

溢油海水双向反射分布函数的建模及仿真*

孙兰君 田兆硕 任秀云[†] 张延超 付石友[‡]

(哈尔滨工业大学(威海), 信息与光电子研究所, 威海 264209)

(2014年1月14日收到; 2014年2月10日收到修改稿)

溢油海水双向反射分布函数(BRDF)研究可为海水表面油膜及海水中溢油乳浊液检测提供理论基础,对保护海洋周边环境及海洋生态平衡具有重要的意义. 本文基于蒙特卡罗方法及Mie散射理论建立了溢油海水模型, 针对532 nm及355 nm激光研究了无溢油海水、漂浮油膜海水及乳浊液海水情况下海水的BRDF, 并给出不同油膜厚度及溢油浓度下海水的BRDF. 结果表明双向反射分布函数对水体的污染程度十分敏感, 相同观测角下, 溢油海水BRDF值明显小于无溢油海水BRDF值, 海水的BRDF值随油膜厚度及溢油浓度的增加而减小. 海水的BRDF值可作为海水是否发生溢油污染及污染程度判断依据之一.

关键词: 溢油海水, BRDF, 蒙特卡罗, Mie 散射

PACS: 42.88.+h, 92.20.Ny, 02.70.Uu, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.63.134211

1 引言

近年来海上溢油事故频发, 致使水体受到污染. 快速检测溢油污染海域、分析溢油污染程度、监测溢油动向对保护海洋周边环境及海洋生态平衡具有重要的意义. 原油或成品油在海上被释放后迅速扩散, 形成油膜漂浮于海面上. 随着时间的迁移, 由于海上风浪、光照、生物降解等作用, 油膜与海水相互作用后形成乳浊液分散于大量的海水之中^[1,2]. 卫星遥感技术可以较为容易地快速大面积检测海水表面油污^[3], 而分散于海水中的油乳浊液检测通常需采取水样或将测量装置浸入海水中, 才能获取有限的溢油位置信息. 激光雷达遥感是一种主动遥感技术, 具有受背景、天气因素影响小, 可全天时全天候作业的优点. 利用机载激光雷达进行溢油检测可实现溢油种类鉴别及污染源位置判断, 是卫星遥感溢油探测的有力补充^[4]. 油膜与油乳浊液的光学性质截然不同导致激光在海水中的传输特性存在明显差异, 从而可提供更全面的溢油信

息^[5]. 可见光或紫外线不仅可穿透油膜入射至海水当中, 也可以在含有乳浊液的海水中自由传播, 因此采用可见光或紫外线的机载激光雷达可以实现海上油膜与海水中油乳浊液的遥感检测.

双向反射分布函数(BRDF)通过描述目标表面的上行光场分布特性表征目标表面的光学特性. 随着激光遥感技术的发展, 人们对众多目标的BRDF理论和实验研究越发深入^[6-8]. 目前人们对BRDF研究已经扩展到海洋遥感领域, Gordon和Morel等已对海洋离水辐照度进行了一系列的研究得到了颇有价值的理论结果^[9-12]. 研究溢油海水BRDF可以表征光在溢油海水的传输特性, 对溢油污染海域的检测及监测具有重要意义. 溢油海水BRDF理论模型的建立及仿真研究可以为溢油检测提供理论基础. 本文基于蒙特卡罗方法和Mie散射理论建立了溢油海水模型, 分别研究了海洋激光遥感常用的两种波长532 nm及355 nm激光入射无溢油海水、漂浮油膜海水及乳浊液海水情况下海水的BRDF, 并给出不同油膜厚度及溢油浓度下

* 国家自然科学基金(批准号: 41306092)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2013DQ026)和山东省科技发展计划项目(批准号: 2011GHY11514)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: renxiuyun_78@163.com

[‡] 通讯作者. E-mail: fsytzs@126.com

的双向反射分布函数. 研究表明: 相同观测角下溢油海水 BRDF 值明显小于无溢油海水 BRDF, 溢油海水 BRDF 值随时间迁移先减小后增大. 研究结果可为基于海水 BRDF 的溢油污染检测提供理论指导.

2 溢油海水双向反射分布函数

2.1 双向反射分布函数

双向反射分布函数 (BRDF) 可通过描述目标的上行光场分布特性表征目标的光学特性, 它是入射波长, 入射天顶角, 入射方位角, 反射天顶角, 反射方位角的函数, 可以用来表征不同表面的光辐射特性. BRDF 数学表达式为

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

其中 θ_i, ϕ_i 分别为入射方向的天顶角和方位角; θ_r, φ_r 分别为出射方向的天顶角和方位角; L_r 为出射方向上的离水辐亮度; E_i 为入射到海水表面的辐照度. BRDF 的几何示意图如图 1 所示. BRDF 表示出射方向 (θ_r, φ_r) 的辐亮度 $dL_r(\theta_r, \varphi_r)$ 与入射方向 (θ_i, ϕ_i) 的辐照度 $dE_i(\theta_i, \phi_i)$ 之比.

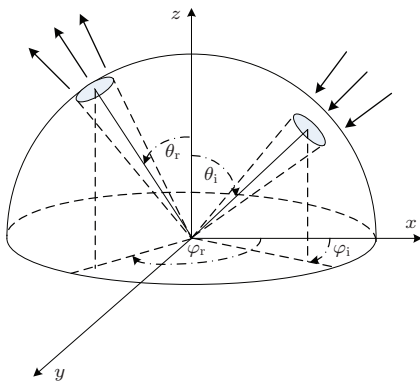


图 1 BRDF 几何示意图

2.2 溢油海水模型建立

蒙特卡罗方法可以建立单个光子在溢油海水中的传输模型, 通过统计大量光子的运动轨迹模拟可得溢油海水的双向反射分布函数. 单个光子运动步长及方向随机, 运动过程中可能发生的概率事件包括表面反射, 折射, 海水分子及其他粒子的散射和吸收. 这些事件发生的概率可以通过海水及溢油的吸收系数、散射系数和体散射相函数来确定. 通

过统计大量光子在溢油海水中的传输行为, 得到溢油海水的 BRDF.

当原油或成品油在海上被释放后迅速扩散, 形成油膜漂浮在海水表面, 随着时间迁移及风浪的作用, 油膜与海水相互作用导致溢油乳化, 乳化过程中油和水形成乳浊液悬浮于大量的海水之中. 根据 Cormack 测量结果, 水下 15 m 的水体会会有不同程度的污染^[13], 可将海水分层考虑. 海表漂浮厚度为 5 μm 的油膜形成的油水乳浊液在不同深度的水体中的浓度如图 2 所示, 污染水体的浓度随时间迁移减小. 图 2(a) 中短时间污染水体的浓度随海水深度增加油浓度从 1.88 ppm 变为 0.08 ppm, 15 m 以下的海水几乎无溢油污染. 图 2(b) 中长时间污染水体 2 m 以内溢油浓度为 0.59 ppm, 而 2 m 以下水体则几乎无溢油污染. 因考虑激光在海水中传输衰减作用, 本文的溢油海水模型海水深度从海表到海下 300 m.

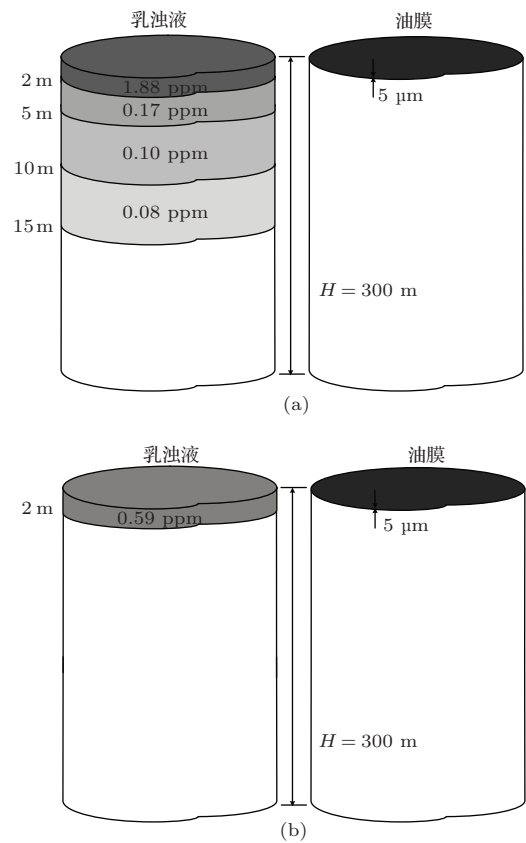


图 2 污染水体模型 (a) 短时间; (b) 长时间

当海水表面漂浮的油膜时, 溢油海水的光学性质主要取决于油的吸收系数及油膜厚度. 而油乳浊液悬浮于海水中时, 溢油海水的光学性质主要取决于吸收系数、散射系数及体散射相函数. 无溢油

海水的吸收系数 a_w , 散射系数 b_w , 体散射相函数 β_w ; 油膜的吸收系数为 a_f ; 油乳浊液的吸收系数 a_o , 散射系数 b_o , 体散射相函数 β_o . 海水的体散射相函数 β_w 采用由 Petzold 测量的海水体散射相函数. 分散于海水中油乳浊液的散射相函数 β_o 可以根据 Mie 散射理论计算得出^[14]. 含有乳浊液海水的体散射相函数 β 可由 β_w 和 β_o 得出, 如下式所示:

$$\beta = \frac{b_w}{b} \beta_w + \frac{b_o}{b} \beta_o, \quad (2)$$

其中 b 为溢油海水总的散射系数. 图 3 中三条曲线分别为 Petzold 测量的海水散射相函数、532 nm 和 355 nm 激光入射乳浊液海水的体散射相函数.

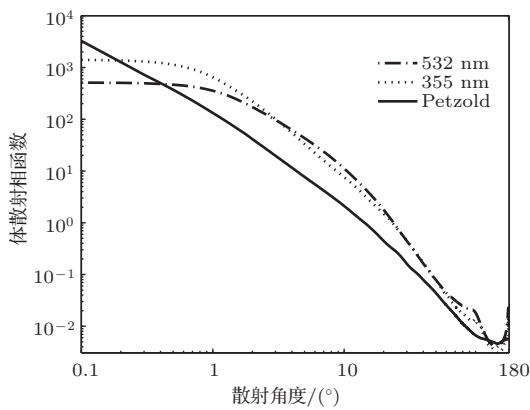


图 3 海水的散射相函数

3 模拟结果

基于上述模型, 分别模拟了 355 nm 紫外激光及 532 nm 绿光入射无溢油的海水、漂浮油膜的海水、存在油乳浊液的浑浊海水的 BRDF. 模型建立的两个基本条件为: 气水界面水平; 海水中无其他光源. 模拟中入射天顶角为 45° , 方位角为 180° . 由于海水表面的镜面反射造成镜面方向的 BRDF 值远大于来自海水体内部散射的 BRDF 值, 为突出其他方向的辐射信息模拟结果均为去除镜面辐射的 BRDF. 图 4 和图 5 分别为 532 nm 和 355 nm 激光入射到无溢油海水、漂浮油膜海水、油乳浊液海水的 BRDF. 由于海水中杂质的后向散射较强, 海水 BRDF 呈现出激光发射方向有一峰值. 在相同观测角下, 溢油海水 BRDF 与无溢油海水 BRDF 存在明显差异, 乳浊液海水的 BRDF 值小于无溢油海水 BRDF 而大于漂浮油膜海水的 BRDF. 图 4 和

图 5 对比可以看出, 532 nm 激光入射海水的 BRDF 值高于 355 nm 激光入射海水的 BRDF, 这是由于海水及油对短波激光吸收大造成的. 因此漂浮海水表面的油膜厚度太大时, 紫外激光遥感测油效果会受到一定的限制.

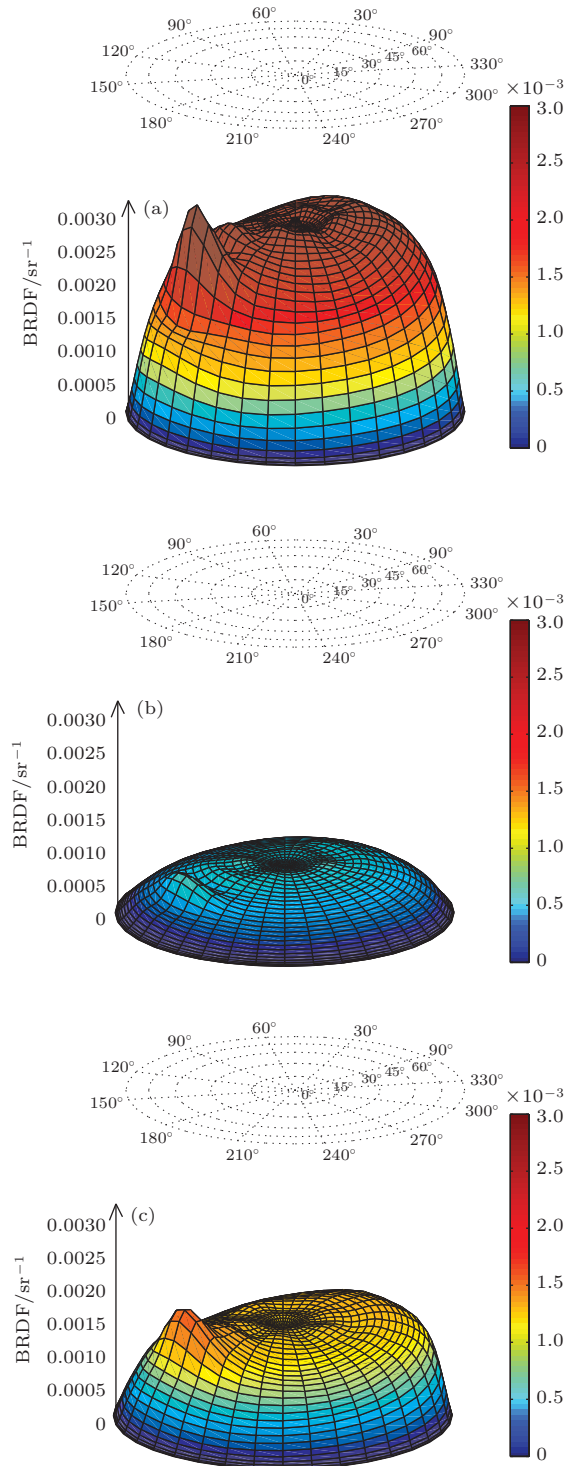


图 4 (网刊彩色) 532 nm 激光入射海水的 BRDF (a) 无溢油海水; (b) 漂浮油膜海水; (c) 乳浊液海水

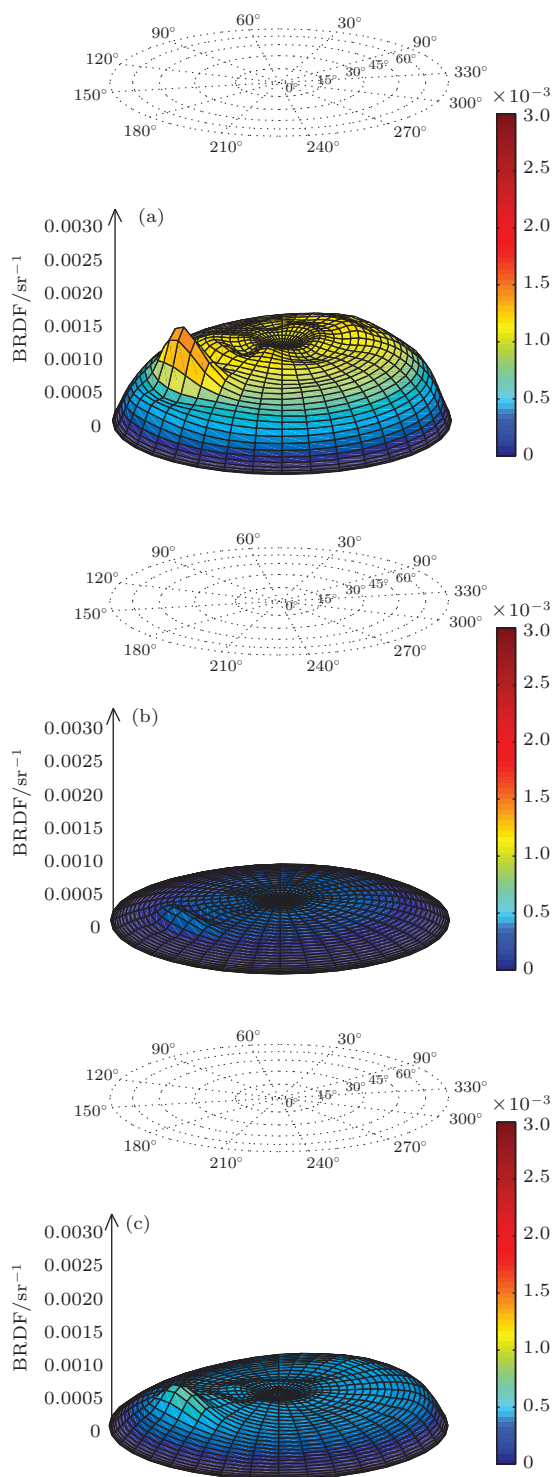


图5 (网刊彩色) 355 nm 激光入射海水的 BRDF (a) 无溢油海水; (b) 漂浮油膜海水; (c) 乳液海水

漂浮在海面上的油膜不断扩散逐渐变薄, 随之油膜海水的 BRDF 也将发生变化. 图 6 为漂浮不同厚度油膜海水的 BRDF 模拟结果. 图 6 (a), (b) 分别为 532 nm 和 355 nm 模拟结果. 相比较 532 nm 的模拟结果, 355 nm 激光入射时后向散射峰更为

明显. 相同观测角下, 海水表面存在油膜时海水的 BRDF 值小于无溢油海水的 BRDF, 随着油膜厚度的增加, 海水的 BRDF 逐渐减小. 因此当海表有溢油污染时, 海水的 BRDF 值迅速减小, 而随着油膜的扩散变薄的过程中海水的 BRDF 值逐渐增加.

海水中的油乳浊液随着时间增加其浓度逐渐减小, 随之溢油海水的 BRDF 也将发生变化. 图 7 为乳浊液不同浓度下海水的 BRDF 模拟结果. 图 7 (a), (b) 分别为 532 nm 和 355 nm 模拟结果. 计算中短时间污染水体乳浊液浓度如图 2 (a) 所示, 而长时间污染水体乳浊液浓度如图 2 (b) 所示. 由图 7 中的模拟结果可以看出 355 nm 激光入射时后向散射峰同样比 532 nm 激光入射时明显. 相同观测角下, 海水中存在油乳浊液时, 海水的 BRDF 值小于无溢油海水的 BRDF, 乳浊液浓度越大, 海水 BRDF 值越低. 因此乳浊液污染水体随时间迁移其 BRDF 值逐渐增加.

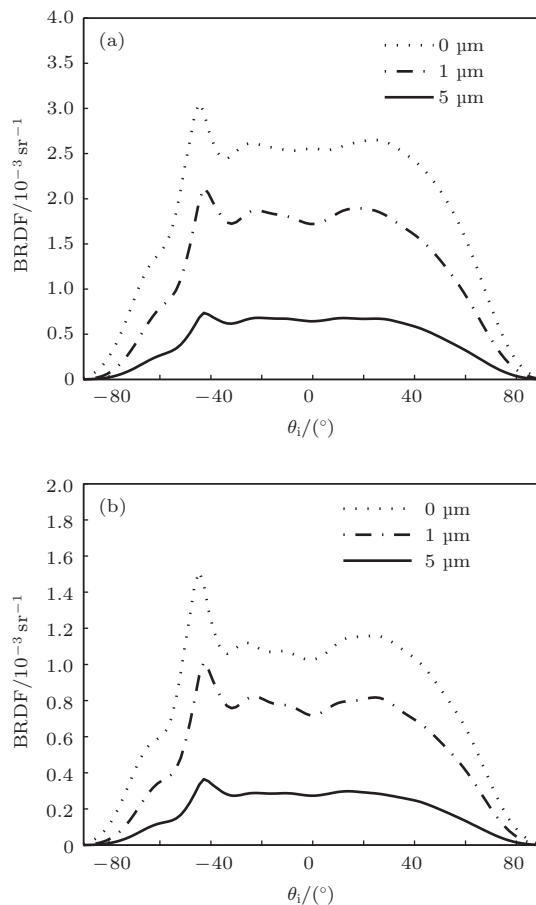


图6 不同油膜厚度海水表面 BRDF (a) 532 nm 激光入射; (b) 355 nm 激光入射

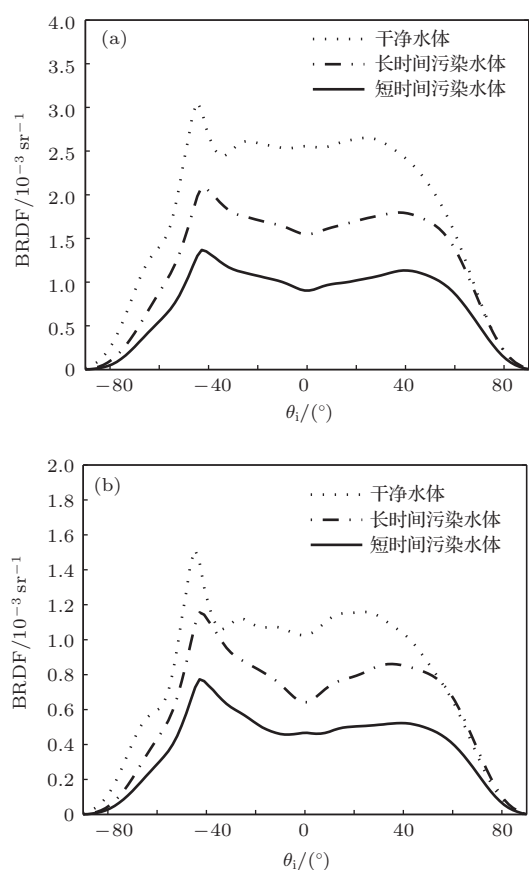


图7 不同乳浊液浓度海水表面BRDF (a) 532 nm 激光入射; (b) 355 nm 激光入射

上述结果表明当海水没有受到污染时,海水的BRDF值较大,一旦受到溢油污染,短时间内形成油膜至使海水的BRDF值迅速变小,油膜扩散变薄过程中海水的BRDF逐渐增加.油膜与海水相互作用后形成乳浊液悬浮于大量海水之中,随着时间迁移溢油浓度变小的过程中海水BRDF值增加.溢油海水BRDF值随时间迁移先减小后增大.

4 结 论

本文基于蒙特卡罗方法和Mie散射理论建立了溢油海水的双向反射分布函数模型.通过模

拟355 nm和532 nm激光在溢油海水中的传输过程,分别得到无溢油海水,漂浮油膜海水及油乳浊液海水的BRDF.结果表明,溢油海水BRDF值随时间迁移先减小后增大.油膜存在时海水BRDF小于无溢油海水BRDF,随着油膜厚度的增加海水BRDF减小.油乳浊液海水的BRDF同样小于无溢油海水的BRDF,随着溢油浓度的增加海水BRDF减小.因此双向反射分布函数对水体的污染程度十分敏感,可通过海水的BRDF值判断海水是否发生溢油污染及污染程度.溢油海水双向反射分布函数模型的建立可为海洋激光遥感测油提供理论基础.

参考文献

- [1] Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, Eliza B, Clark R 2012 *Remote. Sens. Environ.* **124** 185
- [2] Sørensen L, Melbye A G, Booth A M 2014 *Mar. Pollut. Bull.* **78** 146
- [3] Brekke C, Solberg A H 2005 *Remote. Sens. Environ.* **95** 1
- [4] Jha M N, Levy J, Gao Y 2008 *Sensors. Basel.* **8** 236
- [5] Otremba Z 2007 *Opt. Express.* **15** 8592
- [6] Zhao Z Y, Qi C, Dai J M 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 168
- [7] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2097 (in Chinese)[袁艳, 孙成明, 张修宝 2010 物理学报 **59** 2097]
- [8] Zhang J C, Xiong L M, Fang M, He H B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044201
- [9] Gordon H R 2005 *Appl. Opt.* **44** 241
- [10] Morel A, Antoine D, Gentili B 2002 *Appl. Opt.* **41** 6289
- [11] Morel A, Gentili B, Claustre H, Babin M, Bricaud A 2007 *Limnol. Oceanogr.* **52** 217
- [12] Gleason A C, Voss K J, Gordon H R, Twardowski M, Sullivan J 2012 *Opt. Express.* **20** 7630
- [13] Cormack D, Nichols J A 1977 *International Oil Spill Conference* Washington, USA, March, 1977 p381
- [14] Wang H H, Sun X M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054204

Modeling the bidirectional reflectance distribution function of seawater with spilt oil*

Sun Lan-Jun Tian Zhao-Shuo Ren Xiu-Yun[†] Zhang Yan-Chao Fu Shi-You[‡]

(Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 14 January 2014; revised manuscript received 10 February 2014)

Abstract

Study on the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater with spilt oil will provide a theoretical basis for detection of oil film on sea surface and oil emulsion in sea water, which will be of great significance for protection of marine environment and marine ecological balance. In this paper a model of BRDF for oil-polluted seawater has been developed by applying Monte Carlo method and Mie scattering theory. The BRDFs of clean seawater, oil-covered seawater, and oil-emulsion seawater are investigated at wavelengths of 532 nm and 355 nm. Simulation results of different film thicknesses and oil emulsion concentrations are presented. Results show that the BRDF is rather sensitive to the degree of pollution in seawater. The presence of oil film or oil emulsion will cause a decrease of the BRDF. At the same angles of observation, the BRDF value of seawater decreases with the increase of oil film thickness and oil emulsion concentration. Oil spill detecting and monitoring can potentially be achieved using BRDF data from optical sensors.

Keywords: oil spill, BRDF, Monte Carlo, Mie scattering

PACS: 42.88.+h, 92.20.Ny, 02.70.Uu, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.63.134211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41306092), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2013DQ026), and the Science and Technology Development Projects of Shandong Province, China (Grant No. 2011GHY11514).

[†] Corresponding author. E-mail: renxiuyun_78@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: fsytzs@126.com