

文章编号: 1004 — 5589 (2017) 01 — 305 — 06

# 南海乐东海域黄色物质浓度反演及其 时空变化分析

张国亮, 陈圣波, 孟凡晓, 范宪创

吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

**摘要:** 为掌握南海乐东海域黄色物质浓度的时间及空间动态, 对该海域黄色物质浓度反演方法及表达方式进行研究。利用在乐东海域遥感地质调查获取的黄色物质吸收系数数据对 Carder 和 Tassan 两种模型进行回归分析, 得到黄色物质浓度反演模型。其中, 利用 Carder 模型进行回归分析得到的回归模型决定系数  $R^2$  为 0.62; 利用 Tassan 模型进行回归分析得到的回归模型决定系数  $R^2$  为 0.78。应用精度较高的 Tassan 回归模型反演黄色物质浓度并进行年度、季度变化分析, 结果表明: ①由近岸到深海, 黄色物质浓度呈现逐渐下降的趋势, 且分布一定程度上受洋流和人类活动的影响; ②黄色物质浓度有逐年上升的趋势, 在不同季节里, 冬季黄色物质浓度最高。

**关键词:** 黄色物质; 吸收系数; 南海; 时空变化

中图分类号: TP79; P714.7 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2017.01.031

## Inversion of yellow substance concentration and its spatial-temporal variation analysis in Ledong waters, South China Sea

ZHANG Guo-liang, CHEN Sheng-bo, MENG Fan-xiao, FAN Xian-chuang

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract:** In order to grasp the spatial-temporal dynamic state of yellow substance concentration in Ledong waters, South China Sea, the inversion method and expression pattern are studied. The yellow substance absorption coefficient data of remote sensing geological survey in Ledong waters are used to do stepwise regression analysis for Carder and Tassan models, and the yellow substance concentration inversion models are obtained. The determination coefficient  $R^2$  of Carder regression model is 0.62, whereas the  $R^2$  of Tassan regression model is 0.78. The high precision Tassan regression model is used to retrieve yellow substance concentration on multiple phases and its variations over the years and seasons are analyzed. The results show that yellow substance concentration is a gradually declining from the shore to deep sea, and its distribution is influenced by ocean currents and human activities to a certain extent. The yellow substance concentration has a yearly rising trend, and its highest concentration in winter.

**Key words:** yellow substance; absorption coefficient; South China Sea; spatial-temporal variation

收稿日期: 2016-05-17; 改回日期: 2016-07-06

基金项目: 乐东工区遥感地质解译(遥感地质资料处理)与国家地质矿产调查评价项目(1212011087112)联合资助。

通讯作者: 陈圣波(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感技术应用与地理信息系统方向的研究. E-mail: chensb@jlu.edu.cn

## 0 引言

黄色物质 (yellow substance, 亦称为 gelbstoff, chromophoric dissolved organic matter, 简称为 CDOM) 实际上是一种有色的可溶性有机物, 其生化成分极为复杂<sup>[1]</sup>。CDOM 能吸收蓝光, 从而使水体呈浅黄色, 因此被称为黄色物质<sup>[2]</sup>。在海洋水色遥感中, 由于黄色物质不便于称重, 通常使用 440 nm 或 400 nm 吸收系数表示其浓度, 单位为  $\text{m}^{-1}$ 。在开阔大洋水域, 考虑到信噪比影响和自然水体中黄色物质对紫外光的衰减, 可以选取 350 nm 或更短波长吸收系数来表示黄色物质的浓度<sup>[3,4]</sup>。黄色物质在紫外—蓝光波段有强烈的吸收, 这种独特的光学性质对海洋浮游植物和表层海水增温有显著影响。同时, 黄色物质作为海水有机物污染的指示因子, 研究其浓度的时空变化对海洋环境监测和海洋生态方面有重要意义。

在黄色物质研究方面, 国际上起步较早, 早期主要是对点测数据进行其吸收、荧光特性及光谱斜率值的研究和确定<sup>[1]</sup>。随着研究的进一步深入, 黄色物质研究方向开始转向海洋大范围监测和卫星反演, 如 1994 年 Tassan 利用那不勒斯海湾水域现场数据建立了黄色物质的反射率经验算法<sup>[5]</sup>, 2008 年 Mannino 在大西洋中部湾利用 MODIS 和 SeaWiFS 数据进行黄色物质反演<sup>[6]</sup>。截至目前, 国内也进行了大量研究, 但大部分研究集中在黄色物质化学组成和光学特性上, 且研究海域多分布在黄、东海海域, 渤海海域及内陆湖泊<sup>[7-11]</sup>。目前国内外对南海海域黄色物质分布的研究相对较少, 直接由卫星数据反演给出的黄色物质空间分布更是非常稀少。本次研究除直接展现乐东海域黄色物质的时空变化外, 更重要的是建立了一种黄色物质卫星反演模式和方法, 为未来南海黄色物质反演及分布制图提供参考和实证尝试。

## 1 研究区及数据概况

### 1.1 研究区概况

研究区位于海南岛的西南部, 隶属海南乐东县, 位于  $18^{\circ} \sim 19^{\circ}\text{N}$ ,  $108^{\circ} \sim 109^{\circ}30'\text{E}$  (图 1)。南海乐东莺歌海盆地位于海南岛以西、印支半岛以东的海域地区, 是一年轻、快速沉降的新生代沉积盆地, 该盆地处于印支地块和扬子—华南板块交界,

受欧亚板块、印—澳板块和太平洋板块的共同影响, 其构造特征较为复杂<sup>[12]</sup>。莺歌海域盐场产量丰富并且藏有丰富的石油和天然气资源, 乐东西方濒临南海, 分布有昌化和南海两大渔场。同时, 海南岛东南的海水在北部湾湾口存在稳定的流动, 一支沿海南岛向西北进入北部湾, 一支向西南进入南海<sup>[13]</sup>, 这些因素的共同作用将会对研究区内海水黄色物质浓度的时空分布产生一定影响。

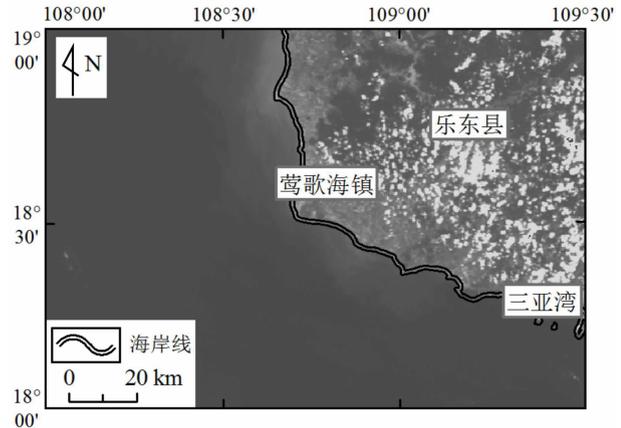


图 1 研究区简图

Fig. 1 Simplified map of studied area

### 1.2 数据概况

本研究采用 MODIS L1B 数据进行反演, 反演前先对数据进行辐射定标、大气校正及几何校正等预处理, 最后得到地表实际反射率用于黄色物质浓度反演。黄色物质浓度年际变化反演采用 2011—2014 年夏季的数据进行反演, 季度变化反演采用 2013 年、2014 年两年内连续 4 个不同季节的 MODIS 数据进行反演。

实地采样时间为 2015 年 2 月, 在研究区内的三亚湾地区由近岸向深海方向进行采样, 并按照采样先后顺序对 16 个采样点进行编号 (图 2)。样品数据委托中国科学院东北地理与农业生态研究所测得。

## 2 方法

利用 13 个采样点实测数据对 Carder 和 Tassan 两种模型分别进行回归分析, 并利用 Carder 和 Tassan 回归模型分别对 2015 年 2 月的 MODIS 数据进行黄色物质浓度反演, 利用 3 个采样点实测数据对

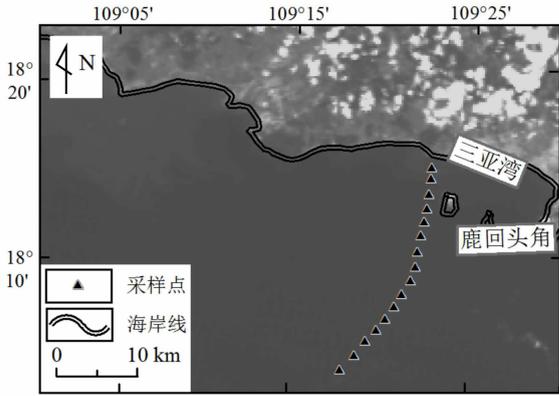


图 2 采样点示意图

Fig. 2 Diagram of sample point

反演结果进行精度评价。回归分析结果显示：采样点实测数据与 Carder 模型回归决定系数  $R^2$  为 0.62，采样点实测数据与 Tassan 模型回归决定系数  $R^2$  达到 0.78。

### 2.1 Carder 回归模型

Carder 模型属于 MODIS 生物光学算法模型中的一种，本研究利用乐东海域实测 CDOM 吸收系数数据对 Carder 模型<sup>[14]</sup>进行回归分析，得到回归模型：

$$a_g(400) = 1.5 [10^{0.11+2.82 \cdot r_{15}-1.55 \cdot r_{15}^2-3.91 \cdot r_{25}+1.79 \cdot r_{25}^2}] \quad (1)$$

式 (1) 中， $a_g(400)$  是黄色物质在 400 nm 处的吸收系数， $r_{15} = \lg[b_8/b_{12}]$ ， $r_{25} = \lg[b_9/b_{12}]$ ； $b_8$ 、 $b_9$ 、 $b_{12}$  分别是 MODIS 波段 8、9、12 的反射率。

### 2.2 Tassan 回归模型

1994 年，Tassan 在那不勒斯海湾根据有关资料，建立了利用 SeaWiFS 数据提取黄色物质吸收系数的模式<sup>[5]</sup>。

利用研究海域实测 CDOM 吸收系数数据对 Tassan 模型进行回归分析，得到本次黄色物质浓度反演模型：

$$\lg[a_g(440)] = -2.68 - 2.28 \cdot \lg[(b_8/b_{10})(b_9)^{0.66}] \quad (2)$$

式 (2) 中， $a_g(440)$  是黄色物质在 440 nm 处的吸收系数， $b_8$ 、 $b_9$ 、 $b_{10}$  分别是 MODIS 8、9、10 波段的反射率。

### 2.3 反演结果精度评价

利用 Carder 回归模型和 Tassan 回归模型分别对 2015 年 2 月的 MODIS 数据进行黄色物质反演，并对反演结果与实测点数据进行比较。Carder 回归模型黄色物质浓度反演结果采用 400 nm 吸收系数表示，反演结果精度如表 1。Tassan 回归模型反演结果采用 440 nm 吸收系数表示，反演结果精度如表 2。

表 1 Carder 回归模型反演结果精度

Table 1 Precision of Carder regression model retrieval result

实测点号	经纬度	$a_g(400) / m^{-1}$		相对误差
		实测值	反演值	
5	109°21'51.41" 18°16'00.47"	0.152	0.131	13.8%
10	109°21'38.67" 18°14'18.65"	0.133	0.127	4.5%
15	109°20'58.76" 18°13'14.39"	0.142	0.117	17.6%

表 2 Tassan 回归模型反演结果精度

Table 2 Precision of Tassan regression model retrieval result

实测点号	经纬度	$a_g(400) / m^{-1}$		相对误差
		实测值	反演值	
1	109°22'10.36" 18°17'21.40"	0.083	0.082	1.2%
7	109°21'39.87" 18°15'13.43"	0.075	0.083	10.7%
16	109°20'58.76" 18°13'02.59"	0.071	0.077	8.5%

比较 Carder 回归模型和 Tassan 回归模型反演结果，可以看出 Tassan 回归模型反演结果精度要明显高于 Carder 回归模型。故本次 CDOM 浓度反演采用 Tassan 回归模型进行年际变化和季度变化制图，并进行结果分析与讨论。

## 3 结果与分析

### 3.1 乐东海域黄色物质浓度年际变化

2011—2014 年不同年份黄色物质浓度统计数据如表 3 所示。可以看出，2011—2012 年黄色物质平均浓度有所上升，2012—2013 年又略有下降，2013—2014 年黄色物质浓度再次上升，2011—2014 年 3a 间黄色物质平均浓度总体上呈上升趋势。

势。黄色物质 440 nm 处的吸收系数平均值从 2011 年的  $0.018 \text{ m}^{-1}$  到 2012 年的  $0.026 \text{ m}^{-1}$ ，其间上升了 44.4%；2012 年到 2013 年黄色物质浓度下降了 11.5%，下降幅度较小；2013—2014 年黄色物质浓度又有上升趋势，从 2013 年的  $0.023 \text{ m}^{-1}$  增加到 2014 年的  $0.027 \text{ m}^{-1}$ ，其浓度值增长了 17.4%；2011—2014 年 3a 间，黄色物质平均浓度增加了 50%。

表 3 乐东海域不同年份  $a_g(440)$  数据统计

Table 3  $a_g(440)$  statistics in Ledong waters of different years

时间	$a_g(440) / \text{m}^{-1}$			
	最小值	最大值	平均值	标准差
2011 年 6 月	0.000	0.092	0.018	0.004
2012 年 7 月	0.000	0.112	0.026	0.027
2013 年 6 月	0.000	0.086	0.023	0.010
2014 年 7 月	0.000	0.104	0.027	0.021

由图 3 可以看出，黄色物质在空间分布上，近岸处的浓度值明显高于深海区，其中河流入海口处黄色物质浓度明显高于其他区域。同时，近岸处黄色物质浓度相对深海区域变化趋势也更加明显。在研究区范围内，春夏两季有一股稳定的暖流流经海南岛西南沿岸进入北部湾<sup>[13,15]</sup>，这使得暖流汇集的北部湾地区黄色物质浓度变化较其他地方明显，2011—2014 年 4 幅不同的黄色物质浓度分布图表明黄色物质浓度在陆地生物、人类活动以及洋流的影响下易产生较大变化。

### 3.2 乐东海域黄色物质浓度季度变化

2013—2014 年不同季节黄色物质浓度统计数据如表 4 所示。黄色物质平均浓度从 2013 年 11 月到 2014 年 1 月上升较多，2014 年 1 月到 2014 年 4 月有明显的下降趋势，2014 年 4 月到 2014 年 7 月又有轻微的上升趋势。黄色物质 440 nm 处的吸收系数平均值从 2013 年 11 月的  $0.021 \text{ m}^{-1}$  到 2014 年 1 月的  $0.036 \text{ m}^{-1}$ ，上升了 71.4%；2014 年 1 月到 2014 年 4 月黄色物质平均浓度下降了 36.1%；2014 年 4 月到 2014 年 7 月黄色物质平均浓度又有

轻微的上升趋势，从 2014 年 4 月的  $0.023 \text{ m}^{-1}$  增加到 2014 年 7 月的  $0.027 \text{ m}^{-1}$ ，其浓度值增长了 17.4%。一年四季黄色物质平均浓度最高值出现在冬季，其他季节黄色物质平均浓度较为接近。

表 4 乐东海域不同季节  $a_g(440)$  数据统计

Table 4  $a_g(440)$  statistics in Ledong waters of different seasons

时间	所属季节	$a_g(440) / \text{m}^{-1}$			
		最小值	最大值	平均值	标准差
2013 年 10 月	秋	0.000	0.093	0.021	0.016
2014 年 1 月	冬	0.000	0.100	0.036	0.020
2014 年 4 月	春	0.000	0.078	0.023	0.007
2014 年 7 月	夏	0.000	0.104	0.027	0.021

海南作为位于热带季风气候区的省份，一年四季平均温度在  $22^\circ\text{C} \sim 27^\circ\text{C}$  之间，其中，冬春季节作为最冷的季节温度也在  $17^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$ ，且为少雨季节，仅占全年降水量的 10% ~ 30%；夏秋季节高温，且为多雨季节，占全年总降水量的 70% ~ 90%。所以，全年温度和降水变化可能对海洋黄色物质浓度产生一定的影响。

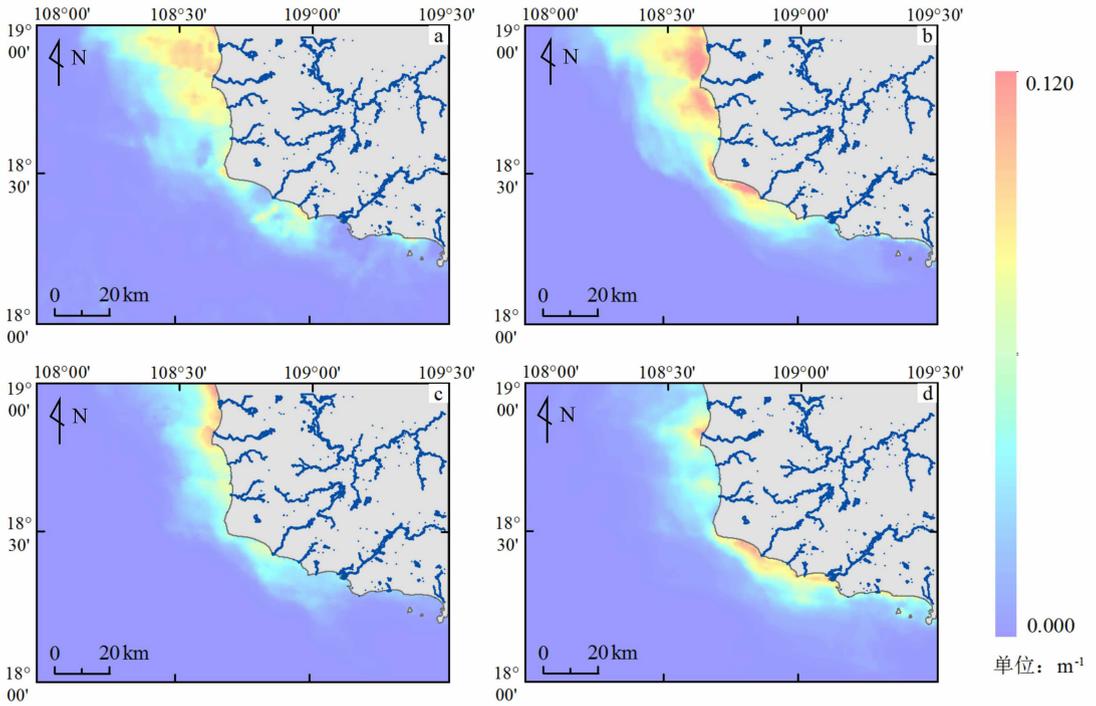
由图 4 可以看出，在空间分布上，2014 年 1 月份黄色物质分布与其他季节明显不同，在近岸范围内存在明显的区域性增大或降低的异常现象。结合研究区的地理位置，这些异常点多位于河流、人工水库入海口和人类活动较大的区域，同样说明陆地环境以及人类活动对海洋黄色物质浓度影响较大。

## 4 结论

(1) 近海以及洋流汇集的北部湾地区黄色物质浓度较其他区域明显偏高，且浓度变化波动明显，表明黄色物质浓度受陆地环境、人类活动及洋流的影响很大。

(2) 随着时间的推移，黄色物质浓度有逐年上升的趋势。

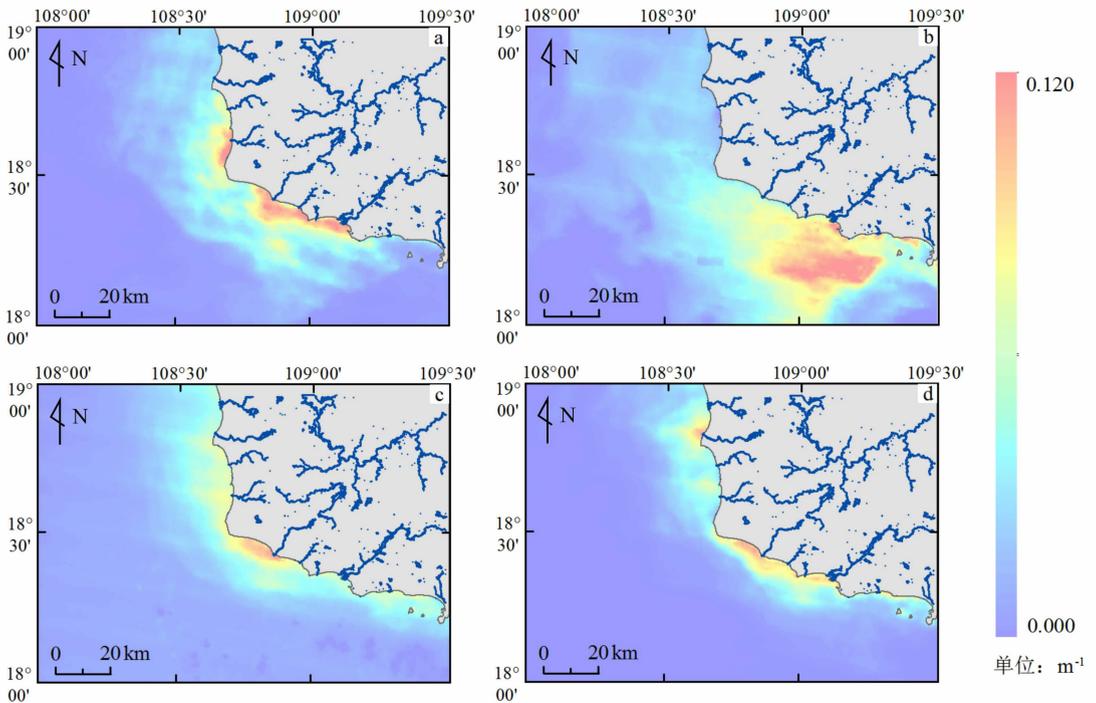
(3) 冬季黄色物质浓度明显高于其他季节，这可能与该季节海洋浮游植物代谢和降水量有关。



a. 2011 年 6 月黄色物质浓度分布； b. 2012 年 7 月黄色物质浓度分布； c. 2013 年 6 月黄色物质浓度分布； d. 2014 年 7 月黄色物质浓度分布。

图 3 不同年份黄色物质浓度分布对比图

Fig. 3 Contrast diagram of CDOM concentration in different years



a. 秋季黄色物质浓度分布； b. 冬季黄色物质浓度分布； c. 春季黄色物质浓度分布； d. 夏季黄色物质浓度分布。

图 4 不同季节黄色物质浓度分布对比图

Fig. 4 Contrast diagram of CDOM concentration in different seasons

## 参考文献:

- [1] 吴绍渊, 吴永森, 张世魁. 黄、东海海洋黄色物质的卫星反演 [J]. 海洋与湖沼, 2013, 44 (5): 1223-1228.  
WU Shao-yuan, WU Yong-sen, ZHANG Shi-kui. The satellite retrieval of marine yellow substance in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44 (5): 1223-1228.
- [2] 朱建华, 周虹丽, 李铜基, 等. 中国近海黄色物质吸收系数光谱特征分析 [J]. 光学技术, 2012, 38 (3): 295-299.  
ZHU Jian-hua, ZHOU Hong-li, LI Tong-ji, et al. Absorption spectral analysis of colored dissolved organic matter (CDOM) in offshore of China [J]. *Optical Technique*, 2012, 38 (3): 295-299.
- [3] 周虹丽, 朱建华, 李铜基, 等. 中国近海典型海区黄色物质含量年际变化分析 [J]. 海洋技术, 2012, 31 (3): 60-63.  
ZHOU Hong-li, ZHU Jian-hua, LI Tong-ji, et al. Interannual variability analysis of yellow substance content in typical nearshore area of China [J]. *Ocean Technology*, 2012, 31 (3): 60-63.
- [4] 沈红, 赵冬至, 付云娜, 等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2006, 10 (6): 950-953.  
SHEN Hong, ZHAO Dong-zhi, FU Yun-na, et al. An overview of optics characteristic and Remote Sensing of CDOM [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10 (6): 950-953.
- [5] 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.
- [6] Antonio M, Russ M E, Hooker S B. Algorithm development and validation for satellite-derived distributions of DOC and CDOM in the U. S. Middle Atlantic Bight [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (C7): 827-830.
- [7] 朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究 [J]. 海洋技术, 2004, 23 (2): 7-13.  
ZHU Jian-hua, LI Tong-ji. Spectral mode research about absorption coefficient of the de-pigment particles and yellow substance in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23 (2): 7-13.
- [8] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 渤海非色素颗粒物和黄色物质的吸收特性研究 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27 (6): 595-598.  
XING Xiao-gang, ZHAO Dong-zhi, LIU Yu-guang, et al. Absorption characteristics de-pigmented particle and yellow substance in Bohai Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27 (6): 595-598.
- [9] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (3): 415-423.  
ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang bay and Da Taihu lake in Taihu lake in summer and winter [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18 (3): 415-423.
- [10] 吴永森, 张士魁, 张绪琴, 等. 海水黄色物质光吸收特性实验研究 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33 (4): 402-406.  
WU Yong-sen, ZHANG Shi-kui, ZHANG Xu-qin, et al. Experimental study on the optical absorption property of yellow substance in Seawater [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33 (4): 402-406.
- [11] 张绪琴, 吴永森, 张士魁, 等. 胶州湾海水黄色物质荧光分布初步研究 [J]. 遥感学报, 2006, 6 (3): 229-232.  
ZHANG Xu-qin, WU Yong-sen, ZHANG Shi-kui, et al. The distribution on fluorescence intensity of yellow substance in Jiaozhou Bay [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 6 (3): 229-232.
- [12] 尤龙, 王璞珺, 吴景富, 等. 莺歌海盆地前新生代基底特征 [J]. 世界地质, 2014, 33 (3): 511-523.  
YOU Long, WANG Pu-jun, WU Jing-fu, et al. Basement characteristics of Yinggehai Basin in pre-Cenozoic [J]. *Global Geology*, 2014, 33 (3): 511-523.
- [13] 王建丰, 王毅, 孙双文. 海南岛西南春季海流特征分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39 (增刊): 1-6.  
WANG Jian-feng, WANG Yi, SUN Shuang-wen. Analysis of residual currents of southwest of Hainan island in spring [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39 (Suppl.): 1-6.
- [14] Darecki M, Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 326-350.
- [15] 崔振昂, 侯月明, 夏真, 等. 南海北部湾全新世以来沉积物地球化学特征及物源分析 [J]. 世界地质, 2015, 34 (3): 605-614.  
CUI Zhen-ang, HOU Yue-ming, XIA Zhen, et al. Geochemical characteristics and provenance analysis of Holocene sediments in Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Global Geology*, 2015, 34 (3): 605-614.