

黄河口海域颗粒有机碳浓度遥感反演与时空分布特征

牟冰¹, 崔廷伟^{2*}, 秦平¹, 巩加龙¹, 肖艳芳², 郑荣儿¹

¹中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

²国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要 基于黄河口海域实测数据,建立了利用 745 nm(模型 1)和 680 nm(模型 2)波段遥感反射率的颗粒有机碳(POC)浓度反演模型,得到的平均相对误差(APD)均低于 26%,其中模型 1 表现更优。结合海洋水色成像仪(GOCI)影像和实测数据对两个模型进行了精度评估,平均相对误差均在 30%以内。基于所建立的模型和卫星遥感影像,分析了逐时、大风过程(几日之间)、季节变化三种情况下黄河口海域 POC 浓度的时空变化特征。结果表明,冬季 POC 浓度整体较高,夏季 POC 浓度整体较低;渤海湾附近出现 POC 浓度最高值。三种情况下,POC 浓度的变化范围在同一尺度上,表明短时间间隔并不意味着 POC 浓度变化范围也小,其季节平均效应是显著的。

关键词 海洋光学; 颗粒有机碳; 遥感反演; 黄河口; 时空分布

中图分类号 P733.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0801004

Remote Sensing Retrieval and Temporal-Spatial Distribution Characteristics of Particulate Organic Carbon Concentration in Seawater Near Yellow River Estuary

Mu Bing¹, Cui Tingwei², Qin Ping¹, Gong Jialong¹, Xiao Yanfang², Zheng Ronger¹

¹College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

²The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract Two particulate organic carbon (POC) concentration retrieval models are developed with remote sensing reflectance at 745 nm (model 1) and 680 nm (model 2) based on the data collected near the Yellow River Estuary. The average percentage differences (APD) of the two models are less than 26%, and model 1 performs better. Accuracy evaluation is carried out with geostationary ocean color imager (GOCI) images and the measured data, and the average relative error is less than 30%. The developed models are used to analyze the temporal and spatial variation of POC concentration in the seawater near the Yellow River Estuary on the time scales of hour, day (for strong wind process) and season, respectively. The results show that the POC concentration is high in winter, and the POC concentration is low in summer. The peak value of POC concentration is found near the Bohai Bay. The variations of POC concentration are of the same order of magnitude under the three conditions, which shows that the obvious change of POC concentration may happen even in shorter time scale, while the seasonal mean effect is significant.

Key words ocean optics, particulate organic carbon; remote sensing retrieval; Yellow River Estuary; temporal and spatial distribution

OCIS codes 010.4450; 010.1030; 010.0280

收稿日期: 2017-03-20; **收到修改稿日期:** 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41606197,41476101,41476159,41506202)、全球变化与海气相互作用专项任务(GASI-03-03-01-01)、中韩海洋科学共同研究中心项目(PI-2017-3)、广东省自然科学基金青年基金(2014A030310287)、热带海洋国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题(LT01509)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx703-201601-014)

作者简介: 牟冰(1978—),女,博士,讲师,主要从事海洋光学和水色遥感方面的研究。E-mail: mubing@ouc.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: cuitingwei@fio.org.cn

1 引 言

颗粒有机碳(POC)浓度是海水中有机颗粒物的碳含量,其中有机颗粒物包含浮游植物、浮游动物细胞及其相应的非生命碎屑、陆源有机颗粒物等。作为海洋碳循环研究中重要的参数,颗粒有机碳的分布受到物理、化学、生物过程等众多因素的影响。

水色卫星遥感具有大面、同步的优势,是量化 POC 浓度和研究其时空变化的重要手段,弥补了传统航次调查的不足。在过去的几十年间,POC 浓度反演算法的研究已成为遥感研究的重要内容之一,目前主要有基于固有光学量^[1-3]和基于遥感反射率的反演方法^[4-8]。基于固有光学量的 POC 浓度反演方法主要通过建立光束衰减系数、吸收系数等固有光学量与 POC 浓度的经验关系实现,但是固有光学量现场测量不够方便易行。由于卫星传感器获取的是表观光学量,且表观光学量相对易于现场测量,直接基于表观光学量遥感反射率的 POC 浓度遥感反演方法更简单易行。在 POC 浓度反演过程中,尤其是浮游生物主导的水体中,蓝绿波段遥感反射率较多地被用来建立模型。Stramski 等^[4]利用 443,490,555 nm 的遥感反射率在东太平洋南部和东大西洋建立了 POC 浓度的反演模型,该模型主要针对大洋水体,沿岸水体的 POC 浓度反演模型则需要进一步的研究。针对墨西哥湾,Son 等^[5]借用 SeaWiFS OC4v4 叶绿素浓度反演算法的思想,利用蓝绿波段遥感反射率建立了最大归一化碳指数 POC 浓度的反演方法。Wang 等^[6]利用我国珠江口海域赤潮过程的实测数据,同样利用蓝绿波段遥感反射率建立了区域适用的 POC 浓度反演模型。但是,由于不同水体水色组分不同,光学特征存在显著区域性差异^[9-10],尤其是复杂浑浊水体,因此基于蓝绿波段遥感反射率建立的模型不能满足所有水体的需求。Woźniak 等^[7]利用 490 nm 和 625 nm 波段遥感反射率建立了 POC 浓度反演方法。张杰等^[8]以内陆湖泊为例,建立了基于 834 nm 波段的单波段 POC 浓度反演模型和基于 563 nm 和 834 nm 波段的双波段 POC 浓度反演模型。

黄河作为我国第二大河,河口及临近海域受陆源影响严重,具有独特的区域性特征^[11],其 POC 浓度时空变化显著,其相关研究一直备受关注^[12-14]。但是,由于现场实测数据、大气校正等因素的制约,黄河口海域 POC 浓度遥感反演算法尚未建立,时空分布特征研究不足。本文基于实测 POC 浓度和光谱数据,建立了黄河口海域的 POC 浓度反演模型;将该模型应用于海洋水色成像仪(GOCI)影像,并利用实测数据进行检验和评估;基于 GOCI 影像和中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像,对黄河口海域 POC 浓度的时空特征进行了分析,包括逐时变化特征、大风过程影响和季节差异等。

2 实测数据

于 2011 年 11 月 21 日至 2011 年 12 月 12 日期间开展了黄河口海域光学观测实验,实验站位分为巡航站位和定点站位,定点站位每隔 1 h 采集一次数据,站位分布如图 1 所示。

现场采集海水样品后,利用 Whatman GF/F 滤膜进行过滤,将滤膜在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下低温保存。基于高温燃烧法对 POC 浓度进行测量,将滤膜称重后放在密闭干燥器中利用浓盐酸熏蒸 12 h,以达到去除无机碳的目的。

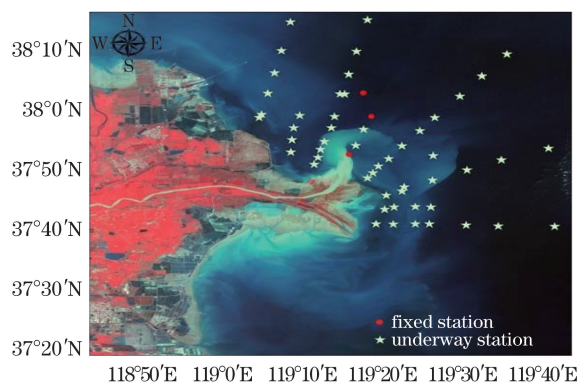


图 1 站位分布图

Fig. 1 Station distribution

的;然后在 50 °C 烘干过程中利用 Milli-Q 将滤膜洗至中性。利用 Shimadzu TOC-V_{CPN} 和固体试样燃烧设备 SSM-5000A 对样品进行测定,共获得 POC 浓度数据 101 组,实测数据直方图如图 2 所示,数据范围为 11.84~297.69 mg·m⁻³,平均值为 70.22 mg·m⁻³。

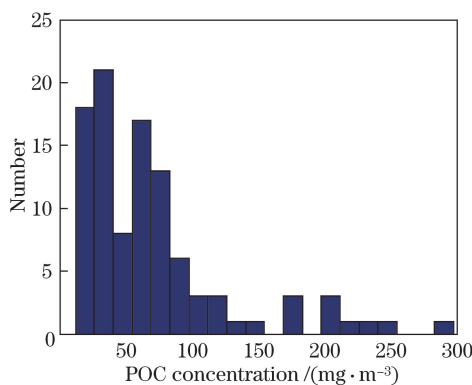


图 2 POC 浓度实测数据直方图

Fig. 2 Histogram of measured POC concentration

基于重量法测定了悬浮物浓度(SPM)。滤膜经浸泡、烘干和恒温脱水冷却处理后,利用真空泵对水样进行过滤,压力保持在 $(5\sim6)\times 10^4$ Pa 之间,防止负压过大。将悬浮物质颗粒嵌入滤膜微孔,待滤膜烘干和再次恒温脱水冷却后,根据滤膜重量的变化结合体积测定了悬浮物浓度。

利用荧光法进行了叶绿素 a 浓度(CHL)的测量。将过滤海水样品后的滤膜放入加有 10 cm³ 体积分数为 90% 的丙酮提取瓶内,拧紧瓶盖并摇荡提取瓶,将提取瓶在 0 °C 环境放置 12~24 h。然后,将提取瓶在室温、黑暗环境下放置 0.5 h,瓶内上清液倒入测定池中,利用 Turner-Design 10 荧光计测定样品的荧光值,滴入 1 滴体积分数为 10% 的盐酸,30 s 后测定酸化后荧光值,利用酸化前后的荧光值结合体积计算得到 CHL。

实验中共获得 133 组 SPM 数据,数据变化范围为 3.9~393.55 g·m⁻³,平均值为 90.6 g·m⁻³;此外,还得到 101 组 CHL 数据,数据变化范围为 0.24~2.94 mg·m⁻³,平均值为 0.77 mg·m⁻³,两者的统计直方图如图 3、4 所示。

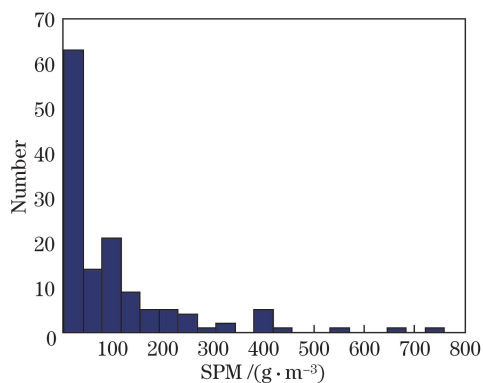


图 3 SPM 实测数据统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of measured SPM

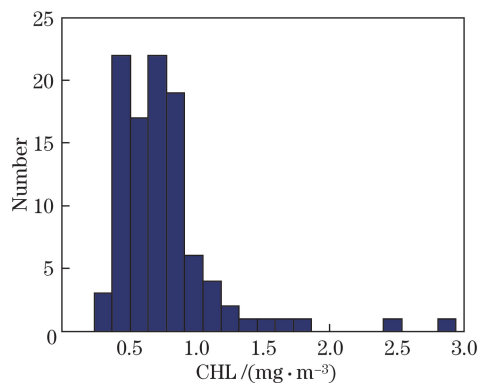


图 4 CHL 实测数据统计直方图

Fig. 4 Statistical histogram of measured CHL

由匹配的 POC-SPM、POC-CHL 数据散点图(图 5、6)可知,POC 浓度与 SPM 的线性相关性良好,相关系数 $R^2=0.77$,但 POC 浓度与 CHL 的相关性较差。

利用地物光谱仪进行了遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 的现场光谱测量(图 7),光谱范围为 350~2500 nm,其中 350~1000 nm 的光谱分辨率优于 1.5 nm,所采用的方法是海面之上法^[15]。实验过程中应避免太阳直射光的反射,忽略或避开水表面泡沫,剔除海面反射的天空漫射光,通过测量水体表面辐亮度得到海表面离水辐亮度 L_w 。海表面之上的向下辐照度 $E_d(0^+)$ 由标准板测得,将 L_w 与 $E_d(0^+)$ 相除,可得到遥感反射率。

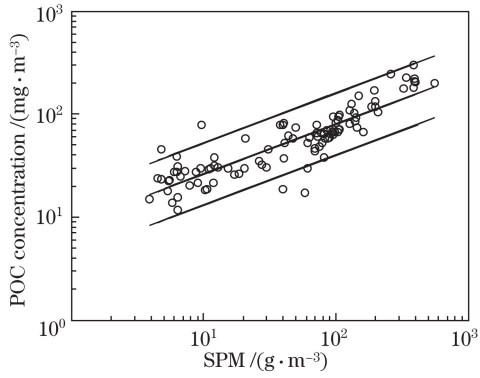


图 5 SPM 与 POC 浓度实测数据散点图

Fig. 5 Scatter plots of measured SPM and POC concentration

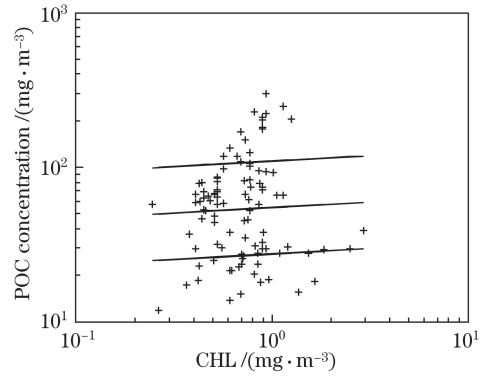


图 6 CHL 与 POC 浓度实测数据散点图

Fig. 6 Scatter plots of measured CHL and POC concentration

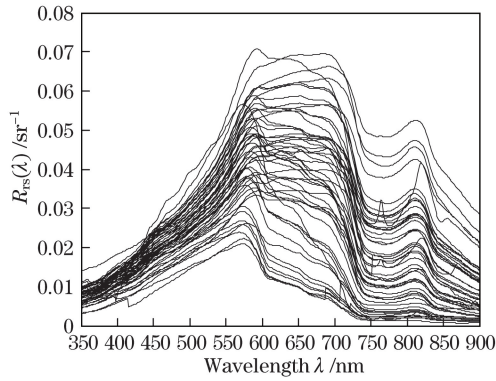


图 7 实测遥感反射率光谱

Fig. 7 Measured remote-sensing reflectance spectrum

3 POC 浓度遥感反演

3.1 POC 浓度反演模型的建立

经时空匹配获得 40 组 POC 浓度与 $R_{rs}(\lambda)$ 匹配数据, POC 浓度范围为 $15.08 \sim 209.64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。基于 POC 浓度和 $R_{rs}(\lambda)$ 数据集, 计算各波段的 R_{rs} 与 POC 浓度的相关系数, 发现蓝绿光波段 R_{rs} 与 POC 浓度的相关性较弱, 红光和近红外波段 R_{rs} 与 POC 浓度的相关性显著。在此基础上, 考虑水色卫星波段设置, 建立了两个经验模型。模型 1 和模型 2 可分别表示为

$$\lg C_{\text{POC}} = a_1 R_{rs}^2(\lambda_1) + b_1 R_{rs}(\lambda_1) + c_1, \quad (1)$$

$$\lg C_{\text{POC}} = a_2 R_{rs}(\lambda_2) + b_2, \quad (2)$$

式中 C_{POC} 为 POC 浓度; a_1, b_1, c_1, a_2, b_2 为系数; λ_1, λ_2 为波长, 分别为 745 nm 和 680 nm。

POC 浓度反演值与实测值的散点图如图 8 所示, 统计结果如表 1 所示。在对数空间计算 R^2 , 平均相对误差 (E_{APD})、均方根误差 (E_{RMSE}) 和平均比值 ($E_{\text{mean_ratio}}$) 可分别表示为

$$E_{\text{APD}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}\left(\frac{y'_i - y_i}{y_i}\right)}{n}, \quad (3)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{mean_ratio}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y'_i}{y_i}, \quad (5)$$

式中 n 为样本数, y'_i 为 POC 浓度反演值, y_i 为 POC 浓度实测值。平均比值趋近于 1 表示反演值与实测值一致性较好, 平均比值大于 1 为高估, 平均比值小于 1 为低估。

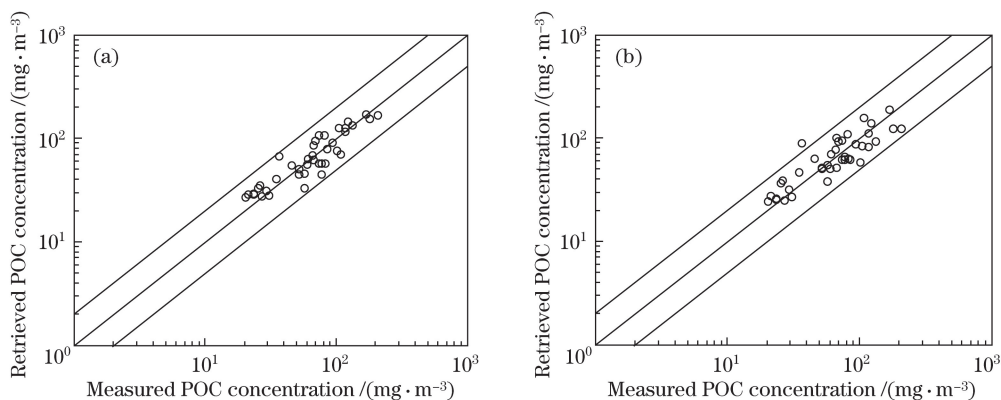


图 8 POC 浓度反演值与实测值的散点图。(a)模型 1;(b)模型 2

Fig. 8 Scatter plots of retrieved and measured POC concentration. (a) Model 1; (b) model 2

表 1 POC 浓度反演值与实测值统计结果

Table 1 Statistic results of retrieved and measured POC concentration

Type of model	$E_{APD} / \%$	$E_{RMSE} / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_{\text{mean_ratio}}$	R^2	n
Model 1	20.4	18.4	1.03	0.83	40
Model 2	25.8	27.0	1.05	0.76	40

由表 1 可知,两种模型的反演值与实测值的平均相对误差均在 26% 以内,其中模型 1 表现更优。

3.2 基于同步 GOCI 实测数据的 POC 浓度遥感反演精度检验

由于与卫星同步的 POC 浓度实测数据不足,考虑到 SPM 与 POC 浓度存在显著相关性,因此在进行 GOCI POC 浓度反演结果检验时,利用实测 SPM 经验估算的 POC 浓度值作为真实值。经时空匹配,共获取 SPM 与 GOCI 影像匹配数据 14 组。SPM 的变化范围为 18.6~295.22 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均值为 155.4 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。基于 POC-SPM 数据集建立两者的经验关系为

$$\lg C_{\text{POC}} = a_3 \lg C_{\text{SPM}} + b_3, \quad (6)$$

式中 C_{SPM} 为悬浮物浓度, a_3 、 b_3 为系数。

由于 GOCI 在黄河口海域大气校正存在困难,利用 Ruddick 等^[16]结合 Wang 等^[17]提出的大气校正方法进行了该海域的大气校正。依据 Ruddick 方法,需确定近红外两个波段($\lambda_1 = 745 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 865 \text{ nm}$)的离水反射率比值 $k [k = \rho_w(\lambda_1) / \rho_w(\lambda_3)]$ 和气溶胶反射率比值 $\epsilon [\epsilon = \rho_a(\lambda_1) / \rho_a(\lambda_3)]$, 其中 k 由实测水体反射率数据确定; ϵ 在 1.00~1.12 之间。黄河口实测 $\rho_w(\lambda_1)$ 与 $\rho_w(\lambda_3)$ 的散点图如图 9 所示,两者的相关系数 R^2 为 0.96,表明近红外两个波段离水反射率的线性相关性显著。通过直线拟合得到 $k = 1.71$ 。数据基本分布在该直线附近,在 $\rho_w(\lambda_3)$ 高于 0.08 时绝对偏差稍大,但是相对偏差仍较为理想,表明黄河口海域水体尽管悬浮物浓度高,变化范围大,但是其两个近红外波段光谱基本保持了较好的线性关系。根据 He 等^[18]关于中国近海的研究, ϵ 取 1。

基于 GOCI 影像的 POC 浓度反演值与基于实测 SPM 得到的 POC 浓度反演值的散点图和统计结果分别如图 10 和表 2 所示。模型 1 和模型 2 的平均相对误差均低于 30%,模型 1 的均方根误差较模型 2 更优。模型 1 和模型 2 的误差基本在 50% 范围内,其中模型 1 反演效果更稳定,模型 2 在高 POC 浓度值时出现了低估现象。

表 2 基于同步 GOCI 和 SPM 实测数据的 POC 浓度反演值统计结果

Table 2 Statistic results of retrieved POC concentration based on synchronous GOCI and SPM measured data

Parameter	Model 1	Model 2
$E_{APD} / \%$	25.80	28.20
$E_{RMSE} / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	19.11	33.89
$E_{\text{mean_ratio}}$	1.19	0.88

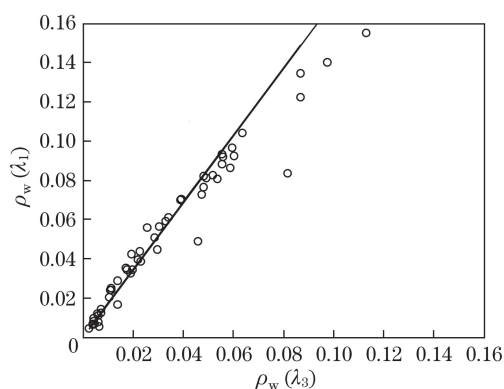


图 9 实测水体反射率散点图
Fig. 9 Scatter plot of measured water reflectivity

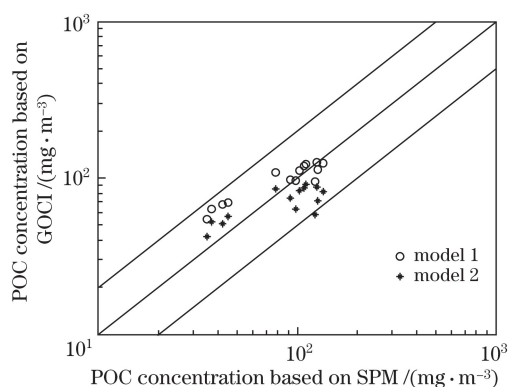


图 10 基于同步 GOCI 和 SPM 实测数据的 POC 反演值散点图
Fig. 10 Scatter plots of retrieved POC concentration based on synchronous GOCI and SPM measured data

4 黄河口海域 POC 浓度时空分布特征分析

基于 GOCI 影像和 MODIS 月及季节平均产品,针对逐时、大风过程(几日之间)和季节变化三种不同情况,利用 POC 浓度遥感反演模型 1 和模型 2,并进行黄河口海域 POC 浓度遥感反演,分析 POC 浓度时空分布特征。

4.1 POC 浓度逐时变化

利用 GOCI 逐时影像分析 POC 浓度逐时变化特征,考虑影像质量,选择了 2011 年 4 月 11 日 7 景逐时影像。基于 POC 浓度遥感反演模型 1 和大气校正方法^[16-17]得到该日 POC 浓度逐时影像,结果如图 11 所示,该日 7 景影像的 POC 浓度值在近岸区域基本超过了 70 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$;同时发现,随着时间的推移,POC 浓度高值区域整体减小比较明显。

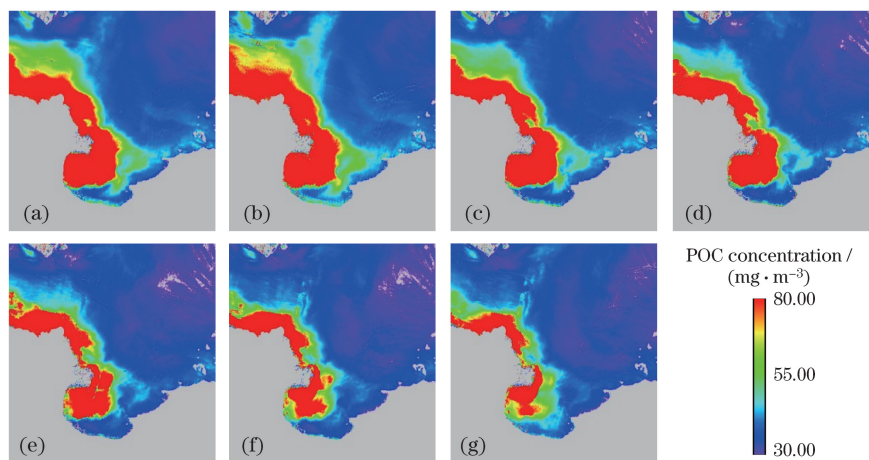


图 11 2011 年 4 月 11 日逐时 POC 浓度分布。(a) 8:30; (b) 9:30; (c) 10:30; (d) 11:30; (e) 12:30; (f) 13:30; (g) 14:30
Fig. 11 Hourly POC concentration distributions on 2011-04-11. (a) 8:30; (b) 9:30; (c) 10:30; (d) 11:30; (e) 12:30; (f) 13:30; (g) 14:30

对 POC 浓度逐时影像进行差分计算发现,黄河入海口部分海域 6 h 之内的变化超过 $60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,相邻两景变化可超过 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;在极轨卫星过境时间范围(10:00—13:00)内,相邻两景变化可超过 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。计算 7 景 POC 浓度标准偏差(SD),发现黄河入海口附近和近岸部分区域 SD 值可达到 $40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。

为进一步解释 POC 浓度逐时影像变化,基于 MetOP-A 极轨卫星搭载的散射计(ASCAT)风场数据,下载了 2011 年 4 月 11 日黄河口海域的风场数据,如图 12 所示。风速基本在 15 n mile/h 以下,同时近岸风速基本在 10 n mile/h 以下,尤其是莱州湾东部和黄河入海口南部区域风速基本低于 5 n mile/h,因此更有利于悬浮物引起的 POC 浓度减小。

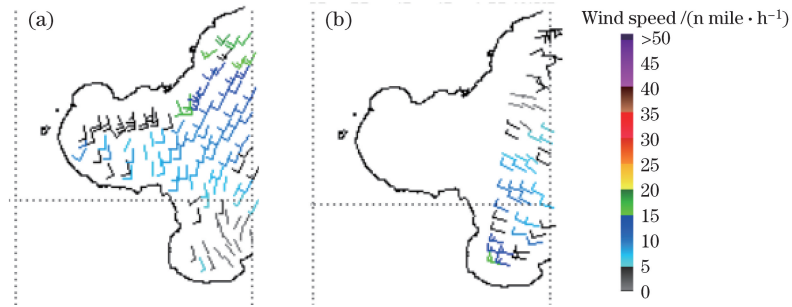


图 12 2011 年 4 月 11 日 ASCAT 风场数据。(a)升轨；(b)降轨

Fig. 12 ASCAT wind field data on 2011-04-11. (a) Ascending; (b) descending

4.2 大风过程对 POC 浓度分布的影响

根据风场数据(图 13),可以看出 2012 年 11 月 18 日黄河口海域发生一次大风过程。2012 年 11 月 18 日黄河口海域风速多高于 30 n mile/h,2012 年 11 月 17 日风速低于 20 n mile/h,2012 年 11 月 17、18 日风向均为西北方向;2012 年 11 月 20 日风速下降,基本低于 15 n mile/h,且风向改变为西南方向。

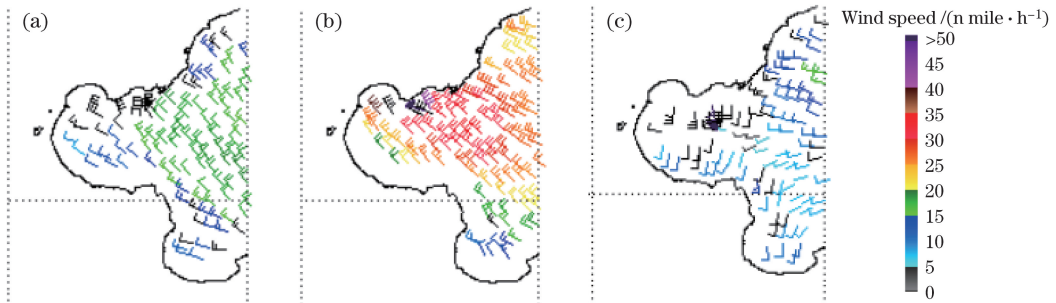


图 13 黄河口海域 ASCAT 风场数据。(a) 2012-11-17; (b) 2012-11-18; (c) 2012-11-20

Fig. 13 ASCAT wind field data of the sea area near the Yellow River estuary. (a) 2012-11-17; (b) 2012-11-18; (c) 2012-11-20

由于大风对 POC 浓度分布的影响通过海流实现,同时考虑到渤海平均水深为 18 m,黄河口附近海域水深仅为 10 m 左右,因此下载了海洋模式(HYCOM)表层流场数据,利用 surfer 软件制作得到该大风过程的海表流场图,如图 14 所示。2012 年 11 月 17 日海流整体为东南方向,2012 年 11 月 18 日海流整体速度增加明显,体现了大风影响海流方向的变化。自渤海海峡方向流入,在莱州湾西部和渤海湾转为西北方向,2012 年 11 月 20 日海流速度显著降低,仍由渤海海峡方向流入,在渤海湾转为东北方向。

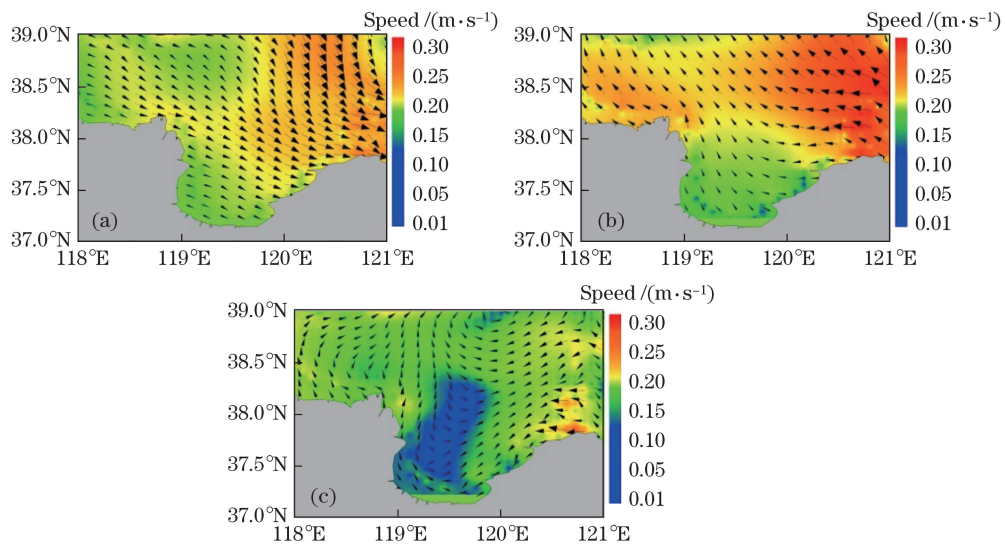


图 14 黄河口海域海表流场。(a) 2012-11-17; (b) 2012-11-18; (c) 2012-11-20

Fig. 14 Sea surface current of the sea area near the Yellow River estuary. (a) 2012-11-17; (b) 2012-11-18; (c) 2012-11-20

选取大风前后两日 GOCI 两景影像[2012-11-17 11:30 和 2012-11-19 11:30]反演得到的 POC 浓度分布如图 15 所示。2012 年 11 月 19 日 POC 浓度高值分布范围明显增大,尤其在渤海湾南部和莱州湾东南部。

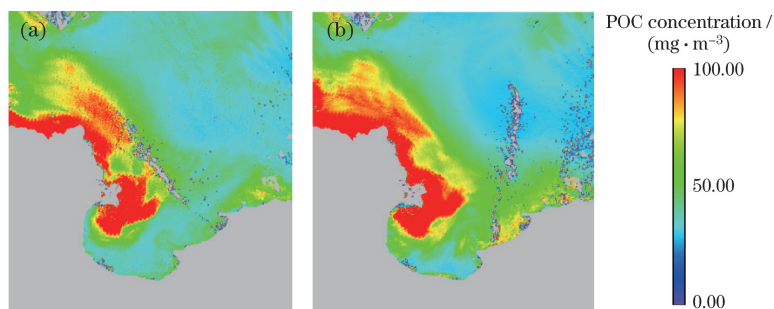


图 15 大风前后 POC 浓度分布。(a) 2012-11-17 11:30; (b) 2012-11-19 11:30

Fig. 15 POC concentration distributions before and after strong wind. (a) 2012-11-17 11:30; (b) 2012-11-19 11:30

对 2012-11-17 和 2012-11-19 的 POC 浓度影像进行差分,结果如图 16 所示。河口附近海域基本 POC 浓度均有所增加,渤海湾南部、莱州湾东部和黄河入海口北部 POC 浓度的增加超过 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结合图 13、14 可知,大风过程影响的流场变化加剧了该海域悬浮物的再悬浮,尤其是悬浮物浓度高的区域,最终引起了 POC 浓度的增加。

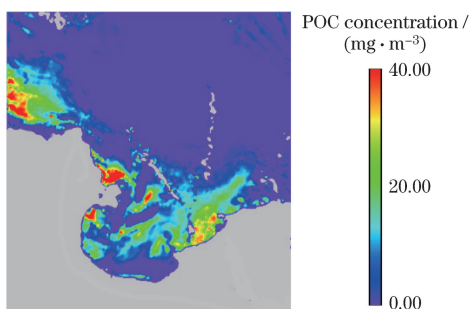


图 16 经滤波处理后的 POC 浓度分布差分

Fig. 16 Filtered POC concentration distribution difference

4.3 POC 浓度季节变化特征

由于 GOCI 没有季节平均产品,因此针对黄河口海域基于 MODIS 的 4 km 分辨率三级产品进行 POC 浓度反演。MODIS 产品在中国近海得到了初步的检验,其反演值与实测值之间具有良好的线性关系^[19]。考虑到 MODIS 三级产品遥感反射率数据不提供红外波段,因此利用基于红光波段 680 nm 的 POC 浓度反演模型(模型 2)进行 POC 浓度反演。

利用 MODIS 的 2012—2013 年季节平均产品进行 POC 浓度反演,结果如图 17 所示。冬季 POC 浓度整体较高,渤海湾附近的 POC 浓度出现最高值,夏季 POC 浓度整体较低。

基于 MODIS 2013 年月平均产品得到的 POC 浓度逐月产品(图 18)同样体现了相同的空间和季节变化特征,渤海湾和莱州湾 POC 浓度较高。2013 年 1,2,3,11,12 月 POC 浓度较高,5~8 月 POC 浓度较低。分析 POC 浓度空间分布发现,黄河口临近的外围海域有时存在相对低值,在莱州湾北侧有时出现高值的空间特征,该特征与文献^[13]所述基本一致。入海口处污染物增加,造成 POC 浓度较高。临近入海口的外围海域是黄河入海细颗粒物的汇集处,有机碳含量低,容易受潮流、环流的影响,因此 POC 浓度有时相对较低,莱州湾北部的 POC 浓度特征可能与附近分布的排污口、倾倒区以及海洋生产力较高有关^[13]。POC 浓度秋季季节产品也反映了这一特点。

4.4 讨论

逐时、大风过程(几日之间)和季节代表了不同的时间尺度。三种情况下,基于 POC 浓度反演模型得到的黄河口 POC 浓度影像基本体现了近河口区域 POC 浓度较高、沿岸 POC 浓度较高的特征,同时随着离岸

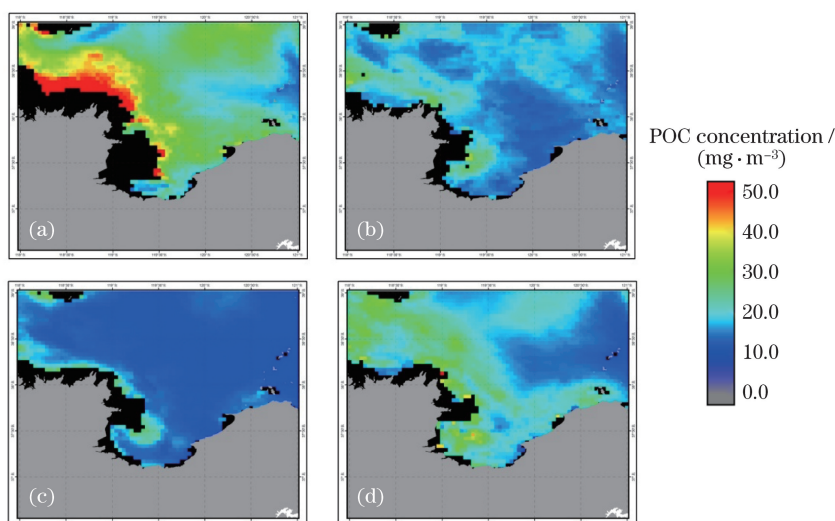


图 17 基于 MODIS 季节平均产品的 POC 浓度分布。(a) 冬季；(b) 春季；(c) 夏季；(d) 秋季

Fig. 17 POC concentration distributions based on MODIS seasonal average products.

(a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

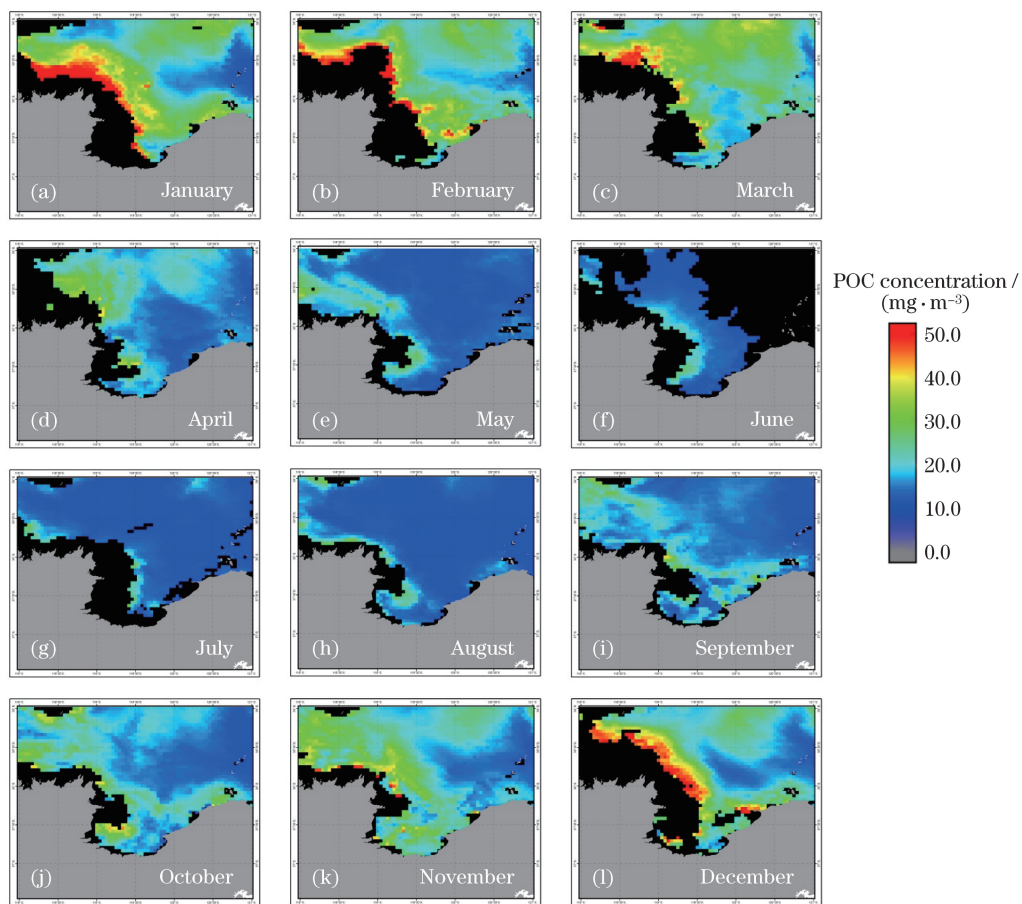


图 18 基于 MODIS 月平均产品的 POC 浓度分布

Fig. 18 POC concentration distributions based on MODIS monthly average products

距离的增加 POC 浓度降低。季节变化采用的 POC 浓度反演模型 2 虽然存在高值低估,但是高值区通常在河口近岸,季节产品中已掩膜,因此 POC 浓度反演模型的不同对结果的影响有限。比较三种情况下 POC 浓度的变化范围发现,逐时变化尺度已可达到与季节变化尺度相当的 POC 浓度变化范围,部分区域的逐时变化尺度甚至可超过与季节变化尺度相当的 POC 浓度变化范围;大风前后代表了几日之间的变化,与季节

POC 浓度变化也可在一个量级上,表明短时间间隔并不意味着 POC 浓度的变化范围也小,POC 浓度季节尺度的平均效应是显著的。

黄河口海域 POC 浓度的季节变化特征与黄河口海域独特的高含沙量密切相关。黄河每年向海洋输送的泥沙可达到 16 亿吨,黄河口有机碳来源单一,以陆源输入为主,不受季节变化影响;其 CHL 丰、枯水期变化不明显^[20],与 POC 浓度的相关性差(图 6),POC/CHL 的比值的范围变化为 61~2500^[20],表明非生命态颗粒有机碳对总有机碳变化起主导作用。因此,与浮游生物主导影响的区域相比,黄河口海域 POC 季节变化特征主要受悬浮泥沙影响。已有研究表明,冬季是黄河口海域泥沙运输的主要季节,冬季悬浮泥沙含量约为夏季低流量期间的 10~25 倍,冬季悬浮泥沙通量约为夏季低流量期间的 4~128 倍^[21]。同时,夏季悬浮泥沙主要在水体密度跃层以下的下层水体传输^[21],而冬季风浪大,导致海底泥沙再悬浮剧烈。上述特点均有助于形成黄河口海域 POC 浓度冬季高、夏季低的季节特征。

5 结 论

基于黄河口海域 2011 年光学实验获得的现场实测数据,建立了分别基于 745 nm(模型 1)和 680 nm(模型 2)波段的 POC 浓度反演模型,两种模型反演值与实测值的 APD 均在 26% 以内,其中模型 1 表现更优。结合 GOCI 影像和实测数据对模型进行了精度评估,模型 1 和模型 2 的 APD 均低于 30%。基于卫星遥感影像,分析了逐时、大风过程(几日之间)和季节三种不同时间尺度下黄河口海域 POC 浓度的时空变化特征。结果表明,冬季 POC 浓度整体最高,夏季 POC 浓度整体最低;渤海湾附近出现 POC 浓度最高值。黄河口海域 POC 浓度的总体空间分布基本体现了近河口区域 POC 浓度高值、沿岸 POC 浓度高值且随着离岸距离的增加 POC 浓度降低的特征。三种情况下,POC 浓度的变化范围在同一尺度上,表明短时间间隔并不意味着 POC 浓度的变化范围也小,季节平均效应是显著的。

致谢 感谢中韩海洋科学共同研究中心对本研究的支持。

参 考 文 献

- [1] Mishonov A V, Gardner W D, Richardson M J. Remote sensing and surface POC concentration in the south Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(22/26): 2997-3015.
- [2] Gardner W D, Mishonov A V, Richardson M J. Global POC concentrations from in-situ and satellite data[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(5/6/7): 718-740.
- [3] Loisel H, Bosc E, Stramski D, *et al.* Seasonal variability of the backscattering coefficient in the Mediterranean Sea based on satellite SeaWiFS imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4203-4206.
- [4] Stramski D, Reynolds R A, Babin M, *et al.* Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(1): 171-201.
- [5] Son Y B, Gardner W D, Mishonov A V, *et al.* Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 50-61.
- [6] Wang G F, Zhou W, Cao W X, *et al.* Variation of particulate organic carbon and its relationship with bio-optical properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(9): 1939-1947.
- [7] Woźniak S B, Darecki M, Zabłocka M, *et al.* New simple statistical formulas for estimating surface concentrations of suspended particulate matter (SPM) and particulate organic carbon (POC) from remote-sensing reflectance in the southern Baltic Sea[J]. *Oceanologia*, 2016, 58(3): 161-175.
- [8] Zhang Jie, Lü Heng, Pan Hongzhou, *et al.* Quantitative estimation of particulate organic carbon and diurnal variation in inland eutrophic lake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1618-1624.
张 杰, 吕 恒, 潘洪洲, 等. 内陆湖泊颗粒有机碳反演及日变化初步研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(12): 1618-1624.
- [9] Liu Qingxia, Huang Xiaoping, Zhang Xia, *et al.* Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4403-4412.
刘庆霞, 黄小平, 张 霞, 等. 2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源[J]. *生态学报*, 2012,

- 32(14): 4403-4412.
- [10] Yang Q C, Zhang X S, Xu X Y, *et al.* Spatial patterns and environmental controls of particulate organic carbon in surface waters in the conterminous United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 266-275.
- [11] Mou Bing, Cui Tingwei, Qin Ping, *et al.* Remote Sensing retrieval and hourly variation analysis of total absorption coefficient in the Bohai Sea with geostationary ocean color imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401003.
牟冰, 崔廷伟, 秦平, 等. 基于静止轨道水色卫星数据的渤海总吸收系数遥感反演和逐时变化研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401003.
- [12] Hu Limin, Deng Shenggui, Guo Zhigang, *et al.* Distribution and source of particulate organic carbon in the Bohai Bay and its adjacent Bohai Sea, China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 39-46.
胡利民, 邓声贵, 郭志刚, 等. 夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 39-46.
- [13] Qiao Shuqing, Shi Xuefa, Bai Yazhi, *et al.* Distribution of organic carbon, nitrogen in suspended and surface sediments and their controlling factors off the Huanghe (Yellow River) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 354-362.
乔淑卿, 石学法, 白亚之, 等. 黄河口及邻近渤海海域悬浮体和沉积物中有机碳、氮的分布特征及其影响因素[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 354-362.
- [14] Hu Bangqi, Li Guogang, Bu Ruyuan, *et al.* Distribution of suspended sediment and particulate organic carbon of the northern Huanghe Delta in winter in China[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(6): 1069-1074.
胡邦琦, 李国刚, 布如源, 等. 黄河三角洲北部悬浮体和颗粒有机碳的分布与影响因素[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(6): 1069-1074.
- [15] Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, *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.
- [16] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 897-912.
- [17] Wang M H, Gordon H R. A simple, moderately accurate, atmospheric correction algorithm for SeaWiFS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(3): 231-239.
- [18] He X Q, Bai Y, Pan D L, *et al.* Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20754-20770.
- [19] Sun Ling, Wang Xiaomei, Guo Maohua. MODIS ocean color product validation around the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(2): 298-306.
孙凌, 王晓梅, 郭茂华. MODIS 水色产品在黄东海域的真实性检验[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(2): 298-306.
- [20] Zhang Longjun, Zhang Xiangshang, Wang Xiaoliang, *et al.* Spatial and temporal distribution of particulate and dissolved organic carbon in Yellow River estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 674-682.
张龙军, 张向上, 王晓亮, 等. 黄河口有机碳的时空输运特征及其影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 674-682.
- [21] Bi Naishuang. Suspended sediment dispersal off the Huanghe (Yellow River) delta and in its adjacent Bohai Sea, its seasonal variation and effect on the delta erosion-accumulation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
毕乃双. 黄河三角洲毗邻海域悬浮泥沙扩散和季节性变化及冲淤效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.