

文章编号: 1007-4619(2008)01-0015-08

二类水体中船舶含气泡尾迹海水表观光学特性的测量与分析

张 宇, 张永刚, 王 华, 张 旭

(海军大连舰艇学院 军事海洋系, 辽宁 大连 116018)

摘 要: 通过海上试验测量船舶含气泡尾迹海水表观光学特性及物理特征, 定量分析在二类水体中尾迹气泡对海水表观光学特性(例如归一化离水辐亮度、遥感反射率)的影响。通过比较含气泡尾迹海水遥感反射率与 AS1ER 可见光、近红外波段辐射计辐射分辨率, 证明了卫星光学遥感船舶含气泡尾迹的适用性。这些工作可为利用星载光学传感器遥感的途径获取船舶尾迹信息提供理论依据。试验证明, 在可见光和近红外波段, 船舶含气泡尾迹不仅在幅度上也在谱形上改变海水表观光学特征, 尾迹气泡使得海水变得更绿。同时, 随着观测点在尾迹中位置距目标船越近, 气泡密度不断增大, 反射率也随之增强。但是, 由于二类水体中其他悬浮颗粒浓度较高, 增强了后向散射, 因此气泡所引起的水色变化没有想像中明显。相比较而言, 海水愈混浊, 船舶尾迹在海水中引起的水色变化愈不明显。

关键词: 船尾迹; 气泡; 二类水体; 表观光学特性

中图分类号: P71/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

根据海洋水色扫描仪(COCTS)、海洋水色和温度传感器、宽视场海洋观测仪(SeaWiFS)已提供的观测数据, 卫星遥感海洋水色使我们了解了海洋生物易变性, 并确定使用遥感来对海洋初级生产力以及长周期大面积海域生物地球化学通量进行评估的可行性。由于这一方法的成功, 精确描述海洋水色变化所对应的生物学与物理过程就显得至关重要^[1]。但是, 无论是风成破碎浪还是降雨、有生命有机质的生物学过程、有机质分解以及海底释放气体等自然现象所产生的水中气泡对海水表观光学特征都有着不可忽视的影响^[2]。对于海洋水色遥感, 忽视泡沫引起的光谱变化的结果将是惊人的。而且, 海水中不管有没有悬浮微粒, 也不论悬浮微粒的类型, 只要有少量泡沫, 在 440 nm 可见光波段反演海水反射率的误差要大于 0.01 sr^{-1} , 这与生物学以及遥感应用中所需要的 0.001 sr^{-1} 精确度相差甚远^[3]。并且, 航行中船舶产生的波浪和湍流

形成一条船尾迹, 其显示为一条泡沫条纹, 湍流水伴随有一片没有小尺度表面粗糙度的光滑海水。行进船只生成表面波, 又称为 Kelvin 尾迹, 并且往往在有浅密度跃层的情况下形成内波^[3]。这些波伴随有生成于海表面以下的大量气泡。由于气泡表面的自然属性, 它们会吸收其他微粒和有机质^[4], 气泡表面的有机膜虽然对于前向散射影响很小, 但能显著增强后向半球的散射^[5]。因此, 不论是为了遥感水色过程中的正确校正, 还是利用尾迹气泡信息监测海面船只, 都需要对海洋中的气泡进行深入研究。本文主要针对可应用于海洋船只监测的尾迹气泡进行海上试验测量, 以求验证并发现其特有的光学特征。

以往众多的文献和研究工作表明, 可以通过船舶尾迹所具有的丰富的物理、微波、红外、声学特征对其进行探测: Kelvin 尾迹和中心线尾迹都能有效地改变布拉格波来使得微波合成孔径雷达可以轻易的探测到舰船尾迹^[6-10]; 舰船尾迹在热红外波段能够呈现出较强的辐射^[11-12]; 尾迹气泡对声传播的影响也相当显著^[13-15]。然而, 已有的工作中在可见光

收稿日期: 2006-08-15 修订日期: 2006-12-26

作者简介: 张 宇(1975—)男, 2000年毕业于海军大连舰艇学院作战指挥学专业, 获得军事学硕士学位, 现为该院交通信息工程及控制专业博士研究生。研究方向: 可见光、微波遥感信息军事应用研究。已发表论文 7 篇。E-mail: diaogn7524@sohu.com

和近红外波段研究船舶含气泡尾迹海水表观光学特性的却不多,尤其是在二类水体中。

Koepke^[16], Moore等^[17-18], Frouin等^[3]对风生成白浪、白泡云、气泡沫的遥感反射率进行了深入的研究。美国北达科他州大学地球系统科学研究所的 Zhang与加拿大海洋局 Lewis等^[18-19]合作,从 1998 年开始对不同水体含气泡船舶尾迹海水的遥感反射率特征进行研究,并开展了相关实验工作。中国的宋金宝等^[20]、毛显谋等^[21]、于定勇等^[22]对海面白泡云对海水光学特性的影响进行了相应的研究。另外,张建生等^[23]、纪延俊等^[24]、王江安等^[25]、刘慧开等^[26]对尾流气泡水下光学特性进行了一系列的研究,主要是为了利用水面以下舰船尾流中气泡与背景海水对光散射的差异来作为鱼雷自导的一种手段。通过分析国内外相关工作可发现,除了 Zhang 等的工作外,在水面以上对船舶含气泡尾迹所进行的光谱测量与分析的试验研究还不多,这对于应用中国本就不多的卫星资源于监测水面船舶十分不利。因此,通过海上试验测量船只含气泡尾迹在二类水体中的海水物理、光学特征,本文探讨了气泡如何影响海水离水辐亮度、归一化离水辐亮度、遥感反射率等光学特征,希望能为星载光学传感器遥感获取船舶尾迹信息提供一些理论参考。

2 船舶产生的气泡

船首波和船尾波都属于 Kelvin尾迹系统,它们破碎后会生成漂浮于水面的气泡^[27],并且,船体与海水的摩擦产生的雾沫也会形成气泡^[13],而绝大部分尾迹中的气泡是由螺旋桨高速运动中所产生的气穴现象所引起的。

虽然, Kelvin尾迹沿着相对于船舶航向 19.5° 的半夹角方向向外辐散,但新产生的气泡则由于尾流水平方向的聚敛作用局限于中心线尾迹里^[14-19]。而中心线尾迹经常伴随有大量持续时间较长的沿着船只航向前进的漩涡^[28],虽然对这些湍流结构如何影响气泡分布构成进行了相关研究,但现场试验表明作为船体运动和螺旋桨旋转的结果,气泡在开始几分钟将显示出一种大致上垂直均匀分布的并会延伸至船底几米的深度^[15]。同时, M V Trevorlow等^[14]还发现尽管表面活性膜尾迹在船后能持续数十公里,但尾迹气泡相对较强的声学散射只持续大约 7.5 m in (船速 10 kn 时尾迹长 2 km 宽 60 m)。

Bush利用声学手段测量一条航速 15 kn (约 $7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)驱逐舰生成的尾迹气泡显示:半径在 80 到 $1000\mu\text{m}$ 之间的气泡浓度约为 $6\times 10^6\text{ m}^{-3}$ ^[13]。基于 Zhang等人在文献[1]中的分析,在 550 nm 波段假定气泡半径都为 $80\mu\text{m}$ 且浓度如上,这时气泡光学后向散射系数最低也在 0.0027 至 0.0097 m^{-1} 之间。而在叶绿素浓度为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的一类水体中,典型微粒的后向散射系数才为 0.0007 m^{-1} ^[29]。如果将更小的气泡计算在内,船尾迹对于散射的贡献会更大,因此,船舶含气泡尾迹能够显著改变海洋上层光学后向散射就显得很清楚了。

3 测量方法

为了研究船只尾迹气泡对离水辐亮度、遥感反射率等海水光学特征的影响,必须测量不同情况下船舶尾迹气泡群的光学特征信息及尾迹气泡区物理特征,同时,通过定量分析含气泡尾迹海水与背景海水光学特征的异同性,为达到利用星载光学传感器监测水面船只的目的提供理论依据。

试验于 2005年 6月在山东近岸海域进行,处于二类水体,天气晴朗,无云,所测量目标船长 103 m 宽为 10.8 m 航速 16 kn (约 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。试验采用水表面以上测量法对船舶含气泡尾迹海水及背景海水的表观光学特征进行测量,使用仪器为 HR2000型高灵敏度微型光纤光谱仪(波段范围: $200\text{—}1100\text{ nm}$;最高分辨率: 0.065 nm FWHM ; FWHM为半峰值全宽度;积分时间: $1\text{ ms—}65\text{ s}$)。

试验过程中,因为离水辐亮度在天顶角 $0\text{—}40^\circ$ 范围内变化不大,所以为避开太阳直射反射和船舶阴影对光场的破坏,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 $90^\circ\leq\phi\leq 135^\circ$ (背向太阳方向),仪器与海面法线方向的夹角为 $30^\circ\leq\theta\leq 45^\circ$ (以上角度都是以光线矢量的走向为依据),这样便可避免绝大部分的太阳直射反射,同时减少船舶阴影的影响^[30],如图 1所示。

根据水色遥感及水体光谱特性相关研究要求,试验测量表观光学特性需要导出离水辐亮度(I_w)、归一化离水辐亮度(I_{wn})、遥感反射率(R_{rs})等基本参数^[30-31]。归一化离水辐亮度为

$$I_{wn} = I_w E_0 / E_d(0^+)$$

式中, $E_0 = 1367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,为太阳常数; $E_d(0^+)$ 为水面入射辐照度。遥感反射率为

$$R_{rs} = I_w / E_d(0^+) = I_{wn} / E_0$$

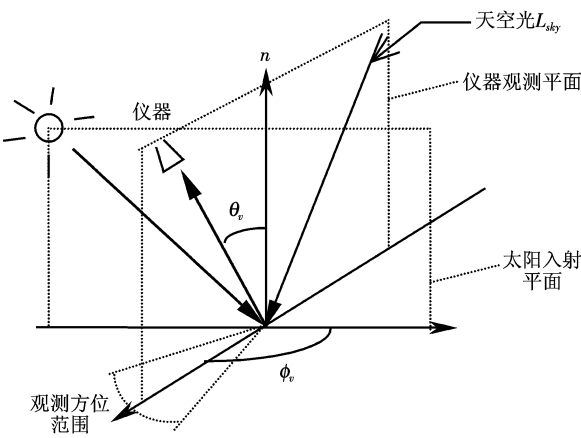


图 1 光谱仪水表面以上测量法观测几何
Fig 1 Viewing geometry of the above-water measured by spectrograph

4 结果与分析

试验共在 4 个观测点进行测量, 每点测量标准板数据 4 组, 天空光数据 2 组, 水体数据 2 组, 每组数据包含 15 条光谱曲线, 且测量时间至少跨越一个波浪周期, 以修正因船只摇摆而导致的误差。相邻观测点时间间隔不超过 20min。其中在无尾迹气泡的背景海域有一个观测点, 距目标船 1 km 的观测点海面有气泡破碎后的白沫, 水中开始出现气泡, 水色已有轻微变化, 距目标船 0.6 km 0.4 km 各 1 个观测点, 后两个观测点海水中尾迹气泡比较明显。以下将以背景, 1 km 0.6 km 及 0.4 km 分别表示相应观测点测量数据。

仪器所测量的水面以上光谱辐亮度信号组成是:

$$I_{av} = I_w + I_{sky} + I_{wc} + I_g \tag{1}$$

式中, I_{av} 是总信号; I_w 是进入水体的光被水体散射回来进入仪器的离水辐亮度; I_{sky} 是天空光在水面反

射以后进入观测仪器的信号; 为气水界面反射率, 取决于太阳位置 (θ_0, ϕ_0) 、观测设置几何 (θ_v, ϕ_v) 、风速风向 (W) 或海面粗糙度等因素, 它的取值现在争议较大, 按 NASA 最新的规范, 在一般情况下 (风速低于 $10 m \cdot s^{-1}$) 应采用 -0.028 左右的反射率值^[32-33], 而在本次试验过程中风速保持在 $5 m \cdot s^{-1}$ 左右, 所以取 0.028 。 I_{wc} 是海面白帽的信号; I_g 是水面波浪对太阳直射光的随机反射。

在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下, 光谱仪测量的水体总信号为 $I_{av} = I_w + I_{sky}$, 由此可得离水辐亮度 $I_w = I_{av} - I_{sky}$ 。

由于遥感反射率越来越多地用于水色遥感反演模型, 获取该参数具有重要的应用价值。按下列公式可进行遥感反射率计算:

$$R_{rs} = [S_w - r_{sky}] \rho_p / \pi S_p \tag{2}$$

式中, S_w , S_{sky} , S_p 分别为光谱仪测量水体、天空和标准板时的信号值。

4.1 含气泡尾迹海水与无气泡背景海水观测数据的比对分析

将背景海水与离目标船 0.4 km 处含气泡尾迹海水两组数据计算出的归一化离水辐亮度 (图 2)、遥感反射率 (图 3) 相比较。在图 2 和图 3 中不难看出, 含气泡海水相对于无气泡背景海水无论是归一化离水辐亮度还是遥感反射率都发生了显著变化, 在尾迹气泡的作用下海水于可见光波段 (400—760 nm) 和近红外波段 (760—1000 nm) 的遥感反射率都得到了显著增强。

在图 4 中可看出, 含气泡尾迹海水相对背景海水的遥感反射率增幅变化不大, 相比较而言, 在红光波段 (620—760 nm) 相对增幅最大; 而通过图 5 的绝对增幅变化曲线可发现, 遥感反射率在绿光波段 (500—560 nm) 绝对增幅最大, 这使得尾迹海水变得更绿。

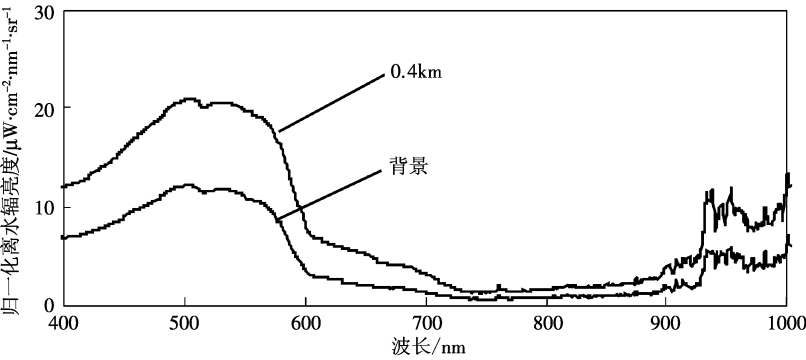


图 2 含气泡尾迹海水与背景海水归一化离水辐亮度曲线图
Fig 2 The normalization water leaving radiance of wake seawater with bubbles and background seawater

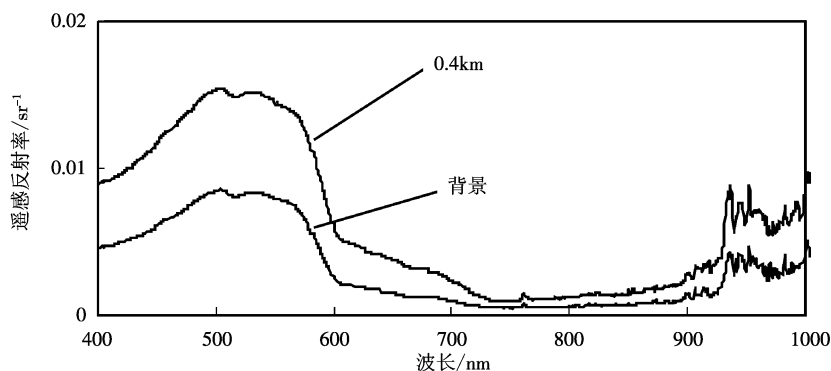


图 3 含气泡尾迹海水与背景海水遥感反射率曲线图

Fig 3 The remote sensing reflectance of wake seawater with bubbles and background seawater

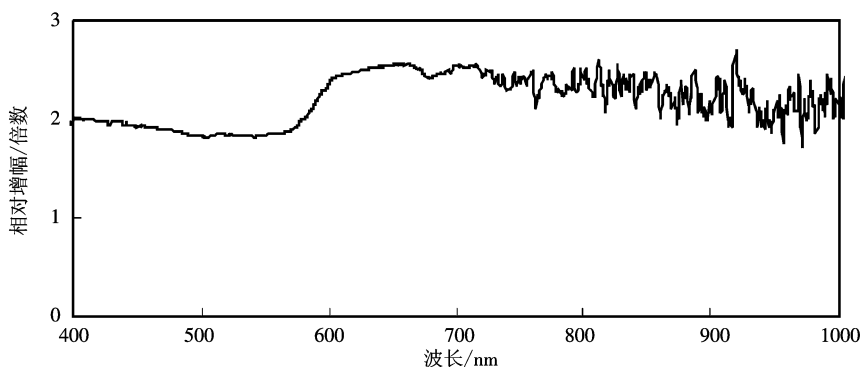


图 4 含气泡尾迹海水相比背景海水遥感反射率相对增幅曲线图

Fig 4 The relative remote sensing reflectance of wake seawater with bubbles relative to background seawater

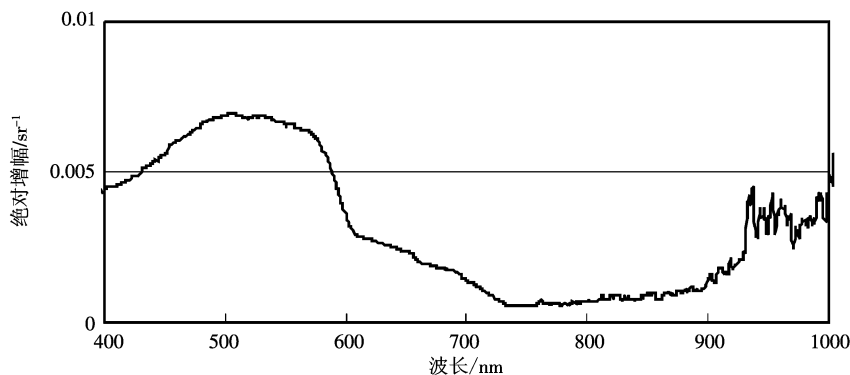


图 5 含气泡尾迹海水相比背景海水遥感反射率绝对增幅曲线图

Fig 5 The absolute remote sensing reflectance of wake seawater with bubbles relative to background seawater

同时,通过蓝-绿波段遥感反射率比率关系式可以近似地表示水色的估计值: $\rho_{440-550} = \{ [R_{rs}(440)] / [R_{rs}(550)] \}$ 。试验中, $\rho_{440-550}$ 从背景海水的 0.71 增加到含气泡尾迹海水的 0.84, 水色有了一定的变化。

4.2 尾迹不同位置观测数据的比对分析

由于含气泡尾迹光谱特征在横向变化不大,所以本文只对尾迹纵向的光谱变化进行分析。图 6 列出了背景及含气泡尾迹纵向不同位置海水的遥感反

射率,经比对分析可以发现:随着离目标船越远,含尾迹气泡群海水的遥感反射率持续减弱,这一现象对应的是气泡浓度的持续降低。

5 讨 论

现今国内外在轨运行的星载光学传感器(例如中巴资源 1 2 号星的 CCD 相机、法国 SPOT 系列卫星的 HRG 相机、美国 TERRA 卫星的 ASTER 辐射计、QuickBird 以及 KONOS 卫星的光学传感器)辐射分

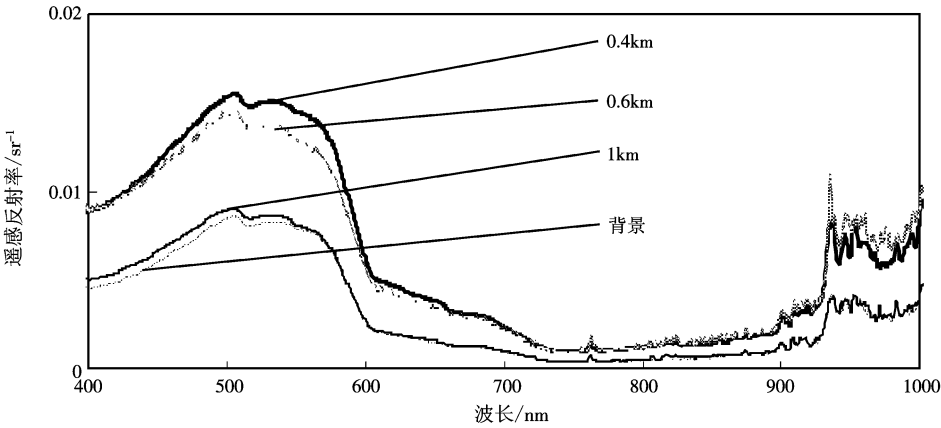


图 6 尾迹中不同位置的海水遥感反射率比较

Fig 6 Remote sensing reflectance of seawater at different distances in the wake

分辨率普遍较高,以 ASTER 的可见光、近红外波段辐射计为例:其波段划分为波段 1(520—600 nm)、波段 2(630—690 nm)、波段 3(760—860 nm),空间分辨率为 15 m,量化等级 8 bits,辐射分辨率优于 0.5%,绝对辐射精度为 $\pm 4\%$ [33]。通过与试验现场观测数据分析

结果相比较,如图 7 所示,对比 ASTER 辐射计的辐射分辨率与 0.4 km 尾迹遥感反射率在相应波段的均值可以看出:虽然在波段 2、3 遥感反射率过低,不能被分辨出来,但在波段 1 遥感反射率大大超过所需的辐射分辨率,能够分离出尾迹信息。

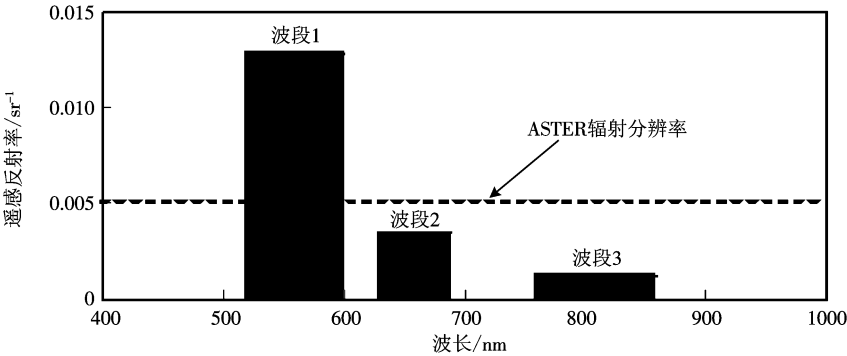


图 7 含气泡尾迹海水遥感反射率与 ASTER 辐射分辨率比较

Fig 7 Contrast between the remote sensing reflectance of wake seawater with bubbles and the radiance resolution of ASTER

试验过程中,风速约为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,海况条件良好,海面粗糙度对观测的影响还没有完全显现出来,今后的试验还需在其他风场、海况条件下继续进行,以充分分析海洋环境对于含气泡尾迹海水光谱后向散射特征的影响。同时,对于不同大小不同航速的船只尾迹还需达成更多的测量,并同步结合卫星遥感信息,以利于总结尾迹区域海水相对于背景海水的光谱特征变化规律,来最终达到利用星载光学传感器大范围监测、识别船舶的目的。

6 结 论

通过分析试验观测数据最终得出以下结论:

- (1) 二类水体中,在可见光(400—760 nm)、近红外波段(760—1000 nm),现场观测海水表观光学特征值显示舰船尾迹气泡不仅在幅度上而且在谱形上改变海水离水辐亮度与遥感反射率。
- (2) 含气泡尾迹海水相对背景海水的遥感反射率增幅变化不大,相比较而言,在红光波段(620—760 nm)相对增幅最大;而通过绝对增幅变化曲线可发现遥感反射率在绿光波段(500—560 nm)绝对增幅最大,这使得尾迹海水变得更绿。但是,由于二类水体中的其他悬浮颗粒浓度很高,增强了后向散射,气泡所引起的水色变化没有想像中明显,相比较而言,海水愈混浊,船舶尾迹在海水中引起的水色变化愈不明显。

(3)在试验中发现目标船含气泡尾迹长度超过 1 km 宽度约 40 m 随着与目标船距离的缩短,尾迹中气泡密度不断增大,反射率也随之增强。试验过程中对另一条船也进行了观测,其航速与前一艘船相当,但吨位比前者大约多 2000 t 虽然受试验条件限制,只进行了目视观测,但发现其含气泡尾迹的长、宽度等物理特征明显比前者要大。因此,可以认为如果船只吨位更大、航速更快,螺旋桨能够生成更多的气泡,并且由于螺旋桨处于离水面更深的位置,气泡上浮到水表面时间更长,尾迹中气泡将能持续更长时间,含气泡尾迹所引起的表观光学特性变化也将更加明显并且持续时间也将更长。

(4)图 7 的比较分析表明,在光学传感器的不同波段反映的含气泡尾迹信息有所不同,但随着现代光学传感器的辐射分辨率、空间分辨率(QuickBird 以及 KONOS 卫星的光学传感器量化等级达到 11 bits 空间分辨率分别为 0.6 m, 1 m)不断提高,尾迹气泡所引起的海水光谱变化值将更容易被提取出来。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhang X D, Lewis M R, Johnson B D. Influence of Bubbles on Scattering of Light in The Ocean[J]. *Applied Optics* 1998 **37**(27): 6525—6536.
- [2] Dariusz S, Emmanuel B, Darek B, et al. The Role of Seawater Constituents in Light Backscattering in the Ocean[J]. *Progress in Oceanography* 2004 **61**: 27—56.
- [3] Frouin R, Schwendling M, Deschamps P Y. Spectral Reflectance of Sea Foam in The Visible and Near Infrared. In Situ Measurements and Remote Sensing Implications[J]. *Journal of Geophysical Research* 1996 **101**(C6): 14361—14371.
- [4] Pelzer R D, Griffin O M, Barger W R, et al. High-resolution Measurement of Surface active Film Redistribution in Ship Wakes[J]. *Journal of Geophysical Research* 1992 **97**(C4): 5231—5252.
- [5] Zhang X D, Lewis M R, Lee M, et al. The Volume Scattering Function of Natural Bubble Populations[J]. *Limnol. Oceanogr.* 2002 **47**(5): 1273—1282.
- [6] Lyden J D, Hammond R R, Lyzena D R, et al. Synthetic Aperture Radar Imaging of Surface Ship Wakes[J]. *Journal of Geophysical Research* 1988 **93**(C10): 12293—12303.
- [7] Zhang Y, Zhang Y G, Huang W G. The Technique Researching for Ship and Ship Wake Detection Using Spaceborne SAR Images[J]. *Remote Sensing Technology and Application* 2003 **18**(1): 31—35. [张宇, 张永刚, 黄伟良. 星载 SAR 船舶及尾迹探测技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 2003 **18**(1): 31—35.]
- [8] Staples G C, Martenson D, Nazarenko D. High Seas Ship Surveillance Via RADARSAT[J]. *Sea Technology* 1995 **11**: 59—62.
- [9] Jiang Q S, Ainsouri E, Wang S R. Automatic Detection for Ship Target in SAR Imagery Using PNN model[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing* 2000 **26**(4): 297—305.
- [10] CoPe and A C, Ravichandran G, Trivedi M. Localized Radon Transform-Based Detection of Ship Wakes in SAR Images[J]. *IEEE Transaction on Geos and Res* 1995 **33**(1): 35—45.
- [11] Liu C L, Wang J A, Jiang C F. The Infrared Image Enhancement Study of the Thermal Wake of Ship[J]. *Laser and Infrared* 2006 **36**(5): 413—416. [柳超龙, 王江安, 江传富. 舰船热迹红外图像增强研究[J]. *激光与红外*, 2006 **36**(5): 413—416.]
- [12] Guo Y, Wang J A, He Y Z. Study of Detecting Thermal Track of Submarines by Infrared Image[J]. *Journal of Naval University of Engineering* 2002 **14**(3): 89—92. [国妍, 王江安, 何英. 红外热像水面寻迹探测的理论分析[J]. *海军工程大学学报*, 2002 **14**(3): 89—92.]
- [13] Bush V, Conant J, Tate J T. The Physics of Sound in the Sea. Summary Technical Report of Division 6[M]. Washington D C: US Government Printing Office 1946.
- [14] Trevornov M V, Vagle S, Farmer D M. Acoustical Measurements of Microbubbles Within Ship Wakes[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* 1994 **95**: 1922—1930.
- [15] Ezeriskii A B, Sandler B M, Selivanovskii D A. Echoringing Observations of Gas Bubbles Near the Sea Surface[J]. *Sov. Phys. Acoust.* 1989 **35**: 483—485.
- [16] Koepke P. Effective Reflectance of Oceanic Whitecaps[J]. *Applied Optics* 1984 **23**: 1816—1824.
- [17] Moore K D, Voss K J, Gordon H R. Spectral Reflectance of Whitecaps: Instrumentation, Calibration and Performance in Coastal Waters[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 1998 **15**: 496—509.
- [18] Moore K D, Voss K J, Gordon H R. Spectral Reflectance of Whitecaps: Their Contribution to Water-leaving Radiance[J]. *Journal of Geophysical Research* 2000 **105**(C3): 6493—6499.
- [19] Zhang X D, Lewis M R. Optical Influence of Ship Wakes[J]. *Applied Optics* 2004 **43**(15): 3122—3132.
- [20] Song J B, Wu K J, Xu D L, et al. Calculation of Probability Distribution of Nonlinear Ocean Wave Surface Slope and White Cap Coverage[J]. *Acta Oceanologica Sinica* 1997 **19**(6): 21—26. [宋金宝, 吴克俭, 徐德伦等. 非线性海浪波面斜率的概率分布和白浪覆盖率的计算[J]. *海洋学报*, 1997 **19**(6): 21—26.]
- [21] Mao X M, Huang W G, Lou X L, et al. Review of and Advances in Study of Whitecaps and Bubble Clouds Affecting the Ocean Optical Remote Sensing[J]. *Advances in Marine Science* 2005 **23**(4): 536—542. [毛显谋, 黄伟良, 楼秀琳等. 影响海洋光学遥感的海面白泡云研究回顾及进展[J]. *海洋科学进展*, 2005 **23**(4): 536—542.]
- [22] Yu D Y, Xu D L, Lu H M. A Study on Oceanic Whitecap Coverage Model[J]. *Oceanologia ET Limnologia Sinica* 1998 **29**(5): 494—500. [于定勇, 徐德伦, 吕红民. 海洋白浪覆盖

- 率模式的研究[J. 海洋与湖泊, 1998 29(5): 494—500.]
- [23] Zhang J S, Liu J K, Ji B J, et al. Optical Spectral of Real Wakes[J. Acta Photonica Sinica 2002 31(10): 1284—1288. [张建生, 刘建康, 冀邦杰等. 真实尾迹的光学特性[J. 光子学报, 2002 31(10): 1284—1288.]
- [24] Ji Y J, Ma X, He J H, et al. The Influence of Bubble on the Transmitting of Light in Wake[J. Acta Photonica Sinica 2004 33(5): 626—628. [纪延俊, 马祥, 何俊华等. 尾流中气泡对光传播的影响[J. 光子学报, 2004 33(5): 626—628.]
- [25] Wang J A, Zong S G, Ma Z G. Study on Polarization Compressing of Laser Detecting of Ship Air Bubble[J. Laser and Infrared 2003 33(3): 172—175. [王安, 宗思光, 马治国. 舰船尾流气泡激光回波偏振压缩探测技术研究[J. 激光与红外, 2003 33(3): 172—175.]
- [26] Liu H K, Yang L, Shen L W. The Laser Scattering Properties of the Ship Wakes[J. Laser and Infrared 2003 33(4): 265—267. [刘慧开, 杨立, 沈良文. 舰船尾流的激光散射特性[J. 激光与红外, 2003 33(4): 265—267.]
- [27] Morel A, Prieur L. Analysis of Variations in Ocean Color[J. Limnology and Oceanography 1977 22(4): 709—722.
- [28] Lian Sheng, Chong Zhang, Dick K P Yue. Free surface Turbulent Wake Behind Towed Ship Models: Experimental Measurements, Stability Analyses and Direct Numerical Simulation[J. J. Fluid Mech. 2002 469: 89—120.
- [29] Morel A, Marjorena S. Bio-Optical Properties of Oceanic Waters: A Reappraisal[J. J. Geophys. Res. 2001 106(C4): 7163—7180.
- [30] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, et al. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: Above-Water Method[J. Journal of Remote Sensing 2004 8(1): 37—44. [唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J. 遥感学报, 2004 8(1): 37—44.]
- [31] Lee Z, Carder K L, Steward R G, et al. Remote sensing Reflectance and Inherent Optical Properties of Oceanic Waters Derived from Above-water Measurements[C]. Proceedings of SPIE 1996 2963: 160—166.
- [32] Mobley C D. Estimation of the Remote Sensing Reflectance from Above-surface Measurements[J. Applied Optics 1999 38: 7442—7455.
- [33] Zhang W L, Liu D C. Developing Status of Satellite Remote Sensing and Its Application[J. World Nuclear Geoscience 2005 22(1): 55—57. [张万良, 刘德长. 卫星遥感及其应用的发展态势[J. 世界核地质科学, 2005 22(1): 55—57.]

Measurement and Analysis of Seawater AOPs of Ship Wakes with Bubbles in Case-II Waters

ZHANG Yu, ZHANG Yong-gang, WANG Hua, ZHANG Xu

(Department of Military Oceanography, Dalian Navy Academy, Liaoning Dalian 116018, China)

Abstract: Ship wake's properties (e.g. microwave property, thermal infrared property, acoustic property, underwater optical scattering property of wake bubbles) have been extensively studied to monitor surface ship through the ages. However, there were few researches on above-water spectral features of ship wake, especially features with submerged bubbles. With the increase of the resolution of spaceborne optical sensor, measurement for ship wakes by optical remote sensing is feasible. The physical features and Apparent Optical Properties (AOPs) of ship wakes with bubbles was measured in situ, and how bubbles would affect AOPs of seawater in Case-II waters, such as normalized water leaving radiance and remote sensing reflectance, were analyzed in quantity. By comparing remote sensing reflectance of wake seawater containing bubbles with radiance resolution of ASTER VNR radiometer, we can find that it is feasible to detect ship wakes containing bubbles by spaceborne optical sensors. In this paper, the main research domestic and abroad was introduced systematically. In accordance with the phenomenon in experiment of optical properties of sea water caused by bubbles, the influence of bubbles in wakes on optical properties caused by varieties of water bodies and environment (e.g. solar altitude angle, wind speed and cloud cover), and quantificational evaluation of validity of wakes with bubbles based on satellite optical sensor were investigated. These works may provide some theoretical foundations for capturing the information of ship wakes from spaceborne optical sensors. Observations prove that ship wakes with bubbles can change AOPs of seawater in both the magnitude or spectral shape over the visible and infrared wave bands, and the color of water becomes greener because of wakes bubbles. And the bubbles' concentration and reflectance increased with the distance from the observation position in wake to the target ship getting shorter. During the experiments, we found that the length of target ship wakes with bubbles exceeded 1 km, and the width was about 40 m. The concentration of bubbles in wakes

became higher as the distance between observation point and target ship shortened. Therefore the reflectance also enhanced. We observed another ship whose speed equalled to the target ship and tonnage was 2000 t heavier than the target ship. Although we only took visual observation because of the limited experiment condition, we found that the length and width of its wake with bubbles were greater than that of target ship, therefore we believe that the screw propeller can generate more bubbles as ship is heavier and faster. And the bubbles in wake are able to last a longer time when the screw propeller is located in deeper water and the time interval of bubbles rising to surface is longer. The changing of AOPs caused by the wake with bubbles will be much more distinct and last a longer time. At the same time, in Case II waters, the variations of seawater AOPs caused by the introduction of bubbles were not very clearly because the high concentration of suspended particles may increase the backscattering. In comparison, the variation of water color affected by ship wakes weakened when water was more turbid. Although the information of wake with bubbles obtained by optical sensor varied with wave bands, the variance of seawater spectrum caused by wake bubbles can be extracted more easily with the improvement of the radiance and spatial resolution of modern optical sensor (the quantification grade of optical sensors carried by QuickBird and KONOS arrive at 11 bits, and the spatial resolution is 0.6 m, 1 m respectively). Wind speed was less than $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the sea condition was good when we took experiments. The effect of the roughness of sea surface on experiment did not completely emerge. In order to fully analyze how marine environment affects AOPs of wake seawater with bubbles, more experiments are needed in other wind speed and sea condition. Meanwhile, we need to take more experiments to measure vessels of different size and speed. We wish to summarize the rules of AOPs of wake seawater comparing with background seawater by means of combining satellite remote sensing information with experiment data. Finally, we may achieve our goals of monitoring and identifying ships in large scale sea area by using spaceborne optical sensor.

Key words: ship wake; bubbles; Case II waters; AOPs