容易区分的。灰度值 140—160 的实线为 Kleiss 等(2011)区分非破碎部分与破碎的阈

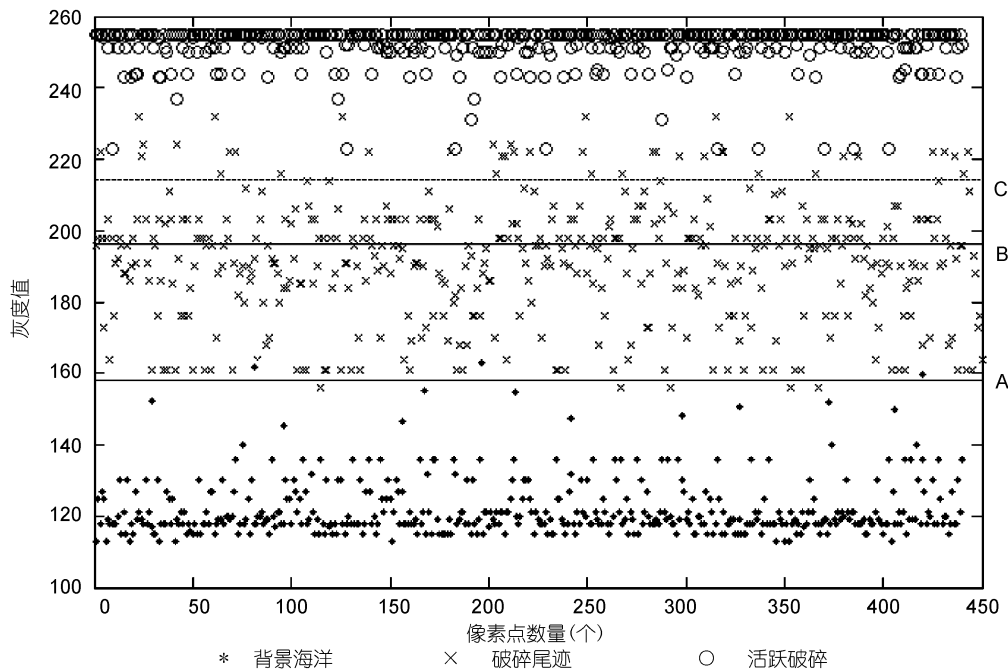


图 2 活跃破碎、破碎尾迹以及背景海洋像素点的灰度值分布

Fig.2 Gray value distributions of active whitecaps, old foam patches and blue background

值线(对应图 3 中 A 点值), 灰度值 200—220 的虚线为 Kleiss 等(2011)区分活跃破碎与尾迹的阈值线(对应图 3 中 B 点值)。灰度值 180—200 的实线为次峰阈值方法得到的区分活跃破碎与尾迹的阈值线(对应图 3 中 C 点值)。可以看出背景海洋的灰度值最低, 与破碎尾迹像素点的灰度有较清晰的分界。破碎尾迹灰度值大多低于活跃破碎的灰度值, 且活跃破碎的灰度较为集中。体现在 L 函数的变化图像上(图 3),

A 点处 L 的下降开始变慢, 此时灰度值刚与破碎尾迹边缘值相同。Kleiss 等基于其图像资料得到经验的阈值选取方法, 选取曲线 L' 的最大值所在灰度值(A 点的位置)作为区分背景海洋与破碎的灰度阈值, 选取 L' 最大值的 20%对应的灰度值(B 点的位置)作为区分活跃破碎和破碎尾迹的阈值。就我们的数据而言, 有许多人工判别为破碎尾迹的点被误判为了活跃破碎, 阈值偏低。

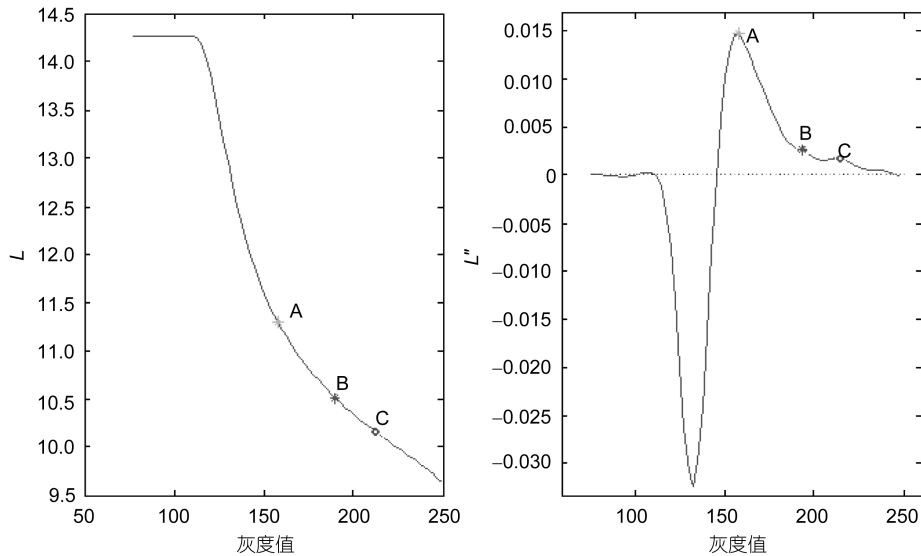


图 3 L 函数与 L' 的图像
Fig.3 Diagrams of L function and L' function

我们考察了多幅海上破碎图像资料, 发现用 Kleiss 方法确定的灰度阈值往往偏低, 区分活跃破碎和尾迹误判概率较高。我们还发现, 除了在 L' 图像上存在 1 个主峰之外, 后部一般还存在 1 个明显的次峰, 其位置较为稳定, 大致集中在 L' 最大值的 4%—15% 对应的灰度值范围内, 如图 4 所示, 横轴坐标 \bar{x} 做了归一化(横坐标值同时除以最大值点的横坐标, 这样可以使所有的函数曲线的最大值在同一横坐标下)。事实上, 次峰的出现并非偶然, 它正反映的是活跃破碎与尾迹灰度的明显变化。

然分开。

将次峰所对应的灰度值作为阈值, 可以有效区分活跃破碎与破碎尾迹。对图 1 中的两幅图像分别使用 Kleiss 方法和次峰阈值方法进行处理, 图 5 中给出了区分活跃破碎的结果。无论是破碎之后产生的破碎气泡, 还是破碎白冠经过产生的尾迹, 在新方法下图像结果中尾迹都有明显的减少。当然, 次峰方法识别结果仍保留了一些高灰度值的破碎亮点。活跃破碎与尾迹的灰度值总有交叉, 不可能靠 1 个阈值把它们截

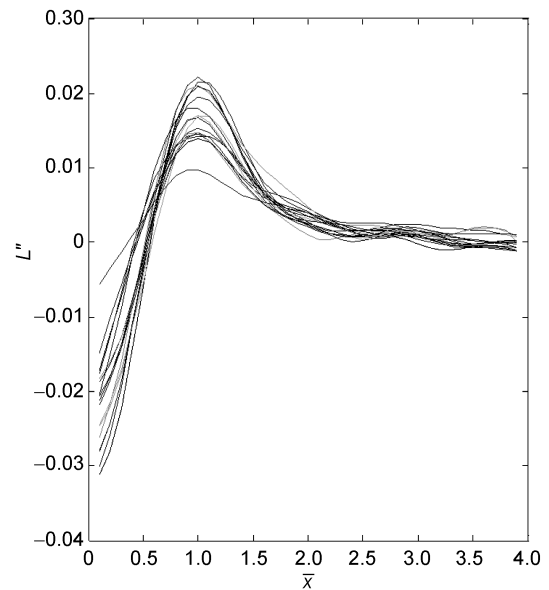


图 4 30 幅图像的 L' 函数结果
Fig.4 L' diagrams of 30 images

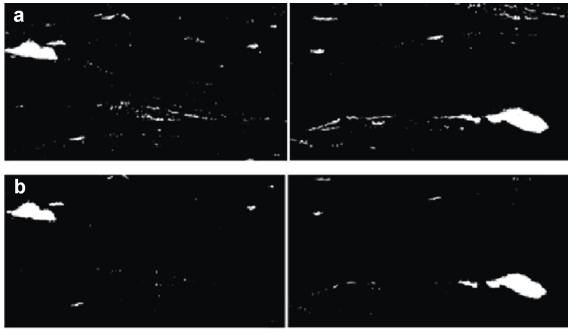


图 5 Kleiss 方法(a)与次峰阈值方法(b)的活跃破碎识别结果

Fig.5 Results of the Kleiss method (a) and the second peak threshold method (b)

2 结论

正确计算 $\Lambda(c)$ 及其高阶矩, 首先需要有效区别图像中的活跃破碎部分和破碎尾迹部分, Kleiss 等 (2011) 活跃破碎阈值的确定方法是基于经验得到的, 有一定的主观性。就我们的录像资料而言, 其误判概率较高、阈值偏低。我们通过条幅海浪破碎的图像验证, 发现 L 函数的二阶导数存在较稳定的次峰, 以其对应的灰度值作为区分活跃破碎与破碎尾迹的灰度阈值, 可以更有效地区分活跃破碎与尾迹。当然, 这样一种 L 函数次峰的阈值确定方法, 也仅仅是基于部分海上资料的分析得到的, 是否具有普适性, 还需要更多的海浪破碎观测资料进一步验证。

参 考 文 献

- Asher W E, Karle L M, Higgins B J *et al*, 1996. The influence of bubble plumes on air-seawater gas transfer velocities. *Geophys Res*, 101(C5): 12027—12041
- Callaghan, A H, White M, 2009. Automated processing of sea surface images for the determination of whitecap coverage. *Atmos Oceanic Technol*, 26(2): 383—394
- Gemmrich, J R, Banner M L, Carrett C, 2008. Spectrally Resolved Energy Dissipation Rate and Momentum Flux of Breaking Waves. *Phys Oceanogr*, 38: 1296—1312
- Grini A, Myhre G, Sundet J *et al*, 2002. Modeling the Annual Cycle of Sea Salt in the Global 3D model Oslo CTM2: Concentrations, Fluxes and Radiative Impact. *Clim*, 15(13): 1717—1730
- Kleiss J M, 2009. Airborne observations of the kinematics and statistics of breaking waves. San Diego: University of California, Doctoral dissertation
- Kleiss J M, Melville W K, 2011. The Analysis of Sea Surface Imagery for Whitecap Kinematics. *American Meteorological Society*, 28(2): 219—243
- Liao H, Seinfeld J, Adams P *et al*, 2004. Global radiative forcing of the coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model. *Geophys Res*, 109: D16207
- Massouh L, LeCalve O, 1999. Measurements of whitecap coverage during F.E.T.C.H. 98 experiment. *Aerosol Sci*, 30(1): 177—178
- Melville W K, 1996. The Role of Surface-Wave Breaking in Air-Sea Interaction. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28: 279—321
- Melville W K, Matusov P, 2002. Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417: 58—63
- Monahan E C, 1969. Fresh water whitecaps. *Atmos Sci*, 26(5): 1026—1029
- Monahan E C, 1993. Occurrence and evolution of acoustically relevant sub-surface bubble plumes and their associated, remotely monitorable, surface whitecaps. Springer Netherlands: *Natural Physical Sources of Underwater Sound*, 503—517
- Phillips O M, 1985. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind generated gravity waves. *Fluid Mech*, 156: 505—531

RECOGNIZING ACTIVE WHITECAP BREAKING

ZHANG Chong¹, LEI Shu-He^{1,2}, GUAN Chang-Long², ZHOU Xi-Long¹

(1. Mathematical College, Ocean University of China, Qingdao 266100; 2. Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract Phillips *et al.* (1985) proposed a function $\Lambda(c)$ to describe statistically the effective energy dissipation and momentum flux of wave breaking. To distinguish effectively active whitecap from old foam patches is important in calculating the function. By analyzing whitecap videos in Bohai Sea, North China, we found that the second derivative of the greyness accumulation function L'' show a subpeak that is persistent in different images of videos. Moreover, grayness level of the subpeak can be defined as a new gray threshold to separate between active whitecap and old foam patches, which is better than that of the Kleiss proposed in 2011.

Key words whitecap breaking; active breaking; old foam patch; image recognition