

南海东北部基于标准经验算法的遥感叶绿素 a 反演结果比较分析

曾银东^{1,2}, 商少凌¹, 张彩云¹, 吴璟瑜¹

(1. 厦门大学海洋环境科学教育部重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 福建省海洋环境与渔业资源监测中心, 福建 福州 350003)

摘要: 比较了 2000 年夏季邻近珠江口的南海东北部海区海洋水色传感器 SeaWiFS 遥感与走航叶绿素 a(Chla) 的分布, 着重对比在运用 Ruddick 的浑浊水体大气校正方法的条件下 OC2, OC4 和 OCTSC 的 3 种标准经验算法反演的 SeaWiFS 遥感 Chla 与实测 Chla 偏离的相对程度。结果表明, 3 种产品都能够反映 Chla 从近岸向远岸降低的空间分布特征, 但从近岸到远岸划分 3 个区域分别对遥感与走航 Chla 求均值比较的结果表明, OC4 产品偏离实测 Chla 分布的程度明显小于其他 2 种产品。此外 3 种产品的 Chla 频率分布差异显著。这一结果可以为选择适用于该海域海洋环境变动研究的 SeaWiFS Chla 标准产品提供参考。

关键词: 海洋水色传感器 SeaWiFS; 叶绿素 a(Chla); 标准经验算法; 比较分析; 南海东北部
中图分类号: P71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2004)08-0014-05

1997 年新一代海洋水色传感器 SeaWiFS 的成功发射^[1], 使得科学家们可以更容易获取全球的海洋叶绿素 a(Chla) 数据。与上一代海洋水色传感器 CZCS 相比, SeaWiFS 更具有优越性^[2], 它有更高的辐射灵敏度, 更多的光谱波段, 得以广泛应用于海洋科学研究^[3,4]、海洋环境监测与海洋生物资源开发^[5-8]。但众所周知, 辐射信号需要经过大气校正后运用生物光学算法反演获得 Chla, 大多数海洋学界的用户皆采用 NASA 发布的 SeaDAS 软件反演 SeaWiFS Chla, 其中有几种标准生物光学经验算法供选择, 而发展这些算法所依据的基础数据多采自大洋及美、欧、日各国近海。中国南海东北部海域, 根据数位学者以及本研究组对该海域生物光学特性的研究结果^[9,10], 在远岸区域海水贫瘠, 表层叶绿素浓度低; 但在近岸区域受到珠江口的影响, 因得到充足营养盐供应使叶绿素增长的同时, 水中也含有丰富的碎屑颗粒物和有色溶解有机物质, 将对叶绿素的遥感反演造成干扰, 很显然必须发展区域大气校正与生物光学算法方可保障精确反演 Chla。但发展算法需要一个漫长的积累现场大气、生物光学数据的过程, 对于海洋环境变动研究而言, 获得精确的 Chla 绝对值固然是最根本的, 但在这个理想的目标实现之前, 利用已积累数年的 SeaWiFS

数据抓住 Chla 相对变化特征, 可以及时获得对区域环境变异生态响应的初步的科学认识。因此对南海东北部海域用标准经验算法获得的 SeaWiFS Chla 产品, 彼此之间差异如何, 与实际 Chla 分布有何偏差, 做一个初步的评估与分析, 是有其科学意义的。作者将比较邻近珠江口的南海东北部海域基于 OC2, OC4 和 OCTSC 经验算法反演的遥感 Chla 分布特征, 估计其偏离实际分布的程度, 为选择可以适用于该海域海洋环境变动研究的 SeaWiFS Chla 标准产品提供参考。

1 数据与算法

2000 年 7 月 18~22 日在珠江口邻近南海陆架海区取得走航荧光计 Chla 数据。

收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-05-28

基金项目: 国家 863 青年基金“近岸纳污海域高光谱现场探测系统”(2002AA639540); 国家杰出青年基金“珠江三角洲及其邻近的南海北部海域中碳的生物地球化学循环研究”项目(49825111)

作者简介: 曾银东(1978-), 男, 福建厦门人, 厦门大学海洋与环境学院在读硕士生, 主要从事海洋遥感研究, 电话: 0592-2186871, E-mail: zydzyd100@163.com

利用美国航空航天局 (NASA) 发布的 Browse CD (SeaWiFS Data External Browse Volume 7: 2000 Jul. 1 to Dec. 31) 搜索该海区在该时间段内基本晴朗的观测日, 选择有效的 SeaWiFS 遥感数据。为了与 7 月间取得的实测数据进行比较, 遥感数据采用周平均或月平均当是较为合理的做法, 但因云覆盖率极高, 从 7 月至 8 月只取得 8 月 19 日一天的有效图像。很显然平

均图像将缺乏代表性, 故而直接择定 2000 年 8 月 19 日的数据。SeaWiFS L1A 数据取自 NASA 网站^[11], 采用 SeaDAS 软件处理, 取经纬度范围 113°E~114.8°E, 21.3°N~23.3°N。大气校正利用 MUMM 软件模块, 是 Ruddick 提出的针对浑浊水体的大气校正算法^[12], Chla 反演选用 OC4(Ver. 4), OC2(Ver. 4) 和 OCTSC 生物光学算法(表 1)相应的 3 种 SeaWiFS Chla 标准产品。

表 1 几种经验算法表达式

Tab.1 Equations of several empirical in-water algorithms

算法	类型	方程	波段比率
OC4(Ver. 4)	四项式	$c(\text{Chla}) = 10.0^{(0.366 - 3.067R_{4S} + 1.930R_{4S}^2 + 0.649R_{4S}^3 - 1.532R_{4S}^4)}$	$R_{4S} = \lg(R_{555}^{443} > R_{555}^{490} > R_{555}^{510})$
OC2(Ver. 4)	三项式	$c(\text{Chla}) = 10.0^{(0.319 - 2.336R_{2S} + 0.879R_{2S}^2 - 0.135R_{2S}^3) - 0.071}$	$R_{2S} = \lg(R_{555}^{490})$
OCTSC	幂函数	$c(\text{Chla}) = 10.0^{(-0.55006 - 3.497R_{3S})}$	$R_{3S} = \lg[(L_{w,n}520 + L_{w,n}565)/L_{w,n}490]$

注: OC4(Ver. 4), OC2(Ver. 4) 和 OCTSC 经验表达式分别来自 O' Reilly(2000)^[13]和 O' Reilly(1998)^[14]; $L_{w,n}$ 表示归一化离水辐射率; $c(\text{Chla})$ 表示 Chla 浓度; 4S 表示 4 个波段(以此类推)

考虑到云以及岛屿附近的像元数据很不可靠, 而该海域恰恰多云、多岛屿, 因此对遥感 Chla 数据首先必须进行初处理, 或曰质量控制。数据处理的原则, 一方面应符合海洋学基本理论, 即它必须是正值; 另一方面考虑二类水体遥感数据误差范围, 对于世界范围而言, 目前为止也没有一个确定的上限, 即使 NASA 提出的一类水体遥感 Chla 误差 35% 的目标^[15]也并不总是能够实现, 因此作者给出一个宽松的上限, 认为遥感 Chla 最高值不超过现场实测 Chla 最大值($c_{t, m, \max}(\text{Chla})$)的 150%。由此确定的数据控制的低限(min)和高限(max)如下所示。

$$c_{\min} = 0.000 \mu\text{g/L}$$

$$c_{\max} = c_{t, m, \max}(\text{Chla}) \times (1 + 150\%) = 17.36 \times (1 +$$

150%) = 43.40 $\mu\text{g/L}$

在此范围之外的数据皆予以删除。

2 结果与讨论

图 1(a), (b), (c) 所示为 OC4, OC2 和 OCTSC 算法反演的 SeaWiFS 遥感 Chla 分布 (以下讨论时分别以 OC4-Chla, OC2-Chla, OCTSC-Chla 表示)。很显然, 虽经过 Ruddick 大气校正, 但珠江河口区仍出现离水辐射率的负值致使 Chla 反演失败 (图像上以纯黑色表示)。作者研究的焦点不在珠江口, 而局限在珠江河口外区到邻近的南海海区。

图 1 中 3 幅图像所反映的 Chla 空间分布特征总体上是一致的, 同样是从近岸的珠江河口外的高

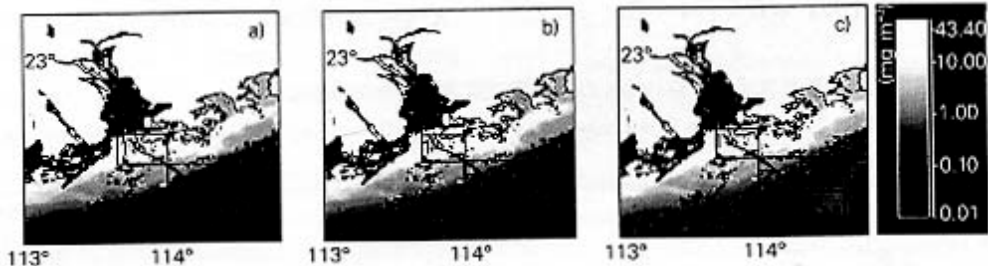


图 1 采用几种经验算法反演的 2000 年 8 月 19 日南海东北部海区(113°E~114.8°E, 21.3°N~23.3°N)SeaWiFS Chla 图像 图中矩形小区内的数字表示小区的标号, 正文中表达为 Box 1~Box 3; 黑色线条为走航航线; a) OC4; b) OC2; c) OCTSC

Fig. 1 SeaWiFS Chla images of the Northeastern South China Sea water (113°E~114.8°E, 21.3°N~23.3°N) on August 19, 2000 Numbers inside the three white squares indicate Box 1~3 (see the text); Black lines show the ship tracks for underway mapping; a) OC4 product; b) OC2 product; c) OCTSC product

Chla 浓度经过一个中等浓度的过渡带而后进入低浓度的远岸海区, 并且一道高 Chla 的条带沿岸自河口区向东北方向延展的特征都得以呈现。但 3 种算法所获得的 Chla 频率分布差异显著(图 2)。OC4_Chla 较其余二者浓度跨度范围小, 频率峰值(16.09%)出现在 0.21~0.26 $\mu\text{g/L}$ 。OCTS_Chla 的频率峰值向高 Chla 的方向移动, 频率最高处 Chla 为 0.36~0.41 $\mu\text{g/L}$,

并且峰值下降, 其频率峰值最低(9.05%)。而 OC2_Chla 的频率峰值位置与 OC4_Chla 一致, 峰值介于 OC4_Chla 和 OCTSC_Chla 之间, 频率峰值为 13.73%。由于缺乏覆盖整个研究海区(图 1)的实测数据, 故难于判别何种频率分布更接近实际。

实测 Chla 数据主要分布在几条基本重复的纵断面上(见图 1 黑色线条), 共有 11 996 个数据点, 跨 5 d

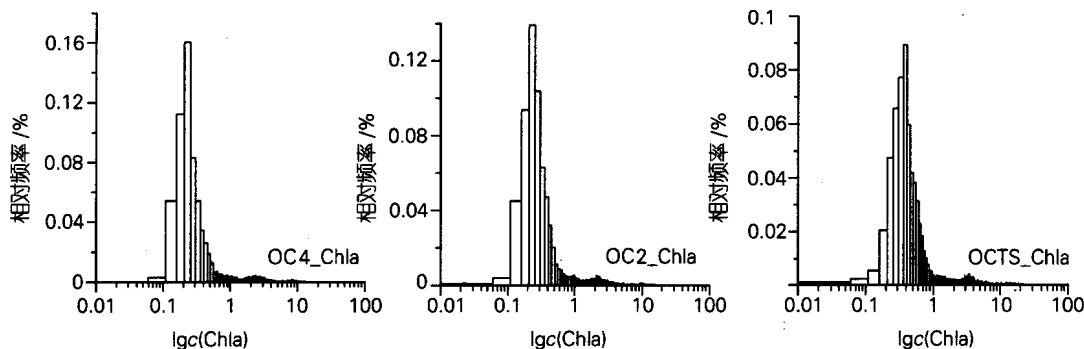


图 2 由 OC4, OC2 和 OCTSC 算法反演的南海东北部海区 Chla 频率分布
Fig. 2 Relative frequency distribution of Chla derived from OC4, OC2 and OCTSC algorithm

时间段(7月 18~22 日), 而本研究采用的遥感数据为现场观测 28 d 之后的瞬时数据, 因此必须指出, 二者的比较只能对不同产品偏离实际的相对程度提供参考, 每一产品与实际值的相对误差在量值上并没有绝对的意义。作者考虑遥感数据取面平均值之便, 沿纵断面布设 3 个 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 的矩形小区(图 1), 地理上覆盖从河口外向陆架延伸的区域。假定纵断面上每一区段的实测数据可以代表相应小区的 Chla 浓度水平。如此获得的每一小区实测 Chla 与遥感数据 Chla 平均值的对比列于表 2。3 种经验算法基本上都高估了实测值, 但程度不同。三者中, OC4 Chla 的相对偏

差显然最低, 而 OCTS Chla 的相对偏差最高。在差异最大的 Box 1, 分别低于 OC2_Chla、OCTSC_Chla 的程度为 10% 和 32%。即使在 Box 2 和 Box 3, OC4_Chla 的相对偏差较 OCTSC_Chla 降低的程度也达到或接近 30%。最重要的是, 这一结果表明, 如果取面平均, 则实测的 Chla 从近岸到远岸的相对变动, 可以从遥感的 OC4_Chla 得到较好的反映, 这对于数据同化及生物地球化学模式计算都将是很有用处的。但必须注意这只是夏季的结果, 对于其他季节很可能情况不同。

导致遥测与实测偏差的原因是多方面的。首先是大气校正的问题, 即便是采用了 Ruddick 的大气校

表 2 不同分区中几种经验算法反演的 SeaWiFS Chla 与现场实测值的相对误差比较

Tab.2 Bias of SeaWiFS Chla relative to in situ measured Chla in three boxes; SeaWiFS Chla was derived from OC4, OC2 and OCTSC algorithms, respectively

区域	Chla 点数量(个)				Chla 平均值($\mu\text{g/L}$)				经验算法 Chla 与实测 Chla 相对偏差		
	实测	OC4	OC2	OCTSC	实测	OC4	OC2	OCTSC	OC4	OC2	OCTSC
Box 1	6915	569	569	569	7.95	9.76	11.2	16.32	0.19	0.29	0.51
Box 2	2789	837	837	837	0.98	0.96	0.9	1.35	0.03	0.1	0.27
Box 3	2292	952	952	952	0.3	0.34	0.35	0.52	0.12	0.13	0.42

正,在邻近珠江口的浑浊区域也还可能产生较大的误差。其次悬浮泥沙和有色溶解有机物质(CDOM)含量高对采用标准生物光学经验算法反演 Chla 有很大影响,这主要是在邻近珠江口的浑浊区域,从表 2 可以清楚地看出,接近河口的近岸区域(Box 1)与远岸区域(Box 2 & Box 3)比较,Chla 浓度最高,相对偏差也最大,在接近河口的近岸区域 440 nm CDOM 的吸收可以高出 Chla 吸收 5~10 倍(本课题组未发表数据),墨西哥湾东北部的走航与 SeaWiFS 遥感 Chla 比较也有类似的在邻近河口的区域由于黄色物质影响而使偏差增大的结果^[6]。

不同遥测产品之间有差异,而其中 OC4 产品相对接近实际,主要的原因则出于生物光学算法经验模型本身以及系数的差异(表 1)。就模型的形式而言,OCTSC 是幂函数模型,OC2 和 OC4 分别是修正三项式和修正四项式模型,它们有不同的适用范围,因此反演得到不同的 Chla 产品。此外,OC4 算法毕竟引入了对低吸收值、Chla 浓度变化较敏感的 443 nm 波段^[13]和能够反映高 Chla 浓度变化的 510 nm 波段,理论上也应得到优于 OC2, OCTSC 产品的结果。实际上 O' Reilly 等人^[13]也指出第 4 版的 OC4(即本文采用的 Ver. 4)会比 OC2 反演效果好一些。

3 总结

作者采用了 Ruddick 大气校正和 OC2, OC4, OCTSC 3 种生物光学标准经验算法反演 2000 年夏季的南海东北部海区 SeaWiFS Chla 并与走航实测 Chla 进行比较,得到以下两点认识:(1) 3 种经验算法反演的 SeaWiFS Chla 产品所反映的空间分布图景总体上是一致的,同样是从近岸的珠江河口外的高 Chla 浓度经过一个中等浓度的过渡带而后进入低浓度的远岸海区。但 3 种产品的 Chla 频率分布差异显著。(2) 取面平均与一组实测 Chla 数据粗略对比的结果,OC4 产品的相对偏差在接近河口区(Chla 高值区)较其余二者低 10%~32%,在远离河口区(Chla 中、低值区)低 4%~30%。作者建议在一个理想的区域算法发布之前,夏季可以考虑选用经 Ruddick 大气校正与 OC4 生物光学经验算法反演的 SeaWiFS Chla 产品进行海洋环境变动研究。

致谢: NASA 提供 SeaWiFS 遥感数据,参加“珠江三角洲及其邻近的南海北部海域中碳的生物地球化

学循环研究”项目 2000 年航次的全体研究人员与“延平二号”全体船员采集现场数据。

参考文献:

- [1] Hu C M, Kendall L, Frank E M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 95-206.
- [2] Hovis W A, Clark D K, Anderson F, et al. Nimbus 7 coastal zone color scanner: system description and initial imagery [J]. *Science*, 1980, 210: 60-63.
- [3] Froidefond J M, Gardel L, Guiral D, et al. Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 225-232.
- [4] Ginzburg A I, Kostianoy A G, Nezhlin N P, et al. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea[J]. *J Marine Systems*, 2002, 32: 91-106.
- [5] Subramaniam A, Brown C W, Hood R R, et al. Detecting Trichodesmium blooms in SeaWiFS imagery[J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49: 107-121.
- [6] 何执兼, 邓孺孺, 王兴玲, 等. 应用水色卫星对海水油及 COD 探测[J]. *中山大学学报*, 1999, 38: 81-84.
- [7] Siddom J R, Bowers D G, Hogue A M. Detecting the Zambezi River Plume using observed optical properties[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42: 942-950.
- [8] Turley C M, Bianchi M, Christaki U, et al. Relationship between primary producers and bacteria in an oligotrophic sea - the Mediterranean and biogeochemical implications[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, 193: 11-18.
- [9] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. *科学通报*, 2003, 48: 1876-1882.
- [10] 陈楚群, 潘志林, 施平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反射率的应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22: 33-39.
- [11] Kempler L. GES Distributed Active Archive Center SeaWiFS Data Access [DB/OL]. <http://acdixx.gsfc.nasa.gov/data/dataset/SEAWIFS/index.html>, 2000-08-19.
- [12] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Optical Society of America*, 2000, 39: 897-912.
- [13] O' Reilly J E, Maritorena S, O' Brien M C, et al. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3[R]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000.
- [14] O' Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, et al. Ocean

- color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24 937 - 24 953.
- [15] Hooker S B, McClain C R. The calibration and validation of SeaWiFS data[J], *Progress in Oceanography*, 2000, 45: 427 - 465.
- [16] Hu CM, Mulle - Karger FE, Biggs DC, *et al* . Comparison of ship and satellite bio-optical measurements on the continental margin of the NE Gulf of Mexico[J]. *Int J Remote Sensing*, 2003, 24: 2 597 - 2 612.

Comparison of remote sensing chlorophyll a (Chla) derived from three empirical algorithms in the northeastern South China Sea water

ZENG Yin-dong^{1,2}, SHANG Shao-ling¹, ZHANG Cai-yun¹, WU Jing-yu¹

(1. Key Laboratory of Marine Science(Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361005, China; 2. Monitoring Center for Marine Environment and Fishery Resources, Fuzhou 350003, China)

Received: Mar. , 25, 2004

Key words: ocean color sensor SeaWiFS; Chla; standard empirical algorithm; comparison; northeastern South China Sea

Abstract: This study compared SeaWiFS Chla derived from three standard empirical algorithms with ship measured Chla in the northeastern South China Sea in summer, 2000. OC4, OC2 and OCTSC were applied respectively to retrieve remote sensing Chla products after Ruddick atmospheric correction was done. By comparing the bias of average remote sensing Chla relative to average real Chla at three portions distributing from inshore to offshore regions, it was found that OC4 product demonstrated the best among three products, with relative errors 10% ~ 32% lower than those produced by OC2 and OCTSC for the coastal water adjacent to the estuarine water where Chla concentration was high and the other interference matter such as color dissolved organic matter and suspended sediment were rich. OCTSC product appeared the worst in this region. It was thus suggested that SeaWiFS Chla retrieved by adopting Ruddick atmospheric correction and OC4 standard empirical algorithm might be applicable to the investigation of marine environmental variability in the northeast South China Sea.

(本文编辑:刘珊珊)