

引用格式:Ye Xiaomin, Ding Jing, Qiu Zhongfeng, *et al.* Error Analysis for the Validation of Ocean Color and Sea Surface Temperature Remote Sensing Products[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 719-724. [叶小敏, 丁静, 丘仲锋, 等. 水色水温遥感产品真实性检验误差分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 719-724.] doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0719

水色水温遥感产品真实性检验误差分析

叶小敏^{1,4}, 丁 静^{1,4}, 丘仲锋², 蒋锦刚³

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;
3. 杭州师范大学, 浙江 杭州 311121; 4. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081)

摘要:真实性检验是利用现场观测数据或其他高质量遥感产品来获取待检验遥感产品精度的技术, 是遥感产品制作及其应用的前提。通过分析均方根误差、平均绝对误差和平均相对误差等多种遥感产品精度评价统计量的适用性, 确定了一套水色、水温遥感产品真实性检验流程。以中分辨率成像光谱仪(MODIS)海表温度(SST)遥感产品的真实性检验实例展示了文中确定的水色水温遥感产品真实性检验流程的可行性。分析结果表明待检验产品的分布规律(样本均值和标准偏差)对检验结果的统计量会产生一定的影响, 平均值对平均相对误差的影响呈现高相关性。

关键词:遥感产品; MODIS; 海表温度(SST); 真实性检验

中图分类号:P 714; TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2015)04-0719-06

1 引言

真实性检验就是正确地评估遥感产品的精度, 使遥感产品的使用者对该精度可信。真实性检验是遥感产品制作算法和其应用的保证。国内外学者对海洋水色产品的真实性检验进行了大量研究。Bailey 和 Werdell^[1]给出了一种基于现场观测数据对卫星海洋水色的真实性检验方法, 详细描述了卫星数据与现场观测数据检验匹配的方法和步骤, 并对 SeaWiFS 水色产品进行了精度检验。孙凌等^[2]利用 Bailey 等真实性检验匹配法相类似的方法步骤, 对中国近海的 MODIS 归一化离水辐亮度和叶绿素 a 浓度等水色产品进行了精度检验。张仁华等^[3]对定量遥感产品真实性检验的基础和方法进行综述。对水色水温产品的真实性检验研究主要集中在对检验数据和待检验产品的匹配方法和步骤, 以及通过计算获得的一个或多个统计量数值大小来评价

水色遥感产品反演算法精度上^[4-6]。

遥感产品精度评价指标包括均方根误差、平均绝对误差和平均相对误差在内的多种统计量。对于相同的水体环境, 由于采用的精度评价方法不相同, 对比数据采集方法不一致等原因, 可能导致反演精度评价结论有所差异。本文通过分析多种遥感产品精度评价统计量的适用性, 确定了一套水色、水温遥感产品真实性检验流程, 并通过一个海面温度(SST)遥感产品的真实性检验实例验证了该检验流程的可行性。

2 水色水温遥感产品真实性检验方法

2.1 真实性检验误差评价量

对反演得到的遥感产品进行真实性检验, 需要使用独立的现场实测值或者高质量的卫星遥感产品作为真值, 经过一定的时空匹配策略, 进行误差统计分析。一般情况下, 真实性检验的误差统计分析量

收稿日期: 2014-02-07; 修订日期: 2014-06-11

基金项目:海洋公益性行业科研专项“海洋环境要素水色遥感技术与应用示范”(201005030), 国家自然科学基金青年科学基金项目“样本特性对海洋遥感产品真实性检验的定量化影响研究”(41506206), 国家高技术产业发展项目—海洋高分辨率卫星遥感系统研制与示范应用, 全球变化与海气相互作用专项(GASI-03-03-01-01)。

作者简介:叶小敏(1983—), 男, 江西九江人, 助理研究员, 主要从事海洋遥感应用研究。E-mail: yxm@mail.nsoas.org.cn。

通讯作者:丁 静(1977—), 女, 湖北襄樊人, 研究员, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: dingjing@mail.nsoas.org.cn。

包括平均绝对误差、平均相对误差和均方根误差。采用不同的误差形式可以全面地评估反演的准确度和精密度^①。

平均绝对误差(MD)、平均相对误差(RMD)和均方根误差(RMSE)的定义表达式分别如下：

平均绝对误差：

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|$$

(1)

平均相对误差：

$$RMD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - Y_i|}{Y_i} \times 100\%$$

(3)

均方根误差：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

(3)

其中： X_i 和 Y_i 分别为反演结果和用于真实性检验的检验数据； n 为检验数据样本大小。

绝对误差直接量度反演结果和作为真值的检验数据之间的差异，量纲与数据相同，绝对误差不能完全说明反演结果的准确度。平均相对误差反映了反演误差在作为真值的检验数据值中所占的比例，用于比较反演结果在各种检验数据情况下的准确度。利用相对误差来进行误差分析时，如果真实值很小的时候，相应的相对误差可能会很大，尽管绝对误差较小。平均绝对误差是对整个数据集反演结果与实测数据的差异进行算术平均，平均相对误差是对数据集中每组反演结果的相对误差进行算术平均。一般情况下，采用平均相对误差比平均绝对误差更能全面地反映反演结果的准确度，因为它与实测数据的量值联系在一起。但是，如果实测数据的量值本身比较小，就会出现数据集平均相对误差“虚高”的情况，不能真实评价反演结果的误差水平。均方根误差反映了反演结果偏离测量数据的程度。误差分析中，绝对误差、相对误差常用于表示准确度，而均方根误差表示精密度，亦即离散程度。精密度高，准确度不一定高，而准确度高，则精密度一定要好。精密度是保证准确度的先决条件，精密度的分析结果才有可能获得高准确度；准确度是反映系统误差和随机误差两者的综合指标。因此在误差评价时，采用多种误差表示方法能够较全面地评价误差水平。

2.2 真实性检验误差分析流程

为了避免在检验数据值比较小的情况下，平均

相对误差虚高引起真实性检验结果的评价，在计算真实性检验统计量之前，应该确定作为真值的检验数据和待检验的遥感产品样本的数值大小及其分布情况。同时，在检验样本量较小的情况下，样本数量的大小也有可能影响平均相对误差的大小，因此对真实性检验误差分析还需考虑检验数据量大小对误差分析统计量大小的影响。

根据上述分析，确定水色遥感产品真实性检验误差分析流程如图 1 所示：①利用遥感产品真实性检验数据星—地匹配策略对卫星遥感产品和现场实测数据进行时空匹配，或者利用星—星匹配策略对卫星遥感产品和高质量卫星遥感产品进行时空匹配；②对作为真值的检验数据和待检验的遥感数据进行分析。计算其均值大小、标准偏差等分布规律的统计量；③根据待检验产品要素的合理分布范围，检查检验数据样本是否在该范围的较小范围内，以此检查结果确定真实性检验的统计量组合。如果处于待检验产品要素的较小范围内，应以平均绝对误差和均方根误差组合综合评价待检验产品的检验精度；否则还应增加平均相对误差作为检验结果的分析统计量；④计算误差分析的统计量，综合评价遥感产品真实性检验结果。

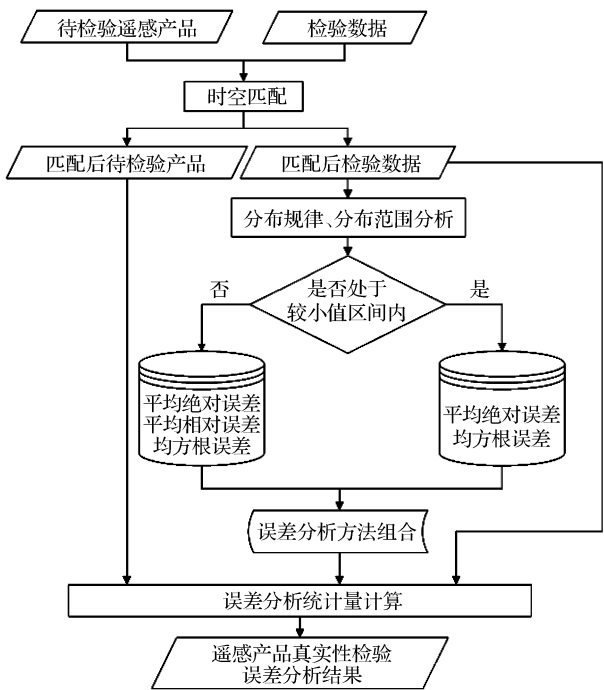


图 1 水色水温遥感产品真实性检验误差分析流程
Fig. 1 Flowchart of error analysis for the validation of ocean color and sea surface temperature remote sensing products

① 丘仲锋,蒋锦刚. 误差评价方法研究。

3 水温遥感产品真实性检验示例

3.1 检验示例数据与处理

3.1.1 检验示例数据

用于待检验的卫星遥感数据为美国 NASA 物理海洋存档与分发中心(ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/modis/)提供的 Aqua 卫星 MODIS 海面温度(SST)产品。其空间分辨率约为 4 km,包括 4 μm 窗口 MODIS SST4 算法的夜间 SST 产品、11 μm 窗口的 NLSST 算法探索者(Pathfinder)修正算法的白天和夜间产品。本文使用 2009 年全年的 11 μm 窗口的白天和夜间 SST 产品作为待检验遥感数据,白天和夜间的 11 μm 窗口 SST 产品相对于浮标的反演精度分别为 $\pm 0.5\text{ K}$ 和 $\pm 0.4\text{ K}$ ^[7]。

用于检验的现场实测数据为 Argo 浮标 SST 实测数据,来源于中国 Argo 资料中心(ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/)。本文依据相关文献^[4,8]的做法,选用浮标在深度为 5~6 m 的温度作为实测 SST 数据集,用于检验 MODIS 的 SST 产品。

3.1.2 检验数据处理

首先对卫星遥感数据与实测数据进行匹配。时间上限制实测数据和卫星过境时间均为同一天;空间上以 Argo 浮标对应的遥感 SST 产品像素点为中心,选取 5 \times 5 窗口内像素的观测值作为待检验遥感 SST 对象;参考相关参考文献^[1-2,9-11]并结合本文的需要,确定可作为待检验的 SST 值还需通过如下质量控制与处理:①统计空间窗口内的有效像元个数(Number Good Pixels,NGP,即 SST 处于合理性范围 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的像元个数)和非陆地像元总数(Number Total Pixels,NTP),满足 $\text{NGP}>\text{NTP}/2+1$ 且 $\text{NTP}>2$;②空间窗口内像元 SST 值标准差满足 $\sigma\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;计算满足①和②条件的空间

窗口的有效像元 SST 的均值作为与 Argo 浮标海温测量值对应的待检验遥感产品 SST 值。卫星遥感 SST 数据与 Argo 浮标实测数据匹配获得检验数据处理流程如图 2 所示。

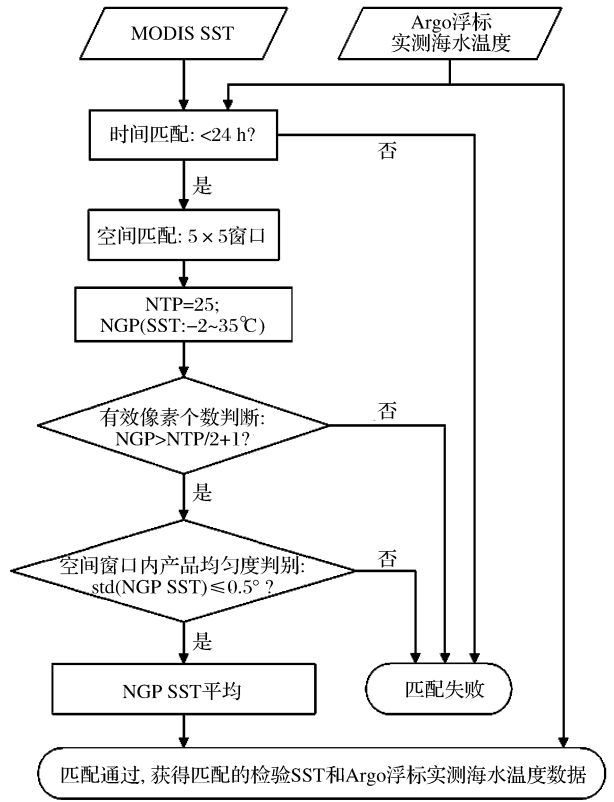


图 2 SST 遥感产品与 Argo 浮标实测数据匹配处理流程
Fig. 2 Flowchart of the matching up of SST remote sensing products to in-situ measurements by Argo buoys

经过上述处理步骤得到与 2009 年 Aqua 卫星 MODIS 11 μm 窗口 SST 产品匹配的 Argo 浮标海水温度测量点,如图 3 所示。由图 3 可见,用于 SST 检验的匹配数据较为均匀地分布于全球海洋,且在各温度大小范围内分布。

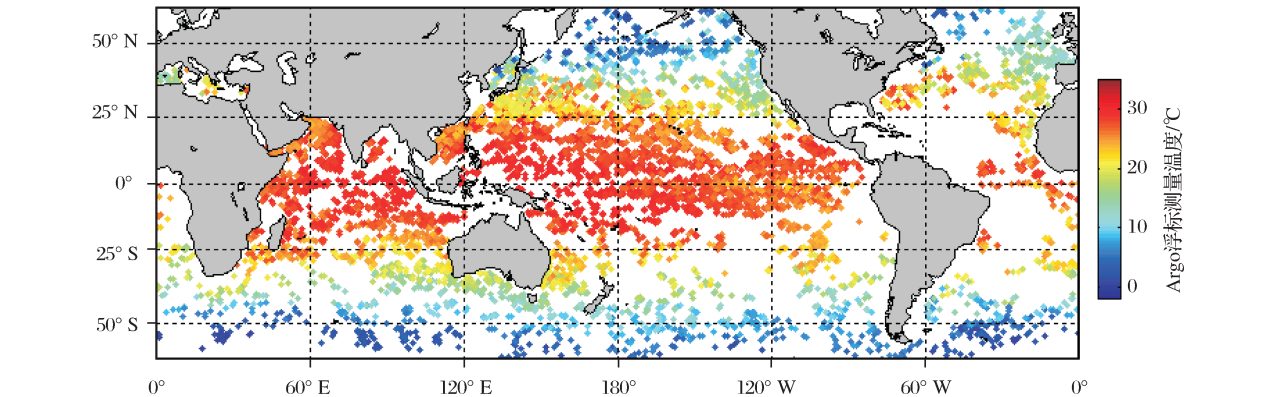


图 3 与 SST 遥感产品匹配的实测数据分布图
Fig. 3 Spatial distributions of in-situ measurements matched up to SST remote sensing products

3.2 真实性检验结果及其误差分析

检验数据时间跨度范围为 2009 年全年,即 2009 年 1 月 1 日~12 月 31 日。空间上将检验区域

分为若干区域;利用图 1 的处理步骤,分别对待检验的 SST 及其 Argo 浮标实测值进行统计分析。检验区域划分信息与检验统计分析结果如表 1 所示。

表 1 检验区域划分信息与检验统计分析结果

编号	检验区域地理范围		匹配点数	MODIS SST/℃		Argo 浮标实测海水温度/℃		检验统计结果		
	纬度/°	经度/°		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	MD/℃	RMD/%	RMSE/℃
1	-60~-60	0~90	2 376	24.82	6.43	24.49	6.41	0.66	4.58	0.98
2	-60~-60	0~135	4 165	24.44	6.39	24.21	6.39	0.59	3.90	0.88
3	-60~-60	0~180	6 640	23.97	6.61	23.71	6.66	0.59	4.21	0.87
4	-60~-60	0~225	9 108	23.74	6.81	23.47	6.90	0.58	4.52	0.86
5	-60~-60	0~270	10 753	23.69	6.69	23.42	6.79	0.56	4.39	0.84
6	-60~-60	0~315	11 075	23.47	6.87	23.20	6.96	0.57	4.76	0.85
7	-60~-60	0~360	12 156	23.01	7.02	22.72	7.11	0.57	4.85	0.86
8	-30~-30	0~360	8 473	26.73	2.48	26.48	2.55	0.54	2.07	0.76
9	-10~-10	0~360	2 613	27.85	1.52	27.72	1.73	0.50	1.81	0.69
10	-60~-30	0~360	1 689	12.48	6.43	12.29	6.60	0.55	13.14	0.95

本文共选择了 10 个检验区域,其中第 1~7 区域,纬度范围相同,经度范围不同,待检验海面温度分布规律和均值基本相同。第 7~10 区域经度范围均为 0~360°,但纬度范围不同,待检验海面温度分布规律和均值有所差异(见表 1 中 SST 均值和标准偏差),图 4 为第 1 和第 10 区域海面温度 SST 分布比例直方图,图 5 为第 1 和第 10 区域 SST 与 Argo 浮标测量海水温度比较散点图。表 1 中 MODIS SST 和 Argo 浮标实测海水温度均值和标准偏差基本一致,检验的均方根误差 RMSE 在 0.69~0.98℃范围内,表明本文使用的 MODIS SST 产品检验结果基本达到其检验标准,不存在显著偏差^[4-5]。检验均方根误差 RMSE 与 Kohtara 等^[12]检

验 RMSE 的 0.70℃ 相当,然而比产品的标称精度 0.5℃ 略高,这可能是由于实测值为 5~6 m 深的海水温度,而 SST 遥感产品为海水表面皮温,同时匹配的时间窗口相对较大(24 h)也可能是造成这一结果的原因。

在检验结果的 3 个统计量中,平均相对误差 MD 和均方根误差 RMSE 在一定范围内波动,MD 的波动范围为 0.50~0.66℃,RMSE 的波动范围为 0.69~0.98℃,变化范围相对稳定。第 3~6 检验区域,待检验的 SST 样本平均值变化范围不超过 0.5℃,标准偏差变化范围不超过 0.26℃,其检验结果 MD 和 RMSE 变化范围均在 0.03℃内,RMD 变化在 0.5%内。该结果表明:检验样本数量大小

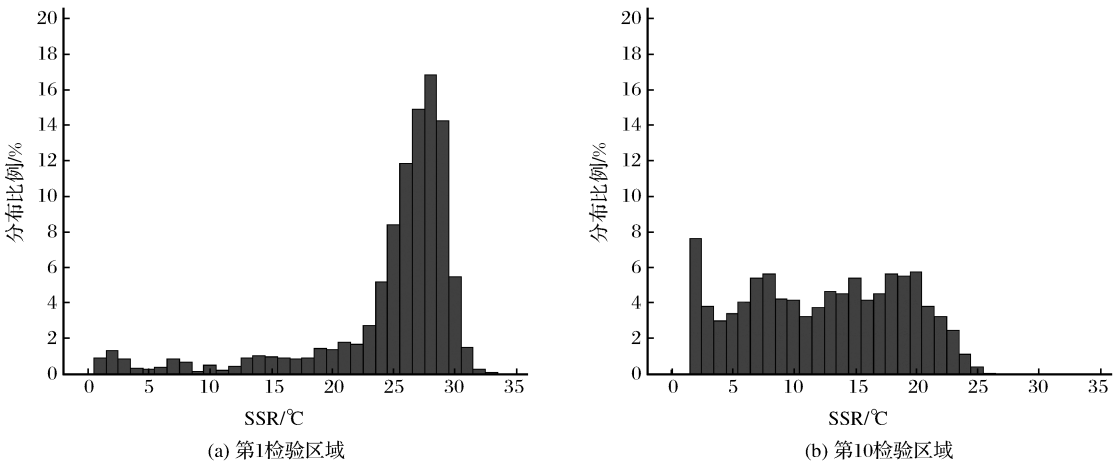


图 4 检验区域内 SST 值百分比直方图

Fig. 4 The percent histogram of SST value in different validation areas

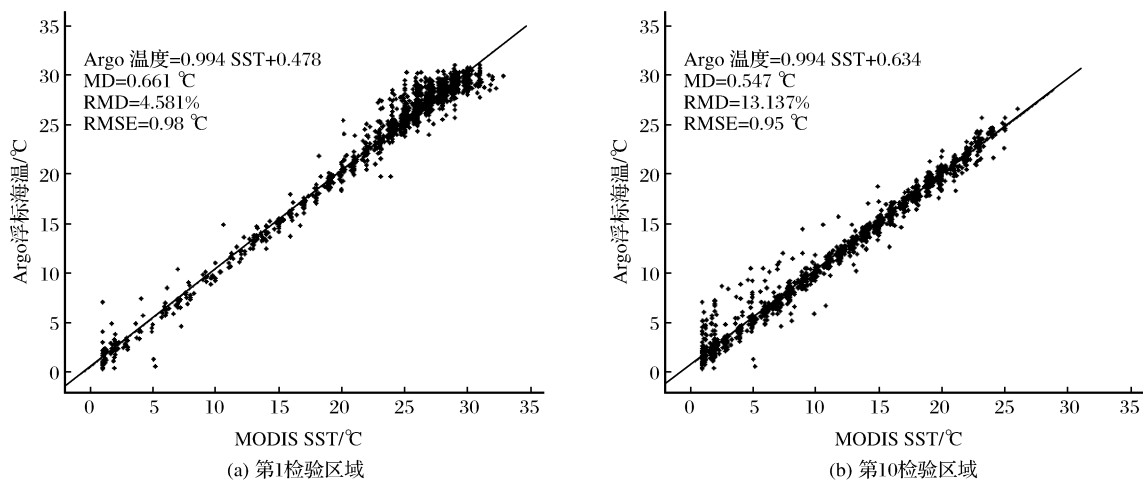


图 5 检验区域内 Argo 浮标海水温度测量值与 MODIS SST 值比较

Fig. 5 Comparison between sea water temperature measured by Argo buoys and SST derived from MODIS

大于某一值时,样本量的大小对检验统计结果的影响可忽略不计;待检验样本均值和分布规律相同的情况下,不影响检验结果。

在 10 个区域的检验统计量中,平均相对误差 RMD 变化较大,分析发现它与待检验的 SST 样本的平均值相关(图 6)。SST 样本平均值与平均相对误差 RMD 呈现负相关,相关系数 $R=-0.99$;该结果表明,在待检验样本标准偏差相差不大的情况下,待检验样本平均值与平均相对误差负相关,平均值越小,检验得到的 RMD 越大;待检验数据值和检验数据值在不同的分布区间的平均偏差相同或者相差不大。

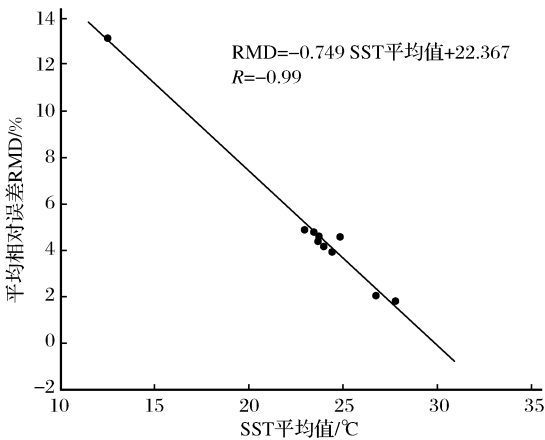


图 6 待检验 SST 样本平均值与其平均相对误差关系图

Fig. 6 Relationship between mean value and mean relative error of the SST samples

4 结 语

本文利用 MODIS SST 遥感产品实例进行了真实性检验,分析结果表明待检验产品的分布规律(样

本均值和标准偏差)对检验结果的统计量会产生一定的影响,平均值对平均相对误差的影响呈现很高的相关性。水色遥感产品(叶绿素浓度、悬浮物浓度等)和海表温度遥感产品适用于相同的真实性检验流程和方法,在进行水色水温遥感产品真实性检验前,均需对遥感要素的均值及其标准偏差等分布规律进行分析,以确定是否采用平均相对误差作为检验的统计量。利用实测检验数据或者高质量的遥感产品对不同算法得到的遥感产品进行真实性检验时,亦需对产品的均值和标准偏差等进行分析,以确定检验统计量作为评估不同算法的适用性与综合评估检验结果的可靠性。另一方面,由于水色要素和海表温度在不同海域和不同时间,可能具有不同的时空分布规律,因此时空匹配过程中的时空匹配窗口大小需根据遥感产品的时空分布特点确定。

参考文献 (References):

[1] 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: 12-23.

[2] Sun Ling, Wang Xiaomei, Guo Maohua, et al. MODIS Ocean Color Product Validation around Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(2): 298-306. [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.]

[3] Zhang Renhua, Tian Jing, Li Zhaoliang, et al. Principles and Methods for the Validation of Quantitative Remote Sensing Products[J]. Science China Press: Earth Science, 2010, 40(2): 211-222. [张仁华, 田静, 李召良, 等. 定量遥感产品真实性检验的基础的方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 211-222.]

[4] Sun Fengqin, Zhang Caiyun, Shang Shaoping, et al. Primary

- Validation of AVHRR/MODIS/TMISST for Part of the Northwest Pacific[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2007, 46(Sup. 1): 1-5. [孙凤琴, 张彩云, 商少平, 等. 西北太平洋部分海域 AVHRR/TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(增刊 1): 1-5.]
- [5] Minnett P J, Browen O B, Evans R H, *et al.* Sea-surface Temperature Measurements from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Aqua and Terra[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, (7): 4576-4579.
- [6] Gao Guoping, Qian Chengchun, Bao Xianwen, *et al.* Difference between the PFSST and the In-Situ Data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 121-126. [高郭平, 钱成春, 鲍献文, 等. 中国东部海域卫星遥感 PFSST 和现场观测资料的差异[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 121-126.]
- [7] Jiang Xingwei. An Introduction to Ocean Remote Sensing [M]. Beijing: Ocean Press, 2008. [蒋兴伟. 海洋遥感导论(译著)[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.]
- [8] Marcello J, Eugenio F, Hernandez A. Validation of MODIS and AVHRR/3 Sea Surface Temperature Retrieval Algorithms[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, (2): 839-842.
- [9] Wang Qimao, Lin Mingsen, Guo Maohua. Error Analysis of Sea Surface Temperature Retrieved from the HY-1 Satellite Data[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 355-359. [王其茂, 林明森, 郭茂华. HY-1 卫星海温反演的误差分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 355-359.]
- [10] Wang Qimao, Jin Zhengang, Sun Congrong. Sea Surface Temperature Retrieval Using the HY-1 Satellite Data[J]. Marine Forecasts, 2003, 20(3): 53-59. [王其茂, 金振刚, 孙从容. “海洋一号”(HY-1) 卫星数据的海面温度反演[J]. 海洋预报, 2003, 20(3): 53-59.]
- [11] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Radiometric Calibration and Validation of CCD Cameras on HJ-1 Satellite[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 682-688. [巩慧, 田国良, 余涛, 等. HJ-1 星 CCD 相机场地辐射定标与真实性检验研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 682-688.]
- [12] Kohtara H, Hiroshi M, Futoki S, *et al.* Algorithm and Validation of Sea Surface Temperature Observation Using MODIS Sensors Aboard Terra and Aqua in the Western North Pacific [J]. Journal of Oceanography, 2007, 63: 267-280.

Error Analysis for the Validation of Ocean Color and Sea Surface Temperature Remote Sensing Products

Ye Xiaomin^{1,4}, Ding Jing^{1,4}, Qiu Zhongfeng², Jiang Jingang³

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China;

4. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, SOA, Beijing 100081, China)

Abstract: The aim of validation is to get the accuracy of satellite remote sensing products using cruise data or higher quality remote sensing products as the true data. It is necessary for the applications of remote sensing products. In this paper, we analyzed the applicability of various statistical algorithms for accuracy evaluation, including root mean square error, mean absolute error and mean relative error. Furthermore, we determine a practical validation process for ocean color products and sea surface temperature (SST) products. The validation results of SST derived from MODIS show that the provided validation process is feasible. The validation results also show the distribution of the products, which represented by the mean deviation and the standard deviation can lead to different validation results, and the mean value of sample is high correlative to mean relative error.

Key words: Remote sensing products; MODIS; Sea surface temperature (SST); Validation