

海洋水色 遥感机理及反演

*HAIYANG SHUISE YAOGAN
JILI JI FANYAN*

潘德炉 毛志华 主编



海洋出版社

海洋水色遥感机理及反演

潘德炉 毛志华 主编

海洋出版社

2012年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

海洋水色遥感机理及反演/潘德炉, 毛志华主编.

—北京: 海洋出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8188 - 0

I. ①海… II. ①潘… ②毛… III. ①水色 - 海洋遥感 - 文集 IV. ①P715.7 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 283052 号

责任编辑: 杨传霞

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

开本: 889mm × 1194mm 1/16 印张: 24.25

字数: 602 千字 定价: 90.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

20多年前,我们出海做试验,吃住在位于浙江嵊泗岛的渔民家,淳朴的渔民总是把各种海鲜让我们品尝和享用。用餐间,出于好奇和对知识的追求,我们向船老大请教了一个问题:“你们怎么知道在茫茫大海哪里有鱼,何时撒网?”他不假思索地告诉我们:“听其音,观其色。”中国传统渔民就是靠他们敏锐的耳朵听潮流声、明亮的眼睛看海面水色,在海上捕鱼,养育了一代又一代的渔家子孙。随着科技的发展,当今,人们已用声呐“测其音”,用遥感卫星“观其色”。利用人造卫星“观其色”捕鱼,仅仅是海洋遥感应用的冰山一角。其实,水色可以帮助研究和认知许许多多变化无穷的海洋现象和奥秘。

人眼所看到的海洋水色完全由海水的光学特性所决定,卫星水色遥感是通过卫星遥感器测量到海水的散射和吸收等固有光学特性量来反演海洋水色因子,如叶绿素、悬浮泥沙和其他带色物质的浓度,所以海洋水色遥感也称为海洋可见光遥感。但卫星遥感器接收到的总能量不仅仅来自海洋,更多的来自大气,其中来自水体的辐射量只有5%~15%左右。这样,海洋水色遥感的首要任务是去掉大气辐射的干扰,即大气校正;其二,从去掉大气辐射后微小的海洋辐射量中反演海洋水体的固有光学量和海洋水色因子;其三,将反演得到的水色因子产品,应用到海洋环境监测、海洋资源的利用与保护、海洋灾害监测和海洋权益维护中。于是,大气校正、水色因子反演和遥感产品应用成为了卫星海洋水色遥感科学技术的三部曲。茫茫大海水色变化与风浪流密切相关,要想认知一望无际的海面水色多彩变化的过程和成因,就要发展探测海洋风、浪和流等动力特征的微波遥感技术,利用微波探测的最大优势是能穿云破雾;于是水色与微波遥感的互融应用,构成了观察海洋全天候的“千里眼”。近10年来,我团队培养的水色和微波遥感博士研究生们克服晕船等重重困难,活跃在渤海、黄海、东海和南海,开展星地同步的遥感实验,不畏艰苦挖掘遥感信息之源,同时又敢想敢做,打开了遥感产品服务之门。他们通过辛勤的劳动,以深奥的科技音符谱写了优美动听的水色遥感三部曲和穿云破雾的微波遥感曲——博士论文。现将它们连同少数几篇优秀硕士论文汇集成书,希望为我国水色和微波遥感科学的发展推波助澜。

本书由3篇博士论文及1篇优秀硕士论文组成,从中读者会品味到海洋水色

遥感的深奥机理和复杂的反演模式。

陶邦一博士论文《水体遥感反射率的辐射传输模拟研究》(2011年)紧紧围绕卫星水色遥感所要测量的水体遥感反射率展开,基于矩阵算法的剖解,建立了一个包含非弹性散射过程的水体辐射传输数值模型,并利用该模型深入探讨了水体非弹性散射过程对我国沿海浑浊二类水体遥感反射率的影响,从而为复杂海况下现场实测水体固有光学特性量与遥感反射率之间的一致性校正找到了新途径。

白雁博士论文《中国近海固有光学量及有机碳卫星遥感反演研究》(2007年)瞄准海洋碳循环研究热点,通过我国黄东海海区固有光学特征的分析,系统地探索并建立了适用于该海区固有光学量的遥感半分析算法的模式,同时通过海上实测资料支撑,在研究海洋水体总悬浮浓度(TSM)、有机颗粒物浓度(POM)和颗粒有机碳(POC)、溶解有机碳(DOC)浓度的生化-光学特征基础上,发展了黄东海的POC和DOC的遥感反演算法,为我国遥感监测海洋碳循环跨出了可喜的第一步。

王迪峰博士论文《海洋航空高光谱遥感大气校正机理及模型研究》(2010年)以机载高光谱成像仪所获得的航空遥感资料为对象,基于MODTRAN的大气辐射传输模式在航空高度下的高光谱辐射传输过程发现了海面水汽透过率与水汽含量的定量关系,为海上低空复杂大气条件下航空高光谱海洋遥感大气校正的精度提高提供了关键技术支撑。

何贤强硕士论文《利用海洋水色遥感数据反演海水透明度的研究》(2002年)在深入剖析SeaDAS大气校正基础上,提出了一种新的二类水体大气校正算法,并通过影响透明度的各因子分析,以及比较了国际上现有的Poole-Atkins和Duntley-Preisendorfer透明度反演模式基础上,提出了水下中尺度目标物能见度概念,从而建立了一种适用于我国海区新的海水透明度的遥感反演模型。

本书是一本反映海洋水色遥感机理及反演算法选编的论文集,在导师们的苦心指导下,各论文作者将点滴辛勤汗水洒在海洋水色遥感机理及反演研究中,结出了累累硕果。我们欣喜地看到他们正在茁壮成长,青出于蓝而胜于蓝。同时也要指出,他们的成长过程中难免有不足,也自然反映在论文中,敬请读者指正。

编者

2011年10月

CONTENTS

论文一：水体遥感反射率的辐射传输模拟研究

1 引言	(3)
1.1 研究的目的与意义	(3)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.2.1 水体辐射传输研究现状	(4)
1.2.2 水体光学特性测量研究	(5)
1.3 论文研究内容	(7)
2 水体辐射传输数值模型	(8)
2.1 自然水体辐射传输理论	(8)
2.1.1 辐射传输的基本知识	(8)
2.1.2 自然水体的光学特性	(11)
2.1.3 水体辐射传输方程	(14)
2.2 水体辐射传输数值模型的建立	(18)
2.2.1 矩阵算法原理	(18)
2.2.2 数值方法介绍	(20)
2.2.3 气-水界面与底边界问题	(25)
2.2.4 大气入射光模型	(31)
2.3 模型验证	(32)
2.3.1 水体辐射传输问题的验证	(32)
2.3.2 大气-水体耦合辐射传输问题的验证	(36)
2.4 小结	(38)
3 非弹性散射对遥感反射率影响的模拟研究	(39)
3.1 水体非弹性散射	(39)

3.1.1	叶绿素与黄色物质荧光	(39)
3.1.2	水体拉曼散射	(41)
3.1.3	非弹性散射源矩阵算子的倍法运算	(42)
3.2	模拟结果验证	(43)
3.3	非弹性散射对遥感反射率的影响	(45)
3.4	小结	(48)
4	固有光学特性与遥感反射率闭合研究	(50)
4.1	固有光学特性获取方法	(50)
4.1.1	水体总吸收与总衰减系数	(50)
4.1.2	颗粒后向散射系数	(52)
4.1.3	水体散射相函数近似模型	(53)
4.2	模拟结果与闭合分析	(54)
4.2.1	吸收系数和颗粒后向散射系数的闭合分析	(54)
4.2.2	模拟与实测遥感反射率的闭合分析	(56)
4.3	小结	(61)
5	表面法的天空漫射光反射率估算方法	(63)
5.1	表面法与天空漫射光反射率介绍	(63)
5.2	天空漫射光以及风生粗糙水面的影响	(65)
5.2.1	气溶胶光学厚度的影响	(65)
5.2.2	太阳天顶角的影响	(67)
5.2.3	风速的影响	(68)
5.3	天空漫射光反射率的估算	(70)
5.3.1	估算方法	(70)
5.3.2	遥感反射率的计算结果	(72)
5.4	小结	(75)
6	结论与展望	(77)
6.1	结论	(77)
6.2	展望	(79)
	参考文献	(80)

论文二：中国近海固有光学量及有机碳卫星遥感反演研究

1	绪论	(89)
1.1	研究目的和意义	(89)
1.2	国内外研究现状	(91)

1.2.1	水色遥感产品及算法	(91)
1.2.2	水体光学研究	(93)
1.3	研究内容和技术路线	(94)
1.3.1	拟解决的关键科学问题	(94)
1.3.2	主要研究内容和技术路线	(95)
1.4	研究区域和数据	(96)
1.4.1	研究区域及特征	(96)
1.4.2	数据及测量方法	(98)
2	黄东海水体组分的光学性质	(102)
2.1	介绍	(102)
2.2	黄东海水体组分的固有光学特性	(102)
2.2.1	水体固有光学特征的理论基础	(102)
2.2.2	黄东海水体组分吸收特性	(107)
2.2.3	水体散射特性	(119)
2.2.4	水体衰减特性	(124)
2.3	颗粒物组成与固有光学特征	(126)
2.3.1	颗粒物含量和组成	(126)
2.3.2	颗粒折射指数估算	(127)
2.4	小结	(129)
3	水体固有光学性质的遥感反演	(131)
3.1	介绍	(131)
3.2	吸收系数 (a) 和后向散射系数 (b_b) 遥感反演	(131)
3.2.1	a 、 b_b 遥感反演算法机理和方法	(131)
3.2.2	中国海区 a 、 b_b 算法建模	(138)
3.2.3	a 、 b_b 反演结果比较	(148)
3.3	黄色物质吸收系数的遥感反演	(152)
3.4	颗粒光束衰减系数遥感反演	(158)
3.5	小结	(161)
4	海洋有机碳遥感反演	(163)
4.1	介绍	(163)
4.2	颗粒物的遥感反演	(164)
4.2.1	总悬浮物浓度 (TSM) 的遥感反演	(164)
4.2.2	有机颗粒物 (POM) 的遥感反演	(168)
4.3	颗粒有机碳 (POC) 的遥感反演	(171)
4.3.1	POC 的生物地球化学特征	(171)

4.3.2	POC 遥感估算方法	(173)
4.3.3	黄东海 POC 的反演结果	(176)
4.4	溶解有机碳 (DOC) 的遥感反演	(176)
4.4.1	DOC 的生物地球化学特征	(176)
4.4.2	DOC 的遥感估算方法	(178)
4.4.3	黄东海 DOC 的反演结果	(181)
4.5	小结	(181)
5	中国近海有机碳时空分布遥感分析	(183)
5.1	介绍	(183)
5.2	固有光学量及生化参数遥感产品的比较和验证	(184)
5.2.1	遥感产品制作	(184)
5.2.2	吸收和后向散射系数的遥感反演结果比较	(185)
5.2.3	颗粒衰减系数遥感分布的比较和验证	(186)
5.2.4	颗粒有机碳遥感分布的比较和验证	(188)
5.2.5	溶解有机碳遥感分布的比较和验证	(190)
5.3	中国近海有机碳时空分布遥感分析	(191)
5.4	小结	(198)
6	总结及展望	(200)
6.1	论文工作总结	(200)
6.2	创新点分析	(201)
6.3	展望	(201)
附录 I	符号及含义	(203)
附录 II	统计参数及计算公式	(205)
	参考文献	(206)

论文三：海洋航空高光谱遥感大气校正机理及模型研究

1	引言	(217)
1.1	选题背景与意义	(217)
1.2	国内外研究进展	(217)
1.3	海监机载高光谱遥感器 AISA + 简介	(219)
1.4	论文结构	(220)
2	AISA + 数据质量评价	(222)
2.1	实验数据	(222)
2.2	质量评价指标	(226)

2.2.1 辐射精度	(227)
2.2.2 信息量	(231)
2.2.3 信噪比	(232)
2.2.4 清晰度	(235)
2.2.5 Smile 效应	(237)
2.3 质量评价小结	(239)
3 航空高光谱遥感辐射校正的机理研究	(240)
3.1 辐射传输基础	(240)
3.2 薄雾、云、水体、雪的掩膜	(243)
3.3 标准大气条件	(244)
3.3.1 常量能见度(气溶胶)与大气水汽	(244)
3.3.2 气溶胶获取与能见度图	(244)
3.3.3 水汽获取	(247)
3.4 非标准条件	(251)
3.4.1 BRDF 校正的经验方法	(251)
3.4.2 薄雾去除	(252)
3.4.3 卷云去除	(253)
3.4.4 去阴影	(255)
3.5 大气校正步骤总结	(259)
4 AISA + 海洋大气校正流程设计与方法实现	(261)
4.1 海洋水色的辐射传输	(261)
4.2 低空海表大气辐射传输模拟分析与方案设计	(263)
4.3 响应函数模拟	(267)
4.4 水体判断	(268)
4.5 云阴影去除	(269)
4.5.1 ISODATA 算法	(270)
4.5.2 直方图阈值法	(273)
4.6 气溶胶反演	(274)
4.7 水汽获取	(276)
4.8 瑞利散射	(278)
4.9 氧气透过率	(278)
4.10 离水辐射率获取结果	(279)
5 总结与展望	(281)
5.1 主要工作与结论	(281)
5.2 特色与创新	(281)

5.3 下一步工作	(282)
参考文献	(283)

论文四：利用海洋水色遥感反演海水透明度的研究

1 绪论	(293)
1.1 研究目的及意义	(293)
1.2 国内外研究现状	(294)
1.3 主要研究内容	(295)
2 海洋水色遥感数据的大气校正技术	(296)
2.1 水色遥感大气校正技术回顾	(296)
2.1.1 CZCS 时期 (1976—1994 年)	(296)
2.1.2 SeaWiFS 时期 (1994 年至今)	(297)
2.2 SeaDAS 标准大气校正技术剖析	(299)
2.2.1 SeaDAS 系统大气校正技术	(299)
2.2.2 SeaDAS 大气校正技术存在的问题分析	(302)
2.3 一类水体大气校正算法	(302)
2.3.1 辐射传输	(302)
2.3.2 瑞利散射计算	(303)
2.3.3 气溶胶散射计算	(305)
2.3.4 O_2 -A 带吸收计算	(308)
2.3.5 其他问题	(308)
2.4 二类水体大气校正失败的原因及目前几种算法的缺陷	(308)
2.4.1 目前的二类水体大气校正算法	(309)
2.4.2 SeaDAS 标准大气校正算法在二类水体失败的原因及 目前几种二类水体大气校正算法的缺陷	(310)
2.5 一种适用于二类水体的大气校正算法	(313)
2.6 小结	(316)
3 神经网络法反演海水叶绿素浓度	(322)
3.1 多层前馈型神经网络的 BP 训练算法	(322)
3.1.1 神经元模型	(322)
3.1.2 多层前馈型神经网络的 BP 算法	(323)
3.2 SeaBAM 经验算法	(327)
3.3 海水叶绿素浓度的神经网络反演方法	(329)
3.3.1 数据源	(329)

3.3.2	网络模型的选择	(329)
3.3.3	人工神经网络模型与 SeaBAM 经验算法的比较	(330)
3.4	小结	(333)
4	利用 SeaWiFS 资料提取海水透明度技术研究	(334)
4.1	海水透明度测量的由来及方法	(334)
4.1.1	透明度盘测量的由来	(334)
4.1.2	海水透明度的测量方法	(335)
4.2	影响海水透明度的因素分析	(335)
4.2.1	水体光学性质的影响	(335)
4.2.2	水面太阳辐射的影响	(336)
4.2.3	海面粗糙度的影响	(336)
4.2.4	透明度盘上表面反射率的影响	(336)
4.2.5	透明度盘形状的影响	(337)
4.3	透明度与水体光学特性之间的两种解析模式	(338)
4.3.1	Poole - Atkins 模式	(338)
4.3.2	Duntley - Preisendorfer 模式	(338)
4.4	水下中尺度目标物的能见度理论	(340)
4.5	海水透明度的遥感机理	(343)
4.6	海水透明度的直接遥感提取模式	(345)
4.6.1	调查区域	(346)
4.6.2	东海、黄海透明度直接遥感提取模式的建立	(347)
4.7	海水透明度的间接遥感提取模式	(352)
4.7.1	透明度与水体光学性质之间的定量模式	(353)
4.7.2	水体光学性质与水色要素之间的定量模式	(354)
4.7.3	模式的分析及检验	(355)
4.8	利用 SeaWiFS 数据提取海水透明度技术	(356)
4.9	小结	(358)
5	我国海区透明度时空分布特征	(359)
5.1	渤海透明度的分布与变化	(359)
5.1.1	渤海透明度地理分布特征	(359)
5.1.2	透明度的季节变化特征	(360)
5.2	黄海透明度的分布与变化	(360)
5.2.1	黄海透明度地理分布特征	(360)
5.2.2	黄海透明度季节变化特征	(360)
5.3	东海透明度的分布与变化	(361)

5.4 台湾海峡及南海东北部海区透明度的分布与变化	(362)
5.4.1 透明度地理分布特征	(362)
5.4.2 透明度季节变化特征	(363)
5.5 南海西北部海区透明度的分布与变化	(363)
5.5.1 透明度地理分布特征	(363)
5.5.2 透明度季节变化特征	(364)
5.6 小结	(364)
6 总结与展望	(365)
参考文献	(367)

论文一：水体遥感反射率的辐射 传输模拟研究

作者：陶邦一

指导教师：毛志华

作者简介：陶邦一，男，1983 年出生，博士。2005 年毕业于浙江大学地球科学系，获理学学士学位；2008 年毕业于国家海洋局第二海洋研究所，获物理海洋理学硕士学位；2011 年毕业于中科院上海技术物理研究所，获电子科学与技术学科工学博士学位。现在国家海洋局第二海洋研究所“卫星海洋环境动力学国家重点实验室”做博士后，主要从事水色遥感、水体辐射传输模拟研究。

摘要: 遥感反射率 (Remote-sensing reflectance) 是水色遥感和水体光学研究中最基本也是最重要的物理量。遥感反射率测量的精度以及水体固有光学特性与遥感反射率测量结果的一致性是提高水色遥感反演精度的基础工作。因此, 本研究内容主要围绕水体遥感反射率展开。

本文基于矩阵算法建立了一个水体光辐射传输数值模型。通过对 Mobley 水体辐射传输标准问题的验证以及与 COART 结果的比较, 证明该模型对多次散射处理是正确的, 并且满足模拟的精度要求, 是一个能够模拟水体各种辐射传输过程的数值计算模型。本文采用均匀介质层中辐射能量随深度增大而呈指数衰减的假设, 将 Raman 散射、叶绿素和黄色物质荧光等水体中的非弹性散射作为源矩阵算子引入到水体辐射传输数值模型当中进行解算。并且利用三分量模型, 模拟分析了水体各成分对水体非弹性散射的影响以及非弹性散射在遥感反射率中所占的比重。

在本文建立的水体辐射传输数值模型基础上, 初步开展了现场实测水体固有光学特性与遥感反射率之间的闭合研究。研究结果表明目前二类水体中的固有光学特性测量还需要进一步的改进。

针对二类水体遥感反射率的主要测量方法——表面法, 系统分析了遥感反射率表面法测量当中, 风速、天空漫射光分布和太阳天顶角等各种因素对天空漫射光反射率 $\rho(\lambda)$ 的影响; 发现在最适宜表面法进行测量的晴空条件下, 由于气溶胶光学厚度较小, $\rho(\lambda)$ 受风速、波长以及太阳天顶角的影响最大。在分析主要影响因素的基础上, 提出了 $\rho(\lambda)$ 估算的新方法。该方法首先基于 Sky Model-R 模型, 利用表面下行辐照度 $E_s(\lambda)$ 和下行漫辐射照度 $E_{dif}(\lambda)$ 来模拟不同波长的天空漫射光分布, 并根据水面风速求取粗糙水面的反射函数, 然后将上述结果代入水体辐射传输数值模型进行 $\rho(\lambda)$ 估算。

关键词: 遥感反射率; 辐射传输模型; 非弹性散射; 固有光学特性; 光学特性闭合; 表面法

1 引言

1.1 研究的目的与意义

水色遥感目前已成为监测我国近海海洋和内陆大型湖泊等水体生态环境的重要技术手段。由于任何目标的光学遥感都必须对目标物的光学特性进行深入的研究,因此,作为水色遥感的目标物,自然水体的光学特性受到了极大的关注。而随着我国国民经济的发展,保护生态环境与进行可持续发展的重要方面是对大型水体的合理保护与开发利用,因此对水体信息定量化遥感的需求日益迫切,同时也对水体光学特性的测量提出了新的要求。水体光学特性应该包括表观光学特性(Apparent Optic Properties, AOP)和固有光学特性(Inherent Optic Properties, IOP)。而在各种水体光学特性当中,遥感反射率(Remote-sensing Reflectance)是最基本也是最重要的物理量,水色遥感中的大量工作包括遥感器辐射定标、大气校正、生化光学参数反演都是围绕着该物理量展开的,因此其重要性不言而喻。

而目前,水色遥感对一类水体即大洋水体的遥感反演之所以成功的一个重要原因是对于一类水体的海洋定量化遥感提出严格的精度要求,而其中就包括对现场光学特性测量精度的详细要求和解决措施。以美国航天航空局(NASA)SeaWiFS计划的目标为例,离水辐射率的测量不确定度要控制在5%以内,叶绿素浓度反演的不确定度控制在35%以内。根据上述要求,又提出了现场测量仪器定标不确定度控制在3%以内,现场数据分析处理不确定度控制在5%以内,并且对现场测量制定了统一的测量规范^[1]。国际上也出现了大量针对大洋一类水体开发的表观光学特性和固有光学特性测量仪器。但是我国主要关注的是与沿海社会与经济发展关系极为密切的近岸水体。我国近岸水体除南沙、台湾以东、海南岛附近等区域外,基本上都属于二类水体,特别是大陆架海域。虽然我国已开展了水体固有光学特性和遥感反射率等表观光学特性的测量与研究,但是采用的仪器与方法基本上是借鉴一类水体的已有工作。由于二类水体光学性质的复杂性,利用上述一类水体方法和仪器测量得到二类水体中遥感反射率和固有光学特性都存在着较大的不确定度,两者之间的联系也就成为一个难题。而这一难题也制约了二类水体固有光学特性遥感反演算法精度的提高。

遥感反射率测量的精度以及水体固有光学特性与遥感反射率测量结果的一致性是提高水色遥感反演精度所要解决的基础工作。而众所周知,任何遥感反演模型建立的理论基础都是辐射传输理论,而辐射传输数值模型是建立固有光学特性(IOP)和表观光学特性(AOP)之间联系的基础。而目前国内还未有一个包含非弹性散射过程在内的能够完整模拟水体辐射传输过程的数值模型。因此,围绕着遥感反射率,开展以下工作是非常有意义的:①研究建立一个包含非弹性散射过程的水体辐射传输数值模型用于模拟水体遥感反射率,研究固有光学特性与遥感反射率的内在关系;②开展现场实测水体固有光学特性与遥感反射率之间闭合

研究；③针对目前遥感反射率测量方法当中的一些关键问题展开讨论。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水体辐射传输研究现状

目前的辐射传输理论开始形成于 20 世纪初期，代表人物有 Chandrasekhar^[2]、Mihalas 和 van de Hulst 等。最初辐射传输理论主要应用于天文学研究，但在过去的几十年里，辐射传输理论取得了长足的发展，广泛应用于大气科学、遥感、材料学、生理学以及机械热能等学科领域。而辐射传输理论在水体光学中的应用应归功于 Preisendorfer，他通过 20 多年的研究建立了一个能够描述水体辐射传输过程的完善的数学理论体系，并完成了水体光学代表性著作《水文光学》(Hydrologic Optics)^[3]。Mobley 作为 Preisendorfer 的学生，在全面总结水体光学与水体生化光学特性的基础上出版了经典著作《光和水》(Light and Water)^[4]，并且开发了基于不变嵌入法的水体辐射传输数值模型 Hydrolight。国外科学家利用辐射传输理论和不同的数值计算方法，已开发了几十种适用于求解水体辐射传输问题的数值计算模型和软件包，其中 Gordon & Brown^[5]、Plass & Kattawar^[6]和 Morel & Gentili^[7,8]先后利用 Monte Carlo 方法建立数值模型；Chami^[9]等利用逐次散射法、Fell^[10]利用矩阵法开发了适用于结算大气-水体耦合介质系统的辐射传输问题的数值模型，但是上述模型并未公开发布其代码或软件包。而 Jin^[11]等利用离散坐标系法开发的 COART 数值模型虽然可以公开使用，但是该模型并未考虑水体非弹性散射这一辐射传输过程，因此严格意义上来说并不是一个完整的水体辐射传输数值模型。总的来说，虽然目前国外已经开发了多个水体或水体-大气耦合辐射传输模型，但是实际上国内研究者想利用现成的水体辐射传输模型进行水体光学研究，只能通过购买昂贵的 Hydrolight 商业软件包。

目前，国内学者已经开展了水体辐射传输数值模拟的研究。唐军武等^[12]为深入研究水体光学特性，初步建立了一个通用型的三维 Monte Carlo 海洋光学模拟系统，并依据此系统模拟的结果对水体辐射场的二向性进行了探讨；曹文熙等^[13]针对一类海水，采用美国标准大气模型和一类水体海洋生物-光学特性的半分析方法，建立了海洋光合有效辐射计算模式。模式比较全面地考虑了大气、海-气界面和水体的光辐射传输过程，能较好地用于分析叶绿素浓度以及光辐射场的角分布对光合有效辐射分布的影响。对模拟结果的分析以及与实测结果的比较表明，该模式能较好地应用于计算衰减系数、光谱辐照度随深度的分布、光合有效辐射随深度的分布和真光层深度；张鉴等^[14]在大气辐射传输理论和三分量水色模型的基础上完善了海洋-大气耦合系统辐射传输计算模型，并利用该模型对离水辐射率等基于水色遥感信息量的变化特性进行了数值模拟；何贤强等^[15]基于矩阵算法开发了适用于精确计算海洋-大气耦合矢量辐射传输方程的数值计算模型 PCOART，根据辐射在海洋-大气界面的反射和折射性质，将海洋和大气矢量辐射传输过程进行耦合，得到海洋-大气耦合介质系统的矢量辐射传输数值计算模型 PCOART。PCOART 是精确计算海洋-大气耦合介质系统矢量辐射传输的得力工具，它为进一步深入研究海洋-大气耦合介质系统辐射传输的偏振特性及遥感信息反演打下基础。但是遗憾的是，国内上述模型都未考虑水体的非弹性散射问题，因此在某种程度上，上述模型在模拟水体辐射传输过程当中具有一定的局限性。