

基于 VIIRS 卫星遥感影像的南海近岸海域 透明度时空变化特征

黄晓翰¹, 娄全胜^{1, 2}, 王孟¹, 苏文³, 姜广甲^{1, 2, 4*}

1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300;
2. 自然资源部南沙珊瑚礁生态系统野外科学观测研究站, 广东 广州 510300;
3. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510310;
4. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广东 广州 510310)

摘要: 水体透明度是评价水下光场分布的重要指标, 反映了水下生物、物理和化学动力变化过程。利用不同光学类型的现场数据, 分析南海近岸海域透明度对遥感反射光谱的影响, 构建基于 VIIRS 波段设置的透明度遥感评价模型, 经过验证, 应用于 2013—2016 年 VIIRS 数据, 揭示了南海近岸海域透明度的时空变化特征, 同时讨论了 VIIRS 和 MODIS 的海洋环境监测能力。结果表明, 当透明度 < 5.3 m 时, 在 555 nm 处出现明显反射峰, 而当透明度 > 5.3 m 时, 拐点出现在 488 nm 处。VIIRS 的 $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$ 与透明度显著相关 ($R^2 = 0.77$), 适于南海近岸海域透明度的遥感评价。将该模型应用于 VIIRS 数据, 发现南海近岸海域透明度表现为离岸较近海域透明度低于较远海域, 西部低于东部。VIIRS 具有较高的空间分辨率和性能, 环境监测能力优于 MODIS。

关键词: 水色遥感; 珠江口; VIIRS; MODIS

中图分类号: P733.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6482(2024)01-021-10

DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.01.003

引言

南海是太平洋最大、最深的边缘海, 面积约为 $350 \times 104 \text{ km}^2$, 海底地形复杂、岛礁密布^[1]。南海近岸海域常年存在上升流, 有河口、海湾、深海区等各种复杂生态系统并存, 并受淡水、咸水、咸淡水、潮滩湿地和沙洲湿地等生态系统的综合影响^[2-3], 囊括了光学 I 类和 II 类水体, 光学特性十分复杂^[4]。其中, 珠江是南海近岸海域最大的输入河流, 平均每年有 $3\ 260 \text{ 亿 m}^3$ 的径流量及其携带物进入南海, 加之南海近岸复杂的水动力条件, 影响了该海域水体的水质环境。

透明度是评价水质环境的重要参数之一。水下光场分布影响了水下生物、物理和化学动力变化过程, 例如, 浮游植物利用水下光照进行光合作用将无机碳转化为有机碳储存于水体中, 而溶解有机物在光照条件下进行降解释放无机碳。同时, 水下光场分布影响着水体的热传输过程, 进而影响了水动力变化^[5-6]。透明度是确定光照在水下传输界面和评估水体营养水平的重要因子, 在无法进行水下辐照度测量的情况下, 透明度是评价水下光场分布的唯一指标^[7]。

与透明度的传统调查方式相比, 卫星遥感技术可以高频次、大尺度、长时间序列的监测海洋环境动力变化特征。VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 发射于 2011 年 10 月 28 日, 是新一代的近极地水色卫星传感器, 其水色波段与 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 具有

基金项目: 南海局科技发展基金项目(230202); 广东省林业科技创新项目(2021KJ CX005); 国家自然科学基金项目(42071338); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515011420); 南海分局海洋科学技术局长基金(180209)

第一作者简介: 黄晓翰(1990—), 男, 广东汕头人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋动力学研究。Email: musical27piano@163.com

* 通信作者: 姜广甲(1983—), 男, 山东东平人, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋生态遥感研究。Email: gjjiang2011@gmail.com

收稿日期: 2021-02-26

相似的波段配置,但具有较大幅宽(3 000 km)和较高空间分辨率(750 m)^[8-9]。目前,针对 VIIRS 卫星遥感数据,相关研究主要集中在数据本身的校正方法^[9-10]以及将 VIIRS 卫星遥感数据的水色产品与 EOS MODIS 数据水色产品进行比对、验证^[11-14],而开展海洋生态环境监测的技术研究相对较少^[15-16],并且基于 VIIRS 数据对南海近岸海域透明度评价方面还未见报道。

利用遥感技术评价水体透明度的方法主要包括经验法(empirical method)和半分析方法(semi-analytical method)^[7,17-21]。本文以涵盖光学 I 类水体和 II 类水体的南海近岸海域为研究区,利用珠江口、大亚湾和粤西海域的现场生物-光学数据,构建适于南海近岸海域水体光学特征的透明度评价经验算法,并应用于 2013—2016 年每天的 VIIRS 卫星遥感影像,以揭示该海域透明度时空变化特征,为新一代水色卫星数据产品验证提供案例,并为海洋生态环境遥感监测业务化运行提供方法论支撑。

1 材料与方法

1.1 采样站点布设

分别于 2014 年 5 月 11 日—18 日和 2015 年 4 月 27 日—5 月 15 日在南海近岸海域布设样点采集表层水样,测量水体的遥感反射光谱、水体透明度、风速风向、水深等现场数据,同时记录水环境状况,共获取 85 个有效样点(图 1)。2015 年 10 月在粤西海域获取 13 个样点的现场生物-光学数据,用于南海近岸海域透明度遥感评价模型的精度验证(图 2a)。同时,于 2015 年 3 月—8 月在南海近岸海域卫星准同步采集样点(图 2b),用于 VIIRS 卫星遥感影像预处理结果的验证。

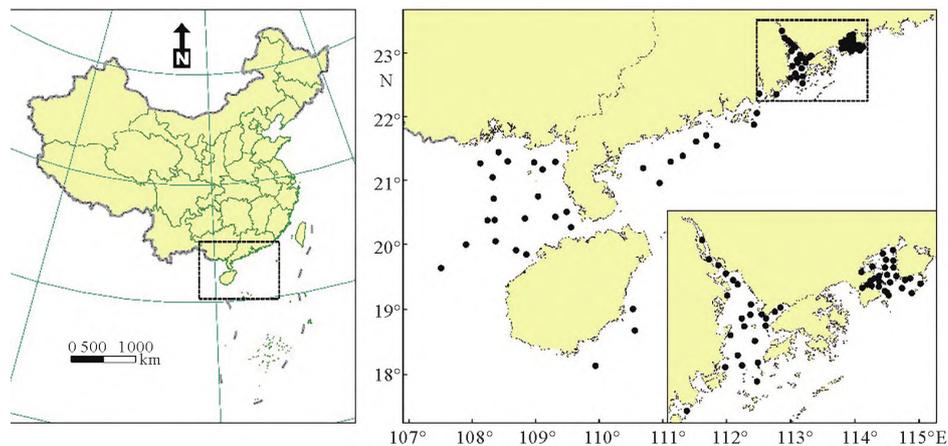


图 1 研究区及样点分布

Fig. 1 Geo-distributions of samples and the study water area

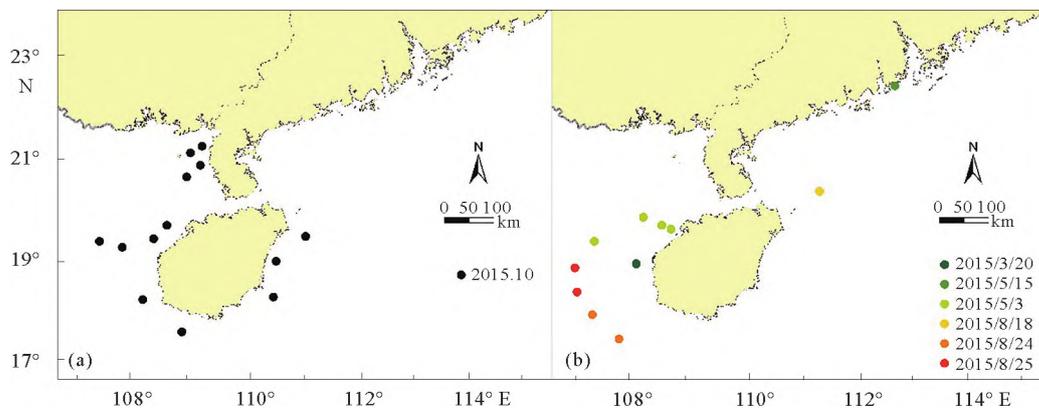


图 2 (a)实测验证样点分布和(b)VIIRS 卫星遥感数据准同步样点分布

Fig. 2 Distributions of the sampling sites for (a) field validation and (b) quasi-synchronous validation comparing with VIIRS satellite observations

1.2 现场遥感光谱测量

采用水面之上测量法测定水体遥感反射光谱^[22]。所用光谱仪为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro Dual VNIR 野外双通道光谱仪,可在 350~1 050 nm 波段范围内连续测量,测定水体、灰板以及天空光谱,通过计算得到水体遥感反射比。测量时天气晴朗无云,风速小于 3 m/s,测量时间为 9:00—15:00。

在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下,水体总光谱信号(L_{sw})可近似看作水体离水辐亮度(L_w)和天空光辐亮度(L_{sky})之和,即:

$$L_{sw} = L_w + rL_{sky} \quad (1)$$

式中, r 为气-水界面对天空光的反射率,与风速、太阳高度角和观测几何等有关,取值为 0.026~0.028^[23]。

由于 L_w 在遥感中容易测定,因此,遥感反射比(R_{rs} , r_s^{-1})可以定义为水体离水辐亮度与恰好位于水体表面的向下辐照度($E_d(0^+)$)的比值。则:

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+) \quad (2)$$

$E_d(0^+)$ 可表示为:

$$E_d(0^+) = L_p \pi / \rho_p \quad (3)$$

其中, ρ_p 为标准白板的反射率,校正值为 30%; L_p 为折合到 100%标准板的信号。

综上,可得水体遥感反射比:

$$R_{rs} = \frac{\rho_p (L_{sw} - rL_{sky})}{\pi L_p} \quad (4)$$

根据 VIIRS 卫星遥感的波段响应,将实测光谱重采样为模拟的 VIIRS 数据,重采样规则与文献^[24]保持一致。

1.3 透明度测量

利用塞氏盘深度(Secchi Disk Depth)测量法测量水体透明度(SD)。使用的测量工具为 20 cm 直径的黑白塞氏盘。测量时,将塞氏盘水平放入待测水体中,直至其到达“可见”与“不可见”的深度临界值,该深度临界值即为测量点的塞氏盘深度^[25]。

1.4 卫星遥感影像数据获取与处理

在 NOAA 官网(Climate Services and Monitoring Division, CLASS)下载 2013—2016 年每天 VIIRS L1B(Sensor Data Record, SDR)数据产品(空间分辨率为 750 m),共计 1 460 景。在 SeaDAS 7.4 软件(OBGP, NASA)中进行数据预处理,包括:几何校正、云掩膜处理、水体提取、大气校正等。其中,大气校正采用近红外迭代法(Iterative NIR correction-BFW10)^[15,26]。

1.5 数据统计方法

数据统计、多元线性拟合等数据处理均在 Origin 8.5 统计软件中完成。

采用观测值与模拟值之间的相对均方根误差(relative root mean square error, r_{RMSE})来评价估算模型的优劣^[27]。

$$RMSE\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (5)$$

式中, P_i 和 O_i 分别为模拟值和观测值; \bar{O} 为观测值的平均值; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 南海近岸海域透明度的变化特征

南海近岸海域透明度在 0.3~30.0 m 之间变化,均值为 6.1 ± 7.7 m,具有较大的空间变异系数(1.3),

说明南海近岸海域透明度空间差异较大。该海域40%以上的透明度小于2.0 m(图3),主要分布在珠江口海域(0.8 ± 0.4 m),但变异系数较小(0.5),说明珠江口海域透明度空间差异不明显。大亚湾海域具有较高的透明度,变化范围为1.2~5.5 m,均值为 2.4 ± 1.3 m。在离岸较远海域透明度远大于珠江口和大亚湾,均值为 13.5 ± 8.7 m,变化范围为3.0~30.0 m。

2.2 南海近岸海域透明度的遥感评价模型

2.2.1 透明度对水体遥感反射光谱的影响

透明度与水体中的光学活性物质密切相关^[7],包括叶绿素a、悬浮物和有形溶解有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)^[28],因此间接影响了水体的离水辐亮度或者遥感反射比。选取透明度梯度为1(0.9)、5(5.3)、10(9.0)、15(15.0)和25(24.0) m对应的遥感反射比以分析不同透明度对VIIRS波段遥感反射光谱的影响。

图4给出透明度对水体遥感反射信号的影响。不同透明度对遥感反射比具有显著影响:总体上,透明度较低(0.9 m)的遥感反射比较高,而透明度较高(24.0 m)的遥感反射比较低($R_{rs}(\lambda) < 0.01 \text{ sr}^{-1}$)。特别是 $R_{rs}(555)$,随着透明度的增加而逐渐降低(图4a)。为分析透明度对水体遥感反射比光谱形状的影响,将不同透明度对应的遥感反射光谱进行归一化,即每条光谱的每个波段的遥感反射比除以该光谱中遥感反射比的最大值(图4b、c)。发现当透明度 ≤ 5.3 m时,在555 nm处出现明显反射峰且遥感反射比最大,表现为412—555 nm波段范围内 $R_{rs}(\lambda)$ 随波长增加逐渐增大,在555—865 nm波段范围内, $R_{rs}(\lambda)$ 随波长增加逐渐减小(图4b);同时,透明度较高水体的归一化 $R_{rs}(\lambda)$ 高于透明度较低水体。而透明度 > 5.3 m时,拐点出现在488 nm处,且归一化 $R_{rs}(555)$ 随着透明度升高而降低,而透明度为9.0 m时,555 nm出现较小反射峰(图4c)。

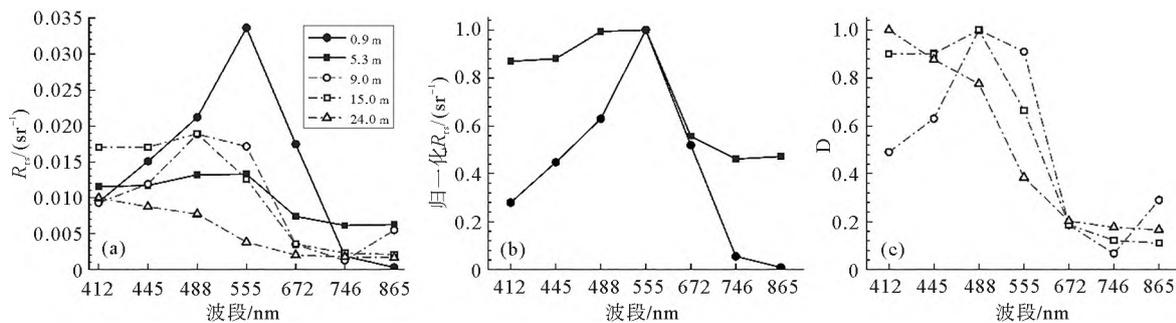


图4 透明度对水体遥感反射光谱的影响:(a)原始遥感反射比;(b、c)归一化遥感反射比

Fig. 4 Influence of Secchi disk depth on the remote sensing reflectance of water: (a) raw data; (b and c) normalized data

2.2.2 透明度的遥感评价模型

通过分析透明度对水体遥感反射光谱的影响,发现随着透明度的增加,遥感反射光谱在488和555 nm处变化敏感(图4)。因此,构建基于VIIRS的波段比值算法以评价南海近岸海域透明度的时空分布特征,即评价 $(R_{rs}(488)/R_{rs}(555))$ 与透明度之间的相关关系。

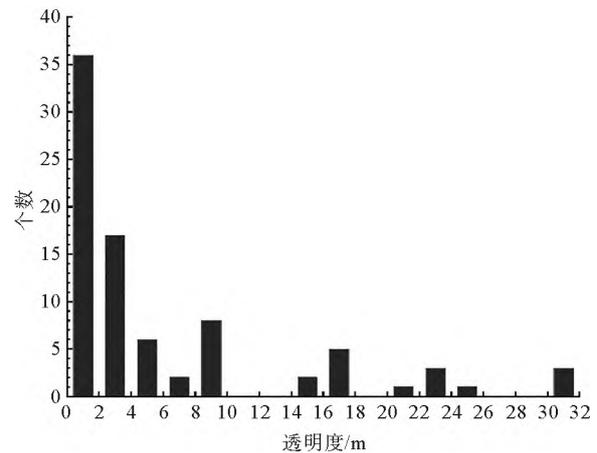


图3 南海近岸海域透明度直方图统计

Fig. 3 Histogram of field measured Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea

两者在南海近岸海域具有较好的正相关关系,随着透明度逐渐增大, $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$ 逐渐增大(变化范围为 0.5~3.5,均值 1.1 ± 0.6),但当透明度 >10.0 m 时,两者的相关性有所降低。经过拟合,发现对数形式结果最好(图 5)。基于 VIIRS 波段的南海海域透明度遥感评价模型表达式为:

$$SD = 15.1 \times \ln[R_{rs}(488)/R_{rs}(555)] + 8.2 \quad (R^2 = 0.77, N = 85, p < 0.01) \quad (6)$$

2.3 透明度遥感评价模型的应用

利用 VIIRS 传感器波段的比值构建南海近岸海域透明度的遥感评价算法,并应用于预处理后的 VIIRS 卫星遥感影像,以获取该海域透明度的时空分布特征。

为分析 VIIRS 大气校正效果,将准同步的现场遥感反射比与预处理后的 VIIRS 卫星遥感数据进行对比,发现两者形状相近(图 6a),且不同波长的遥感反射比的绝对值相差很小(图 6b),可用于评价南海海域透明度的动态变化特征。

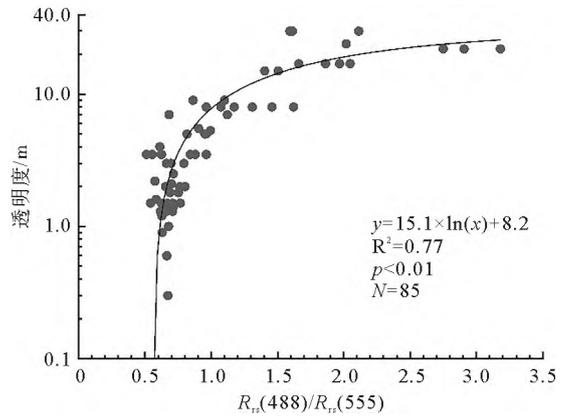


图 5 透明度与 $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$ 的相关关系
Fig. 5 Relationship between Secchi disk depth and $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$

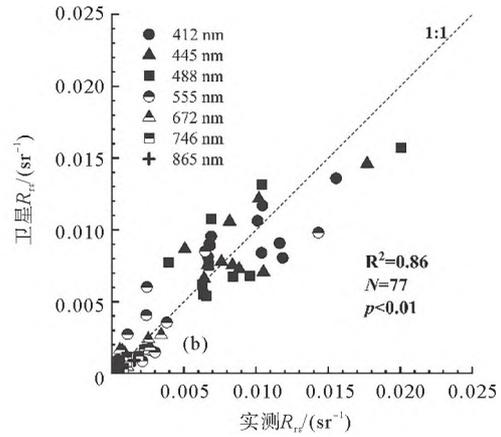
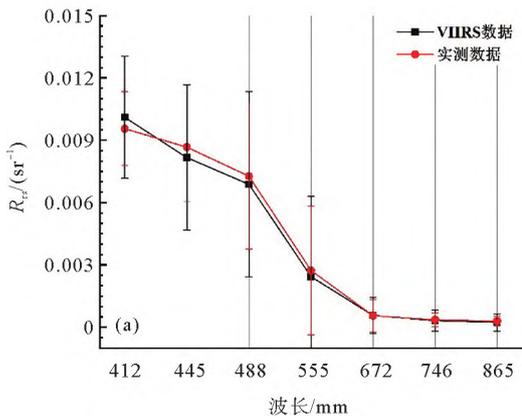


图 6 (a)准同步采样点实测遥感反射光谱与遥感影像反射光谱的对比;(b)特定波长处实测与遥感影像遥感反射比的对比:412、445、488、555、672、746 和 865 nm

Fig. 6 (a) Comparison of field and satellite-derived remote sensing reflectance and (b) Five compared field and satellite-derived R_{rs} at 412, 445, 488, 555, 672, 746 and 865 nm

将公式(6)应用于 2015 年 10 月在粤西海域的现场数据,以验证南海近岸海域透明遥感评价算法的稳定性(图 7)。结果表明,模型计算结果与实测值具有较好的一致性,均匀分布在 1:1 线周围,两者具有较好的相关关系($R^2 = 0.84$, $r_{RMSE} = 19.3\%$, $N = 13$, $p < 0.01$),说明该模型具有较好的稳定性,可用于南海近岸海域透明度的业务化监测。

将该算法应用于 2013—2016 年南海近岸海域的 VIIRS 卫星遥感影像,获取该海域的月均产品,从整体上揭示了该海域透明度的时空变化规律。基于不同时相的 VIIRS 卫星遥感

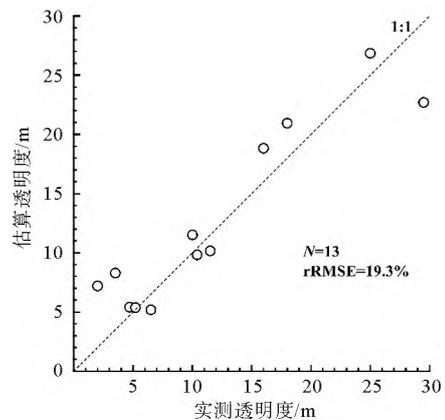


图 7 实测透明度与估算透明度之间的关系
Fig. 7 Relationship between measured and estimated Secchi disk depth

影像获取了南海近岸海域透明度的时空分布状况(图8),发现该海域的透明度在0.0~40.0 m范围内变化。整体上看,不同年度5月份透明度的空间变化显著,但离岸较远海域透明度高于离岸较近海域,特别是沿岸水体透明度较低,大部分海域透明度小于12.0 m。受水动力影响,珠江口东部沿岸透明度高于西部。在海南附近海域,不同年度透明度变化较大。

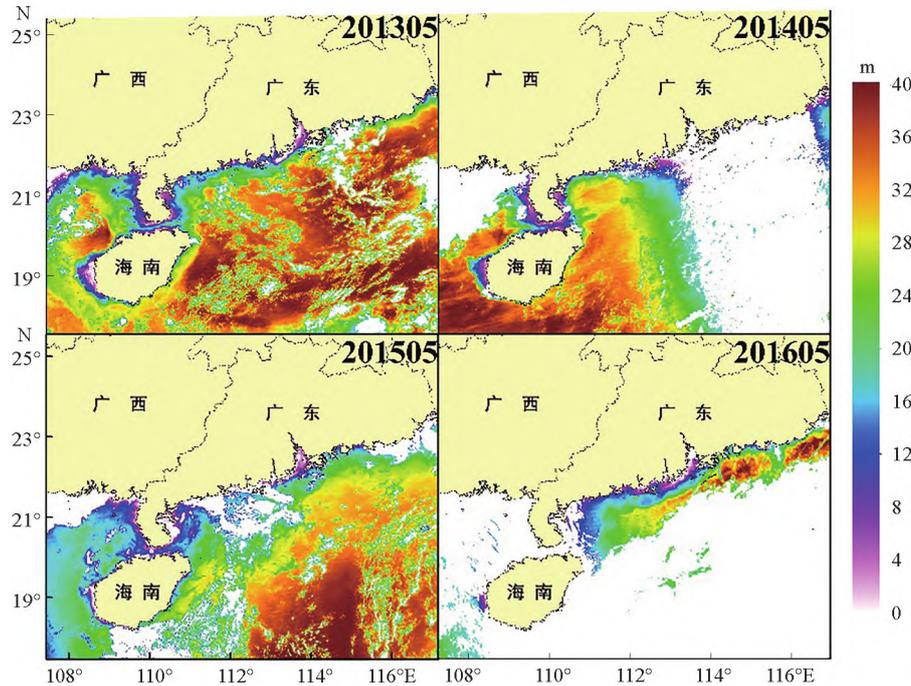


图8 2013—2016年5月南海近岸海域透明度的空间分布(白色代表有云区域)

Fig. 8 The spatially distributed patterns of Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea in May from 2013 to 2016

3 讨论

3.1 透明度遥感评价模型适用性分析

经验模型受限于训练数据集的选择,并且与水体光学特性密切相关^[29]。但遥感反射光谱是对水体及周围环境信息的综合响应,基于水体生物光学模型的半分析算法仍与样点个数、代表性以及水体环境具有较大的相关性,限制了其在不同水体中的推广应用。针对南海近岸海域,样点分布于悬浮泥沙和 CDOM 占主导地位珠江口海域^[30]、相对封闭且初级生产力较高的大亚湾海域^[31]以及属于光学 I 类水体的远离近岸水体,同时,使用不同年度的样点数据对模型进行了验证($R^2 = 0.84$, $r_{RMSE} = 19.3\%$),样点代表性较强,说明该模型在南海近岸海域有较强的适用性,为海洋生态环境的业务化监测提供了方法论基础。

针对不同透明度大小对应的遥感反射光谱以及 VIIRS 传感器的波段设置(图4),488 和 555 nm 处遥感反射比的斜率对不同透明度具有较强的区分性。CDOM 在紫外和可见光波

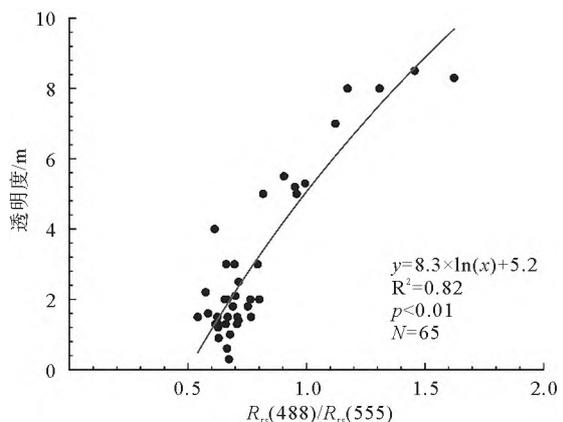


图9 透明度(<10 m)与 $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$ 的相关关系
Fig. 9 Relationship between Secchi disk depth lower than 10 m and $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$

段吸收强烈,悬浮泥沙在 555 nm 附近具有较强的散射特征,浮游植物色素在 490 nm 处吸收强烈,而叶绿素 a 在 665 nm 处具有显著的吸收峰。水体中的悬浮泥沙、浮游植物色素和 CDOM 是影响透明度的主要因素^[7],因此,考虑 488 和 555 nm 处的遥感反射比与透明度的相关关系具有一定的物理意义。

从图 5 可以看出,当透明度 >10.0 m 时,模型敏感度有所降低,变化平缓,但对透明度仍有较好的区分能力(图 7)。而仅考虑透明度 <10.0 m 的样点,透明度与 $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$ 的相关关系有所提高(图 9, $R^2=0.82$),模型敏感度较高。将模型应用于 VIIRS 影像数据,南海近岸海域透明度 <40.0 m(图 8),且大部分海域透明度 <32.0 m,说明该模型的适用性较强,稳定性较高。

3.2 VIIRS 与 MODIS 卫星遥感数据透明度评价结果比较

为了进一步评价 VIIRS 卫星遥感影像产品的优劣,将 2013 年 3 月 7 日 VIIRS 和 MODIS 透明度产品进行对比。由于 MODIS 传感器中心波长为 555 nm 的波段(545—565 nm)空间分辨率为 500 m,而中心波长为 488 nm 的波段(483—493 nm)空间分辨率为 1 000 m,故采用重采样为 1 000 m 空间分辨率的 555 nm 波段参与透明度评价模型运算。同时,VIIRS 和 MODIS Aqua 的成像时间相近,因此选择 VIIRS 与 MODIS Aqua 卫星遥感影像数据透明产品进行比较。

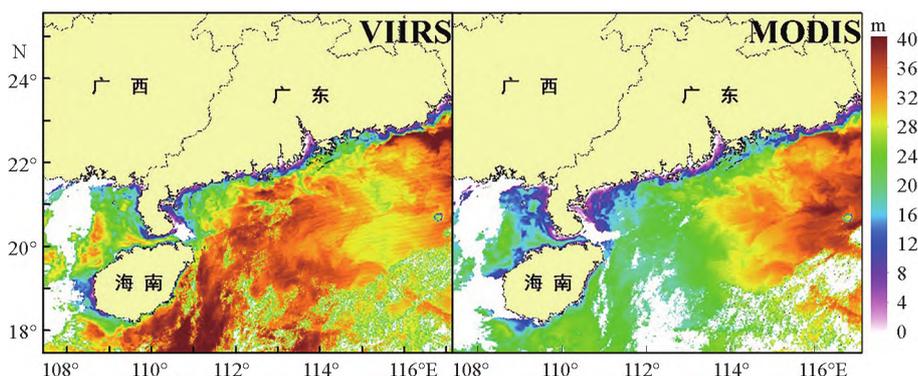


图 10 VIIRS 和 MODIS 透明度产品对比

Fig. 10 Comparison of Secchi disk depth products between VIIRS and MODIS observations

基于 VIIRS 和 MODIS 卫星遥感影像数据的透明度产品均能反映出南海近岸海域透明度的空间分布特征(图 10),总体上表现为离岸较近海域透明度较低,反之较高,且均可表征该海域水动力状况。两者成像时间差别较小(VIIRS:5:45 UTC,MODIS Aqua:5:17 UTC),可从空间上进行比较。在珠江口以东海域,两者透明度表现出相似的空间分布特征,但在细节上 VIIRS 透明度产品刻画的较为细致,主要与其较高的空间分辨率有关。而在珠江口以东海域,特别是湛江海域附近,两者透明度绝对值有一定差异,基于 VIIRS 计算得到的透明度较高,而 MODIS 较低,可能与两者传感器的性能^[9]以及大气校正参数输入有关^[15]。为保证 VIIRS 传感器在轨校准和数据质量,卫星上搭载了一系列在轨校准器(onboard calibrators, OBCs),并携带漫反射板和稳定器以减少 MODIS 存在的非均匀光照带来的误差^[9]。对于大气校正方法——近红外迭代法(Iterative NIR correction-BFW10)更适于清澈至中等浑浊水体^[15,26],并将该方法应用于 VIIRS 卫星遥感影像,大气校正效果较好。对于 MODIS 来说,大气校正输入的大气参数与 VIIRS 获取的大气参数有一定差别,导致两者透明度产品在珠江口以西海域有一定差异。

总之,作为新一代在轨的水色传感器 VIIRS,具有较高的性能和空间分辨率,将在未来水色遥感水体生态参量的定量评价中发挥重要作用,并将推动水色遥感的业务化应用。

3.3 南海近岸海域透明度时空变化特征

将南海近岸海域透明度遥感评价模型应用于 2013—2016 年每月 VIIRS 卫星遥感影像(2016 年 4 月整个海域云覆盖,无影像),发现南海近岸海域透明空间差异显著(图 11),透明度在 0.0~40.0 m 之间变

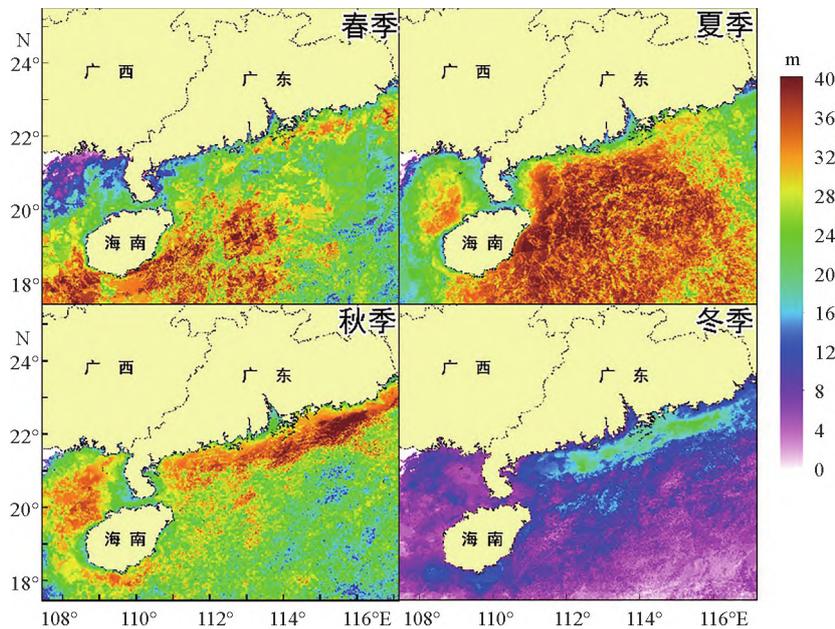


图 11 南海近岸海域透明度空间和季节变化

Fig. 11 Spatial and seasonal variations of average values of Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea

化,总体表现为离岸较近海域透明度低于离岸较远海域,西部海域低于东部。特别是珠江口海域,透明度均小于 8.0 m。南海近岸海域透明度季节变化显著,总体上夏季最高,其次是春季和秋季,冬季最低(图 11)。薛宇欢等^[32]研究了中国近海海水透明度分布特征和季节变化,发现南海近岸海域水体透明度变化范围为 0.2~32.0 m,且冬季最低,夏季最高,与本文研究结果一致。

图 12 给出南海近岸海域透明度均值年际变化,最大值出现在 2015 年 8 月,透明度均值为 21.2 m。最小值出现在 2016 年 5 月(2.6 m),可能由于该月获取的卫星遥感影像主要集中在离岸较近海域。从不同年度进行比较,2015 年透明度均值最大,为 13.7 m,其次 2013 年(12.0 m),2014 年和 2015 年透明度均值相差不大,分别为 10.8 m 和 9.7 m。

4 结论

(1)南海近岸海域透明度变化范围为 0.3~30.0 m(均值为 6.1 ± 7.7 m),且该海域 40% 以上的透明度在 2.0 m 以下,而离岸较远海域透明度较大,均值为 13.5 ± 8.7 m。

(2)利用涵盖光学 I 类和 II 类水体的生物-光学数据,参照 VIIRS 卫星遥感传感器波段设置,构建了南海近岸海域透明度遥感评价模型,该模型基于 VIIRS 的波段比值($R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$)和透明度之间的定量关系,精度较高($R^2 = 0.77$, $N = 85$, $p < 0.01$)。该模型在透明度 > 10.0 m 时敏感性有所降低,但对透明度(10.0~30.0 m)仍有较好的区分能力。VIIRS 具有较高的空间分辨率和性能,对透明度

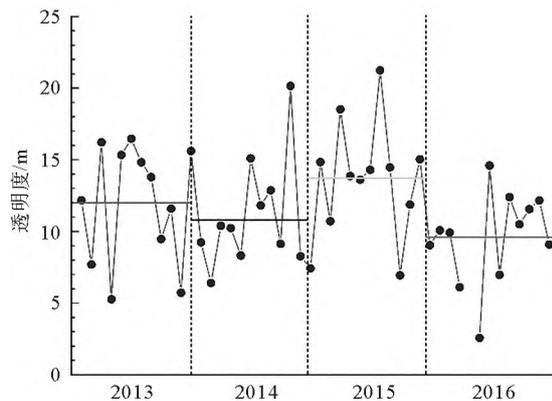


图 12 南海近岸海域透明度均值年际变化(2013—2016)
(其中,不同颜色的横线代表透明度年均值)

Fig. 12 Yearly variation of average values of Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea from 2013 to 2016

的细节刻画能力优于 MODIS。

(3)将南海近岸海域透明度遥感评价模型应用于预处理后的 VIIRS 卫星遥感影像,发现南海近岸海域透明度在 0.0~40.0 m 之间变化,总体表现为离岸较近海域透明度低于离岸较远海域,西部海域低于东部。

参考文献

- [1] 吴日升,郭小钢,李立. 1998 年冬季南海的海洋水文特征与环流[J]. 海洋学报, 2002, 24(增刊 1):142-153.
- [2] MAO Q, SHI P, YIN K, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24:1797-1808.
- [3] 庞海龙. 珠江冲淡水扩散路径分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2006:80-85.
- [4] WANG G F, CAO W X, YANG Y Z, et al. Variations in light absorption properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30: 1085-1094.
- [5] MEGARD R, BERMAN T. Effects of algae on the secchi transparency of the southeastern Mediterranean Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34:1640-1655.
- [6] GARABA S, VOß D, ZIELINSKI O. Physical, bio-optical state and correlations in north-western European shelf seas[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6):5042-5066.
- [7] ALIKAS K, KRATZER S. Improved retrieval of Secchi depth for optically-complex waters using remote sensing data[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77:218-227.
- [8] HILLGER D, SEAMAN C, LIANG C, et al. Suomi NPP VIIRS Imagery evaluation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119:6440-6455.
- [9] XIONG X, BUTLER J, CHIANG K, et al. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119:5065-5078.
- [10] SUN J, WANG M. VIIRS reflective solar bands calibration progress and its impact on ocean color products[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 194.
- [11] WANG M, LIU X, TAN L, et al. Impacts of VIIRS SDR performance on ocean color products[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(18): 10347-10360.
- [12] HLAING S, HARMEL T, GILERSON A, et al. Evaluation of the VIIRS ocean color monitoring performance in coastal regions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 398-414.
- [13] HU C, BARNES B, QI L, et al. A harmful algal bloom of *Karenia brevis* in the Northeastern Gulf of Mexico as revealed by MODIS and VIIRS: A comparison[J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 2873-2887.
- [14] KAHRU M, KUDELA R, ANDERSON C, et al. Optimized merger of ocean chlorophyll algorithms of MODIS-Aqua and VIIRS [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2282-2285.
- [15] JOSHI I, DSA E, OSBURN C, et al. Assessing chromophoric dissolved organic matter (CDOM) distribution, stocks, and fluxes in Apalachicola Bay using combined field, VIIRS ocean color, and model observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 359-372.
- [16] QI L, HU C, CANNIZZARO J, et al. VIIRS observations of a *Karenia brevis* bloom in the Northeastern Gulf of Mexico in the absence of a fluorescence band[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12 (11), 2213-2217.
- [17] SHANG S, LEE Z, SHI L, et al. Changes in water clarity of the Bohai Sea: Observations from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 22-31.
- [18] LEE Z, SHANG S, HU C, et al. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139-149.
- [19] 禹定峰,周燕,邢前国,等. 基于实测数据和卫星数据的黄东海透明度估测模型研究[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(5):774-779.
- [20] 张春桂,曾银东. 台湾海峡海水透明度遥感监测及时空变化分析[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(2):73-81.
- [21] 王晓菲,张亭禄,田林,等. 西北太平洋海水透明度遥感反演与融合方法[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(12): 133-141.
- [22] 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[J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37-44.
- [23] MOBLEY C. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(26), 7442-7455.
- [24] 杨贵军,柳钦火,黄华国,等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(1): 15-21.
- [25] AL KAABI M, ZHAO J, GHEDIRA H, et al. MODIS-Based mapping of Secchi Disk Depth using a qualitative algorithm in the shallow Arabian Gulf[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 423.
- [26] BAILEY S, FRANZ B, WERDELL P. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing

- [J]. *Optical Express*, 2010, 18: 7521-7527.
- [27] 曹静, 刘小军, 汤亮, 等. 稻麦适宜氮素营养指标动态的模型设计[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 359-364.
- [28] MOREL A, PRIEUR L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709-722.
- [29] LEE Z, CARDER K, ARNONE R. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [30] 姜广甲, 段国钦, 黄志雄, 等. 珠江口海域主导光学因子的遥感分类及其变化特征[J]. *海洋学报*, 2016, 38(9): 64-75.
- [31] TANG D L, KESTER D, WANG Z, et al. Satellite Remote Sensing of the Thermal Plume from the Daya Bay Nuclear Power Station, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 506-515.
- [32] 薛宇欢, 熊学军, 刘衍庆. 中国近海海水透明度分布特征与季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 38-44.

Spatio-temporal variations of Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea from VIIRS observations

HUANG Xiaohan¹, LOU Quansheng^{1, 2}, WANG Meng¹, SU Wen³, JIANG Guangjia^{1, 2, 4}

(1. South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 2. Nansha Islands Coral Reef Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 3. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Water transparency is an important ecological indicator for evaluating the underwater light field, which determines the biological, physical and chemical processes in waters. Based on the field measurements from case I and case II waters, the effect of Secchi disk depth on remote sensing reflectance of water was performed to develop a Secchi disk depth estimation algorithm for coastal waters of the South China Sea. The optical model, validated by using local data in October 2015, was used with monthly VIIRS data from 2013 to 2016 to assess the temporal and spatial variability of the Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea. Furthermore, a comparison of VIIRS and MODIS for monitoring marine environment was performed in this study. Results demonstrated that the Secchi disk depth highly controlled the remote sensing reflectance of water at bands of 488 and 555 nm. A reflected peak was found at 555 nm when the Secchi disk depth higher than 5.3 m, while on the condition of the Secchi disk depth lower than 5.3 m, the peak moved to the waveband of 488 nm. The band ratio of VIIRS, $R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$, was highly correlated to the Secchi disk depth in coastal waters of the South China Sea, which was then applied to the calibrated VIIRS images and found that the Secchi disk depth was higher in the offshore than nearshore and also in the east than west. Compared to MODIS data, the VIIRS instrument has higher spatial resolution and calibration activities, which will provide more ocean color products in future.

Key words: water color; pearl river estuary; VIIRS; MODIS