

## 水中油对水体上行辐亮度光谱的影响

杨俊杰<sup>1</sup>, 黄妙芬<sup>2\*</sup>, 骆蔚健<sup>3</sup>, 王忠林<sup>2</sup>, 邢旭峰<sup>2</sup>

1. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088
2. 广东海洋大学数学与计算机学院, 广东 湛江 524088
3. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088

**摘要** 目前, 学者主要关注利用遥感技术探测海面油膜。然而, 经海洋物理过程或人为喷洒化学分散剂处理形成的水中油对海洋生境也具有危害作用。水体上行辐亮度是水色传感器的重要信号源, 通过分析含油水体的上行辐亮度光谱特征, 探索快速有效地遥测水中油的方法对保护海洋生境具有重要意义。基于大连港海域现场实测数据及 Hydrolight 模拟含油水体水下光场, 通过分析上行辐亮度随波长、水深及太阳天顶角的变化特征, 剖析水中油对上行辐亮度光谱的影响及水中油的敏感光谱特性。结果表明水中油的主要光谱响应区间位于可见光波段(380~760 nm)。随着水中油浓度的增加, 上行辐亮度光谱峰值有逐渐向长波方向移动及蓝光波段辐亮度量值逐渐降低的趋势, 这些变化处于水色遥感的探测光谱范畴, 为利用水色遥感技术探测水中油提供了光谱依据。其次, 上行辐亮度随水深逐级递减, 并在接近水体下界面不降反升的现象说明刚好在水面之上的上行辐亮度由各深度水体组分的后向散射及下界面的反射共同贡献, 再经水汽界面上行透射而得, 属于水体辐射传输的核心机理。这与水面油膜通过油类物质改变海表反射率而产生与自然海表不同反射光谱的探测机理具有本质上的差别。再者, 与含水中油水体后向散射产生的上行辐亮度相比, 海表对太阳光的反射属于强信号, 会掩盖水体组分信息。水色卫星搭载的水色传感器具有一定的侧摆能力, 能避开太阳辐射反射信号并接收到含水中油水体的上行辐亮度; 水色卫星的当地过境时间一般为 10 至 14 点, 且水色传感器具有高信噪比特征, 满足含水中油水体的暗像元探测要求。该研究揭示了水色遥感探测含水中油水体的光谱和机理依据, 表明可以视水中油为一种新的水体组分, 基于光在水体中的辐射传输过程, 开展含水中油水体的水色遥感反演研究。

**关键词** 水色遥感; 辐射传输机理; 石油污染; 上行辐亮度光谱

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)05-1648-06

## 引言

目前, 关于海洋油污的研究主要集中在油膜的遥感探测和识别上, 主要的技术手段包括热红外<sup>[1]</sup>、雷达<sup>[2]</sup>、光学遥感<sup>[3]</sup>, 而关于水中油对太阳光在水体辐射传输过程中的影响研究甚少。油属于光学活性物质<sup>[4]</sup>, 水中油能够改变太阳光在水体中的辐射传输过程。这不会引起上行辐射信息的变化, 也会影响到水上传感器的入瞳信号强度, 还会造成水体光场的辐亮度信息变化。光场指的是光谱辐亮度在水体中各个位置随角度分布的完整描述, 水下光场的研究是解决水

下能见度、水下观测系统、水下成像、水下目标的目视检测及水下初级生产力等问题的前提条件<sup>[5-6]</sup>。辐亮度是描述光的一种辐射测量学术用语, 也是海洋光学关注的基本辐射物理量之一, 所有其他的辐射物理量(如辐照度、漫衰减系数、光合有效辐射等)都可以通过辐亮度推导得出<sup>[7]</sup>。这些参数可以反映不同水体可获得太阳能量的大小或光子数量的多少, 进而影响水下生物的生长过程及海气界面的碳交换过程。辐亮度可用于全面描述水体光场结构随空间、时间、方向及波长的变化<sup>[7-8]</sup>。水体的水下光场及辐亮度分布则是由海水的固有光学特性、其垂向结构及光照条件所决定的<sup>[5]</sup>。辐亮度与水体组分固有光学特性之间的关系可由辐射传输方

收稿日期: 2021-09-13, 修订日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771384), 广东海洋大学 2017 年“创新强校工程”自主创新能力提升项目(GDOU2017052501), 广东海洋大学科研启动经费资助项目(E16187)资助

作者简介: 杨俊杰, 1982 年生, 广东海洋大学电子与信息工程学院博士研究生 e-mail: jiel@stu.gdou.edu.cn

\* 通讯作者 e-mail: huangmf@gdou.edu.cn

程进行表达和计算<sup>[9]</sup>。油污事件发生后,在海洋物理过程<sup>[10]</sup>的作用下或在人为污染应急处理<sup>[11]</sup>之后,部分油类污染物与海水混合形成油水乳化物,以水中油的形式存在于海水水体中,水中油的出现及其在海水中垂向分布会改变水体的光学特性。因此,含油水体的水下光场研究是描述太阳辐射在含油水体中辐射传输过程的基础工作。其中,辐亮度随海水深度、波长及太阳入射天顶角的变化特征是研究含油水体水下光场及进一步开展含油水体对海洋生地化循环过程影响的核心内容;同时,上行辐亮度还是水色传感器的重要信号源,也是利用水色遥感技术探测水体组分构成的关键物理量。

水下光场及水体中辐亮度随空间、时间、波长和方向变化的研究方法主要有两种,分别是理论模拟和野外实测两种方法。同野外实测方法相比,理论模拟方法具有能够描述更多细节特征、计算结果精确度更高、代价更低等优点,并且,理论方法还能用于模拟计算野外实测无法开展测量的情况。其中,比较常见的理论模拟方法有 Hydrolight 和 Monte Carlo。和 Monte Carlo 方法相比,Hydrolight 采用不变嵌入法<sup>[7, 12]</sup>计算水体辐射传输方程,具有计算速度快、精度高等优点而被广泛应用于海洋光学及水色遥感领域。

本文利用在大连港海域现场采集的石油类物质固有光学特性及水中油浓度数据,并基于 Hydrolight 进行含水中油水体水下光场数值模拟,旨在揭示水中油的敏感光谱特性,并分析水中油对纯海水水体上行辐亮度光谱的影响,从水色遥感机理角度分析探测水中油污染的可行性,为进一步利用遥感技术探测水中油污染信息奠定基础。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区域及观测站点

研究区位于中国辽宁大连港海域,如图 1 所示。大连港坐落在辽东半岛的南端,属于港阔水深、冬季不冻的万吨货轮港,其中新港港区、北良港区和长兴岛港区是主要的油品码头。原油卸装及中转过程发生的原油泄漏、大型船舶运输过程的排放及石油污染事故均对大连港海域的水环境产生危害。图 1 中的 A、B 和 C 为本次研究的观测站点,A 站位为历史石油管道爆炸事故点,B 站位位于大连港航道上,C 站位远离事故发生地点和航运航道。

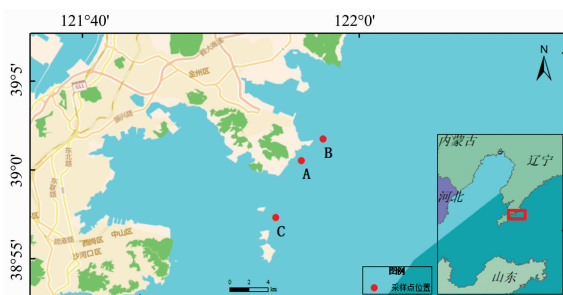


图 1 研究区及观测点位置

底图: ArcGIS 的 ChinaOnlineStreetWarm

Fig. 1 Location of sampling stations

Raster data: ChinaOnlineStreetWarm from ArcGIS

### 1.2 数据测量与光场模拟

2018 年 8 月 25 日—27 日,分别依每个整点时刻从 7:00—17:00 在图 1 的三个站点进行测量,测量的参数包括水中油浓度、吸收系数、后向散射系数等。水中油浓度、吸收系数及后向散射系数的测量方法和分离算法已被详细阐述<sup>[13-15]</sup>,不再赘述。

本文将现场测量及处理后的数据作为 Hydrolight 的输入,模拟水深为 50 m(间隔为 0.6 m)的含水中油(浓度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )水体、在不同太阳天顶角( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ 和  $90^\circ$ )条件下的水下光场,波长区间为 300~1 000 nm(分辨率为 5 nm)。文献<sup>[15]</sup>中列举了更详细的单一组分含水中油水体光场模拟的 Hydrolight 参数设置<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水中油上行辐亮度光谱特性

图 2 为含水中油水体不同水深(刚好在水面之下 0~10.2, 20.4, 30.0, 40.2 和 50.0 m)处的上行辐亮度光谱(300~1 000 nm),图 2(a—d)分别表示含不同浓度(0.1, 1, 5 和 10  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )的水中油水体在不同天顶角( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ 和  $90^\circ$ )入射条件下的上行辐亮度光谱。首先,在 300~1 000 nm 光谱区间,不同浓度的水中油对水体上行辐亮度光谱的影响主要集中在可见光波段(380~760 nm),而在紫外和红外波段,由于纯水的高吸收特性,水中油对水体的上行辐亮度光谱影响微弱,甚至可以忽略(尤其当水中油浓度较低时)。其次,当水中油浓度较低时,含水中油水体主要体现出纯海水的上行辐亮度光谱特性[图 2(a—c)],峰值出现在 417.5 nm 附近。其主要原因在于纯水的吸收系数在可见光波段大致呈递增的趋势,蓝绿波段纯水的吸收能力弱,在红光波段纯水的吸收系数快速增加。随着水中油浓度的增加,上行辐亮度光谱峰值逐渐向长波方向(442.5~472.5 nm)移动,且在蓝光波段范围内,水中油上行辐亮度光谱均出现一个明显的吸收谷(432.5 nm)。此外,随着水中油浓度的增加,水中油的吸收效应逐渐凸显,上行辐亮度光谱在蓝光波段的量值逐渐降低。

水色遥感传感器的光谱分辨率高,光谱范围一般覆盖 400~900 nm 区间。图 2 表明不同浓度的水中油均可引起水体上行辐亮度光谱(可见光波段)的明显变化,其波谱响应区间与水色传感器的波谱设置相对应,属于水色遥感的研究光谱范畴,为利用水色遥感技术探测含水中油水体及反演水中油浓度提供了重要的光谱依据。同时,利用水色传感器获取含水中油水体的上行辐射的光谱信息,可以为建立反演水中油浓度的反演模型提供大量的数据源。

### 2.2 水中油上行辐亮度的深度响应机制

水体组分对不同波长的太阳辐射具有不同的吸收和散射能力,因此,不同波长的太阳辐射具有相异的穿透能力。由于石油污染事件多发生在近海海域,本文设置水体的最大水深为 50 m,分析三个水色遥感常用波段(442.5, 557.5 和 677.5 nm)的上行辐亮度随水体深度(刚好在水面以下 0~

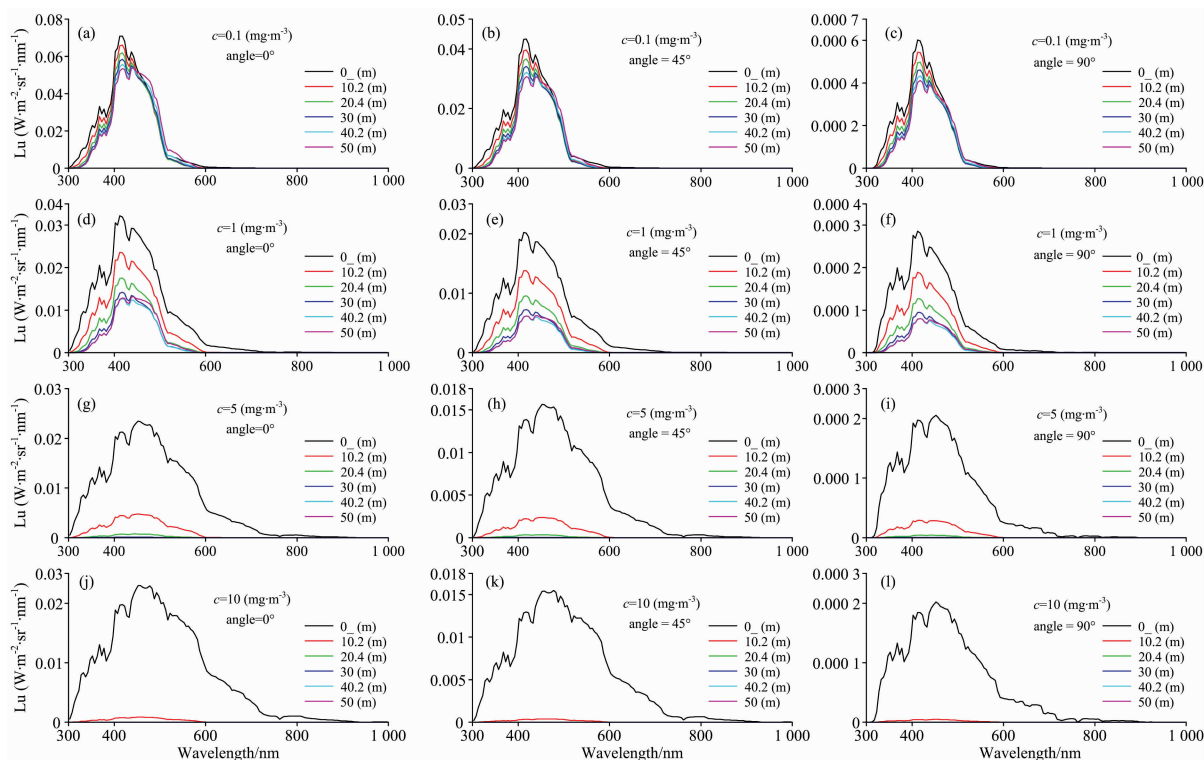


图 2 上行辐亮度光谱

Fig. 2 Upward radiance spectra

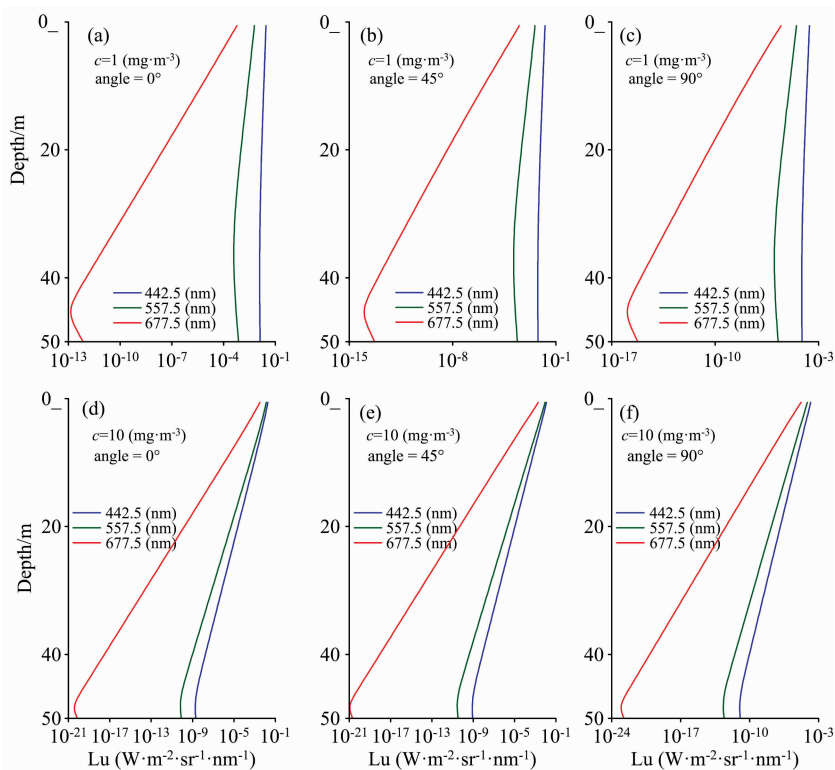


图 3 不同波长(442.5、557.5和677.5 nm)的上行辐亮度随水体深度的变化曲线

Fig. 3 Upward radiance as a function of the water depth at three wavelengths (442.5, 557.5 and 677.5 nm)

50 m)的变化特征(图3)。图3(a—f)分别表示两种浓度(1和 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )水中油水体在三种天顶角( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ 和 $90^\circ$ )入射

条件下的上行辐亮度随深度的变化曲线。上行辐亮度随着水深(刚好在水面以下 $0 \sim 50 \text{ m}$ )的增加呈现出先递减、而后

在接近水体下界面之前递增的趋势。此外，含高浓度(10 mg · m<sup>-3</sup>)水中油水体的上行辐亮度随水深的增加(呈递增趋势之前的深度)而快速减少，而含低浓度水中油水体的上行辐亮度随水深增加而降低的速率则相对较慢(尤其在蓝绿波段)，该现象表明含高浓度水中油水体对光的衰减作用强于含低浓度水中油水体。

采用最大水深 50 m 的下界面，下界面将部分入射至此处的太阳辐射反射回水体，这是造成越接近水体的下界面，上行辐亮度不减反增的根本原因。本文含水中油水体属于近岸或光学浅水水体(optically shallow waters)，含不同浓度的水中油水体刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度之间的差异(图 2 和图 3)表明，水体中不同浓度的水中油对刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的贡献是不同的；同时，也不可忽视水体下界面对刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的贡献(图 3)。水体辐射传输利用水体中不同深度内的水体组分与光的相互作用，对光的下行和上行传输过程进行描述，是水色遥感的核

心理。不同浓度的水中油对光线在水体中辐射传输过程的影响与水色三要素一致，均会引起光在传输过程中不同程度的衰减，符合利用水色遥感技术探测水体组分的辐射传输机理。这表明可以将水中油视作一种新的水体组分，基于水体辐射传输机理开展含水中油水体的水色遥感反演研究。

2.3 刚好位于水面之上和水面之下上行辐亮度的太阳天顶角响应机理

水体上行辐亮度需经过水汽界面的透射后再经大气传输进入传感器，传感器除了能接收到水体的上行辐射信息之外，还受到水汽界面对太阳辐射反射的影响。图 4 是刚好在水面之上(带点实线)和刚好在水面之下(虚线)的上行辐亮度随天顶角(0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°及 90°)的变化曲线图。随着天顶角的增大，辐亮度光谱的量值逐渐变小，表明太阳天顶角对辐亮度光谱的量值具有影响作用。此外，当天顶角为 0°时，刚好在水面之上(0<sub>+</sub>)上行辐亮度往往超过刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的 1~3 个数量级。

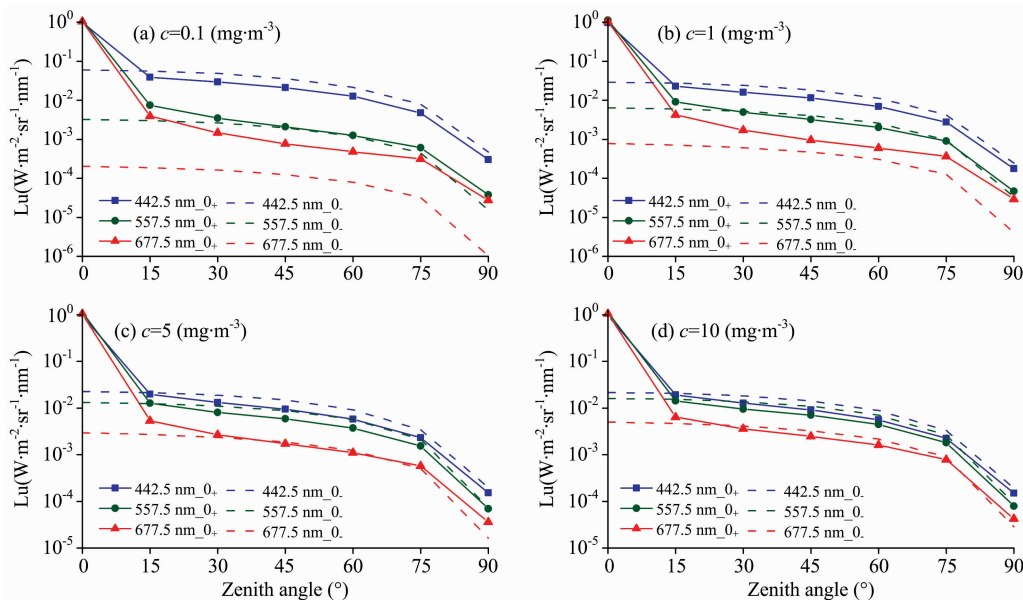


图 4 刚好位于水面之上和水面之下的上行辐亮度随天顶角变化曲线图

Fig. 4 Upward radiance of just above and below the sea surface as a function of zenith angle

海表面对太阳直射辐射的反射会淹没水体组分的弱信号，在含水中油水体中也具有该效果(图 4 和表 1)。表 1 以图 4(d)(10 mg · m<sup>-3</sup>)为例，计算在不同波长及天顶角条件下刚好在水面之上(0<sub>+</sub>)上行辐亮度占刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的比率。当太阳天顶角为 0°时，太阳直射入射反射参与贡献的刚好在水面之上(0<sub>+</sub>)上行辐亮度是刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的几十甚至几百倍。太阳直射入射反射信号属于强信号，不包含水体组分的组成信息。水色传感器具有一定的侧摆能力，可以避免太阳直射反射信号进入传感器，保证传感器接收到的有用信号主要由水体组分(本文中的水分子和水中油)贡献。

水体向上辐射传输的信号能量较低，通常清洁水体在影像上呈现暗像元的特征，因而，水色传感器均具有较高的信噪比特点。如 2.1 所述，蓝光波段含最强的水中油光谱信号，

表 1 刚好在水面之上(0<sub>+</sub>)上行辐亮度占刚好在水面之下(0<sub>-</sub>)上行辐亮度的比率(%)

Table 1 The ratio (%) of the upward radiance just above the sea surface to the upward radiance just below the sea surface

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
442.5 nm	4 485.88	93.00	69.98	63.94	63.06	67.86	77.18
557.5 nm	7 019.63	92.11	69.70	63.77	62.96	68.31	85.93
677.5 nm	20 997.36	137.53	88.73	76.05	74.36	87.36	148.48

然而，随太阳天顶角及水中油浓度的增加，蓝光波段上行辐亮度量值逐渐降低，势必造成传感器入瞳信号减弱。含水中油水体上行辐亮度量值随水中油浓度及太阳天顶角增加而减少的现象表明水色卫星上午 10 点至下午 14 点的过境特点能

保证有足够多含水中油水体的上行辐亮度进入水色传感器,且水色传感器的高信噪比特征也适合属于暗目标体的含水中油水体探测。所以,水色卫星提供的遥感数据将是探测水中油污染和反演水中油浓度的重要数据源之一。

### 3 结 论

结合大连港现场实测数据及辐射传输模型 Hydrolight 对含水中油水体的上行辐亮度进行模拟,分析水中油对上行辐亮度光谱的影响及上行辐亮度随深度及天顶角的变化特征,结果表明:

(1)含水中油水体的上行辐亮度光谱响应区间与水色传感器的波谱设置相对应,主要在可见光波段,且其峰值变化集中在蓝光波段(442.5~472.5 nm),为利用水色遥感技术探测含水中油水体及反演水中油浓度提供了重要的光谱依据,以便发挥水色遥感技术的范围广、快速、成本低且便于

长期动态监测的优点。

(2)与海表油膜通过油类污染物改变海表反射率的遥感探测机理不同,含水中油水体上行辐亮度随深度变化特征表明各个水深处的含水中油水体及下界面均对上行辐射产生不同程度的贡献。在水媒介中,水中油对光在水体中辐射传输过程的影响机理与水色三要素是一致的,不仅会在下行传输过程中造成不同程度的衰减,还会对上行辐射产生影响。因此,开展水色遥感探测和反演水中油具备了机理基础,可将水中油视作一种新的水体组分,基于辐射传输机理研究水中油对太阳辐射上行及下行传输过程的影响。

(3)水色卫星搭载的传感器具有高信噪比的特点和一定的侧摆能力,且其过境时间一般在上午 10 点和下午 14 点之间,使得水色传感器既能保证避开太阳直射反射信号以接收到由水体组分贡献的有用信号,还能最大程度感应到由水体组分变化引起的暗像元变化。因此,水色遥感数据是建立反演水中油浓度算法的可靠数据源之一。

### References

- [ 1 ] Lu Y C, Zhan W F, Hu C M. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 181: 207.
- [ 2 ] Zhang B, Perrie W, Li X F, et al. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10602.
- [ 3 ] Lu Y C, Shi J, Wen Y S, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111183.
- [ 4 ] Drozdowska V, Freda W, Baszanowska E, et al. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, 222(9): 2157.
- [ 5 ] Kopelevich O, Sheberstov S, Vazyulya S. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(6): 456.
- [ 6 ] Sundarabalan B, Shanmugam P, Ahn Y H. *Ocean Science Journal*, 2016, 51(1): 67.
- [ 7 ] Mobley C D. *light and water*. San Diego: Academic, 1994. 22.
- [ 8 ] Stramski D, Tegowski J. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C12): 31345.
- [ 9 ] Sundarabalan B, Shanmugam P, Manjusha S. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 121: 30.
- [10] National Research Council (U. S. ). *Oil in the Sea III Inputs, Fates, and Effects*. Washington, D. C: The National Academies Press, 2003: 63.
- [11] Johansen Ø, Brandvik P J, Farooq U. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 73(1): 327.
- [12] Hedley J D, Mobley C D, Sumdman L K. *Hydrolight 5.3 Users' Guide*. Numerical Optics Ltd; Numerical Optics Ltd, 2017. 5.
- [13] HUANG Miao-fen, TANG Jun-wu, SONG Qing-jun(黄妙芬,唐军武,宋庆君). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2010, 14(1): 131.
- [14] HUANG Miao-fen, ZHUANG Yang, LIU Yang, et al(黄妙芬,庄 杨,刘 杨,等). *Transactions of Oceanology and Limnology(海洋湖沼通报)*, 2020, 174(3): 141.
- [15] LUO Wei-jian, HUANG Miao-fen, YANG Jun-jie, et al(骆蔚健,黄妙芬,杨俊杰,等). *Marine Sciences(海洋科学)*, 2021, 45(10): 49.

# The Effect of Oil-in-Water on the Upward Radiance Spectrum in Seawater

YANG Jun-jie<sup>1</sup>, HUANG Miao-fen<sup>2\*</sup>, LUO Wei-jian<sup>3</sup>, WANG Zhong-lin<sup>2</sup>, XING Xu-feng<sup>2</sup>

1. School of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. School of Mathematics and Computer Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

3. School of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

**Abstract** Currently, oil slick detection at a large scale by remote sensing is widely concerned. However, oil-in-water, which is subject to seawater and chemical dispersant's physical process, can also harm marine environment and organisms. The upward radiance of seawater is the key signal of watercolor sensors, so finding the approaches to detecting oil-in-water by analyzing the feature of the upward radiance spectrum for oil-in-water waters is also significant for the marine ecosystems. A simulation, which parameters were from the ground-based measurement at Dalian Port, was made by Hydro light for the computation of the underwater light field of seawater, which contains oil-in-water. To reveal the feature of the upward radiance as a function of wavelength, water depth and zenith angle, and to analyze the effect of oil-in-water on the upward radiance spectra and its response spectra in seawater medium. The simulation shows that oil-in-water mainly affects the visible spectrum. The peak of the upward radiance spectrum shifts from 417.5 to 442.5~472.5 nm and the value of the radiance decreases as the content of oil-in-water increases. It is the primary spectrum basis for detecting oil-in-water by the ocean color remote sensing techniques, for these responses belong to the detection domain of watercolor remote sensing. Besides, the upward radiance curves decrease with increasing water depth, then increase near the bottom. It indicates that the upward radiance just above the sea surface is contributed by the backscattering of water components at depth, the reflection of the bottom and the upward transmission through the air-water surface, following the radiative transfer model. It is different from the detection mechanism of oil slicks by changing the reflection ratio of the nature sea surface. Furthermore, compared with seawater's upward radiance, which contains oil-in-water, the reflection of direct solar radiation is powerful enough to shield the upward radiance. The swing capability of satellite-borne ocean color sensors can exclude the direct solar reflection to sense the upward spectral signals of oil-in-water. Meanwhile, the high signal to noise ratio of ocean color sensors and the transit time of ocean color satellites from 10 am to 2 pm also meet the detection requirement of dark pixels for waters containing oil-in-water. This paper indicates the spectral basis and the radiative transfer mechanism to detect oil-in-water by ocean color remote sensing techniques. It shows that the oil-in-water can be regarded as a new water component to develop the remote sensing inversion model to retrieve oil-in-water by the radiative transfer procedure of light in water media.

**Keywords** Water color remote sensing; Radiative transfer mechanism; Oil pollution; Upward radiance spectrum

(Received Sep. 13, 2021; accepted Feb. 23, 2022)

\* Corresponding author