

# 利用 SeaWiFS 数据估算珠江口海域表层 叶绿素浓度的研究\*

陈晓翔, 丁晓英  
(中山大学遥感中心, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 介绍了 SeaWiFS 资料的基本处理方法和海水叶绿素浓度提取方法, 针对目前 SeaWiFS 资料沿岸二类水域的数据失效问题, 提出了解决方法。并以珠江口为例, 将经改进算法处理后的 SeaWiFS 数据用于叶绿素信息提取, 经与实测数据对比, 平均误差为 29.6%。

**关键词:** SeaWiFS; 叶绿素; 珠江口; 大气校正

**中图分类号:** P412.27 (265) **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 01-0098-04

叶绿素浓度的精确估算对于海洋初级生产力、生物量等具有重要意义。从 20 世纪 70 年代开始遥感工作者就开始了探测海水叶绿素方面的研究并取得了许多成果, 如今卫星遥感已成为探测海水叶绿素浓度的重要方法之一。

自第一代海洋水色传感器海岸带水色扫描仪 CZCS 在探测大洋海水叶绿素浓度方面取得较好效果之后, 美国国家宇航局 (NASA) 于 1997 年 9 月成功发射海洋水色卫星 (SeaStar), 星上装载海洋宽视场扫描仪 (SeaWiFS)。SeaWiFS 资料能为遥感探测海水叶绿素浓度提供比 CZCS 更为丰富的信息源<sup>[1]</sup>。但由于 NASA 提供的 SeaWiFS 资料专用处理软件 SeaDAS (SeaWiFS data analysis system) 在处理二类海水区域的 SeaWiFS 资料时存在一些问题, 其大气校正模块不适用二类海水区域。使得目前 SeaWiFS 资料在水色遥感中的应用仅限于大洋水域。如何解决这一问题, 将 SeaWiFS 数据应用于近岸水域水色遥感研究, 是近年来国内外研究的重点。本文以珠江口海域作为研究对象, 通过介绍 SeaWiFS 资料的处理, 指出目前 SeaWiFS 资料用于近岸水域处理所存在的问题, 并提出了解决办法, 同时介绍了用 SeaWiFS 资料提取海水表层叶绿素信息的定量模型, 将之用于珠江口域海水叶绿素信息提取。结果表明, 利用 SeaWiFS 资料进行近岸海域表层叶绿素信息提取具有较高精度。

## 1 研究区概况和所使用卫星资料

研究区域包括了整个珠江口, 即东经 112°25′

- 114°25′, 北纬 23°20′ - 21°35′。珠江口属亚热带海洋性季风气候, 多年平均降雨量 1 600 ~ 2 300 mm, 为典型二类水区域。珠江三角洲河网径流量大, 年际变化小、具有含沙量小但输沙量较大、叶绿素、黄色物质含量高的特点。

本次所采用的卫星资料为 1998 年 12 月 31 日成像的 SeaWiFS 数据, 采用的是 L1a 格式产品。SeaWiFS 是美国第二代海洋水色卫星 SeaStar 所携带的一种光学机械扫描成像遥感仪器<sup>[2]</sup>。它共有 8 个探测波段, 均在可见光和近红外区, 除了第 7、8 波段的波段宽度为 40 nm 外, 其余 6 个波段的波段宽度均为 20 nm。与第一代传感器相比, 其探测水色的灵敏度更高、精度更好、图像质量更高。

## 2 SeaWiFS 资料的处理

SeaWiFS 资料的处理主要包括几何纠正和大气纠正。目前对 SeaWiFS 资料的处理可用美国 NASA 提供的专用软件 SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System)。

### 2.1 几何纠正

由于地球表面的弯曲和卫星姿态的变化, 卫星图像会出现几何畸变, 几何纠正就是按照一定的地图投影规则对卫星图像的几何畸变进行纠正处理, 使之能与地图匹配, 并符合人们的读图习惯<sup>[3]</sup>。

### 2.2 大气校正

大气校正是去除大气辐射的干扰, 获得准确的海面离水辐射率。由于海水的光谱信号很弱, 在卫星传感器接收的辐射量中, 来自海水的辐射量不足

\* 收稿日期: 2003 - 09 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40071063); 广东省百项工程资助项目 (2KB06202S);

作者简介: 陈晓翔 (1956 年生), 男, 教授; E-mail: eescxx@zsu.edu.cn

全部辐射量的 20%, 而超过 80% 的辐射量是由大气等非海水辐射产生的, 因此, 大气校正是 SeaWiFS 资料处理的关键。

目前 SeaDAS 对大洋水域 SeaWiFS 图像进行离水辐射信息提取时精度达  $\pm 5\%$ , 但却无法对近岸二类水域的 SeaWiFS 进行大气校正。主要原因是 SeaDAS 采用的大气校正算法是 Gordon 等<sup>[4,5]</sup>提出的针对 SeaWiFS 资料的标准大气校正算法。这种算法是在假设 765 和 865 nm 波段的离水辐射率为 0 的基础上, 推算出各波段的气溶胶辐射值 ( $L_a$ ), 然后算出各波段的离水辐射率值  $L_w$ , 实现对 SeaWiFS 资料的大气校正<sup>[4,5]</sup>。这样的假设与大洋水体 (清洁水体) 的实际情况相符, 但却与叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质含量较高的近岸二类水体不符。近岸水体由于受到叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质的影响, 水体浑浊度大, 765 和 865 nm 波段的离水辐射率并不为 0, 因此这种标准大气校正算法并不适用于近岸二类水体区域, 表现为 SeaDAS 对这部分水体不进行处理, 只是简单的将结果赋为 0 值。国内学者针对这种情况开展了相关的研究, 提出了用于二类水体的大气校正算法<sup>[6]</sup>。

为将 SeaWiFS 数据用于近岸二类水体的叶绿素信息提取, 首要需解决大气校正问题。作者提出了适用于二类水体的小区域扩展算法。该算法可解决 SeaDAS 无法对二类水体进行大气校正处理的问题, 经实测数据验证具有较高的精度。原理为:

卫星传感器在海面上空接收到的某波段  $\lambda_i$  的总辐射值  $L_t(\lambda_i)$ <sup>[7]</sup>, 包括来自海水水面的离水辐射值  $L_w - t(\lambda_i)$ 、瑞利散射辐射  $L_r(\lambda_i)$  值、大气气溶胶散射辐射值  $L_a(\lambda_i)$  和太阳光或天空光的闪射光辐射值  $L_g(\lambda_i)$ , 即:

$$L_t(\lambda_i) = t(\lambda_i)L_w(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + L_g(\lambda_i) \quad (1)$$

由于海洋水色传感器具有侧视扫描装置, 能避免太阳光或天空光引起的辐射值的影响, 式 (1) 中  $L_g(\lambda_i)$  可以忽略不计。因此, 对海洋水色遥感资料的大气校正主要是去除瑞利散射辐射值  $L_r(\lambda_i)$  和气溶胶散射辐射值  $L_a(\lambda_i)$  的影响, 从总辐射值 ( $L_t(\lambda_i)$ ) 中求得海水水面的离水辐射值 ( $L_w(\lambda_i)$ )。有下式:

$$t(\lambda_i)L_w(\lambda_i) = L_t(\lambda_i) - L_r(\lambda_i) - L_a(\lambda_i) \quad (2)$$

式中  $t(\lambda_i)$  是海面到卫星传感器之间的大气传递衰减系数。

依据上述大气校正原理, 作者对 SeaDAS 的大气校正算法进行了改进。对于 SeaWiFS 数据, 用 SeaDAS 采用的标准大气校正算法计算瑞利散射辐

射值已经得到了比较精确的结果。因此在扩展算法中可对 SeaDAS 标准大气校正算法所得的瑞利散射辐射值予以保留。

对于气溶胶值的计算一直是大气校正的难点, 也是影响 SeaDAS 能否对二类水体进行大气校正的关键。对于 SeaWiFS 气溶胶散射辐射率的计算, 考虑到 SeaDAS 的标准大气校正算法在计算清洁水区域的气溶胶辐射值和离水辐射值具有较高精度, 拟采用下列方法: 假定在遥感图像所考虑的地区内, 认为大气是均匀的, 气溶胶成分稳定且光学厚度一样, 气溶胶具有稳定的向上辐射值。在图像上找到一个清洁水区域, 利用 SeaDAS 算出这个清洁水区域的气溶胶散射辐射值  $L_a$ , 再结合公式 (2), 推算出整个区域各个波段的离水辐射率值  $L_w$ 。由此, 建立针对二类水体的 SeaDAS 小区域扩展算法。

SeaDAS 的小区域二类水体扩展算法可概括为以下几个步骤:

(1) 利用标准大气校正算法求出精确瑞利散射, 然后用总辐射减去瑞利辐射就可以求出各波段的  $L_t-L_r$  值。

(2) 在所处理的区域选取一小块清洁水区域的影像, 用 SeaDAS 的标准大气校正算法进行计算, 求出各波段的气溶胶散射辐射值  $L_a$ 。

(3) 根据公式 (2), 用  $L_t-L_r$  值减去  $L_a$  值, 求得近岸二类水体的离水辐射率。

利用上述大气校正算法可完成对 SeaWiFS 资料在近岸地区的大气校正。

### 3 估算叶绿素浓度的遥感定量模型

传感器接收到的辐射亮度  $L$  与水体反射率  $R$  的关系是已知的, 欲求叶绿素含量  $c$ , 需要确定  $R$  与  $c$  之间的定量关系式。国内外已提出的有关叶绿素信息提取的算法有经验、半分析、神经网络和基于辐射传递模型的理论算法, 其中以“比值波段组合”为基础的经验统计算法因其应用简便和在一类海水中较高的反演精度而成为业务上的主要算法。为配合 SeaWiFS 的投入使用, 美国国家航空与航天局的 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同步观测数据, 提出了适用于 SeaWiFS 的海水叶绿素浓度统计算法。本文选用 SeaDAS 的叶绿素浓度估算模式, 即为 SeaBAM 算法中的 OC2 算法。其估算叶绿素浓度的模式是<sup>[8]</sup>:

$$c(\text{Chl } a) = 10^b - 0.04 \quad (3)$$

$$b = 0.341 - 3.001 \left( \lg \frac{R_{490}}{R_{555}} \right) +$$

$$2.811 \left( \lg \frac{R_{490}}{R_{555}} \right)^2 - 2.041 \left( \lg \frac{R_{490}}{R_{555}} \right)^3 \quad (4)$$

式中  $R$  表示反射率, 下标表示波长,  $c$  (Chl  $a$ ) 表示叶绿素浓度

## 4 叶绿素信息提取

### 4.1 图像预处理

本文对叶绿素信息的处理均是在 SeaDAS 软件上完成的。利用 IDL 语言在 SeaDAS 提供的 User Defined Operation Command 用户自定义开发模块上将上述大气校正扩展算法编写成程序。用该程序对 SeaWiFS 图像进行处理, 提取出珠江口水域的离水辐射率 (1~6 个波段)。比较图 1 和图 2, 在一类水体, 二者在图像结构方面相差不大, 都比较清楚地显示出水体信息; 在近岸二类水体, 图 1 中, 由于 SeaDAS 并不对近岸二类水体区域进行大气校正处理, 其近岸区域的影像为黑色区域, 不能用于海洋水色信息提取, 而在图 2 中, 能清楚地显示出二类水体的结构。可将扩展算法处理后所得的离水辐射率用于叶绿素信息提取。

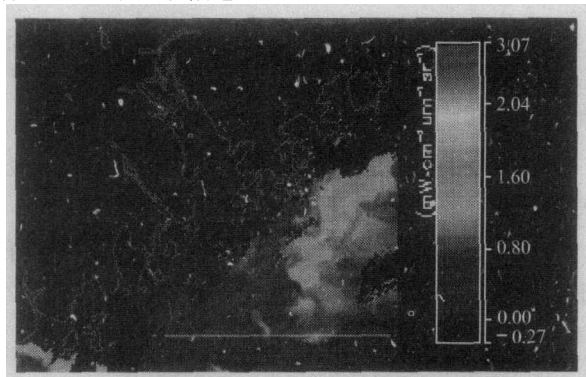


图1 原 SeaDAS 算法处理所得的 490 nm 波段离水辐射率图

Fig.1 The  $L_w$  image of 490 nm produced by the standard atmospheric correction algorithms

### 4.2 叶绿素信息提取

用 SeaDAS 提供的 OC2 算法程序对经预处理所得的离水辐射率图进行运算, 得到珠江口域叶绿素浓度分布图 (见图 3)

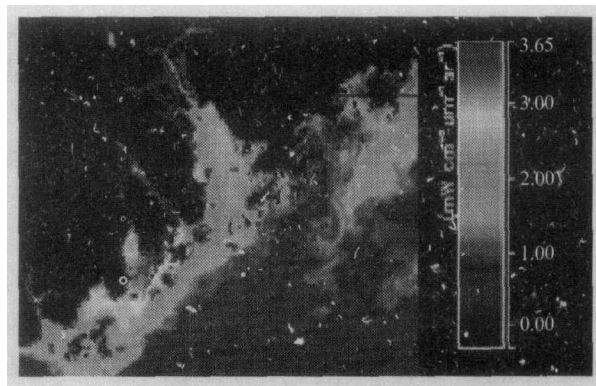


图2 经扩展算法处理所得的 490 nm 波段离水辐射率图

Fig.2 The  $L_w$  image of 490 nm produced by the extend atmospheric correction

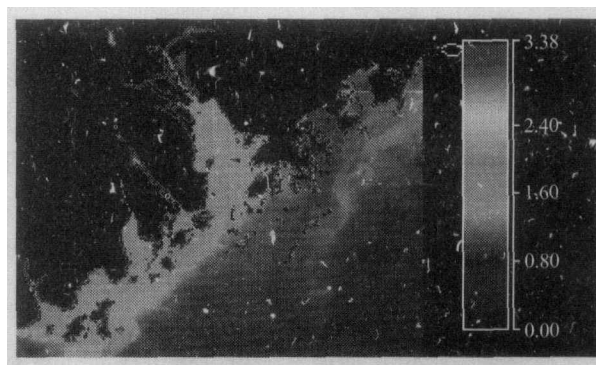


图3 利用 OC2 算法提取珠江口域叶绿素浓度分布图

Fig.3 The chlorophyll image of the Pearl River by the OC2 algorithms

### 4.3 精度检验

采用 1998 年 12 月 29-31 日珠江口同步实测数据进行验证, 数据来源于中国科学院南海水产研究所。比较的结果见表 1。

由上面模型的估算误差分析表明, 利用 SeaDAS 软件对叶绿素浓度提取的平均误差为 0.400, 平均相对误差为 29.62%。这个精度可以满足一般海洋水色遥感应应用研究的要求。

对珠江口域叶绿素浓度的遥感估算与实测值不一致的主要有两个: 一是二者的观测时间与观测空间不完全一致, 实测是点式采样, 遥感估算的是  $1 \text{ km}^2$  内的平均值。二是本次估算采用的 OC2 算法是

表1 估算的叶绿素浓度与实测的叶绿素浓度对照表

Tab.1 Comparison between chlorophyll concentration and its estimated value

| 编号                                      | 1      | 2      | 3       | 4       | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----------------------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 实测值/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 0.68   | 0.84   | 2.25    | 2.25    | 1.11   | 1.20   | 1.62   | 1.03   | 1.10   | 1.21   |
| 估算值/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 0.9496 | 0.8710 | 1.495   | 1.383   | 1.578  | 1.668  | 1.465  | 1.37   | 1.495  | 1.474  |
| 误差                                      | 0.2696 | 0.0310 | -0.7550 | -0.8670 | 0.4680 | 0.4680 | -0.150 | 0.3400 | 0.3950 | 0.2640 |
| 相对误差/%                                  | 39.65  | 3.69   | -33.56  | -38.56  | 42.16  | 39.00  | -9.57  | 33.00  | 35.91  | 21.82  |

美国 SeaBAM (SeaWiFS bio-optical algorithm mini-workshop) 小组针对 SeaWiFS 提出的海水叶绿素浓度统计算法, 它是基于对大洋水光谱特性的分析建立起来的。大洋水的光学特性由浮游植物及其伴生物决定, 叶绿素是主要的色素。在近岸二类水体对离水辐射有贡献的除了叶绿素, 还有悬浮泥沙等, 其光谱特性远比大洋水复杂得多。因而利用针对大洋水的 OC2 算法进行珠江口域叶绿素信息提取必引起叶绿素浓度估算误差。

## 5 结 语

经过大气校正扩展算法处理后的 SeaWiFS 数据用于探测近岸二类海水叶绿素浓度具有较高精度。但目前存在的主要问题是近岸二类水体受泥沙、叶绿素、黄色物质影响, 其光学性质复杂, 单纯依靠大气校正算法精度的提高及利用全球性算法 SeaBAM 算法来进行叶绿素浓度的估算难以在精度上有很大提高。这也是引起本次珠江口域叶绿素浓度估算偏高的主要原因。针对二类水体的光学特性开发适合本区域的二类水体叶绿素浓度估算模型应是今后叶绿素信息提取的重要研究内容之一。

## 参考文献:

- [1] 毛志华, 黄海清, 朱乾坤, 等. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(6): 581 - 587.
- [2] 黄韦良, 张鸿翔. 美国 SeaStar 海洋水色卫星简介[J]. 国土资源遥感, 1995, 23(1): 41 - 44.
- [3] 陈楚群, 施平, 毛庆文. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析, 热带海洋学报, 2001, 20(2): 66 - 70.
- [4] 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.
- [5] WANG M, GORDON H R. A simple, moderately accurate, atmospheric correction algorithm for SeaWiFS [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50: 231 - 239.
- [6] 韦钧, 陈楚群, 施平. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 118 - 125.
- [7] 陈楚群. 海洋水色遥感资料红光波段的大气纠正[J]. 热带海洋, 1998, 17(2): 81 - 87.
- [8] O'REILLY J E, MAPITORENA S, MITCHELL B G, et al, Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. J Geophysical Research, 1998, 103(C11): 24937 - 24953.

## Study on Estimation of Chlorophyll Concentration of Surface Water in the Pearl River Estuary Using SeaWiFS Data

CHEN Xiao-xiang, DING Xiao-ying

(Remote Sensing Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The models of retrieving chlorophyll (Chl) concentrations, together with the basic process of SeaWiFS imagery, are introduced. A simple solution was proposed to retrieve SeaWiF invalid data in highly turbid waters in Pearl River estuary (case 2 waters). Finally, chlorophyll (Chl) concentrations in Pearl River estuary are extracted by using corrected SeaWiFS data. The results show the mean standard error is 29.6% between the retrieved values and in situ data.

**Key words:** SeaWiFS; chlorophyll; the Pearl River estuary; atmospheric correction