

文章编号 1004-924X(2014)11-3081-10

## 南海海域 MODIS-Aqua 叶绿素浓度产品的 精度对比和区域性算法修正

赵文静<sup>1,2,3</sup>, 曹文熙<sup>1,2\*</sup>, 王桂芬<sup>1,2</sup>, 胡水波<sup>1,2</sup>, 林俊芳<sup>1,2</sup>, 许占堂<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广东广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东广州 510655)

**摘要:** 利用 2004~2012 年在南海获得的 9 个航次的实测 *Chl-a* 数据, 采用 NASA 标准业务化算法 OC3 和针对低 *Chl-a* 水体所发展的最新算法 OCI 反演获得了相应的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品。通过建立实测与遥感产品的时空匹配数据对, 开展了 *Chl-a* 产品的适用性评估, 并对比分析了上述两种算法的性能。在此基础上, 利用南海实测遥感反射率 ( $R_{rs}(\lambda)$ ) 和 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品以及相应实测 *Chl-a* 的匹配数据集, 分别对算法 OC3 和 OCI 进行了区域性修正。结果显示: 基于算法 OC3 和 OCI 反演所得的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品值均高估了实测值, 平均绝对误差 (APD) 的精度分别为 56.30% 和 42.58%, 且算法 OCI 可明显改善低 *Chl-a* 水体 ( $<0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 的反演精度; 采用南海 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品与实测 *Chl-a* 匹配数据集 ( $N=82$ ) 修正后的区域性算法 NOC3 和 NOCI 的精度均有不同程度提高, APD 精度分别为 37.85% 和 36.74%; 采用现场实测  $R_{rs}(\lambda)$  与 *Chl-a* 匹配数据集 ( $N=123$ ) 进行区域性修正后的算法 INOC3 和 INOCI 的 APD 精度分别为 36.61% 和 37.79%, 上述两种方案精度较为接近。因此, 对于南海海域而言, 算法的区域性修正对于改善 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品精度非常重要。

**关键词:** MODIS-Aqua; 叶绿素浓度; 南海; 精度评估; 光学遥感; 算法修正

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.3081

## Comparison of chlorophyll products derived from MODIS-Aqua and modification of operational algorithms in the South China Sea

ZHAO Wen-jing<sup>1,2,3</sup>, CAO Wen-xi<sup>1,2\*</sup>, WANG Gui-fen<sup>1,2</sup>,  
HU Shui-bo<sup>1,2</sup>, LIN Jun-fang<sup>1,2</sup>, XU Zhan-tang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Oceanography in the Tropics, South China Sea  
Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental  
Protection of the People's Republic of China, Guangzhou 510655, China)

\* Corresponding author, E-mail: wxcao@scsio.ac.cn

**Abstract:** The performance of MODIS-Aqua *Chl-a* derived from the standard OC3 band-ratio algorithm

**收稿日期:** 2014-04-09; **修订日期:** 2014-05-19.

**基金项目:** 国家自然科学基金“广东省自然科学基金联合资助项目”(No. U0933005); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41076014, No. 41176035, No. 41206029); 中科院南海海洋研究所青年人才领域资助项目 (No. SQ201102); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA092001-2); 环保公益性行业科研专项资助项目 (No. PM-zx007-201305-023)

and a new band-difference OCI algorithm are compared in the South China Sea(SCS) from the MODIS instrument on the Aqua satellite with nine cruises of chlorophyll measurements collected from 2004 to 2012. Then, the algorithms of OC3 and OCI were corrected by the parameter adjustments based on the satellite, *in situ* remote sensing reflectance ( $R_{rs}(\lambda)$ ) and corresponding *in situ* *Chl-a* pairs respectively. The results show that MODIS-Aqua *Chl-a* products derived from OC3 and OCI algorithms overestimate the *in situ* data, with the Average Relative Error(APD) of 59.41% and 44.17%, respectively. However, the algorithm OCI significantly improves the retrieval accuracy for low chlorophyll concentration waters( $<0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). After regional correction by MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  and corresponding *Chl-a* pairs, the algorithms are likely to fare better, and the modified algorithm NOC3 and NOCI show their APD accuracies are 37.85% and 36.74%, respectively. Moreover, the algorithms NOC3 and NOCI modified by *in situ*  $R_{rs}(\lambda)$  and corresponding *Chl-a* pairs also give a good estimate with the APD accuracy of 36.61% and 37.79%. Therefore, it suggests that to conduct the regional correction for the operational algorithms is important to improve the accuracy of *Chl-a* estimation in the SCS.

**Key words:** MODIS-Aqua; chlorophyll concentration (*Chl-a*); the South China Sea; accuracy assessment; optical remote sensing; algorithm modification

## 1 引言

叶绿素 *a* 作为主要的浮游植物色素,其浓度通常被用于表征浮游植物的生物量。准确估算叶绿素的浓度(*Chl-a*),可为海洋碳通量乃至全球碳循环的定量化研究提供重要的模型参数,对生物过程及物理海洋学的研究也具有重要价值<sup>[1]</sup>。自 1978 年第一颗水色卫星 CZCS 发射以来,*Chl-a* 的准确估算和应用一直是水色遥感的主要研究内容,也是水色遥感的难点和热点,而对开阔海域或沿岸海域水色卫星产品进行真实性检验和校正,对于水色卫星发射来说是一项非常重要的工作<sup>[2]</sup>,其检验结果对于确定现场测量的不确定性、水色要素反演算法的适用性、大气校正方法的合理性、定标参数校正的准确性以及评价在轨卫星观测性能的可靠性等均具有关键作用<sup>[3-5]</sup>。

美国宇航中心(NASA)的 Goddard(空间飞行中心)的 OBPG(The NASA Ocean Biology Processing Group)工作组利用全球范围的实测辐射和生化数据,在卫星生命周期内开展了持续性的遥感产品真实性检验工作<sup>[3]</sup>。欧洲空间局(European Space Agency,ESA)自 1995 年开始基于海岸带大气海洋时间序列项目(Coastal Atmosphere and Sea Time Series,CoASTS),采

用 Adriatic 北部海域的 AAOT(Acqua Alta Oceanographic Tower)浮标收集实测数据,进行相应水色遥感产品的检验<sup>[6]</sup>。国际相关领域的学者也针对不同水色传感器及特定区域开展了大量的研究工作<sup>[3,6-15]</sup>。

国内学者对国际主流水色遥感产品 *Chl-a* 在中国近海的适用性也进行了大量的验证工作。Zhang 等<sup>[16]</sup>利用 2004 年台湾海峡和南海北部海域的实测数据,对 MODIS 和 SeaWiFS 的 *Chl-a* 产品进行了检验,并就 MODIS 的延续性和替代性做了相应评价。Tang 等<sup>[17]</sup>基于 1997 至 2005 年 6 个航测的实测 *Chl-a* 数据,对算法 OC4v4 在南海海域的适用性进行了初步评估。孙凌等<sup>[18]</sup>和崔廷伟<sup>[19]</sup>分别对黄东海和渤海 MODIS-Aqua 的 *Chl-a* 产品进行了真实性检验,并给出了其标准产品的区域适用性评价。Shang 等<sup>[20]</sup>基于南海多个代表性海域(包括:台湾海峡、广东沿岸、海南岛东部以及菲律宾东部海域)的实测数据,采用现有成熟算法 OC3M, GSM, GIOP 反演获得 *Chl-a* 产品,探讨 MODIS 产品在上述海域对典型生态动力过程的刻画能力。

目前,NASA 和 ESA 的标准业务化产品已广泛应用于我国海洋环境的监测和分析当中,然而,受限于大量长时间序列、高质量实测数据的匮乏,主流水色遥感数据的 *Chl-a* 产品在南海海域

的精度验证尚未得到系统开展。

本文采用 2004~2012 年覆盖整个南海海域的实测 *Chl-a* 数据,提取相应 MODIS-Aqua 业务化二级遥感产品,通过建立实测数据与遥感产品数据的时空匹配数据对,对南海海域 MODIS-Aqua *Chl-a* 业务化产品进行精度评估;针对南海开阔海域低 *Chl-a* 的现实特征,应用 Hu 等<sup>[21]</sup>最新专门针对低 *Chl-a* 水体( $<0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )所提出的反演算法 OCI 来对比评价 MODIS 标准业务化算法 OC3 与最新算法 OCI 的性能差异。在此基础上,利用南海实测  $R_{rs}(\lambda)$  和 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品,以及相应的 *Chl-a* 匹配数据集,开展了算法 OC3 和 OCI 的区域性修正,以提高南海海域 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品的反演精度,从而更好地为本地区海洋地球生物化学和气候研究服务。

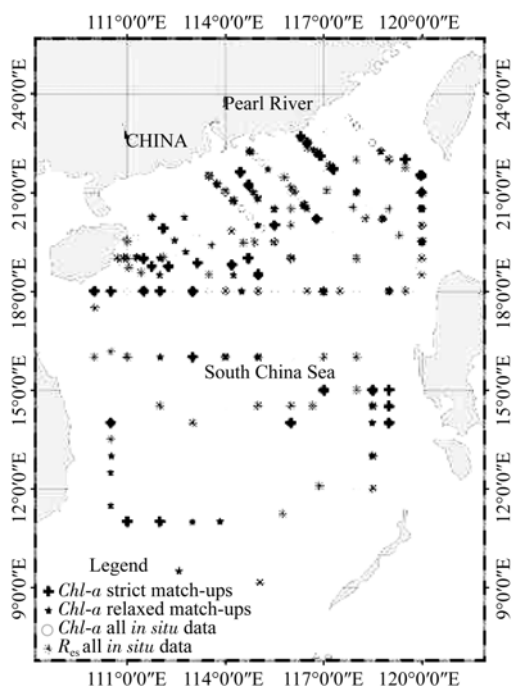


图 1 2004~2012 年南海海域 *Chl-a*(空心圆圈)和  $R_{rs}(\lambda)$ (雪花)采样站点分布;及在宽松(实心五角星)和严格匹配(实心十字)法则下,MODIS-Aqua *Chl-a* 精度检验匹配站点分布

Fig. 1 Station map for the *Chl-a* (hollow circiles) and  $R_{rs}(\lambda)$  (snowflakes) of the SCS during 2004-2012 and spatial distribution of relaxed (solid stars) and strict (solid crosses) match-ups for MODIS-Aqua validation of *Chl-a*

## 2 数据和方法

本文数据取自整个南海海域,其水体光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定,属于大洋 I 类水体。

### 2.1 实测数据

2004 年 9 月至 2012 年 10 月,在中科院南海海洋研究所海上观测平台和基金委航次的支持下,共获取了 9 个航次的实测数据,其中,*Chl-a* 的有效样本共 392 个,与 *Chl-a* 相匹配的遥感反射率光谱( $R_{rs}(\lambda)$ )共 123 条,采样站点分布和实测  $R_{rs}(\lambda)$  光谱分别见图 1 和图 2。

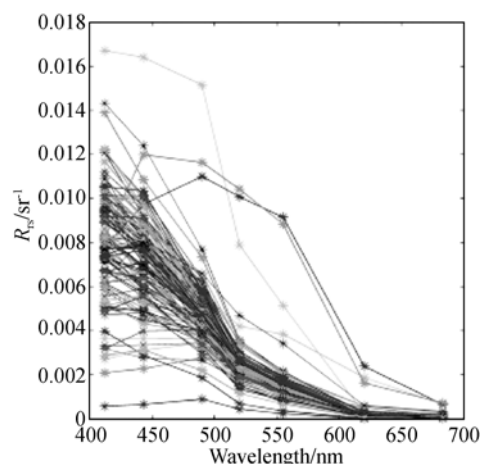


图 2 与 *Chl-a* 相匹配的实测  $R_{rs}(\lambda)$  光谱  
Fig. 2  $R_{rs}(\lambda)$  spectra matching with *Chl-a* in the SCS waters

*Chl-a* 的获取方式如下:利用 Niskin 采水器采集不同深度的海水样品,且在低真空度( $<16 \text{ kPa}$ 汞柱)下分别将一定体积(2~3 L)的水样过滤到直径为 25 mm、孔径为  $0.7 \mu\text{m}$  的 Whatman GF/F 滤膜上,然后将样品滤膜封入铝箔且置于液氮罐中保存带回实验室后,采用 Turner-Design10 型荧光光度计进行测量,有关测量方法可参见 Parsons 等<sup>[22]</sup>。

测量  $R_{rs}(\lambda)$  采用的是剖面法,该方法适用于水深较深的水体。剖面仪采用的是加拿大 Satlantic 公司生产的 Profiler IIOCI/R-200 海洋光学剖面仪。该仪器设有 7 个波段,中心波长分别为 412,443,490,520,555,620 和 683 nm,带宽为 10 nm。数据处理采用的是由 Satlantic 公司提

供的 Prosoft 软件,具体的测量步骤与数据处理流程参见 CAO 等<sup>[23]</sup>。据有限站位重复测量结果显示, $R_{rs}(\lambda)$ 的误差不超过 $\pm 30\%$ 。此外,实测  $Chl-a$  与  $R_{rs}(\lambda)$ 相匹配的数据共 123 组, $Chl-a$  为  $0.04\sim 0.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,中值为  $0.098 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

此外,本文还用到了全球代表性数据集 NOMAD<sup>[24]</sup> (The National Aeronautics and Space Administration bio-Optical Marine Algorithm Dataset)中的  $R_{rs}(\lambda)$  ( $\lambda$  分别为 443, 489, 510 和 555 nm)和相应的  $Chl-a$  数据。基于 NASA OC4 算法<sup>[25-26]</sup>绘制  $Chl-a$  反演值与实测值的散点图,对业务化算法 OC3 和最新算法 OCI 在南海海域  $Chl-a$  产品的反演能力给予了参照和评价。其中,选取算法 OC4 而非标准业务化算法 OC3 的原因如下:一、在 NOMAD 数据集中,算法 OC4 所用到的  $R_{rs}(555)$ 与  $Chl-a$  的匹配数据对远多于算法 OC3 所用到的  $R_{rs}(550)$ 与  $Chl-a$  的匹配数据对;二、NOMAD 数据集为全球代表性数据集,故采用经典的大洋一类水体算法更为合适。最终可利用的 NOMAD 匹配数据对共 2 141 组。

## 2.2 卫星数据

本文利用的卫星数据是空间分辨率为 1 km 的 MODIS-Aqua 业务化二级遥感产品,该传感器的中心波长分别为 412, 443, 488, 531, 551 和 667 nm,除 412 nm 中心波长的波段宽度为 15 nm 之外,其余均为 10 nm。该产品所采用的大气校正方法是 Gordon 等<sup>[27]</sup>和 Wang 等<sup>[28]</sup>提出的方法; $Chl-a$  业务化二级产品采用的方法是 O'Reilly 等<sup>[26]</sup>所提出的波段比值算法 OC3。

参照 Bailey 等<sup>[3]</sup>所采用的遥感产品检验标准和流程,结合南海海域的数据特点,“严格”时空匹配法则下的检验流程如下:首先,设定时间和像元窗口,像元窗口选取  $3\times 3$  的像元单元,时间窗口选取  $\pm 3 \text{ h}$ ;其次,遴选有效数据,剔除天顶角和太阳高度角分别超过  $60^\circ$ 和  $75^\circ$ 、任一可见光波段  $R_{rs}(\lambda)$ 为负值、 $Chl-a$  标志溢出或受太阳耀斑污染严重的像元;其三,像元单元满足空间均一化要求,分别计算像元单元的中值(median)和标准差(std),将不满足  $\text{median}\pm 2.0 \text{ std}$  的像元单元全部剔除,再计算各像元单元的空间异质性指标  $CV$ <sup>[3]</sup>(std 与 median 之比),CV 窗口设定为 0.15,用以控制像元单元的空间异质性;最后,核

查像元单位中有效像元的总数,若有效像元数超过像元单元总数的 50%,则将该像元单元有效值的中值作为遥感产品值,将其与实测值进行比较,确定水色遥感产品的反演精度。“宽松”的时空匹配法则参见 Cui 等<sup>[10]</sup>所设定的方法,其将时间窗口扩大至当天( $\pm 14 \text{ h}$ ),且无须满足 CV 指标和有效像元比例的限制,目的是为引入更多的统计样本,增加统计结果的可信度。

2004~2012 年,在“宽松”时空匹配法则下,南海 MODIS-Aqua  $Chl-a$  产品数据与实测数据的时空匹配数据对为 82 组,浓度为  $0.03\sim 2.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,小于  $0.25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  的共 77 组;在“严格”时空匹配法则下,匹配数据对共 5 组,浓度为  $0.09\sim 2.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,小于  $0.25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  的共 4 组。鉴于匹配数据样本数量对统计结果的影响,本文基于“宽松”匹配法则下的结果进行分析和讨论。

## 2.3 反演算法

MODIS-Aqua  $Chl-a$  标准业务化算法 OC3 采用的是蓝绿波段比值的幂指数经验算法,表达式如下:

$$Chla\_OC3 = 10^{a+bX+cX^2+dX^3+eX^4}, \quad (1)$$

其中: $a=0.242 4$ , $b=-2.743 0$ , $c=1.801 7$ , $d=0.001 5$ , $e=-1.228 0$ ;

$$X = \lg(\max(R_{rs}(443) > R_{rs}(488))/R_{rs}(547)).$$

基于大洋水体开发、且应用较为广泛的 NASA OC4 算法<sup>[25-26]</sup>的具体形式如下:

$$Chla\_OC4 = 10^{a_1+b_1X+c_1X^2+d_1X^3+e_1X^4}, \quad (2)$$

其中: $a_1=0.366 0$ , $b_1=-3.067 0$ , $c_1=1.930 0$ , $d_1=0.649 0$ , $e_1=-1.532 0$ ;

$$X = \lg \left[ \max \left( \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)}, \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}, \frac{R_{rs}(510)}{R_{rs}(555)} \right) \right].$$

Hu 等<sup>[21]</sup>在算法 OC3 的基础上,提出了一种新的算法 OCI,经验证,该算法在低  $Chl-a$  水体的性能( $< 0.25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )中优于算法 OC3。此方法通过确定水色指数(CI),在算法 OCI 与 OC3 之间进行切换:

$$\text{若 } 10^{A+B*CI} < 0.25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3},$$

$$Chla\_OCI = 10^{A+B*CI}, \quad (3)$$

其中:CI 定义为  $CI = R_{rs}(555) - 0.5(R_{rs}(443) + R_{rs}(670))$ 。

由于红光波段处的  $R_{rs}(\lambda)$ 取值已非常低、且

接近于 0,故假设  $R_{rs}(670)$  近似等于  $R_{rs}(667)$ 。参数 A 和 B 是通过 NOMAD 数据集估算获取的,其取值分别为 -0.490 9 和 191.659 0。

$$Chla\_OCI = \alpha(10^{a+bX+cX^2+dX^3+eX^4}) + \beta(10^{A+B*Cl}), \quad (4)$$

其中:  $\alpha = (10^{A+B*Cl} - 0.25)/(0.3 - 0.25)$ ,  $\beta = (0.3 - 10^{A+B*Cl})/(0.3 - 0.25)$ ; a, b, c, d 和 e 的取值同公式(1)。

若  $10^{A+B*Cl} > 0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 则采用算法 OC3,即公式(1)所示方法和参数。

### 2.4 统计参数

本文选取均方根误差(RMS),平均绝对误差(APD),平均相对误差(RPD),遥感产品值与实测值之比的中值(Ratio)、四分位 SIQR (Semi-Inter Quartile Range)等指标来对上述算法结果进行评价;采用斜率(slope)、截距(interception)、决定系数( $R^2$ )来表征遥感产品值与实测值的线性拟合情况;上述参数均为线性坐标下的计算结果。

RMS 用来评价不确定性:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}. \quad (5)$$

APD 和 RPD 用来评估偏差:

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \times 100\%. \quad (6)$$

$$RPD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i - x_i}{x_i} \times 100\%. \quad (7)$$

其中:  $y_i$  为遥感产品值,  $x_i$  为实测值, N 为匹配数据总数。统计指标的计算公式如下:

遥感产品值与实测值之比的中值(Ratio)和 SIQR<sup>[3]</sup>:

$$SIQR = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2}; \quad (8)$$

$$Ratio = Q_2, \quad (9)$$

其中:  $Q_1$ ,  $Q_2$  和  $Q_3$  分别是遥感产品值与实测值之比的 25%, 50% 和 75% 四分位数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 精度评价

基于算法 OC3 和 OCI 反演得到的 MODIS-

Aqua *Chl-a* 产品值与实测值的散点图和精度评价结果分别如图 3 和表 1 所示。可以看出,上述两种算法所得的遥感产品值与实测值的对应点均位于 1:1 直线附近,且散落在 NOMAD 散点范围之内。总体来看,算法 OCI 的精度明显优于算法 OC3。算法 OC3 和 OCI 的 APD 分别为 56.30% 和 42.58%; 且从 RPD (>0) 和 Ratio 结果来看,上述两种算法反演所得的 *Chl-a* 遥感产品值均高于实测值,其 RPD 分别为 31.76% 和 21.96%, Ratio 分别为 1.127 9 和 1.124 4,同时,根据遥感产品值/实测值的中值 SIQR 数据显示,算法 OC3 的不确定性略高,且相关系数  $R^2$  较算法 OCI 略低。基于算法 OC4、采用 NOMAD 数据集反演得到的 *Chl-a* 产品值高于实测值,其 APD 为 47.16%, 与南海相比而言,反演精度优于算法 OC3,但低于算法 OCI。需指出的是, NOMAD 采用的是实测  $R_{rs}(\lambda)$ , 而算法 OC3 和 OCI 采用的均是  $R_{rs}(\lambda)$  遥感产品值。

表 1 在宽松匹配法则下,基于算法 OC3 和 OCI 反演所得的南海海域 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品值与实测值 (N=82), 以及基于 NOMAD 全球海域实测数据和算法 OC4 反演所得的 *Chl-a* 产品值与实测值 (N=2 241) 的精度比较

Tab. 1 Precision comparison of MODIS-Aqua *Chl-a* and *in situ* match-ups (N=82) performed in the SCS waters with OC3 and OCI algorithms and in the globe waters with NOMAD database (N=2 241) using the OC4 algorithm when relaxed match-ups are included

Algorithm/Area	OC3/SCS	OCI/SCS	OC4/NOMAD
APD	56.30%	42.58%	47.16%
RPD	31.76%	21.96%	5.06%
RMS	0.267 3	0.263 5	3.487 8
Ratio	1.127 9	1.124 4	0.932 8
SIQR	0.495 5	0.339 0	0.347 8
$R^2$	0.685 7	0.690 1	0.451 0
Slope	1.160 0	1.160 1	1.048 8
Intercept	0.012 0	0.000 5	0.435 3

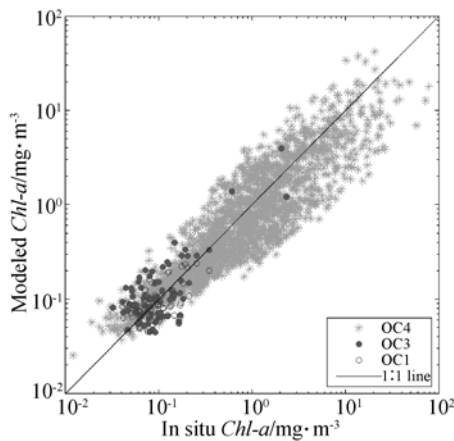


图 3 在宽松匹配法则下,基于算法 OC3(实心圆点)与 OCI(空心圆圈)反演所得的南海海域 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品值与实测值的( $N=82$ )散点图。以及基于 NOMAD 实测数据集( $N=2\ 241$ ),采用 OC4 算法所得的 *Chl-a* 反演值与实测值的散点图(星点);图中实线为 1:1 直线

Fig. 3 Scatter plots of match-ups between *in situ* and satellite-derived *Chl-a* using the OC3 (solid dots) and OCI (hollow circles) algorithms in the SCS for MODIS-Aqua of relaxed match-ups ( $N=82$ ). Scatter plots of match-ups ( $N=2\ 241$ ) between *in situ* and modelled *Chl-a* from the NOMAD database (stars) using the NASA OC4 algorithm. The solid line is 1:1 line

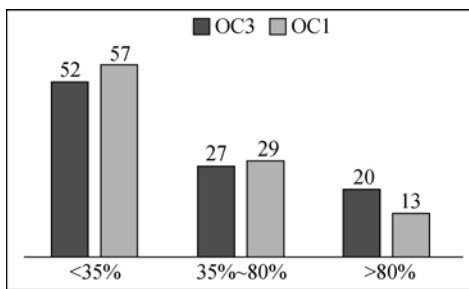


图 4 基于算法 OC3 和 OCI 所得的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品值与实测值( $N=82$ ) APD 的量值分布

Fig. 4 Numbers of different APD range for *in situ* *Chl-a* and satellite-derived values ( $N=82$ ) using the OC3 and OCI algorithms in the SCS waters for MODIS-Aqua

图 4 给出的是分别基于算法 OC3 和 OCI 所得的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品值与实测值之间的 APD 量值分布情况。就 APD 量值小于 35% 的统计情况来看,算法 OCI 可达 45 个,而算法 OC3 为 37 个; APD 量值大于 80% 的情况则截然相

反,算法 OCI 有 9 个,算法 OC3 达 19 个。与此同时,表 2 数据显示,对于南海低 *Chl-a* ( $<0.25\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 水体,基于 OCI 算法反演得到的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品的 APD 精度较算法 OC3 可提高 20% 左右。

通过对上述结果的分析可知,对于南海海域,基于 OCI 算法反演所得的 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品精度比标准业务化算法 OC3 更高,虽尚未达到大洋清洁水体 35% 的精度预期<sup>[3]</sup>,但也接近于世界上其他清洁海区的评价结果<sup>[7,9,24]</sup>。与中国近海相比而言,渤海 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品的 APD 为 88.31%<sup>[19]</sup>、黄东海 APD 在  $\pm 40\%$  内的数据比重只有 40%<sup>[18]</sup>,而南海海域 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品精度远高于渤、黄、东海的检验结果,这主要可归因于:渤海、黄海及东海水体属于典型的二类水体,其光学性质更为复杂,针对一类水体开发的大气校正算法将失效,且上述海域均具有明显的区域性特征,故 OC3 标准算法已不再适用。与南海海域<sup>[16,20]</sup> 已有成果(APD 大于 70% 以上)相比,本文所给出的精度也相对较高,究其原因可能为:一是本文的数据匹配要求相对较高,在一定程度上减少了时空变化、像元质量所带来误差;二是由匹配站位的分布特点所决定,如图 1 所示。本文匹配站位几乎散布于整个南海海域,而南海已有研究更多集中在粤东、珠江口、琼东、菲律宾东岸等水动力较为典型的区域,影响因素更为复杂。

### 3.2 区域性算法修正

算法 OC3 和 OCI 均是针对大洋水体发展的全球性通用算法,而南海作为西北太平洋上最大的边缘海,其光学特性有显著的区域特征<sup>[29-32]</sup>,故有必要对上述算法进行区域性参数修正,以提高遥感产品的精度。本节主要探讨了采用 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品及相应的实测 *Chl-a* 数据集( $N=82$ ),进行参数修正后的算法 NOC3 和 NOCI,以及采用现场实测  $R_{rs}(\lambda)$  及相应 *Chl-a* 数据集( $N=123$ ),进行参数修正后的算法 INOC3 和 INOCI 的精度变化情况比较。

利用最小二乘法首先对算法 NOC3 和 INOC3 进行优化,在此基础上,进一步优化算法

NOCI 和 INOCI。在公式(1)的基础上,将算法 NOC3 相应参数修正为: 0.216 4, -1.196 7, 1.801 7, 0.001 5, 1.228 0;将算法 INOC3 相应参数修正为: 0.046 9, -2.926 2, 2.771 7, 0.002 3, -1.511 8。对算法 NOCI 和 INOCI 中 CI 指数的参数 A 进行修正(Robert, *et al.*, 2013),修正后的参数分别为-0.498 8和-0.554 4。

根据图 5 和表 2 所示,基于南海 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品及相应实测  $Chl-a$  数据集进行参数修正后的算法 NOC3 和 NOCI 精度均有不同程度提高,APD 分别为 37.85%和 36.61%,相对于算法 OC3,算法 NOC3 精度改善较明显。由表 3 的统计数据可知,算法 NOCI 在低  $Chl-a$  水体的表现仍优于 NOC3,但提高幅度已不明显;在高  $Chl-a$  水体中,算法 NOC3 的精度反而更高,这主要由 CI 水色指数的精度所致。采用实测  $R_{rs}(\lambda)$  及相应实测  $Chl-a$  数据集进行参数修正后,算法 INOC3 和 INOCI 的精度也有明显提升,其 APD 分别为 36.61%和 37.79%,与算法 NOC3 和 NOCI 精度较为接近。因此,算法的区域性修正对于提高 MODIS-Aqua  $Chl-a$  产品的精度尤为关键。

表 2 基于 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品及相应实测  $Chl-a$  ( $N=82$ ) 和实测  $R_{rs}(\lambda)$  及相应实测  $Chl-a$  ( $N=123$ ) 的匹配数据集,经区域性参数修正后的区域性算法 NOC3, NOCI 和 INOC3, INOCI 的精度对比

Tab. 2 Precision comparison of regional algorithms NOC3, NOCI and INOC3, INOCI in the SCS waters based on MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  and *in situ*  $R_{rs}(\lambda)$  with corresponding *in situ*  $Chl-a$  pairs respectively ( $N=82,123$ )

Algorithm	NOC3	NOCI	INOC3	INOCI
APD	37.85%	36.74%	36.61%	37.79%
RPD	6.71%	7.64%	12.64%	14.65%
RMS	0.152 6	0.149 9	0.055 2	0.052 9
Ratio	1.015 0	0.995 2	1.014 9	1.007 6
SIQR	0.320 9	0.278 7	0.267 7	0.318 1
$R^2$	0.787 0	0.794 7	0.768 1	0.786 6
Slope	0.990 2	1.004 0	0.975 0	1.024 6
Intercept	0.007 2	0.006 7	0.005 5	-0.002 0

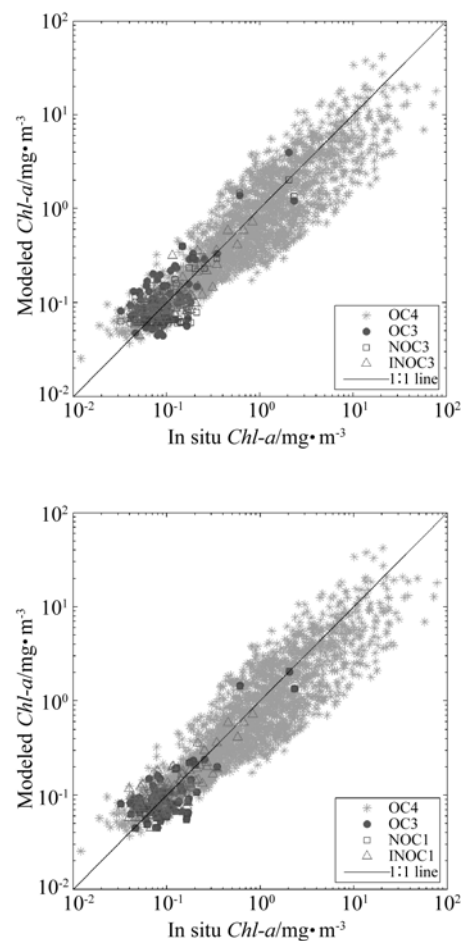


图 5 基于算法 OC3(圆点,  $N=82$ ) 及其区域性修正算法 NOC3(正方形,  $N=82$ ) 和 INOC3(三角形,  $N=123$ ) 反演所得的南海海域 MODIS-Aqua  $Chl-a$  产品值与实测值的散点图。基于算法 OCI(圆点,  $N=82$ ) 及其区域化修正算法 NOCI(正方形,  $N=82$ ) 和 INOCI(三角形,  $N=123$ ) 反演所得的南海海域 MODIS-Aqua  $Chl-a$  产品值与实测值散点图。灰色星号表示基于实测匹配数据集 ( $N=2241$ ), 采用 OC4 算法所得的  $Chl-a$  反演值与实测值的散点图; 图中实线为 1:1 直线

Fig. 5 Scatter plots of match-ups between *in situ* and satellite-derived  $Chl-a$  using the OC3 (solid dots,  $N=82$ ) and regional optimization algorithms NOC3 (squares,  $N=82$ ) and INOC3 (triangles,  $N=123$ ) in the SCS for MODIS-Aqua. Scatter plots of match-ups between *in situ* and satellite-derived  $Chl-a$  using the OCI (solid dots,  $N=82$ ) and regional optimization algorithms NOCI (squares,  $N=82$ ) and INOCI (triangles,  $N=123$ ) in the SCS for MODIS-Aqua. Scatter plots of match-ups between *in situ* and modelled  $Chl-a$  from the NOMAD database (grey stars,  $N=2241$ ) using the NASA OC4 algorithm. The solid line is the 1:1 line

表 3 算法 OC3 和 OCI, NOC3 和 NOCI, INOC3 和 INOCI 在不同 *Chl-a* 浓度范围下反演南海水体 *Chl-a* 产品的性能评价(采用 APD 表征)

Tab. 3 Performance (indicated by APD) of algorithms OC3 and OCI, NOC3 and NOCI, INOC3 and INOCI when deriving *Chl-a* products in the SCS with different *Chl-a* ranges (N)

Algorithm	<i>Chl-a</i>	
	$<0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$>0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
OC3	56.24%(77)	57.24%(5)
OCI	36.86%(77)	62.91%(5)
NOC3	37.64%(77)	41.00%(5)
NOCI	36.11%(77)	46.39%(5)
INOC3	38.22%(112)	20.24%(11)
INOCI	39.45%(112)	20.85%(11)

### 3.3 精度影响因素分析和探讨

时空匹配方案的选取是影响卫星遥感产品真实检验的一个重要因素。采用不同的时空匹配法则,匹配数据对的个数相差较大,“严格”匹配法则下的匹配数据对急剧减少(仅 5 组),但较之于“宽松”匹配法则下的精度统计结果,算法 OC3 和 OCI 的 APD 精度均有大幅提升,分别为 30.34% 和 32.57%,且上述两种算法的 SIQR 值均有所减小,相关系数  $R^2$  显著变大。不难看出,加强时空匹配条件的限制,有助于提升 *Chl-a* 遥感产品精度,但统计结果的置信度是建立在大量统计样本的基础上的,因此,获取更多高质量的实测数据是进行有效检验的前提。

此外,黄色物质在蓝光波段的高吸收特性也是导致 *Chl-a* 产品高的一个重要因素,而算法 OC3 和 OCI 均选用了该波段;现场测量 *Chl-a* 所采用的方法也是构成其误差的一个不容忽视的方面,通常认为,采用 HPLC 法测量 *Chl-a* 更为精准。卫星遥感产品反映的是一定光学水柱内的综合效应,由于缺乏 *Chl-a* 垂直分布信息,本文采用的仅是表层实测值,这也是 MODIS-Aqua *Chl-a* 产品高的一个不可忽略因素。

## 4 结 论

本文利用 2004~2012 年覆盖整个南海海域的实测 *Chl-a* 数据,对比评价了 MODIS-Aqua 标准业务化算法 OC3 和针对低 *Chl-a* 水体的最新算法 OCI 在南海海域的适用性,并在此基础上对上述算法进行了区域性修正,得到如下结论:(1)基于算法 OC3 和 OCI 反演所得的 MODIS-Aqua 遥感产品值均高于实测值,APD 分别为 56.30% 和 42.58%,该结果距离全球清洁自然水体的 35% 精度预期有一定距离,但明显高于我国其他近海二类水体;(2)对于南海大部分水体 *Chl-a* 较低的现实特征,算法 OCI 的性能明显优于 NASA 标准业务化算法 OC3,APD 精度可提高约 15% 左右,其他相关统计参量也均有改善;(3)经修正后的区域性算法精度均有明显提高。采用南海 MODIS-Aqua  $R_{rs}(\lambda)$  产品与实测 *Chl-a* 匹配数据集(N=82)修正后的区域性算法 NOC3 和 NOCI,其精度均有不同程度提高,APD 分别为 37.85% 和 36.74%;采用实测  $R_{rs}(\lambda)$  及相应实测 *Chl-a* 数据集进行参数修正后的算法 INOC3 和 INOCI 的精度也有明显提升,其 APD 分别为 36.61% 和 37.79%,与算法 NOC3 和 NOCI 精度较为接近。因此,对于南海海域而言,算法的区域性优化对于改善 MODIS-Aqua *Chl-a* 遥感产品精度尤为关键。

在卫星产品真实性检验过程中,时空匹配法则的选取对于检验结果的影响较大。本文主要基于宽松时空匹配法则下的结果进行分析和讨论,旨在增加统计样本数量,从而增加统计结果的置信度,但严格的时空匹配法则可减少测量站位周边水体环境的影响,对于分析卫星遥感产品的精度更为科学合理,因此,获取更多高质量的实测数据是进行有效检验的前提。

## 5 致 谢

感谢中国科学院南海海洋研究所“实验 1 号”和基金委科学考察船及全体船员、科考队员在南海开放航次中的辛苦努力;感谢李刚老师提供叶绿素 *a* 浓度数据。感谢 NASA 免费提供的 MODIS-Aqua 二级产品数据。

## 参考文献:

- [1] SATHYENDRANATH S. Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters [J]. *IOCCG Report*, 2000.
- [2] HOOKER S, MCCLAIN C. The calibration and validation of SeaWiFS data[J]. *Progress in Oceanography*, 2000, 45(3): 427-465.
- [3] BAILEY S W, WERDELL P J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1): 12-23.
- [4] 魏新国,王清龙,李健,等. 星敏感器和遥感相机主光轴交联角的在轨校验[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 274-280.
- WEI X G, WANG Q L, LI J, *et al.*. On-orbit calibration for cross-angle between optical axes of star sensor and remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 274-280. (in Chinese)
- [5] 王锐,王淑荣,郭劲,等. 高精度紫外标准探测器的定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1696-1703.
- WANG R, WANG SH R, GUO J, *et al.*. Calibration of high accuracy UV standard detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1696-1703. (in Chinese)
- [6] 智喜洋,张伟,侯晴宇,等. 影响测绘相机匹配精度的辐射指标量化[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 387-394.
- ZHI X Y, ZHANG W, HOU Q Y, *et al.*. Quantification for radiometric specifications impacting on matching accuracy of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 387-394. (in Chinese)
- [7] ANTOINE D, D'ORTENZIO F, HOOKER S B, *et al.*. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS - A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2008, C7:113.
- [8] ARMSTRONG R A, GILBES F, GUERRERO R, *et al.*. Validation of SeaWiFS-derived chlorophyll for the Rio de la Plata Estuary and adjacent waters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(7-8): 1501-1505.
- [9] BINDING C E, GREEBERG T A, JEROMEL J H, *et al.*. An assessment of MERIS algal products during an intense bloom in the lake of Woods [J]. *Journal of Plankton Research*, 33(5): 798-803.
- [10] CUI T W, ZHANG J, GROOM S, *et al.*. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: A case study for turbid coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2326-2336.
- [11] MELIN F, ZIBORDI G, BERTHON J F, *et al.*. Uncertainties in remote sensing reflectance from MODIS-Terra [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9, 432-436.
- [12] QING S, ZHANG J, CUI T, *et al.*. Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136, 117-125.
- [13] ZHAO J, BARNES B, MELO N, *et al.*. Assessment of satellite-derived diffuse attenuation coefficients and euphotic depths in south Florida coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131, 38-50.
- [14] ZHAO W J, WANG G Q, CAO W X, *et al.*. Assessment of SeaWiFS, MODIS and MERIS ocean-color products in the South China Sea [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013(accepted).
- [15] ZIBORDI G, MELIN F, BERTHON J F, *et al.*. Comparison of SeaWiFS, MODIS and MERIS radiometric products at a coastal site [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6):L06617-4.
- [16] ZHANG C Y, HU C M SHANG S L, *et al.*. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll-a concentration assessments off Southeastern China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3): 250-263.
- [17] TANG S L, CHEN C Q, ZHAN H G, *et al.*. An appraisal of surface chlorophyll estimation by satellite remote sensing in the South China Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(21): 6217-6226.
- [18] 孙凌,王晓梅,郭茂华,等. MODIS 水色产品在黄东海域的真实性检验[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(2): 298-306.
- SUN L, WANG X M, GUO M H, *et al.*. MODIS ocean color product validation around the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(2): 143-148. (in Chinese)
- [19] 崔廷伟. 渤海生物光学性质与水色遥感反演[D].

- 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- CUI T W. *Bio-optical properties and ocean color inversion of the Bohai Sea* [D]. Qingdao: Ocean university of China, 2006. (in Chinese)
- [20] SHANG S, DONG Q, HU C, *et al.*. On the consistency of MODIS chlorophyll-a products in the northern South China Sea [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(2): 269-280.
- [21] HU C, LEE Z, FRANZ B. Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three band reflectance difference [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2012, 117.
- [22] PARSONS, T R, MAITA Y, *et al.*. A Manual of chemical and biological methods for seawater analysis [J]. *Oxford: Pergamon Press*, 1984, 1-173.
- [23] CAO W, YANG Y, LIU S, *et al.*. Spectral absorption coefficient of phytoplankton and its relation to chlorophyll a and remote sensing reflectance in coastal waters of southern China [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(4): 342-350.
- [24] BREWIN R J, RAITOS D E, PRADHAN Y, *et al.* Comparison of chlorophyll in the Red Sea derived from MODIS-Aqua and in vivo fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 218-224.
- [25] O'REILLY J E, MARITORENA S, MITCHELL B G, *et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1998, 103 (C11): 24937-24953.
- [26] O'REILLY J E, MARITORENA S, SIEGEL D A, *et al.* Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4; Version 4 [J]. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses*, 2000, Part, 3: 9-23.
- [27] 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(3): 443-452.
- [28] WANG M. A refinement for the Rayleigh radiance computation with variation of the atmospheric pressure [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(24): 5651-5663.
- [29] LIN J F, CAO W X, WANG G F, *et al.*. An approach for determining the contributions of phytoplankton, colored organic material, and non-algal particles to the total spectral absorption [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4249-4257.
- [30] WANG G F, ZHOU W, CAO W X, *et al.*. Variation of particulate organic carbon and its relationship with bio-optical properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62:1939-1947.
- [31] WANG G Q, ZHOU W, WANG G F, *et al.*. Phytoplankton size class derived from phytoplankton absorption and chlorophyll-a concentrations in the northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 750-761.
- [32] ZHOU W, WANG G F, SUN Z H, *et al.*. Variations in the optical scattering properties of phytoplankton cultures [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10):11189-11206.

#### 作者简介:



赵文静(1982-),女,内蒙古乌兰察布人,博士,工程师,2014年于中国科学院南海海洋研究所获得博士学位,主要从事海洋环境遥感应用研究。E-mail: wenjing\_jingjing@163.com



曹文熙(1963-),男,湖南郴州人,博士,研究员,博士生导师,享受国务院特殊津贴专家,现为热带海洋环境国家重点实验室副主任,1992年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2006年于中国科学院南海海洋研究所获得博士学位,主要从事海洋光学、海洋监测技术和海洋生物光学特性研究。E-mail: wxcao@scsio.ac.cn