

MODIS 水色产品在黄东海域的真实性检验*

孙凌¹, 王晓梅², 郭茂华², 唐军武²

(1: 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

(2: 国家海洋局国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 水色产品的真实性检验无论对于算法的改进还是后续应用的可靠性保障来说都是十分重要的. 中国近海是世界上最为浑浊的海域之一, NASA 标准 MODIS 水色产品在该海域的精度十分有限. 然而, 局限于高质量海上实测数据的获取, 相关的检验工作并未得到有效开展. 利用 2003 年春季和秋季黄东海航次的实测数据对 MODIS Aqua 标准水色产品中的归一化离水辐亮度 $L_{wN}(\lambda)$ (转换成遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$)和叶绿素 a 浓度(Chl.a)进行了真实性检验分析. 采用 3×3 像元和 $\pm 3h$ 作为时空匹配窗口, 并根据空间均匀性判识准则进行了数据剔除. 基于验证数据(中低混浊水体)的分析, 得到初步结论: (1)MODIS 的 $R_{rs}(\lambda)$ 反演结果具有一定精度, 但是不能满足 10%的误差期盼, 且 412nm 波段的结果明显较差. 反演值与实测值之间具有良好线性相关关系, 对于所有 6 个波段, 均方根偏差约为 $0.0030sr^{-1}$, 相对偏差绝对值的中值约为 25%. MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测光谱的形状基本相似, 数值多数偏低, 特别是在高值区, 另外, 412 和 667nm 波段在低值区大多数偏低, 甚至出现负值, 主要是大气修正过程中近红外波段离水辐射和气溶胶类型不当造成的. (2)MODIS 的 Chl.a 精度很差. 反演值整体偏高, 且与实测值之间不具有明显的线性相关关系, 两者的均方根偏差约为 $1.56 mg/m^3$, 相对偏差绝对值的中值约为 103.25%, 主要是 OC3M 模型(系数)的不适用性造成的.

关键词: 真实性检验; 黄东海; MODIS; 遥感反射率; 叶绿素 a 浓度

MODIS ocean color product validation around the Yellow Sea and East China Sea

SUN Ling¹, WANG Xiaomei², GUO Maohua² & TANG Junwu²

(1: *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, P.R.China*)

(2: *National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, P.R.China*)

Abstract: Ocean color product validation is vital to improve the algorithms and to secure subsequent applications. China coastal region is one of the most highly turbid waters in the world. The precision of NASA's standard MODIS ocean color products are poor for this region. However, the validations have not been made due to the shortage of high quality *in-situ* data. In this paper, *in-situ* data collected in the Yellow Sea and the East China Sea in the spring and autumn of 2003 are used to validate the main parameters of MODIS Aqua standard ocean color product, i.e., the normalized water-leaving radiance $L_{wN}(\lambda)$ (converted to remote sensing reflectance $R_{rs}(\lambda)$) and chlorophyll-a concentration (Chl.a). The resolution of 3×3 pixel box and $\pm 0.5h$ are used as the sampling window, and spatial homogeneity criteria are used to screen data. Based on the analysis of match-ups (in low and middle turbid waters), primary conclusions are obtained: (1) MODIS-derived $R_{rs}(\lambda)$ can assure certain precisions but can not satisfy the expected error of 10%, and has obviously poor results in 412nm bands. There is good linear relationship between satellite images and modeled images. The overall root mean square error is $0.0030sr^{-1}$ and the median of absolute values over the relative error is about 25%, respectively. Derived $R_{rs}(\lambda)$ is similar with *in-situ* ones in spectrum shape, and is mostly underestimated especially in high value region. Besides, $R_{rs}(\lambda)$ at 412 and 667nm bands are mostly underestimated with even negative values in low value region. The reasons for this phenomenon are due to the influences of water-leaving radiance in the near-infrared bands and improper aerosol models used

* 国家自然科学基金项目(40606043)、国家863计划项目(2007AA12Z145)和国家重点基础研究发展计划项目(2006CB40370)联合资助. 2008-10-29收稿; 2008-12-03收修改稿. 孙凌, 女, 1977年生, 博士, 副研究员; E-mail: sunling@cma.gov.cn.

in the atmospheric correction process. (2) MODIS derived Chl.a is very poor. The satellite derived values are systematically overestimated. And there is no obvious linear relationship between satellite derived and *in-situ* Chl.a, which the root mean square error is about $1.56\text{mg}/\text{m}^3$, the median absolute relative error about 103.25%, and the median satellite to *in-situ* ratio about 2.03. The major reason for this phenomenon is the OC3M model (coefficients) unsuitability.

Keywords: Validation; Yellow & East China Sea; MOIDS; remote sensing reflectance; chlorophyll-a concentration

利用水色遥感手段, 可以从大气顶测量的辐亮度反演得到可见光至近红外波段的离水辐射光谱, 利用离水辐射光谱可进一步估算若干地球物理参数, 如表层叶绿素 a 浓度等, 而这些产品又是其它模型的输入量, 如初级生产力、赤潮和富营养化监测等. 为了保证后端科学研究的可靠性, 首先要确保基本的水色产品, 如归一化离水辐亮度($L_{wN}(\lambda)$)以及叶绿素 a 浓度(Chl.a)的精度. 真实性检验就是针对某个数据产品确定其误差的时间和空间分布的过程.

国际上已有部分学者开展了针对 $L_{wN}(\lambda)$ 和 Chl.a 的区域或全球性的真实性检验研究^[1-3], 最常采用的方式就是将遥感产品与同步现场测量结果进行直接比较, 特别是 NASA 海洋生物学处理小组(OBPG)利用全球范围的数据在卫星生命周期内开展了持续的真实性检验工作, 并在水色产品精度评估、卫星测量长期稳定性评估、卫星在轨定标精度检验等方面获益.

MODIS 产品在国内水色遥感领域应用广泛. 中国近海是世界上最为浑浊的海域之一, 特别是杭州湾、长江口和苏北浅滩, 常年具有高悬浮沉积物浓度和复杂的水体光学特性. NASA 发布的标准 MODIS 水色产品虽然在全球尺度上具有较高的精度, 但是由于其采用的算法主要是针对大洋一类水体的情况, 在光学特性复杂多变的局部海域的精度并不高, 十分需要确定其产品在我国海域的可靠性, 以免影响后续应用. 另外, 为了改进已有的或开发新的适用于我国近海的大气修正和水色要素反演算法, 也需要对现有标准产品的精度进行评估, 确定算法反演失效所对应的特定大气、水体或者传感器条件. 但是, 由于高质量的海上实测数据获取的困难, 鲜见中国近海 MODIS 标准水色产品真实性检验结果的报道. 崔廷伟等^[4]曾针对 MODIS 标准水色产品的 $L_{wN}(\lambda)$ 和 Chl.a 在渤海区域进行了初步检验. 本文将利用 2003 年春季和秋季黄东海航次的高质量实测数据对 MODIS Aqua 标准水色产品中的归一化离水辐亮度(转换成遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$)和叶绿素 a 浓度进行真实性检验分析.

1 真实性检验方法

1.1 数据说明

采用 2003 年春季和秋季黄东海航次的实测遥感反射率和叶绿素 a 浓度数据^[5]作为真实值, 用以检验 MODIS Aqua 水色产品(来自 <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)的真实性.

图 1 为实测站位分布. 参与检验的实测数据包括春季航次的 87 个站位(3 月 19 日-4 月 23 日)和秋季航次的 79 个站位(9 月 2 日-9 月 27 日). 其中, $R_{rs}(\lambda)$ 采用美国 ASD 公司的双通道地物波谱仪 FieldSpec Dual VNIR(512 个通道, 光谱范围为 350-1050nm)进行测量. 试验前对 ASD 光谱仪进行了基于 NIST 标准的绝对辐射定标, ASD 光谱仪的测量几何和数据处理参照 NASA 海洋光学规范^[6], 并针对 II 类水体特点采用唐军武等^[7]的方法进行了气-水界面反射率调整. 为了监视仪器在试验中有无大的变化, 还对仪器进行了相对定标, 即利用加拿大 Satlantic 公司的水色质量监视仪(SQM-II), 每 2-3d 对 ASD 进行跟踪测试. 测试结果

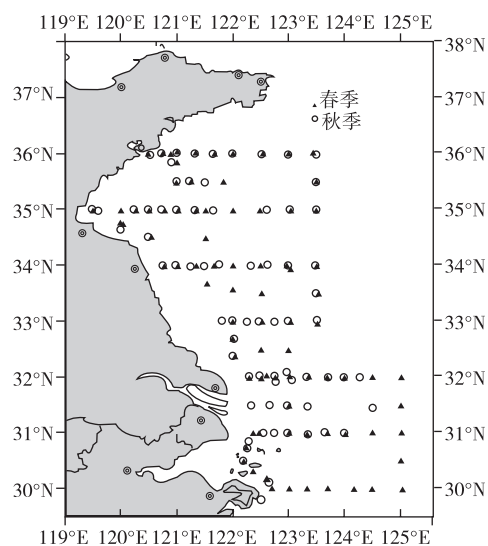


图 1 实测数据站位分布
Fig.1 *In situ* sites distribution

表明仪器变化基本在系统误差之内, 可以认为仪器在整个试验过程中是基本稳定的, 测量数据可靠. 叶绿素 a 浓度采用荧光法测定, 所用荧光计为 Turner designs 公司的 10-000R rack mount fluorometer. 在测定色素浓度之前采用 SIGMA 化学公司的标准叶绿素 a 依据 NASA 海洋光学规范对荧光计进行了标定. 样品的荧光色素浓度测定依据 NASA 海洋光学规范进行, 并在试验过程中对部分站位做了平行样品的测定, 误差分析结果表明测量数据可靠.

根据 MODIS Aqua 的光谱响应函数进行实测 $R_{rs}(\lambda)$ 的波段等效处理:

$$\langle R_{rs}(\lambda_i) \rangle = \int_{380\text{nm}}^{650\text{nm}} R_{rs}(\lambda) F_s(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda / \int_{380\text{nm}}^{650\text{nm}} F_s(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, $\langle R_{rs}(\lambda_i) \rangle$ 为中心波长为 λ_i 的波段的等效遥感反射率, $F_s(\lambda)$ 为日地平均距离处大气层外太阳辐照度, $S_i(\lambda)$ 为中心波长为 λ_i 的波段的光谱相应函数(来自 http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/RSR_tables.html).

NASA 发布的 MODIS Aqua 水色产品包括 6 个波段的 $L_{wN}(\lambda_i)$ 、869nm 波段气溶胶光学厚度 $\tau_a(869)$ 、Angstrom 波长指数、Epsilon 系数和 Chl.a 等, 空间分辨率为 1km. 其采用基于 2 个近红外波段(748 和 869nm)暗像元假设的 Gordon 和 Wang^[8] 的方法进行大气修正, 包括了 BRDF 校正^[9]、带外响应校正^[10-11]、近红外离水辐亮度校正^[11], 采用 OC3M 模型^[12]进行 Chl.a 估算. 文中, 参与检验的水色产品参数包括 412nm、443nm、488nm、531nm、551nm 和 667nm 波段的归一化离水辐亮度和叶绿素 a 浓度. 为了便于比较, 将 MODIS 的归一化离水辐亮度转换成遥感反射率:

$$R_{rs}(\lambda_i) = L_{wN}(\lambda_i) / \langle F_s(\lambda_i) \rangle \quad (2)$$

式中, $\langle F_s(\lambda_i) \rangle$ 为中心波长为 λ_i 的波段的等效日地平均距离处大气层外太阳辐照度, 对于这 6 个波段分别为 172.718、187.688、194.973、185.82、186.594 和 152.163mW/(cm²·μm·sr)(来自 http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/RSR_tables.html).

图 2a 为 2003 年 10 月 19 日的中国中北部海域 MODIS Aqua 真彩色图像, 显示出近岸水体非常混浊(棕黄色到绿色), 特别是在杭州湾、长江口和苏北浅滩等具有极高悬浮沉积物浓度的区域. 图 2b-2h 为对应的标准水色产品示例: 412、443、488、531、551 和 667nm 波段的 $R_{rs}(\lambda)$ 和 Chl.a. 可以看出, 在近海极高浑浊的区域, 无 $R_{rs}(\lambda)$ 反演值, 在北黄海海域, $R_{rs}(412)$ 出现大量负值.

1.2 时空匹配方法

卫星产品和现场实测数据具有不同的时空采样特性, 需要根据卫星产品的空间分辨率, 以及水体的时空变化与均匀性来确定合理的时空窗口, 并将空间窗口内有效水色像元的均值和时间窗口内有效现场实测的均值作为一个匹配数据对, 纳入验证数据集.

MODIS 水色产品的空间分辨率为 1km(天底观测), 每个像元值为观测视场内的空间平均, 而现场测量代表的是很小范围的局地特性. 观测尺度效应的存在要求待检验的地球物理参数在一定范围内是基本稳定的, 以实现卫星与实测值之间比较可靠的比较. 考虑到定位的误差以及我国近岸水体的空间变化性, 文中采用了以实测站点为中心的 3×3 像元窗口. 这种空间窗口的选择比较便于进行统计参数的计算以判识空间均匀性, 相比于采用与实测站位最邻近像元的方式^[4], 只要窗口内的像元满足均匀性要求, 可以增加某个站位测量数据参与检验分析的机会.

实测数据极少能够在卫星观测的同时进行采集, 因此本文采用了以卫星过境时间为中心的±3h 时间窗口来限定观测的同步性, 与 OBPG 小组的一致.

卫星数据的空间均匀性判识是时空匹配中的重要一步. 根据前人的研究成果^[1-3], 本文主要采用了 3 个判识准则:

(1) 统计空间窗口内的有效像元个数(即非填充值的像元个数, NVP)和非陆地像元总数(NTP), 要求 $NVP > NTP/2 + 1$ 且 $NVP \geq 2$, 以保证空间均值的代表性.

(2) 计算有效像元的均值 \bar{x} 和标准差 σ , 剔除 $\bar{x} \pm (1.5 \times \sigma)$ 之外的像元, 以减少较异常数据对均值计算的影响.

(3) 重新计算均值和标准差, 并计算方差系数 $CV = \text{标准差}/\text{均值}$, 若 $CV \leq 0.15$, 则通过均匀性判识.

同时也试验了 OBPG 小组所采用的 5×5 像元窗口^[1], 但是空间范围的增大引入了更多的空间变化性,

使得数据难以通过空间均匀性判识, 最终得到的有效匹配数据不仅没有增加反而降低(结果未在本文给出).

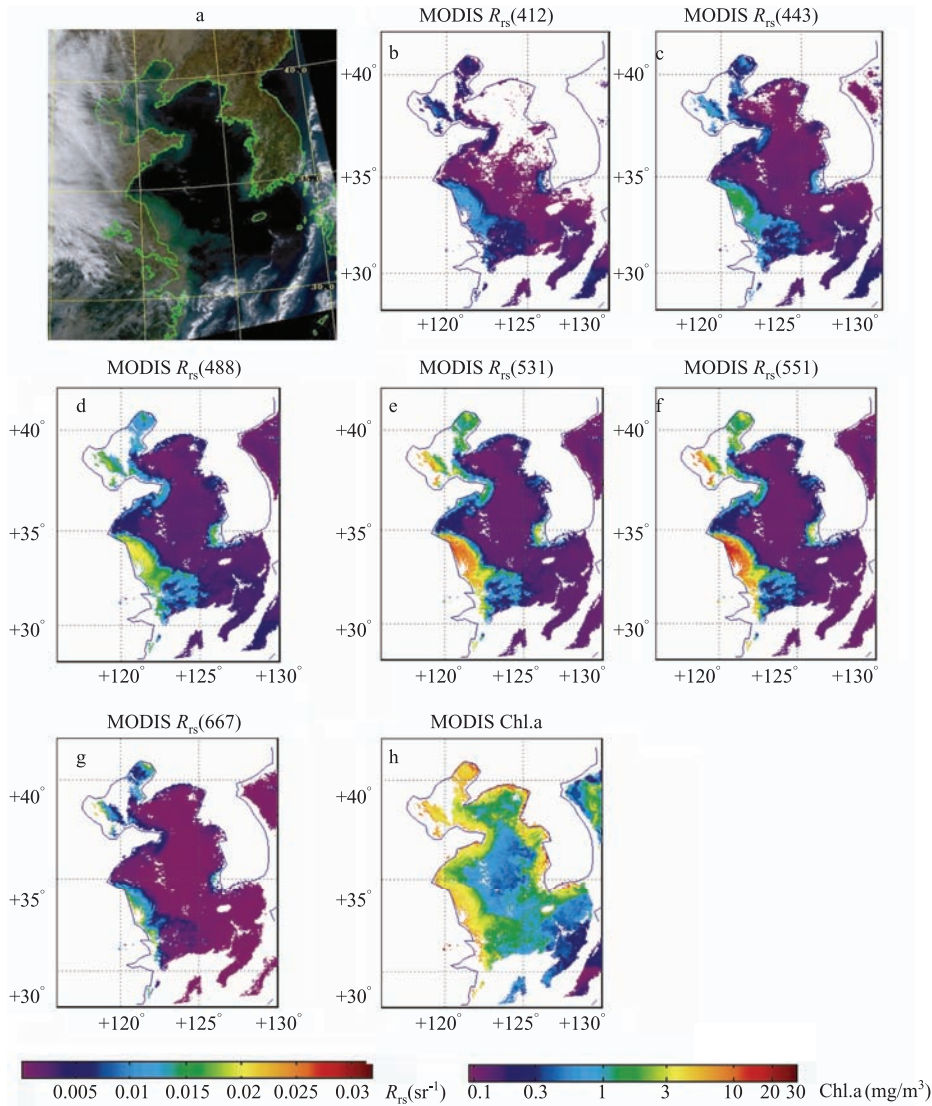


图 2 2003 年 10 月 19 日中国近海 MODIS Aqua 产品示例

(a)真彩色, (b-g) 412, 443, 488, 531, 551 和 667nm 波段的 $R_{rs}(\lambda)$, (h) Chl.a

Fig.2 MODIS Aqua products on October 19th, 2003 around the China coast for (a) true color image, (b-g) $R_{rs}(\lambda)$ at 412, 443, 488, 531, 551 and 667nm bands, respectively, (h) Chl.a

2 检验结果与分析

采用上文所述的时空匹配方法, 我们获得了 25 个站位的现场测量结果与 MODIS 产品满足空间和时间上的一致性, 经过空间均匀性检验(第一条判识准则的影响最大)之后, 最终得到最多 9 个 R_{rs} 和 9 个 Chl.a 验证数据对. 在验证数据对中, 每个卫星数据是至少 5 个像元的均值.

2.1 遥感反射率

图 3 为 6 个波段的 MODIS 反演 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测值的散点图, 图中给出了各个波段的线性拟合结果. 表 1

为对应的偏差统计信息, 包括均方根偏差 $RMSE$, 均方根相对偏差 $RMSRE$ (相对偏差 $RE=(X^{Sat}-X^{Mea})/X^{Mea}$), 相对偏差绝对值的中值 $MARE$, 卫星与实测值之比的中值 $MRatio$, 相对偏差分别在 $\pm 30\%$ 和 $\pm 40\%$ 内的数据比重 $|RE|<30\%$ 和 $|RE|<40\%$.

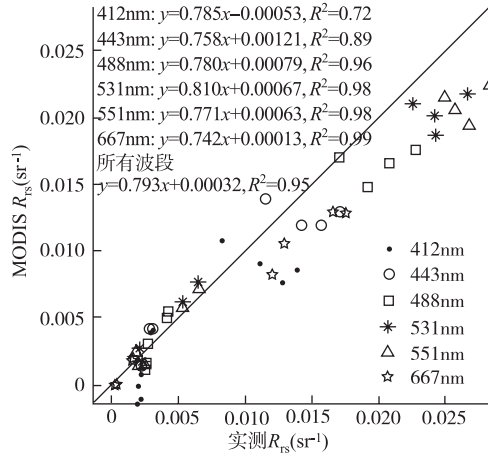


图 3 6 个波段的 MODIS 反演 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测值的散点图

Fig.3 MODIS derived $R_{rs}(\lambda)$ compared with *in situ* data for the bands of 412, 443, 488, 531, 551 and 667nm

由图 3 可见, MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测值之间具有良好的线性相关关系. 对于所有 6 个波段, 线性拟合的斜率约为 0.79, 截距约为 0.00032, 相关系数 R^2 约为 0.95. 在这 6 个波段中, 412 和 443nm 波段的反演结果相对较差, 特别是 412nm 波段, 相关系数 R^2 只有 0.72. MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 多数偏低, 特别是在高值区(约 $>0.01sr^{-1}$), 412nm 波段在低值区(约 $<0.005sr^{-1}$)大多数偏低, 甚至出现负值.

进一步分析表 1 的偏差信息. 自 443nm 至 551nm 再至 667nm, 均方根偏差 $RMSE$ 先增加后减小, 与实测 $R_{rs}(\lambda)$ 的变化趋势一致; 各个波段的 $RMSE$ 值均较小, 相对来说 412nm 的 $RMSE$ 偏高; 相对偏差绝对值的中值 $MARE$ 基本都小于 25%, 而 412nm 波段的接近 40%; 卫星反演与实测值之比的中值 $MRatio$ 除了 412nm 波段数值偏低之外, 都在 0.75 至 0.82 范围内; R_{rs} 反演偏差基本在 $\pm 30\%$ 以内(数据比重 $>60\%$), 而 412nm 波段的反演偏差基本在 $\pm 40\%$ 以内.

表 1 6 个波段的 MODIS 反演 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测值间的偏差统计信息

Tab.1 Statistics of differences between MODIS derived $R_{rs}(\lambda)$ and *in situ* data for 6 bands

波段(nm)	$RMSE(sr^{-1})$	$RMSRE$	$MARE$	$MRatio$	$ RE <30\%$	$ RE <40\%$
412	0.0031	86.99%	39.33%	0.61	20.00%	60.00%
443	0.0024	29.61%	24.59%	0.81	62.50%	87.50%
488	0.0028	28.36%	22.98%	0.79	77.78%	88.89%
531	0.0028	24.44%	20.91%	0.82	90.00%	90.00%
551	0.0036	25.25%	24.35%	0.80	90.00%	100.0%
667	0.0027	58.22%	25.00%	0.75	75.00%	75.00%
所有	0.0030	48.50%	24.68%	0.79	69.09%	83.63%

基本可以认为 R_{rs} 的反演结果具有一定的精度, 但 412nm 波段的结果明显较差. 对于所有 6 个波段, $RMSE$ 约为 $0.0030sr^{-1}$, $MARE$ 约为 25%, $MRatio$ 约为 0.79. 但是, 距离全球清洁自然水体的 5%精度预期^[1] 来说仍有很大距离.

在渤海地区, 国内学者曾在 412–551nm 波段得到了比较好的检验结果, 平均相对误差为 12%–15%, 然而在 667nm 波段精度很低, 平均相对误差高达 924.94%^[4]. 这与本文的结果并不一致. 除了海区本身的

不同之外, 必须注意到所采用的时空匹配策略、数据的剔除准则、现场数据的测量都存在差异.

图 4b-4i 给出了 MODIS 反演的遥感反射率与实测光谱在 8 个站位的比较(其地理分布见图 4a), 其中实线为实测光谱, 圆圈为实测数据的波段等效值, 方框为 MODIS 反演值, 站位的日期、经纬度以及 MODIS 产品与实测数据的观测时间间隔也标注在图上. 可以看出, MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测光谱的形状基本相似. 对于中等混浊水体, 如 hd91, HD35, HD36 和 hd61($7\text{mg/L} < \text{悬浮物浓度} < 15\text{mg/L}$), MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 多数明显偏低, 很可能是近红外波段离水辐射信号造成大气修正过程中气溶胶信号估计值偏大所致; 而在 hd61 站点, 412 和 443nm 波段的值又偏高, 可能与大气校正过程中气溶胶类型的选择有关

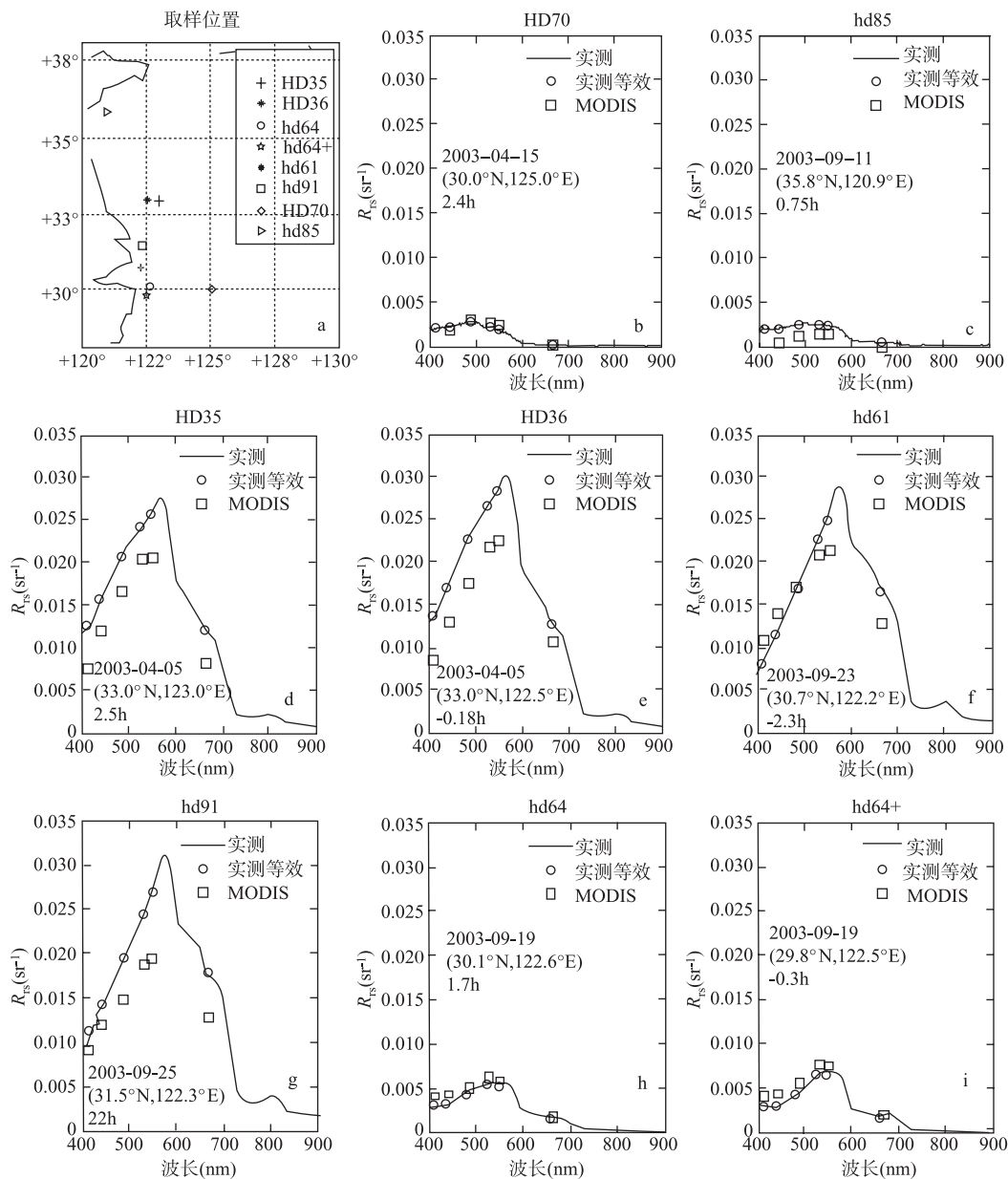


图 4 8 个站点 MODIS 反演的遥感反射率与实测光谱的比较

Fig.4 MODIS derived remote sensing reflectance spectra compared with those from *in situ* data

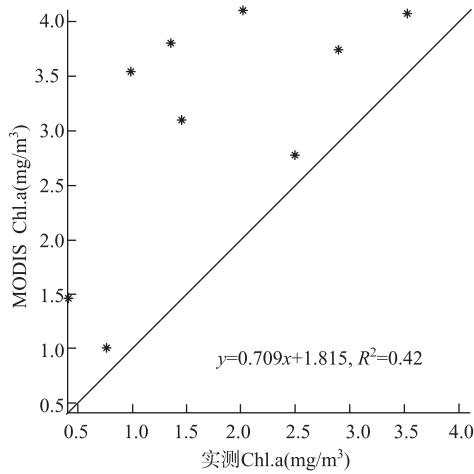


图 5 MODIS 反演的 Chl.a 与实测值的散点图
Fig.5 MODIS derived Chl.a values compared with *in situ* concentrations

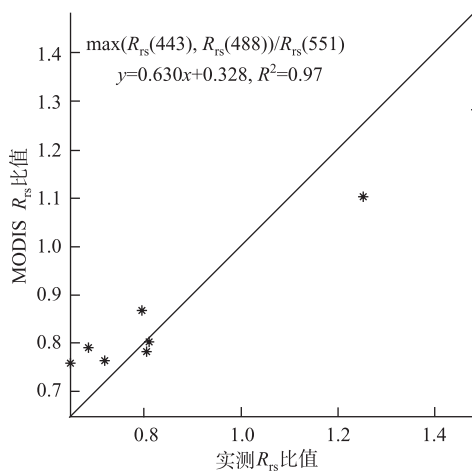


图 6 MODIS 反演的 $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ 与实测结果的散点图
Fig.6 MODIS derived $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ values compared with *in situ* data

偏差^[4]仍比本文的检验结果好,但是必须注意到不同地区实测 Chl.a 本身的差异(渤海地区的实测 Chl.a 具有更大的变化范围 0.88–16.90mg/m³).

MODIS 的 Chl.a 反演结果很差. 究其可能的原因,一方面,MODIS 的 OC3M 模型不适用于研究海域;另一方面,Chl.a 是 $R_{rs}(\lambda)$ 的导出产品,存在误差累积效应. 为此,我们分析了 OC3M 模型的输入变量 $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ 的偏差情况,以及 OC3M 模型的适用性.

图 6 给出了 MODIS 反演的 $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ 与实测结果的散点图. 事实上,对于匹配数据, $R_{rs}(488)$ 均大于 $R_{rs}(443)$, 即 $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551) = R_{rs}(488)/R_{rs}(551)$. 表 3 给出了对应的偏差统计信息. 可以看出, $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ 的反演值与实测值间具有良好的线性相关关系, R^2 约为 0.97, 两者的 RMSE 约为 0.11, MARE 约为 10.61%, MRatio 约为 1.03.

(该站的 MODIS Angstrom 波长指数为 0.23, 明显低于其他站点; Epsilon 系数为 1.03, 也低于其他站点), 导致短波波段的气溶胶信号相对于长波来说偏小. 对于低浑浊水体, 如 hd64 和 $hd64+(2\text{mg/L} < \text{悬浮物浓度} < 4\text{mg/L})$, MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测光谱吻合基本良好; 但是对于 hd85(悬浮物浓度为 1.5mg/L), MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 偏低, 在 412 和 667nm 波段甚至为负值, 可能是由于近红外离水辐射信号未得到有效校正所致; 对于 HD70(悬浮物浓度为 0.66mg/L), 412nm 波段也出现负值的情况, 可能是由于气溶胶类型的选择不当所致.

总的来说,对于较为混浊的水体,在大气修正过程中经常会同时存在近红外波段离水辐射的影响和气溶胶类型不适当的影响,对于较为清洁的水体也可能存在气溶胶类型不适当的影响. 近红外波段离水辐射的影响会造成气溶胶信号的高估,而气溶胶类型不适当的影响则会在短波波段造成气溶胶信号高估或者低估. MODIS 标准大气修正算法^[8,13]的近红外暗像元假设在混浊水体失效,尽管采用了近红外离水辐射校正,仍可能存在问题. 另外,近海的气溶胶受陆源影响,存在吸收性较强的情况,标准算法所采用的 16 个气溶胶类型都是弱吸收气溶胶(531nm 气溶胶单次散射反照率最小也在 0.96 以上),这两个方面将使得标准算法在近海可能具有较大的离水辐射反演误差,特别是短波波段,如 412 和 443nm 波段的反演值可能偏低甚至为负^[14].

2.2 叶绿素 a 浓度

图 5 为 MODIS 反演的 Chl.a 与实测值的散点图. 分析可知,MODIS 反演的 Chl.a 整体偏高,与实测值之间不具有明显的线性相关关系; 两者的 RMSE 约为 1.56mg/m³, MARE 为 103.25%, MRatio 为 2.03, 相对偏差在 $\pm 40\%$ 内的数据比重只有 44.44%, 远达不到全球清洁自然水体 35% 的精度预期^[1].

叶绿素浓度高估的现象与国内学者在渤海地区的检验结果相同,但是渤海地区 54.44% 的平均相对

图 7 给出了采用实测数据由 OC3M 模型得到的 Chl.a 与实测结果的散点图(线性相关分析结果示于图中). 对应的偏差统计信息见表 2. 可以发现, 即使采用实测 R_{rs} 数据, OC3M 模型得到的 Chl.a 估算结果仍然系统偏高, 具有很大的偏差, 其 $RMSE$ 高达 2.36mg/m^3 , $MARE$ 约为 127.99%, $MRatio$ 约为 2.28. 初步可以认为 OC3M 模型(系数)^[12]虽然是采用全球几千个站位的数据建立而成的, 但是并不适用于研究海域. 作为对比, 我们给出了采用一个区域模型^[15]得到的结果, 散点图和偏差信息分别示于图 8 和表 2. 可以看出, 采用区域模型之后, 反演结果更接近于实测值(除了 1 个站点), $MARE$ 约为 38.53%, $MRatio$ 约为 1.36.

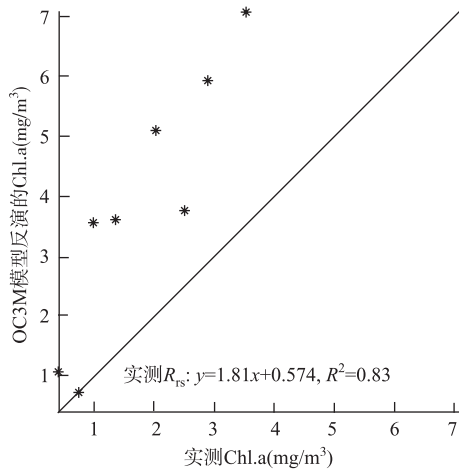


图 7 采用实测 R_{rs} 数据由 OC3M 模型得到的 Chl.a 与实测结果的散点图

Fig.7 OC3M derived Chl.a with *in situ* R_{rs} as inputs compared with *in situ* data

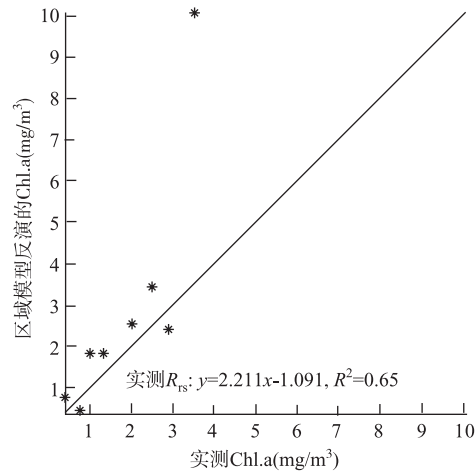


图 8 采用实测 R_{rs} 数据由区域模型得到的 Chl.a 与实测结果的散点图

Fig.8 Local model derived Chl.a with *in situ* R_{rs} as inputs compared with *in situ* data

表 2 与 Chl.a 反演相关的偏差统计信息

Tab.2 Difference statistics of Chl.a estimation related issues

	$RMSE$	$RMSRE$	$MARE$	$MRatio$	$ RE < 10\%$	$ RE < 15\%$
$\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(511)$	0.11	11.24%	10.61%	1.03	62.50%	100.00%
	$RMSE(\text{mg/m}^3)$	$RMSRE$	$MARE$	$MRatio$	$ RE < 40\%$	
OC3M模型	2.36	144.05%	127.99%	2.28	12.50%	
区域模型	2.37	81.44%	38.53%	1.36	62.50%	

3 结论与讨论

本文利用 2003 年春季和秋季黄东海航次的实测数据对 MODIS Aqua 标准水色产品中的归一化离水辐亮度 $L_{wn}(\lambda)$ (转换成遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$)和叶绿素 a 浓度(Chl.a)进行了真实性检验分析, 得到如下结论.

(1)MODIS 的 $R_{rs}(\lambda)$ 反演结果具有一定精度, 但 412nm 波段的结果明显较差. 整体上 MODIS 反演的 $R_{rs}(\lambda)$ 与实测光谱的形状基本相似, 数值多数偏低, 特别是在高值区(约 $>0.01\text{sr}^{-1}$), 412nm 波段在低值区(约 $<0.005\text{sr}^{-1}$)大多数偏低, 甚至出现负值. 反演值与实测值之间具有良好线性相关关系, 对于所有 6 个波段, 线性拟合的斜率约为 0.79, 截距约为 0.00032, 相关系数 R^2 约为 0.95, 均方根偏差约为 0.0030sr^{-1} , 相对偏差绝对值的中值约为 25%. 该结果距离全球清洁自然水体的 5%精度预期^[1]有很大距离, 即使是 10%的国内期望值也无法满足. 究其原因, 主要是大气修正过程中近红外波段离水辐射的影响和气溶胶类型不适当

的影响, 其中, 前者会造成气溶胶信号的高估, 而后者则会在短波波段造成气溶胶信号的高估或者低估。

(2)MODIS 的 Chl.a 反演结果很差。反演值整体偏高, 且与实测值之间不具有明显的线性相关关系, 两者的均方根偏差约为 $1.56\text{mg}/\text{m}^3$, 相对偏差绝对值的中值约为 103.25%, 反演与实测值之比的中值约为 2.03。该结果远达不到全球清洁自然水体 35%的精度预期^[1]。究其原因, 一是 MODIS 的 OC3M 算法不适用于研究海域; 二是 $R_{rs}(\lambda)$ 误差的累积, 即 OC3M 模型的输入变量 $\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488))/R_{rs}(551)$ 的误差放大。其中, 更主要的是 OC3M 模型(系数)的不适用性造成的。

值得注意的是, 由于 MODIS 标准产品本身在极高悬浮物浓度的水域无反演结果, 加之时空匹配的条件限制, 本文所得的结论仍局限在中低混浊水体。更为全面的分析有待高质量实测数据的积累, 以覆盖各种类型的水体。另外, 近海区域时空匹配的具体方法仍有探究的必要, 若数据量允许可以在检验时根据不同的影响条件, 如杂散光、太阳耀斑、特殊水体或大气因素等进行具体分析, 而且高质量的实测数据是进行有效检验的前提。

致谢: 感谢2003年黄东海试验人员的辛勤工作, 以及NASA OBPG小组和ocean color网站提供的MODIS Aqua水色产品数据。

4 参考文献

- [1] Bailey SW, Werdell PJ. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **102**: 12-23.
- [2] Barbini R, Colal F, Fantoni R *et al.* Comparison of SeaWiFS, MODIS-Terra and MODIS-Aqua in the Southern Ocean. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(11): 2471-2478.
- [3] Froidefond JM, Lavender S, Laborde P *et al.* SeaWiFS data interpretation in a coastal area in the Bay of Biscay. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(5): 881-904.
- [4] 崔廷伟, 张杰, 马毅等. 渤海MODIS水色产品评估与修正. 第五次全国二类水体水色研讨会[CDROM], 大连, 2006.
- [5] Tang JW, Wang XM, Song QJ *et al.* The statistic inversion algorithms of water constituents for Yellow Sea & East China Sea. *ACTA Oceanologica Sinica*, 2004, **23**(4): 617-626.
- [6] Mueller JL, Fargion GS. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 3. Greenbelt, Maryland 20771: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2002: 308.
- [7] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析: I.水面以上测量法. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [8] Gordon HR, Wang MH. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443-452.
- [9] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters: III. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem. *Applied Optics*, 1996, **35**(24): 4850-4862.
- [10] Wang M, Franz BA, Barnes RA *et al.* Effects of spectral bandpass on SeaWiFS-retrieved near-surface optical properties of the ocean. *Applied Optics*, 2001, **40**(3): 343-348.
- [11] Patt FS, Barnes RA, RE Eplee J *et al.* Algorithm updates for the fourth SeaWiFS data reprocessing. NASA Tech. Memo., vol. 206892. Greenbelt, Maryland 20771: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2003.
- [12] O'Reilly JE, Maritorena S, Mitchell BG. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J Geophys Res*, 1998, **103**(C11): 24937-24953.
- [13] Gordon HR. Atmospheric correction of ocean color imagery in the earth observing system era. *J Geophys Res*, 1997, **102**(D14): 17081-17106.
- [14] Siegel DA, Wang MH, Maritorena S. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption. *Applied Optics*, 2000, **39**(21): 3582-3591.
- [15] Sun L, Guo MH, Wang XM. Ocean color products retrieval and validation around China coast with MODIS. Proceedings of ISPRS 2008, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008, **XXXVII**(B8): 673-678.