

激光与光电子学进展

水中油对水体下行漫衰减系数的影响

杨俊杰¹, 黄妙芬^{2*}, 邢旭峰², 王忠林²¹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

摘要 下行漫衰减系数(k_d)是海洋光学领域的重要光学参数之一。利用大连港现场实测的含水中油水体光学参数和辐射传输模型 Hydrolight 模拟含水中油水体水下光场, 分析水中油对水体 k_d 的影响, 并根据模拟结果构建 k_d 半分析模型。结果表明, 在可见光波段, 不同水深的 k_d 光谱随着水中油浓度的增加而升高; 随着水中油浓度的增加, k_d 随水深增加而升高的趋势更为明显, 且接近其定常渐进值的速度越快; 含水中油水体吸收系数及后向散射系数对 k_d 的贡献与自然水体不同, 使得含水中油水体与自然水体 k_d 半分析模型的参数值差异明显, 因此, 自然水体 k_d 半分析模型无法满足含水中油水体的精确计算需求。通过模拟结果构建的 k_d 半分析模型可以进一步计算得到精度较高的下行辐照度, 为快速模拟含水中油水体水下光场提供了可靠的解决方案。

关键词 海洋光学; 下行漫衰减系数; 半分析模型; 大连港; Hydrolight

中图分类号 P733.3+1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221391

Influence of Dispersed Oil on Diffuse Attenuation Coefficient of Downwelling Irradiance

Yang Junjie¹, Huang Miaofen^{2*}, Xing Xufeng², Wang Zhonglin²¹*School of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China;*²*School of Mathematics and Computer Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China*

Abstract The diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance (k_d) is one of the most critical optical parameters in oceanic optics. The optical parameters of waters around the Dalian port polluted by dispersed oil (oil in water) were measured, and the underwater light field was simulated using the radiative transfer model (Hydrolight) to analyze the influence of oil in water on k_d and to establish a semi-analytical model for k_d . The simulation results show that the k_d spectra of various water depths increase with increasing oil concentrations. Moreover, k_d increases with increasing depth, particularly for the waters containing high concentrations of dispersed oil, and the faster it approaches its steady asymptotic value. In addition, this study also shows that the contributions of the absorption coefficient (a) and backscattering coefficient (b_b) to k_d of water polluted by dispersed oil differ from those of a and b_b to k_d of natural water body, so that the parameter values of the k_d semi-analytical models of water polluted by dispersed oil and natural water body are significantly different. Therefore, the existing k_d semi-analytical model for natural water body is unsuitable for accurate calculations of k_d of water polluted by dispersed oil. Hence, a semi-analytical model of k_d was developed based on the simulation results of Hydrolight. The accurate downwelling irradiance can be further calculated using k_d obtained with this developed semi-analytical model to provide a rapid and reliable solution for the underwater light field simulation of waters polluted by dispersed oil.

Key words oceanic optics; diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance; semi-analytical model; Dalian port; Hydrolight

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-24; 录用日期: 2022-05-16; 网络首发日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(41771384)

通信作者: *huangmf@gdou.edu.cn

1 引言

在海气循环、生地化及生态系统建模等海洋学研究领域,下行漫衰减系数是一个重要的光学参数^[1],它决定了太阳光向下由水体表面向深水辐射传输的能力^[2],也可以用于量化光在水体中的光量和真光层的深度^[3]。大洋及近岸自然水体的下行漫衰减系数已经得到了广泛的研究^[3],下行漫衰减系数与水体中的光学活性物质[叶绿素、悬浮泥沙及有色溶解有机物(CDOM)]关联紧密。其中,在大洋水体中,叶绿素主导水体的光学特性,而在近岸及河口海域,悬浮颗粒物及CDOM对光在水体的辐射传输过程起主导作用,不同水体的下行漫衰减系数随光谱及深度的变化特征也不同^[4]。1999年,Reinart等^[5]测量了14个不同营养状态的爱沙尼亚和芬兰湖泊的漫衰减系数,认为黄色物质和悬浮颗粒物对辐照度的垂向衰减起主要的作用,而叶绿素的影响次之。在海水水体中,不仅要考虑叶绿素、悬浮颗粒物及CDOM对光在水下传输过程中的衰减作用,非弹性散射对红光波段的向下漫衰减系数的影响也不可忽视^[6]。

发生石油污染事件后,石油污染物通常以油膜、分散油、乳化油及溶解油四种形式存在于海水中^[7]。油膜类型石油污染得到了广泛的关注,然而,分散油和乳化油类型石油污染也是一种很重要的污染^[8-9],受到社会和学者们的关注十分有限。本文不涉及油膜及溶解油,而是将悬浮在水体中分散油和乳化油合称为水中油,仅考虑含水中油情况的石油污染水体。在含水中油水体中,水中油属于光学活性物质^[10],水中油也可以影响太阳辐射在水体中的辐射传输过程,目前,还未有学者研究水中油对太阳辐射在水体辐射传输过程中衰减的影响。

辐射传输模型可以用于描述下行漫衰减系数与水体固有光学特性(如吸收系数、后向散射系数)之间的关系,有研究表明,水深小于下行漫衰减系数倒数的水体可贡献90%的遥感辐亮度,因此,下行漫衰减系数对水色遥感来说具有特别重要的意义^[5-6,11]。利用水色遥感技术监测含水中油水体(以下简称为含油水体),首要的是确定下行漫衰减系数随含油水体水深的变化关系。尽管在很多研究工作中将漫衰减系数视作准固有光学特性(具有可累加性),然而,下行漫衰减系数是表观光学特性,不具有可累加性^[12]。所以,不能采取利用每种水体组分固有光学特性计算各自的下行漫衰减系数再求和的方式获取水体总下行漫衰减系数,而是要先获取水体的固有光学特性,再基于这些固有光学特性计算水体的总下行漫衰减系数。文献^[13]分析表明,水体的吸收系数和后向散射系数对水体下行漫衰减系数起着决定性的作用,由此可知,在吸收系数和后向散射系数已知的情况下,无需更多关于颗粒物散射相函数的知识,即可求得精确的水体下行漫衰减系数,

这对水色遥感具有很重要的意义。

为了分析水中油对水体下行漫衰减系数的影响,本文基于大连港现场实测的水中油含量及固有光学特性(吸收系数及后向散射系数)等数据,采用辐射传输模型Hydrolight模拟含水中油单一组分水体的水下光场,分析水中油对水体下行漫衰减系数的影响,并基于辐射传输模型建立含油水体的固有光学特性(吸收系数及后向散射系数)与下行漫衰减系数之间的关系。

2 数据与方法

2.1 研究区及水下光场模拟

大连港坐落在辽东半岛的南端,属于我国渤海、黄海北部唯一冬季不冻的深水良港,其中包含新港港区、北良港区和长兴岛港区等主要油品码头。石油运输、卸装及中过程中可能发生泄露及排放等事件,甚至可能发生石油污染事故,这些都会对海水环境产生危害。

本文研究区位于中国辽宁大连港附近海域,实测采样点位置信息如表1所示。2018年8月25~27日,选取历史石油管道爆炸事故点附近的A站点(St. A)、大连港航道上B站点(St. B)和远离事故发生地点和航运航道C站点(St. C),依每个整点时刻从7:00至17:00对三个站点的水中油浓度、吸收系数、后向散射系数等参数进行测量。具体测量及数据处理方法^[14-16]已得到广泛的阐述和说明,在此不再赘述。然后,将处理后的有效数据作为Hydrolight辐射传输模型的输入参数,模拟在不同太阳天顶角(0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°)条件下、光谱区间为400~800 nm(分辨率为5 nm)、水深为50 m(间隔0.6 m)的含不同质量浓度(0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、5.0、10.0 mg/m³)的水中油水体的水下光场。在该模拟中,水中油的比吸收系数和比后向散射系数值分别设置为0.0191和0.1473,体散射描述采用后向散射率为0.0183的Fournier-Forand散射相函数^[16]。

表1 三个采样站点的位置信息

Table 1 Locations of three sampling sites

Name of station	Longitude (N)	Latitude (E)
St. A	121.89705°	38.9541°
St. B	121.92833°	38.9700°
St. C	121.85118°	38.9056°

2.2 下行漫衰减系数

在海洋水体中,下行辐照度从海表面传输至水深(z)处的过程受下行漫衰减系数控制^[2]。下行漫衰减系数是一种表观光学特性,即其受水体本身及外界环境的共同影响,其定义^[13]为

$$k_d(z, \lambda) = -\frac{1}{E_d(z, \lambda)} \frac{dE_d(z, \lambda)}{dz}, \quad (1)$$

式中: $k_d(z, \lambda)$ 是下行漫衰减系数; $E_d(z, \lambda)$ 是水深 z 处的向下辐照度。

2.3 下行漫衰减系数理论模型及含油水体下行漫衰减系数半分析模型

基于辐射传输理论可知,下行漫衰减系数是吸收系数和后向散射系数的函数^[13],其计算公式为

$$k_d(z, \lambda) = \frac{1}{\mu_d(z, \lambda)} a(\lambda) + \left[\frac{r_d(z, \lambda)}{\mu_d(z, \lambda)} - \frac{r_u(z, \lambda)R(z, \lambda)}{\mu_u(z, \lambda)} \right] b_b(\lambda), \quad (2)$$

式中: μ_d (μ_u) 指的是平均余弦; r_d (r_u) 指的是向下(向上)光场; a 和 b_b 指的是水体的吸收系数和后向散射系数; R 指的是辐照度比。Lee 等^[12-13]根据下行漫衰减系数与吸收系数及后向散射系数之间的关系及 Hydrolight 数值模拟结果,将式(2)简化为

$$k_d(z, \lambda) = m_0(z, \lambda)a(\lambda) + m_1(z, \lambda)b_b(\lambda) - m_1(z, \lambda) \cdot m_2(z, \lambda) \exp[-m^3(z, \lambda)a(\lambda)]b_b(\lambda), \quad (3)$$

式中, m_0 、 m_1 、 m_2 和 m_3 是用于式(3)拟合式(2)的参数。

为了简化复杂度并凸显水中油对下行漫衰减系数半分析模型的影响,本文模拟水体的吸收系数及后向散射系数分别由纯海水及水中油贡献。将式(3)中的吸收系数及后向散射系数分解,可得到含油水体下行漫衰减系数半分析模型为

$$k_d(z, \lambda) = m_0(z, \lambda)[a_w(\lambda) + a_{oil}(\lambda)] + m_1(z, \lambda)[b_{bw}(\lambda) + b_{boil}(\lambda)] - m_1(z, \lambda)m_2(z, \lambda) \cdot \exp[-m^3(z, \lambda)a_w(\lambda) - m^3(z, \lambda)a_{oil}(\lambda)] \cdot [b_{bw}(\lambda) + b_{boil}(\lambda)], \quad (4)$$

式中: a_w 和 a_{oil} 分别指的是纯海水及水中油的吸收系数; b_{bw} 和 b_{boil} 分别指的是纯海水及水中油的后向散射系数。

根据辐射传输理论可知,可以利用水体的 μ_d (μ_u) 及 r_d (r_u) 获取水体的下行漫衰减系数。然而,半分析模型反演水体光学特性过程主要关注如何基于辐射传输理论的数值模拟结果拟合式(3)中的参数 m_0 、 m_1 、 m_2 和 m_3 , 然后基于这些参数及水体固有光学特性 $a(\lambda)$ 和 $b_b(\lambda)$, 可直接、快速地计算得到水体的下行漫衰减系数^[13]。本文则利用辐射传输模型 Hydrolight 模拟含油水体的水下光场,基于数值模拟结果拟合式(4)中的参数 m_0 、 m_1 、 m_2 和 m_3 , 建立高效、精确的含水中油水体下行漫衰减系数半分析反演模型。

3 结果与讨论

3.1 下行漫衰减系数随水中油质量浓度的变化

图 1 显示在可见光波段内(400~800 nm)、不同深度水层中、含不同质量浓度(0.1、1.0、5.0、10.0 mg/m³)的水中油水体的下行漫衰减系数光谱。在可见光波段内,各个水层中下行漫衰减系数光谱随着水中油质量浓度的增加而升高。同时,下行漫衰减系数光谱呈现出随波长增加而逐渐升高的趋势,并且,在 762.5 nm 之后,又呈现出随波长增加而逐渐递减的趋势,但整体上红黄波段的下行漫衰减系数均大于蓝绿波段的下行漫衰减系数。

式(2)表明,从光线在水体中的辐射传输过程角度来看,下行漫衰减系数本质上是由水体及水体组分的吸

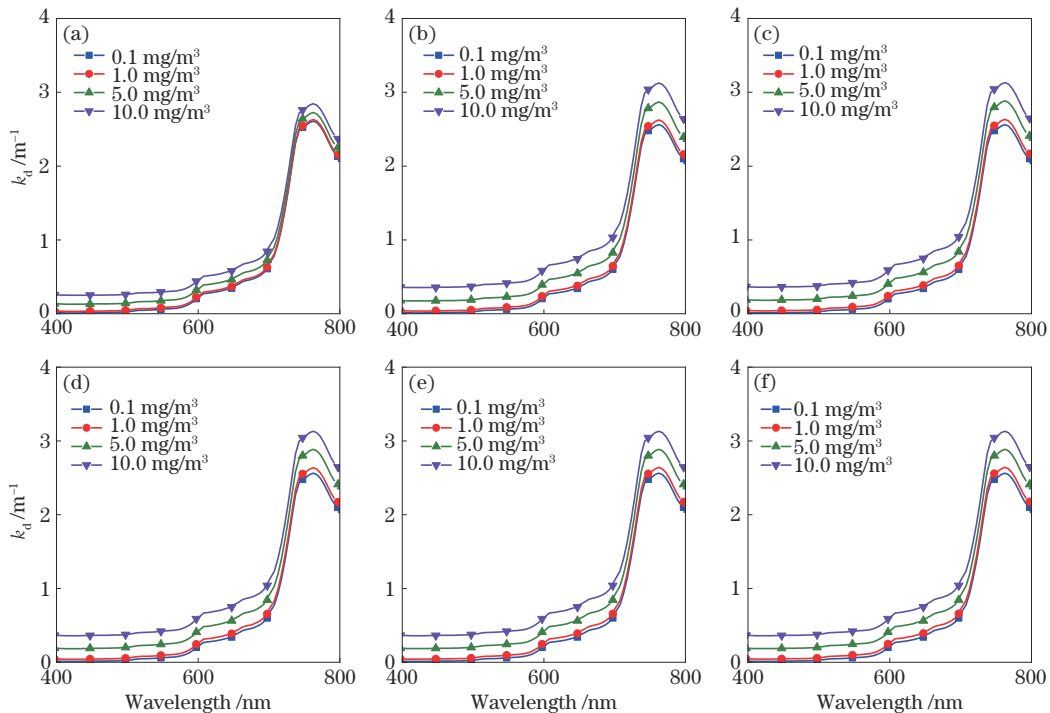


图 1 不同深度水层下行漫衰减系数(k_d)光谱随水中油质量浓度的变化。(a) 0.005 m; (b) 10.205 m; (c) 20.405 m; (d) 30.005 m; (e) 40.205 m; (f) 49.995 m

Fig. 1 Diffuse attenuation coefficient spectra for downwelling irradiance (k_d) in waters of different depths versus mass concentrations of waters polluted by dispersed oil. (a) 0.005 m; (b) 10.205 m; (c) 20.405 m; (d) 30.005 m; (e) 40.205 m; (f) 49.995 m

收系数及后向散射系数共同决定的。图 1 中含水中油水体的下行漫衰减系数光谱随着水中油质量浓度的增加而升高的现象,实际上反映的是水中油质量浓度的变化引起水体的吸收系数及后向散射系数的变化。随着潮起潮落,大连港附近海域海水中水体组分及水中油质量浓度会发生变化^[15,17]。水体组分及水中油质量浓度的变化会引起水体吸收系数和后向散射系数的变化^[14,17-18],因此,在研究含油水体的下行漫衰减系数及利用下行漫衰减系数研究水下光场时,考虑下行漫衰减系数随水中油的质量浓度变化而变化是具有现实意义的。

3.2 下行漫衰减系数随水深的变化

光在水体中的分布随着水深的变化而改变,即使是在均匀水体中,在到达较深水体的渐进值(k_{∞})之

前,下行漫衰减系数也随着水深的变化而变化^[13]。图 2 是含不同水中油质量浓度水体、三个水色遥感常用波段(442.5、557.5、677.5 nm)的下行漫衰减系数随水深变化的曲线(图中带点实线)图,各子图中的空心点状虚线表示下行漫衰减系数随水深变化曲线的渐近线。

在水中油含量较低的水体中[图 2(a)],水中油对水体的下行漫衰减系数影响很小。随着水中油含量的增加[图 2(b)、2(c)和 2(d)],水体下行漫衰减系数逐渐增加,且下行漫衰减系数随着水深的增加而变化的趋势也更加明显。然而,在到达一定深度时,下行漫衰减系数仍然遵循逐渐接近定常的渐进值 k_{∞} (表 2)这一规律^[11,13]。

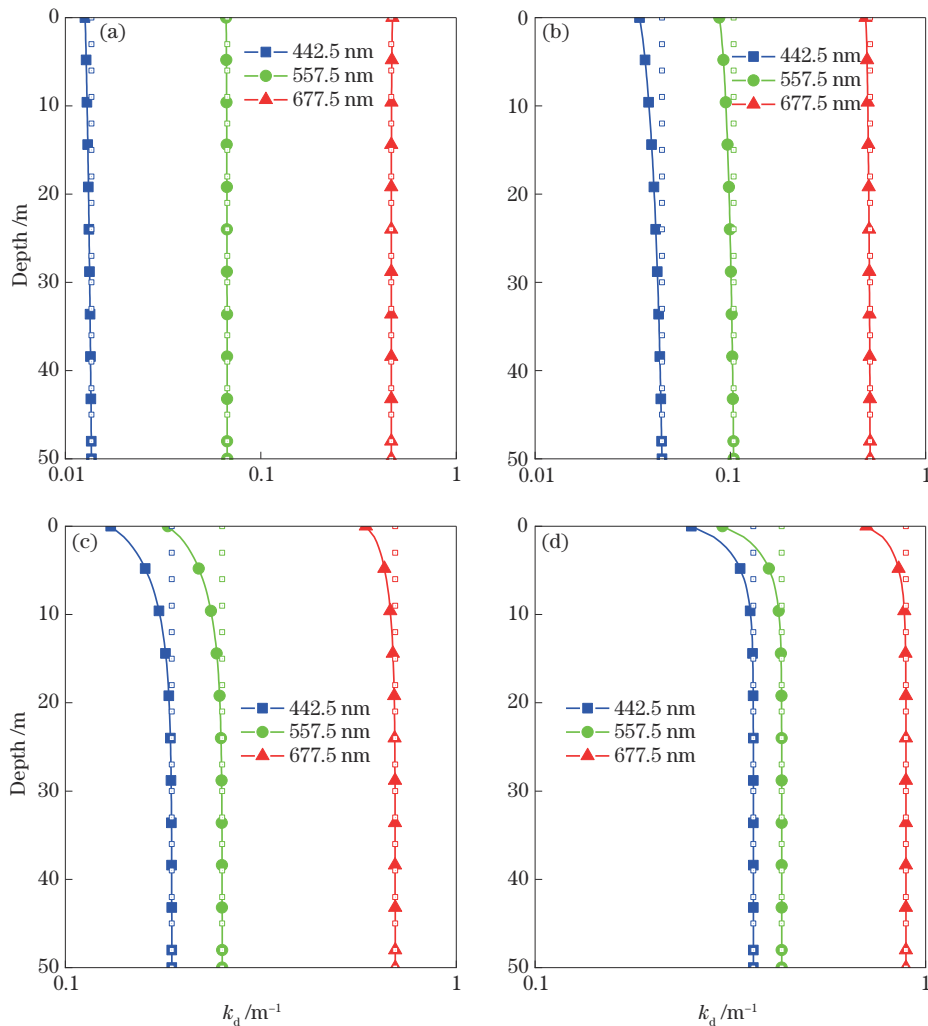


图 2 含不同质量浓度水中油水体下行漫衰减系数(k_d)随水体深度变化。(a) 0.1 mg/m^3 ; (b) 1.0 mg/m^3 ; (c) 5.0 mg/m^3 ; (d) 10.0 mg/m^3

Fig. 2 Diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance (k_d) in waters polluted by different mass concentrations of dispersed oil versus water depth. (a) 0.1 mg/m^3 ; (b) 1.0 mg/m^3 ; (c) 5.0 mg/m^3 ; (d) 10.0 mg/m^3

图 2 和表 2 共同表明,低质量浓度水中油对下行漫衰减系数的影响较小,而随着水中油含量的增加,水中油对下行漫衰减系数的影响越明显。该影响不仅表现在下行漫衰减系数的大小上(图 1),还表现在随深度递

增的趋势上。首先,随着水中油含量的增加,下行漫衰减系数随着水深的增加而递增的趋势越明显(图 2)。其次,随着水中油含量的增加,下行漫衰减系数接近其定常渐进值 k_{∞} 越快,如表 2 所示,在含 5.0 mg/m^3 的水

表 2 含不同质量浓度水中油水体下行漫衰减系数的定常渐进值(k_{∞})及接近该定常值的相应水深

Table 2 Asymptotic k_a values (k_{∞}) of waters polluted by various mass concentrations of dispersed oil and their approaching depths

Mass concentration of dispersed oil / (mg·m ⁻³)	Wavelength /nm	k_{∞} /m ⁻¹	Depth of approaching k_{∞} /m
0.1	442.5	0.014	0
	557.5	0.068	0
	677.5	0.466	0
1.0	442.5	0.045	30
	557.5	0.104	30
	677.5	0.520	0
5.0	442.5	0.188	20
	557.5	0.252	20
	677.5	0.698	20
10.0	442.5	0.363	10
	557.5	0.428	10
	677.5	0.891	10

中油水体中,接近 k_{∞} 的水深大约为 20 m,而在含 10.0 mg/m³ 的水中油水体中,下行漫衰减系数在大约 10 m 的水深处随水深的变化就变得不再明显(图 2)。

含油水体的下行漫衰减系数是随深度变化而变化的一种表观光学特性,尤其是在水体的上层,下行漫衰减系数随水深的变化最为显著。造成该现象的主要原因是水体边界效应对水体光场的影响^[11]。然而,在光学深水(远离水体表面和底界面)水体中,由于边界对水体光场影响较弱、甚至消失,下行漫衰减系数逐渐接近于定常渐进值 k_{∞} ,尤其是在水中油含量较高的水体中,由于水中油对光线在水体中传输的影响,下行漫衰减系数很快接近于定常渐进值 k_{∞} 。下行漫衰减系数在深水中不受外界环境的影响,而仅仅由水体固有光

学特性决定,这也是下行漫衰减系数经常被称为准固有光学特性^[4,6]的主要原因。

3.3 含油水体下行漫衰减系数半分析模型

水体的吸收系数和后向散射系数是决定下行漫衰减系数的关键参数。然而,吸收系数和后向散射系数对水体下行漫衰减系数的贡献率并不是一致的^[13]。利用 Hydrolight 数值模拟计算不同深度水层(0.005~49.995 m,水深间隔为 0.6 m)、含不同质量浓度的水中油水体(代表不同的吸收系数和后向散射系数)、几个水色遥感常用可见光波段(442.5、557.5、677.5 nm)的下行漫衰减系数,再根据式(4)拟合不同水深处的下行漫衰减系数,得到不同波段及不同水深处的半分析模型参数,如表 3 所示。

表 3 几个波段的半分析模型参数

Table 3 Parameters of semi-analytical model for a few wavebands

Depth /m	m_0, m_1, m_2, m_3		
	442.5 nm	557.5 nm	677.5 nm
0.005	1.128, 0.943, -0.046, 35.486	1.031, 1.498, -0.067, 14.852	1.026, 1.499, -0.140, 5.795
0.605	1.111, 3.993, 0.749, 1.428	1.029, 5.736, 0.738, 0.880	1.024, 5.582, 0.818, 0.945
1.205	1.105, 4.315, 0.770, 2.502	1.026, 5.458, 0.732, 1.899	1.022, 6.311, 0.943, 1.563
1.805	1.100, 4.573, 0.786, 3.376	1.023, 5.651, 0.747, 2.675	1.020, 6.651, 1.089, 2.229
2.405	1.097, 4.769, 0.798, 4.134	1.021, 5.804, 0.761, 3.395	1.018, 6.837, 1.326, 3.046
3.005	1.095, 4.903, 0.806, 4.860	1.019, 5.926, 0.772, 4.082	1.016, 6.978, 1.757, 4.067
3.605	1.092, 5.000, 0.813, 5.562	1.017, 5.997, 0.784, 4.806	1.015, 7.116, 2.562, 5.310
4.205	1.090, 5.072, 0.818, 6.257	1.015, 6.043, 0.798, 5.569	1.013, 7.256, 4.386, 6.915
4.805	1.087, 5.126, 0.823, 6.932	1.013, 6.081, 0.812, 6.338	1.012, 7.395, 10.184, 9.195
5.405	1.084, 5.169, 0.827, 7.633	1.011, 6.104, 0.830, 7.168	1.011, 7.544, 38.028, 12.495
6.005	1.080, 5.207, 0.830, 8.328	1.010, 6.127, 0.849, 8.011	1.010, 7.699, 406.955, 18.013
6.605	1.075, 5.244, 0.832, 9.051	1.009, 6.139, 0.876, 8.935	1.010, 7.852, 65002.984, 29.085
7.205	1.069, 5.278, 0.834, 9.762	1.007, 6.151, 0.905, 9.896	1.006, 0.459, -17.031, 0.044
7.805	1.062, 5.318, 0.836, 10.492	1.006, 6.160, 0.943, 10.932	1.006, 0.035, -255.479, 0.160
8.405	1.056, 5.358, 0.837, 11.216	1.005, 6.171, 0.986, 12.005	1.005, 0.013, -783.311, 0.273

表 3 (续)

Depth /m	m_0, m_1, m_2, m_3		
	442.5 nm	557.5 nm	677.5 nm
9.005	1.048, 5.399, 0.838, 11.934	1.004, 6.180, 1.036, 13.137	1.004, 0.006, -1783.282, 0.383
9.605	1.040, 5.445, 0.839, 12.659	1.004, 6.189, 1.097, 14.348	1.003, 0.004, -2871.691, 0.488
10.205	1.032, 5.491, 0.840, 13.372	1.003, 6.198, 1.168, 15.612	1.003, 0.002, -5033.093, 0.590
10.805	1.024, 5.537, 0.841, 14.080	1.003, 6.207, 1.254, 16.954	1.002, 0.002, -6944.489, 0.686
11.405	1.017, 5.578, 0.843, 14.769	1.003, 6.213, 1.359, 18.402	1.001, 0.001, -10342.645, 0.778
12.005	1.007, 5.633, 0.843, 15.460	1.003, 6.217, 1.491, 19.952	1.001, 0.001, -12530.219, 0.865
12.605	1.000, 5.677, 0.844, 16.132	1.003, 6.220, 1.653, 21.612	1.001, 0.001, -17547.324, 0.947
13.205	0.993, 5.714, 0.846, 16.780	1.004, 6.220, 1.851, 23.366	1.000, 0.001, -23071.212, 1.025
13.805	0.988, 5.744, 0.848, 17.401	1.005, 6.216, 2.115, 25.288	1.000, 0.001, -26202.295, 1.099
14.405	0.981, 5.779, 0.849, 18.021	1.006, 6.210, 2.435, 27.281	1.000, 0.001, -26806.012, 1.168
15.005	0.977, 5.806, 0.851, 18.618	1.008, 6.198, 2.853, 29.420	0.999, 0.001, -21462.481, 1.232
15.605	0.973, 5.825, 0.853, 19.197	1.010, 6.182, 3.382, 31.632	0.999, 0.252, -80.400, 1.329
16.205	0.972, 5.828, 0.856, 19.737	1.014, 6.159, 4.079, 33.952	0.999, 2.994, -7.000, 1.967
16.805	0.970, 5.837, 0.859, 20.281	1.018, 6.129, 4.967, 36.307	0.998, 4.315, -5.515, 2.553
17.405	0.971, 5.822, 0.862, 20.782	1.022, 6.094, 6.084, 38.672	0.998, 5.152, -5.499, 3.129
18.005	0.972, 5.815, 0.865, 21.291	0.918, 0.248, -27.907, 0.070	0.998, 5.675, -5.998, 3.639
18.605	0.975, 5.790, 0.869, 21.763	0.917, 0.092, -78.276, 0.117	0.997, 6.060, -6.804, 4.126
19.205	0.980, 5.753, 0.873, 22.217	0.916, 0.049, -149.062, 0.161	0.997, 6.372, -7.922, 4.610
19.805	0.985, 5.714, 0.878, 22.661	0.915, 0.029, -254.125, 0.202	0.996, 6.600, -9.249, 5.042
20.405	0.992, 5.665, 0.882, 23.086	0.915, 0.020, -367.558, 0.241	0.996, 6.791, -10.855, 5.459
21.005	1.000, 5.607, 0.888, 23.496	0.914, 0.014, -524.200, 0.278	0.996, 6.943, -12.674, 5.839
21.605	1.009, 5.542, 0.893, 23.891	0.914, 0.012, -628.038, 0.312	0.996, 7.080, -14.850, 6.216
22.205	2.620, -5.321, 1.360, 163.729	0.914, 0.010, -806.768, 0.345	0.995, 7.204, -17.458, 6.591
22.805	2.594, -5.141, 1.415, 170.465	0.913, 0.008, -1007.483, 0.376	0.995, 7.309, -20.397, 6.943
23.405	1.832, 0, -134415.617, 20.963	0.923, 7.323, 0, -106.540	0.995, 7.398, -23.631, 7.267
24.005	1.057, 5.210, 0.919, 25.361	0.913, 0.006, -1298.363, 0.431	0.995, 7.481, -27.427, 7.592
24.605	2.252, -476.463, 0.994, -0.002	0.913, 0.005, -1618.408, 0.458	0.994, 7.56, -31.853, 7.915
25.205	2.253, 0.009, 322.657, 0.317	0.913, 0.005, -1751.022, 0.482	0.994, 7.627, -36.619, 8.211
25.805	2.261, -289.650, 0.989, -0.003	0.913, 0.004, -1964.724, 0.505	0.994, 7.690, -42.084, 8.505
26.405	1.117, 4.799, 0.953, 26.696	0.913, 0.004, -1849.527, 0.526	0.994, 7.744, -47.841, 8.773
27.005	2.266, 0.031, 98.092, 0.175	0.914, 0.004, -1838.475, 0.546	0.993, 7.797, -54.501, 9.045
27.605	1.152, 4.563, 0.973, 27.316	0.914, 0.004, -1934.854, 0.565	0.993, 7.843, -61.382, 9.290
28.205	1.169, 4.443, 0.984, 27.626	0.914, 0.004, -1933.648, 0.583	0.993, 7.886, -69.199, 9.537
28.805	1.187, 4.321, 0.996, 27.938	0.914, 0.005, -1701.013, 0.600	0.993, 7.929, -77.938, 9.781
29.405	1.204, 4.207, 1.007, 28.251	0.915, 0.005, -1593.535, 0.616	0.993, 7.966, -87.038, 10.006
30.005	1.222, 4.085, 1.020, 28.555	0.915, 0.007, -1147.311, 0.632	0.993, 8.000, -96.821, 10.222
30.605	1.239, 3.968, 1.033, 28.860	0.916, 0.018, -464.077, 0.647	0.992, 8.033, -107.480, 10.434
31.205	1.258, 3.840, 1.048, 29.157	0.916, 2.276, -2.679, 0.956	0.992, 8.062, -118.453, 10.630
31.805	1.277, 3.711, 1.064, 29.468	0.914, 4.756, -0.790, 1.906	0.992, 8.090, -130.216, 10.821
32.405	1.296, 3.584, 1.080, 29.765	0.913, 5.499, -0.572, 2.710	0.992, 8.118, -143.423, 11.016
33.005	1.313, 3.465, 1.097, 30.076	0.912, 5.924, -0.486, 3.552	0.992, 8.144, -156.925, 11.198
33.605	1.332, 3.340, 1.115, 30.390	0.911, 6.153, -0.454, 4.256	0.992, 8.167, -171.339, 11.373
34.205	1.350, 3.218, 1.135, 30.703	0.910, 6.307, -0.442, 4.899	0.992, 8.189, -186.123, 11.540
34.805	1.367, 3.103, 1.155, 31.030	0.909, 6.431, -0.440, 5.549	0.992, 8.211, -202.457, 11.708
35.405	1.383, 2.991, 1.175, 31.356	0.908, 6.522, -0.445, 6.133	0.991, 8.230, -218.796, 11.863

表 3 (续)

Depth /m	m_0, m_1, m_2, m_3		
	442.5 nm	557.5 nm	677.5 nm
36.005	1.829, 0, -173647.528, 33.065	0.907, 6.592, -0.454, 6.661	0.991, 8.249, -236.164, 12.016
36.605	1.418, 2.755, 1.224, 32.016	0.905, 6.655, -0.466, 7.199	0.991, 8.266, -253.444, 12.156
37.205	1.434, 2.645, 1.249, 32.358	0.904, 6.699, -0.479, 7.626	0.991, 8.283, -271.844, 12.296
37.805	1.450, 2.537, 1.276, 32.695	0.903, 6.744, -0.495, 8.091	0.991, 8.298, -290.730, 12.430
38.405	1.468, 2.420, 1.308, 33.043	0.902, 6.782, -0.512, 8.521	0.991, 8.314, -310.979, 12.564
39.005	1.482, 2.325, 1.337, 33.407	0.901, 6.817, -0.530, 8.938	0.991, 8.328, -331.125, 12.689
39.605	1.497, 2.220, 1.371, 33.782	0.900, 6.847, -0.549, 9.310	0.991, 8.341, -352.283, 12.813
40.205	1.513, 2.117, 1.407, 34.153	0.899, 6.874, -0.568, 9.676	0.991, 8.353, -372.199, 12.921
40.805	1.527, 2.018, 1.446, 34.542	0.898, 6.902, -0.588, 10.050	0.991, 8.366, -396.156, 13.046
41.405	1.541, 1.927, 1.485, 34.939	0.897, 6.923, -0.607, 10.349	0.991, 8.377, -418.365, 13.154
42.005	1.554, 1.834, 1.529, 35.336	0.897, 6.945, -0.627, 10.669	0.991, 8.389, -443.147, 13.269
42.605	1.567, 1.748, 1.574, 35.743	0.896, 6.967, -0.649, 10.999	0.991, 8.399, -465.928, 13.368
43.205	1.579, 1.667, 1.619, 36.160	0.895, 6.985, -0.669, 11.279	0.991, 8.409, -489.269, 13.466
43.805	1.591, 1.591, 1.668, 36.594	0.894, 7.001, -0.689, 11.540	0.991, 8.419, -515.459, 13.569
44.405	1.604, 1.499, 1.731, 37.030	0.893, 7.018, -0.710, 11.809	0.991, 8.427, -538.200, 13.655
45.005	1.614, 1.433, 1.783, 37.486	0.892, 7.035, -0.731, 12.076	0.991, 8.436, -563.885, 13.748
45.605	1.626, 1.350, 1.854, 37.953	0.891, 7.048, -0.751, 12.300	0.991, 8.444, -588.393, 13.832
46.205	1.635, 1.288, 1.912, 38.411	0.891, 7.061, -0.771, 12.522	0.991, 8.452, -613.062, 13.914
46.805	1.646, 1.215, 1.990, 38.902	0.890, 7.077, -0.794, 12.775	0.990, 8.459, -637.643, 13.992
47.405	1.657, 1.141, 2.079, 39.391	0.889, 7.089, -0.814, 12.993	0.990, 8.467, -666.276, 14.080
48.005	1.665, 1.091, 2.145, 39.881	0.888, 7.101, -0.834, 13.194	0.990, 8.474, -692.960, 14.158
48.605	2.219, -2.398, -0.024, -7.073	0.888, 7.113, -0.855, 13.406	0.990, 8.479, -716.417, 14.224
49.205	1.683, 0.969, 2.337, 40.928	0.887, 7.124, -0.876, 13.606	0.990, 8.486, -745.198, 14.303
49.805	1.689, 0.925, 2.419, 41.422	0.887, 7.133, -0.893, 13.765	0.990, 8.492, -772.592, 14.375
49.995	1.693, 0.902, 2.465, 41.600	0.886, 7.137, -0.901, 13.838	0.990, 8.494, -780.400, 14.395

表 3 表明,含油水体的吸收系数及后向散射系数对下行漫衰减系数的贡献与自然水体中吸收系数及后向散射系数的贡献^[13]是有区别的,主要原因在于含油水体的吸收系数及后向散射系数与自然水体的吸收系数及后向散射系数之间存在差异^[14-15,18-19]。因此,在利用半分析模型反演含油水体的下行漫衰减系数及模拟水下光场时,应该与自然水体区别对待。尽管含油水体下行漫衰减系数半分析模型与自然水体半分析模型存在差异,然而 m_0 的变化依然较小(0.886~2.620),而 m_1 、 m_2 和 m_3 的变化也说明后向散射系数与吸收系数对下行漫衰减系数的贡献并不一致,该结论与前人在自然水体中的研究结论^[13]是一致的。

为了检验以表 3 为参数的半分析模型(即查找表方式)反演得到的下行漫衰减系数在含油水体下行辐照度计算中的适用性和精确性,本文利用式(5)和刚好在水面之下的下行辐照度值逐层计算各个水深处的下行辐照度,并将上述计算结果分别与 Hydrolight 模拟下行辐照度进行比较,得到三个波长(442.5、557.5、677.5 nm)、含四种水中油质量浓度(0.1、1.0、5.0、10.0 mg/m³)的水体的相对误差结果,如图 3 所示。图 3

表明,在含较低质量浓度水中油水体中[图 3(a)和 3(b)],由半分析模型反演下行漫衰减系数计算得到的下行辐照度与 Hydrolight 模拟的水下光场下行辐照度之间的相对误差较小,而在水中油质量浓度较高的水体中[图 3(c)和 3(d)],相对误差变大。尽管如此,在图 3(c)和 3(d)中,除在极个别水深处(12.6 m)外,相对误差通常不超过 5.0% 和 6.5%。此外,多数情况下,随着水深的增加,相对误差曲线逐渐升高,相对误差变大。由于本文采用刚好在水面之下的下行辐照度值逐层计算各个水深处的下行辐照度,每层水深处的下行辐照度的计算误差均逐层传递至下一水层的下行辐照度计算结果中,这是造成相对误差随着水深增加而逐渐变大的主要原因。另外,在含油水体中,下行辐照度随着水深的增加而逐渐减弱,在较深的水层中,由半分析模型计算得到的下行辐照度与 Hydrolight 模拟的下行辐照度之间较小的绝对误差也会引起较大的相对误差,这是造成相对误差随着水深增加而逐渐变大的另一原因。

$$E_d(z_2, \lambda) = E_d(z_1, \lambda) \exp[-k_d(z, \lambda)(z_2 - z_1)] \quad (5)$$

事实上,基于辐射传输理论建立的辐射传输模型

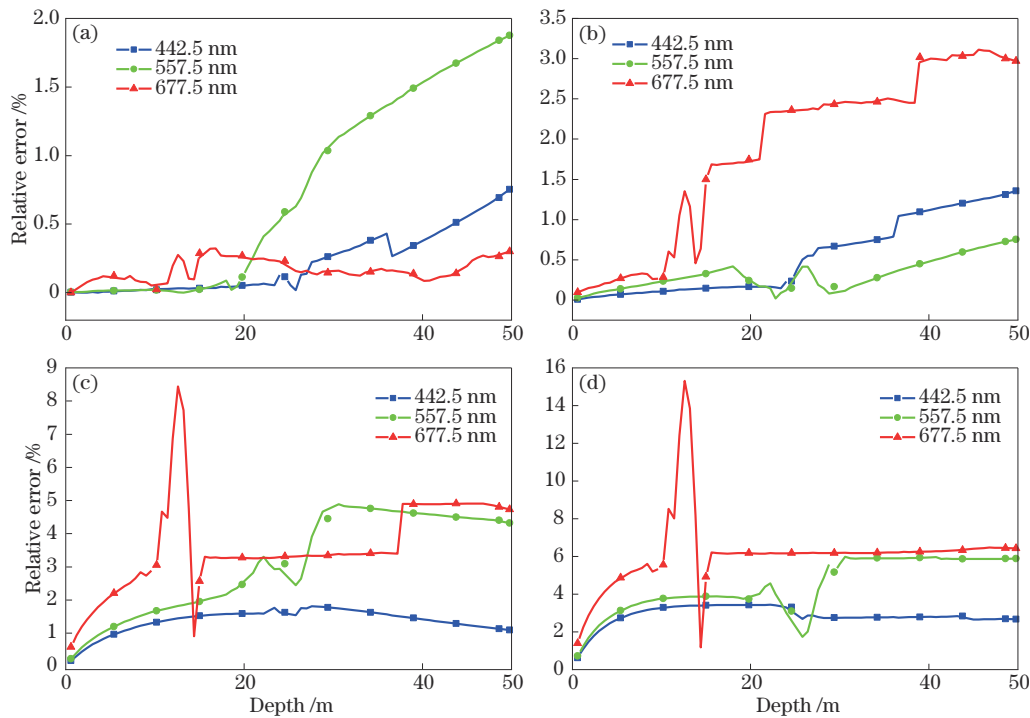


图 3 不同质量浓度水中油水体中半分析模型反演各水深处的下行辐照度与 Hydrolight 数值模拟的下行辐照度之间的相对误差。
(a) 0.1 mg/m³; (b) 1.0 mg/m³; (c) 5.0 mg/m³; (d) 10.0 mg/m³

Fig. 3 Relative error between downwelling irradiance (E_d) retrieved from semi-analytical model and E_d simulated by Hydrolight in each water depth polluted by different mass concentrations of dispersed oil. (a) 0.1 mg/m³; (b) 1.0 mg/m³; (c) 5.0 mg/m³; (d) 10.0 mg/m³

通常具有计算复杂及运算速度相对较慢等缺点。较小的相对误差表明通过半分析模型(查找表)计算含油水体下行辐照度是可行的,因此,与通过辐射传输模型模拟水体光场的方式获取含油水体下行辐照度的方式相比,查找表是一种高效、精确地获取含油水体下行辐照度的解决思路。

4 结 论

含油水体下行漫衰减系数是一种随水体深度变化而变化的一种表观光学特性,水体的辐射量(下行辐亮度、下行辐照度等)并不严格随着水深增加而呈固定的指数递减,尤其是在水体表层,这对于精确计算含油水体的辐射量及水下光场是至关重要的。

在含油水体中,水中油质量浓度的变化会引起水体的固有光学特性(如吸收系数、后向散射系数等)的变化。下行漫衰减系数主要受水体的吸收系数及后向散射系数控制,在含油水体中,随着水中油质量浓度的增加,水体下行漫衰减系数(400~800 nm)呈现出逐渐增大的趋势。此外,随着水中油质量浓度的增加,下行漫衰减系数随着水深的增加而增加的趋势也更加明显。然而,与自然水体相似,在到达一定深度时,下行漫衰减系数仍然遵循逐渐接近定常渐进值的规律,并且,随着水中油质量浓度的增加,下行漫衰减系数接近其定常渐进值的速度越快。

通过查找表方式构建含油水体下行漫衰减系数

半分析模型,并基于此半分析模型反演的下行漫衰减系数进一步计算得到水体各个水层的下行辐照度,将计算得到水体各个水深处的下行辐照度与 Hydrolight 辐射传输模型的数值模拟结果比较发现,查找表方式下行漫衰减系数半分析模型的精度足够高,可以计算得到相对误差较小的水体下行辐照度,为快速计算含油水体水下光场(下行辐照度)提供了一个可行的替代性解决方案。另外,由于含油水体的固有光学特性(如吸收系数和后向散射系数)与自然水体固有光学特性之间存在差异,含油水体的吸收系数和后向散射系数对下行漫衰减系数的贡献与自然水体的吸收系数和后向散射系数对下行漫衰减系数的贡献差异明显,这主要体现在半分析模型的参数大小变化上。上述差异表明,在研究含油水体水下光场及下行漫衰减系数时,不能简单套用自然水体的下行漫衰减系数半分析模型,否则会得出不精确的计算结果,甚至是不正确的结论。

参 考 文 献

- [1] Son S, Wang M H. Diffuse attenuation coefficient of the photosynthetically available radiation $K_d(\text{PAR})$ for global open ocean and coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 159: 250-258.
- [2] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, et al. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C2): C02017.

- [3] Mishra D R, Narumalani S, Rundquist D, et al. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: implications for water penetration by high resolution satellite data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 60(1): 48-64.
- [4] Wang G F, Cao W X, Yang D T, et al. Variation in downwelling diffuse attenuation coefficient in the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(3): 323-333.
- [5] Reinart A, Herlevi A. Diffuse attenuation coefficient in some Estonian and Finnish Lakes[J]. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology Ecology, 1999, 48(4): 267-283.
- [6] Zheng X B, Dickey T, Chang G. Variability of the downwelling diffuse attenuation coefficient with consideration of inelastic scattering[J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6477-6488.
- [7] Król T, Adam S, Freda W. Variability in the optical properties of a crude oil-seawater emulsion[J]. OCEANOLOGIA, 2006, 48(S): 203-211.
- [8] National Research Council (U. S.). Oil in the sea III: inputs, fates, and effects[M]. Washington, D. C.: National Academy Press, 2003.
- [9] Rudz K, Darecki M, Toczek H. Modelling the influence of oil content on optical properties of seawater in the Baltic Sea[J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2013, 8: 13063.
- [10] Drozdowska V, Freda W, Baszanowska E, et al. Spectral properties of natural and oil polluted Baltic seawater: results of measurements and modelling[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2013, 222(9): 2157-2170.
- [11] Mobley C, Boss E, Roesler C. Ocean optics web book [EB/OL]. (2020-08-24) [2020-10-19]. <https://www.oceanopticsbook.info/>.
- [12] Lee Z P, Shang S L, Stavn R. AOPs are not additive: on the biogeo-optical modeling of the diffuse attenuation coefficient[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 8.
- [13] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C2): C02016.
- [14] 黄妙芬, 唐军武, 宋庆君. 石油类污染水体吸收特性分析[J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 131-147.
- Huang M F, Tang J W, Song Q J. Analysis of petroleum-polluted water absorption spectral properties [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(1): 131-147.
- [15] 黄妙芬, 庄扬, 刘杨, 等. 大连港海域石油类物质比吸收系数特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3): 141-149.
- Huang M F, Zhuang Y, Liu Y, et al. Analysis on the characteristics of specific absorption coefficient of petroleum-polluted water in Dalian Port[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 141-149.
- [16] 骆蔚健, 黄妙芬, 杨俊杰, 等. 油藻混合水体遥感反射比光谱分析[J]. 海洋科学, 2021, 45(10): 49-60.
- Luo W J, Huang M F, Yang J J, et al. Remote sensing reflectance spectral analysis of oil and algae mixed water [J]. Marine Sciences, 2021, 45(10): 49-60.
- [17] 邢旭峰, 王忠林, 黄妙芬, 等. 石油污染水体油浓度及后向散射系数垂向变化特性分析[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(4): 75-81.
- Xing X F, Wang Z L, Huang M F, et al. Vertical variation characteristics of petroleum concentration and backscattering coefficient in petroleum-polluted water body[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(4): 75-81.
- [18] 宋庆君, 黄妙芬, 唐军武, 等. 水中石油类含量对后向散射系数光谱的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2438-2442.
- Song Q J, Huang M F, Tang J W, et al. Influence of petroleum concentration in water on spectral backscattering coefficient[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2438-2442.
- [19] 黄妙芬, 宋庆君, 唐军武, 等. 石油类污染水体后向散射特性分析: 以辽宁省盘锦市双台子河和绕阳河为例[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 12-20.
- Huang M F, Song Q J, Tang J W, et al. Analysis of backscattering properties of petroleum polluted water: a case study at the Liaohe River and the Raoyang River in Laoning Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3): 12-20.