doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.03.002

应用 Hydrolight 模式研究含油水体辐射传输特性 的关键技术

黄妙芬1,骆蔚健1,刘杨2,邢旭峰1,庄炀1

(1.广东海洋大学,广东 湛江 524088;2.中国石油勘探开发研究院测井与遥感所,北京 100083)

摘 要: 辐射传输模式 Hydrolight 在国际水色遥感研究领域已被广泛用于解决水体光学的各种问题,也是进行石油类污染水体辐射传输特性研究的有效模型。结合 Hydrolight 模式的机理、应用现状及含油水体的特点,提出了将该模式应用于光学特性复杂的石油污染水体辐射传输特性研究时需要解决的关键技术,包括测定石油污染水体吸收系数和散射系数、建立石油污染吸收和散射特性随波长和深度变化的参数化模型、确定油物质的吸附后悬浮颗粒物体散射函数模型等方面。依据 2018 年 8 月和 2016 年 8 月分别在辽宁大连港和辽宁盘锦辽河油田等区域测定的含油水体数据,讨论了这些关键技术的解决方案。

关键词:Hydrolight 模式:石油污染水体:辐射传输:关键技术

中图分类号:P237 文献标志码:A 文章编号:1003-2029(2019)03-0007-08

石油作为不可再生的战略性资源和"政治性商 品",在国民经济和国际关系中起着举足轻重的作 用。我国在沿海、沿江、沿河区域已经形成了石油化 工基地,在陆地上相继开发了十几个石油基地,在 渤海、东海和南海等近海海域上建立了一批采油平 台,这些基地和平台的建成,使得我国众多水域面 临严峻的油污染问题。大量含油污染物进入水体后 会改变自然水体原有的辐射传输特性,从而影响着 水域的生态环境。开展石油污染水体辐射传输特性 的研究,对于水域生态文明建设与环境保护等具有 重要的应用前景。

针对自然水体辐射特性的数值模拟已经有了 完整的研究,并开发了辐射传输模式 Hydrolight,该 模式在国际水色遥感研究领域多个方面得到广泛 应用^{III},众多学者从不同的角度利用 Hydrolight 展开 了大量的相关研究,主要体现在以下几个方面:(1) 遥感反射比的模拟^[2-3];(2)水下光场参数的模拟^[4-6]; (3)遥感反演算法评估^[7-8]等方面。 石油类污染物主要以漂浮油、分散油、乳化油和分解油等形式存在于水体中,其中漂浮油以油膜形式存在,分解油和分散油主要以黄色物质的形式存在,而乳化油主要以颗粒物的形式附着于水体的悬浮颗粒物上,因而石油类物质对水体吸收系数的影响主要通过黄色物质体现,石油类物质对水体散射系数的影响主要通过无机悬浮物来体现¹⁰⁻¹⁰。石油污染水体属于 II 类水体,石油类物质的存在改变了自然水体的吸收和散射特性,必然也导致含油水体的辐射传输特性的改变,因而辐射传输模式Hydrolight可作为进行石油类污染水体辐射传输特性的改变,因而辐射传输特性

本文在综合分析 Hydrolight 的机理及应用现状 的基础上,结合石油污染水体的表观光学特性、固 有光学特性、识别模式等内容,针对该模型应用于 光学特性复杂的石油污染水体辐射传输特性研究 时需要解决的关键技术展开。利用 Hydrolight 对光 学特性复杂的石油污染水体辐射传输特性展开研

收稿日期:2019-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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资助 (GDOU2017052501);广东海洋大学科研启动经费资助项目(E16187)

作者简介:黄妙芬(1963-),女,博士,教授,主要研究方向为遥感技术。E-mail: hmf808@163.com

究,有助于推动水色遥感基础研究和应用研究的进程。研究成果对于完善各类水体辐射传输模型的研究具有重要的理论意义,可为"陆海统筹、以海定陆"的环境治理思想提供科学、及时、有效的数据基础与技术支撑;还可为水体石油类污染监测提供技术手段,以及为油田环境效应评价提供依据。

1 Hydrolight 的机理分析

Hydrolight 模式根据不同的输入数据和相应的 算法模型来模拟所需要的大气(水体)辐射传输方 程、各种水体光学参数以及光场分布等一系列的光 学特征,是计算自然水体中的辐射分布和其他特征 量的一个辐射传输数值模式^[12]。

1.1 辐射传输方程的求解方法

水体辐射传输特性的研究可通过水体辐射传 输方程来进行。水体辐射传输方程是指定量地研究 辐射能通过水体受到多次散射和吸收后,辐射场的 空间分布及光谱分布的变化。在给定入射太阳光的 情况下,光线在水体中的传输模型可以表示为水体 的吸收系数 *a*、散射系数 *b* 和体散射函数 β 函数关 系^[13],如公式 1 所示:

$$\cos(\theta) \frac{\mathrm{d}L(z,\theta,\varphi,\lambda)}{\mathrm{d}z} = -c(z,\lambda)L(z,\theta,\varphi,\lambda) + \left[\int_{4\pi} L(z,\theta',\varphi',\lambda)\beta(z;\theta'\varphi' \longrightarrow \theta,\varphi;\lambda)\mathrm{d}\Omega' + S(z,\theta,\varphi,\lambda) \right]$$
(1)

式中: $L(z, \theta, \varphi, \lambda)$ 为辐亮度,mW·cm⁻²·sr⁻¹·nm⁻¹; θ 和 φ 分别为入射方向的天顶角和方位角; θ', φ' 分别为散射方向的天顶角和方位角; $\theta', \varphi' \rightarrow \theta, \varphi$ 表示入射方向与散射方向的夹角,即散射角; Ω' 为散射辐射的立体角;z 为水体某一深度,m; λ 为波长,nm; $\beta(z; \theta'\varphi' \rightarrow \theta, \varphi; \lambda)$ 为体散射函数,m⁻¹·sr⁻¹;c 为衰减系数,m⁻¹,等于吸收系数 a 与散射系数 b 之和; $S(z, \theta, \varphi, \lambda)$ 可以描述为像生物发光性这样的内部光源或者其他波长导致的非弹性散射光。在解辐射传输方程时,表面波、海底特性和入射辐射是必须要考虑的。给定水体的固有光学特性(Inherent Optical Properties,IOPs)和合适的边界条件后,辐射传输方程就可以通过数值解的方法求解出来,得到辐亮度分布情况。

对水体辐射传输特性的研究首先就是求解水 体辐射传输方程。由于方程本身的复杂性及边界条 件的限制,只能利用数值分析的方法得到数值解, 求辐射传输方程数值解的方法有 Monte Carlo 光线 追踪法、不变嵌入法、离散坐标法和矩阵算法等^[14]。 辐射传输模式 HydroLight 为美国学者 Mobley 采用 不变嵌入技术求解上述方程,以获得辐亮度随水 深、天顶角、方位角、波长的分布变化情况^[15]。

1.2 Hydrolight 模式输入与输出物理量

从水体参数获取这一角度看,Hydrolight 模式 属于正演过程。它是根据水体的固有光学特性 (Inherent Optical Properties,IOPs)、水体各组分的浓 度和环境背景参数,通过辐射传输方程,得到随水 深、天顶角、方位角、波长的分布变化的辐亮度,再 进一步推算能完整地刻画出各类水体的辐射传输 特性的表观光学特性^[16]。

1.2.1 Hydrolight 模式的输入量

(1) 固有光学特性 IOPs

固有光学性质是指与光照无关,仅由海水本身 物理性质和光学特性决定的水体光学性质。主要包 括吸收系数 (Absorption Coefficient) a、散射系数 (Scattering Coefficient)b、体散射函数 (Volume Scattering Function, VSF) β (m⁻¹·sr⁻¹),以及光束衰减 系数(Beam Attenuation Coefficient)c (m⁻¹),单次散射 反照率(Single scattering albedo) ω_0 (无量纲),相函数 (scattering phase functions) $P(sr^{-1})$,这些固有光学量 之间的关系可以用图 1 来表示。



Fig.1 Relation diagram of inherent optical properties

根据图 1 可以看到,如果能直接测定吸收系数 a 和散射系数 b,就可以得到光衰减系数 c,单次散 射反照率 ω_0 ;如果能测量到体散射函数 β ,或者通过 Mie 散射理论计算出 β ,就可以进一步求出散射系 数相函数 $P(\theta)$ 。

在运用 Hydrolight 模式时, IOPs 的输入视不同 的水体组分组合情况而定。Hydrolight 模式提供了 6 种水体模型和一种用户自定义方式,每一种模型中 水体的组分组成是不同,因而 IOPs 有不同的输入方 式,主要可归纳为以下:(1)采用仪器测量的吸收系 数、散射系数、衰减系数体和散射函数;(2)采用仪 器测量的吸收系数、散射系数,体散射函数模型由 Hydrolight模式提供选择,一种是FF体散射函数模 型,另外一种是Petzold体散射模型^[17-18];(3)通过 输入水体各组分的浓度和比吸收系数(Specific absorption coefficient) 和比散射系数(Specific scattering coefficient),从而求出吸收系数和散射系 数;(4)所有的参数在Hydrolight模式提供的标准 模型中进行选择。

(2) 环境条件参数

在运用 Hydrolight 模式时,输入的参数中还包括边界条件、生物发光源和非弹性散射等环境参数。

边界条件包括入射在海表面的太阳直接辐射、 天空辐射分布、水汽界面边界条件、水底边界性质 等,海面辐照度的计算可采用 RADTRAN 半经验天 空模型或者理想天空模型,海面的辐亮度计算可采 用 Combes and Harrison 方法或者理想天空模型。天 空辐亮度和辐照度的计算可选择半经验模型、理想 模型或者是用户自己根据辐射传递模型(如 MODTRAN)计算的数据。Hydrolight模式模拟水汽界 面边界条件采用的是 Cox-Munk 毛细波斜面统计 学,描述出光学反射以及在适当风速及太阳高度角 下(solar angles away from the horizon)海表的传输特 性。水底边界性质的设定分为无限深水和有限深水 两种情况,有限深时必须定义海底反射率,太阳和 天空光入射辐照度以及太阳天顶角,水深等^[1]。

Hydrolight 模式还提供了生物发光源的选项, 对于考虑均质层水体生物发光问题时,可选择此 项。非弹性散射(叶绿素荧光、CDOM 荧光)、非弹性 散射如拉曼散射(Raman),Hydrolight 采用平均方位 角模式(azimuthally-averaged formulation)对 Mobley 在 1994 年提出的拉曼散射进行处理^[19];通过计算组 分的吸收并基于荧光效应再分配函数来计算荧光 的光量。

1.2.2 Hydrolight 模式的输出量 HydroLight 模式 通过假设水体是由光学上独立的"水层"组成,每一 层都可以模拟成水平均匀的水体,其光学性质仅随 深度变化,然后在每一水层的中心应用一维辐射传 输模型(一维是深度),来模拟整个水平不均匀的水 体,由此得到任意离开水表面及水体中与时间无关 的辐亮度分布,所计算出的光谱辐亮度分布是水体 深度、方向和波长的函数^[20]。Hydrolight 模式输出随 水深、天顶角、方位角、波长的分布变化的辐亮度 L (*z*,*θ*,*φ*,*λ*)。实际上由于辐亮度是一个基本的辐射参量,一旦辐亮度已知,其他的水体光学参量都可以 计算出来^[1],如图2所示。



Fig.2 Flow diagram of other underwater optical parameters solved by Radiance $L(z,\theta,\varphi,\lambda)$

分析图 2 可见, 辐亮度确定后, 第一层次可以 推算出辐照度衰减系数、标量辐照度、辐照度和光 合有效辐射等光学参数,其中标量辐照度可分为上 行标量辐照度和下行标量辐照度, 辐照度可细分为 上行辐照度和下行辐照度; 在此基础上可进一步推 算出平行余弦、遥感反射比、各辐照度对应的衰减 系数导尿管, 其中平均余弦为辐照度与标量辐照度 之比, 遥感反射比为上行辐照度与下行辐照度之 比。有了这些参数就可完整地描述在某些水体组分 存在时的整个水下光场分布情况。

2 石油污染水体应用 Hydroligh 模式 的关键技术

Hydrolight 模式中提供了 7 种水体模型,其中 最后一种"A UESR-DEFINDED IOP MODEL"模型 允许用户根据研究区域情况自定义水体组分,只要 遵循以下两个原则即可:(1) 总吸收和总散射为各 组分吸收和散射的线性加和;(2) 组分数最多为 10 个。这项功能为在 Hydrolight 中增加一个水色因子 来对石油污染水体进行辐射传输特性进行研究提 供了可行性。

由于该水体模型中,组分个数及种类是用户自

行定义的,因而用户需要自己获取所定义组分对应 的吸收系数、散射系数随波长和深度变化的参数化 模型、以及体散射函数。为此,对这些参数的测定、 参数化模型的建立、散射相函数的确定,成为将 Hydrolight模式应用于石油污染水体辐射传输过程 研究的关键技术。

2.1 石油类物质吸收系数的测定技术

现有的水体吸收系数测量规范遵循的是美国 NASA 所提供的标准,主要测量水色三要素(黄色物 质、非色素颗粒物和色素颗粒物)的吸收系数,尚无 专门针对石油类物质吸收系数的测量规范。

实际上,如果能在实验室内,将正常水体和受 石油污染水体分别置于分光光度计两条光路上,通 过测定石油物质的光学密度,然后计算污染水体中 石油物质的吸收系数,是最有效获取石油类物质吸 收系数的方法。但目前对于石油类污染水体样本的 获取,一般是采用野外采集水样,然后用四氯化碳 萃取的方法,由于四氯化碳挥发性较强,不利于样 本的长时间保存,加上四氯化碳属于有机溶剂,使 得将正常水体和受石油污染水体分别置于分光光 度计两条光路上直接测定石油类污染吸收系数的 方式未能实现,这是今后要进行的实验研究工作。

另外,在测量石油物质浓度时,石油物质是用 正己烷或者四氯化碳直接萃取出来的,因而采用黄 色物质吸收系数测量规范是可直接用正己烷或者 四氯化碳代替纯水作为参比样,但由于四氯化碳有 毒且易挥发,所以选择正己烷更为合适一些。这两 种方式哪一种更适合需要进行进一步的标准化和 规范化研究。

2.2 石油类物质与颗粒物后向散射系数的分离技术

对于受到石油类物质影响的水域,石油类物质 会通过附着在颗粒物的表面,借助无机悬浮物来对 水体后向散射系数产生影响,由此可见测量的水体 后向散射系数包含了油和颗粒物的贡献,这需要进 一步区分石油类物质和颗粒物对后向散射的贡献¹⁰⁰。

散射光的强度会随着散射角(θ)和波长(λ)而变化, 一般用水体体积散射函数 $\beta(\lambda, \theta)$ (Volume scattering function)(m⁻¹·sr⁻¹)来描述这种变化。当 $\beta(\lambda, \theta)$ 对空 间散射立体角 θ 在 [$\pi/2, \pi$] 范围内进行积分得到的 为水体的后向散射系数(back scattering coefficient) b_{δ} (m⁻¹)。根据米散射理论,有:

$$b_{b}(\lambda)=2\pi\int_{\pi/2}\beta(\theta,\lambda)\sin\theta\mathrm{d}\theta$$
 (1)

$$\mathcal{B}(\theta,\lambda) = N(D) \frac{\pi}{4} D^2 Q_{\beta(\theta)}(D,m_p,\lambda)$$
(2)

式中:N 为粒径分布函数;Q_{β00}为后向散射效率, 其为颗粒物粒径 D,相对折射指数 m_p和波长 λ 的 函数。有了上述理论模型做基础,利用构建的体散 射函数测量系统就可以计算出各种颗粒物的体散 射函数和后向散射系数。

目前国内外常用于直接测量水体后向散射系数的仪器主要有以下 2 类;(1) 美国 Hobilabs 公司 生产的 HS-6 (HydroScat-6 Spectral Back scattering Sensor, 6 通道后向散射仪);(2) 美国 Wetlabs 公司 生产的散射仪(BB9)。这两种仪器直接直接测量的 都是油与颗粒物混合水体的后向散射系数。美国 Wyatt 公司生产的 DAWN HELEOS II 18 角度激光 散射仪可以测量 18 角度的散射强度,美国 SEQUOIA 公司生产的 LISST-100B 激光粒径仪可 以直接测量颗粒物的浓度和粒径的大小。黄妙芬等 ^[21](2017)选择折射系数已知的石英砂将这两种仪器 结合,再辅以 Mie 散射理论,计算出了油和颗粒物 的体散射函数,确定混合水样的复折射指数(等效指 数),这为将油和颗粒物后向散射系数分离出来提 供了技术支撑。

2.3 石油污染吸收和散射特性随波长和深度变化 的参数化模型

2.3.1 吸收系数参数化模型 根据 2016 年 8 月和 2018 年 8 月分别在辽宁盘锦辽河油田和大连港进 行的含油水体的测量,建立吸收系数随深度和随波 长变化的参数化模型。实验中石油物质的吸收系数 采用如下方式获取:测量无油水体吸收系数,测量 有油水体吸收系数,然后把无油水体作为本底值, 用有油水体的吸收系数减去无油水体的吸收系数, 相当于去除了黄色物质的吸收系数,这样得到的就 是油物质的吸收系数。



图 3 为不同深度的石油物质吸收系数随波长



变化图,分析图可以看到,各个深度的石油物质吸收系数随波长变化都呈现出 e 指数衰减规律。

因此,图3的曲线可用式(3)来表示:

 $a_{o}(\lambda . z) = a_{o}(\lambda_{0} . z) \exp[-S(z)(\lambda - \lambda_{0})]$ (3)

式中: $a_0(\lambda.z)$ 为石油物质随深度和波长变化的 吸收系数,m⁻¹; $a_0(\lambda_{0.z})$ 为石油物质在参考波长处的吸 收系数;z为深度的函数,m⁻¹;S(z)为随深度变化的光 谱吸收斜率。根据公式(3)可以看到,只要求出各个 深度层的S(z),就可以得到参数化的吸收系数变化 特征。

根据实测数据,在含油水体中,*a*₆(λ.*z*)的变化范 围在 0.02~0.45 m⁻¹之间。表 1 为利用 15 个站点 5 个深度(0 m, 3 m, 5 m, 10 m, 15 m)的实测数据 *S* 平均 取值,计算得到 *S*(*z*)变化范围在 0.012 268~0.01 849 m⁻¹ 之间。

表 1 不同深度的 S 取值

Tab.1 The values of <i>S</i> at different depths		
深度/m	S(z)	
0	0.015 913	
3	0.016 354	
5	0.015 840	
10	0.015 886	
15	0.014 920	

2.3.2 后向散射系数参数化模型 Song et al.^[22] (2010)根据现场测定和配比试验的数据,建立了石 油污染水体后向散射系数的参数化模型,利用该模 型可以反演出水体石油类浓度,但石油水体后向散 射系数随波长变化的参数化模型尚无建立,确定后 向散射系数随波长变化的参数模型是今后需要进 一步研究的关键技术。

图 4 是在大连港其中 1 个站点,利用的美国 Hobilabs 公司生产六通道后向散射仪 (HydroScat-6 Sprctral Backscattering Sensor, HS6, 140°),测量的石 油物质后向散射系数随深度的变化曲线图, 6 个通



Fig.4 The change curves of b_b in oil pollution water bodies with depth

道对应的波长为 420 nm,442 nm,470 nm,510 nm, 590 nm,700 nm。

分析图 4 可以看到,该站点的后向散射系数随 深度的变化为陡增型,随着深度增加,b_b量值变化 不大,在 11.5 m 处突然剧增,该类型可以用指数方 程来表达,如公式(4)。表 2 给出了指数方程对应 6 个波段所取的系数值。

$$b_b = k_1 e^k 2^z \tag{4}$$

式中: b_b 为后向散射系数, m^{-1} ; $k_1(m^{-7})$ 和 $k_2(m^{-6})$ 为系数;z为深度, m_o

表 2 陡增型拟合的系数值

Tab.2 Fitting coefficient values of spurt type

波长/nm	k_1	k_2	R_2
420	0.011 7	0.015 3	0.855 6
442	0.012 0	0.015 1	0.838 5
470	0.010 7	0.015 6	0.840 7
510	0.011 0	0.016 5	0.864 7
590	0.009 8	0.016 5	0.853 4
700	0.008 5	0.016 4	0.829 8

2.4 含油水体体散射 β(θ)函数表达式的确定

散射相函数 *P*(θ)是水体辐射传输方程的自变量,为 Hydrolight 模拟模型的重要输入参数。根据图 1 可以看到,散射相函数(sr⁻¹)定义为体散射函数 β(θ) 除以散射系数 b 得到。体积散射函数 β(θ)是关于散 射角的函数,用来描述散射光强随散射角变化的特 征,因而众多学者对体散射函数的计算方法进行了 研究,得到了不同的表达式。在 Hydrolight 模拟模型 中普遍采用的是 Fournier and Forand^[25](1994)提出 的 FF 体散射函数,在此基础上进一步求解出散射 相函数。

FF 体散射函数基于单个粒子的精确 Mie 理论 计算,进而计算粒径具有双曲线分布形式的颗粒物 的体散射,其表达式为:

$$\beta(\theta) = \frac{1}{4\pi (1-\delta)^{2} \delta^{\nu}} \left\{ \upsilon(1-\delta) - (1-\delta^{\nu}) + [\delta(1-\delta^{\nu}) - \upsilon(1-\delta)] \sin^{-2}(\frac{\theta}{2}) \right\} + \frac{1-\delta^{\nu}_{180}}{4\pi (\delta_{180}-1) \delta^{\nu}_{180}} (3\cos^{2}(\theta)-1) \quad (5)$$

式中: $v=\frac{3-\mu}{2}$, $\delta=\frac{4}{3(n-1)^2}\sin^2(\frac{\theta}{2})$; μ 为粒径剖

面系数;n为折射率; θ 为散射角; δ_{180} 为 θ =180°时 δ_{\circ}

根据 FF 体散射函数近似计算方法,体散射函数主要受 3 个因素的影响,即后向散射系数与散射系数的比值(称为后向散射率),粒径的分布即粒径

剖面系数μ,折射指数n。对于颗粒物这3个参数都 有经验的获取方法,一般取其标准值μ=3.5835,n= 1.10,后向散射率取0.0183^[5]。对于含油水体,石油 物质的吸附必然改变体散射函数,因而如何确定石 油污染水体中这3个参数是需要研究的关键问题。 另外由于散射相函数具有较强的区域性,一些学者 ^[3]就根据各自研究区域的特性,对相散射函数的表 达式进行了改进。

3 结束语

水体辐射传输特性的研究可通过水体辐射传 输方程来进行。在给定入射太阳光的情况下,光线 在水体中的传输模型可以表示为水体的吸收系数 (a)、散射系数(b)和体散射系数β(θ)函数关系。 Hydroligh 模式模拟的准确度与输入参数的精度有 关,这就要求我们要对输入参数的误差进行控制。 文中对含油水体的这些参数的获取关键技术进行 了分析,可起到抛砖引玉的作用。

石油物质吸收系数的精确测量及规范形成需 要再进一步研究,石油物质吸收系数参数化模型虽 然已经建立,但其适用性及精度需要更多实验数据 来验证。石油物质后向散射系数随波长变化的参数 化模型建立,以及石油物质和颗粒物后向散射系数 分离算法的确定也是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Mobely C D, Sundman L K. Hydrolight 5.2-Ecolight 5.2 Techical Documentation[M]. Sequoia Scientific Inc, 2013:115.
- [2] Nima Pahlevan, John R. Schott, Bryan A. Franz, et al. Landsat 8 remote sensing reflectance (Rrs) products: Evalutaions, intercomparisons, and enhancements[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 289–301.
- [3] MA Chunyong, XU Shu, WANG Hongsong, et al. A Real-Time Photo-Realistic Rendering Algorithm of Ocean Color Based on Bio-Optical Model [J]. J Ocean Univ China (Oceanic and Coastal Sea Research), 2016, 15 (6): 996–1006.
- [4] Hubert Loisel, Vincent Vantrepotte, Sylvain Ouillon, et al. Assessment and anlysisi of the chlorophyll–a concentration variabilitu over the Vietnanmese coastal water from the Meris ocean color sensor (2002–2012) [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 217–232.
- [5] Balasubramanian Sundarabalan, Palanisamy Shanmugam, Yu-Hwan Ahn. Modeling the Underwater Light Field Fluctuations in Coastal Oceanic Water: Validation with Experimental Data [J]. Ocean Science Journal, 2016, 51(1):67–86.
- [6] M Blum, V V Rozanov, J P Burrows, et al. Coupled ocean-atmosphere radiative transfer model in the framework of software package SCIATRAN: Selected comparisons to model and satellite data [J]. Advances in Space Research, 2012, 49:1728–1742.
- [7] Martin Ligi, Tiit Kutser, Kari Kallio, et al. Testing the performance of empirical remote sensing algorithms in the Baltic Sea waters with modeled and in situ reflectance data [J]. Oceanologia, 2017, 59:57–68.
- [8] John R Schott, Aaron Gerace, Curtis E Woodcock, et al. The impact of improved signal-to-noise ratio on algorithm performance: case studies for Landsat class instruments [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:37–45.
- [9] 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): 140-156.
 HUANG Miaofen, TANG Junwu, SONG Qingjun. Analysis of petroleum polluted water absorption spectral properties [J]. Journal of Remote Sensing, 2010,14(1): 140-156.
- [10] 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[J]. 海洋学报, 2009, 31(3):12-20.
 HUANG Miaofen, SONG Qingjun, TANG Junwu. Analysis of backscattering properties of petroleum polluted water: a case study at the Liaohe River and the Raoyang River in Liaoning Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3):12-20.
- [11] 黄妙芬等. 水体石油类污染遥感探测机理与信息提取方法[M]. 北京:科学出版社,2016. HUANG Miaofen. Remote sensing detection mechanism and information extraction method of water petroleum pollution[M].Beijing: Science Press, 2016.
- [12] Mobely C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. Applied optics, 1999, 38 (36): 7442-7455.
- [13] Mobley C D. Radiative transfer in the ocean equation[M]. San Diego: Academic Press, 2001.

- [14] 黄佳慧,段洪涛,马荣华,等. 基于 Hydrolight 的太湖水体区域化固有光学模型参数率定与验证[J]. 中国科学院大学学报,2014,31(5):613-625.
 HUANG Jiahui, DUAN Hongtao, MA Ronghua, et al. Study on regional parameters of radiative transfer simulation based on Hydrolight in Taihu Lake[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014,31(5):613-625.
- [15] Hedley J D, Mobley C D, Sumdman L K. Hydrolight 5.3 users' guide[M]. Numerical Optics Ltd, 2017.
- [16] Mobley C D, Sundman L K, Boss E. Phase function effects on oceanic light fields [J]. Applied Optics, 2002, 41(6):1035-1050.
- [17] Fournier G, Forand J L. Analytic phase function for ocean water in Ocean Optics XII[C]// Proceedings of SPIE, 1994, 2558:194-201.
- [18] Petzold T J. Volume scattering function for selected ocean waters [M]. SanDiego: Scripps Institute of Oceanography, 1972.
- [19] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [M].San Diego:Academic Press, 1994.
- [20] 王云飞.东海赤潮监测卫星遥感方法研究[D].青岛:中国海洋大学, 2009.

Wang Yunfei. Monitoring studies of red tides in the East Sea using satellite data[D]. China Ocean university, 2009.

[21] 黄妙芬,邢旭峰,宋庆君,等.油砂混合水体后向散射系数光谱贡献分离算法 I:实验理论[J].光谱学与光谱分析,2017,37(1): 205-211.

Huang Miaofen, Xing Xufeng, Song Qingjun, et al. New algorithms to separate the contribution of petroleum substances and suspended particulate matter on the scattering coefficient spectrum from mixed water [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37 (1):205–211.

- [22] Song Qingjun, Huang Miaofen, Tang Junwu, et al. Influence of petroleum concentration in water on spectral backscattering coefficient [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2438–2442.
- [23] Raul Acosta-Herazo, Jesus Monterroza-Romero, Miguel Angel Mueses, et al. Coupling the six flux absorption-scattering model to the Henyey Greenstein scattering phase function: evaluation and optimization of radiation absorption in solar heterogeneous photoreactors [J]. Chemical Engineering Journal, 2016,302: 86–98.

The Key Technology for Studying the Radiation Transmission Characteristics of Petroleum–Polluted Water Using the Hydrolight Mode

HUANG Miao-fen¹, LUO Wei-jian¹, LIU Yang², XING Xu-feng¹, ZHUANG Yang¹

1. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong Province, China;

2. PetroChina Exploration & Development Research Institute, Beijing 100083, China

Abstract: The radiation transmission mode of Hydrolight has been widely applied to solve various water optial problems in the international field of water color remote sensing research, and it is also an effective model for studying the radiation transmission characteristics of petroleum–polluted water. Combining with the Hydrolight mode mechanism, application status and the characteristics of petroleum–polluted water, this paper puts forward the key technology needed to be solved when applying the model to study the radiation transmission characteristics tias of petroleum–polluted waters, including the determination of absorption coefficient and scattering coefficients of petroleum–polluted waters, establishment of the parametric model of the petroleum–polluted absorption and scattering properties varying with wavelength and depth, and determination of the volume scattering function of suspended particles after absorbing petroleum matters. Based on the petroleum–polluted data measured in the Dalian Port of Liaoning Province in August 2018 and the Liaohe Oilfield in Panjin, Liaoning Province in August 2016, the solutions to these key technologies are discussed in this paper. **Key words**; Hydrolight mode; oil pollution of water bodies; radiation transmission; key technology