

海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素

贾后磊¹, 苏文¹, 黄华梅¹, 孙庆杨¹, 姜广甲^{2*}, 马荣华³

¹ 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510310;

² 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300;

³ 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008

摘要 基于太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域大量的生物-光学数据, 提出透明度高度(SD_H)法评价水体的透明度, 并将该方法应用于新一代水色卫星传感器 Suomi NPP VIIRS, 揭示了水体透明度的动态变化特征。分析了不同水域透明度的主导影响因素, 对比了珠江口水域 VIIRS 和中分辨率成像光谱仪(MODIS)的透明度产品, 并讨论了两者的水环境监测能力。结果表明, 基于 VIIRS 的 488, 555, 672 nm 波段构建的 SD_H 模型适用于研究水域, 可以解释 79% 的透明度变化。将所提模型应用于预处理后的 VIIRS 卫星遥感影像, 可得到太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水体透明度的空间分布特征。相对于浮游植物, 悬浮物 and 有色溶解有机物是影响海岸带和内陆水体透明度的主导因子。VIIRS 和 MODIS 的透明度产品在空间上保持一致, 但 VIIRS 透明度产品的空间分辨率优于 MODIS, 环境监测能力较强。

关键词 海洋光学; 水体光学; Suomi NPP VIIRS; 光学特性; MODIS; 准分析算法

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0301001

Dynamic Change Characteristics and Its Dominant Influencing Factors of Secchi Disk Depth in Coastal and Inland Waters

Jia Houlei¹, Su Wen¹, Huang Huamei¹, Sun Qingyang¹, Jiang Guangjia², Ma Ronghua³

¹ South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangdong 510310, China;

² South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangdong 510300, China;

³ Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

Abstract Based on mass bio-optical data from Taihu Lake, Poyang Lake, Pearl River Estuary and Daya Bay, we propose a method called Secchi disk depth (SD_H) to evaluate the water transparency. The method is applied to the new generation water color satellite sensor Suomi NPP VIIRS. The dynamic change characteristics of water transparency are revealed. We analyze the dominant influencing factors of transparency in different waters, compare the transparency products of VIIRS and moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) in Pearl River Estuary, and discuss their water environmental monitoring capacity. The results show that the SD_H model constructed based on VIIRS at 488, 555, 672 nm is suitable for water investigation, which can explain 79% of the transparency variation. We apply the proposed model to VIIRS satellite remote sensing images after pretreatment, and get the spatial distribution characteristics of water transparency in Taihu Lake, Poyang Lake, Pearl River Estuary and Daya Bay. Compared to phytoplankton, the suspended sediments and chromophoric dissolved organic matter are the dominant factors influencing the Secchi disk depth in coastal and

收稿日期: 2017-09-13; 收到修改稿日期: 2017-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(41501411, 31500411)、国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室基金(SCS1617, 1722)、海岸带地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室基金(CZ15010)、海洋公益性行业科研专项(201405007, 201505008)、国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(1601, 1606)

作者简介: 贾后磊(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋生态环境保护方面的研究。E-mail: jiahoulei@163.com

* 通信联系人。E-mail: gjjiang2011@gmail.com

inland waters. Transparency products of VIIRS and MODIS are consistent in space. However, the transparency product of VIIRS has a better spatial resolution and a stronger environmental monitoring ability.

Key words ocean optics; water optics; Suomi NPP VIIRS; optical properties; MODIS; quasi-analytical algorithm

OCIS codes 010.0280; 010.1690; 010.4450; 010.3920

1 引 言

透明度是评价水质的重要参数^[1],也是水色遥感定量监测的生态指标^[2]。水体中影响透明度的主要光学活性物质包括悬浮物、浮游植物和有色溶解有机物(CDOM)^[3],这三种光学因子也是影响水体水下光场分布的主要因素。在无法现场测量水下辐照度/辐亮度的情况下,只能通过测量透明度来评价水下光场分布^[3]。水下光场分布影响着水体中生物、物理和化学动力学变化过程,以及水体与大气的热传输过程^[4-5]。利用遥感技术评价水体透明度的变化特征,有助于分析不同水域水下光场分布的时空变化特点,为精确定量评价水体光学活性物质的含量和动力学特征提供了数据和方法论支撑。

水色遥感的目的是在精确获取水体离水辐亮度或遥感反射比的情况下,通过建立其与水色参数含量之间的相关关系,实现水色参数含量的反演,以满足水色遥感监测或预测的现实需求^[6-7]。第一代水色遥感传感器始于20世纪70年代的海岸带扫描仪(CZCS)。随着卫星遥感技术的快速发展,SeaWiFS、中分辨率成像光谱仪(MODIS)、中等分辨率成像光谱仪(MERIS)、静止水色卫星(GOCD)等水色传感器相继问世^[8]。新一代的近极地水色卫星传感器 Suomi NPP VIIRS 于2011年10月发射,其水色波段与 MODIS 具有相似的波段配置,与 MODIS Aqua 过境时间相近,且具有较大幅宽(3000 km)和较高空间分辨率(750 m)^[9-10]。目前,对 Suomi NPP VIIRS 卫星遥感数据的相关研究主要集中在数据本身的评价以及水色产品对比分析和真实性检验^[10-15],而利用 Suomi NPP VIIRS 卫星遥感数据对水体(特别是针对内陆、河口和海湾水体)生态参量的评价较少^[16-17]。

水体透明度的遥感评价方法包括经验法^[18-20]和半分析法^[3,21-22]。经验法主要是建立遥感数据与水色参数含量之间的统计关系。对于透明度来说,以两波段比值法和多波段线性组合为主。半分析法侧重水体中光的辐射传输过程,但某些参数的获取仍采用经验法^[23]。就经验法而言,很多研究针对不同水域(内陆、海岸带和大洋水体等)提出了一元、多元

和遥感光谱变换等回归模式进行透明度遥感评价,决定系数在0.7~0.9之间变化,精度较高^[18]。Lee等^[22]基于MODIS卫星遥感影像提出了一种基于水体辐射传输理论的透明度半分析算法,该算法适用于湖泊、海岸带和海洋水体,并在渤海海域^[21]和水库^[24]得到了应用,精度较高。综上,针对不同水域的透明度遥感评价经验算法较多,但针对湖泊和海岸带水体的统一的经验模型还未见报道。基于辐射传输理论的半分析法在算法推算过程中涉及不同计算步骤间的误差传递过程,可能导致算法的精度不高,需要进行进一步验证^[24]。Letelier等^[25]基于MODIS卫星遥感影像提出了叶绿素荧光算法(FLH),该算法已应用于漂浮藻类的遥感监测^[26]。研究表明,基于三个波段的基线高度法有助于剔除大气的影响^[26],且有利于透明度遥感评价算法应用于卫星遥感影像,减小了大气校正的误差。

本文以光学特性复杂的内陆和海岸带水体(太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾)为研究区,利用现场生物-光学数据,基于基线高度算法构建了适用于不同水域光学特征的统一的透明度遥感评价算法——透明度高度(SD_H)法,并将其与已报道的经验法和半分析法进行了对比,最终将其应用于 Suomi NPP VIIRS 卫星遥感影像,以揭示研究水域透明度动态变化特征并找出透明度的主要影响因素。该研究成果有助于新一代水色卫星数据的推广应用,并能够为水色遥感的业务化应用提供技术支持。

2 材料与方 法

2.1 研究区及样点布设

选择太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域为研究区,图1为研究水域及其样点分布。太湖位于长江三角洲南部(30°55'N—31°32'N,119°53'E—120°36'E),是典型的大型浅水富营养化内陆湖泊,水面面积约2338 km²,平均水深为1.9 m^[27-28]。鄱阳湖是我国第一大淡水湖,全湖位于江西境内(28°22'N—29°45'N,115°47'E—116°45'E),北接长江,水位季节性变化显著^[29]。珠江口位于中国南海北部(21°30'N—23°10'N,113°10'E—114°20'E),属亚热带季风气候,该水域水体受地形、潮流和陆架上升流的作用和影响较大^[30],水体光学特性复

杂^[31]。大亚湾位于珠江口东侧(22°24'N—22°54'N, 114°30'E—114°45'E),属半封闭海湾,初级生产力较高^[32]。

分别于 2011-05-01—2011-05-08, 2011-08-08—2011-08-10, 2014-05-11—2014-05-13 和 2014-05-15—2014-05-18 在太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域布设样点并采集表层水样,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 139 个有效样点,如图 1 所示。分别在太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾选取 20% 的样点(共 28 个)用于透明度遥感评价模型的验证,其他样点(111 个)用于模型构建。2014 年 8 月和 10 月 VIIRS 卫星在珠江口和大亚湾水域准同步(时间窗口为±3 h,空间窗口大小为 3 pixel×3 pixel)采集 8 个样点,如图 2 所示,用于 VIIRS 卫星遥感影像预处理结果的验证。

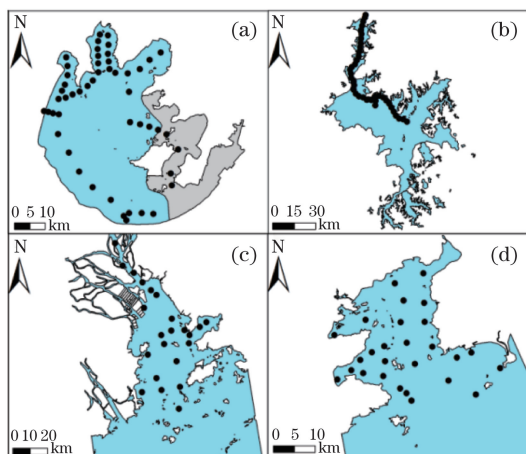


图 1 研究水域及其样点分布。(a)太湖;(b)鄱阳湖;
(c)珠江口;(d)大亚湾

Fig. 1 Investigated waters and sample point distributions.
(a) Taihu Lake; (b) Poyang Lake;
(c) Pearl River Estuary; (d) Daya Bay

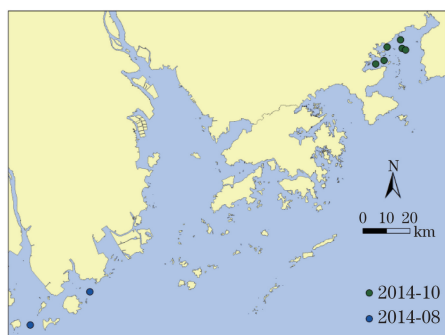


图 2 VIIRS 卫星遥感数据准同步样点分布

Fig. 2 Quasi-synchronization sample point distribution of remote sensing data from VIIRS satellite

2.2 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^[33]。使用美国光谱学应用与仪器公司生产的 FieldSpec Pro Dual VNIR 野外双通道光谱仪,其测量波段范围为 350~1050 nm,分别测定水体、灰板和天空光光谱,计算得到水体遥感反射比^[34]。测量时风速小于 3 m/s,测量时间为 9:00—15:00。

根据 VIIRS 卫星遥感传感器的波段响应,将实测光谱重采样为模拟的 VIIRS 数据,重采样方法见文献^[35]。

2.3 水体生态参数测量

利用直径为 20 cm 的塞氏盘深度测量法测量水体透明度(S_D)。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,即测量点的塞氏盘深度,此深度为透明度^[36]。

采用重量差法测量水体的悬浮物浓度(c_{TSS}),使用 Whatman GF/F 滤膜。利用分光光度计测定并计算叶绿素 a 的浓度(c_{Chla})。利用盐酸处理后的 Whatman Nuclepore 滤膜过滤水样,以 Milli-Q 水为参比,利用分光光度计扫描 200~800 nm 波段范围的吸光度,散射校正后计算得到 CDOM 吸收 $[a_{CDOM}(\lambda)]$ ^[37]。

2.4 卫星遥感影像数据获取与处理

在 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)官网(Climate Services and Monitoring Division, CLASS)下载太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域的 VIIRS L1B(SDR)数据产品(空间分辨率为 750 m)。利用 SeaDAS 7.4 软件(OBGP, NASA)对 VIIRS 数据进行预处理(几何校正、云掩模处理、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)^[16,38]。

2.5 透明度遥感评价模型

建立透明度遥感评价的经验模型主要采用单波段算法^[39]、波段比值法^[18]和三波段算法^[40]。透明度遥感评价的半分析算法是基于 Lee 等^[41]提出的准分析算法(QAA)模型,反演得到水体衰减系数后,建立透明度与衰减系数之间的定量关系^[24]。选取已报道的透明度遥感评价模型与提出的透明度高度法进行对比分析,模型表达式如表 1 所示。表 1 中 a 、 b 、 c 为拟合系数, $K_d(443, 448, 531, 547, 665)$ 为波长 443, 448, 531, 547, 665 nm 处的水体衰减系数, R_{rs}^r 为水体透射窗口内的遥感反射比。

基于 Lee 等^[22]提出的 QAA 模型的半分析算法的计算步骤如表 2 所示。表 2 中 $a(\lambda)$ 、 $b_b(\lambda)$ 分别为吸收和后向散射系数。

表 1 几种已报道的透明度遥感评价模型
Table 1 Transparency remote sensing evaluation models

Type	Model	Algorithm
Empirical model	Single-band model	$D_{SD} = a + bR_{rs} (678)$
	Band-ratio model	$D_{SD} = a + b[R_{rs} (488)/R_{rs} (555)]$
	Three-band model	$D_{SD} = a + bR_{rs} (678) + c[R_{rs} (488)/R_{rs} (555)]$
Quasi-analytical model	QAA-based model	$D_{SD} = \frac{1}{2.5 \min[K_d(443, 488, 531, 547, 665)]} \ln \frac{ 0.14 - R_{rs}^{tr} }{0.013}$

表 2 基于 QAA 的透明度遥感评价模型计算步骤
Table 2 Calculation procedure of transparency remote sensing evaluation model based on QAA

Step	Property	Expression
1	r_{rs}	$r_{rs} = R_{rs} / (0.52 + 1.7R_{rs})$
2	$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$	$u(\lambda) = \frac{-g_0 + (g_0^2 + 4g_1 r_{rs})^{1/2}}{2g_1}, g_0 = 0.089, g_1 = 0.125$
3	$a(555)$	$a(555) = a_w(555) + 10^{-1.146 - 1.366\chi - 0.469\chi^2}, \chi = \lg \frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(488)}{r_{rs}(555) + 5 \frac{r_{rs}(672)}{r_{rs}(488)} r_{rs}(672)}$
4	$b_{bp}(555)$	$b_{bp}(555) = \frac{u(555)a(555)}{1 - u(555)} - b_{bw}(555)$
5	η	$\eta = 2.0 \left\{ 1 - 1.2 \exp \left[-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)} \right] \right\}$
6	$b_{bp}(\lambda)$	$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(555) \left(\frac{555}{\lambda} \right)^\eta$
7	$a(\lambda)$	$a(\lambda) = \frac{[1 - u(\lambda)][b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)}$
8	$k_d(\lambda)$	$k_d(\lambda) = (1 + m_0 \theta_s) a(\lambda) + \left[1 - \gamma \frac{b_{bw}(\lambda)}{b_b(\lambda)} \right] m_1 \{ 1 - m_2 \exp[-m_3 a(\lambda)] \} b_b(\lambda),$ $m_0 = 0.005, m_1 = 4.26, m_2 = 0.52, m_3 = 10.8, \gamma = 0.265$
9	S_D	$S_D = \frac{1}{2.5 \min[K_d(443, 488, 531, 547, 665)]} \ln \frac{ 0.14 - R_{rs}^{tr} }{0.013}$

3 结果与分析

3.1 研究水域水体生态参数变化特征

研究水域的透明度在 0.10~5.50 m 之间变化,均值为(0.80±1.00) m(表 3)。透明度最大值出现在大亚湾水域,最小值出现在鄱阳湖水域。整体来看,大亚湾水域透明度最高[(2.41±1.28) m],珠江口次之[(0.84±0.44) m],太湖[(0.25±0.11) m]和鄱阳湖[(0.22±0.12) m]透明度相差不大。 c_{TSS} 与透明度具有相反的变化趋势,鄱阳湖

c_{TSS} 均值最高[(108.97±100.63) mg/L],其次是太湖[(48.31±37.16) mg/L],珠江口和大亚湾 c_{TSS} 均值相差不大。

对于 c_{Chla} 来说,太湖 c_{Chla} 均值最高[(23.17±64.93) $\mu\text{g/L}$],约为珠江口[(2.01±1.20) $\mu\text{g/L}$]的 12 倍,大亚湾水域 c_{Chla} 均值略小于鄱阳湖。 $a_{CDOM}(440)$ 均值最大值出现在鄱阳湖[(1.67±0.94) m^{-1}],太湖[(1.41±1.04) m^{-1}]次之,而珠江口[(0.55±0.27) m^{-1}]约为大亚湾[(0.26±0.18) m^{-1}]的 2 倍。

表 3 太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水体采样信息及其生态参数统计

Table 3 Sampling information and ecological parameter statistics of waters in Taihu Lake, Poyang Lake, Pearl River Estuary, and Daya Bay

Investigated area	Sampling date	Waters	Site No.	S_D / m	$c_{TSS} / (mg \cdot L^{-1})$	$c_{Chla} / (\mu g \cdot L^{-1})$	$a_{CDOM}(440) / m^{-1}$
Taihu Lake	2011-05-01—2011-05-08	Taihu Lake (2011-05)	51	0.25±0.11	48.31±37.16	23.17±64.93	1.41±1.04
Poyang Lake	2011-08-08—2011-08-10	Poyang Lake (2011-08)	38	0.22±0.12	108.97±100.63	6.53±7.54	1.67±0.94
Pearl River Estuary	2014-05-11—2014-05-13	Pearl River Estuary(2014-05)	23	0.84±0.44	25.45±18.53	2.01±1.20	0.55±0.27
Daya Bay	2014-05-15—2014-05-18	Daya Bay (2014-05)	27	2.41±1.28	21.97±5.58	4.92±1.55	0.26±0.18

3.2 基于 VIIRS 的透明度遥感评价模型

3.2.1 透明度对水体遥感反射比的影响

透明度与水体中的光学因子密切相关^[3],包括叶绿素 a、悬浮物和 CDOM,三者间接影响了水体的遥感反射比,是建立透明度遥感评价模型的基础。为分析水体透明度对 VIIRS 波段遥感反射光谱的影响,选取透明度为 0.1,0.5,1.0,2.0,5.0,8.0 m 对应的遥感反射光谱进行对比分析。

对 3 个相同透明度梯度的遥感反射光谱进行平均,分析透明度对遥感反射比的影响。选择太湖 2 个和鄱阳湖 1 个样点,对应的透明度为 0.1 m;选择珠江口 2 个和太湖 1 个样点,对应的透明度为 0.5 m;选择珠江口 3 个样点,对应的透明度为 1.0 m;选择大亚湾 2 个和珠江口 1 个样点,对应的透明度为 2.0 m;选择大亚湾 6 个样点,对应的透明度为 5.0 m 和 8.0 m。

图 3(a)给出了透明度对水体遥感反射光谱的影响。整体上,随着透明度的增大,水体遥感反射比逐渐降低。可以看出,当透明度大于 0.5 m 时,在 412~555 nm 波段范围内, $R_{rs}(\lambda)$ 随波长的增加逐渐增大。而在 555~865 nm 波段范围内, $R_{rs}(\lambda)$ 随波长的增加而逐渐减小,遥感反射峰出现在 555 nm 处;当透明度小于 0.5 m 时,在 672 nm 处出现遥感反射峰,在 555 nm 处也有较小反射峰。

3.2.2 透明度高度模型

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 488,555,672 nm 波段处变化敏感[图 3(a)]。评价叶绿素 a 浓度的荧光基线高度法 (FLH) 是以叶绿素在红波段 683 nm 处具有最大的荧光强度为基础^[25],而透明度的观测与波长有关,且以人眼观察到的反射光为基础^[22]。因此,以具有明显反射的 555 nm 波段为中心波段,构建 SD_H 法[图 3(b)],该方法以 555 nm

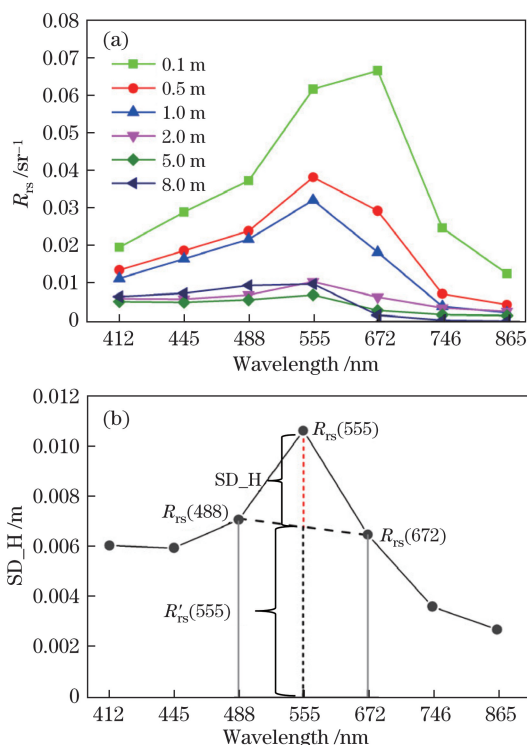


图 3 (a)透明度对水体遥感反射光谱的影响;(b) SD_H 处反射峰左右两侧通道的遥感反射比的连线为基线,计算 555 nm 处的遥感反射比在基线上的高度。

探讨透明度与 SD_H 之间的定量关系,以建立研究水域透明度的遥感评价模型,其具体表达式为

$$H_{SD_H} = R_{rs}(555) - R'_{rs}(555), \quad (1)$$

式中 $R_{rs}(555)$ 为 555 nm 处的遥感反射比, $R'_{rs}(555) = R_{rs}(488) + [R_{rs}(672) - R_{rs}(488)](555 - 488) / (672 - 488)$ 。

基于 SD_H 构建的透明度遥感评价模型如图 4 所示,可表示为

$$D_{SD} = 1.2 \exp(-83.2 H_{SD_H}) + 0.2, \quad (2)$$

此时决定系数 $R^2 = 0.79$, 样点个数 $N = 111$, 假设检

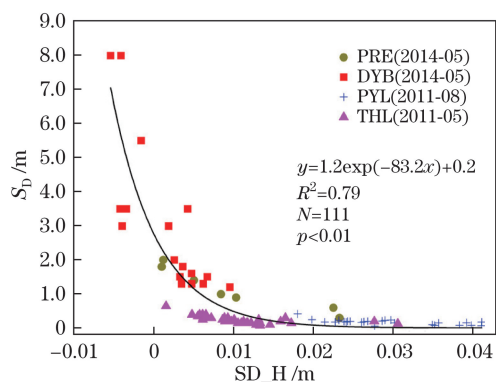


图 4 透明度与 SD_H 的关系

Fig. 4 Relationship between Secchi disk depth and SD_H
 验中的 p 值小于 0.01。

利用太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域 20% 的样点对模型进行验证,以评价模型的稳定性。图 5 给出了实测与模型计算得到的 S_D 之间的相关关系。结果表明,两者具有显著正相关关系($R^2 = 0.72, p < 0.01$),对应的数据点较为均匀地分布在 1:1 虚线周围,说明基于透明度高度法构建的透明度遥感评价模型具有较好的稳定性,可用于内陆和海岸带水体透明度的遥感评价。

3.2.3 透明度遥感评价模型的对比

已报道的单波段、波段比值、三波段和半分析模

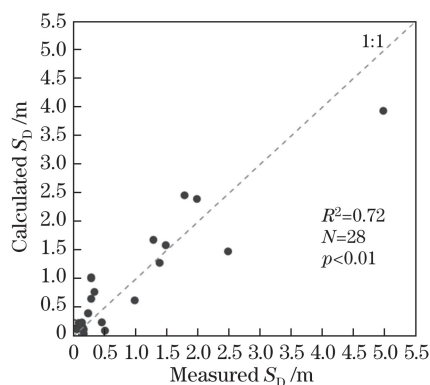


图 5 实测和计算透明度的关系

Fig. 5 Relationship between measured and calculated Secchi disk depth

型主要基于 EOS MODIS 卫星传感器波段进行计算,而所提模型采用的是 VIIRS 卫星传感器,故选择两者中心光谱相差最小的波段进行模型计算。

对比 5 种透明度评价方法,如图 6 所示。单波段和波段比值模型的效果都不理想($R^2 < 0.5$),但仍与透明度具有显著相关关系($p < 0.01$)。三波段模型表现出波段组合优势,评价精度有所提高($R^2 = 0.67, p < 0.01$)。基于 QAA 的半分析方法表现较好,估算与实测 S_D 相关性显著($R^2 = 0.80, p < 0.01$),但对透明度有所低估。而透明度高度法具有

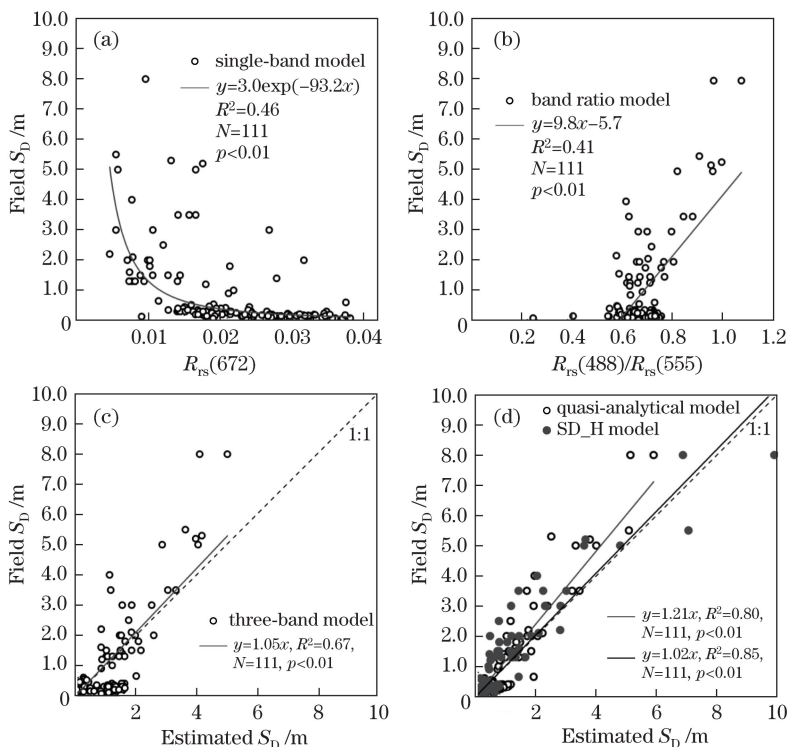


图 6 透明度遥感评价模型对比。(a)单波段模型;(b)波段比值模型;(c)三波段模型;(d) QAA 和 SD_H 模型

Fig. 6 Comparison of Secchi disk depth remote sensing evaluation models. (a) Single-band model;
 (b) band ratio model; (c) three-band model; (d) QAA and SD_H model

较高的精度,估算与实测 S_D 具有很好的相关关系 ($R^2=0.85, p<0.01$),保持了较好的一致性,对应数据均匀地分布在 1:1 虚线周围。因此,利用 VIIRS 的 488,555,672 nm 波段构建的透明度高度模型效果最好,适用于海岸带和内陆湖泊透明度的遥感评价。

3.3 透明度遥感评价模型的应用

基于 VIIRS 传感器 488,555,672 nm 这 3 个波段的遥感反射比计算得到了水体 SD_H ,并建立了研究水域 SD_H 与透明度之间的定量关系,如图 4 所示。可以看出,研究水域 SD_H 与透明度之间具有显著的负指数关系 ($R^2=0.79, p<0.01$),并以此构建了基于 SD_H 的水体透明度遥感评价算法。将该算法应用于 VIIRS 卫星遥感影像,以获取研究水域透明度的动态变化特征。

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,以分析 VIIRS 卫星遥感影像的预处理效果。结果发现,不同水色波段 (412,445,488,555,672,746,865 nm) 遥感反射比的绝对值相差很小,如图 7(a) 所示,且两者形状相近 (误差在 20% 以内),如图 7(b) 所示。在 488 nm 和 555 nm 波段处 VIIRS 卫星遥感数据结果略高于实测遥感反射比,这可能与大气校正输入参数有关。为了进一步验证卫星数据与实测数据的一致性,对比了基于 VIIRS 卫星数据和实测遥感反射比计算得到的 SD_H ,结果发现两者具有显著的相关关系 ($R^2=0.93, p<0.01$),并均匀分散在 1:1 虚线周围,说明基于两者遥感反射比计算得到的透明度高度保持较好的一致性,可用于揭示水域透明度的动态变化特征。

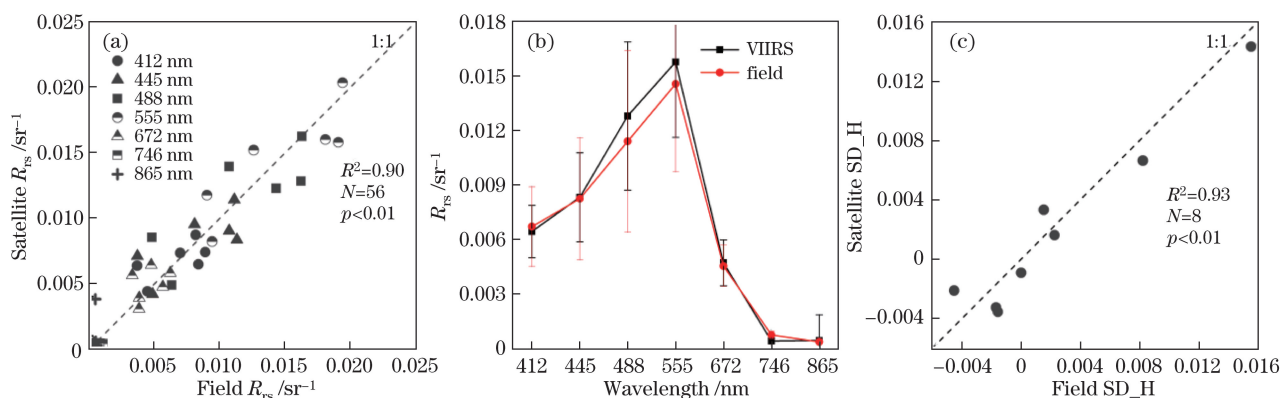


图 7 (a) 实测与卫星遥感反射比 R_{rs} 的对比; (b) 准同步采样点实测遥感反射光谱与卫星遥感影像反射光谱的对比; (c) 卫星遥感影像和实测 SD_H 的对比

Fig. 7 (a) Comparison of measured and satellite-derived remote sensing reflectance ratio R_{rs} ;

(b) comparison of remote sensing reflectance spectrum and satellite remote sensing image reflectance spectrum measured at quasi-synchronous sampling points; (c) comparison of satellite remote sensing image and measured SD_H

将所提算法应用于 2014-05-25 珠江口和大亚湾水体的 VIIRS 卫星遥感影像以及 2014-10-09 太湖和鄱阳湖水体的 VIIRS 遥感影像,获取研究水域透明度的空间分布情况,如图 8 所示。为了进一步验证卫星遥感数据的透明度评价结果,将 2014-05-11—2014-05-18 在珠江口和大亚湾水体的现场测量结果[图 8(b)]进行了对比分析。

对于珠江口和大亚湾水域,实测和卫星遥感数据计算结果保持较好的一致性[图 8(a)],特别是在珠江口水域,其透明度在 2.0 m 以下,并且呈现由西北部水域到东南部水域透明度逐渐增大的趋势。对于大亚湾海域,由内水到外海透明度逐渐增大,但遥感监测结果显示内水透明度在 2.0 m 以上,而现场测量透明度在 1.0~1.5 m 之间。两者的差异可

能与不同时期监测结果有关,但空间分布趋势保持一致。

太湖透明度变化范围为 0~0.5 m,如图 8(c) 所示,其东部水域为光学浅水水域,有大量水草分布,对水体遥感反射比影响较大^[7],故不考虑此水域[图 8(c)中灰色区域]。在空间上,透明度表现为由西南部水域向东北部水域逐渐升高,且最大值出现在竺山湾。北部 3 个湖湾的透明度均比较高,在 0.25 m 以上,而中部水域的透明度小于 0.20 m。

对于水位季节性变化显著的鄱阳湖,其北部湾口和航道内的透明度较低(小于 0.20 m),而东北部宽阔海域的透明度较高,并出现最大值[图 8(d)]。西南部水域的透明度高于北部湾口和航道,但低于东北部宽阔水域,绝大多数在 0.30 m 左右。

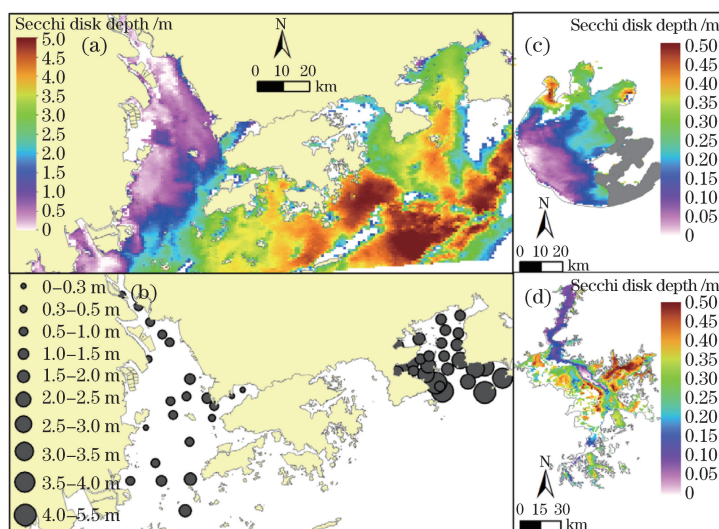


图 8 珠江口、大亚湾、太湖和鄱阳湖水域透明度空间分布情况。(a)珠江口、大亚湾卫星数据评价结果 (白色代表有云遮挡水域,透明度设置为 0);(b)珠江口、大亚湾现场监测数据;(c)太湖卫星数据评价结果;(d)鄱阳湖卫星数据评价结果

Fig. 8 Spatial distributions of Secchi disk depth in Pearl River Estuary, Daya Bay, Taihu Lake, and Poyang Lake. (a) Satellite data evaluation results in Pearl River Estuary and Daya Bay (white represents cloud-shaded water, where the transparency is set to zero); (b) field monitoring data in Pearl River Estuary and Daya Bay; (c) satellite data evaluation result in Taihu Lake; (d) satellite data evaluation result in Poyang Lake

4 讨 论

4.1 透明度的主导影响因素分析

按照光学特征,水体分为光学 I 类和 II 类,其中光学 II 类水体受水体中光学活性物质(悬浮物、浮游植物和 CDOM)的共同影响^[41]。透明度直接反映了光在水体中的传输深度,是水体中光衰减的综合响应^[3]。因此,水体中的光学活性物质是影响透明度的关键因素。

图 9 给出珠江口、大亚湾、太湖和鄱阳湖透明度与 c_{TSS} 、 c_{Chla} 和 $a_{CDOM}(440)$ 之间的相关关系。可以看出,除鄱阳湖水域的透明度与 $a_{CDOM}(440)$ 成正相关(相关系数 $r = 0.12$)之外,其他区域的透明度与水色参数含量成反比。通过对比不同水域透明度与水色参数含量之间的相关关系可以发现,透明度与 c_{TSS} 的相关性最好, r 的变化范围为 $-0.78 \sim -0.62$, 且均显著相关($p < 0.01$)。对于叶绿素 a 浓度而言,透明度与 c_{Chla} 仅在大亚湾水域具有极显著的负相关关系($r = -0.71, p < 0.01$),其他水域两者的相关性很差。珠江口和太湖水域的 $a_{CDOM}(440)$ 与透明度的相关性显著($-0.54 < r < -0.39, p < 0.05$),大亚湾和鄱阳湖水域的 $a_{CDOM}(440)$ 与透明度的相关性较差。

建立所有样点透明度与水色参数含量的关

系,如图 10 所示。可以看出透明度与 c_{TSS} 、 c_{Chla} 、 $a_{CDOM}(440)$ 具有显著的负相关关系($p < 0.01$),说明三者对水体透明度均产生重要影响。同时发现,透明度与 c_{TSS} 的相关性最好($R^2 > 0.60$),CDOM 吸收系数次之($R^2 = 0.45$),而与 c_{Chla} 相关性最差,决定系数仅为 0.15。这说明对于海岸带和内陆水体,悬浮物和 CDOM 是影响水体透明度的主导因素,且悬浮物的影响更为显著。

研究发现,虽然太湖水体浮游藻类含量很高,但由于太湖较浅,底泥对水体中悬浮物含量的贡献较大,太湖水体的主导光学因子仍然是悬浮泥沙^[42]。对于鄱阳湖水体,悬浮泥沙在光学特性中占绝对优势^[29]。对于珠江口和大亚湾水体,悬浮泥沙和 CDOM 主导了水体的光学特性^[43]。综上所述,浮游植物在内陆和海洋近岸水体中处于劣势,对水体光学特性的影响较小,对水体透明度产生较小影响。

4.2 透明度遥感评价模型对比分析

选取的研究区域涵盖富营养化极为严重的太湖水体、高悬浮泥沙且水位季节性强的鄱阳湖水体、咸淡水混合且水动力复杂的珠江口水体以及相对封闭且初级生产力较高的大亚湾水体,采样期跨及 2011—2014 年,样点代表性较强,说明基于 VIIRS 卫星数据 488,555,672 nm 计算得到的 SD_H 对不同光学特征的水体透明度具有较好的区分能力。同

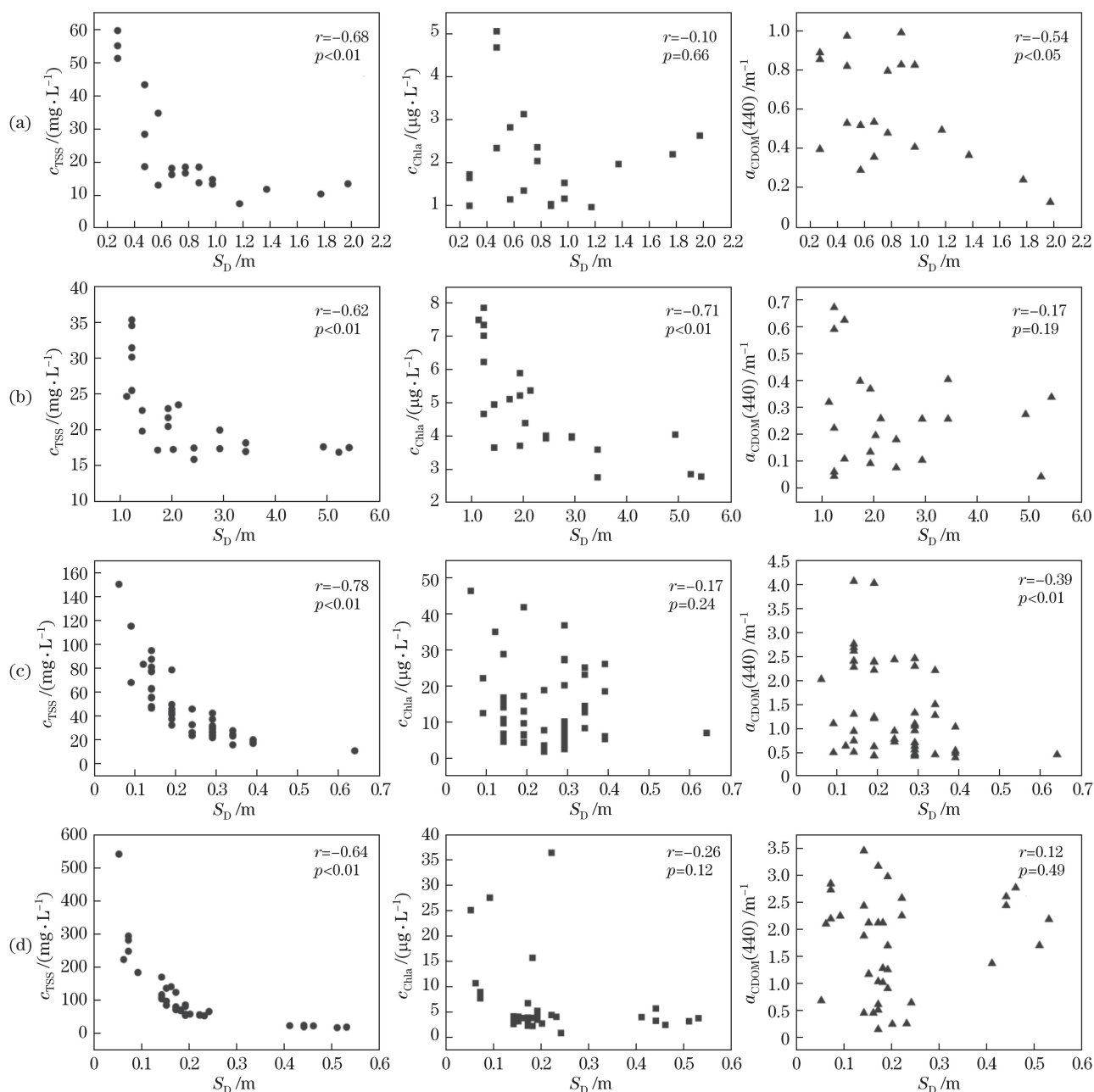


图9 水域透明度与 c_{TSS} 、 c_{Chla} 和 $a_{CDOM(440)}$ 的相关关系。(a)珠江口;(b)大亚湾;(c)太湖;(d)潘阳湖

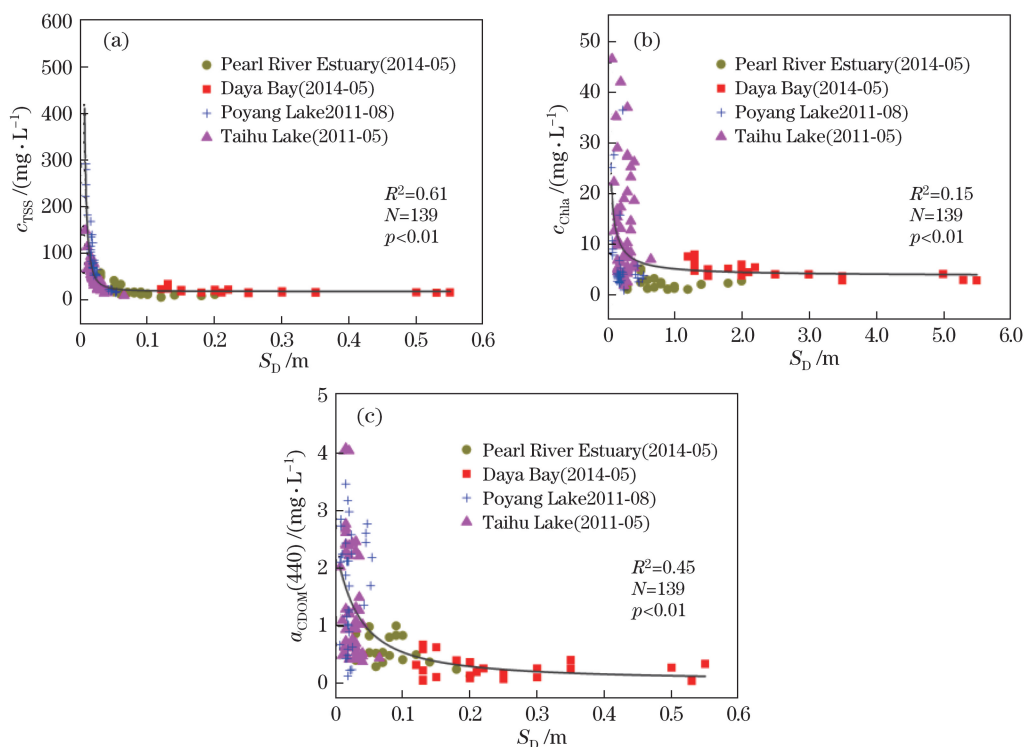
Fig. 9 Correlation among Secchi disk depth of investigated waters, c_{TSS} , c_{Chla} and $a_{CDOM(440)}$.

(a) Pearl River Estuary; (b) Daya Bay; (c) Taihu Lake; (d) Poyang Lake

时,对于水体中的光学物质而言,CDOM在紫外和可见光波段具有较强的吸收,悬浮泥沙在555 nm附近的散射较强,浮游植物色素在490 nm和665 nm处具有显著吸收。因此,考虑488,555,672 nm处的遥感信息与水体透明度的相关关系具有一定的物理意义。

基于488,555,672 nm构建的单波段和波段比值算法并不适应光学特性复杂且多变的水体,对透明度的区分能力较弱(图6),这可能与水体光学组

分所占比例有关,即需同时考虑水体中所有光学物质的光学特点才能提高评价精度。同时,赛氏盘法测得的透明度是水体和环境因素等综合信息,而水色要素在垂直方向上具有明显差异,导致不同水深处水体组分比例不同^[44],因此单波段和波段比值模型效果较差。综合考虑不同水色要素光学特性的三波段模型的精度有所提高,但对较低的透明度区分效果较差(图6),说明透明度与这三个特征波段不能用简单的线性关系进行描述。

图 10 所有样点透明度与(a) c_{TSS} 、(b) c_{Chla} 和(c) $a_{CDOM(440)}$ 的相关关系Fig. 10 Correlation among Secchi disk depth of all sampling points, (a) c_{TSS} , (b) c_{Chla} and (c) $a_{CDOM(440)}$

基于 QAA 的半分析方法虽然加入了一定的经验参数,但该方法实现了从水体表观光学量到固有光学量的定量推演^[24],精度得到大幅提高,特别是对较低透明度的区分能力有所增强。整体上,该方法低估了透明度,特别是当透明度大于 2.0 m 时,其误差可能是由参数之间的传递所导致的^[24]。例如,衰减系数 $k_d(\lambda)$ 的值取决于通过 QAA 计算得到的 $a(\lambda)$ 和 $b_{bp}(\lambda)$,而 QAA 对于不同浑浊程度的水体有一定的适应条件,需要更改参考波长才能获得较准确的 $a(\lambda)$ 和 $b_{bp}(\lambda)$ ^[24]。因此,对于浑浊程度差异较大的海岸带和内陆水体而言,QAA 的适应能力受到一定的限制,导致透明度被低估。在今后的研究中,需要进一步对 QAA 的适应条件进行分类,以获取更为准确的固有光学量。

所提出的基于 488, 555, 672 nm 波段的透明度高度法充分考虑了不同水体组分的影响特点,在透明度较低的内陆水体中具有较好的评价精度,适用于不同光学条件水体透明度的遥感评价。此外,该方法有助于提升大气校正的效果,且有利于卫星遥感数据的推广应用^[45]。

4.3 新一代水色卫星 VIIRS 的透明度产品

新一代的水色卫星传感器 Suomi NPP VIIRS 具有较高的空间分辨率 (750 nm) 和较大的幅宽

(3000 km),同时在在轨校准和数据质量控制方面更为严格^[10],为精确评价水色参数含量提供了硬件技术支撑。

与 MODIS 相比,VIIRS 的空间分辨率整体上有提高,但波段宽度有所增加且波段数减少,因此 VIIRS 的空间分辨率对水体环境变化的敏感度可能会有所降低,如表 4 所示。VIIRS 没有对浮游植物色素敏感的 678 nm 波段,这限制了其在海岸带水体浮游植物变化研究中的应用^[14]。为评价 VIIRS 卫星遥感影像透明度产品的优劣,将 2014-01-03 的 VIIRS 和 MODIS Aqua 透明度产品进行对比。由于两者成像时间差别较小 (VIIRS: 5:58 UTC, MODIS Aqua: 6:00 UTC),可从空间上进行比较。MODIS Aqua 的波段选择为 488, 555, 667 nm,空间分辨率为 1000 m。研究发现^[14],MODIS Aqua 667 nm 和 VIIRS 672 nm 的遥感反射比保持很好的一致性 ($R^2=0.94$, 遥感反射比均值 $R_{\text{mean}}=0.96$),因此两者透明度遥感评价结果在空间和光谱上均具有可比性。

基于 VIIRS 和 MODIS Aqua 卫星遥感影像数据的透明度产品均能反映出珠江口水域透明度的空间分布特征,如图 11 所示,透明度由西北部水域到东南部水域逐渐增大。总体上,两者透明度空间分

表 4 VIIRS 和 MODIS 水色波段设置对比

Table 4 Comparison of water color band settings of VIIRS and MODIS

VIIRS				MODIS			
Band	Central wavelength /nm	Wavelength range /nm	Spatial resolution /m	Band No.	Central wavelength /nm	Wavelength range /nm	Spatial resolution/m
M1	412	20	750	8	412	15	1000
M2	445	18	750	9	443	10	1000
M3	488	20	750	10	488	10	1000
M4	555	20	750	3	469	20	500
I1	645	50	375	12	551	10	1000
M5	672	20	750	4	555	20	500
M6	751	15	750	1	645	50	250
M7	865	39	750	13	667	10	1000
I2	865	39	375	15	748	10	1000
				16	870	15	1000
				2	859	36	250

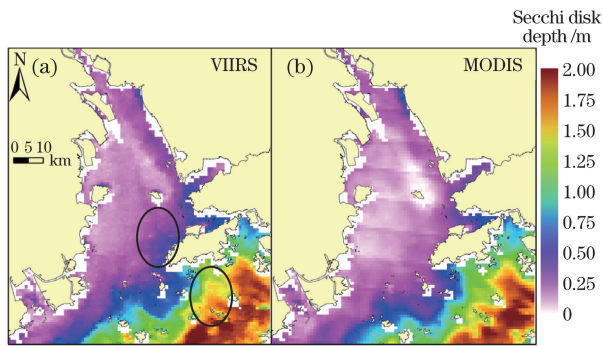


图 11 2014-01-03 珠江口 VIIRS 和 MODIS Aqua 透明度产品对比。(a) VIIRS; (b) MODIS

Fig. 11 Comparison of Secchi disk depth products between VIIRS and MODIS Aqua observations on 2014-01-03 in Pearl River Estuary. (a) VIIRS; (b) MODIS

布相似,但在细节上 VIIRS 比 MODIS Aqua 刻画得更细致(黑色椭圆范围内),但 MODIS Aqua 透明度产品更平滑,这主要与空间分辨率的差异有关。在珠江口西南部水域,两者透明度绝对值有一定的差异,基于 VIIRS 计算得到的透明度高于基于 MODIS 计算得到的透明度,这可能与中心波长差异及大气校正参数输入有关^[16]。总之,对于悬浮物和 CDOM 为光学主导的水体而言,新一代在轨水色传感器 VIIRS 在空间分辨率上有一定的优势,将在水体生态参量的定量遥感评价中发挥重要作用。

5 结 论

太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾透明度的变化范围为 0.10~5.50 m[均值为(0.80±1.00) m]。大亚

湾水体的透明度最高,鄱阳湖最低。基于研究水域现场生物-光学数据,利用新一代水色卫星传感器 Suomi NPP VIIRS 的 488,555,672 nm 波段构建了透明度高度法,评价了太湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水体的透明度变化特征,算法精度较高($R^2 = 0.79, N = 111, p < 0.01$),可区分 0~8.0 m 之间的透明度变化。经过验证,将所提算法应用于预处理后的 VIIRS 卫星遥感影像,获取了研究水域透明度的空间分布情况。其中,珠江口和大亚湾水域实测透明度与卫星评价结果空间分布十分相近。对于海岸带和内陆水体,影响水体透明度的主导光学因子是悬浮物和 CDOM,而浮游植物的影响较小。通过对比分析 VIIRS 和 MODIS Aqua 在珠江口水域的透明度产品,发现两者均可反映透明度空间分布特征,但 VIIRS 具有较高的空间分辨率,对透明度具有较强的细节刻画能力。

致谢 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊-流域数据集成与模拟中心湖泊-流域科学数据共享平台提供的 MODIS 卫星遥感数据。

参 考 文 献

- [1] Bukata R, Jerome J, Bruton J. Relationships among Secchi disk depth, beam attenuation coefficient, and irradiance attenuation coefficient for Great Lakes waters[J]. Journal of Great Lakes Research, 1988, 14(3): 347-355.
- [2] Doron M, Babin M, Hembise O, et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms using

- MERIS, MODIS and SeaWiFS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 2986-3001.
- [3] Alikas K, Kratzer S. Improved retrieval of Secchi depth for optically-complex waters using remote sensing data[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 218-227.
- [4] Megard R, Berman T. Effects of algae on the Secchi transparency of the southeastern Mediterranean sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1640-1655.
- [5] 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.
- [6] Miller R L, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentration of total suspended matter in coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 259-266.
- [7] Ma R H, Duan H T, Tang J W, *et al.* Remote sensing of lake water environmental[M]. Beijing: Science Press, 2010: 31-32.
马荣华, 段洪涛, 唐军武, 等. 湖泊水环境遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 31-32.
- [8] IOCCG. Status and plans for satellite ocean-color missions: Considerations for complementary missions[R]. Halifax: IOCCG, 1999.
- [9] Hillger D, Seaman C, Liang C, *et al.* Suomi NPP VIIRS Imagery evaluation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(11): 6440-6455.
- [10] Xiong X, Butler J, Chiang K, *et al.* VIIRS on-orbit calibration methodology and performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(9): 5065-5078.
- [11] Sun J, Wang M. VIIRS reflective solar bands calibration progress and its impact on ocean color products[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 194-213.
- [12] 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.
- [13] 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(4): 398-414.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Joshi I, D'Sa 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.
- [17] 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.
- [18] Yu D F, Zhou Y, Xing Q G, *et al.* Retrieval of Secchi disk depth using MODIS satellite remote sensing and *in situ* observations in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(5): 774-779.
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.
- [19] Zhang C G, Zeng Y D. Remote sensing monitoring and spatial-temporal change of seawater transparency in Taiwan Strait[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(2): 73-81.
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.
- [20] Wang X F, Zhang T L, Tian L, *et al.* Secchi disk depth retrieval and merging in the northwest Pacific from multiple missions of ocean color remote sensing[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(12): 133-141.
王晓菲, 张亭祿, 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Yu D F, Xing Q G, Shi P. A review on the estimation of Secchi disk depth by remote sensing in inland and nearshore case 2 waters[J]. *Marine Science*, 2015, 39(7): 136-144.
禹定峰, 邢前国, 施平. 内陆及近岸二类水体透明度的遥感研究进展[J]. *海洋科学*, 2015, 39(7): 136-144.
- [24] Rodrigues T, Alcântara E, Watanabe F, *et al.* Retrieval of Secchi disk depth from a reservoir using a semi-analytical scheme[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 213-228.
- [25] Letelier R, Abott M. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the Moderate Resolution

- Imaging Spectrometer (MODIS)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(2): 215-223.
- [26] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [27] Qin B Q, Hu W P, Chen W M, *et al.* Process and mechanism of environmental changes of Lake Taihu[M]. Beijing: Science Press, 2004: 2-8.
秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 2-8.
- [28] Duan H T, Ma R H, Xu X F, *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10): 3522-3528.
- [29] Wu G, Cui L, Duan H, *et al.* Absorption and backscattering coefficients and their relations to water constituents of Poyang Lake, China[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): 6358-6368.
- [30] Mao Q, Shi P, Yin K, *et al.* Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1797-1808.
- [31] 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(9): 1085-1094.
- [32] 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(4): 506-515.
- [33] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 37-44.
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.
- [34] Mobley C. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(26): 7442-7455.
- [35] Yang G J, Liu Q H, Huang H G, *et al.* Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(1): 15-21.
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.
- [36] Mezhoud N, Temimi M, Zhao J, *et al.* Analysis of the spatio-temporal variability of seawater quality in the southeastern Arabian Gulf[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 106(1/2): 127-138.
- [37] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1): 43-53.
- [38] Bailey S, Franz B, Werdell P. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing[J]. *Optical Express*, 2010, 18(7): 7521-7527.
- [39] Cong P F, Qu L M, Han G C, *et al.* Remotely sensed estimation model of ocean water transparency in Liaodong Gulf[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 295-299.
丛丕福, 曲丽梅, 韩庚辰, 等. 辽东湾海水透明度的遥感估算模型[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 295-299.
- [40] Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(12): 2369-2378.
- [41] 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.
- [42] Jiang G J, Su W, Ma R H, *et al.* Remote estimation and temporal-spatial variability of particulate organic carbon concentrations in eutrophic inland water[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2015, 34(2): 203-210.
姜广甲, 苏文, 马荣华, 等. 富营养化水体颗粒有机碳浓度的遥感估算及动态变化特征[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(2): 203-210.
- [43] Jiang G J, Duan G Q, Huang Z X, *et al.* Remote sensing classification of the dominant optically active components and its variations in the Pearl River Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(9): 64-75.
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.
- [44] Huang C C, Li Y M, Xu L J, *et al.* Influence of vertical distribution of water consistent to precision of remote sensing retrieval algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101002.
黄昌春, 李云梅, 徐良将, 等. 水色要素垂直分布对其遥感反演算法精度的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101002.
- [45] Li H, He X Q, Ding J, *et al.* Validation of the remote sensing products retrieved by geostationary ocean color imager in Liaodong Bay in Spring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401002.
李豪, 何贤强, 丁静, 等. 春季辽东湾静止轨道海洋水色遥感产品的真实性检验[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401002.