

针对海洋水体的 FY-3D MERSI II 数据质量评估

张靖玮, 丘仲锋*

南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

摘要 为促进 MERSI II 数据在海洋上的应用, 采用目前水色遥感主流传感器中的可见光红外光学成像遥感仪器 (VIIRS) 作为参照, 从信噪比 (SNR) 等方面对 MERSI II 数据质量进行了初步评估。结果显示: MERSI II 的信噪比在可见光波段高于 300, 最大可达到 900, 满足水体监测要求; 在可见光波段及近红外波段略低于 VIIRS, 在短波红外波段与 VIIRS 信噪比相差不大; 经辐射定标后的 MERSI II 各波段大气层顶反射率数据与 VIIRS 数据具有较好的一致性, 其决定系数 (R^2) 均高于 0.5, 其中蓝光波段 R^2 可达 0.9 以上, 平均绝对百分比误差 (E_{MAPE}) 小于 30%。西太平洋区域 670~865 nm 波段 R^2 约为 0.5, E_{MAPE} 在 5%~15%; 中国近岸海域 670~865 nm 波段 R^2 可达 0.8, E_{MAPE} 在 7%~24%。经简单线性拟合后, MERSI II 大气层顶反射率数据与 VIIRS 数据更加接近, 可见光波段的 E_{MAPE} 降至 8%, 其中, 蓝光波段降至 3%。上述结果表明, MERSI II 数据质量与 VIIRS 具有可比性, 可用于海洋遥感应用。

关键词 海洋光学; FY-3D; MERSI II; VIIRS; 信噪比; 大气层顶反射率

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1201002

Evaluation of Data Quality of FY-3D Satellite Sensor MERSI II over Marine Waters

Zhang Jingwei, Qiu Zhongfeng*

School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract In order to promote the application of MERSI II data in the ocean, this paper uses the visible infrared optical imaging remote sensing instrument (VIIRS), which is one of the mainstream sensors for water color remote sensing, as a reference, from the signal-to-noise ratio (SNR) and other aspects to conduct a preliminary assessment of the MERSI II data quality. The results show that the SNR values of MERSI II are higher than 300 in the visible band, and the maximum can reach 900, which meet the water bodies monitoring requirements. The SNR values of MERSI II are slightly lower than that of VIIRS in the visible band and the near-infrared band, and are not much different from VIIRS in the short-wave infrared band. In addition, the radiance calibrated MERSI II reflectance data at the top-of-atmosphere is in good agreement with the VIIRS data, the determination coefficients (R^2) are higher than 0.5, and the blue band R^2 can reach more than 0.9. The mean absolute percentage error (E_{MAPE}) is less than 30%. The R^2 in the 670–865 nm band of the Western Pacific is about 0.5, and the E_{MAPE} is 5%–15%. The R^2 can reach 0.8 in the 670–865 nm band of China's coastal waters, and the E_{MAPE} is 7%–24%. After a simple linear fitting, the MERSI II reflectance data at the top-of-atmosphere is closer to the VIIRS data. The E_{MAPE} in the visible band drops to 8%, and the blue band drops to 3%. The above results show that the quality of MERSI II data is comparable to VIIRS and can be used for ocean remote sensing applications.

Key words oceanic optics; FY-3D; MERSI II; VIIRS; signal-to-noise ratio; reflectance at the top-of-atmosphere

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 010.7340

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-07; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(41976165)

* E-mail: zhongfeng.qiu@nuist.edu.cn

1 引言

我国第 2 代风云极轨气象卫星(FY-3D)上搭载了可见光红外光学成像遥感仪器 MERSI II,其在探测灵敏度、带外响应、定标精度和寿命等性能指标上相比之前成像遥感仪器 MERSI I 型(搭载于 FY-3A/B/C)有了很大提高^[1]。MERSI II 可获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海表特性参数^[2-3],已被广泛用于积雪面积比例提取^[4]、云检测研究^[3,5]、真彩色影像合成^[6]、全球晴空数据合成^[7]和火点监测产品及应用^[8]等。

MERSI II 共有 25 个光谱通道,包括 6 个可见光光谱通道、10 个可见光/近红外光谱通道、3 个短波红外波段和 6 个中/长波红外光谱通道,地面分辨率为 250 m(6 个波段)和 1000 m(19 个波段),与其他主流水色传感器,如中分辨率成像光谱仪 MODIS、可见光红外光学成像遥感仪器 VIIRS 等相似,具有光谱波段多、覆盖范围广、测量精度高等特点,是海洋水色遥感数据的新来源。为促进 MERSI II 数据在海洋上的应用,需要针对海洋水域开展传感器的数据质量评估。

首先,信噪比(SNR, R_{SN})是光学传感器所获取数据质量的一个重要评价标准,是对在轨光学传感器信噪比的实际评估,它主要取决于仪器的性能,同时还和数据获取时的环境条件、大气条件等因素有一定的关系^[9],其值越高,代表遥感图像的质量越好。国内外学者在遥感图像信噪比的评估方法上已经做了很多研究工作,方差法是应用最广、最简单的一种^[10],即选取图像中面积较大且均匀的区域,然后计算该区域内像元的均值和标准差,均值和标准差的比值即所求信噪比。常用的方法还有不少,如 Curran 等^[11]提出了地学统计法,Gao 等^[12]提出了局部均值与局部标准差法,高连如等^[13]提出了基于边缘块剔除的局部均值与局部标准差法等。上述信噪比评估方法大多是通过估计空间分布比较均匀的窗口的均值与标准差来代表传感器的信号与噪声值,从而对信噪比进行评估。由于过去和现在传感器中一些关键参数的信号水平、格式等设置不同,跨传感器比较或为未来的传感器设计建立标准变得困难,因此,Hu 等^[14]提出了一种通过多种评判标准来筛选均质区域,并以相同的参考辐射值作为输入,从而实现对不同传感器信噪比评估的方法。

其次,准确的辐射定标是传感器数据质量的重要措施和保障,直接影响所获取的水色遥感参数质

量,从而影响水色产品的精度及可靠性。因此,利用高精度的辐射定标系数进行精确和及时的辐射定标,对获取高质量水色参数及数据产品具有重要作用。目前,已有学者利用陆地和湖泊信息,对 MERSI 传感器辐射定标进行了研究。胡秀清等^[15]利用中国辐射场地定标、可见光星上定标装置(VOC)跟踪仪器响应和基于敦煌沙漠交叉定标这三种定标方法对 FY-3A/MERSI 展开辐射定标分析,得到 MERSI 在轨两年(2008—2009 年和 2009—2010 年)的总衰减率,并采用基于 Terra/MODIS 的交叉定标进行验证。发现:较短波长通道(<500 nm)具有明显的响应衰减,超过 10%;红色和近红外通道(600~900 nm)基本稳定,衰减率低于 2%,同时发现第一年的衰减速率比第二年的衰减速率快。王玲等^[16]使用沙漠及盐湖等多种稳定目标,以 MODIS 波段的反射率为参考值,分析研究了 FY-3C/MERSI 传感器发射一年以来反射太阳波段的辐射定标精度,发现:除蓝光波段和水汽吸收波段以外,其他波段的定标精度变化幅度基本在 5%以内。徐娜等^[17]为解决 FY-3C/MERSI 反射波段非线性响应导致传统两点定标不适用的问题,提出了在轨宽动态综合辐射定标(WD-IVC)方法,即融合不依赖于地面同步测量的多种替代方案,利用各方案选用目标样本亮度不同的特性,实现遥感仪器宽动态范围的辐射定标。该方法适用于大部分反射通道,其结果可以表征宽动态范围的辐射响应特征,定标不确定性较传统的两点法线性定标有明显改善。支丹丹等^[18]为改善 FY-3 系列卫星定标频次低、FY-3A/B/C 辐射定标不统一的问题,采用同一种高精度定标方法,基于同一定标场地对大量遥感历史影像数据进行统一再处理,获得遥感器的真实衰变规律,实现对历史数据的再定标。张允祥等^[19]基于青海辐射校正场对 FY-3D/MERSI II 传感器的热红外波段进行在轨辐射定标,并利用国际公认精度的 Aqua/MODIS 与 NPP/VIIRS 观测数据对在轨定标方法进行精度检验,结果表明基于青海湖辐射校准场的在轨辐射定标精度优于 1.0 K,满足 FY-3D/MERSI II 传感器在轨定标精度需求。Chen 等^[20]利用 VIIRS 和 MERSI II 四大洋 35 景遥感影像开发了一种交叉校准算法,对 MERSI II 数据进行校正,并使用 11 幅全球海洋图像进行评估。结果显示,该算法可提供校正良好的 MERSI II 大气层顶反射率数据,决定系数(R^2)大于 0.89,平均绝对百分比误差(E_{MAPD})在可见波段从 1.13%到

8.37%不等,这表明对于 MERSI II 原始反射率数据辐射定标不完善的情况,通过交叉校准可以提供好的海洋水色产品。

尽管已有学者对 FY-3D/MERSI II 传感器做过不少研究,但针对海洋应用的研究较少。本文首先采用 Hu 等^[14]方法对 MERSI II 信噪比进行评估,以了解该传感器信噪比与其他主流传感器(如 VIIRS)等之间的差异;其次利用目前主流水色传感器 VIIRS 的观测数据作为参照,对比 MERSI II 辐射定标后大气层顶反射率数据的差异,为以后各水色参数反演算法的开发,促进 MERSI II 在海洋中的应用打下基础。

2 研究数据与方法

2.1 卫星数据

本研究对风云 3D(FY-3D)MERSI II 传感器进行数据质量评价,MERSI II 传感器共有 25 个光谱通道,包括 6 个可见光光谱通道、10 个可见光/近红外光谱通道、3 个短波红外波段和 6 个中/长波红外光谱通道,可以探测来自地球大气系统的电磁辐射,实现植被、生态、地表覆盖分类以及积雪覆盖等陆表特性的全球遥感监测。地面分辨率为 250 m(6 个波段)和 1000 m(19 个波段)。250 m 高分辨率图像为识别、提取和分析地表、海表和云层等更多的细节特征提供了便利。MERSI II 太阳反射波段设置信息如表 1 所示。

MERSI II 数据由国家气象卫星中心(<http://www.nsmc.org.cn/newsite/nsmc/Home/Index.html>)提供。本文共选取了两批 MERSI II 数据:

1) 选取了 2018—2019 年 286 景少云遥感影像用于计算信噪比,选取范围是 MERSI II 北太平洋区域(150°E~150°W,15°N~45°N);

2) 选取了共 24 景少云、无云遥感影像进行大气层顶反射率数据比较,数据来自 2019 年 5 月至 12 月的西太平洋区域(130°E~180°E,0°N~45°N),以及 2019 年 1 月至 5 月的中国近岸海域(117°E~128°E,31°N~41°N)。

为了更好地评估和对照 MERSI II 传感器性能,本文选取当前水色遥感领域业务应用广泛的 VIIRS 传感器数据作为参照。VIIRS 传感器包含 22 个光谱波段,可见光、近红外波段 9 个,短、中波红外波段 8 个,热红外波段 4 个,1 个低照度条件下的可见光通道。VIIRS 数据可用来测量云和气溶胶特性、海洋水色、海洋和陆地表面温度、海冰运动和温度、火灾,以及地球反照率。国家极轨道伙伴关系卫星(SNPP)搭载的 VIIRS 传感器波段设置信息如表 2 所示(与

表 1 MERSI II 太阳反射波段设置信息

Table 1 Band setting information of MERSI II in solar reflection band

Channel number	Central wavelength / nm	Spectral bandwidth / nm	Spatial resolution / m
1	470	50	250
2	550	50	250
3	650	50	250
4	865	50	250
5	1380	20/30	1000
6	1640	50	1000
7	2130	50	1000
8	412	20	1000
9	443	20	1000
10	490	20	1000
11	555	20	1000
12	670	20	1000
13	709	20	1000
14	746	20	1000
15	865	20	1000
16	905	20	1000
17	936	20	1000
18	940	50	1000
19	1030	20	1000

表 2 VIIRS 波段设置信息

Table 2 Band setting information of VIIRS

Channel number	Central wavelength / nm	Spectral bandwidth / nm	Spatial resolution / m
M1	410	20	750
M2	443	18	750
M3 (B)	486	10	750
M4 (G)	551	20	750
M5 (B, R)	671	20	750
M6	745	15	750
M7 (G)	862	39	750
M8	1238	20	750
M9	1378	15	750
M10 (R)	1601	60	750
M11	2257	50	750
M12	3700	180	750
M13	4050	160	750
M14	8500	300	750
M15	10763	1000	750
M16	12013	950	750
I1 (B)	640	80	375
I2 (G)	865	30	375
I3 (R)	1610	60	375
I4	3740	380	375
I5	11450	1900	375

JPSS1 VIIRS 略有差异,但此处认为二者波段配置一致),其中与 MERSI II 水色波段相匹配的波段为 M1~M7 以及 M9~M11(对应表 1 中 MERSI II 波段顺序)。

VIIRS 由 oceancolor 官方网站 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 提供。本文共选取了两批 VIIRS 数据,分别作为 MERSI II 信噪比分析和大气层顶反射率数据比较的参考值:

1) 选取了 2018—2019 年 613 景少云遥感影像用于计算信噪比,选取范围是 VIIRS 北太平洋区域

(150°E~150°W,15°N~45°N);

2) 选取了与 MERSI II 准实时匹配的共 24 景少云、无云遥感影像进行大气层顶反射率数据比较,数据来自 Suomi-NPP/ JPSS1 VIIRS 2019 年 5 月至 12 月的西太平洋区域(130°E~180°E,0°N~45°N),以及 2019 年 1 月至 5 月的中国近岸海域(117°E~128°E,31°N~41°N),匹配信息见表 3。西太平洋区域 MERSI II 与 VIIRS 准实时匹配遥感影像时间窗口为±25 min,中国近岸海域相匹配遥感影像时间窗口为±1 h。

表 3 MERSI II 和 VIIRS 西太平洋、中国近岸区域准实时匹配图像信息

Table 3 Quasi-real-time matching image information of MERSI II and VIIRS in the Western Pacific and China coastal water

Western Pacific			China coastal		
No.	Date	Latitude and longitude in the lower left corner	No.	Date	Latitude and longitude in the lower left corner
1	23 Mar. 2019*	11.2°N, 135.4°E(M) 10.7°N, 131.8°E(V)	13	16 Feb. 2019	34.7°N, 105.3°E(M) 32.3°N, 89.9°E(V)
2	30 May 2019*	15.6°N, 130.0°E(M) 7.0°N, 127.1°E(V)	14	21 Feb. 2019	33.0°N, 105.3°E(M) 31.3°N, 89.3°E(V)
3	10 Jun. 2019*	14.7°N, 157.8°E(M) 6.7°N, 154.2°E(V)	15	13 Mar. 2019	27.4°N, 98.0°E(M) 27.4°N, 86.4°E(V)
4	23 Aug. 2019	15.9°N, 157.2°E(M) 12.6°N, 160.8°E(V)	16	17 Mar. 2019	25.8°N, 97.7°E(M) 21.3°N, 109.9°E(V)
5	31 Aug. 2019	23.3°N, 166.3°E(M) 21.7°N, 168.1°E(V)	17	22 Mar. 2019	23.1°N, 104.2°E(M) 20.3°N, 109.0°E(V)
6	06 Sep. 2019	19.1°N, 172.1°E(M) 24.0°N, 169.8°E(V)	18	25 Mar. 2019	22.5°N, 97.1°E(M) 32.3°N, 88.3°E(V)
7	04 Oct. 2019	10.4°N, 133.0°E(M) 12.0°N, 132.5°E(V)	19	01 Apr. 2019	30.5°N, 98.4°E(M) 18.4°N, 107.0°E(V)
8	30 Oct. 2019	5.4°N, 158.3°E(M) 8.5°N, 156.4°E(V)	20	03 Apr. 2019	27.9°N, 105.1°E(M) 27.1°N, 85.1°E(V)
9	18 Nov. 2019	2.2°N, 149.2°E(M) 0.6°N, 148.3°E(V)	21	20 May 2019*	30.1°N, 91.1°E(M) 30.9°N, 90.1°E(V)
10	27 Dec. 2019	10.7°N, 130.4°E(M) 9.6°N, 127.3°E(V)	22	21 May 2019	24.8°N, 104.4°E(M) 24.3°N, 112.6°E(V)
11	28 Dec. 2019	13.1°N, 159.5°E(M) 11.4°N, 156.6°E(V)	23	29 May 2019*	27.9°N, 96.2°E(M) 25.5°N, 86.7°E(V)
12	29 Dec. 2019	10.4°N, 165.5°E(M) 15.0°N, 159.6°E(V)	24	31 May 2019	24.7°N, 93.3°E(M) 21.7°N, 111.2°E(V)

Note: "*" represents JPSS1, otherwise SNPP. "M" and "V" represent MERSI II and VIIRS, respectively.

2.2 数据预处理

MERSI II 包含 1000 m 和 250 m 分辨率数据。本研究只考虑 1000 m 分辨率数据且不考虑由 250 m 合成的 1000 m 数据。MERSI II L1A 的 1 km 水色波段数据包含各波段的遥感影像像元亮度值(DN,物理量符号为 ξ_{DN} ,其有效值范围为 0 至 4095)、定标系数、大气层顶太阳辐射常数等。对应

的 1 km _GEO 数据中包含海陆掩模产品(LandSeaMask),其中像元值为 1 对应陆地,其余为水体,包括浅层海水、深层海水及内陆水等。本研究通过 DN 值和定标系数等参数可得大气层顶反射率 ρ_t ,具体表达式为

$$\rho_{t,\lambda} = (c_{2,\lambda}\xi_{DN,\lambda}^2 + c_{1,\lambda}\xi_{DN,\lambda} + c_{0,\lambda}) \times D_{es}^2 / \cos S_{ZA}, \quad (1)$$

式中: $\rho_{i,\lambda}$ 为各波段大气层顶反射率; $c_{0,\lambda}$ 、 $c_{1,\lambda}$ 、 $c_{2,\lambda}$ 为各波段的定标系数; λ 为波段; D_{es} 为太阳地球距离比; S_{ZA} 为太阳天顶角。

VIIRS 数据包括 L1A 数据及对应的 GEO 数据, 本研究利用 SesDAS(7.5.3 版本) 软件对数据进行处理, 得到每个像元的大气层顶辐亮度(L_t)、大气层顶反射率(ρ_t)、叶绿素 a 浓度、太阳天顶角、质量控制标记等数据。

2.3 信噪比评估

信噪比能够很好地反映传感器的数据质量, 高水平的信噪比对应低水平的数据噪声, 这意味着传感器可以识别出因水体组分改变而引起的微弱信号的变化, 保证了相应卫星产品的质量; 反之, 信噪比越低, 数据噪声水平就越高, 导致相对应的卫星产品具有较高的不确定性^[21]。

只有在信号变化微弱的均质区域才能准确地评估信噪比^[21-22], 因此, 本研究利用 MERSI II (286 景) 北太平洋区域的 L_t 数据, 采用 Hu 等^[14] 提出的信噪比评估方法, 通过 MATLAB 2018a 编程实现了对 MERSI II 信噪比的计算。同时, 采用同样的方法, 利用北太平洋区域的 VIIRS(613 景) 数据计算了 VIIRS 信噪比, 用作参考。详细的计算过程可总结为以下几个步骤:

1) 首先利用质量控制标记对北太平洋区域数据进行云、陆地(所选区域一般不包含陆地)掩模; 太阳天顶角限制在 $45^\circ \pm 1^\circ$ 范围内; 叶绿素 a 质量浓度设置为 $< 0.07 \text{ mg/m}^3$, 因为质量浓度为 0.07 mg/m^3 的叶绿素 a 浓度值是界定贫营养海域的阈值^[23]; 利用典型辐射值($L_{t\text{-typical}}$) 作为限制条件对 L_t 数据进行筛选, $L_{t\text{-typical}}$ 值是由 Hu 等^[14] 利用 255 景 MODIS/Aqua 影像数据来得到的。由于不同传感器的波段设置不同, 本研究对波段差为 10 nm 之内的波段进行匹配, 采用相对应 MODIS 波段的 $L_{t\text{-typical}}$ 值作为该波段的限制条件。

2) 为了进一步确保研究区域的均质性, 尽量减少海洋或大气变化带来的影响, 使水体信号变化均由传感器噪声造成, 通过设置各波段 3×3 窗口的阈值(根据窗口内最大/最小值来确定) 对清水像素进行进一步筛选, 来去除超过/低于该阈值的窗口。各波段 3×3 窗口及阈值的设置方法见文献^[14]。

3) 计算经前两个步骤筛选后 3×3 窗口的平均值与标准差, 窗口的信噪比由均值比标准差之比得到, 最后将所有窗口的信噪比平均值作为所评估传感器的信噪比, 表达式为

$$R_{SN} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_{i,\text{mean}}}{L_{i,\text{std}}}, \quad (2)$$

式中, R_{SN} 为所评估传感器的信噪比; N 为 3×3 窗口的个数; $L_{i,\text{mean}}$ 和 $L_{i,\text{std}}$ 为第 i 个 3×3 窗口的平均值与标准差。

上述过程介绍了计算信噪比所需的限制条件: 质量控制标记、太阳天顶角、叶绿素 a 浓度和 $L_{t\text{-typical}}$, 但 MERSI II 没有叶绿素 a 浓度产品, 且没有质量控制标记, 故无法进行云、陆地等的掩模。为确保研究区域的均质性, 本研究根据云区及叶绿素 a 含量相对较高区域在近红外波段存在反射峰这一光谱特征, 利用近红外波段挑选出叶绿素 a 浓度低且无云的像素作为有效像素。由于 MERSI II 与 VIIRS 的中心波长及光谱带宽设置较为接近, 且 VIIRS 包含计算信噪比所需的所有条件, 本研究首先基于 VIIRS 大气层顶辐亮度(L_t) 数据采用 Hu 等方法设置各波段 3×3 窗口的阈值, 计算出信噪比, 并以 VIIRS 为参考数据, 设置近红外波段这一限制条件。为了保证数据数量并尽可能筛选出叶绿素 a 浓度低值像素, 近红外波段条件设置如下。

1) 分别选取 VIIRS 大气层顶反射率(ρ_t) 在近红外波段(862 nm) 从小到大排列前 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10% 的数据所对应的像素为有效像素。

2) 结合太阳天顶角和 $L_{t\text{-typical}}$ 条件对 L_t 数据进行筛选, 随机选取筛选后的 20 景遥感影像, 根据 3×3 窗口的信噪比(平均值/标准差) 随最大/最小比值的确定各波段阈值。

3) 将结合各个近红外波段条件所得到的阈值与基于 VIIRS 采用 Hu 等方法得到的阈值进行比较, 得出: 选取近红外波段大气层顶反射率从小到大排列前 8% 所对应的像素来设置 3×3 窗口的阈值与采用 Hu 等方法得到的阈值最为接近。所以本研究以 MERSI II 近红外波段(865 nm) 大气层顶反射率从小到大排列前 8% 所对应的像素为有效像素, 结合太阳天顶角和 $L_{t\text{-typical}}$ 条件对数据进行筛选, 以此来确定各波段 3×3 窗口阈值并计算各波段的信噪比。由于 MODIS、VIIRS 以及 MERSI II 的中心波长设置不同, 本研究只考虑与 MODIS 波长差在 10 nm 之内的 VIIRS、MERSI II 波段, 该波段的 $L_{t\text{-typical}}$ 值为对应 MODIS 波段的 $L_{t\text{-typical}}$ 值。与 MODIS 中心波长差在 50 nm 之内的波段则通过插值得到该波段的 $L_{t\text{-typical}}$ 。由于 MERSI II 中心波长为 709, 905, 936, 940, 1030 nm 的波段与 MODIS 波段中心波长的设置不同, 通过插值得到的 $L_{t\text{-typical}}$ 值

与实际遥感数据大小存在差异,利用插值出的结果对数据进行筛选,会掩模掉有效像元,减少数据量,所以本研究不考虑这些波段。

2.4 大气层顶反射率(ρ_i)数据比较

卫星数据的质量直接影响卫星产品的精度,而辐射定标的精度又决定了卫星数据的质量。大气层顶反射率,作为辐射定标的结果之一,可以作为反映传感器数据质量的指标之一。考虑到 VIIRS 是当前使用最广的水色遥感传感器之一,其数据在全球范围得到大量成功的应用。本研究以 VIIRS 为参照,对 MERSI II 大气层顶反射率数据进行比较。

本研究采用西太平洋区域($130^\circ\text{E}\sim 180^\circ\text{E}$, $0^\circ\text{N}\sim 45^\circ\text{N}$)及中国近岸海域($117^\circ\text{E}\sim 128^\circ\text{E}$, $31^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$)各 12 景遥感影像数据,以 VIIRS 大气层顶反射率数据(ρ_i)为参考值,对 MERSI II ρ_i 数据进行分析,并建立线性回归模型,对 MERSI II ρ_i 数据进行拟合。 ρ_i 数据的对比分析与线性拟合的具体步骤如下:

1) 对与 MERSI II 准实时匹配的 VIIRS 遥感影像进行条带修复,并利用质量控制标记进行云、陆地、耀斑等的掩模,挑选出进行数据评估的高质量像元。

2) 对经步骤 1) 处理过的 VIIRS 数据进行重采样,按照相匹配的 MERSI II 网格经纬度进行插值,得到与 MERSI II 网格数及空间分辨率相同的 VIIRS 数据。

3) 使用 MERSI II 的海陆掩模产品(LandSeaMask)对 MERSI II 及 VIIRS 遥感影像数据进行进一步陆地掩模,并将 MERSI II 与 VIIRS 数据在空间上相对应的格点作为有效格点,其他格点处的值设为 NaN。

4) 由于准实时匹配的 MERSI II 与 VIIRS 遥感影像之间存在时间差,且 MERSI II 数据未经过云掩模处理,故 MERSI II 对应的有效格点中包含云像元。因此,本研究通过设置 MERSI II 近红外波段(746 nm)的阈值对挑选出的有效格点进行云掩模处理,西太平洋区域云掩模阈值设为 0.03,中国近岸区域云掩模阈值设为 0.06。

5) 最终基于 MERSI II 与 VIIRS 相对应的格点数据进行对比分析与线性拟合。线性拟合的回归模型具体形式可表示为

$$y_\lambda = a_\lambda \cdot x_\lambda + b_\lambda, \quad (3)$$

式中, λ 为波段; y 表示 MERSI II ρ_i 数据; x 表示 VIIRS ρ_i 数据; a 和 b 为回归模型的拟合系数。

2.5 精度评价指标

本研究采用了几个指标进行统计分析,包括:决定系数(R^2),均方根误差(E_{RMSE}),平均绝对百分比误差(E_{MAPE})。他们可以从不同的角度显示统计精度,公式定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

$$E_{\text{MAPE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: N 表示样本个数;下标 i 表示第 i 个数据点; x 、 y 表示两个被估计的量(x 为测试集上的真实值, y 为预测值); R^2 表示数据之间的相关性; E_{RMSE} 用以衡量观测值与真值(模拟值)之间的偏差, E_{MAPE} 是以百分比形式对精度进行度量。在本研究中, R^2 由 MATLAB 自带函数 corrcoef 间接得到, E_{RMSE} 和 E_{MAPE} 由(5)式和(6)式编写的代码得到。

3 结果分析

3.1 信噪比评估

MERSI II 及 VIIRS 的信噪比结果及动态范围见表 4。表中: $L_{\text{t-typical}}$ 为 Hu 等^[14] 根据 255 景 MODIS/Aqua 遥感影像得出的结果; $L_{\text{t-MERSI II}}$ 为采用 Hu 等^[14] 计算 $L_{\text{t-typical}}$ 的方法基于 MERSI II 遥感影像数据得到的典型辐射值; $L_{\text{t-tyr}}$ 和 R_{SN}^a 为由国家卫星气象中心提供的 MERSI II 各通道典型辐射值及信噪比的性能要求, R_{SN}^a 一列中括号内的数值为将 $L_{\text{t-tyr}}$ 调整为 $L_{\text{t-typical}}$ 并根据平方根函数得到的信噪比值。从表 4 可以看出:以 $L_{\text{t-typical}}$ 为限制条件,MERSI II 的信噪比值($R_{\text{SN-MERSI II}}$)在可见光波段(412~746 nm)总体上大于 200,且在蓝光波段(412~490 nm)达到最大值,超过 800;在近红外波段(865 nm)的信噪比值相对较低,为 100 左右;在短波红外波段(1640 nm, 2130 nm),信噪比值只有 30 左右。以 $L_{\text{t-MERSI II}}$ 为限制条件得出的信噪比结果($R_{\text{SN-MERSI II}}^*$)相比以 $L_{\text{t-typical}}$ 为限制条件得出的结果,在 412~746 nm 波段偏低(443 nm 除外),在 865 nm 波段相差不大,在 1640 nm 和 2130 nm 波段偏高。从上述分析可以看出,以 $L_{\text{t-typical}}$ 或 $L_{\text{t-MERSI II}}$ 为输入辐射值得到的信噪比结果整体上呈现随波长增加而减小的变化趋势,且在蓝光波段的

结果高于国家卫星气象中心的规格 (R_{SN}^a)。假设信噪比与输入辐亮度的平方根成正比^[14], 将输入辐亮度从 L_{t-typ} 调整为 $L_{t-typical}$ 后, 得到 R_{SN}^a 一列中括号内的信噪比值。从表 4 可以看出, 在 412~555 nm、2130 nm 波段, MERSI II 信噪比 ($R_{SN-MERSI II}$) 高于 R_{SN}^a 一列中括号内的信噪比值; 在 670~1640 nm 波段, MERSI II 信噪比 ($R_{SN-MERSI II}$) 低于 R_{SN}^a 一列中括号内

的信噪比值。在正常情况下, 由于受大气的影响, 基于卫星数据评估的信噪比应低于发射前的规格, 然而, 本文评估的信噪比在蓝光波段高于发射前的规格, Hu 等^[14] 和 Cao 等^[21] 使用类似信噪比评估方法得到的信噪比在部分波段也高于发射前规格, 造成这一现象的原因尚未明确, 但仍可采用此方法来评估传感器信噪比, 并与其他传感器信噪比进行对比^[21]。

表 4 MERSI II 和 VIIRS 各波段信噪比结果

Table 4 Signal-to-noise ratio results of MERSI II and VIIRS

MODIS /Aqua		VIIRS/SNPP		MERSI II /FY-3D					
λ /nm	$L_{t-typical}$	λ /nm	$R_{SN-VIIRS}$	λ /nm	$R_{SN-MERSI II}$	$L_{t-MERSI II}$	$R_{SN-MERSI II}^*$	L_{t-typ}	R_{SN}^a
412	8.07	410	1362.4 ± 212.1	412	915.5 ± 98.5	6.19	907.3	4.49	300 (402)
443	6.98	443	1359.1 ± 204.1	443	818 ± 96.1	6.01	827.9	4.19	300 (387)
488	5.23	486	1365.1 ± 212.5	490	813.4 ± 90.7	4.62	780.9	3.21	300 (383)
555	2.85	551	1107.2 ± 150.1	555	484.5 ± 60.1	2.44	461.6	3.68	500 (440)
667	1.27	671	625.9 ± 61.7	670	257.4 ± 27.5	1.05	246.6	2.78	500 (338)
748	0.75	745	431.7 ± 40.9	746	192.7 ± 18.5	0.62	177.3	2.4	500 (280)
869	0.41	862	300.7 ± 25.7	865	99.6 ± 22.6	0.33	100.7	1.78	500 (240)
1640	0.031	1601	27.3 ± 3.4	1640	28.3 ± 2.6	0.1	36.6	0.73	200 (41)
2130	0.008	2257	—	2130	29.9 ± 2.1	0.049	40.4	0.12	100 (26)

图 1 为采用同种方法, VIIRS 和 MERSI II 信噪比值以及 MERSI II 在不同输入辐射值下的信噪比结果。从图中可以看出, 以 $L_{t-typical}$ 为限制条件, VIIRS 的信噪比在可见光和近红外波段高于 MERSI II 的信噪比, 在短波红外波段的 MERSI II 信噪比略高于 VIIRS 信噪比, 但二者相差不大, 均约为 30。基于 MERSI II 数据以 $L_{t-typical}$ 为限制条

件算出的信噪比 ($R_{SN-MERSI II}$ 曲线) 与以 $L_{t-MERSI II}$ 为限制条件算出的信噪比 ($R_{SN-MERSI II}^*$ 曲线) 整体上差别不大。总体来看, MERSI II 在可见光波段的信噪比相对较高, 与 VIIRS 信噪比水平相差不大; 在短波红外波段略高于 VIIRS 在短波红外波段的信噪比。

3.2 大气层顶反射率 (ρ_t) 数据比较

3.2.1 西太平洋区域

为评估西太平洋区域(一类水体) MERSI II 大气层顶反射率 (ρ_t) 数据质量, 本研究选取了 MERSI II 西太平洋区域 12 景遥感影像作为输入值, 以同区域准实时匹配的 12 景 VIIRS 大气层顶反射率数据为参考值进行分析。以 2019 年 3 月 23 日为例, 遥感影像覆盖范围及真彩图如图 2 所示。

图 3 为 2019 年 3 月 23 日遥感影像各波段的散点密度图, 共匹配 578061 个有效像元。散点密度可通过各区间内散点数与区间长度之比得到。从散点

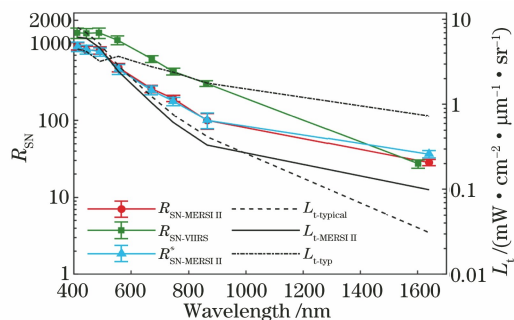


图 1 MERSI II 和 VIIRS 各波段信噪比结果

Fig. 1 Signal-to-noise ratio results of MERSI II and VIIRS

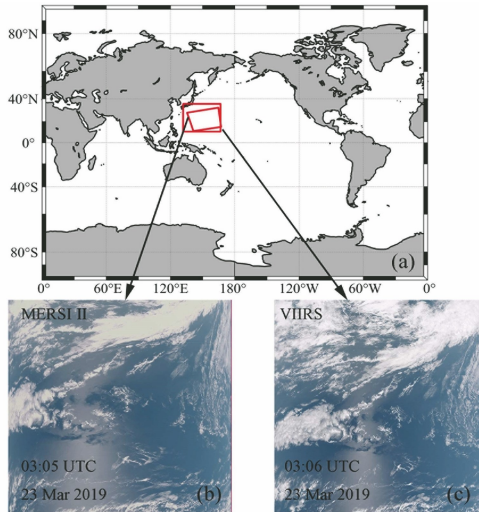


图 2 2019 年 3 月 23 日 MERSI II 和 VIIRS 遥感影像真彩图。(a) 遥感影像覆盖范围;(b) MERSI II 真彩图;(c) VIIRS 真彩图

Fig. 2 True-color red-green-blue composite image from MERSI II and VIIRS on March 23, 2019. (a) Image coverage; (b) MERSI II RGB composite image; (c) VIIRS RGB composite image

密度图中可以看出,412,443,490,555 nm 波段散点分布较为集中,但高值区散点略低于 1:1 线;670,

746,865 nm 波段 MERSI II 与 VIIRS 部分数据数值差异相对较大,散点分布较为发散,密度中心略高于 1:1 线。412 nm 波段和 443 nm 波段决定系数 R^2 分别达到了 0.966 和 0.949,平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 小于 10%。490 nm 波段和 555 nm 波段 R^2 分别为 0.881 和 0.794, E_{MAPE} 为 7.861% 和 4.172%。670,746,865 nm 波段 R^2 为 0.5~0.6 左右, E_{MAPE} 为 5%~15% 左右。

通过上述分析,以 VIIRS 作为参考值, MERSI II 数据与 VIIRS 数据存在一定差异,散点没有集中分布在 1:1 线附近。通过对两种数据进行线性拟合,可提高 MERSI II 与 VIIRS 数据的一致性。对 2019 年 3 月 23 日 MERSI II 数据进行线性拟合,拟合后的结果如图 4 所示。从图中可以看出,与线性拟合前相比,可见光波段低值区散点分布变化不大,高值区提升效果较明显,平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 降至 10% 以下,412,443,490,555 nm 波段的 E_{MAPE} 分别从 8.509%, 7.919%, 7.861%, 4.172% 降至 1.338%, 1.612%, 2.442%, 3.841%。670,746,865 nm 波段的 E_{MAPE} 从 6%~14% 降至 6%~8% 左右。综上,线性拟合后的 MERSI II

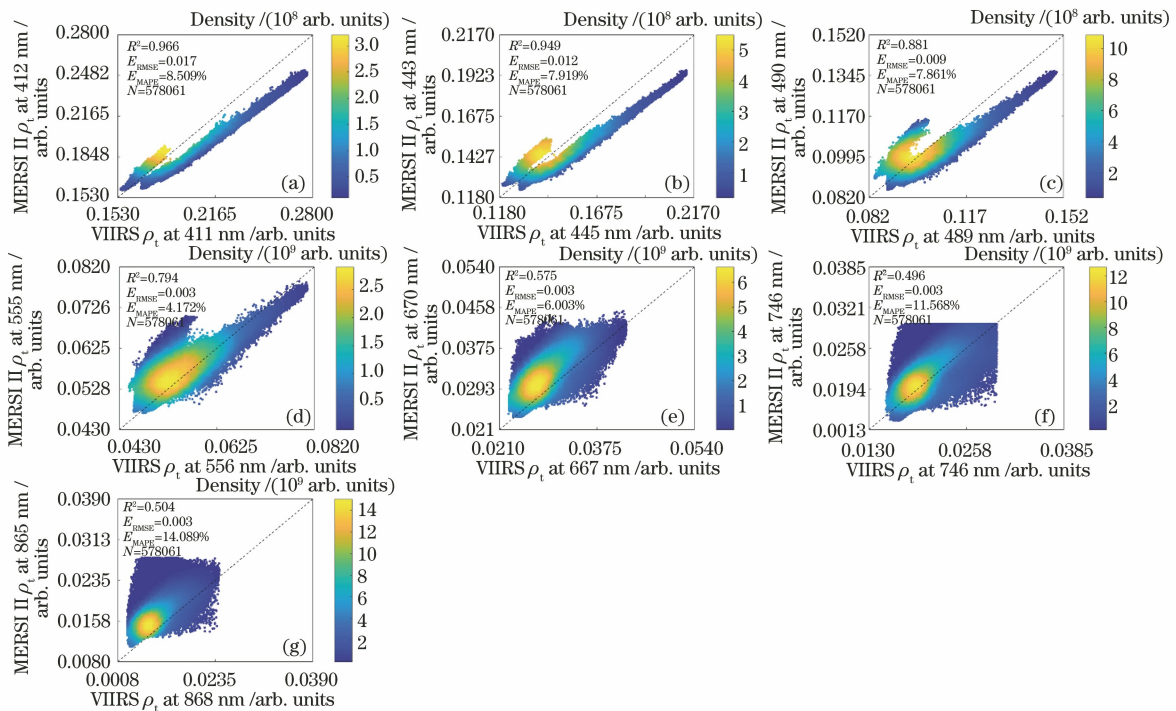


图 3 2019 年 3 月 23 日 MERSI II 与 VIIRS ρ_t 数据散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 3 Scatter density diagrams from MERSI II and VIIRS ρ_t data on March 23, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

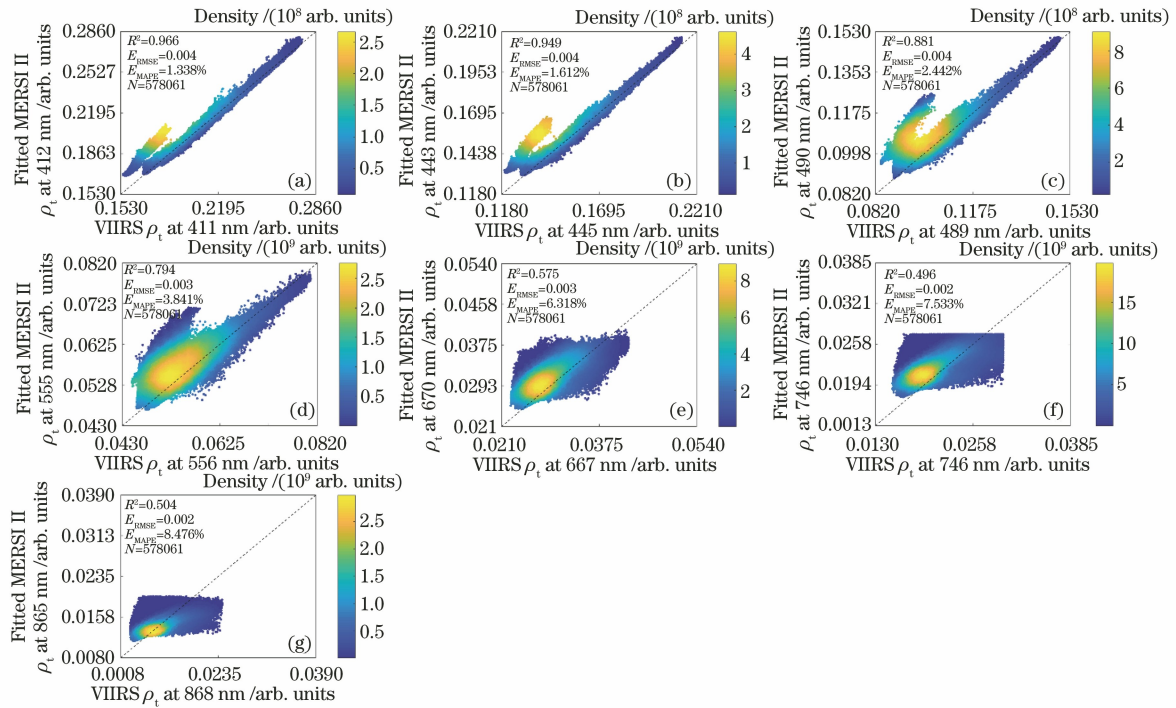


图 4 2019 年 3 月 23 日 MERSI II ρ_t 数据线性拟合后与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段；(b) 443 nm 波段；(c) 490 nm 波段；(d) 555 nm 波段；(e) 670 nm 波段；(f) 746 nm 波段；(g) 865 nm 波段

Fig. 4 Scatter density diagrams from MERSI II linear fitted ρ_t data and VIIRS ρ_t data on March 23, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

ρ_t 数据与 VIIRS ρ_t 数据的一致性有所提升,在可见光波段拟合效果相对较好。

12 景 MERSI II 遥感影像 ρ_t 数据的线性拟合系数如图 5 所示。图中, x 轴代表不同景遥感影像,左 y 轴为拟合系数 a 的波动范围,右 y 轴为拟合系数 b 的波动范围。从图中可以看出,412,443,490,555 nm 波段的拟合系数 a 、 b 随不同遥感影像的变化较大;670,746,865 nm 波段的拟合系数 a 随遥感影像的变化较大,拟合系数 b 变化较小。综上,各波段拟合系数对于不同匹配影像有明显的不同。

12 景 MERSI II 遥感影像 ρ_t 数据线性拟合前后与 VIIRS ρ_t 数据的 E_{MAPE} 变化情况如图 6 所示。从图中可以看出,12 景遥感影像 ρ_t 数据整体上线性拟合后 E_{MAPE} 明显降低,基本在 25% 以下,大多数可达 10% 以下,这表明拟合后的 MERSI II ρ_t 数据与 VIIRS ρ_t 数据有更好的一致性。部分遥感影像的个别波段,如第 1 景遥感影像 555 nm 和 670 nm 波段,第 10 景遥感影像 670 nm 波段,第 11 景遥感影像 555 nm 波段,第 12 景遥感影像 490 nm 和 555 nm 波段, E_{MAPE} 线性拟合前后变化不大甚至高于拟合前的 E_{MAPE} 。这种 E_{MAPE} 的变化差异主要与各匹配遥感影像中的云、耀斑污染以及

匹配时间差等有关。

3.2.2 中国近岸海域

为评估中国近岸海域(二类水体)MERSI II 大气层顶反射率数据质量,本研究选取 12 景 MERSI II 遥感影像作为输入值,以准实时匹配的 12 景 VIIRS 遥感影像数据为参考值进行分析。以 2019 年 5 月 29 日遥感影像为例,图 7 给出 MERSI II 与 VIIRS 各波段的散点密度图,有效像元个数为 48871。从图中可以看出,各波段散点分布都较为集中,决定系数 R^2 在 0.7 以上,平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 在 30% 以下。412,443,490 nm 波段决定系数 R^2 在 0.9 以上,但整体明显低于 1:1 线。555 nm 波段散点分布在 1:1 线附近,决定系数 R^2 达到 0.966,平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 为 11.912%。670,746,865 nm 波段 R^2 分别为 0.889,0.804,0.701; E_{MAPE} 分别为 23.288%,17.168%,7.547%。

2019 年 5 月 29 日经过线性拟合后的 MERSI II ρ_t 数据与相匹配的 VIIRS ρ_t 数据各波段的散点密度如图 8 所示。从图 8 可以看出,经过线性拟合后的 MERSI II 数据整体上分布在 1:1 线附近, E_{MAPE} 从拟合前的 30% 左右降至 7% 以下。

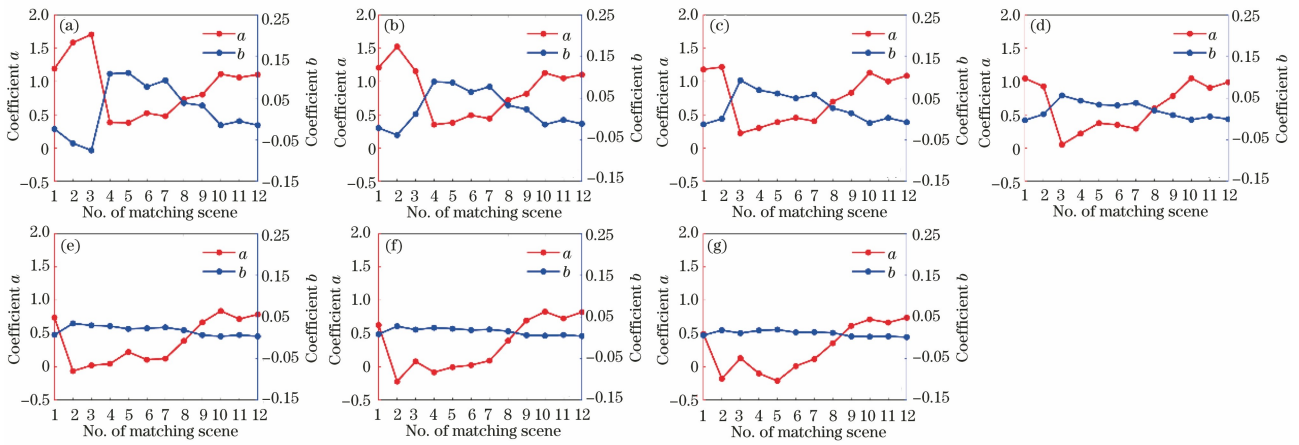


图 5 2019 年 3 月 23 日各波段的线性拟合系数随 12 景遥感影像的变化。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;
(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 5 Variation of fitting coefficient with 12 scenes remote sensing images on March 23, 2019. (a) At 412 nm waveband;
(b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at
746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

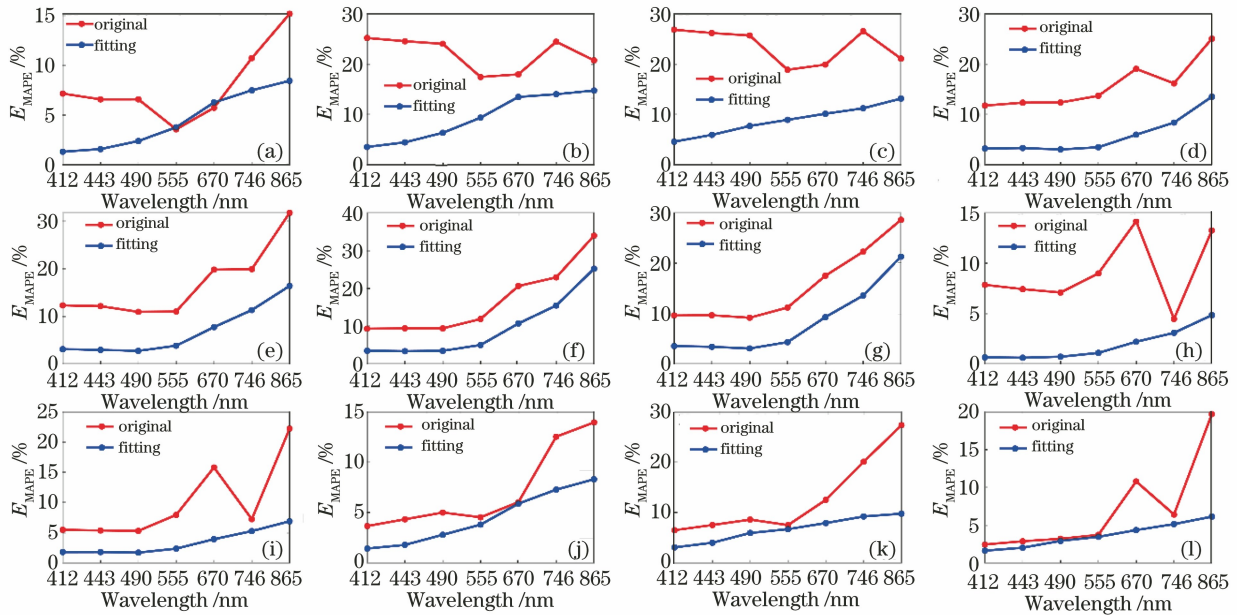


图 6 2019 年 3 月 23 日不同遥感影像下 MERSI II ρ_t 数据线性拟合前后与 VIIRS 数据 E_{MAPE} 的变化。(a) 第 1 景;(b) 第 2 景;
(c) 第 3 景;(d) 第 4 景;(e) 第 5 景;(f) 第 6 景;(g) 第 7 景;(h) 第 8 景;(i) 第 9 景;(j) 第 10 景;(k) 第 11 景;(l) 第 12 景

Fig. 6 E_{MAPE} changes between MERSI II ρ_t data before and after linear fitting and VIIRS ρ_t data at different remote sensing
images on March 23, 2019. (a) 1st matching scene; (b) 2nd matching scene; (c) 3rd matching scene; (d) 4th
matching scene; (e) 5th matching scene; (f) 6th matching scene; (g) 7th matching scene; (h) 8th matching scene;
(i) 9th matching scene; (j) 10th matching scene; (k) 11th matching scene; (l) 12th matching scene

412, 443, 490 nm 波段的拟合效果较为明显, E_{MAPE} 分别下降至 1.031%, 1.105%, 1.619%。555 nm 波段的低值区散点也从 1:1 线以下移至 1:1 线附近, E_{MAPE} 从 11.912% 降至 1.975%。670 nm 波段整体也从 1:1 线附近以下移至 1:1 线附近, E_{MAPE} 从 23.288% 降至 3.38%。746 nm 和 865 nm 波段的 E_{MAPE} 也明显下降, 从 17.168% 和 7.547% 分别降

至 4.486% 和 6.872%。

12 景遥感影像 MERSI II ρ_t 数据线性拟合前后与 VIIRS ρ_t 数据的 E_{MAPE} 变化情况如图 9 所示。从图中可以看出, 12 景遥感影像 ρ_t 数据整体上线性拟合后 E_{MAPE} 明显降低, 基本在 20% 以下, 这表明拟合后的 MERSI II ρ_t 数据与 VIIRS ρ_t 数据有更好的一致性。个别遥感影像的 E_{MAPE} 降至 5%

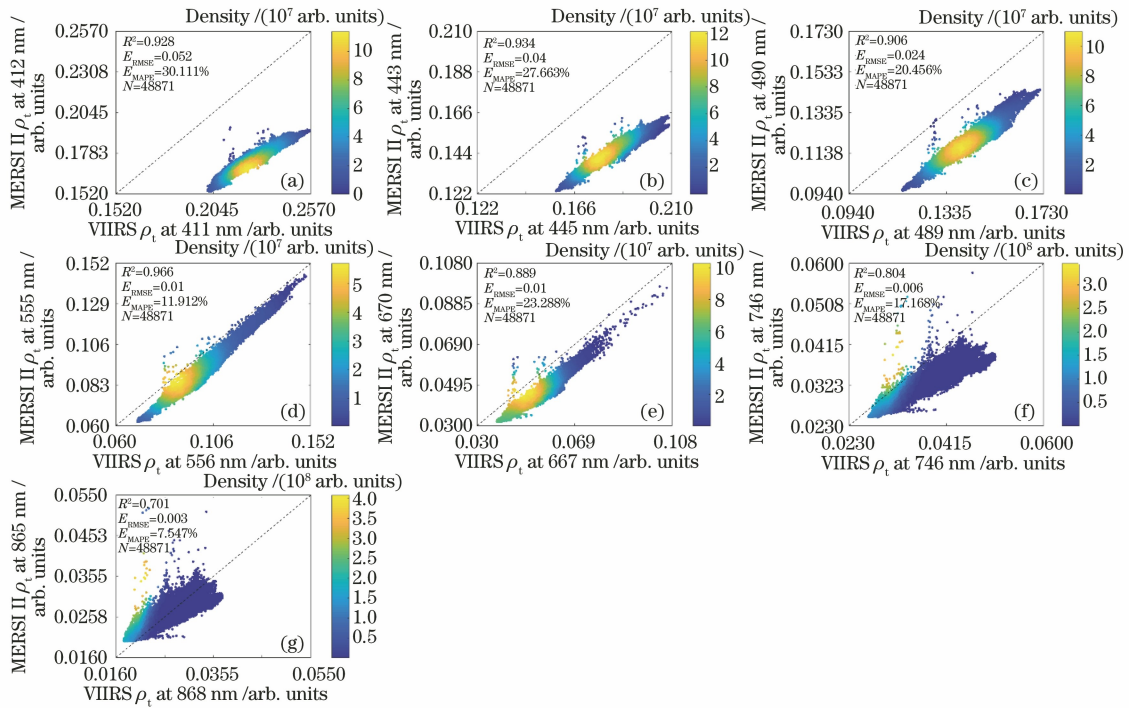


图 7 2019 年 5 月 29 日 MERSI II 与 VIIRS ρ_t 数据散点密度图。(a) 412 nm 波段; (b) 443 nm 波段; (c) 490 nm 波段; (d) 555 nm 波段; (e) 670 nm 波段; (f) 746 nm 波段; (g) 865 nm 波段

Fig. 7 Scatter density diagrams from MERSI II and VIIRS ρ_t data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

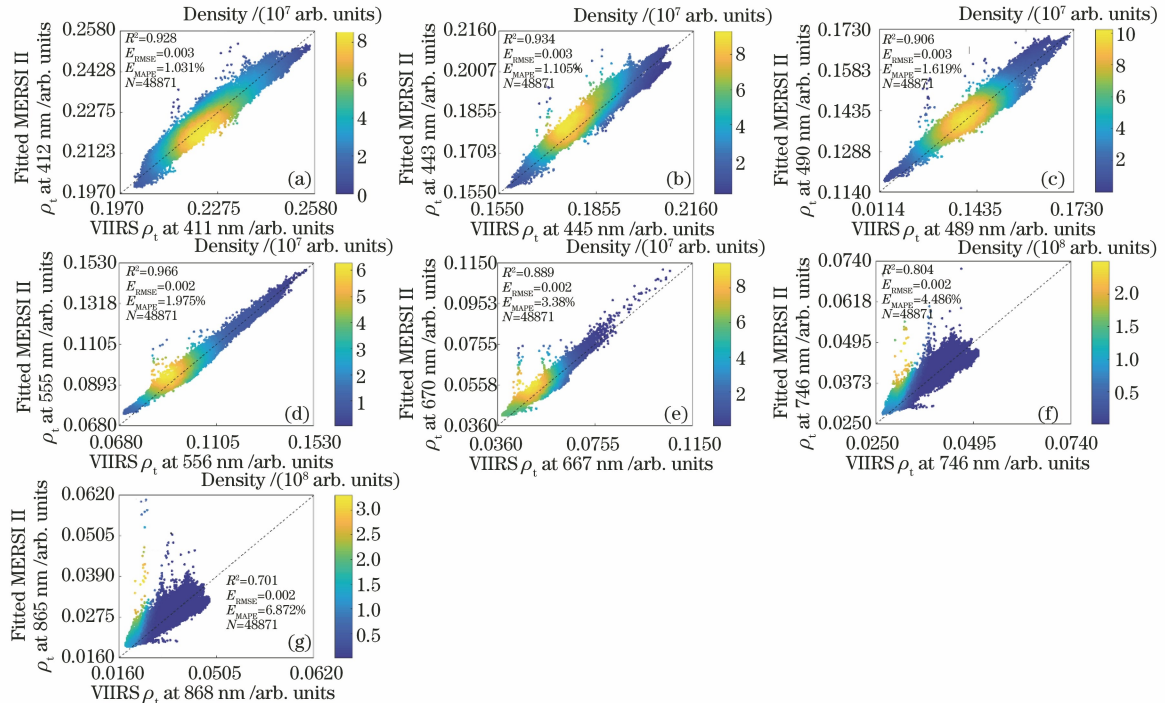


图 8 2019 年 5 月 29 日 MERSI II ρ_t 数据线性拟合后与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段; (b) 443 nm 波段; (c) 490 nm 波段; (d) 555 nm 波段; (e) 670 nm 波段; (f) 746 nm 波段; (g) 865 nm 波段

Fig. 8 Scatter density diagrams from MERSI II linear fitted ρ_t data and VIIRS ρ_t data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

左右,如第 1、8 和 11 景遥感影像线性拟合后 MERSI II ρ_i 数据与 VIIRS ρ_i 数据 E_{MAPE} 均在 5% 左右。部分遥感影像的个别波段,如第 3 景遥感影像 865 nm 波段,第 5 景遥感影像 670 nm 波段,第 9

景遥感影像 490 nm 波段,第 11 景遥感影像 865 nm 波段, E_{MAPE} 线性拟合前后变化不大甚至略高于拟合前的 E_{MAPE} 。

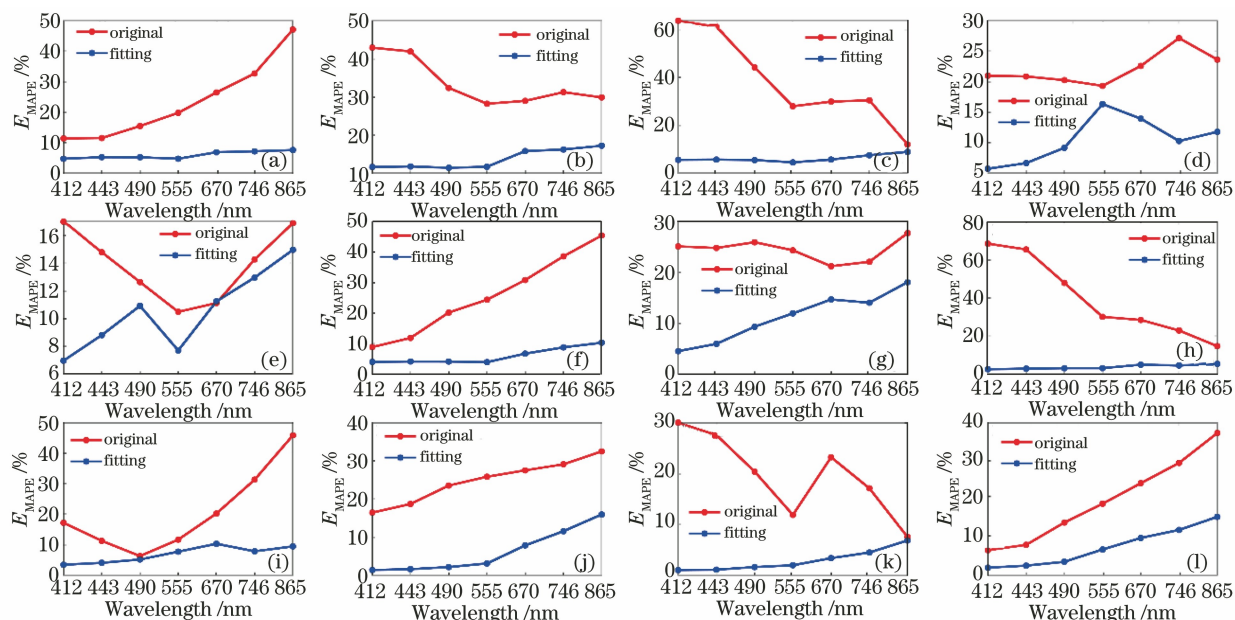


图 9 2019 年 5 月 29 日不同遥感影像下 MERSI II ρ_i 数据线性拟合前后与 VIIRS 数据 E_{MAPE} 的变化。(a)第 1 景;(b)第 2 景;(c)第 3 景;(d)第 4 景;(e)第 5 景;(f)第 6 景;(g)第 7 景;(h)第 8 景;(i)第 9 景;(j)第 10 景;(k)第 11 景;(l)第 12 景
Fig. 9 E_{MAPE} changes between MERSI II ρ_i data before and after linear fitting and VIIRS ρ_i data at different remote sensing images on May 29, 2019. (a) 1st matching scene; (b) 2nd matching scene; (c) 3rd matching scene; (d) 4th matching scene; (e) 5th matching scene; (f) 6th matching scene; (g) 7th matching scene; (h) 8th matching scene; (i) 9th matching scene; (j) 10th matching scene; (k) 11th matching scene; (l) 12th matching scene

为分析研究区域内不同研究范围 MERSI II 大气层顶反射率的数据质量,本研究根据 MERSI II 海陆掩模产品(LandSeaMask)对水体的划分从中国近岸海域中挑选出 3 个小区域进行分析,如图 10 所示。LandSeaMask 数值为 1 的区域代表陆地;数值为 0 的区域代表浅层水体;数值为 6 的区域代表深层水体。Region1 的经纬度范围为:119. 2°E~120. 7°E,38. 3°N~39. 3°N;Region2 的经纬度范围为:120. 5°E~122° E, 34. 5° N~35. 5°N;Region3 的经纬度范围为:123. 2° E~124. 7°E,34. 5°N~35. 5°N。

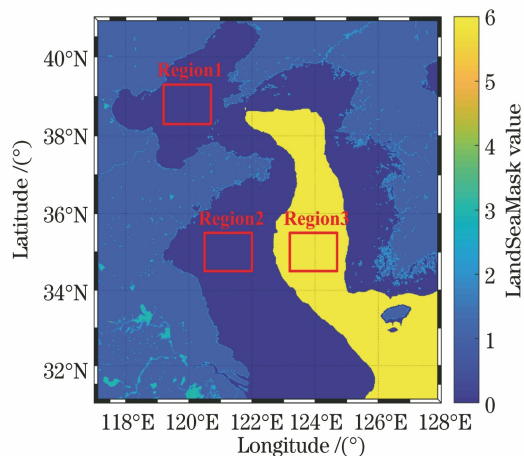


图 10 中国近岸海域 LandSeaMask 分布图

本文以 2019 年 5 月 29 日遥感影像为例,以 MERSI II 准实时匹配的 VIIRS 数据为参考值,对 Region1 区域及 Region2 区域 MERSI II 大气层顶反射率数据进行分析。Region1 散点密度如图 11 所示,有效像元个数为 5417。从图 11 中可以看出,各波段均有两个密度中心,表明数据动态变化范围较大,决定系数 R^2 均在 0.9 以上, E_{MAPE} 小于 30%

左右。412,443,490,555,670,746 nm 波段的散点分布明显低于 1:1 线, E_{MAPE} 在 10%~30% 左右。865 nm 波段散点分布在 1:1 线附近, R^2 为 0.907, E_{MAPE} 为 5.258%。

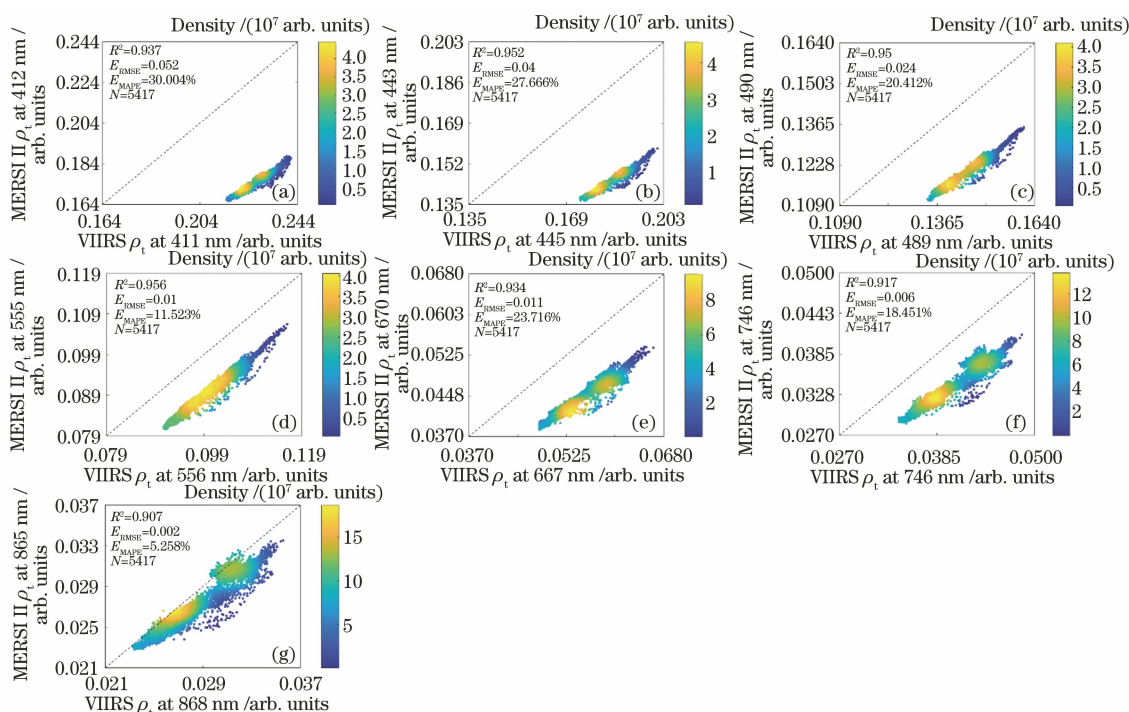


图 11 2019 年 5 月 29 日 Region1 MERSI II ρ_i 数据与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;
(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 11 Scatter density diagrams in Region1 from MERSI II and VIIRS ρ_i data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband;
(b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at
746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

2019 年 5 月 29 日 Region1 区域经过线性拟合后的 MERSI II ρ_i 数据与相匹配的 VIIRS ρ_i 数据各波段的散点密度如图 12 所示。从图 12 可以看出,拟合后的各波段 MERSI II ρ_i 数据与 VIIRS ρ_i 数据一致性较好,各波段散点从集中分布在 1:1 线以下移至 1:1 线附近,平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 降至 2% 左右。412,443,490,555 nm 波段的 E_{MAPE} 从 10% ~ 30% 降至 1% 以下。670 nm 波段和 746 nm 波段的 E_{MAPE} 分别从 23.716% 和 18.451% 降至 1.289% 和 1.775%。865 nm 波段的 E_{MAPE} 从 5.258% 降至 2.227%。

2019 年 5 月 29 日遥感影像 Region2 区域散点密度如图 13 所示,有效像元为 4938 个。从图中可以看出 412,443,746,865 nm 波段有两个密度中心,其余波段有一个密度中心。可见光波段(410~746 nm)的散点分布均低于 1:1 线,865 nm 波段低值区的散点分布在 1:1 线附近,高值区的散点分布在 1:1 线以下。各波段 R^2 均在 0.85 以上, E_{MAPE} 在 32% 以下。412,443,555,746,865 nm 波段的 R^2 达到 0.9 以上。

2019 年 5 月 29 日 Region2 区域经过线性拟合后的 MERSI II ρ_i 数据与相匹配的 VIIRS ρ_i 数据

各波段的散点密度如图 14 所示。从图 14 可以看出,可见光波段(410~746 nm)散点及 865 nm 波段高值区散点分布从拟合前低于 1:1 线移至 1:1 线附近,部分散点分散于 1:1 线以上。412,443,490 nm 波段平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 从 20% ~ 30% 降至 1% 左右。555 nm 波段的 E_{MAPE} 从拟合前的 14.626% 降至 1.763%。670 nm 波段和 746 nm 波段的 E_{MAPE} 分别从拟合前的 26.772% 和 22.19% 降至 1.924% 和 1.868%。865 nm 波段的 E_{MAPE} 从 9.147% 降至 2.703%。

2019 年 3 月 22 日遥感影像 Region3 区域 MERSI II 与 VIIRS 数据散点密度如图 15 所示,有效像元 5827 个。从图 15 中可以看出,各波段决定系数 R^2 在 0.65 以上, E_{MAPE} 小于 25%。412,443,490,555 nm 波段整体高于 1:1 线。670 nm 波段低值区散点略高于 1:1 线,高值区散点略低于 1:1 线。746 nm 波段和 865 nm 波段散点分布在 1:1 线以下。412 nm 波段 R^2 为 0.695, E_{MAPE} 为 19.246%。443 nm 波段 R^2 为 0.871, E_{MAPE} 为 15.263%。490,555,670 nm 波段 R^2 在 0.9 以上,490 nm 波段和 555 nm 波段 R^2 为 0.95 左右, E_{MAPE} 分别为 10.861% 和 6.304%;670 nm 波段 R^2 为 0.902,

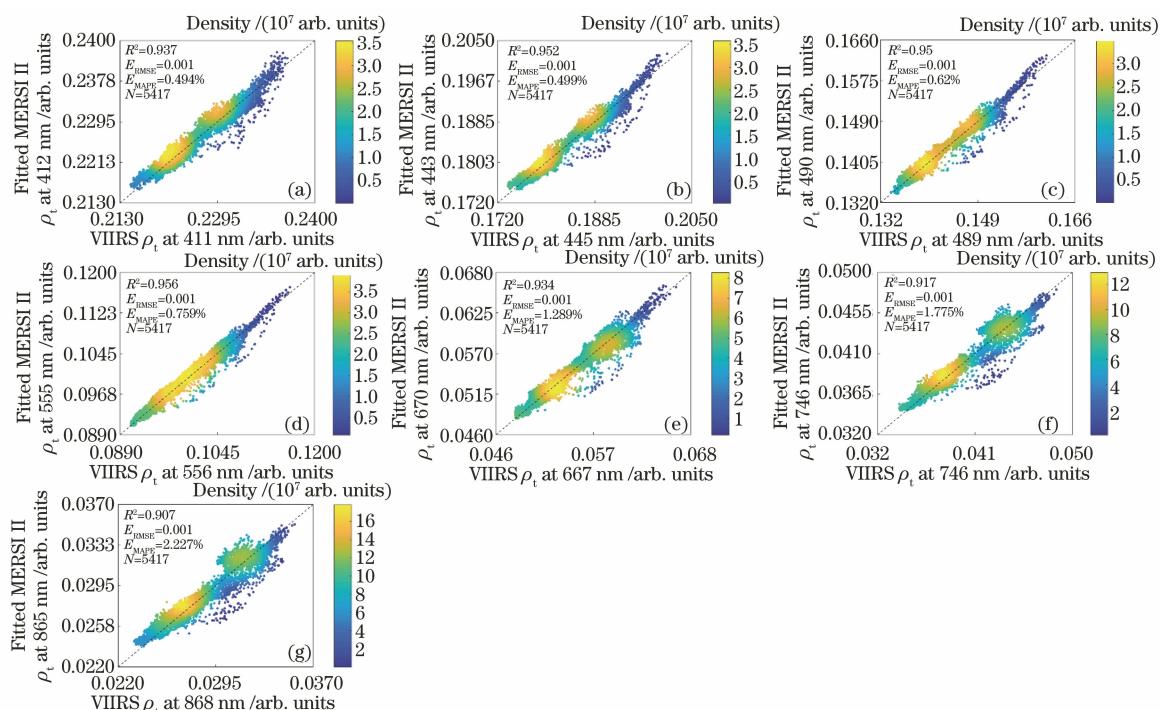


图 12 2019 年 5 月 29 日 Region1 MERSI II ρ_t 数据线性拟合后与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 12 Scatter density diagrams in Region1 from MERSI II linear fitted ρ_t data and VIIRS ρ_t data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

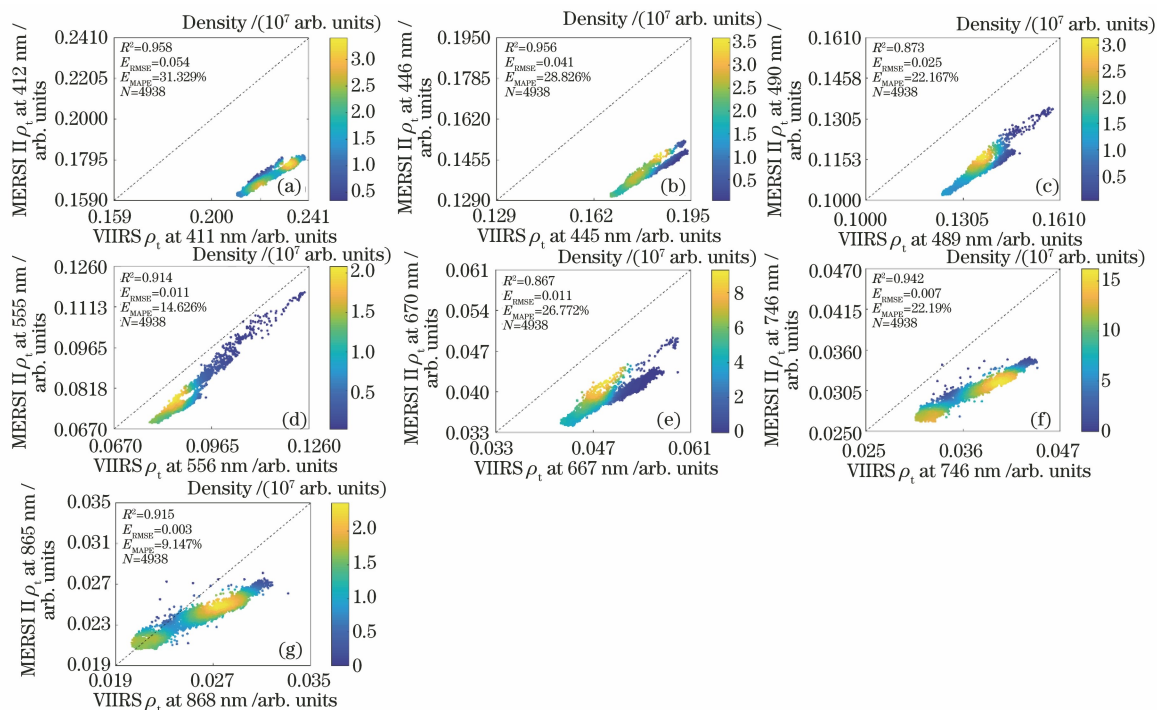


图 13 2019 年 5 月 29 日 Region2 MERSI II ρ_t 数据与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 13 Scatter density diagrams in Region2 from MERSI II and VIIRS ρ_t data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

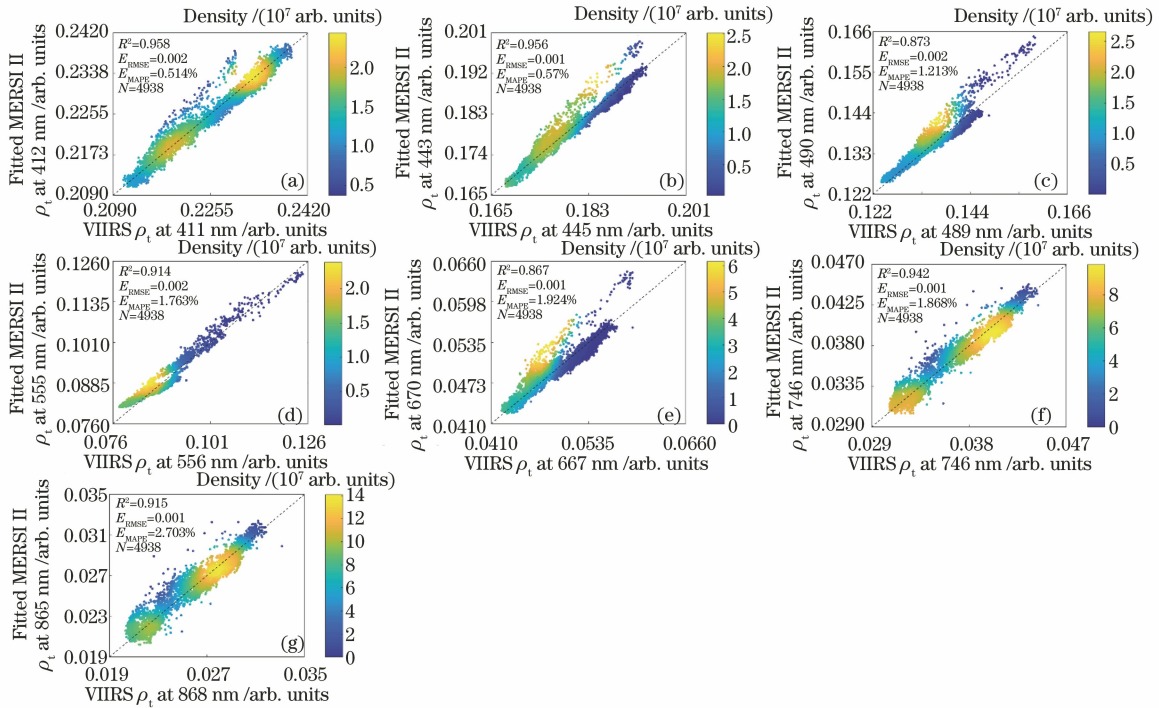


图 14 2019 年 5 月 29 日 Region2 MERSI II ρ_t 数据线性拟合后与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 14 Scatter density diagrams in Region2 from MERSI II linear fitted ρ_t data and VIIRS ρ_t data on May 29, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

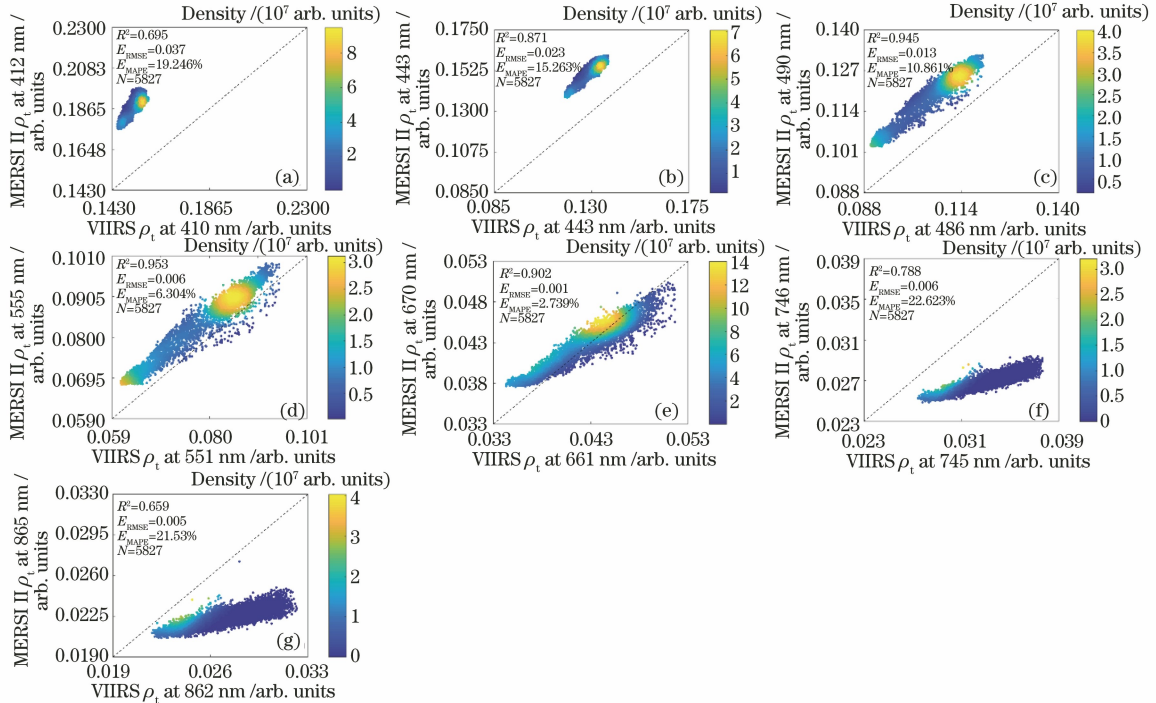


图 15 2019 年 3 月 22 日 Region3 MERSI II ρ_t 数据与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 15 Scatter density diagrams in Region3 from MERSI II and VIIRS ρ_t data on March 22, 2019. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

E_{MAPE} 为 2.739%。746 nm 波段和 865 nm 波段 R^2 分别为 0.788 和 0.659, E_{MAPE} 在 22% 左右。

2019 年 3 月 22 日 Region3 区域经过线性拟合后的 MERSI II ρ_t 数据与相匹配的 VIIRS ρ_t 数据各波段的散点密度如图 16 所示。从图 16 可以看出, 拟合后的各波段散点集中分布在 1:1 线附近, 412, 443, 490 nm 波段散点分布从拟合前高于 1:1 线移至 1:1 线附近, 746 nm 和 865 nm 波段散点分布从拟合前低于 1:1 线移至 1:1 线附近, 这表明线

性拟合效果较好, MERSI II 与 VIIRS ρ_t 数据之间的差异有所减小。412, 746, 865 nm 波段的 E_{MAPE} 从 22% 左右降至 4% 以下。443 nm 波段和 490 nm 波段的 E_{MAPE} 分别从 15.263% 和 10.861% 降至 1.189% 和 1.387%。555 nm 波段和 670 nm 波段的 E_{MAPE} 分别从 6.304% 和 2.739% 降至 1.822% 和 2.178%, 746 nm 波段和 865 nm 波段的 E_{MAPE} 分别为 2.497% 和 3.917%。

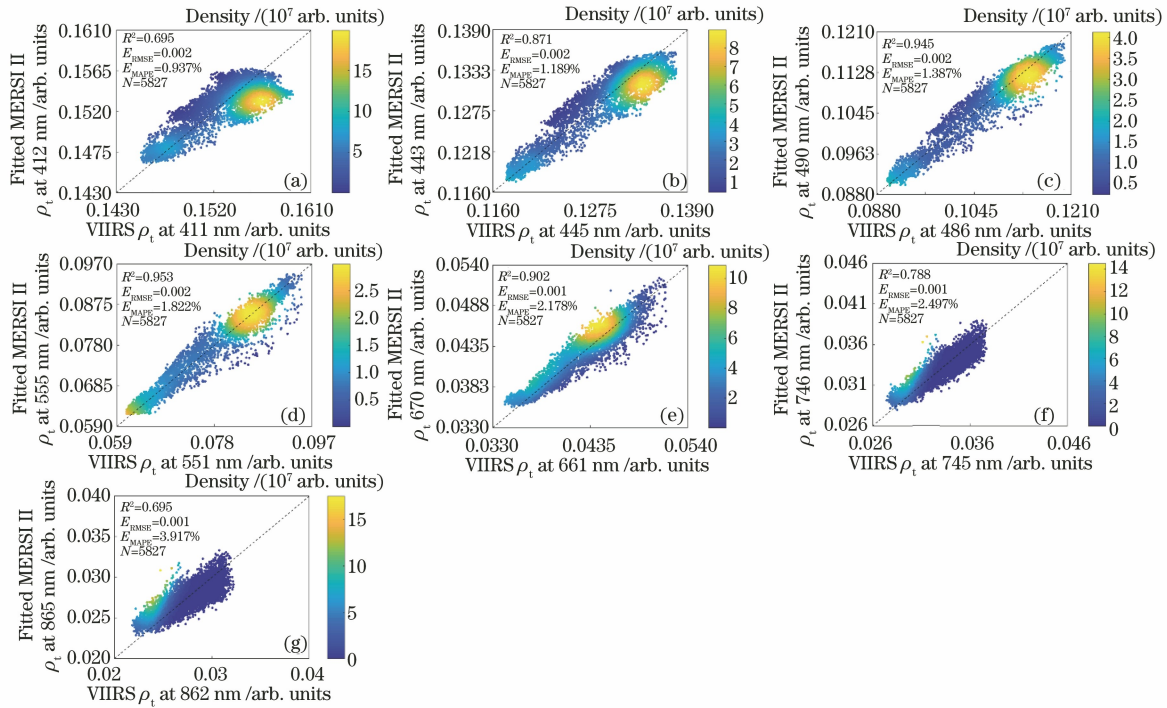


图 16 2019 年 3 月 22 日 Region3 MERSI II ρ_t 数据线性拟合后与 VIIRS 各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;

(b) 443 nm 波段; (c) 490 nm 波段; (d) 555 nm 波段; (e) 670 nm 波段; (f) 746 nm 波段; (g) 865 nm 波段

Fig. 16 Scatter density diagrams in Region3 from MERSI II linear fitted ρ_t data and VIIRS ρ_t data on March 22, 2019.

(a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

4 讨 论

4.1 信噪比评估

信噪比能够很好地反映传感器的辐射性能及衰退情况, 是决定海洋数据产品精度的一个重要参数。通过对传感器信噪比的评估, 我们可以了解到该传感器各波段的信噪比水平, 且水质参数及水色产品的反演离不开大气校正, 而大气校正依赖于近红外波段和短波红外波段, 这些波段的信噪比水平会对大气校正的精度造成影响, 从而影响水色产品, 如叶绿素 a 浓度等的精度。对 MERSI II 信噪比进行评估, 可为该传感器未来的改进及其他传感器的设计提供参考。

采用 Hu 等^[14] 的方法来计算 MERSI II 信噪比: 一是因为该方法以同样的参考辐射值作为输入, 可实现不同传感器信噪比之间的比较, 便于将 MERSI II 信噪比与 VIIRS 的信噪比进行对比, 从而了解该传感器的信噪比水平; 二是因为该方法使用 3×3 窗口最大/最小阈值排除了大气中气溶胶、云等的影响。结果显示: MERSI II 信噪比在蓝光波段大于 800, 该信噪比水平可有效避免由海洋水色传感器自身噪声带来的不确定性, 且该波段信噪比水平达到了由国家卫星气象中心提供的各通道信噪比指标(如表 2, R_{SN}^a)。蓝光波段相比其他波段, 信噪比更高, 一个可能的原因是大洋水体对蓝光吸收较少, 散射较强, 导致离水辐射在蓝光波段最强。假

使所有波段噪声水平都一样,蓝光波段的信噪比将远大于其他波段,由表 4 清晰可见,从 L_{typical} 和 $L_{\text{MERSI II}}$ 的数值也可看出,蓝光波段的信噪比水平要高于其他波段。此外,从上述分析可知,信噪比结果会受到输入辐射亮度值的影响,且与辐射亮度值呈正相关关系,当减小输入辐射亮度值时,信噪比减小,反之,亦然。后续研究可以通过提高水质参数反演算法的精度来提高水色产品的质量,在长时间序列数据分析中,可通过对数据进行月平均、年平均来提高算法精度,减小误差。

4.2 大气层顶反射率(ρ_t)数据比较

以 VIIRS 数据为参考值,对 MERSI II 大气层顶反射率数据进行了分析,从上述结果(图 3 和图 7)可以看出,MERSI II 数据与 VIIRS 数据之间还存在一定的差异。为减小这种差异,提高二者数据的一致性,本研究建立了简单的线性拟合模型,并对数据进行拟合,从图 4 和图 8 可以看出,拟合后的数据一致性有所提高, E_{MAPE} 显著下降,但拟合模型的效果还不够理想,在近红外波段仍有部分散点较为分散。针对这一情况,又对影响数据一致性的影响因素进行了分析。对于 MERSI II 和 VIIRS 传感器,由于二者在探测器的扫描方向、空间分辨率、光谱响应函数、各通道中心波长的设置以及带宽上具有一定差异(如表 1 和表 2),导致其极化效应可能存在差异,这对传感器接收到的信号会产生一定影响,从而影响数据的一致性。此外,由相匹配遥感影像的时间差异造成的气象条件差异也会对数据一致性产生影响,导致相同位置所包含的气象条件不同,如云位置、气溶胶含量等。例如,在中国近岸海域区域数据比较中,Region1 和 Region2 选自 2019 年 5 月 29 日相匹配遥感影像,匹配时间差为 11 min,受 VIIRS 遥感影像薄云/雾的影响,VIIRS 数据偏高,导致 Region1 和 Region2 区域散点(图 11 和图 13)分布于 1:1 线以下。Region3 选自 2019 年 3 月 22 日相匹配遥感影像,匹配时间差为 52 min,受 MERSI II 遥感影像薄云/耀斑的影响,MERSI II 数据偏高,导致 Region3 区域散点(图 15)分布于 1:1 线以上,出现了与 Region1 和 Region2 相反的情况。

观测条件的差异,如太阳天顶角、太阳方位角、传感器天顶角和传感器方位角的差异也会对传感器信号的接收产生一定影响:太阳天顶角过小,容易产生耀斑及卫星阴影,角度过大则会导致弱光效应。例如,在西太平洋区域的大气层顶反

射率数据比较中,受 2019 年 3 月 23 日 MERSI II 遥感影像边缘区域耀斑的影响,MERSI II 数据偏高,导致蓝光波段低值区部分散点分布于 1:1 线以上(如图 3 所示散点图),将该区域进行掩模后,各波段散点密度如图 17 所示。从图中可以看出:经耀斑掩模后两者数据一致性显著提高,蓝光波段 R^2 从 0.88~0.96 提升至 0.96~0.98;555 nm~865 nm 波段的 R^2 也有显著提升。

对于海洋水色传感器,如 MODIS、VIIRS 和 MERSI II 等,为每个像素提供了太阳天顶角、太阳方位角、传感器天顶角和传感器方位角数据,因此,有必要对像素角度的影响进行分析。以西太平洋 12 景遥感影像为例,分析了 MERSI II 各遥感影像与准实时匹配的 VIIRS 遥感影像有效像元角度之间的差异。如图 18 和图 19 所示,不同景遥感影像各角度之间的差异较大,太阳天顶角和太阳方位角之间的差异在 10° 以下,但传感器天顶角和传感器方位角的差异最大可达 45° ,这主要是由传感器成像模式(如传感器的扫描方向差异)造成的。

辐射定标可以校正传感器的灵敏度,降低水质参数反演算法的不准确性^[24],在大洋中,与大气的贡献相比,离水辐射很小,1%的校准误差会导致 5%的大气校正误差,从而影响产品精度^[25-26]。由 MERSI II 与 VIIRS 数据比较可知,所选取的大气层顶反射率数据依赖于辐射定标系数,尽管由于观测时间差异导致气象条件不同,但从上述 MERSI II 与 VIIRS 的数据对比散点图可以看出,两者数据一致性较好,整体的偏差可主要归结为气象条件差异所致,初步验证了 MERSI II 辐射定标系数在海洋中的可用性。然而,MERSI II 传感器多基于沙漠和湖泊进行定标,基于沙漠和湖泊等定标场得到的辐射定标系数在海洋中的应用还需更多现场观测来验证。

5 结 论

本研究以北太平洋区域与中国近岸海域为研究区域,对 FY-3D MERSI II 传感器进行了数据质量评估。主要得出以下结论:

1) MERSI II 的信噪比在可见光波段高于 300,最大可达到 900,满足水体监测要求;在可见光波段及近红外波段略低于 VIIRS,在短波红外波段与 VIIRS 信噪比相差不大。

2) 以 VIIRS 数据为参考值,对西太平洋及中国

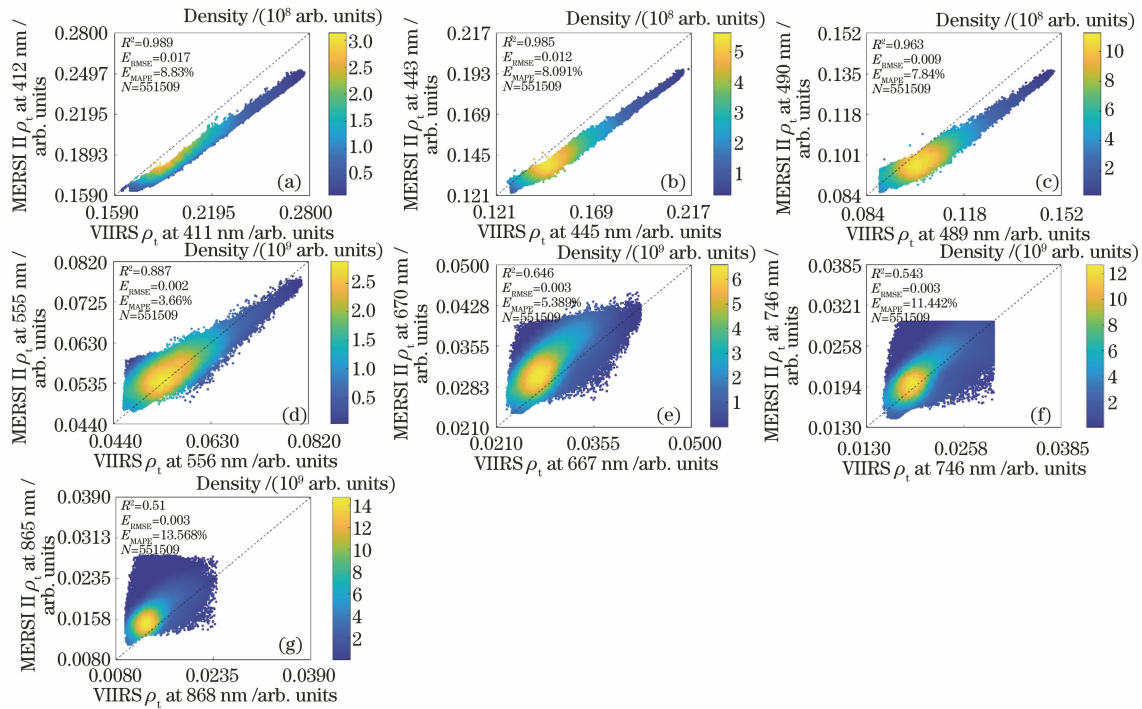


图 17 掩模耀斑后 MERSI II 与 VIIRS ρ_t 数据各波段散点密度图。(a) 412 nm 波段;(b) 443 nm 波段;(c) 490 nm 波段;(d) 555 nm 波段;(e) 670 nm 波段;(f) 746 nm 波段;(g) 865 nm 波段

Fig. 17 Scatter density diagrams from MERSI II and VIIRS ρ_t data after masking sun glint. (a) At 412 nm waveband; (b) at 443 nm waveband; (c) at 490 nm waveband; (d) at 555 nm waveband; (e) at 670 nm waveband; (f) at 746 nm waveband; (g) at 865 nm waveband

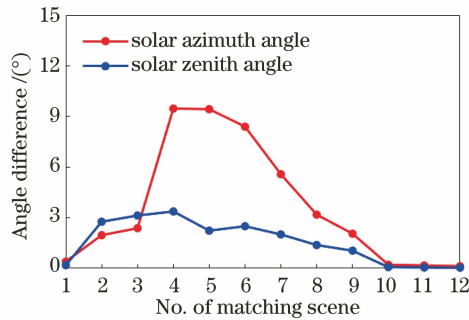


图 18 MERSI II 与 VIIRS 太阳方位角和太阳天顶角差值随 12 景遥感影像的变化

Fig. 18 Difference between the solar azimuth angle and the solar zenith angle of MERSI II and VIIRS varies with 12 remote sensing images

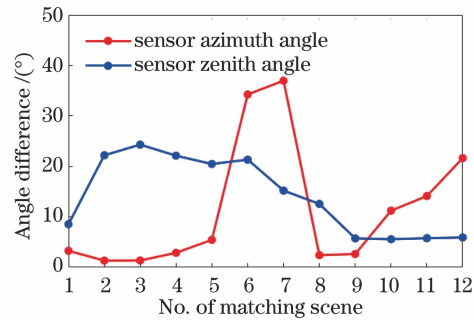


图 19 MERSI II 与 VIIRS 传感器方位角和传感器天顶角差值随 12 景遥感影像的变化

Fig. 19 Difference between the sensor azimuth angle and the sensor zenith angle of MERSI II and VIIRS varies with 12 remote sensing images

近岸海域 MERSI II 大气层顶反射率数据进行对比分析发现:MERSI II 与 VIIRS ρ_t 数据在可见光波段一致性较好;两者数据差异可主要归结为观测时间不同气象条件所致。经线性回归模型拟合后的 MERSI II ρ_t 数据与 VIIRS 数据一致性有所提高, E_{MAPE} 明显下降。

参 考 文 献

[1] Hu X Q, Niu X H, Xu N, et al. The instrument and application ability improvement of medium resolution

spectral imager onboard FY-3D[C]//The 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S21 Satellite Meteorology and Ecological Remote Sensing, October 23-26, 2018, Hefei, Anhui, China. Beijing: Meteorological Society of China: 2018: 92-100. 胡秀清, 钮新华, 徐娜, 等. FY-3D 中分辨率光谱成像仪 II 型仪器改进及应用能力提升[C]//第 35 届中国气象学会年会论文集. 合肥, 2018: 92-100.

[2] Dong C H, Yang J, Lu N M, et al. Main characteristics and primary applications of polar-

- orbiting satellite FY-3A [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, 12(4): 458-465.
- 董超华, 杨军, 卢乃锰, 等. 风云三号 A 星(FY-3A)的主要性能与应用[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(4): 458-465.
- [3] Jin C. A study on cloud detection algorithm of Fengyun-3D spectral imager over land[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- 金诚. FY-3D 卫星光谱成像仪陆上云检测算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [4] Zhao H Y, Hao X H, Zheng Z J, et al. A new algorithm of fractional snow cover basing on FY-3D/MERSI-II [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1004-1016.
- 赵宏宇, 郝晓华, 郑照军, 等. 基于 FY-3D/MERSI-II 的积雪面积比例提取算法[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1004-1016.
- [5] Qu J H, Yan J J, Xue J, et al. Research on the cloud detection model of FY3D/MERSI and EOS/MODIS based on deep learning [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 35(3): 87-93.
- 瞿建华, 鄢俊洁, 薛娟, 等. 基于深度学习的 FY3D/MERSI 和 EOS/MODIS 云检测模型研究[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(3): 87-93.
- [6] Han X Z, Wang F, Shan T C, et al. Research and applications of true color image composite method for Fengyun-3D [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2019, 39(2): 13-23.
- 韩秀珍, 王峰, 单天婵, 等. 风云三号 D 星真彩色影像合成方法研究及应用[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2): 13-23.
- [7] Qu J H, Yan J J, Wang Y T, et al. Global clear-sky data synthesis technology based on FY-3D MERSI-II instrument [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(4): 539-545.
- 瞿建华, 鄢俊洁, 王燕婷, 等. 基于 FY-3D 的 MERSI 全球晴空数据合成技术[J]. *气象科技*, 2019, 47(4): 539-545.
- [8] Zheng W, Chen J, Yan H, et al. Global fire monitoring products of FY-3D/MERSI-II and their applications[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(5): 521-530.
- 郑伟, 陈洁, 闫华, 等. FY-3D/MERSI-II 全球火点监测产品及其应用[J]. *遥感学报*, 2020, 24(5): 521-530.
- [9] Zhu B, Wang X H, Tang L L, et al. Review on methods for SNR estimation of optical remote sensing imagery [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2): 303-309.
- 朱博, 王新鸿, 唐伶俐, 等. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 303-309.
- [10] Liu J G, Zheng L F, Tong Q X, et al. Estimation of signal to noise ratio of remote sensing images [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1999, 7(4): 360-365.
- 刘建贵, 郑兰芬, 童庆禧, 等. 遥感图像信噪比的估算[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1999, 7(4): 360-365.
- [11] Curran P J, Dungan J L. Estimation of signal-to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(5): 620-628.
- [12] Gao B C. An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(1): 23-33.
- [13] Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. Study on the method for estimating the noise in remote sensing images based on local standard deviations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 201-208.
- 高连如, 张兵, 张霞, 等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(2): 201-208.
- [14] Hu C M, Feng L, Lee Z, et al. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6045-6062.
- [15] Hu X Q, Sun L, Liu J J, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 71-83.
- 胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 71-83.
- [16] Wang L, Hu X Q, Chen L, et al. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1911-1920.
- 王玲, 胡秀清, 陈林, 等. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1911-1920.
- [17] Xu N, Wu R H, Hu X Q, et al. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228001.
- 徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228001.
- [18] Zhi D D. Radiometric recalibration for the reflective

- solar bands of FengYun-3 satellite medium resolution spectral imager and its applications [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- 支丹丹. 风云三号卫星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射再定标及其应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [19] Zhang Y X, Li X, Zhang M, et al. On-orbit radiometric calibration for thermal infrared band of FY3D/MERSI-II satellite remote sensor based on Qinghai lake radiation calibration test-site[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(5): 0528002.
- 张允祥, 李新, 张孟, 等. 基于青海湖辐射校正场的FY3D/MERSI-II卫星遥感热红外波段在轨辐射定标[J]. *光子学报*, 2020, 49(5): 0528002.
- [20] Chen J, He X Q, Liu Z L, et al. An approach to cross-calibrating multi-mission satellite data for the open ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246: 111895.
- [21] Cao Z G, Duan H T, Song Q J, et al. Evaluation of the sensitivity of China's next-generation ocean satellite sensor MWI onboard the Tiangong-2 space lab over inland waters [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 71: 109-120.
- [22] Fu P, Sun Q S, Ji Z X, et al. A method of SNR estimation and comparison for remote sensing images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 559-567.
- 傅鹏, 孙权森, 纪则轩, 等. 一种遥感图像信噪比评估和度量准则[J]. *测绘学报*, 2013, 42(4): 559-567.
- [23] McClain C R, Signorini S R, Christian J R, et al. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(1/2/3): 281-301.
- [24] Li J, Chen X L, Tian L Q, et al. Tracking radiometric responsivity of optical sensors without on-board calibration systems-case of the Chinese HJ-1A/1B CCD sensors [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1829-1847.
- [25] Gordon H R, Wang M H. 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.
- [26] Zhou Q, Li J, Tian L, et al. Coupled approach for radiometric calibration and parameter retrieval to improve SPM estimations in turbid inland/coastal waters [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5567-5586.