

基于 MODIS 遥感数据源的内陆水体叶绿素 a 浓度反演算法综述

吴煜晨

(江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

摘要:由于 MODIS 遥感具有较高的空间、光谱以及时间分辨率,遥感反演方法已经逐渐成为内陆水体叶绿素浓度信息提取研究的重要技术之一。本文回顾了国内外 MODIS 遥感反演算法研究进展,总结了目前若干反演方法的基本原理与典型算法,将反演方法归纳为经验模型法、半经验模型法以及分析模型法,对比分析各方法的特点,并提出区域性与普适性问题是所有目前算法模型的通病,未来以高光谱数据源反演是趋势,算法要以解决区域局限性与水色复杂性为主。

关键词:MODIS;叶绿素 a;反演;遥感;内陆水体

中图分类号:P331 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2017)01-0014-05

0 引言

中国当前正在面临水环境质量的恶化和水环境污染等各种严重的环境问题。目前,国内许多重要湖泊,例如太湖的富营养化情况非常严重,定时定量监测水体浮游植物数量是解决湖泊富营养化问题的关键^[1]。叶绿素 a 是浮游生物的重要组成成分之一,若浮游生物数量变多,湖泊的叶绿素含量也相应会增高,因此叶绿素 a 常常用于估算湖泊等水体的浮游植物的生物量,也更是反映水体营养化程度的一个极重要参数。因此通过监测内陆湖泊水体的叶绿素 a 浓度以及分布情况,能够很直观地反映出水体的水质状况与富营养化情况。

目前水生态环境系统的监测体系主要以定时定点的地面监测系统为主^[1],实际监测工作因为受到人力物力等条件的限制,布设的监测点位数量非常有限,监测点位的数量往往会影响到整体湖泊富营养化监测结果的精度,特别针对非点源污染的监测极其不利,所以对于大面积大范围的水域,传统的地面监测系统很难快速全面地监测营养化程度的分布和变化^[2]。相比之下,随着卫星遥感技术的飞跃发展,遥感监测具有快速及时、动态准确、大范围覆盖、低成本以及周期性等特点,能够弥补传统地面监测采样方法的数据离散化、耗时长且费用高的缺陷,可以有效地结合地面离散数据,反演

并同时监测水域表面水质参数在时空上的变化情况^[3]。因此卫星遥感监测技术已经逐渐成为研究大时空尺度水域富营养化现象的有效手段,具有一定的优越性。

1 基本原理

叶绿素 a 是光学活性物质,大量研究表明叶绿素 a 在蓝色与红色波段附近有明显的吸收谷,在红外波段附近有明显的反射峰,表现出一定的特征光谱,同时水体在近红外波段附近有明显的吸收谷。因此水域内叶绿素的含量高低会导致水体反射光谱特征发生明显的变化。该特征支撑了内陆水体富营养化监测与反演建模的理论基础。

2 研究进展

随着遥感技术的逐渐成熟,MODIS 卫星遥感影像数据,给内陆水体的富营养化监测提供了新的机遇。MODIS 遥感影像数据具有 250 m~1 000 m 的地面空间分辨率,拥有覆盖可见光到热红外的 36 个光谱通道,波段的设置非常适合于监测 II 类水体。同时,MODIS 影像数据一天两次成像,时间分辨率很高,加之较高的辐射分辨率和免费的数据获取途径,使其成为大型内陆湖

收稿日期:2016-11-07

作者简介:吴煜晨(1991-),男,硕士,助理工程师。

泊营养化遥感监测的最有潜力的数据源之一^[4]。在早期,许多学者对卫星遥感影像数据进行几何纠正、重采样、辐射定标以及大气校正等预处理工作得到水体较为真实的像元反射率,结合地面监测的离散采样点数据,利用不同的反演模式找出像元反射率与监测样点的对应关系,这类方法统称为经验模型法。其中运用最广泛的是波段比值法:胡尊英等利用 MODIS 近红外波段 2 与可见光波段 4 的比值模拟太湖蓝藻的分布情况,结果与实际情况大致相符;丛丕福等用 MODIS 波段 4、8、9、10、12、13、14 等进行波段比值运算,从中选出最优组合反演辽东湾叶绿素浓度。除了波段比值法外,还有引进陆地植被的反演方法来反演水体叶绿素浓度。经验模型法的反演模型一般比较简单,比较依赖实际的采样数据,并且叶绿素的浓度与遥感数据之间的事实相关性不能保证,缺乏一定的物理依据,具有较强的区域性。为了弥补经验算法的缺陷,半经验算法逐渐发展起来,并成为了目前比较常用的方法。它将遥感数据、采样数据与统计模型三者想结合,具有一定的物理意义。Dall'Olmo 与 Gitelson 等提出了一种三波段模型,该模型能够最大程度地提取光谱中的叶绿素信息,从而与实际样本的叶绿素浓度有较好的相关性。此外还有在三波段模型基础上的四波段模型以及 APPLE 模型。半经验算法的各种模型虽然各有差别,但是其中心的理念都是消除悬浮物、黄色物质、后向散射以及纯水对于叶绿素反射波谱的影响,从而最大化地提取叶绿素浓度。经验模型法与半经验模型法都需要依赖基础的野外水样叶绿素浓度数据来反演并构建模型,因此模型的物理性欠佳。Gordon 在 1975 年提出了一种新型模型称为分析模型,它主要依赖于水体组分、固有光学量、表观光学量之间的关系,通过代数方程直接求解叶绿素浓度,具有极高的物理性与相关性。但是相较于经验/半经验模型法,分析模型需要大量水体各种组分的固有光学特性数据,具体实施较为困难,建立算法的难度比较大。

总体来说,目前比较大众的内陆水体反演模型为经验模型法、半经验模型法以及分析模型法,三种方法互有优点与缺点,下文将总结各种方法的原理与公式,并进行横向对比分析。

3 经验模型法

3.1 单波段法

蓝藻属于水域内的浮游生物,同陆地绿色植被一样靠着细胞内的叶绿素进行光合作用,因此它们有着类似

的反射光谱特征。一般单波段方法中所选择的波长都集中在叶绿素 a 反射特征光谱的反射峰或吸收谷的位置。许多国内外学者针对各种水域开展了相关单波段反演叶绿素 a 浓度的研究:黄耀欢等人为了实现武汉汤逊湖叶绿素 a 浓度的遥感定量监测,利用同步实测的水质数据与 380~900 nm 范围的 MODIS 光谱波段数据进行了遥感定量反演,研究发现最优波段主要集中在红外波段附近 726.5~734.4 nm 的波长范围^[1]。单波段法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * R_a \quad (1)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; R_a 为所选反演 MODIS 数据源 a 波段的水体反射率。

3.2 波段比值法

相关研究表明,通过相关波段进行比值分析能够有效地减少大气和镜面反射的影响以及消除水表面光滑度和微波变化的干扰,并且能在一定程度上减少类似黄色物质等污染物的影响,许多学者依据叶绿素 a 的反射光谱特征选取两个或者更多的波段进行比值,可以扩大叶绿素 a 的吸收谷与反射峰的差异,有效地反演与提取叶绿素 a 浓度信息。胡尊英等运用 MODIS 遥感数据中的近红外 Band2 与可见光绿色 Band4 两个波段进行比值,对太湖的蓝藻分布进行了提取,得到的结果与目视解译结果的吻合程度较高。Koponen 等人发现,通过对光谱反射率值进行对数转换,有助于对叶绿素 a 含量进行定量遥感。段洪涛等利用查干湖的叶绿素 a 浓度实测数据与 670 nm、700 nm 两个波段的比值对数建立了回归方程,相关系数 R^2 达到 0.71。波段比值法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * \frac{R_a}{R_b} \quad (2)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; R_a 、 R_b 分别为所选反演 MODIS 数据源 a、b 波段的水体反射率。

3.3 波段差值法

波段差值法也称差值植被指数法(DVI),DVI 是陆地遥感技术针对于陆地植被分布以及生长情况的一种定量分析方法,它对土壤背景的变化有着较高的敏感性,可以在一定程度上识别并区分水体和植被。由于水域蓝藻水华与陆地绿色植被有着相似的反射率光谱特征,因此陆地差值植被指数法对于水域蓝藻水华叶绿素 a 浓度的反演有一定的借鉴意义。波段差值法主要是依据叶绿素 a 在红外波段与近红外波段的光谱特性差

异建立的半分析模型,将两波段的差值作为相关变量反演水域叶绿素 a 浓度。王珊珊等基于 MODIS 的红光波段 1 与近红外波段 2 数据反演了太湖水体叶绿素浓度,相关系数 R^2 为 0.495 4^[6]。顾亮等不拘泥于传统的红外波段与红光波段差值反演法,将 MODIS 遥感数据所有波段进行全部可能的组合,最终选取了蓝光波段 3 与红外波段 19 建立叶绿素 a 浓度反演模型,相关系数 R^2 达到 0.702 2。波段差值法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * (R_a - R_b) \quad (3)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; R_a 、 R_b 分别为所选反演 MODIS 数据源 a、b 波段的水体反射率。

3.4 归一化植被指数法

归一化植被指数法 (NDVI) 同差值植被指数法一样,是陆地遥感技术针对于陆地植被分布以及生长情况的一种定量分析方法。NDVI 吸取了波段比值法的优势,能够在一定程度上扩大强、弱反射率波段的差距,达到突出感兴趣地物的目的,并且在此基础上以 MODIS 两个波段反射率之差与之和进行比值,通过非线性拉伸的方式进一步增强两个波段反射率的对比,从而反映植被覆盖度和生长状况的差异。顾亮等选取了 MODIS 蓝光波段 3 与近红外波段 17 建立了叶绿素 a 浓度反演模型,相关系数 R^2 达到了 0.641 0。归一化植被指数法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * \frac{R_a - R_b}{R_a + R_b} \quad (4)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; R_a 、 R_b 分别为所选反演 MODIS 数据源 a、b 波段的水体反射率。

3.5 光谱微分法

Rundquist 首先提出并建立了一阶微分模型,该方法能够有效地去除部分线性或者似线性背景、噪声光谱对目标光谱的影响。光谱微分法首先要分析叶绿素 a 浓度与光谱反射率之间的关系,选取两者相关性最为显著的波段所对应的反射率以及其相邻波段对应的反射率,计算出该光谱波段的微分值,最后利用该微分值与叶绿素 a 浓度进行相关反演,建立合适的模型。段洪涛等与杨煜等分别利用光谱微分法对查干湖与太湖的叶绿素 a 浓度进行了反演并建立模型,相关系数 R^2 分别达到了 0.54 与 0.69^[6]。光谱微分法的一般回归模型如下:

$$R(a_i)^n = \frac{(R(a_{i+1})^{n-1} - R(a_{i-1})^{n-1})}{(a_{i+1} - a_{i-1})} \quad (5)$$

$$C_{chl-a} = A + B * R(a_i)^n \quad (6)$$

式中: a_i 为相关性最为显著的 MODIS 波段; $R(a_i)$ 为波段 a_i 对应的反射率; a_{i+1} 、 a_{i-1} 分别为 a_i 波段的两个相邻波段; $R(a_{i+1})$ 、 $R(a_{i-1})$ 分别为波段 a_{i+1} 、 a_{i-1} 对应的反射率; n 为求导次数; C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数。

4 半经验模型法

4.1 三波段法

Dall'Olmo 与 Gitelson 等首先提出了用于测算陆地绿色植被叶绿素含量的三波段遥感反演模型。该模型根据水体光学的基本理论,采用 3 个特征波段并结合数学推导与统计理论,把叶绿素的光谱信息从无机悬浮物、黄色物质以及纯水的光谱信息中分离出来,具有明确的物理意义。模型中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别选择 660 ~ 690 nm、710 ~ 730 nm 和 730 nm 以后的波段,但是波段的区间范围与 MODIS 传感器波段设置不能完全理想地契合。针对此问题 El - Alem 等提出,可以采用 MODIS 波段 1 代替 λ_1 ,选用 MODIS 波段 1、3、4 的组合代替 λ_2 ,选用 MODIS 波段 2 代替 λ_3 。王珊珊等利用 MODIS 1、2、3、4 波段数据反演了太湖水体叶绿素浓度,模型相关系数达到了 0.64。三波段法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * (R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)) * R(\lambda_3) \quad (7)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; $R^{-1}(\lambda_1)$ 、 $R^{-1}(\lambda_2)$ 分别为所选波段 λ_1 与 λ_2 反射率的倒数; $R(\lambda_3)$ 为所选波段 λ_3 的反射率。

4.2 四波段法

Le 在三波段半经验法的基础上,引入第四个波段来进一步考虑叶绿素荧光效应与悬浮泥沙的影响,提出了四波段算法,并利用实验数据验证了此模型具有较高的精度。四波段法的一般回归模型如下:

$$C_{chl-a} = A + B * \frac{(R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2))}{(R^{-1}(\lambda_4) - R^{-1}(\lambda_3))} \quad (8)$$

式中: C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数; $R^{-1}(\lambda_1)$ 、 $R^{-1}(\lambda_2)$ 、 $R^{-1}(\lambda_3)$ 、 $R^{-1}(\lambda_4)$ 为所选波段 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 反射率的倒数。

4.3 APPLE 模型法

APPLE 模型是由 El - Alem 等针对 MODIS 遥感数据源提出的一种新型的半经验模型。它的基本原理是叶绿素 a 在近红外波段处表现为高反射率光谱特征,而水体正好相反,表现出强吸收的反射光谱特征,充分利用这一特性能够最大限度地获取叶绿素信息量^[7]。但

是由于在叶绿素与水体近红外波段反射率光谱中,仍然受到悬浮物、CDOM 以及后向散射的影响,因此该模型加入了蓝光波段来去除 CDOM 的影响,同时引入红光波段来削弱悬浮物的影响,最终利用近红外波段与蓝光波段、红光波段的相辅的作用,达到去除后向散射影响的结果^[5]。王珊珊等利用 APPLE 模型,采用 MODIS 的红光波段 1、近红外波段 2 以及蓝光波段 3 遥感数据,对太湖水体叶绿素 a 浓度进行了反演,相关系数 R^2 达到了 0.73^[6]。APPLE 模型法的一般回归模型如下:

$$F(APPLE) = R(a_{NIR}) - [(R(a_{BLUE}) - R(a_{NIR})) * R(a_{NIR}) + (R(a_{RED}) - R(a_{NIR}))] \quad (9)$$

$$C_{chl-a} = A + B * F(APPLE) \quad (10)$$

式中: $F(APPLE)$ 为 APPLE 的光谱指数; $R(a_{NIR})$ 、 $R(a_{BLUE})$ 、以及 $R(a_{RED})$ 分别为 MODIS 遥感数据中的红光波段、蓝光波段以及红光波段; C_{chl-a} 为水域叶绿素 a 的浓度; A 、 B 为回归模型的相关系数。

5 分析模型法

分析模型法是 Gordon 在 1975 年提出的一种新型模型,目前已逐渐发展为一类有代表性的机理模型。该模型的理论基础是水体内部光学传输,基于水体组分与固有光学量、固有光学量与表观光学量之间的关系,模拟水中光场分布,进而反演水质参数。利用此模型反演叶绿素浓度主要分为三个步骤:第一,找到水面以下辐照度比与遥感反射率的关系;第二,确定水面以下辐照度比与固有光学量的关系;第三,结合第一步与第二步的方程,确定遥感反射率与固有光学量的关系,从而求解叶绿素的浓度。模型的一般方程式如下:

$$\frac{Q * R}{\frac{[1 - r(\theta_s)][1 - r(\theta_v)]}{n_w^2} + \bar{r} * Q * R} = f * \frac{b_n(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (11)$$

$$a(\lambda) = a_1(\lambda) + a_2(\lambda) * C_{chl-a} + a_3(\lambda) * C_s + a_4(\lambda) * C_y \quad (12)$$

$$b_b(\lambda) = b_1(\lambda) + b_2(\lambda) * C_s \quad (13)$$

式中: Q 为水面以下上行辐照度和福亮度的比值; R 为遥感反射率; $r(\theta_s)$ 为气水界面反射率; $r(\theta_v)$ 为水气界面反射率; n_w 为水体折射系数; \bar{r} 为水下上行辐照度被水面反射的比例系数; f 为模型系数; $a(\lambda)$ 、 $a_1(\lambda)$ 、 $a_2(\lambda)$ 、 $a_3(\lambda)$ 、 $a_4(\lambda)$ 分别为波长 λ 处水体总的、纯水、浮游植物、非色素颗粒物、黄色物质的吸收系数;

$b_b(\lambda)$ 、 $b_1(\lambda)$ 、 $b_2(\lambda)$ 分别为波长 λ 处水体总的、纯水、悬浮物的向后散射系数; C_{chl-a} 、 C_s 、 C_y 分别为水体叶绿素、悬浮物、黄色物质的浓度。

6 反演算法比较

由于内陆水体具有不稳定的内部光学性质以及近岸水体由多种水色因子成分组成等复杂因素的关系,上述的几种方法都存在一定的区域性以及不通用问题,尤其是经验模型法中的单波段法、波段比值法以及波段差值法对叶绿素 a 浓度实测数据以及水体区域环境状况的依赖性非常大,反演精度与相关性会有较大浮动。半经验模型法结合样点的叶绿素浓度数据,采用一定的水质物理参数,使得模型具有一定的物理性,在精度与适用性方面都较优于经验模型法。分析模型法摒弃了传统经验模型法与半经验模型法对于实际样点叶绿素浓度的依赖,采用水体内部的光学物理性质,结合算法与方程反演出叶绿素浓度,其精度极高,区域性问题也能够得到一定的解决,但是算法极其复杂。从经验模型法、半经验模型法以及分析模型法的特点中可以得出,算法越复杂,越依赖于水体物理性质的,其反演精度则更加优越。那么提高内陆水体叶绿素浓度反演算法的精度,基本的思路就是通过调用一些输出变量的相关信息,运用适宜的物理量性质的统计关系和物理模型,比如简单的回归方程,这样可以帮助获得正确的反演结果。目前,众多学者利用不同的模型反演了特定内陆水体的叶绿素浓度,虽然能够达到一定的精度,但是其构建的模型仅仅是适用于特定的区域,模型的适用性并没有做进一步的考证。本文提到各算法的主要特点见表 1。

7 讨论与展望

本文总结了目前利用 MODIS 遥感数据源反演内陆水体叶绿素浓度的主要算法,从当下反演应用需求来看,内陆水体叶绿素浓度的反演应体现其光学特性的区域性和季节性变化。我国的几个内陆湖泊例如太湖、汤逊湖以及查干湖虽然同为内陆水体,但是水质与光学特性差异很大,同一种反演算法会有一定的差别。因此,未来应探讨研究各内陆水体区域光学特性的共性和个性,探索悬浮物、黄色物质等水色因子对叶绿素与水体反射率的贡献大小,发展适用于中国内陆湖泊的叶绿素浓度反演算法体系。

表1 内陆水体叶绿素浓度各反演算法特点

算法属性	单波段法	波段差值法	波段比值法	归一化指数法	光谱微分法	三波段法	四波段法	APPLE模型法	分析模型法
复杂性	低	低	低	中	高	高	高	高	极高
反演准确性	低	低到中	低到中	中到高	中到高	较高	较高	较高	高
适用的空间范围	依赖输入的数据类型	依赖输入的数据类型	依赖输入的数据类型	通过局部的模型适应	通过局部的模型适应	稳定性较强,对于不同区域有较强适应	稳定性较强,对于不同区域有较强适应	稳定性较强,对于不同区域有较强适应	受环境与季节影响
优势	算法简单,用于粗略估算	适用叶绿素高浓度区域的反演	适用叶绿素中、高浓度区域的反演	适用湖泊蓝藻早、中期的反演	消除噪声光谱对目标光谱的影响	消除悬浮物、CDOM和后向散射的影响	消除悬浮物、CDOM和后向散射的影响	消除悬浮物、CDOM和后向散射的影响	极高的物理性,反演精度极高

参考文献:

- [1] 黄耀欢,江东,庄大方,等. 汤逊湖水体叶绿素浓度遥感估测研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(2):215~222.
- [2] 熊春妮,田晓锋,汤爱仪,等. 我国蓝藻水华遥感监测研究进展[J]. 现代农业科技,2010(9):281~282,297.
- [3] 张道祥,阮仁宗,颜梅春,等. 基于MODIS的巢湖叶绿素a空间分布[J]. 地理空间信息,2012,10(5):64~66.
- [4] 林怡,潘琛,陈映鹰,等. 基于遥感影像光谱分析的蓝藻水华识别方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(8):1247~1252.
- [5] 熊竹,丁世敏,肖红艳,等. 水体中叶绿素a浓度遥感反演的算法研究进展[J]. 中国西部科技,2015,14(10):16~20.
- [6] 王珊珊,李云梅,王永波,等. 太湖水体叶绿素浓度反演模型适宜性分析[J]. 湖泊科学,2015,27(1):150~162.
- [7] El - Alem A, Chokmani K, Laurion I et al. Comparative analysis of four models to estimate chlorophyll - a concentration in case - 2 waters using MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Imagery. Remote Sensing,2012,4(8):2373~2400.

编辑:张绍付

Review on inversion method of chlorophyll - a concentration in inland water based on Modis remote sensing data source

WU Yuchen

(Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Because of Modis remote sensing having a high spatial, spectral and temporal resolution, the remote sensing inversion has become one of the most important techniques for extraction of chlorophyll concentration inland water. This paper reviewed the progress of MODIS remote sensing retrieval algorithms at home and abroad, summarized the basic principles and typical algorithms of several inversion methods, summed up the inversion methods as empirical model method, semiempirical model method and analytic model method, analyzed and compared the characteristics of each method, and put forward the regional and universal problem was a common problem of all current algorithm model, advised that the inversion of hyperspectral data source was a trend in the future, and suggested that the algorithm should resolve regional limits and aquatic complexity.

Key words: MODIS; chlorophyll - a; Inversion; Remote sensing; Inland water

翻译:吴煜晨