

文章编号: 1001-8166(2002)03-0363-09

二类水体水色遥感的主要进展与发展前景^{*}

任敬萍¹, 赵进平²

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: II类水体水色遥感是海洋水色遥感的难点和热点。针对II类水体的光谱特性和海洋现象的特点, 综述了水色卫星传感器在光谱波段配置、辐射探测性能和时空分辨率等方面的设计要求和 技术 进步。从水色遥感资料反演的两大关键技术——大气校正和生物光学算法两个方面, 概述了 II类水体水色反演算法的研究现状和发展方向。根据我国近海的水体特点, 提出了我国水色遥感研究需要解决的关键问题。

关键词: 水色遥感; II类水体; 反演算法

中图分类号: P71 文献标识码: A

海水按其光学性质的不同可划分为 I 类水体 (Case 1 Waters) 和 II 类水体 (Case 2 Waters)。I 类水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定, 典型的 I 类水体是大洋开阔水体。II 类水体的光学特性主要由悬浮物、黄色物质 (又称有色可溶性有机物—CDOM: Coloured Dissolved Organic Matter) 决定, 这类水体主要位于近岸、河口等受陆源物质排放影响较为严重的地方^[1,2]。II 类水体是与人类关系最密切、受人类活动影响最强烈的海域, 其水色因子悬浮物、叶绿素和黄色物质等则是影响海水环境的重要成分, 是海洋环境的重要参数。如果能从水色遥感资料可靠地推算出悬浮泥沙、叶绿素和黄色物质含量, 将使我们得以对近海、河口环境进行实时、长周期、大范围的监测和研究。

自 1978 年 10 月第一台水色卫星传感器 CZCS (Coastal Zone Color Scanner) 投入使用至今, 水色遥感主要针对相对简单的 I 类水体进行研究。目前业务化的反演算法是美国国家航空和宇航局 (NASA) 的标准算法, 基本思路是利用大气辐射传递理论, 将传感器接收到的总信号中大气效应和离水辐射分开。I 类水体近红外波段离水辐射可忽略不计, 据

此求出该波段的大气特性, 并外推至可见光波段。传感器接收的信号经大气校正后, 求得离水辐射度, 然后用经验公式反演出叶绿素 a 的含量^[3]。II 类水体的水色反演主要受到两个方面的局限: 第一, II 类水体的海水组分和光学特性都比 I 类水体复杂得多, 由水色卫星资料反演叶绿素浓度的标准算法对 II 类水体不适用。第二, CZCS 的水色通道太少, 光谱分辨率和辐射灵敏度低。

自从新一代水色卫星传感器 SeaWiFS 问世以来, 上述两个方面的局限性正在取得或即将取得突破: 新的水色传感器和新的卫星陆续完成, 水色反演的新算法也相继问世, 水色遥感已经开始了一个新的时代。本文将系统介绍 II 类水体水色遥感的最新进展, 分析遥感技术的发展趋势, 并探讨我国水色遥感应用需要解决的关键问题, 以推动我国水色遥感研究的发展。

1 水色卫星传感器的技术进步

第二代水色传感器中, 观测范围覆盖全球的有美国的 SeaWiFS, 日本的 OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor), 法国的 POLDER (Polarization

收稿日期: 2001-05-08; 修回日期: 2001-08-08

*基金项目: 山东省青年基金项目“SeaWiFS 资料监测海岸带生态环境的应用研究”(编号: Q98E01138); 中国科学院知识创新工程项目“近海海洋动力过程的遥感分析与应用研究”(编号: KZCX2-202) 资助。

作者简介: 任敬萍(1968-), 女, 山东莱州人, 助理, 主要从事海洋水色遥感研究, E-mail: jipen@ms.qdio.ac.cn

and Directionality of the Earth's Reflectance), 美国的 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 和 MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer), 欧空局的 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 以及日本的 GLI (Global Imager) 等。德国、印度、南韩、中国台湾、中国、美国海军等已发射或即将发射局域覆盖的水色传感器。这些传感器的技术特性请参见文献[4]。第二代水色传感器在 CZCS 的基础上进行了改进, 增加了光谱通道, 提高了光谱分辨率和辐射灵敏度, 为提高 II 类水体的研究水平创造了条件。

水色传感器光谱波段的选择主要应满足大气校正和水色要素反演的需要。以 SeaWiFS 为例, 波段选择的依据是①历史经验; ②海水普通光学要素的光谱吸收特性; ③平均宇宙辐照度; ④大气中氧和水蒸气的光谱透射率^[5]。水色传感器的可见光通道是按照海洋中主要组分的光学特性设置的, 每个通道对应于海洋中各种组分吸收光谱的强吸收带和最小吸收带。近红外通道是用来进行大气校正的。在大气透射窗内, 近红外通道的选择应体现气溶胶的光谱变化趋势。为保证外推精度, 近红外通道不要远离可见光谱段^[6]。

对大洋水域, 海水组分以浮游植物及其伴生物为主, 叶绿素是最主要的色素。浮游植物对蓝光强烈吸收, 在 445 nm 附近存在吸收峰; 对黄绿光(550~580 nm)吸收较弱^[6], 近红外波段的离水辐射可以忽略。海洋水色的研究及应用经验表明, 对大洋水域, 水色生物要素反演所需的基本波段设置见表 1^[7]。光谱带宽的最低要求是 20 nm, 为了提高反演精度, 最好设定为 10 nm 或更高^[6]。

表 1 水色生物要素反演所需的基本波段设置

Table 1 The minimal band requirements for high quality observation of biological variables from ocean color remote sensing

中心波长范围(nm)	带宽(nm)	用途
438~448	20	低叶绿素浓度
485~495	20	中、高浓度叶绿素
550~565	30	叶绿素、悬移质
744~757	40	气溶胶
855~890	40	气溶胶

I 类水体可以看作 II 类水体的特例, 水色传感器的设计应满足全球海洋及近海海域监测的需要。因此, 新一代水色传感器的设计除了必须满足 I 类

水体的所有要求外, 还应满足 II 类水体的特殊要求。正在发展的水色传感器取得了以下技术进步:

1.1 增加光谱波段设置

(1) 增加可见光光谱通道, 以提取叶绿素、悬浮沉积物、黄色物质和浅海海底信息。II 类水体叶绿素含量较高, 在 685 nm 附近出现荧光峰。MODIS、MERIS 和 GLI 增设了中心波长在 680 nm 和 665 nm 附近的窄波段测量荧光峰, 计算叶绿素浓度。该方法避免了其它物质吸收和散射的影响, 适用于 II 类水体叶绿素浓度较高的情况^[7]。黄色物质的吸收光谱曲线随波长的增加而呈近指数减少, 在黄色波段吸收最小。几乎所有的新一代传感器增设了 410 nm 波段, 将黄色物质与叶绿素分开(叶绿素在 440 nm 有一吸收峰)。GLI 增设了 380 nm 通道探测黄色物质^[3]。悬浮泥沙的后向散射较强, 随着泥沙含量的增加, 光谱反射比也增加。水体浑浊度的灵敏波长是 620 nm^[7]。MERIS 和 GLI 设置了 620 nm 波段探测悬浮沉积物。

(2) 配置更合理的波段进行大气校正。对 II 类水体, 波长大于 700 nm 谱段的离水辐射不为零。在近红外波段, MERIS 和 GLI 分别设置了 3 个通道用于大气校正^[4]。对浑浊的海水或浅海海水, 还可增设大气透射窗内的 1 040 nm 和 1 240 nm 两个通道^[3]。

许多沿海地区已城市化, 近岸水域上空往往含有吸收性气溶胶。GLI 增设 380 nm 波段判别吸收性气溶胶的存在, 并进行校正^[3]。

超光谱传感器日益引起人们的关注。GLI 类似于超光谱传感器, 在 380~680 nm 波谱范围内, 设置了 12 个光谱分辨率为 10 nm 的波段。计划中的高分辨率超光谱传感器, 如澳大利亚资源信息与环境卫星 ARIES (Australian Resource Information and Environmental Satellite) 及美国海军地球制图观测卫星 NEMO (Naval Earth Map Observer), 将在从可见光到近红外的整个光谱范围内连续设置光谱分辨率为 10 nm 或 20 nm 的波段^[7]。相信超光谱传感器将会带来海洋水色的海量信息, 推动水色遥感的新的进步。

1.2 增强辐射探测性能

新一代水色传感器的探测性能向高灵敏度、高信噪比、宽动态范围的方向发展, 以适应 II 类水体的探测需要。II 类水体离水辐射率量值跨度较大, 因此, 水色传感器的灵敏度和信噪比应高于 I 类水体的设计要求。另外, 为兼顾海岸带测量或有云天气时传感器不饱和而正常工作, 传感器的动态范围要

宽, 数据量化精度要高, 一般为 12 ~ 14 bit^[3]。如 SeaWiFS 光学通道的灵敏度约为 CZCS 的十倍, 10 bit 量化; MODIS 的信噪比又高于 SeaWiFS, 12 bit 量化。

1.3 提高时空分辨率

近岸水域海洋现象的发生周期短则几个小时, 多为 2 ~ 10 天。为此, 卫星的重复观测间隔最小为 1 天。单颗极轨卫星最多 2 ~ 3 天重复观测一次, 两颗极轨卫星每天可重复观测一次, 机载传感器更适用于采样频率高的特殊监测。考虑到云的影响, 观测 II 类水体的海洋现象和过程, 应利用多颗卫星的传感器观测。根据研究对象的不同, II 类水体水色遥感传感器的地面分辨率要求跨度较大, 由几十米、几百米到 1 km。对河口悬浮泥沙探测、近岸赤潮探测和海岸带测绘等, 要求地面分辨率高达 30 m, 甚至更高^[3]。MERIS 的分辨率为 0.3 km, GLI 的分辨率为 0.25 km, 美国的 NEMO 地面分辨率高达 30 m。机载传感器地面分辨率高达 1 ~ 20 m, 特别适合对近岸及河口地区的监测。

总的来说, 适应 II 类水体的新一代水色传感器的设计要求要严格得多^[3] (表 2), 要求水色传感器灵敏度高、信噪比高、光谱分辨率高、时空分辨率高、波段数目较多甚至是超光谱。现有和计划中的单个水色传感器不能满足所有的要求, 应将多颗卫星传感器、机载传感器和现场实测结合起来对 II 类水域进行业务监测。目前, MERIS、MODIS 和 GLI 三颗卫星既有适于 I 类水体的波段设置, 又有适合观测 II 类水体叶绿素荧光及进行 II 类水体大气校正的波

段, 还有测量水中悬浮物质的波段。MODIS 已成功发射, 探测叶绿素荧光已成为现实。MERIS、GLI 及其它计划中的传感器波段更多, 探测性能更好, 必将有力地推动 II 类水体水色遥感的发展。

2 水色资料反演算法的进展

从水色卫星资料获取海洋水色要素的信息, 有两大关键技术。一是大气校正, 即从传感器接收到的信号中消除大气的影 响, 获得包含海水组分信息的海面离水辐亮度。二是生物光学算法, 即根据不同海水的光学特性, 与离水辐亮度估算有关的海洋水色要素。

到目前为止, 水色遥感主要针对相对简单的 I 类水体进行研究, 取得了较大的进展。美国 NASA 戈达德空间飞行中心承担了 SeaWiFS 资料的大气校正定标、验证和算法研究, 已得到全球性的、主要适用于大洋水域的 NASA 标准算法, 并专门开发了一套处理软件 SeaDAS, 用于产生 SeaWiFS 各级产品资料。美国 NASA 的 SeaBAM (SeaWiFS Bio-optical Algorithm Mini-Workshop) 小组收集全球范围内海水叶绿素浓度与辐射的同步测量数据, 提出适用于 SeaWiFS 的、以“比值波段组合”为基础的海水叶绿素浓度统计算法^[8,9]。

但是, 全球性的算法模型对局部海区的反演精度往往并不高。为了开发高精度的反演算法, 并有效地评价遥感数据的产品质量, NASA 制订了长期的、专门的现场测量计划, 规定了现场必须测量的参数、所用仪器的性能、现场测量的方法及数据处理方法等^[4,10-13]。1997 年 1 月, 美国 NASA 启动了 SIMBIOS 项目 (Sensor Intercomparison and Merger for Biological and Interdisciplinary Oceanic Studies), 主要致力于: ①多种传感器的相互定标; ②地球物理产品的算法开发和验证; ③多类型传感器数据的信息复合。SIMBIOS 在全球范围内收集海洋光学数据, 通过 NASA 在世界多个地点设置的 AERONET 网络 (Aerosol Robotic Network) 收集大气数据^[14-18]。与此同时, 全球性的水色研究计划也在筹备当中, 并于 1996 年成立了 IOCCG (The International Ocean-Colour Coordinating Group)。目前, 尚没有成熟的 II 类水体海洋光学现场测量与验证草案。

II 类水体的光学特性远比 I 类水体复杂。II 类水体对离水辐射有贡献的水色因子除了叶绿素外, 还有悬浮物质、黄色物质等, 每一水色因子又包含多

表 2 I 类、II 类水体的可见光遥感要求
Table 2 Visible remote sensing over open ocean and Case 2 waters

比较内容	I 类水体	II 类水体
传感器要求	波段窄 动态范围小 信噪比高	波段窄 动态范围大 信噪比高
反演技术	大气校正; 生物光学算法	辐射传递; 多元技术
监测对象的特点	空间尺度约 1 km 时间尺度约 1 d 流体边界 单个光谱特征	空间尺度约 30 m 时间尺度约 0.2 d 流体边界 多个光谱特征
应用展望	色素浓度 水华爆发动力学、生产力	叶绿素、悬移质、黄色物质 水华爆发动力学、生产力、泥沙运输、沿岸动力学
	碳循环、赤潮	碳循环、赤潮、水质、水产、渔业、娱乐

种成分(如叶绿素, 不仅含有叶绿素 a, 还含有其它色素)。因此, 每一水色因子因其成分的不同而有不同的光谱特征, 3 种光学特性彼此独立的水色因子吸收和散射光谱有重叠区域, 组合起来的光谱特性是非线性的、复杂多变的, 且有季节变化。另外, 对水深较浅的海域, 海底对水色也有影响。I 类水体反演算法的基本出发点是利用近红外波段离水辐射可以忽略, 将大气效应和离水辐射分开。但这不适用于 II 类水体, 必须研制新的反演算法。针对 II 类水体的特点, 反演算法的研发方向是将海洋—大气系统当作耦合系统, 用水色因子反演的理论模式取代经验算法, 并引入新的数据处理方法解决算法中的多变量、非线性问题^[3]。

2.1 大气校正

传感器接收到的总辐射量中来自海面的信号甚微, 90%以上来自大气瑞利散射、气溶胶散射以及太阳反射^[2], 因此大气校正成为水色卫星资料反演模式的关键技术。I 类水体大气校正方法的基础是光谱辐射传递理论, 大部分工作是围绕处理 CZCS 资料进行的^[2, 19~22]。美国 NASA 对相关模型进行改进, 用于 SeaWiFS 资料的大气校正^[23], 嵌入在 SeaDAS 软件中。SeaDAS 成功地进行 I 类水体的大气校正, 但不适合 II 类水体, 对浑浊海水也不做处理^[24~27]。II 类水体近红外波段离水辐射不为零, 有两种方法对 I 类水体的大气校正方法进行修正, 使其适用于浑浊海水。一是在近红外波段建立耦合的水文—大气光学模式, 根据水体后向散射在近红外波段之间的关系迭代计算近红外波段的气溶胶特性^[28, 29]。二是假设气溶胶类型在小范围内(50~100 km)基本不变, 借用邻近较洁净水体的大气条件来计算浑浊海水的气溶胶辐射率, 实现对 II 类水体的大气校正^[30]。另外, 还可用逆模式同时求出海水组分浓度和气溶胶特性(详见 2.2 节)。这些算法尚未达到业务化水平, 需要改进。

2.2 生物光学算法

自 CZCS 运行以来, 已发展了多种提取海水叶绿素浓度的经验、半分析和基于辐射传递模型的理论算法。以“比值波段组合”为基础的经验统计算法在 I 类水体中有较高的反演精度, 成为业务上的主要算法^[2, 8, 9]。对 II 类水体, 选择合适的观测波段、增加光谱波段数均可提高经验算法的精度^[3]。如避开 I 类水体常用的蓝/绿光而选择较长的波段观测叶绿素浓度较高的海区, 会减小黄色物质的影响, 提高算法精度。经验算法应用简便, 运算快捷。但本

质上是区域性算法, 对水中组分的时空变化敏感。

模式算法(Model-based Approaches)利用生物光学模式描述水中组分与离水辐射之间的关系, 利用辐射传递模型模拟光在大气和海洋中的传播。这些模式在海水的不同组分、大气的不同状态下计算水面或大气顶 TOA(Top of the Atmosphere)的模拟光谱, 然后建立反演算法, 求解海水组分。目前正在发展的模式算法主要有代数方法、非线性优化方法、主成分方法和神经网络方法等^[3]。

2.2.1 代数方法

遥感反射比可表示为后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 与 $a(\lambda)$ 吸收系数之比的函数, 据此建立海洋光学理论模式。利用经验数据表示模式诸变量的固有光学特性及这些特性与诸变量浓度的关系, 然后采用假设减少未知量的方法简化模式, 得到一组代数方程。该方程可以求解模式中的每个未知量^[31~35]。该方法是半分析(semi-analytical)反演算法, 也是最简单的模式算法。代数方法的优点是将水色因子的已知光学特性与理论模式耦合起来, 对特定的 II 类水域的运算结果也较精确^[34], 但能求解的未知量(即反演的浓度)个数有限。

2.2.2 非线性优化方法

该多变量分析方法包含了两个模式: 一是正模式(Forward Model), 即对特定海区, 根据水中组分浓度确定海水的固有光学特性; 二是逆模式(Inverse Model), 根据固有光学特性和实测的辐射值, 采用优化方法迭代求解水中组分的浓度。

将卫星接收(或现场实测)的辐射 L_{meas} 与正模式计算的辐射 L_{mod} 对比, 令

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} (L_{\text{meas}} - L_{\text{mod}})^2$$

对所有波长求和。采用 simplex 算法^[36]、Levenberg-Marquardt 方法^[37~39] 或 Gauss-Newton 算法^[40] 等非线性优化方法求解的最小值。正模式以叶绿素、悬浮物和黄色物质的浓度以及气溶胶光学厚度等变量作为输入, 调整这些变量的大小, 能使 χ^2 达到最小的变量值即为所求。可同时求出所有水色因子的浓度。

这种方法能在模式中体现海水的非线性特征, 不依赖先验的模拟数据集, 易于区域化。但正模式必须体现研究海区海水组分浓度的代表性分布, 否则计算结果误差很大。

2.2.3 主成分方法

根据海水组分浓度的变化范围、大气特性及卫星传感器的光谱特性, 用辐射传递模型模拟 TOA

的辐射。对 II 类水体, 不同波段数据间有较高的相关性。为提高反演组分的区分和重构精度, 采用主成分方法确定数据的光谱维数及权重, 建立加权因子表^[41, 42]。由卫星传感器测量的 TOA 辐射值反演水中物质组分和大气气溶胶光学厚度等地球物理参数, 一般采用线性估计:

$$P_i = \sum_j K_{ij} L_j + A_i$$

P_i 是要估算的地球物理参数, L_j 是通道 j 变量 i 的加权因子, L_j 是通道 j 的测量值, A_i 是变量 i 的偏差值。对所有通道求和。

主成分方法的主要优点是: ①线性算法, 简单、稳定, 运算快捷; ②大气的影响自动体现在加权因子中, 不必进行大气校正; ③可用区域光学模式确定加权因子, 进行优化。但实际上水色因子与光谱辐射呈非线性关系, 可将数据分段进行线性分析, 也可引入辅助变量表示非线性, 采用多变量非线性回归方法分析。

2.2.4 神经网络方法

神经网络方法作为一种有效的非线性逼近方法, 近年来在海洋水色反演中已有应用^[43, 44]。神经网络方法是一种功能强大、灵活多变的 II 类水体水色因子反演和大气校正方法, 可以实现最复杂的辐射传递模型。网络输入界面可以是 TOA 的辐射或反射率、大气瑞利散射校正后的辐射或反射率、大气校正后的离水辐射等, 输出可以是海水组分浓度或光学变量, 再由区域光学模式将光学变量转化为海水组分浓度。该方法对正模式包含的遥感过程进行详细的物理描述, 易于区域化, 可实时应用。但必须训练网络、方法设计和训练过程要求广泛的经验。

这 4 种模式算法都需要生物—光学模式作为输入, 主成分和神经网络法也可以将有代表性的生物—光学和现场数据作为输入。主成分和神经网络法需要依赖模拟或训练数据。非线性优化方法是最复杂、反演精度最高的算法, 也是运算耗时最长的算法。模式算法都可区域化。目前, 这些算法(包括海洋光学和大气光学模式)需要大加改进, 以保证业务化的反演误差小于 30%^[3]。

3 II 类水体水色遥感需要解决的关键问题

我国的主要海域: 渤海、黄海、东海的绝大部分和南海的近岸部分都属于 II 类水体, 光学特征极为复杂, 大量河口泥沙输入海洋, 海水浊度高, 黄色物

质含量较高, 近岸海水富营养化, 赤潮爆发率高。开展 II 类水体海洋光学及其应用的相关研究对于我国具有更加明确的科学意义和更为迫切而重要的应用价值。我国政府和海洋界、遥感界的专家学者密切关注世界范围愈来愈强劲的水色遥感研究热潮。目前, 国家在杭州国家海洋局第二海洋研究所和青岛海洋大学建立了 SeaWiFS 数据地面接收站。我国即将发射自己的水色卫星——海洋一号。根据海洋光学遥感技术的现状和国内外水色卫星遥感计划, 结合我国的实际情况, 我国海洋水色遥感的发展需要解决如下关键问题。

3.1 大气校正

我国海岸带和近海以 II 类水体为主, 而且近海上空大气较浑浊, 经常受到戈壁滩灰尘流的影响^[45, 46], 水色遥感大气校正是国际公认的难题。目前日本的 ADEOS-1 和美国的 SeaWiFS 推荐的标准模式在该海区的成功率很低, 明显地影响到该海域海洋光学遥感数据的应用^[46]。国内提出的理论模型和应用模型, 多数仅以论文发表, 缺乏严格和足够的现场测量验证。因此, 需要重点发展针对我国 II 类水体的大气校正算法。

为了开发适合我国的大气校正方法, 必须对我国近海海区近红外波段海水的固有光学特性、近红外波段离水辐射率之间的关系进行研究, 必须对近海大气进行监测。NASA 的 AERONET 网络可提供全球多个观测点自动太阳光度计的气溶胶光学厚度、气溶胶颗粒分布等准实时数据^[18, 47], 我国也要在沿岸和海岛布放太阳光度计, 监测气溶胶的时空分布和变化。

3.2 海水光学特性探测

对 I 类水体, 可将浮游植物光学特性表示为叶绿素 a 的函数, 但一般对 II 类水体不适用。到目前为止, 我们对 II 类水体固有光学特性了解不多。不同的 II 类水体, 浮游植物光学特性与叶绿素 a 的关系可能会有相当大的区域变化。对悬浮颗粒的光学特性仍知之甚少, 需要填补空白。对黄色物质的研究刚刚起步^[48], 因此需要采用船载、机载高光谱甚至超光谱传感器在不同海区进行现场实验, 研究海洋光学特征, 以高精度地提取叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的含量。应进行长时期有系统的近岸海域调查(水文、生物、泥沙、化学、光学), 建立中国海区完整的海洋水色数据库, 为海洋光学和水色遥感应应用和发展提供基础数据^[49~52]。

3.3 加强海底影响的研究

对沿岸水域,水深较浅,海底对离水辐射有影响。为消除海底的影响^[53],或从水色遥感资料反演水深^[39, 54, 55],需定期对中国近海海底类型进行采样研究,测量不同类型海底的反射率。我国海水泥沙含量很高,有时在海水中出现泥沙跃层,具有相当于海底的光学作用,也需要加强研究。

3.4 水色要素反演算法研究

水色要素的反演应体现 II 类水体光学特性的区域性和季节性变化。我国的渤海、黄海、东海和南海近岸海域虽然同为 II 类水体,但水质及其光学特性差异很大,需要的生物光学反演算法也会有差别。应当仔细研究各海区的异同,探讨各海区光学特性的共性和个性,发展适应中国近海特点的水色要素反演算法体系。

致 谢: 本文作者多次与何宜军研究员进行有益的讨论,谨致谢忱。

参考文献(References):

- [1] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709-722.
- [2] Gordon H R, Morel A. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review[M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [3] International Ocean Colour Coordinating Group. Remote Sensing of Ocean Color in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters [R]. IOCCG Project Office, Report No. 3, 2000.
- [4] Fargion G S, Mueller J L. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 2000-209966, 2000.
- [5] Hooker S B, Esaias W, Feldman G C, *et al.* An Overview of SeaWiFS and Ocean Color[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 104566, Vol. 1, 1992, 1-2.
- [6] International Ocean Colour Coordinating Group. Minimum Requirements for an Operational Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean[R]. IOCCG Project Office, Report No. 1, 1998, 6-17.
- [7] International Ocean Colour Coordinating Group. Status and Plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions[R]. IOCCG Project Office, Report No. 2, 1999, 11-29.
- [8] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, *et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 24 937-24 953.
- [9] O'Reilly J E, Maritorena S, O'Brien M C, *et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3 [R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 2000-206892, Vol. 11, 2000.
- [10] McClain C R, Esaias W E, Barnes W, *et al.* SeaWiFS Calibration and Validation[R]. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt NASA Tech Memo 104566, Vol. 3, 1992.
- [11] Mueller J L, Austin R W. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 104566, Vol. 5, 1992.
- [12] Mueller J L, Austin R W. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS Validation, Revision 1[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 104566, Vol. 25, 1995.
- [13] Siegel D A, O'Brien M C, Sorensen J C, *et al.* Results of the SeaWiFS Data Analysis Round-Robin (DARR), July 1994[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 104566, Vol. 26, 1995.
- [14] McClain C R, Fargion G S. SIMBIOS Project 1998 Annual Report[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 1999-208645, 1999.
- [15] McClain C R, Fargion G S. SIMBIOS Project 1999 Annual Report[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 1999-209486, 1999.
- [16] Fargion G S, McClain C R. Three years of ocean color instrument intercomparisons and cross-calibration by the SIMBIOS Project(1997-2000)[A]. In: Bostater C R, Jr, Santoleri R, eds. Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice 2000[C]. Proceedings of SPIE, Vol. 4 172, 2000, 44-55.
- [17] Fargion G S, McClain C R. SIMBIOS Project 2000 Annual Report[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 2001-209976, 2001.
- [18] Fargion G S, Barnes R, McClain C R. In Situ Aerosol Optical Thickness Collected by the SIMBIOS Program (1997-2000): Protocols and Data QC and Analysis[R]. NASA Goddard Space Flight Center, NASA Tech Memo 2001-209982, 2001.
- [19] Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans[J]. *Applied Optics*, 1978, 17: 1 631-1 636.
- [20] Gordon H R, Castano D J. Coastal Zone Color Scanner atmospheric correction algorithm: multiple scattering effects[J]. *Applied Optics*, 1987, 26: 2 111-2 122.
- [21] Gordon H R, Brown J W, Evans R H. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus 7 Coastal Zone Color Scanner[J]. *Applied Optics*, 1988, 27: 862-871.
- [22] Gordon H R, Castano D J. Aerosol analysis with Coastal Zone Color Scanner: A simple method for including multiple scattering effects[J]. *Applied Optics*, 1989, 28: 1 320-1 326.
- [23] Gordon H R, Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1994, 33: 443-452.
- [24] Ding K, Gordon H R. Analysis of the influence of O₂ A-band absorption on atmospheric correction of ocean color imagery[J]. *Applied Optics*, 1995, 34: 2 068-2 080.
- [25] Wang M. Atmospheric correction of ocean color sensors: computing atmospheric diffuse transmittance[J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 451-455.
- [26] Siegel D A, Wang M, Maritorena S, *et al.* Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption

- [J] . *Applied Optics*, 2000, 39: 3 582-3 591.
- [27] Wang M, Franz B, Barnes A, *et al.* Effects of spectral band-pass on SeaWiFS-retrieved near-surface optical properties of the ocean[J] . *Applied Optics*, 2001, 40: 343-348.
- [28] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of Sea WiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J] . *Applied Optics*, 2000, 39: 897-912.
- [29] Moore G F, Aiken J, Lavender S J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters; application to MERIS[J] . *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20: 1 713-1 733.
- [30] Hu C, Carder K L, Muller-Karger F E. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method[J] . *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 195-206.
- [31] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color[J] . *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 10 909-10 924.
- [32] Morel A. Optical Modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I Waters)[J] . *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 10 749-10 768.
- [33] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal[J] . *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 7 163-7 180.
- [34] Carder K L, Chen F R, Lee Z P, *et al.* Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains on nitrate-depletion temperatures[J] . *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 5 403-5 421.
- [35] Sathyendranath S, Cota G, Stuart V, *et al.* Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches[J] . *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22: 249-273.
- [36] Doeffler R, Fischer J. Concentration of chlorophyll, suspended matter and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods [J] . *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 7 454-7 466.
- [37] Roesler C S, Perry M J. In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance[J] . *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 13 279-13 294.
- [38] Lee Z P, Carder K L, Peacock K L, *et al.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance[J] . *Applied Optics*, 1996, 35: 453-462.
- [39] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization[J] . *Applied Optics*, 1999, 38: 3 831-3 843.
- [40] Garver S A, Siegel D A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Time series from the Sargasso Sea[J] . *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 18 607-18 625.
- [41] Sathyendranath S, Prieur L, Morel A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters[J] . *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 1 373-1 394.
- [42] Sathyendranath S, Hoge F E, Platt T, *et al.* Detection of phytoplankton pigments from ocean color: Improved algorithms[J] . *Applied Optics*, 1994, 33: 1 081-1 089.
- [43] Buckton D, O' Mongain E. The use of Neural Networks for the estimation of oceanic constituents based on the MERIS instrument[J] . *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20: 1 841-1 851.
- [44] Zhan Haigang, Shi Ping, Chen Chuqun. Inversion of oceanic chlorophyll concentrations by natural networks[J] . *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46: 158-161. [詹海刚, 施平, 陈楚群. 利用神经网络反演海水叶绿素浓度[J] . *科学通报*, 2000, 45 (17): 1 879-1 884.]
- [45] Pan Delu, Mao Tianming, Yin Zhonglin. Chlorophyll a concentration retrieval model in subtropical ocean[A] . In: *Oceanography in China*, 12: Study on the Subtropical Current in the North-West Pacific Ocean(2) [C] . Beijing: China Ocean Press, 2000. 123-133. [潘德炉, 毛天明, 尹中林. 副热带环流海区叶绿素 a 浓度反演模式的研究[A] . 见: *中国海洋学文集*, 12: 西北太平洋副热带环流研究(二)[C] . 北京: 海洋出版社, 2000. 123-133.]
- [46] Li Yan, Pan Delu, Mao Zhihua. Marine optical remote sensing technology- development and our task[A] . In: *Proceedings of Marine High-tech Development Workshop in 1999*[C] . Beijing: China Ocean Press, 2000. 63-68. [李炎, 潘德炉, 毛志华. 海洋光学遥感技术发展和我们的任务[A] . 见: *1999 海洋高新技术发展研讨会论文集* [C] . 北京: 海洋出版社, 2000. 63-68.]
- [47] Holben BN, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J] . *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 1-16.
- [48] Zhang Xuqin, Zhang Shikui, Wu Yongsun, *et al.* Progress in research on yellow-substance in seawater[J] . *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2000, 18(1): 89-92. [张绪琴, 张士魁, 吴永森, 等. 海水黄色物质研究进展[J] . *黄渤海海洋*, 2000, 18(1): 89-92.]
- [49] Tang Junwu. The Simulation of Marine Optical Properties and Color Sensing Models[Dissertation D] . Beijing: Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, 1999. [唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[博士论文 D] . 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999.]
- [50] Cao Wenxi. Marine optical monitoring technology at the beginning of the new century[A] . In: *Proceedings of Development Strategy Workshop on Marine High-tech Monitoring at the Beginning of the 21st Century*[C] . Beijing: China Ocean Press, 2000. 127-143. [曹文熙. 世纪之交的海洋光学监测技术[A] . 见: *21 世纪初海洋监测高新技术发展战略研讨会论文集* [C] . 北京: 海洋出版社, 2000. 127-143.]
- [51] Cao Wenxi. Marine optical monitoring technology: development status, tendency and strategic envisagement[A] . In: *Proceed-*

- ings of Marine High-tech Development Workshop in 1999[C] . Beijing: China Ocean Press, 2000. 34-41. [曹文熙. 海洋光学监测技术的发展状况、趋势和战略设想[A] . 见: 1999 海洋高新技术发展研讨会论文集[C] . 北京: 海洋出版社, 2000. 34-41.]
- [52] Li Sihai, Wang Hong, Xu Weidong. Research and progress in satellite ocean color remote sensing[J] . *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(2): 190-196. [李四海, 王宏, 许卫东. 海洋水色卫星遥感研究与进展[J] . *地球科学进展*, 2000, 15(2): 190-196.]
- [53] Ohde T, Siegel H. Correction of bottom influence in ocean colour satellite images of shallow water areas of the Baltic Sea[J] . *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22: 297-313.
- [54] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semianalytical model[J] . *Applied Optics*, 1998, 37: 6 329-6 338.
- [55] Maritorena S, Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo[J] . *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 1 689-1 703.

PROGRESS AND PROSPECT OF OCEAN COLOR REMOTE SENSING IN CASE 2 WATERS

REN Jing-ping¹, ZHAO Jin-ping²

(1. *Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China; 2. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China*)

Abstract: case 1 waters and case 2 waters are different water types defined by optical characteristics. case 1 water is clear, open-ocean water, and case 2 is generally coastal, higher productivity, turbid water. Ocean color in case 2 waters is influenced by three major components of the water, namely phytoplankton pigment, suspended sediment and yellow substance. case 2 waters are more complex than case 1 waters in their composition and optical properties. To date, remote sensing of ocean color has focused largely on case 1 waters. It has been demonstrated that the standard algorithms in use today for chlorophyll retrieval from satellite data work well in case 1 waters, but they often break down in case 2 waters. With the advent of the new sensors and the emergence of the new algorithm in parallel, better interpretation of ocean color in case 2 waters are under intensive investigation.

Technical requirements for ocean color measurements are reviewed first according to the spectral signatures and ocean processes in case 2 waters. The minimum requirements for ocean color sensors designed for case 1 applications are introduced. Ocean color sensors for case 2 waters must meet all the requirements for case 1 waters, as well as the special requirements for case 2 waters. ①In the visible domain, additional spectral channels are required for the measurement of chlorophyll fluorescence, suspended sediment, yellow substance and shallow bottom reflectance. In the near infrared region, one or more additional channels are required for atmospheric correction over shallow or turbid coastal waters because of the non-zero water leaving radiance beyond 700 nm. ②Because the range of remote sensing reflectance in case 2 waters is larger than in case 1 waters, the sensitivity and signal-to-noise ratio must be increased. In addition, ocean color sensors must not saturate over clouds or the coast, so very high dynamic range is required. ③More temporal resolution and more spatial resolution are required to monitor the dynamical processes of the coastal zone. No single existing or planned satellite sensors meet all those requirements. Monitoring of coastal waters must involve sensors aboard various platforms, whether they are spaceborne, airborne, in situ or land-based.

Development of retrieval algorithms is then elucidated. With at least three groups of different color producing components, all varying independently with local and seasonal variations, remote sensing in case 2 waters is a non-linear, multivariate problem, and the algorithms must be designed accordingly. The algorithms are being developed toward treating the ocean-atmosphere system as a coupled system, retrieving aquatic properties based

on theoretical models and introducing new and powerful mathematical and statistical approaches to solve non-linear, multivariate problem. Atmospheric correction in turbid coastal waters is complicated by the occurrence of non-zero water leaving radiance beyond 700 nm. There are two approaches to correcting for the effect of the near infrared contribution of water leaving radiance to the atmospheric correction. One is to use a coupled hydrological atmospheric model to calculate the atmospheric path radiance iteratively. Another is to apply the aerosol type observed over adjacent, less turbid waters to the turbid water pixels. Inverse techniques can also be used to estimate simultaneously in-water constituents and aerosols. Bio-optical algorithms, including empirical approaches and model-based approaches, are reviewed. Empirical algorithm is successful in case 1 waters, but its accuracy is usually relatively-low in Case 2 waters. Model-based algorithms use bio-optical models to describe the relationship between water constituents and spectra of water leaving radiance and reflectance, and use radiative transfer models to simulate the light propagation through the water and the atmosphere. There are four major groups of algorithms developed to date, the algebraic methods, the non-linear optimization techniques, the principal component approach and the neural network approach. The algebraic method is a semi-analytical model, and is the simplest of the model-based approaches. The non-linear optimization directly invert the forward model to estimate simultaneously all the concentrations of the aquatic constituents by minimizing the differences between the calculated values and the measured radiances using such minimization techniques as the simplex algorithm, Levenberg-Marquardt method and the Gauss-Newton algorithm, *etc.* It doesn't depend on a pre-defined, simulated data set. The complexity level and retrieval accuracy are the highest among the four approaches. The principal component analysis of simulated data is introduced to deal with the high correlation between signals from different wavebands in case 2 waters, determining the spectral dimensionality of the data and the weighting coefficients of each spectral channel. Atmospheric correction is unnecessary and the model can be implemented at high computation speed. The neural network is a powerful approach to the retrieval of water constituents and also to atmospheric correction over case 2 waters. The disadvantage is that the design of the training and test data set and the training procedure require extensive experience. In summary, the algorithms are still far from being operational, and significant improvements are needed.

Finally, key issues for ocean color remote sensing in China seas are discussed based on the specific characteristics of the coastal waters. Most of the East China Seas belong to case 2 waters, and the optical properties of the shallow, turbid waters are very complex. It is well recognized worldwide that the turbid atmospheric correction over East China Seas is a difficult task, and new algorithms are needed to address the challenge. Up to now, we know little about the Inherent Optical Properties in case 2 waters, and in situ measurements are necessary both in the development of algorithms, as well as for subsequent validation of the retrieval results from satellite data. Bottom reflectance, bottom characterization and bathymetry must be taken into account when developing retrieval algorithms in optically-shallow waters. The optical properties of coastal waters vary greatly over time and space. Regional algorithms optimized for local conditions are required to better interpret ocean color in China Seas.

Key words: Ocean color remote sensing; Case 2 waters; Retrieval algorithm.