

引用格式:Chen Yuli, Shen Fang. Influence of Suspended Particulate Matter on Chlorophyll-a Retrieval Algorithms in Yangtze River Estuary and Adjacent Turbid Waters[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1):126-133. [陈瑜丽, 沈芳. 长江口及邻近海域悬浮颗粒物对叶绿素 a 遥感反演算法的影响分析[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):126-133.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.1.0126

# 长江口及邻近海域悬浮颗粒物对叶绿素 a 遥感反演算法的影响分析

陈瑜丽, 沈 芳

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:**利用水介质光辐射传输数值模型 Hydrolight, 结合前人对长江口及邻近海域水体的生物—光学模型研究, 模拟不同光学水体的遥感反射率, 并分析遥感反射率对悬浮颗粒物 (SPM) 的敏感性以及 SPM 对 4 种叶绿素 a (Chla) 反演算法 (二波段、三波段、荧光基线高度 (FLH) 和综合叶绿素指数 (SCI) 算法) 的影响。结果表明:由 Hydrolight 模拟得到的遥感反射率与现场同步实测的遥感反射率的均方根误差小于  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ , 其中可实现遥感反射率在 550~725 nm 波段较精确的模拟。遥感反射率对 SPM 的敏感性随着 Chla 浓度的升高而降低。二波段、三波段算法适合低 SPM 浓度水体的 Chla 浓度反演, FLH 算法反演 Chla 浓度时易受 SPM 的影响, 而 SCI 算法在中、高 SPM 浓度水体中消除 SPM 的影响进而反演 Chla 的潜力较好。

**关 键 词:**叶绿素 a; 悬浮颗粒物; 遥感反射率; 遥感反演; 长江口

**中图分类号:**X 87      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-0323(2016)01-0126-08

## 1 引 言

叶绿素 a (Chlorophyll-a, Chla) 浓度是浮游植物生物量的间接表征量, 关乎海洋初级生产力和全球碳循环的研究, 是海洋环境监测的重要指标之一<sup>[1]</sup>。长江口及其邻近海域水体为典型的二类水体, 与一类水体中因 Chla 在水体成分中占主体地位而成为单一主导光学因子不同, 该类水体中 Chla 的单一主导地位被其他水色要素, 如悬浮颗粒物 (Suspended Particulate Matter, SPM)、黄色物质所取代而成为多种光学因子共同主导, 因此, 从二类水体遥感反射率光谱中提取叶绿素 a 浓度信息变得较为困难。此外, 除了二类水体本身复杂的光学特性, 长江口及其邻近海域水体由于河流物质输入、近海环流和波浪的侵蚀及风等的影响出现 SPM 浓度高值区 (浑浊

带), 也会导致遥感反演 Chla 浓度存在很大的困难。因为较高浓度的 SPM 带来的高散射使得遥感反射率在整个可见光波段受到巨大影响, 可能掩盖以吸收为主要特征的 Chla 遥感反射率波谱特征, 导致遥感反演 Chla 浓度出现较大的误差<sup>[2]</sup>。Shen 等<sup>[3]</sup>在研究长江口 Chla 反演算法时指出, 当 SPM 浓度大于  $50 \text{ g/m}^3$  时, 使用 Beam VISAT4.5 关于 MERIS 的二类水体反演算法 (C2P) 时得到的 Chla 浓度对比同步实测值出现高估, 尤其是在低 Chla 高 SPM 浓度的环境中, 高估现象更加明显。

为研究 SPM 对 Chla 遥感反演的影响, 本文选取 4 种 Chla 反演算法:二波段、三波段、荧光基线高度 (Fluorescent Light Height, FLH) 算法和综合叶绿素指数 (Synthetic Chlorophyll Index, SCI) 算法, 通过水介质光辐射传输数值模型 Hydrolight 模拟

收稿日期:2014-12-16; 修订日期:2015-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目 (41271375), 教育部博士学科点专项科研基金 (20120076110009)。

作者简介:陈瑜丽 (1990—), 女, 浙江玉环人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水色遥感研究。E-mail: yayachen1990@163.com。

通讯作者:沈 芳 (1964—), 女, 教授, 主要从事河口海岸/近海水色遥感研究。E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn。

出不同 SPM 和 Chla 浓度下的遥感反射率,分析 SPM 对遥感反射率和 Chla 反演算法的影响。由于 4 种反演算法的波长选择都位于红光和近红外波段,不在黄色物质主要影响的蓝光波段,故黄色物质对 Chla 反演算法的影响在本文中不做讨论。

2 数 据

2.1 实测数据集

为衡量模拟数据的精度,本研究收集了长江口及邻近海域的现场调查数据进行验证。航次调查时间为 2013 年 8 月和 2011 年 5 月,覆盖范围为 29°~31.1°N 和 122.2°~123.5°E,现场同步采集生物化学参数及高光谱遥感反射率数据,获得 2013 年 8 月 23 组和 2011 年 5 月 8 组同步数据。本研究涉及的 Chla 浓度、SPM 浓度和黄色物质吸收系数来自现场过滤和实验室测量<sup>[4]</sup>,其中,2013 年 8 月航次的 SPM 浓度范围为 1.7~20.5 g/m<sup>3</sup>,Chla 浓度范围为 0.12~2.4 mg/m<sup>3</sup>,黄色物质在 440 nm 处的吸收系数范围为 0.09~0.37 m<sup>-1</sup>;2011 年 5 月航次的 SPM 浓度范围为 13.6~140 g/m<sup>3</sup>,Chla 浓度范围为 0.3~

37.7 mg/m<sup>3</sup>,黄色物质在 440 nm 处的吸收系数范围为 0.08~0.36 m<sup>-1</sup>。遥感反射率光谱由 HyperSAS 海面高光谱仪(Satlantic,加拿大)测量的海水表面入射辐照度  $E_d(\lambda)$ 、入射天空光辐亮度  $L_{s,sky}(\lambda)$  和来自水体的总辐亮度  $L_{tot}(\lambda)$  计算得到,公式如下<sup>[5]</sup>:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_{tot}(\lambda) - \rho_{sky}(\lambda)L_{s,sky}(\lambda)}{E_d(\lambda)}$$

(1)

其中: $\rho_{sky}(\lambda)$  和  $L_{s,sky}(\lambda)$  分别代表天空光海面反射率和天空光漫射辐亮度,取值见 Leonid 和 Shen<sup>[5]</sup>。2013 年 8 月与 2011 年 5 月的实测遥感反射率波谱曲线见图 1(a)。根据现场实测遥感反射率光谱特征形状,参考 Lubac 与 Loisel<sup>[6]</sup>的分类方法以及洪官林等<sup>[7]</sup>对长江口遥感反射率的分类实例,除去实测数据中的两组水华样本,将实测遥感反射率数据分为三类,图 1(b)为各个类别中遥感反射率平均值波谱曲线,其中Class1 的 SPM 浓度为 0.9~13.6 g/m<sup>3</sup>,Chla 浓度为 0.34~8.2mg/m<sup>3</sup>,Class2 的 SPM 浓度为 6.7~20.25 g/m<sup>3</sup>,Chla 浓度为 0.88~2.43 mg/m<sup>3</sup>,Class3 的 SPM 浓度为 47.6~140 g/m<sup>3</sup>,Chla 浓度为 0.12~1.28 mg/m<sup>3</sup>。

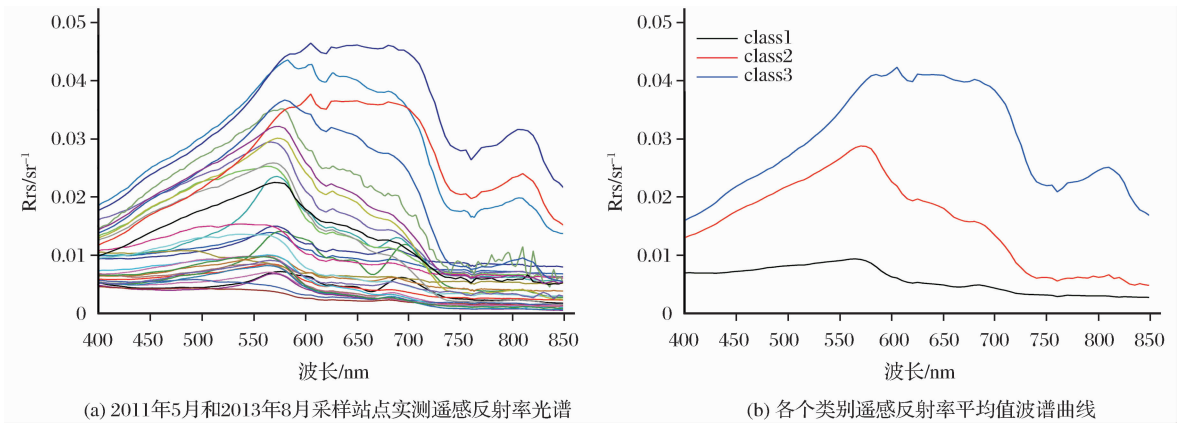


图 1 2011 年 5 月和 2013 年 8 月采样站点实测遥感反射率光谱和各个类别遥感反射率平均值波谱曲线

Fig. 1 Field remote sensing reflectance obtained from May 2011 and Aug. 2013 and the mean remote sensing reflectance spectra obtained for each class

2.2 模拟数据集

水介质光辐射传输数值模型 Hydrolight 由 Fortran 语言编写,采用不变嵌入法(Invariant Imbedding)求解辐射传输方程,计算出任意平行平面的水体内部和离开水体的与时间无关的辐射分布,主要输出量有向下辐照度、向上辐照度、漫射衰减系数和遥感反射率等,它们都是关于波长和深度的函数<sup>[8]</sup>。

Hydrolight 的运行需要输入水色成分的光学参数和外部边界条件,通过改变水体各成分的浓度值,即可产生不同类型水体的遥感反射率模拟数据集。

根据长江口及邻近海域实测数据,设置 SPM 浓度为 5、10、30、50、100 g/m<sup>3</sup>;Chla 浓度为 0.01、0.1、0.5、1、2、3、4、5、7、9、10、15、20、25 mg/m<sup>3</sup>;黄色物质浓度用 440 nm 处黄色物质吸收系数表示,依据实测数据,设为常数 0.25 m<sup>-1</sup>。水体成分光学参数和外部条件输入详见 2.3 节。

3 方 法

3.1 模型方法

Hydrolight 模型输入包括水色成分的固有光学

特性(Inherent Optical Properties, IOPs)和表观光学特性(Apparent Optical Properties, AOPs)。AOPs 参数主要为:①海水表面入射辐照度  $E_d(\lambda)$ , 由天空辐射传输模型 RADTRAN 计算得到;②海表面风速, 用于计算海表面粗糙度, 本研究设为 5 m/s;③水体的折射指数, 用于计算菲涅尔反射率和水—汽界面的透射率, 设为 1.34;④天气状况参数, 如云量、相对湿度、气溶胶类型等, 采用模型初始值;⑤太阳高度角, 设为  $30^\circ$ 。同时, 假设水体为无限水深, 不受海底的影响, 并考虑水分子的瑞利散射。

IOPs 主要为水色各组分的吸收和散射系数。水体总吸收系数为各组分吸收系数的线性相加, 表示为<sup>[8]</sup>:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{spm}(\lambda) \quad (2)$$

其中:  $a_w(\lambda)$  代表纯水的吸收系数, 取值参考 Pope 和 Fry<sup>[9]</sup>。  $a_{ph}(\lambda)$  代表浮游植物色素的吸收系数, 计算式如式(3)<sup>[10]</sup>:

$$a_{ph}(\lambda) = \{ (a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \ln[a_{ph}(\lambda_0)]) \} a_{ph}(\lambda_0) \quad (3)$$

其中: 选择 674 nm 作为参考波长,  $a_0$  和  $a_1$  值参考文献<sup>[11]</sup>。在长江口及邻近海域浮游植物在 674 nm 处的吸收系数与 Chla 浓度存在较好的相关关系<sup>[9]</sup>:

$$a_{ph}(674) = 0.008C_{Chla} + 0.018 \quad (4)$$

其中:  $a_g(\lambda)$  为黄色物质的吸收系数, 计算如下<sup>[12]</sup>:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp(-S_g(\lambda - \lambda_0)) \quad (5)$$

根据余小龙等<sup>[4]</sup> 对于长江口及邻近海域黄色物质光吸收特性的研究结果, 选择参考波长  $\lambda_0 = 440$  nm, 光谱斜率为  $S_g = 0.015$ ,  $a_g(440)$  值的波动范围为  $0.1 \sim 5 \text{ m}^{-1}$ , 本文取  $a_g(440) = 0.25 \text{ m}^{-1}$ 。

SPM 的吸收系数  $a_{spm}(\lambda)$  与黄色物质的吸收  $a_g(\lambda)$  有类似的指数衰减关系, 表达如下:

$$a_{spm}(\lambda) = a_{spm}(\lambda_0) \exp(-S(\lambda - \lambda_0)) \quad (6)$$

根据 Shen 等<sup>[13]</sup> 对长江口 SPM 的吸收特性分析, 选择参考波长  $\lambda_0 = 440$  nm, 在 440 nm 处的 SPM 的吸收值在  $0.8 \sim 5.8 \text{ m}^{-1}$  之间波动, 斜率  $S$  波动在  $0.008 \sim 0.011$  之间。

水体的总散射表示为水体主要成分的散射系数的线性相加, 表示为:

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_{spm}(\lambda) \quad (7)$$

其中: 纯水的散射系数  $b_w(\lambda)$  参考 Morel<sup>[14]</sup> 的研究结果。

式(7)中  $b_{ph}(\lambda)$  代表浮游植物的散射系数, Gould 等<sup>[15]</sup> 发现线性模型可以很好地模拟一类和二类水体散射系数。本文采用该线性模型, 使用 Gould 等提出的 GAM(Gould-Arnold-Martinolich)

参数设置, 公式如下:

$$b_{ph}(\lambda) = b_0 C_{Chla}^n \frac{(m\lambda + i)}{(m\lambda_0 + i)} \quad (8)$$

其中:  $b_0(\lambda) = 0.5$ ,  $m = -0.00113$ ,  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ ,  $i = 1.62517$ ,  $n = 0.62$ 。

由于 SPM 的高散射特性, 加之河流物质输入、近海环流和波浪的侵蚀及风等造成的 SPM 浓度高值, 使得河口海岸水域的 SPM 的散射在总散射中占据重要的地位。刘猛<sup>[16]</sup> 在对浑浊水体 SPM 的散射特性进行研究时, 建立了长江口后向散射系数参数化模型, 本实验参考其 SPM 的散射系数参数化模型:

$$b_{spm}(\lambda) = b_{spm}(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^n \quad (9)$$

其中:  $b_{spm}(\lambda)$  表示 SPM 的散射系数, 参考波长  $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ ,  $n$  表示光谱指数。宋庆君和唐军武<sup>[17]</sup> 在对黄、东海水体散射特性进行研究时发现, 光谱指数  $n$  在黄、东海变化较大, 不能将  $n$  作为一个常数, 刘猛<sup>[16]</sup> 参考其方法, 利用长江口 2011 年 7 月与 2012 年冬季的实测数据, 得到光谱指数与参考波长 532 nm 处后向散射系数的拟合关系式:

$$n = 0.4114b_{b_{spm}}(532)^{-0.3} \quad (10)$$

其中:  $b_{b_{spm}}$  表示 SPM 后向散射系数。况润元<sup>[18]</sup> 依据长江口实测数据分析发现, SPM 在参考波长 532 nm 处的散射系数与 SPM 的浓度存在如下关系:

$$b_{spm}(532) = 819.12 \times \text{SPM}^{1.3894}, \text{SPM} < 0.032 \text{ g/L} \quad (11)$$

$$b_{spm}(532) = 429.9 \times \text{SPM} - 7.0867, \text{SPM} > 0.032 \text{ g/L}$$

此外, Chla 和 SPM 的散射相函数主要利用 Fournier 和 Forand 提出的估算粒子相函数的近似分析形式计算得到, 该 Fourier-Forand 相函数由  $b_b/b$  的比值来参数化<sup>[19]</sup>, 本实验中, 叶绿素的  $b_b/b$  取 0.005, SPM 的  $b_b/b$  取 0.034。

### 3.2 叶绿素反演算法

本文采用 4 种 Chla 反演算法: 二波段算法、三波段算法、FLH 算法和 SCI 算法。二波段算法主要利用 Chla 吸收峰(675 nm 附近)和水的强吸收(700~720 nm 附近)处的遥感反射率的比值。三波段算法相较于二波段引入一个新波段, 此波段选择遥感反射率受水色各组分吸收影响最小的波段(730 nm 附近), 通过三波段比值来抑制水体中黄色物质和 SPM 的影响<sup>[20-21]</sup>。FLH 算法利用 Chla 的荧光峰波段(680 nm 附近)来估算 Chla 的浓度, 荧光基线高度通过 Chla 荧光峰处波长与两侧邻近的两个吸收峰处波长的遥感反射率计算得到<sup>[22]</sup>。SCI

算法利用 Chla 的荧光峰波段并综合考虑 Chla 和 SPM 的特征波段,引入两个参数  $H_{chl}$  和  $H_{\Delta}$ ,其中,  $H_{chl}$  是指示 Chla 浓度的参数,利用了 Chla 红光波段处的强吸收深度;  $H_{chl}$  为修正参数,利用了 Chla 弱吸收和 SPM 散射的敏感波段<sup>[3]</sup>。

Cheng 等<sup>[23]</sup> 利用 MERIS、MODIS 波段以及实

测数据优化的波段实现了利用二波段、三波段、FLH 算法和 SCI 算法对 Chla 浓度的反演,本文参考其波长选择。反演算法及参考波长详见表 1。考虑到研究海域为浑浊二类水体,蓝—绿光波段易受黄色物质的影响,本研究采用反演算法的波段均在红光及近红外波段。

表 1 本文采用的叶绿素反演算法及参考波长  
Table 1 The Chla retrieval algorithms and reference band

| 叶绿素反演算法         | 算法及参考波长  |  |
|-----------------|--|--|
| 二波段算法           | $\text{Chla} \sim R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ $\lambda_1 = 700 \text{ nm}, \lambda_2 = 675 \text{ nm}$  |  |
| 三波段算法           | $\text{Chla} \sim [R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}(\lambda_3)$ $\lambda_1 = 675 \text{ nm}, \lambda_2 = 695 \text{ nm}, \lambda_3 = 730 \text{ nm}$   |  |
| 荧光高度算法 (FLH)    | $\text{Chla} \sim R_{rs}(\lambda_2) - \left[ R_{rs}(\lambda_3) + \frac{(\lambda_3 - \lambda_2)}{(\lambda_3 - \lambda_1)} (R_{rs}(\lambda_1) - R_{rs}(\lambda_3)) \right]$ $\lambda_1 = 675 \text{ nm}, \lambda_2 = 695 \text{ nm}, \lambda_3 = 740 \text{ nm}$ |  |
| 综合叶绿素指数算法 (SCI) | $H_{chl} = \left[ R_{rs}(\lambda_1) + \frac{\lambda_4 - \lambda_3}{\lambda_4 - \lambda_2} (R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_4)) \right] - R_{rs}(\lambda_3)$   |  |
|                 | $H_{\Delta} = R_{rs}(\lambda_2) - \left[ R_{rs}(\lambda_4) + \frac{\lambda_4 - \lambda_2}{\lambda_4 - \lambda_1} (R_{rs}(\lambda_1) - R_{rs}(\lambda_4)) \right]$  |  |
|                 | $\text{SCI} = H_{chl} - H_{\Delta}$ $\text{Chla} \sim \text{SCI}$ $\lambda_1 = 575 \text{ nm}, \lambda_2 = 650 \text{ nm}, \lambda_3 = 775 \text{ nm}, \lambda_4 = 695 \text{ nm}$   |  |

3.3 敏感性评价方法

为研究 SPM 对遥感反射率的敏感性,采用相对偏差来表示不同浓度 SPM 对遥感反射率的影响程度。计算公式为:

$$\text{相对偏差} = \frac{R_{rs}^i - R_{rs}^0}{R_{rs}^0} 100\%$$

(12)

其中:  $R_{rs}^i$  表示不同 SPM 浓度水体的遥感反射率,  $R_{rs}^0$  表示不含 SPM 水体的遥感反射率。相对偏差高值表示遥感反射率易受 SPM 的影响,低值表示不易受到 SPM 的影响。遥感反射率是关于波长的函数,故遥感反射率的相对偏差也是关于波长的函数,因此,相对偏差高值对应的波长为遥感反射率对 SPM 敏感波长,而低值对应的波长为对 SPM 不敏感波长。

4 结果与分析

4.1 遥感反射率光谱模拟结果

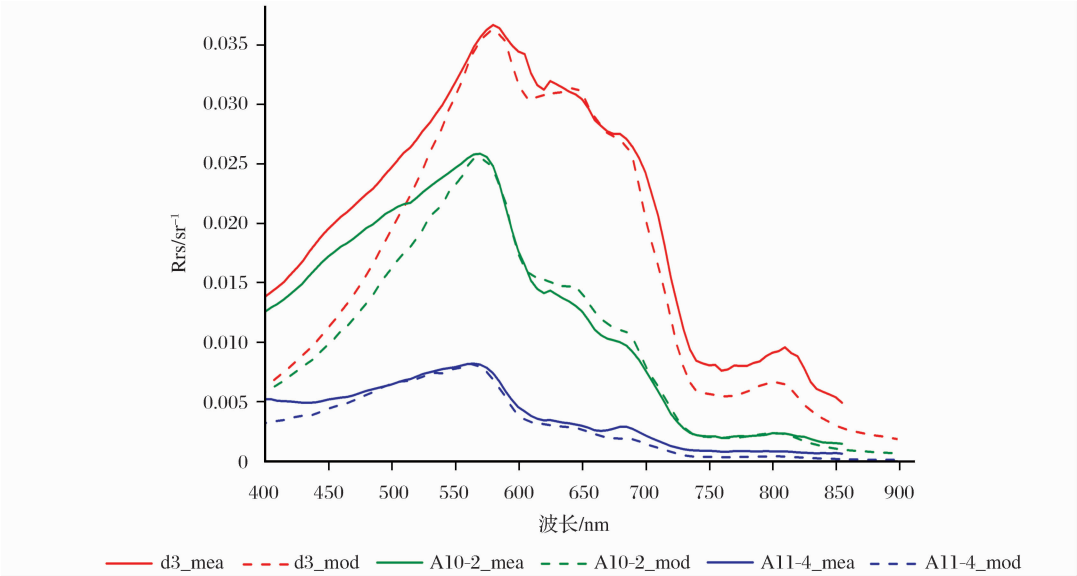
根据 2.3 节的模型方法,获得 Hydrolight 模拟遥感反射率数据集,并与现场同步实测数据对比,结果显示,模拟的遥感反射率与现场实测数据的均方根误差(RMSE)均小于  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ 。根据数据与方法中对现场实测遥感反射率 3 种分类,图 2 展示了每种类别的遥感反射率模拟值与实测值的对比。从图中可以看出,3 个站点在  $550 \sim 725 \text{ nm}$  范围内拟合的精度均较高。其中,d3 站点在  $400 \sim 550 \text{ nm}$  范围内模拟与实测值的 RMSE 为  $0.0075 \text{ sr}^{-1}$ ,在  $550 \sim 855 \text{ nm}$  范围内为  $0.0023 \text{ sr}^{-1}$ ; A10-2 站点在

$400 \sim 550 \text{ nm}$  范围内模拟与实测值的 RMSE 为  $0.0073 \text{ sr}^{-1}$ ,在  $550 \sim 855 \text{ nm}$  范围内为  $0.0014 \text{ sr}^{-1}$ ; A11-4 站点在  $400 \sim 550 \text{ nm}$  范围内模拟与实测值的 RMSE 为  $0.0053 \text{ sr}^{-1}$ ,在  $550 \sim 855 \text{ nm}$  范围内为  $0.0005 \text{ sr}^{-1}$ 。本研究比较的 4 种 Chla 反演算法的波长均位于红光和近红外波段,属于模拟精度较高波段范围。

4.2 SPM 浓度对遥感反射率的敏感性分析

高 SPM 浓度水体的遥感反射率光谱具有明显的双峰特征,第一反射峰的位置在  $600 \sim 700 \text{ nm}$  附近,第二反射峰的位置在  $760 \sim 820 \text{ nm}$  附近。而 Chla 吸收谷的位置在  $675 \text{ nm}$  附近,荧光峰位于  $680 \text{ nm}$  附近,与 SPM 的第一反射峰波段重叠。当水体中 SPM 浓度增加时,反射峰的位置由短波向长波方向移动,即“红移”现象。因此,SPM 浓度的增加不仅减少了浮游植物吸收的光能,而且强烈的后向散射也会掩盖 Chla 的特征峰。

本文利用 3.1 节中的模型方法并结合模拟数据与实测数据的同步验证,得到了 Chla 浓度变化范围为  $0.01 \sim 25 \text{ mg/m}^3$ ,SPM 浓度变化范围为  $5 \sim 100 \text{ g/m}^3$  条件下的模拟遥感反射率数据集。利用该模拟数据集并结合 3.3 节中的敏感性评价方法,分析 SPM 浓度变化对遥感反射率的敏感性,结果如图 3 所示。从整体上看,遥感反射率对 SPM 的敏感性随着 Chla 浓度的升高而降低。当 SPM 浓度较低 ( $<10 \text{ g/m}^3$ ),Chla 浓度从  $0.5 \sim 25 \text{ mg/m}^3$  变化



(注: mea 和 mod 分别代表实测值和模拟值。d3 站点, Chla、SPM 浓度分别为 0.13 mg/m<sup>3</sup> 和 60.6 g/m<sup>3</sup>, A10-2 站点, Chla、SPM 浓度分别为 1.29 mg/m<sup>3</sup> 和 20 g/m<sup>3</sup>; A11-4 站点, Chla、SPM 浓度为 4.6 mg/m<sup>3</sup> 和 1.7 g/m<sup>3</sup>)

图 2 遥感反射率光谱模型与实测数据对比

Fig. 2 Comparison between measured and modeled remote sensing reflectance

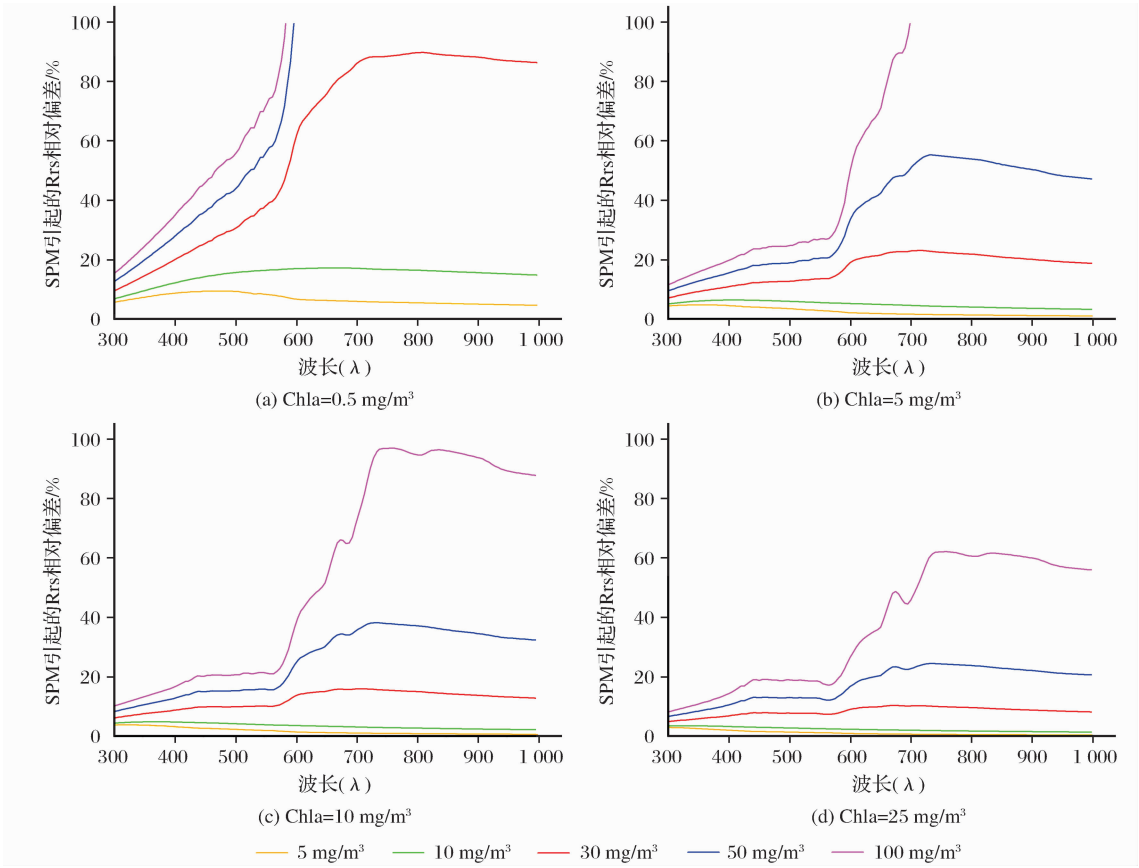


图 3 不同 Chla、SPM 浓度下的遥感反射率的相对变化率

Fig. 3 Relative change of remote sensing reflectance under different concentrations of Chla and SPM

时,SPM 引起的遥感反射率的变化率小于 20%,随着 Chla 浓度的增加,该变化率逐渐减小。当 SPM

浓度大于 30 g/m<sup>3</sup> 时,该变化率一直维持较高值,并在 560~650 nm 处急剧升高,尤其是当 Chla 浓度为

0.5~5 mg/m<sup>3</sup>, SPM 浓度为 30~100 g/m<sup>3</sup> 时,变化率甚至大于 100%。

与 Chla 类似,SPM 对遥感反射率光谱的作用主要为吸收和散射,在 400~560 nm 波长范围内,以吸收作用为主,且为 Chla、黄色物质和 SPM 共同吸收;在 560~900 nm 范围内,以散射作用为主,且 Chla 和黄色物质的后向散射较 SPM 微乎其微,故在此波长范围内 SPM 对遥感反射率的敏感性急剧升高。Morel 和 Belanger<sup>[2]</sup>研究表明,SPM 对遥感反射率的增强可以在 560 nm 附近明显检测到,故可将 560 nm 作为 SPM 的一个特征波长,这与本文的研究结果一致。多年实测数据表明,长江河口区的 Chla 浓度一般在 0.01~5 mg/m<sup>3</sup> 范围内,而长江口年均含沙量大于 100 g/m<sup>3</sup>,故高浓度 SPM 势必会影响到长江口及其沿岸 Chla 遥感反演算法的适应性和精度。

4.3 SPM 浓度变化对 Chla 反演算法的影响

由前文分析发现,中、高浓度(>30 g/m<sup>3</sup>)SPM 可以引起遥感反射率 100% 以上的变化,故基于遥感反射率比值或者遥感反射率反射峰值的 Chla 反演算法必然会受到 SPM 的影响。在遥感反射率模拟数据集的基础上,通过不同 Chla 的反演算法,分

析 SPM 浓度对反演算法的影响。

图 4 为不同 SPM 浓度下 Chla 反演算法与 Chla 浓度的关系。从图中可以看出,二波段和三波段算法与 Chla 浓度呈线性递增关系(图 3(a)、(b)),FLH 和 SCI 算法与 Chla 浓度呈递增的二次多项式关系(图 3(c)、(d))。从整体上看,以上相关关系均受到 SPM 的影响。当 Chla 浓度小于 20 mg/m<sup>3</sup> 时,随着 Chla 浓度的升高,SPM 对二波段、三波段以及 SCI 算法的影响逐渐减弱,但对 FLH 算法却一直维持较高影响;在相同 Chla 浓度下,各反演算法在较低 SPM 浓度时(≤10 g/m<sup>3</sup>)变化不大,随着 SPM 浓度的升高,二波段比值、三波段比值以及 FLH 值相应增加,SCI 值相应减小,且增加和减小的幅度越来越大,这表明,在相同 Chla 浓度下,SPM 对 4 种 Chla 反演算法的影响均随 SPM 浓度的升高而愈加明显。而当 Chla 浓度大于 20 mg/m<sup>3</sup> 时,随着 Chla 浓度的升高,4 种算法受 SPM 的影响有减弱的趋势。

Chla 反演算法对 Chla 浓度的敏感性亦受到 SPM 的影响。当 SPM 浓度较低时,二波段和三波段比值随 Chla 浓度的升高或降低呈现明显的线性变化,即对 Chla 浓度变化的敏感性较强,而 FLH 和

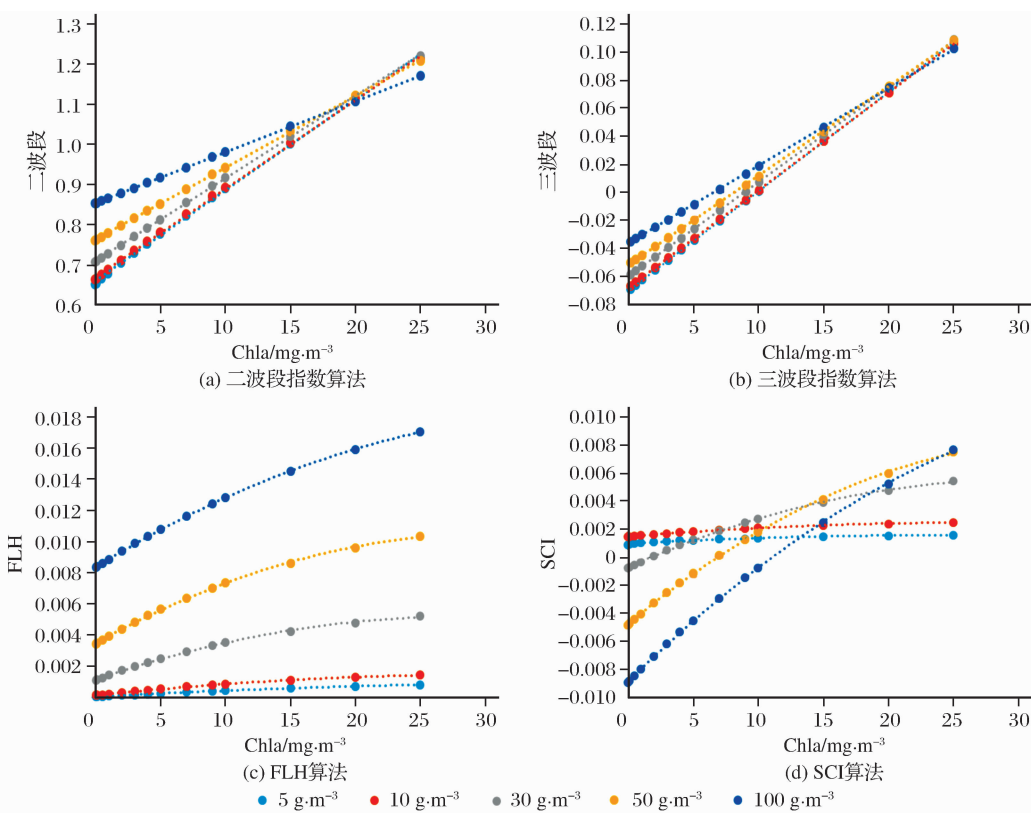


图 4 不同 SPM 浓度条件下 Chla 反演算法与叶绿素 a 浓度的回归关系

Fig. 4 Regressions between the Chla retrieval algorithms and Chla under different concentrations of SPM

SCI 值对 Chla 浓度变化的敏感性较弱。随着 SPM 浓度增加,二波段和三波段算法对 Chla 浓度变化的敏感性开始减弱,而 FLH 和 SCI 算法与之恰好相反,随着 SPM 浓度增加,算法对 Chla 浓度的敏感性逐渐增强。

由以上分析可知,SPM 浓度较低时,随着 Chla 浓度升高,二波段、三波段算法均对 Chla 有较好的线性增强,反演潜力较好;SPM 浓度升高时,它们的线性增强关系减弱,当 SPM 大于  $100 \text{ g/m}^3$  时,二波段、三波段算法对 Chla 浓度已无法很好响应(线性关系趋于平坦),而 FLH 算法对 SPM 的升高非常敏感,也由此表明 FLH 算法反演 Chla 浓度时极易受 SPM 的影响。相比二波段、三波段以及 FLH 算法,SCI 算法在 SPM 升高时,呈现出线性增强趋势,例如  $\text{SPM} > 100 \text{ g/m}^3$  且  $\text{Chla} > 25 \text{ mg/m}^3$  的情形,表明 SCI 算法在富沙水体中消除 SPM 的影响反演 Chla 浓度具有较好的潜力。

## 5 结 语

利用水介质光辐射传输数值模型 Hydrolight、结合学者对于长江口及邻近海域水体生物—光学模型的研究,模拟得到不同水体下的遥感反射率,结合 4 种 Chla 反演算法,分析 SPM 对遥感反射率以及 Chla 反演算法的影响,得到如下结论:

(1)利用 Hydrolight 模拟得到的遥感反射率与现场同步实测的遥感反射率的均方根误差小于  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ ,其中可以实现  $550 \sim 725 \text{ nm}$  波段遥感反射率的精确模拟。

(2)SPM 浓度变化对遥感反射率的敏感性从整体上来看,在低 SPM 浓度时( $< 10 \text{ g/m}^3$ ),SPM 对遥感反射率的影响较小;当 SPM 为中、高浓度时( $> 10 \text{ g/m}^3$ ),SPM 对于遥感反射率的敏感性随着其浓度的增加而增强,并在  $560 \text{ nm}$  处出现急剧变化。

(3)二波段、三波段算法在低 SPM 浓度时反演 Chla 浓度的能力较好,而 FLH 算法在反演 Chla 浓度时易受到 SPM 的影响,SCI 算法却在富沙水体中表现出消除 SPM 的影响反演 Chla 浓度的良好潜力。

## 参考文献(References):

[1] Huang Changchun, Li Yunmei, Xu Liangjiang, *et al.* Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body[J]. Journal of Environ-

mental Sciences, 2013, (2): 525-531. [黄昌春, 李云梅, 徐良将, 等. 内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2013, (2): 525-531.]

[2] Morel A, Belanger S. Improved Detection of Turbid Waters from Ocean Color Sensors Information[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, (102): 237-249.

[3] Shen F, Zhou Y X, Li D J, *et al.* Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) Estimation of Chlorophyll-a Concentration in the Turbid Sediment-Laden Waters of the Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(17-18): 4635-4650.

[4] Yu Xiaolong. Measurements of Pigment Absorption Coefficients and Retrieval Models of Pigment Concentration in Turbid Coastal Waters[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013 [余小龙. 浑浊海岸水体色素成分的吸收特性测量及其浓度的遥感反演[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.]

[5] Leonid G S, Shen F. Optical Closure for the Remote-Sensing Reflectance based on Accurate Radiative Transfer Approximations: The Case of Changjiang (Yangtze) River Estuary and Its Adjacent Coastal Area, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12): 4193-4224.

[6] Lubac B, Loisel H. Variability and Classification of Remote Sensing Reflectance Spectra in the Eastern English Channel and Southern North Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(1): 45-58.

[7] Hong Guanlin, Shen Fang, Shen Hong. Modeling of Seawater Reflectance in the Yangtze Estuary and the Adjacent Sea[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2012, 52(1): 37-46. [洪官林, 沈芳, 沈宏. 长江口及邻近海域水体遥感反射率的模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012, 52(1): 37-46.]

[8] Mobley C D. Light and Water [M]. San Diego: Academic Press, 1994.

[9] Pope R M, Fry E S. Absorption Spectrum ( $380 \sim 700 \text{ nm}$ ) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements[J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8710-8723.

[10] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, *et al.* Hyperspectral Remote Sensing for Shallow Waters. I. A Semianalytical Model[J]. Applied Optics, 1998, 37(27): 6329-6338.

[11] Zhang Jinfang. Parameterization and Variability of Phytoplankton Absorption Properties in South Adjacent Coastal Ocean of the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. [张晋芳. 长江口南部邻近海域浮游植物吸收特性及其参数化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.]

[12] 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): 43-53.

[13] Shen F, Zhou Y, Hong G. Absorption Property of Non-Algal Particles and Contribution to Total Light Absorption in Optically Complex Waters, A Case Study in Yangtze Estuary and Adjacent Coast[M]. Advances in Computational Environment Science. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 61-66.

- [14] Morel A. Optical Properties of Pure Water and Pure Sea Water[J]. Optical Aspects of Oceanography, 1974; 1-24.
- [15] Gould R W, Arnone R A, Martinolich P M. Spectral Dependence of the Scattering Coefficient in Case 1 and Case 2 Waters [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2377-2397.
- [16] Liu Meng. Scattering Properties of Suspended Particles in High Turbid Waters and Remote Sensing Application[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. [刘猛. 浑浊水体颗粒物散射特性及遥感初步应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.]
- [17] Song Qingjun, Tang Junwu. The Study on the Scattering Properties in the Huanghai Sea and East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, (4): 56-63 [宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报(中文版), 2006, (4): 56-63]
- [18] Kuang Runyuan. Remote Sensing Model of Ocean Color Parameters in Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. [况润元. 长江口水色遥感参数模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.]
- [19] Mobley C D, Sundman L K, Boss E. Phase Function Effects on Oceanic Light Fields[J]. Applied Optics, 2002, (41): 1035-1050.
- [20] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of Bio-optical Parameter Variability on the Remote Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Turbid Productive Waters; Experimental Results [J]. Applied Optics, 2005, 44(3): 412-422.
- [21] Zhou L, Roberts D A, Ma W C, *et al.*, Estimation of Higher Chlorophylla Concentrations Using Field Spectral Measurement and HJ-1A Hyperspectral Satellite Data in Dianshan Lake, China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 88: 41-47. Doi: 10. 1016/j. isprsjprs. 2013. 11. 016.
- [22] Gilerson A, Zhou J, Hlaing S, *et al.* Fluorescence Component in the Reflectance Spectra from Coastal Waters. Dependence on Water Composition [J]. Optics Express, 2007, 15 (24): 15702-15721.
- [23] Xu Liangjiang, Wang Hong, Huang Changchun, *et al.* Fluorescence Inversion of Chlorophyll-a in Taihu Lake an Autumn[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29 (3): 433-441. [徐良将, 王红, 黄昌春, 等. 秋季太湖叶绿素 a 浓度荧光反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 433-441.]
- [24] Cheng F L, Chuanm H, Jennifer C, *et al.* Evaluation of Chlorophyll-a Remote Sensing Algorithms for an Optically Complex Estuary[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, (129): 75-89.

## Influence of Suspended Particulate Matter on Chlorophyll-a Retrieval Algorithms in Yangtze River Estuary and Adjacent Turbid Waters

Chen Yuli, Shen Fang

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research,  
East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Combined with bio-optical model of the Yangtze River Estuary and adjacent water, this study utilized underwater light field simulation model Hydrolight to obtain remote sensing reflectance spectra of various water types. The sensitivity of remote sensing reflectance to suspended particulate matter (SPM) and the influence on four kinds of chlorophyll-a (Chla) retrieval algorithms (two-band algorithms, three-band algorithm, fluorescent light height (FLH) algorithm, synthetic chlorophyll index (SCI) algorithm) by SPM were analyzed. Results showed that the RSME between the Hydrolight simulated remote sensing reflectance and that of in situ measurements were smaller than  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ , with higher simulation accuracy of remote sensing reflectance from 550 nm to 725 nm. The impact of SPM on remote sensing reflectance decreased with an increase of Chla concentration, which means a decrease of sensitivity. The two-band and three-band algorithms were suitable for chlorophyll-a retrieval with low SPM concentration. FLH was highly influenced by SPM when retrieving Chla, while SCI exhibited better potential of dismissing the influence of SPM when retrieving Chla in highly turbid waters.

**Key words:** Chlorophyll-a; Suspended particulate matter; Remote sensing reflectance; Retrieval algorithms; Yangtze river estuary