

海洋水色卫星遥感二类水体反演算法综述

卢聪景

(福建省石狮市环境监测站 福建泉州 362700)

摘要 在简要说明海洋水色遥感原理、水体类型和水色遥感的物理基础上,针对二类水体的光谱特性和海洋现象的特点,综述二类水体水色反演算法的各种算法,并进行了特点比较。

关键词 水色遥感 二类水体 反演算法

中图分类号:P715.6

文献标识码:A

文章编号:1672-9064(2011)05-064-3

海洋水色遥感是利用卫星传感器获得的海洋表层水体光谱信息来研究海洋现象或海洋过程的新兴技术。由于浮游植物的叶绿素、无机悬浮物和有机黄色物质是决定水色的三要素,而水色遥感技术的原理是通过卫星传感器接收的信号来反演获得水体中影响光学性质的组分浓度,进而探测到海洋上层物质成分组成。所以,水色遥感在海洋初级生产力的估计和海洋通量研究、海洋生态环境监测、海洋动力学研究、海洋渔业开发和管理服务等方面都具有广泛应用。

到目前为止,水色遥感主要针对相对简单的一类水体进行研究,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。

但是二类水体的光学特性远比一类水体复杂,通过水色卫星资料反演叶绿素浓度的标准算法对二类水体并不适用。目前,通过对卫星平台传感器和现场观测的研究,水色反演的新算法相继问世。例如针对二类水体的特点,建立一些新的数学模型,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的非线性问题。

1 海洋水色遥感简介

1.1 水色遥感原理

水色遥感的原理是通过卫星传感器接收信号的变化,来反演获得水体中影响光学性质的组分浓度,这里组成成分主要指浮游植物、黄色物质以及水体中的无机悬浮物。水体中的重要组分浓度发生变化时,必将引起水体光学性质的变化,主要表现为水体的吸收和散射信号的变化,即水体离水辐亮度的变化。获取离水辐亮度以后,再根据水体光学性质与各成分浓度的关系,通过一系列反演算法得到水体中各成分的浓度^[1]。

1.2 水体类型

海水按其光学性质的不同可划分为一类水体 (Case 1 Waters)和二类水体 (Case 2 Waters)。一类水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定,典型的一类水体是大洋开阔水体。二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^[2,3]。通常外海海水为一类水体,沿岸水水体属于二类水体。二类水体位于与人类关系最密切、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是影响海水环境的重要成分,也是影响海水光学特性的重要参数。如果从水色遥感资料能可靠地推算出悬浮泥沙、叶绿素和黄色物质含量,我们就能够对近海、河口环境进行实时、长周期、大范围的监测和研究。

2 二类水体的水色反演算法

二类水体的光学属性受几种物质共同影响,而且许多情况下二类水体对入射光具有很大的散射作用。因此已有的一类水体反演算法并不适用于二类水体,需要设计新的算法来研究二类水体。下面介绍现有的几种二类水体反演算法及其优缺点。

2.1 经验公式法

经验公式是建立在实验数据基础上的,通过建立水体光学性质和水质组分浓度之间的定量关系,即通过测量水体表面的光谱辐射特征和水体中各组分的浓度而建立的。

算法表达式为:

$$\hat{\rho} = \alpha \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\beta + \gamma}$$

式中: $\hat{\rho}$ 为待估计物理量的浓度(如叶绿素浓度、悬浮物质和黄色物质浓度,以及衰减*i*系数);*R*为光谱通道*i*的反射(或辐射)系数;系数 α 、 β 和 γ 可根据实验数据得出的辐射率系数与水体物理性质的关系反演求得^[4]。

2.2 模型算法

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

作者简介:卢聪景(1984-),女,硕士,毕业于厦门大学环境管理专业,主要从事环境科学的研究。

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^[5]。

2.2.1 代数法

最简单的模型算法是用代数表达式描述海洋水色与地球物理特征的相关性。这种方法应用按照一定周期测量的光谱数据,建立光谱特征与水中物质组分浓度之间的定量关系。因为需要测量光谱数据来建立海洋水色模型,所以该方法又称“半解析法”。利用近似值可以减少未知数的个数和简化未知数之间的相互关系,该方法表示为一个可以依次求得未知数解的方程组,如果光谱特征与物质组分浓度是非线性关系,可以通过查表或者减小预测值和观测值之间的差异来求解。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,对特定的二类水域的运算结果也较精确^[6],但能求解的未知量(即反演的浓度)个数有限。

2.2.2 非线性最优化法

该多变量分析方法包含了2个模式:①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;②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

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

对所有波长求和。采用 simplex 算法、Levenberg2, Marquardt 方法 [37~39] 或 Gauss-Newton 算法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 主成分分析法

在所有研究海洋水色的算法中,都要考虑水体对大气的吸收和散射,因为它们对大气辐射测量的影响很大。传统的方法是通过大气纠正来消除水体对光的吸收和散射。综合解译方法是将大气的光学性质作为反演公式的附加变量来考虑。采用这种方法,可将海洋水色传感器测量到的大气顶部的光谱辐射数据作为反演的初值。该方法不但可以测量大气的光谱性质,还可以定量反演水体中三种主要组分(叶绿素-a、黄色物质和无机悬浮物质)的特征,能够根据水体内部不同的光学性质对算法进行调整。该方法利用多光谱、多变量的数据可以区分水体所含的不同组分,并且可以节约计算机运算时间。

综合解译算法的基本思想是要得到大气顶部光谱辐射和地球物理量之间的分段线性关系图。该算法研究引出了光

学权重系数的概念,并且与多变量线性回归分析密切相关。因为不同波段的光谱数据特征具有很大的相关性,所以需要一种特殊的方法来研究二类水体,主成分分析法就是可以减少这种相关性的方法之一。给定水体组分和大气光谱性质的相关性,辐射传输模型可以产生大气顶部的辐射特征数据集和检验传感器的光谱性能。所以,对模拟光谱数据的主成分分析可以决定所需光谱通道数和每一个光谱通道在反演感兴趣的地球物理变量时所占的权重。相对于使用所有波段而言,主成分分析法通过计算不同波段提供的信号的相关性,并增强它们之间的潜在的差别,提高了反演水体组分的准确性。

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^[5]。

2.2.4 神经网络法

神经网络技术可以用来解决水色遥感反演问题,包括不同波段辐射之间的相互关系反演,以及水体组分的浓度反演。利用神经网络技术的多元非线性回归技术与简单线性回归的相互关系,神经网络技术反演算法的优势在于其预测模型包含了详细的遥感过程的物理描述,具有极高的实用性。

神经网络技术可以根据一组测量数据(即浓度和反射率)或者一组模拟数据集进行回归分析。如果利用辐射传输模型的模拟数据集,需要知道水体内部光学性质。线性或非线性的回归分析可以推导水体组分浓度和光谱辐射特征之间的关系。而且,还需要其它一些关于水体性质的假设条件,如水体组分的垂直分布状况等。

一个神经网络在输入层和输出层包含大量的节点,输入输出层之间有许多隐含层。提前输入的神经网络,每一个层的节点都和前一输出层的所有节点相关联。每一节点的输入值权重不同,对其求偏导或者其它非线性逻辑关系求和,因此输出值就和下一层的所有神经元有关。这种逻辑关系特别适用于遥感研究,因为浓度的对数和反射率的对数都遵循新的对数函数。因为每一个节点有不同系数,所以人工神经网络可以描述任何非线性关系。通过实验或者训练,求模拟浓度和光学性质的最小方差来决定每个神经元的权重,通过神经网络和相关辐射率的关系决定水体组分的浓度。系数的确定,即训练,可以用各种最小化技术例如后向传播算法等,问题是反演求出的浓度与辐射值的关系在误差范围内会有不止一个解,学习的成功与否依赖于是否尽量避免了这些问题。另外,还要避免过量的学习,因为当网络对每个节点训练精度较节点之间训练精度高时,可以近似描述多边形,却不能正确描述每一个节点^[4]。

2.3 不同算法的特点

上述四种模式算法都需要生物光学模式作为输入,主成

表1 不同算法的主要特点

算法属性	经验公式法	代数法	非线性最优化法	主成分分析法	神经网络法
输入要求	生物-光学数据和实地测量数据中的代表性数据	生物-光学模型	生物-光学模型	生物-光学模型或生物-光学数据和实地测量中的代表性数据	生物-光学模型或生物-光学数据和实地测量中的代表性数据
复杂性级别	低	中	高	中等(对于模型和训练),低(对于运算)	高(对于模型和训练),低(对于运算)
反演准确性	低到中等	中	高	中到高	中到高
对模拟/训练数据的依赖性	无	无	无	有	有
计算机运算速度	低	低	高	中等(对于模型和训练),低(对于运算)	高(对于模型和训练),低(对于运算)
适用的空间范围	依赖于输入的数据类型	通过局部模型适应	通过局部模型适应	通过局部 LUTs 自适应	通过局部网络自适应

分分析法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,它们需要依赖模拟或训练数据。非线性最优化法是最复杂、反演精度最高的算法,也是运算耗时最长的算法。模式算法都可区澎化。目前,这些算法还不健全,需要大加改进。二类水体光学特性极其复杂,不同水体所适用的算法会有所差别,应仔细研究各海区的异同,发展分工更细、具有针对性的算法模式。不同算法的主要特点见表1。

3 结语

从上面讨论中可以得到如下结论:

(1)由于二类水体内部光学性质不稳定,与一类水体的简单反演算法相比而言,二类水体的反演算法需要更加复杂的数学函数和计算过程,要处理更多的变量,在非线形反演算法中存在更多的未知数。

(2)二类水体的反演需要更多的光谱信息,也就是说,需要更多的光谱通道和更高的光谱分辨率,某些应用领域还需要高光谱数据。

(3)提高二类水体反演算法的精确度的基本方法是同时调用一些关于输出变量的相关信息。关于欲反演物理量的性质的统计关系(如最简单的回归方程)和物理模型可以帮助获得正确的反演结果^[1]。

(4)为了检验二类水体反演算法的有效性,要求建立可以校正光学仪器和测量样品的光学模型。二类水体的光学模

型要比一类水体的光学模型具有更大的可扩充性,有利于不同算法和结果的互相比较。

总之,尽管研究海洋水色卫星数据反演二类水体的算法已经取得可喜的进步,但是要建立全球通用的反演算法还远远不够。为了保证反演结果的精度达到能够解决实际问题的要求,仍然需要继续研究更好的反演光学模型和提高各种算法的研究程度。

参考文献

- 1 陈森.海洋水色卫星遥感算法综述.中国优秀博硕士学位论文数据库,2005.7
- 2 Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4)
- 3 Gordon H R, Morel A. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review. New York: Springer-Verlag, 1983
- 4 巩彩兰,樊伟.海洋水色卫星遥感二类水体反演算法的国际研究进展. *海洋通报*, 2002.4
- 5 任敬萍,赵进平.二类水体水色遥感的主要进展与发展前景. *地球科学进展*, 2002.6
- 6 Carder KL, Chen FR, Lee ZP, et al. Semianalytic Moderate Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll and absorption with bio-optical domains on nitrate depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104

我国将合理控制能源消费总量

从十一届全国人大常委会第二十二次会议上获悉,目前国家能源局正牵头研究建立能源消费总量控制制度,以形成

能源消费总量倒逼机制,抑制高耗能行业过快增长。

法国太阳能发电装机容量一年增长近两倍

法国可持续发展综合委员会9月1日发布的数据显示,法国太阳能发电装机容量在截止2011年6月的一年间增长

了近两倍。与此同时,法国的风力发电装机容量增长约14%。