

基于半分析算法的海岸带和内陆水体 悬浮物浓度遥感估算

娄全胜^{1,2}, 张纯超¹, 邓伟^{1,2}, 苏文³, 姜广甲^{1,2*}, 马荣华^{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 510300;

⁴中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008

摘要 水体总悬浮物(TSS)会影响光在水体中的传播过程及水体的生态功能,在水生生态系统中起着重要作用。基于 2009~2014 年在太湖、巢湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾采集的生物-光学数据,分析了 TSS 浓度变化的遥感响应波段,构建了海岸带和内陆水体 TSS 浓度遥感定量估算模型,并结合 VIIRS(Visible infrared imaging radiometer suite)卫星遥感数据揭示了水体 TSS 浓度的时空分布特征。结果表明,由不同水体组分贡献的比值模型 $[R_{rs}(865)/k_d(555)]$ 可以解释 81% 的 TSS 浓度变化,其中, $R_{rs}(865)$ 为 865 nm 处的遥感反射比, $k_d(555)$ 为 555 nm 处的水体衰减系数。相比已报道的其他经验模型,本模型的估算精度有明显提高。验证结果表明,该模型可适用于海岸带和内陆水体,将其应用于预处理后的 VIIRS 卫星遥感数据,揭示了太湖和珠江口水域水体 TSS 浓度的空间和季节变化规律。

关键词 海洋光学; 水色遥感; 二类水体; 富营养化水体

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1901003

Remote Sensing Estimation of Suspended Solids Concentrations in Coastal and Inland Waters Based on Quasi-Analytical Algorithm

Lou Quansheng^{1,2}, Zhang Chunchao¹, Deng Wei^{1,2}, Su Wen³, Jiang Guangjia^{1,2*}, Ma Ronghua^{4**}

¹South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangdong 510300, China;

²Nansha Islands Coral Reef Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Guangzhou, Guangdong 510300, China;

³South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangdong 510300, China;

⁴State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

Abstract Total suspended solids (TSS) in water plays a key role in aquatic ecosystems, due to its influences on light propagation in waters and the biological functions of waters. With the bio-optical data collected during 2009—2014 from Taihu Lake, Chaohu Lake, Poyang Lake, Pearl River Estuary, and Daya Bay, this work analyzed the

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(42071338, 41431176, 41771366)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011420)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0404)、2019 年广东省促进经济高质量发展专项资金海洋经济发展项目(GDOE[2019]A46)

通信作者: *gjjiang2011@gmail.com; **mrhua2002@niglas.ac.cn

remote sensing response bands for variations of TSS concentrations and constructed a remote sensing-based quantitative estimation model for TSS concentrations in coastal and inland waters. The visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) satellite remote sensing data were employed to obtain the temporal and spatial distribution characteristics of the TSS concentrations. The results show that the model of the band ratio $[R_{rs}(865)/k_d(555)]$ contributed by different components of water can explain 81% of the TSS concentration changes. In the model, the $R_{rs}(865)$ is the remote sensing reflectance at 865 nm and the $k_d(555)$ is the attenuation coefficient of the waters at 555 nm. Compared with other empirical models that have been reported, this model has significantly improved estimation accuracy. The verification results show that the model can be applied to coastal and inland waters. When applied to pre-processed VIIRS satellite remote sensing data, it can reveal the spatial and seasonal variations of TSS concentrations of in waters from Taihu Lake and the Pearl River Estuary.

Key words oceanic optics; water color remote sensing; case II waters; eutrophic waters

OCIS codes 010.7340; 120.0280; 280.4788

1 引言

水体中的总悬浮物(TSS)是有机悬浮物 and 无机悬浮物的总称^[1],主要包括浮游生物、动植物遗体、浮游植物非色素细胞物质和悬浮泥沙等^[2-3]。悬浮物在水生生态系统中会直接影响光在水体中的传播过程及水体的生态功能和元素地球化学循环^[4-5],且会影响水下光能的再分配过程和垂向分布^[6],决定了水体的透明度、真光层深度、水色等光学性质,对水下浮游植物的光合作用和初级生产力水平产生了重要影响^[7-9]。因此,摸清悬浮物浓度的动态变化特征对于深入理解水体动力变化过程、精确评价水体初级生产力具有重要意义^[10-11]。

基于现场布设样点监测悬浮物浓度的传统方法难以实现高频次、大尺度悬浮物浓度的动态变化特征,但现场悬浮物数据可为基于卫星遥感数据的模型驱动方法提供真实性检验和构建模型使用的基础数据集^[12]。随着卫星遥感技术的快速发展,现场测量数据和卫星遥感数据的融合已成为一种探测水体中悬浮物浓度时空分布的有效手段^[9]。国内外学者基于卫星遥感数据建立的经验模型(Empirical model)和半分析算法(QAA)定量评价了海洋和内陆水体中悬浮物浓度的动态变化过程^[4, 13-21],但悬浮物浓度的遥感估算模型主要适用于特定水域,能同时适用于海岸带和内陆水体的模型相对较少。在估算悬浮物浓度时使用的卫星遥感传感器主要包括海洋宽视场成像遥感器(SeaWiFS)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)、Lansat TM/ETM/OLI 和 SPOT 等。NASA 在 2011 年成功发射的 NPP 卫星搭载了新一代水色卫星传感器——VIIRS(Visible infrared imaging radiometer suite),该传感器与 MODIS Aqua 过境时间基本一致,且水色波段(412~862 nm)设置相似,但其性能更优越^[22],具有双增益动态监

测、幅宽较大及水体信号不易饱和等特点^[23]。VIIRS 作为 MODIS 的延续传感器,已应用于水色参数浓度的遥感定量反演研究^[23-24],但基于 VIIRS 的水色遥感产品还需进一步的精度验证和定量评价。

本文以太湖、巢湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域为研究区域,分析了悬浮物浓度对水体遥感反射光谱的影响,构建了适用于海岸带和内陆水体的悬浮物浓度遥感估算模型,并利用石头口门水库水体的生物光学数据对模型进行验证。此外,基于 2014 年 VIIRS 卫星的遥感数据获取了研究水域水体中悬浮物浓度的时空变化特征,为基于 VIIRS 卫星遥感数据水色遥感产品的推广应用提供了新思路。

2 数据与方法

2.1 数据采集与处理

2009~2014 年在太湖、巢湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域布设样点,利用 GPS 进行定位,采集每个样点的水体透明度、水体光谱、风速风向、水深等数据,并记录水环境状况,结果如图 1 所示。实验共获取 231 个有效采样点,采样点的信息如表 1 所示,采集表层水样后立即将水样运至实验室分析水质参数。此外,将 2009 年 5 月 20 日在石头口门水库采集的悬浮物浓度数据和遥感反射光谱数据用于模型的验证实验中。

用 FieldSpec Pro Dual VNIR 野外双通道光谱仪(测量波长范围为 350~1050 nm)、采用水面之上测量法测量并计算水体遥感反射比 $R_{rs}(\lambda)$ (单位为 sr^{-1})^[25],其中, λ 为波长。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[26]一致。利用分光光度计测量水体中叶绿素 a 的浓度 c_{Chla} (单位为 $\mu g/L$)^[27]。用重量差法测量悬浮物的浓度,用预处理(450 °C, 4~6 h)后的 Whatman GF/F 滤膜过滤水样,在

105 °C 温度环境下烘干 4 h 后用精度为 0.0001 g 的天平称重,并计算得到各水样的 TSS 浓度 c_{TSS} (单位为 mg/L)。将各样点滤膜在 450 °C 温度下烧 4~

6 h 后称重,然后计算无机悬浮物的质量和各参数的浓度^[27]。其中,无机悬浮物的浓度为 c_{ISS} ,有机悬浮物的浓度为 c_{OSS} ,单位均为 mg/L。

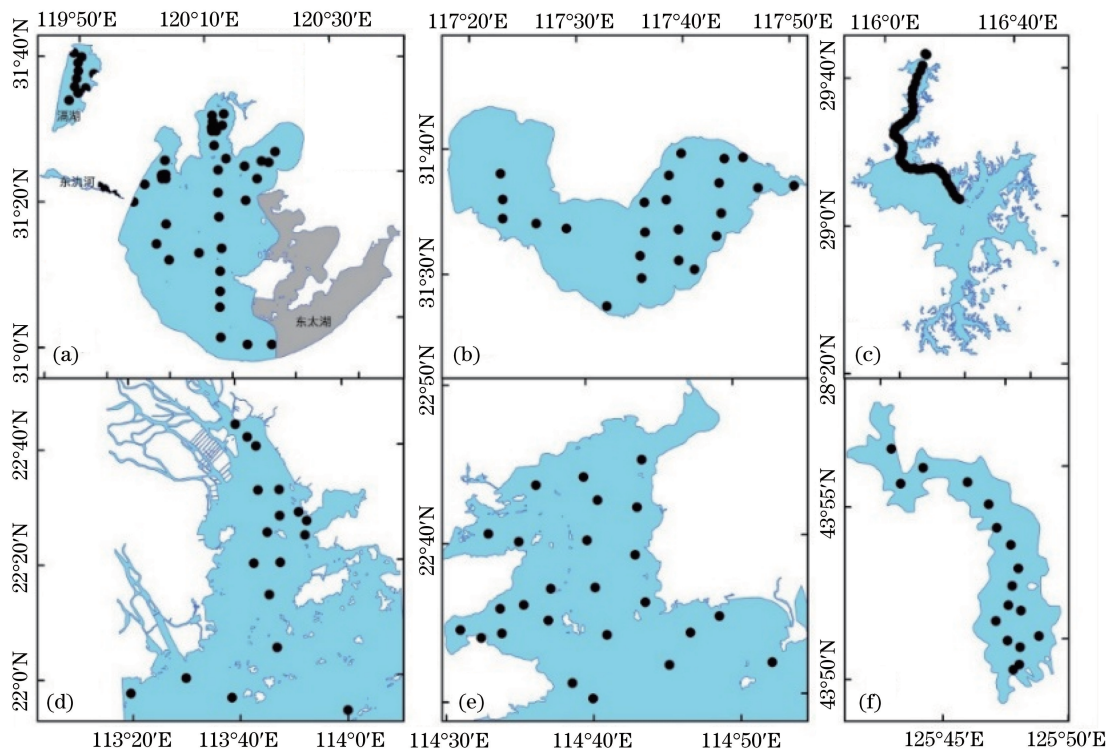


图 1 采样点的分布。(a)太湖;(b)巢湖;(c)鄱阳湖;(d)珠江口;(e)大亚湾;(f)石头口门水库

Fig. 1 Distribution of sampling sites. (a) Taihu Lake; (b) Chaohu Lake; (c) Poyang Lake; (d) Pearl River Estuary; (e) Daya Bay; (f) Shitoukoumen Reservoir

表 1 研究区的采样点信息

Table 1 Sampling sites information in the study area

Study area	Sampling date	Proxy	Sampling site
Taihu Lake	Apr. 23-May 2, 2010	THL-201004	102
Chaohu Lake	Oct. 15-16, 2009	CHL-200910	37
Poyang Lake	Oct. 15-17, 2010	PYL-201010	47
Pearl River Estuary	Aug. 11-15, 2014	PRE-201408	21
Daya Bay	Aug. 19-21, 2014	DYB-201408	24
Shitoukoumen Reservoir	May 20, 2009	STKM-200905	17

2.2 VIIRS 卫星遥感数据处理

在 NOAA 官网 CLASS(Climat services and monitoring division) 上下载 98 幅天气晴朗时 VIIRS L1B 的 SDR(Sensor data record)数据,其空间分辨率为 750 m。VIIRS 数据的预处理利用 SeaDAS 7.4 软件(OBGP, NASA)完成,大气校正采用近红外迭代法(Iterative NIR correction-BFW10)^[28]。2014 年 8 月和 10 月在珠江口和大亚湾水域布设样点,将采集的遥感反射光谱数据与准同步的 VIIRS 卫星数据(时空匹配窗口:± 3 h, 3 pixel×3 pixel)进行匹配,结果如图 2 所示。

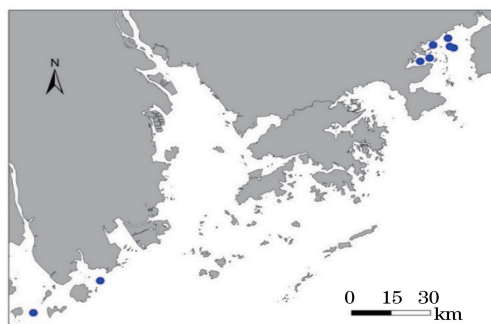


图 2 卫星遥感影像与现场光谱测量的准同步样点分布
Fig. 2 Spatial distribution of quasi-synchronous stations from satellite observations and field measurements

针对内陆和海岸带水体构建的悬浮物浓度遥感估算模型使用 555 nm 和 865 nm 两个波段,因此仅对比这两个波段的遥感反射比,同时对比了准同步实测遥感反射比与经大气校正的遥感影像获取的遥感反射比的光谱形状,结果如图 3 所示。可以发现,实测和卫星遥感影像获得的 $R_{rs}(555)$ 和 $R_{rs}(865)$ 均匀分布在 1:1 线周围,如图 3(a) 所示;且两者的均值形状相近,如图 3(b) 所示。488 nm 和 555 nm 处的遥感反射比有一定差异,但误差较小(小于 8%),这表明可将该模型应用于大气校正后的 VIIRS 遥感影像中,以展示研究水域水体中 TSS 浓度的时空变化特征。

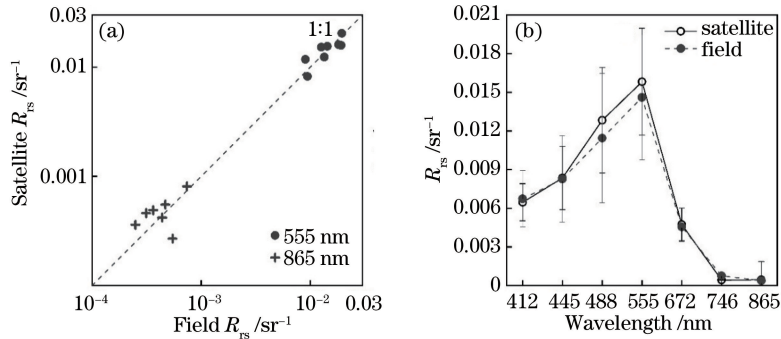


图 3 实测与卫星遥感影像的 R_{rs} 。(a) $R_{rs}(555)$ 和 $R_{rs}(865)$; (b) 遥感反射光谱

Fig. 3 R_{rs} of measured and satellite remote sensing images. (a) $R_{rs}(555)$ and $R_{rs}(865)$; (b) remote sensing reflectance spectra

三波段模型可表示为

$$c_{TSS} = [R_{rs}(555) + R_{rs}(672)] - a \times [R_{rs}(488)/R_{rs}(555)]. \quad (3)$$

2.4 模型精度评价方法

利用 TSS 浓度现场实测值对模型估算值的可靠性与鲁棒性进行验证和分析,用观测值与模拟值之间的相对均方根误差(r_{RMSE})、决定系数(R^2)和平均绝对误差(X_{MAE})评价估算模型的性能优劣。

3 实验结果

3.1 研究水域水体的水色参数浓度

不同水域水体水色参数(c_{Chla} 、 c_{TSS} 、 c_{ISS} 和 c_{OSS}) 的浓度如表 2 所示,可以发现,不同水体水色参数的浓度均值差异显著,总体来说,内陆水体的水色参数浓度高于海岸带水体。CHL-200910 的叶绿素 a 浓度均值最大,为 $(377.45 \pm 761.59) \mu\text{g/L}$, 变异系数也最大,为 2.0,这表明巢湖水体的 c_{Chla} 空间差异较大,其次为太湖水体(THL-201004)。叶绿素 a 浓度的最小值出现在珠江口水域(PRE-201408),为 $(1.46 \pm 0.79) \mu\text{g/L}$,但其变异系数与大亚湾水域(DYB-201408)的差异很小,这表明两个水域中 c_{Chla}

2.3 遥感模型

水体中悬浮物浓度的遥感估算主要以经验方法为主,使用的波段主要包括 488, 555, 672, 751, 865 nm (参考 VIIRS 的波段设置)。利用研究水域水体的生物光学数据评价几种现有模型的适用性, TSS 浓度的经验模型主要采用单波段模型^[11]、波段比值模型^[7]和三波段模型^[29],其中,单波段模型可表示为

$$c_{TSS} = a_1 \times R_{rs}(\lambda)^{b_1}, c_{TSS} = a_2 \times R_{rs}(\lambda) + b_2, \\ c_{TSS} = a_3 \times R_{rs}(\lambda) + a_4 \times R_{rs}(\lambda)^2 + b_3, \quad (1)$$

式中, a 和 b 为拟合系数, $\lambda = 672, 751, 865 \text{ nm}$ 。波段比值模型可表示为

$$c_{TSS} = a \times [(R_{rs}(865)/R_{rs}(555))] + b. \quad (2)$$

的空间差异较小。悬浮物浓度的最大值仍出现在巢湖,且该水域的悬浮物浓度约为太湖水体的 2.3 倍。鄱阳湖(PYL-201010)与珠江口的悬浮物浓度均值相差不大,但均大于太湖和大亚湾,其中,大亚湾的 c_{TSS} 均值最小。巢湖水体的 c_{ISS} 均值最小,鄱阳湖最大,其次为珠江口,太湖水体 c_{ISS} 的变异系数最大。 c_{OSS} 均值的最大值出现在巢湖,其他水域水体的 c_{OSS} 均值相差不大。

3.2 海岸带和内陆水体悬浮物浓度的遥感估算模型

水体中悬浮物的遥感反射光谱具有 2 个反射峰,表现为 555 nm 和 865 nm 波长处有明显的反射特征;且随着悬浮物浓度的增加,反射峰由短波长向长波长方向移动(红移现象)^[30]。在近红外波段(865 nm),悬浮物的浓度决定了遥感反射光谱的形状和遥感反射比的大小,而其他水体组分(叶绿素和黄色物质)的表观光学特性基本消失^[11]。在绿光波段(555 nm),水体的遥感反射光谱特征受多种水体组分的影响,如颗粒物(色素颗粒和非色素颗粒物)的吸收、散射以及黄色物质的吸收等,且颗粒物的散射特征占主导地位,在该波段形成较高的反射峰。

表 2 研究水域水体中水质参数浓度的统计特征

Table 2 Statistical characters of water variations contents in the study waters

Cruise		$c_{\text{Chla}}/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_{\text{TSS}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_{\text{ISS}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_{\text{OSS}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
THL-201004	Average	12.98±13.88	41.32±35.21	33.36±32.93	7.96±4.57
	Range	0.13–46.98	9.90–162.73	7.68–145.60	1.98–19.65
CHL-200910	Average	377.45±761.59	93.45±160.93	23.61±15.16	69.84±153.04
	Range	6.43–3580.27	12.50–942.00	8.50–67.00	2.50–888.00
PYL-201010	Average	8.39±6.25	57.96±31.17	49.93±28.15	8.03±3.41
	Range	1.47–24.65	19.00–168.00	13.00–148.00	3.60–20.00
PRE-201408	Average	1.46±0.79	51.29±40.47	42.71±33.53	8.58±7.31
	Range	0.50–3.33	11.60–191.20	9.53–156.00	2.07–35.20
DYB-201408	Average	3.64±1.88	24.69±9.79	17.02±6.96	7.66±4.26
	Range	1.53–7.94	14.55–44.00	9.75–31.40	3.30–21.00

Lee 等^[31]重新解释了水体透明度的识别原理,发现水体透明度的变化依赖于特定波长处的水体漫衰减系数。其中,水体漫衰减系数反映的是水体组成的综合信息,即在高悬浮泥沙的水体中可突显悬浮泥沙的高散射信息,而在黄色物质含量较高的水体中可表达其吸收特性。表 3 为基于 QAA 模型^[32]计算水体衰减系数 $k_d(\lambda)$ (单位为 m^{-1})的方法,其

中, b_{bw} 为纯水的后向散射系数。通过分析悬浮物浓度对水体遥感反射光谱及水体光学特性的影响,基于模拟的 VIIRS 数据,构建了适于海岸带和内陆水体的 TSS 浓度遥感估算模型,如图 4 所示,该模型可表示为

$$c_{\text{TSS}} = 21374.0 \times [R_{\text{rs}}(865)/k_d(555)] - 17.8, \quad (R^2 = 0.81, n = 231, p < 0.01). \quad (4)$$

表 3 基于 QAA 模型计算的水体衰减系数

Table 3 Diffuse attenuation coefficient of water calculated by using the QAA model

Step	Parameter	Expression
1	r_{rs}	$R_{\text{rs}}/(0.52 + 1.7R_{\text{rs}})$
2	$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$	$\frac{-g_0 + [g_0^2 + 4g_1 r_{\text{rs}}]^{\frac{1}{2}}}{2g_1}, g_0 = 0.089, g_1 = 0.125$
3	$a(555)$	$a_w(555) + 10^{-1.146 - 1.366\chi - 0.469\chi^2}, \chi = \log \left[\frac{r_{\text{rs}}(443) + r_{\text{rs}}(488)}{r_{\text{rs}}(555) + 5 \frac{r_{\text{rs}}(672)}{r_{\text{rs}}(488)} r_{\text{rs}}(672)} \right]$
4	$B_{\text{bp}}(555)$	$\frac{u(555)a(555)}{1 - u(555)} - b_{\text{bw}}(555)$
5	η	$2.0 \left\{ 1 - 1.2 \exp \left[-0.9 \frac{r_{\text{rs}}(443)}{r_{\text{rs}}(555)} \right] \right\}$
6	$b_{\text{bp}}(\lambda)$	$b_{\text{bp}}(555) \left(\frac{555}{\lambda} \right)^{\eta}$
7	$a(\lambda)$	$\frac{[1 - u(\lambda)] [b_{\text{bw}}(\lambda) + b_{\text{bp}}(\lambda)]}{u(\lambda)}$
8	$k_d(\lambda)$	$(1 + m_0 \times \theta_s) a(\lambda) + \left[1 - \gamma \frac{b_{\text{bw}}(\lambda)}{b_b(\lambda)} \right] \times m_1 \times \{ 1 - m_2 \times \exp[-m_3 \times a(\lambda)] \} b_b(\lambda)$ $m_0 = 0.005, m_1 = 4.26, m_2 = 0.52, m_3 = 10.8, \gamma = 0.265$

基于水体近红外波段(865 nm)遥感反射比与绿光波段(555 nm)衰减系数构建的经验模型可以解释 81%悬浮物浓度的变化,适用于具有复杂光学特性的海岸带和内陆水体。本模型结合经验算法和

QAA 提出了一种新的遥感反演模式,为形成高精度的水色遥感产品提供了新思路。

3.3 悬浮物浓度遥感估算模型的验证

为分析本模型的稳定性和鲁棒性,利用在石头

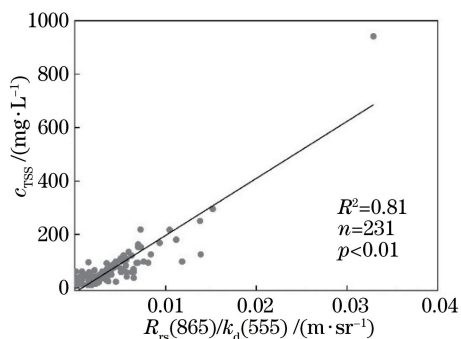


图 4 海岸带和内陆水体中 TSS 浓度的估算结果
Fig. 4 Estimation results of TSS concentration in coastal and inland waters

口门水库采集的生物-光学数据进行模型验证,结果如图 5 所示。可以发现,该模型估算的 c_{TSS} 与实测 c_{TSS} 之间具有较好的相关性 ($R^2 = 0.74$, $n = 17$, $p < 0.01$);且大部分匹配样点均匀分布在 40% 的误差线以内, $X_{MAE} = 4.3 \text{ mg/L}$, $r_{RMSE} = 36.2\%$ 。这表明该模型具有一定的稳定性,可应用于其他海岸带和内陆水体。

4 讨论与分析

4.1 悬浮物浓度遥感估算模型的对比分析

基于不同波段组合的经验算法,利用悬浮物在水体遥感反射光谱的光谱响应特征,在不同水域中获得了较高的遥感估算精度^[7,11,29]。但不同水体的

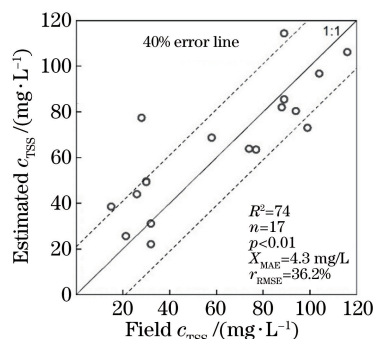


图 5 石头口门水库实测 c_{TSS} 与估算 c_{TSS} 之间的关系
Fig. 5 Relationship between measured c_{TSS} and estimated c_{TSS} in Shitoukoumen Reservoir

生物光学特性差异较大,特别是二类水体(Case II waters),其光学特性的时空异质性更显著^[27]。因此,构建适于不同二类水体光学特征的悬浮物浓度遥感估算模型更具挑战性。

利用 5 个航次的生物-光学数据,根据已报道的单波段模型、波段比值模型和三波段模型拟合回归系数,结果如表 4 所示。可以发现,三波段模型估算 TSS 浓度的精度最差,其 $R^2 = 0.14$, $r_{RMSE} = 107.2\%$, $X_{MAE} = 21.6 \text{ mg/L}$,而基于 $R_{rs}(865)$ 和 $R_{rs}(555)$ 构建的比值模型估算精度最高 ($R^2 = 0.70$)。此外,随着波长的增加, $R_{rs}(\lambda)$ 与 c_{TSS} 的相关性逐渐提高,如单波段模型中,利用 $R_{rs}(865)$ 构建的 c_{TSS} 定量估算模型决定系数为 0.67。

表 4 不同 TSS 浓度遥感估算模型的性能

Table 4 Comparison of different TSS concentration estimation models from remote sensing

Model	Model pattern	R^2	$r_{RMSE}/\%$	$X_{MAE}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
Single-band model	$-7308.4 \times R_{rs}(672)^2 + 1300.3 \times R_{rs}(672) + 29.7$	0.19	102.3	32.4
	$-128187 \times R_{rs}(751)^2 - 1009.6 \times R_{rs}(751) + 33.2$	0.62	58.5	18.5
	$-184397 \times R_{rs}(865)^2 + 621.1 \times R_{rs}(865) + 30.1$	0.67	51.4	15.3
Band-ratio model	$414.4 \times [R_{rs}(865)/R_{rs}(555)] - 18.7$	0.70	46.8	13.3
Three-band model	$791.0 \times [R_{rs}(555) + R_{rs}(672)] -$	0.14	107.2	21.6
	$209.8 \times [R_{rs}(488)/R_{rs}(555)] + 146.5$			
Our model	$21374.0 \times [R_{rs}(865)/k_d(555)] - 17.8$	0.81	39.5	8.8

基于 QAA 构建的比值模型 $R_{rs}(865)/k_d(555)$ 大幅提高了 TSS 浓度的遥感估算精度,对应的 $R^2 = 0.81$, $p < 0.01$, $r_{RMSE} = 39.2\%$, $X_{MAE} = 8.8 \text{ mg/L}$ 。在石头口门水库水体(2009 年 5 月, c_{TSS} 的变化范围为 14~120 mg/L)中进行了验证,研究区覆盖了海岸带和内陆水体,包括富营养化水平非常高的太湖和巢湖水体、悬浮泥沙浓度高且水位季节性较强的鄱阳湖水体、具有典型河口特征且光学特性极为复杂的珠江口水体以及透明度较高且相对封闭的大

亚湾水体,采样期跨越 6 年(2009~2014 年),研究表明,基于 VIIRS 数据以及 QAA 模型得到的 TSS 浓度遥感定量估算模型对不同光学特征水体中的悬浮物浓度具有较好的区分能力。

基于悬浮物“敏感”光谱波段构建的单波段和三波段模型对光学特性复杂且多变的水体适应性较差,而基于 $R_{rs}(865)$ 和 $R_{rs}(555)$ 构建的波段比值模型对不同水体悬浮物浓度有一定的区分能力,特别是近红外波段对悬浮物浓度变化具有较高的分选能

力^[4]。原因是浮游植物的吸收和散射、黄色物质的吸收等作用,555 nm 处的遥感反射比是不同水体组分光学特性的综合反映。 $R_{rs}(865)/R_{rs}(555)$ 可消除其他光学物质的部分影响,进而提高模型对悬浮物浓度的识别能力,但入射光场的变化对遥感反射信号具有一定的影响^[25],如天空光反射、水面的白帽以及风引起的波浪对太阳直射的反射^[33]。

本模型中加入了不随入射光场变化的水体衰减系数 $k_d(555)$,可同时满足不同悬浮物组分变化的需求,从而提高不同水体中 TSS 浓度的遥感估算精度。虽然 $k_d(555)$ 通过 QAA 模型由 $R_{rs}(555)$ 推导得到,计算过程中会有 $\pm 10\%$ 误差的传递^[34],但其精度仍高于直接利用 $R_{rs}(555)$ 构建的 TSS 浓度遥感估算模型,这表明基于 QAA 模型的 TSS 浓度遥感估算模型具有较好的鲁棒性和适应性。但在 TSS 浓度较低(如 $c_{TSS} < 10$ mg/L)的情况下,在 865 nm 处的遥感反射峰不明显^[30],而受叶绿素和黄色物质的影响, $k_d(555)$ 的值较大,导致 $R_{rs}(865)/k_d(555)$ 非常小,模型计算结果会出现偏小或负值情

况。因此,本模型适用于光学特性复杂、高悬浮物状态的内陆和海岸带水体,但针对 TSS 浓度较低的水体,还需按照分段函数的思想,构建适用于不同光学类型水体的 TSS 浓度遥感估算模型。

4.2 研究水域水体悬浮物浓度的动态变化分析

将基于 QAA 模型和悬浮物光谱响应特征的 TSS 浓度遥感估算方法应用于研究水域的 VIIRS 卫星遥感影像(以太湖和珠江口为例),以揭示不同水体 c_{TSS} 的动态变化规律。受模型精度的限制,本模型在 TSS 浓度较低水域中的估算精度相对偏低。对于太湖水体,东太湖水域属于光学浅水水域^[35],底质反射光谱会影响 c_{TSS} 的估算结果,因此剔除东太湖水域。基于不同时相的 VIIRS 遥感影像数据揭示了太湖和珠江口水域水体中 c_{TSS} 的时空分布状况,结果如图 6 所示。可以发现,不同季节 c_{TSS} 的均值变化范围为 0~200 mg/L。整体上看,太湖水体的 c_{TSS} 高于珠江口水域水体,而太湖的 c_{TSS} 高于太湖,特别是太湖的东南部水域, c_{TSS} 均值大于 140 mg/L。

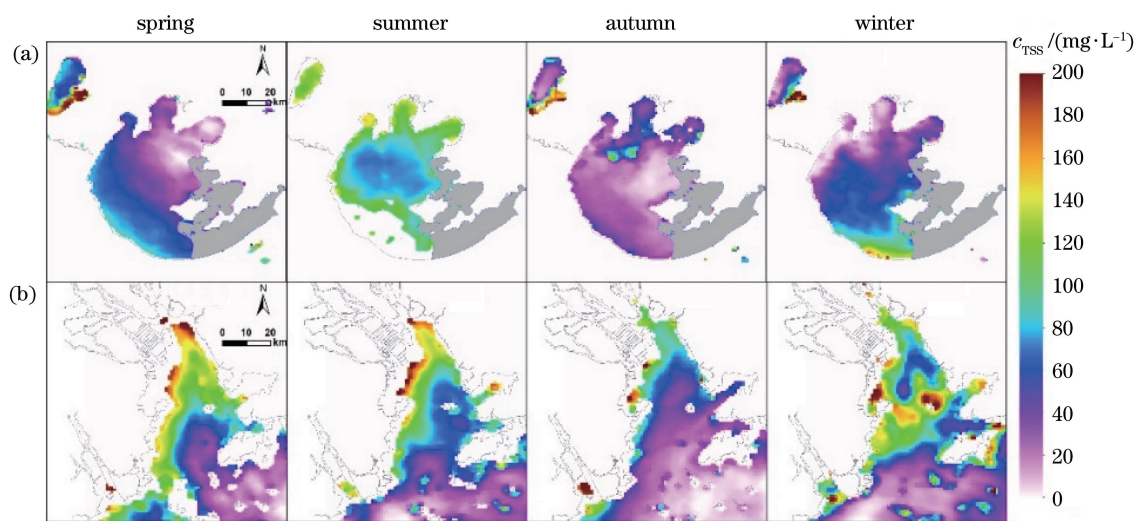


图 6 不同水域水体 c_{TSS} 的时空变化。(a)太湖;(b)珠江口

Fig. 6 Temporal and spatial changes of c_{TSS} in different water bodies. (a) Taihu Lake; (b) Pearl River Estuary

太湖水体的 c_{TSS} 季节变化明显,空间异质性显著。夏季和冬季的 c_{TSS} 均值较大,其次是春季和秋季。春季的 c_{TSS} 均值由西南向东北方向逐渐降低,最大值为 100 mg/L;夏季太湖中部的 c_{TSS} 小于其他水域,特别是北部的竺山湾、梅梁湾和贡湖湾 3 个湾口,原因是夏季该水域会高频次暴发蓝藻水华^[36];秋季的 c_{TSS} 空间分布与夏季相似,但浓度变化范围明显低于夏季,且西南部水域 c_{TSS} 高于中部;冬季较大的 c_{TSS} 均值分布在南部水域,变化范围为 100~200 mg/L,且西北部小于中部水域。Shi

等^[37]利用 MODIS 卫星遥感影像研究 2003~2013 年太湖 c_{TSS} 的时空分布时发现,南部水域的 c_{TSS} 最高,3 个湾内较低,且春季和冬季的 c_{TSS} 高于夏季和秋季,与本模型的研究结果基本一致。珠江口水域的 c_{TSS} 均值在空间上整体表现为河口水域高于离岸水域,西北部水域高于东南部水域,与 Wang 等^[38]的研究结果一致。较高的 c_{TSS} 主要分布在冬季,绝大部分水域在 80 mg/L 以上;其次为春季,特别是在珠江口西部和北部, c_{TSS} 梯度明显;夏季较小的 c_{TSS} 主要分布在南部水域,与冬季相似,但其高

c_{TSS} 分布范围明显小于春季;秋季大部分水域的 c_{TSS} 在 70 mg/L 以下,原因是珠江口 c_{TSS} 的季节变化与降雨量明显相关,因此,夏、秋季的 c_{TSS} 低于春、冬季^[38]。

在太湖以 120°10'E 为基准经线、在珠江口以 113°40'E 为基准经线,分析水体中 c_{TSS} 均值随纬度剖面分布的季节变化特征,结果如图 7 所示。可以发现,太湖水体的 c_{TSS} 均值随纬度剖面季节性变化明显,主要表现为春季和冬季 c_{TSS} 变化趋势相似,即 c_{TSS} 随纬度的增加逐渐降低,但在 31.4°N 附近变化趋势相反,冬季 c_{TSS} 随纬度增加继续降低,而春季有较小幅度的上升趋势,但总体上冬季的 c_{TSS}

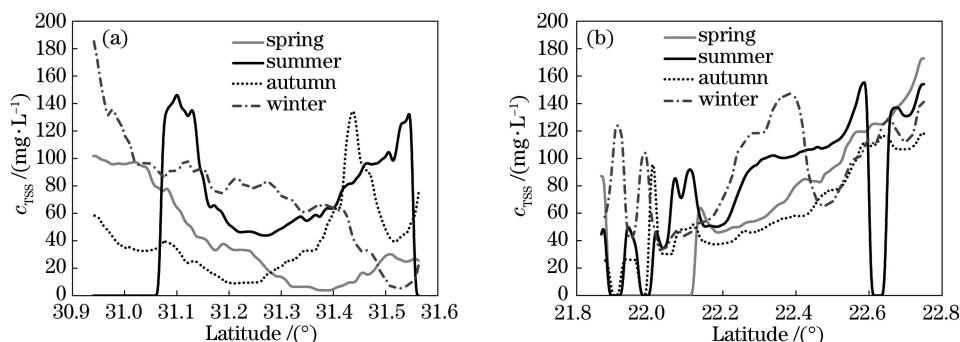


图 7 不同水域水体 c_{TSS} 随纬度剖面分布的变化曲线。(a)太湖;(b)珠江口

Fig. 7 Variation curve of c_{TSS} in different water bodies with latitude profile distribution.

(a) Taihu Lake; (b) Pearl River Estuary

5 结 论

利用 2009~2014 年在太湖、巢湖、鄱阳湖、珠江口和大亚湾水域获取的实测光谱数据和悬浮物浓度数据,结合模拟的 VIIRS 遥感数据和悬浮物的“敏感”波段(555 nm 和 865 nm),构建了适于海岸带和内陆水体光学特征的悬浮物浓度遥感定量估算模型($c_{TSS} = 21374.0 \times [R_{rs}(865)/k_d(555)] - 17.8$, $R^2 = 0.81, n = 231, p < 0.01$)。相比已报道的模型,本模型考虑了不同水体组分在悬浮物光谱响应波段(555 nm)的贡献,对悬浮物浓度具有较好的区分能力,且该模型在石头口门水库的数据中得到了验证($X_{MAE} = 4.3$ mg/L, $r_{RMSE} = 36.2\%$)。以太湖和珠江口水域为例,将本模型应用于 2014 年预处理后的 VIIRS 卫星遥感影像,揭示了太湖和珠江口水域水体中 c_{TSS} 的动态变化过程。结果表明,太湖水体的 c_{TSS} 时空异质性显著,表现为夏季和冬季 c_{TSS} 均值高于春季和秋季。珠江口水域 c_{TSS} 均值在空间上呈现河口水域高于离岸水域、西北部水域高于东南部水域的变化特征。下一步的工作重点是利用更多

大于春季。夏季 c_{TSS} 均值出现 2 个峰值,分别在 31.1°N 和 31.5°N 附近,且 31.1°N 的 c_{TSS} 为整个太湖的最大值。秋季 c_{TSS} 均值在 31.4°N 附近出现了 1 个峰值,并在 31.2°N~31.3°N 之间出现最小值。珠江口夏季和秋季 c_{TSS} 均值表现为相似的变化趋势,在 21.8°N~22.0°N 之间形成两个浓度谷, c_{TSS} 在 22.0°N 附近出现峰值后随纬度的增加逐渐增加;冬季 c_{TSS} 均值在 21.8°N~22.0°N 之间出现 2 个峰值,并在 22.4°N 附近形成峰值后在 22.4°N~22.6°N 之间出现浓度谷;春季 c_{TSS} 随纬度增加而增大,在 22.7°N 附近的 c_{TSS} 出现了整个珠江口水域的最大值。

现场数据验证模型的稳定性,为构建二类水体中统一的 TSS 浓度遥感估算模型提供更精确的拟合参数。

参 考 文 献

- [1] Bilotta G S, Brazier R E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota [J]. *Water Research*, 2008, 42(12): 2849-2861.
- [2] Binding C E, Jerome J H, Bukata R P, et al. Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1702-1711.
- [3] Eleveld M A, Pasterkamp R, van der Woerd H J, et al. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(1): 103-113.
- [4] Doxaran D, Lamquin N, Park Y J, et al. Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 36-48.

- [5] Zhang Y L, Zhang B, Ma R H, et al. Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2007, 170(1): 11-19.
- [6] Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S, et al. Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 149-161.
- [7] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, et al. Experimental study on underwater light intensity and primary productivity caused by variation of total suspended matter [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 615-620.
张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响 [J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 615-620.
- [8] Aguirre-Gomez R. Detection of total suspended sediments in the North Sea using AVHRR and ship data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(8): 1583-1596.
- [9] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P, et al. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): observations from field and MODIS satellite data [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 81(3): 321-332.
- [10] Wu G F, Cui L J, Duan H T, et al. An approach for developing Landsat-5 TM-based retrieval models of suspended particulate matter concentration with the assistance of MODIS [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 84-92.
- [11] Chen J, D'Sa E, Cui T W, et al. A semi-analytical total suspended sediment retrieval model in turbid coastal waters: a case study in Changjiang River estuary [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13018-13031.
- [12] Stumpf R P, Pennock J R. Calibration of a general optical equation for remote sensing of suspended sediments in a moderately turbid estuary [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1989, 94(C10): 14363-14361.
- [13] Chen H R, Zhang J W, Wang S Q, et al. Study on diurnal variation of turbidity in the Yangtze estuary and adjacent areas by remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0501003.
陈黄蓉, 张靖玮, 王胜强, 等. 长江口及邻近海域的浊度日变化遥感研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0501003.
- [14] Mao Z H, Chen J Y, Pan D L, et al. A regional remote sensing algorithm for total suspended matter in the East China Sea [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 819-831.
- [15] He X Q, Bai Y, Pan D L, et al. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 225-239.
- [16] Han B, Loisel H, Vantrepotte V, et al. Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 211.
- [17] Chen J, Quan W T, Cui T W, et al. Estimation of total suspended matter concentration from MODIS data using a neural network model in the China eastern coastal zone [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 155: 104-113.
- [18] Mu B, Cui T W, Qin P, et al. Remote sensing retrieval and temporal-spatial distribution characteristics of particulate organic carbon concentration in seawater near Yellow River estuary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801004.
牟冰, 崔廷伟, 秦平, 等. 黄河口海域颗粒有机碳浓度遥感反演与时空分布特征 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801004.
- [19] Jia H L, Su W, Huang H M, et al. Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0301001.
贾后磊, 苏文, 黄华梅, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0301001.
- [20] Jiang G J, Liu D W, Song K S, et al. Estimation of total suspended matter concentration in Shitoukoumen reservoir based on a semi-empirical model [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 107-111.
姜广甲, 刘殿伟, 宋开山, 等. 基于半分析模型的石头口门水库总悬浮物浓度反演研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 107-111.
- [21] Fu D Y, Luan H, Liu D Z, et al. Analysis of suspended sediment concentration remote sensing models in winter and spring in the Pearl River estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(4): 600-604.
付东洋, 栾虹, 刘大召, 等. 珠江口冬春季悬浮泥沙浓度遥感反演模式分析 [J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(4): 600-604.
- [22] Xiong X 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.
- [23] Cao Z G, Duan H T, Cui H S, et al. Remote estimation of suspended matters concentrations using VIIRS in Lake Hongze, China [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4): 462-469.
曹志刚, 段洪涛, 崔海山, 等. 基于 VIIRS 数据洪泽湖悬浮物浓度估算算法研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(4): 462-469.
- [24] Kahru M, Kudela R M, Anderson C R, 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.
- [25] 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.
- [26] Jiang G J, Ma R H, Loiselle S A, et al. Remote sensing of particulate organic carbon dynamics in a eutrophic lake (Taihu Lake, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 245-254.
- [27] Ma R H, Duan H T, Tang J W. Remote sensing of lake water environmental [M]. Beijing: Science Press, 2010: 31-32.
马荣华, 段洪涛, 唐军武. 湖泊水环境遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 31-32.
- [28] Joshi I D, D'Sa E J, Osburn C L, 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.
- [29] Loisel H, Mangin A, Vantrepotte V, et al. Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150: 218-230.
- [30] Wang F. Estuary water suspended matter inherent optical property and concentration remote sensing inversion model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
王繁. 河口水体悬浮物固有光学性质及浓度遥感反演模式研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [31] Lee Z, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139-149.
- [32] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [33] Tang J W, Tian G L, Chen Q L. Bidirectionality of water-leaving radiance: simulation results and its correction [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(2): 48-57.
唐军武, 田国良, 陈清莲. 离水辐射非朗伯特特性的 Monte Carlo 模拟及分析 [J]. *海洋学报(中文版)*, 2000, 22(2): 48-57.
- [34] Lee Z P, Arnone R, Hu C M, et al. Uncertainties of optical parameters and their propagations in an analytical ocean color inversion algorithm [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 369-381.
- [35] Ma R H, Jiang G J, Duan H T, et al. Effective upwelling irradiance depths in turbid waters: a spectral analysis of origins and fate [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7127-7138.
- [36] 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.
- [37] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, et al. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 43-56.
- [38] Wang C Y, Li W J, Chen S S, et al. The spatial and temporal variation of total suspended solid concentration in Pearl River estuary during 1987-2015 based on remote sensing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1125-1138.