

不同潮汐条件下珠江河口 黄色物质光谱吸收特性*

何颖清¹, 秦雁², 冯佑斌¹, 扶卿华¹, 刘超群¹

(1. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;

2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 珠江河口位于珠江三角洲下游, 淡水输入源多, 咸淡水交换频繁, 潮汐对其水体光学特性的影响是个尚待研究的问题。基于4 d的定点观测数据发现: 珠江口CDOM浓度 $a_g(355)$ 涨潮时均值 $1.01 \pm 0.31 \text{ m}^{-1}$, 落潮时均值 $1.18 \pm 0.37 \text{ m}^{-1}$, 浓度分布呈现口门内高、口门外低的空间分布特征及落潮高、涨潮低的时间特征, 且在湾口区涨潮、口门内落潮时的波动较小; CDOM吸收光谱的衰减斜率 S_g 涨潮时均值 $0.0186 \pm 0.0029 \text{ nm}^{-1}$, 落潮时均值 $0.0177 \pm 0.0023 \text{ nm}^{-1}$, 落潮普遍低于涨潮且空间差异小; S_g 和相对分子量 $M(250 \text{ nm}$ 和 365 nm 处的吸收系数比值)正相关, 涨潮时量值均较大; 盐度与 $a_g(355)$ 在湾口外表现出明显的负相关, 且落潮时的相关性较好, 但该关系在洪季的口门内并不显著。因此, 珠江河口(尤其在湾口以上区域)CDOM在落潮时的吸收特征较稳定。在水质遥感反演时, 应根据影像区域及成像时刻的涨落潮情况选择合适的CDOM吸收特征量值。

关键词: CDOM; 吸收; 潮汐; 珠江口

中图分类号: P733.3.1; P734.2.3 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2018)02-0022-10

Absorption characteristics of CDOM in the Pearl River Estuary at flood and ebb tides

HE Yingqing¹, QIN Yan², FENG Youbin¹, FU Qinghua¹, LIU Chaoqun¹

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China;

2. School of Geographic Science and Planning, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The Pearl River Estuary, located at the downstream of the Pearl River Delta, receives freshwater from multi-sources and is an active transition zone between river environments and maritime environments. The variation of water optical properties with tide remains to be further studied. Based on the fixed point measurement during 4 days in the Pearl River Estuary, The averaged CDOM (chromophoric dissolved organic matter) concentration $a_g(355)$ is $1.01 \pm 0.31 \text{ m}^{-1}$ at flood tide while the value is $1.18 \pm 0.37 \text{ m}^{-1}$ at ebb tide. It shows the temporal feature that the values at ebb tide are higher than those at flood tide. From the spatial dimension, $a_g(355)$ inside the estuary entrance is higher than that outside. It fluctuates weakly both inside the estuary entrance at ebb tide and outside the entrance at flood tide. The averaged S_g (spectral slope of CDOM absorption coefficient) is $0.0186 \pm 0.0029 \text{ nm}^{-1}$ at flood tide and it shows a lower value ($0.0177 \pm 0.0023 \text{ nm}^{-1}$) at ebb tide. The values at ebb tide are closer to each other in space. S_g has significantly positive correlation with the molecular size M (absorbance ratio

* 收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 水利部公益性项目(201501010); 国家自然科学基金(41301452, 41204332)

作者简介: 何颖清(1985年生), 女; 研究方向: 水环境遥感, 水利遥感应用; E-mail: heyinqing@foxmail.com

between 250 and 365 nm), both of them show high values at flood tide. In addition, there is remarkable negative correlation between $a_g(355)$ and salinity for the outer estuary. And the correlation at ebb tide is superior to that at flood tide. However they have no common bond inside the entrance during flood season. Therefore, the optical properties of CDOM at ebb tide appear to be more stable, particularly for those of the inner estuary. And the tidal effects should be considered in retrieving water quality parameters from remote sensing data.

Key words: CDOM; absorption; tide; Pearl River Estuary

水色遥感技术从诞生至今,经历了分析模型-统计模型-半分析模型的发展过程。统计模型基于实测的水质参数与表观反射率建模,虽简单易用但时间空间普适性有限,缺乏物理意义;半分析、分析模型以固有光学量为媒介,基于水体组分-固有光学特性-表观光学特性之间的关系,模拟水中光场分布,进而反演水质参数^[1],近年来逐渐成为水色遥感研究的热点^[2]。这其中,固有光学量的获取尤为重要。过去认为,固有光学量是一个稳定的参数,因此水色遥感研究人员都希望可以探求一种模式、方法对其进行模拟表达。但近年来众多研究都表明,固有光学量也具有一定的时间和区域特性,不同区域的固有光学量都有相应的表达模式。因此对于特定区域的水体固有光学特性研究具有重要意义。国内有大批学者对于太湖水体进行了大量深入而细致的研究^[3-5],而对于珠江河口的研究还相对较少^[6-12]。文献[6]对珠江口水体的光学特征进行了分析,认为珠江口的环境比较复杂,其光学特性也有较大的变化,与其他海域相比,也有其特殊的光学特性。因此对于珠江河口区水体固有光学特性的研究是十分有必要的。

珠江口位于河网密布的珠三角地区下游,上游径流会携带大量的陆源物质,经珠江口八大口门入海(本文研究区内的观测点仅涉及虎门、横门、蕉门、洪奇门四个口门)。因此珠江口具有淡水输入源多、咸淡水交换频繁的特点。由于海水和内陆水的光学特性差异甚大,而河口区是海-陆相互作用的耦合带和高生产力区域,对于珠江河口水体光学特性时间上的变化是一个值得研究的问题。太湖等内陆湖泊水体的交换能力较差,对于固有光学特性时间上的研究主要是基于季节变化来进行,而珠江河口区的水体交换频繁,相对于季节而言潮汐对于水体光学特性的影响也很大。文献[7]在对珠江河口区悬浮物的光学特性的研究中就指出:“非藻类颗粒物吸收占总颗粒物吸收的比例明显地随表层海水盐度增加而减少”,而海水盐度与潮汐的息息相关。研究不同潮汐条件下珠江口水体光学特性

变化,有利于建立珠江河口固有光学量更为精确的区域模式。

本文主要研究珠江河口黄色物质 CDOM,即有色可溶性有机物质(coloured dissolved organic matter),它是影响水体光学特性主要参数之一。河口近岸水体中的 CDOM 可分为“海洋”和“陆地”两种起源,大洋中的 CDOM 主要是由海洋有机物自身降解所产生的,而在近海区域,CDOM 主要由江河径流携带入海。河口区由于潮汐作用,咸淡水的比例会不断发生变化,由此造成水中 CDOM 的浓度、组成不断发生变化。文献[8-11]对珠江口黄色物质吸收特性进行研究发现:珠江口口门处的 CDOM 浓度高于近海,且 CDOM 浓度与盐度呈现线性或非线性的负相关关系;而 CDOM 吸收特性斜率 S_g 没有规律的空间分布特征;由于不同研究选用的参考波段并不一致, S_g 的结果没有可比性,因此在进行 CDOM 的遥感反演时,仍难以选择合适的 CDOM 吸收光谱模型。珠江河口黄色物质的光学特性还有可深入研究的空间。

相较于大多研究采用走航取样,水样并不具有同步性,对于描述珠江河口 CDOM 光学性质的空间分布具有一定的局限性,尤其难以说明其在时间维的变化情况。本文基于 4 d 的定点观测数据,分析了涨落潮对于珠江口 CDOM 的吸收特性:包括表征浓度的 $a_g(355)$ 、可以表征组成的曲线斜率 S_g 、相对分子量 M 的时间及空间分布影响,分析三者的在不同潮汐条件下的变化规律;并进一步研究了不同潮汐条件下 CDOM 与盐度与斜率的相关性变化规律;研究结果可为后续的水质遥感反演提供基础参数及理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间与观测点位

于 2013 年 9 月 17-18 日和 25-26 日分两次在珠江口进行定点观测实验。共设 16 个观测点,观测 4 d,每天 10:30、13:30 采集水样,共采集水样 96 个用于室内水质分析。观测点分布参见图

1, S01 - S06 位于口门内, 其中 S01、S02 位于蕉门, S03 位于洪奇门, S04 位于横门, S05 - S06 位于虎门; S07 - S16 位于伶仃洋, 以内伶仃岛为界,

S07 - S11 位于内伶仃洋, S12 - S16 位于外伶仃洋。采集的样品当天运回实验室进行过滤处理, 测定水质参数。

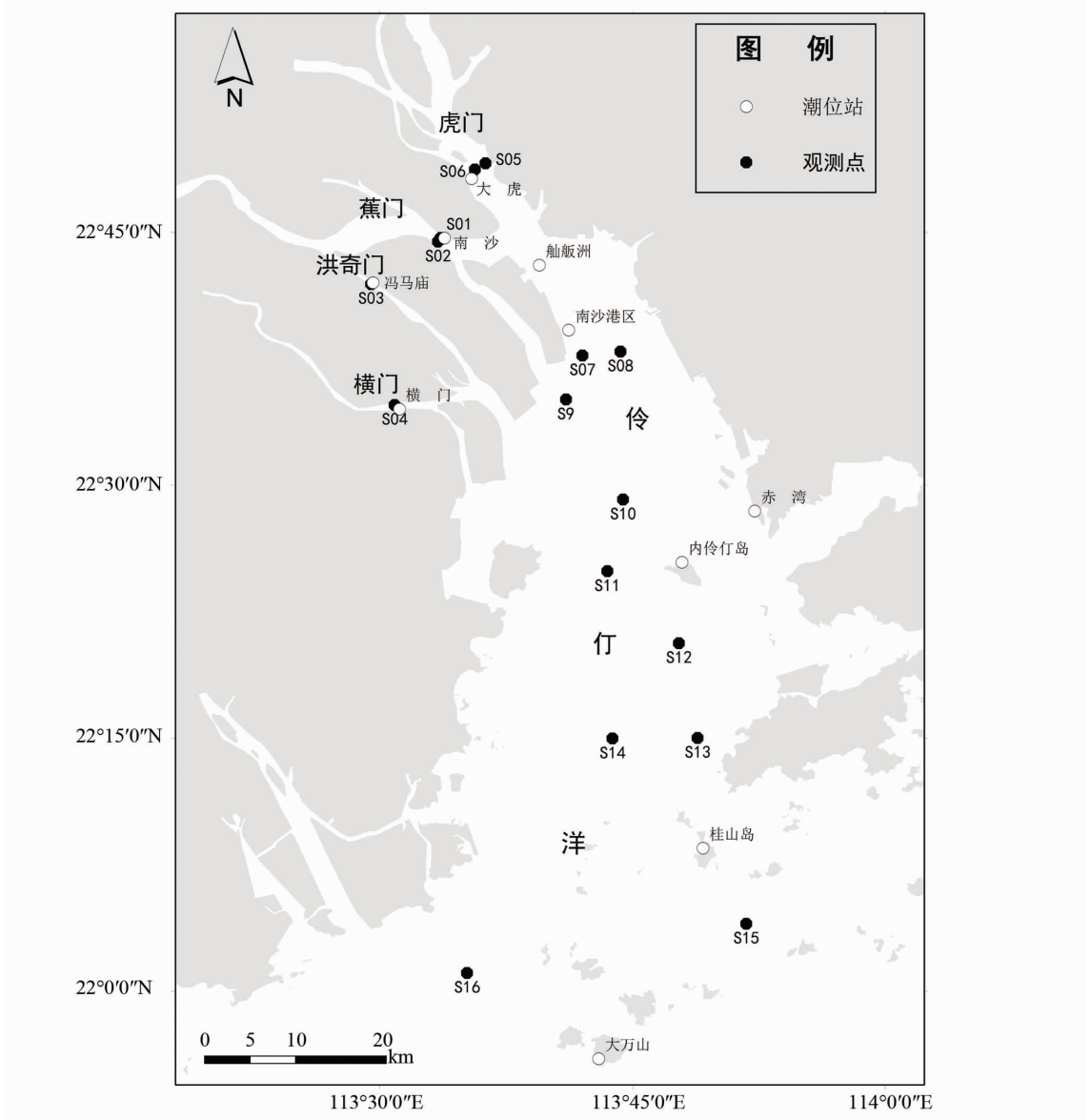


图 1 观测点及潮位站点分布图

Fig. 1 The distribution of sampling sites and tide stations in the Pearl River Estuary

1.2 潮位信息获取

受实验条件限制, 本次研究并未直接测量观测点的潮位信息, 而是通过邻近潮位站的逐时水位来判断观测点潮位。潮位站的分布参见图 1, 共设 10 个潮位观测站点。其中, S01 - S02 观测点根据南沙站判断潮位, S03、S04 分别依据冯马庙站和横门站, S05 - S06 依据大虎站, S07 - S11 依据南沙和内伶仃岛站, S12 - S14 依据内伶仃岛和桂山岛

站, S15 - S16 依据桂山岛和大万山站。采样时刻的潮位信息参见图 2: 实验共获取 6 个采样时刻的涨潮有效数据 34 份, 落潮有效数据 42 份。其中, 各采样点在 9 月 17 日 13: 30、9 月 18 日 10: 30 和 13: 30 三个时刻均处于落潮; 在 9 月 25 日 13: 30 和 9 月 26 日 13: 30 日两个时刻均处于涨潮; S01 - S10 样点在 9 月 26 日 10: 30 处于落潮, 其余样点在该时刻为涨潮。

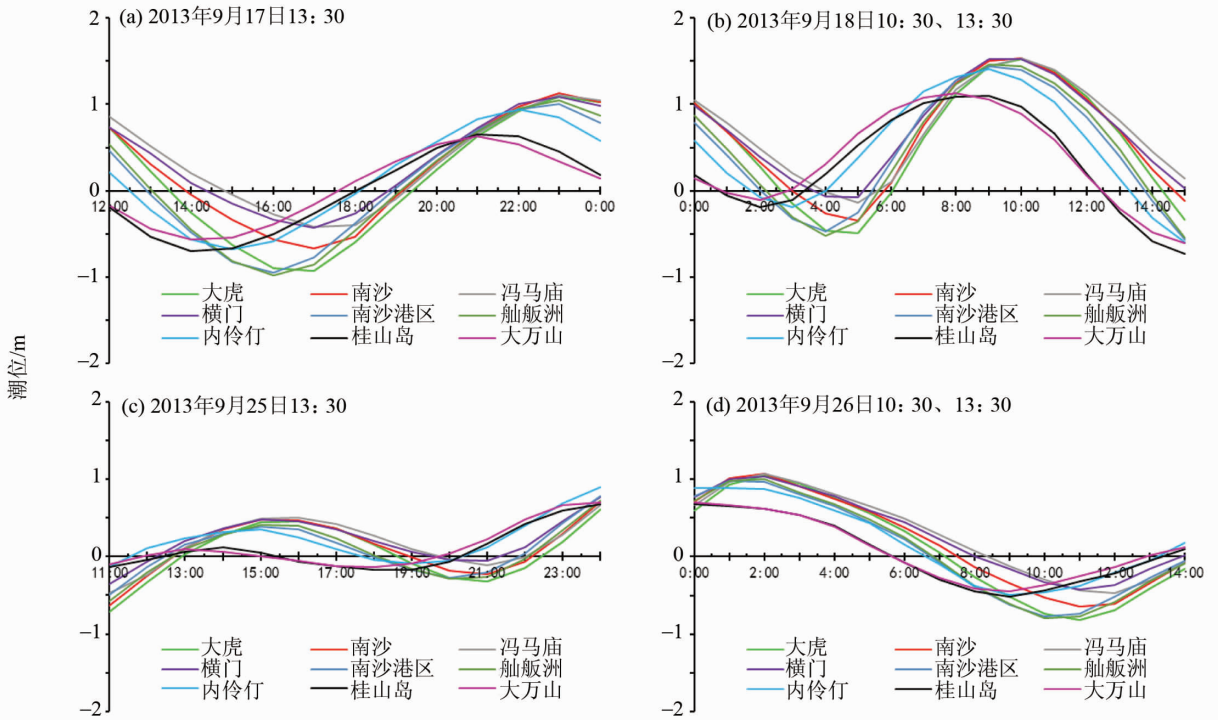


图 2 2013 年 9 月 17 - 18 日、25 - 26 日珠江口潮位过程线

Fig. 2 The tide cover of the Pearl River Estuary on Sep. 17 - 18 and 25 - 26, 2013

1.3 参数的测定

珠江河口水体属于近岸高混浊水体，在 CDOM 吸收系数的测定时，先使用 0.45 μm 的 GF/F 滤膜用来过滤水样得到一定体积的水样，再使用 0.22 μm 的 millipore 滤膜二次过滤得到黄质水样，将黄质水样放入比色皿中，利用分光光度计测量黄质的吸光度，然后利用下式计算各波长的吸收系数^[12]，并做散射校正：

$$a(\lambda') = 2.303D(\lambda)/r \quad (1)$$

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750 \quad (2)$$

式中， $D(\lambda)$ 为吸光度， r 为光程路径 (m)， $a(\lambda')$ 为波长 λ 未校正的吸收系数 (m^{-1})， $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数 (m^{-1})。

1.4 数据分析方法

CDOM 吸收光谱随波长的增加呈指数衰减^[13]：

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0)e^{-S_g(\lambda-\lambda_0)} \quad (3)$$

式中， $a_g(\lambda)$ 是 CDOM 波长 λ 处的吸收系数 (m^{-1})； λ_0 是参照波长 (nm)， $a_g(\lambda_0)$ 反映了测定水样中黄色物质含量的丰度 (高低)；光谱曲线斜率参数 S_g (nm^{-1}) 表征 CDOM 吸收系数的衰减程度，其值可作为区分 CDOM 来源和组成的参数^[14]。

一般而言， λ_0 可以选择 375 nm^[13]、400 nm^[15]、440 nm^[16] 等，目前水色遥感中常用 440

nm 作为参照波段。而前人对珠江河口 CDOM 的研究中，参照波长的选择并不一致，分别有 355^[10]、400^[8-9]、440^[11]。图 3 为本次实验测得的珠江口 CDOM 的吸收光谱曲线： $a_g(440)$ 的值域范围为 0.045 ~ 0.592， $a_g(355)$ 的值域范围为 0.38 ~ 1.79。文献 [8 - 10] 认为珠江河口 CDOM 含量要低于美国 and 欧洲的一些河口。我们认为若沿用常用的 $a_g(440)$ ，其值容易接近仪器的观测极限，引入观测误差。因此，此处选用 355 nm 作为参考波段，以 $a_g(355)$ 反映水中 CDOM 含量的高低。曲线斜率参数 S_g 采用非线性拟合^[17] 对 300 ~ 500 nm 的光谱曲线拟合而得。

对于各个样点的统计、曲线斜率的拟合均利用 Octave 软件编程实现。

2 结果与分析

2.1 $a_g(355)$ 涨落潮特征分析

图 4 为不同潮汐条件下采样点 $a_g(355)$ 分布散点及均值图：涨潮时， $a_g(355)$ 的分布范围为 0.38 ~ 1.80，均值 1.01 ± 0.31 。落潮时， $a_g(355)$ 的分布范围为 0.32 ~ 1.75，均值 1.18 ± 0.37 。

从时间角度出发分析各测点涨落潮的 $a_g(355)$ 的波动情况，如图 4 所示。S01 - S11 观测点 $a_g(355)$

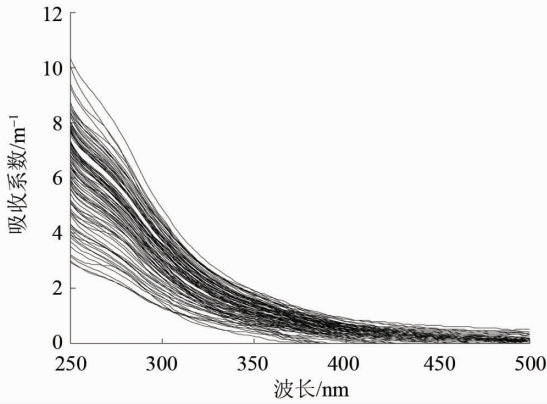


图3 珠江口 CDOM 吸收光谱
Fig. 3 Absorption spectra of CDOM
in the Pearl River Estuary

落潮时的波动小于涨潮, 其落潮、涨潮方差分别为 0.20、0.35; 而 S12 - S16 则相反, 其落潮、涨潮方差分别为 0.24、0.15。洪季, 位于口门内的 S01 - S06 以及内伶仃洋的 S07 - S11 观测点属于径流的强势区, 落潮时, 此区域持续被淡水团控制, $a_g(355)$ 波动不大; 而涨潮时, 海水上溯, 咸水团注入的多寡使得 $a_g(355)$ 的浓度出现波动。反之, 位于外伶仃洋的 S12 - S16 观测点以咸水团为主, 涨潮时咸水上溯引起 $a_g(355)$ 的波动不大, 而落潮时径流下泄, 淡水团的注入使得 $a_g(355)$ 的浓度出现较大波动。

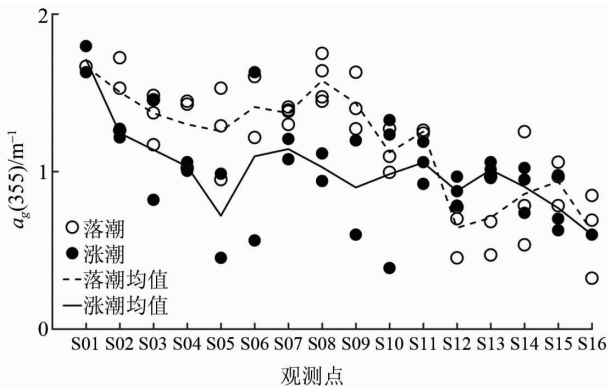


图4 观测点 $a_g(355)$ 涨落潮分布散点及均值对比图
Fig. 4 The averaged and horizontal distribution of
 $a_g(355)$ for each sampling sites at flood and ebb tides

从空间分布来看珠江口涨落潮 CDOM 浓度分布: 与前人研究成果相似^[7-9], 总体来看珠江口湾口外的黄质浓度要低于口门内。但涨、落潮呈现出不同的特征: 落潮时, 各个口门的径流水汇入伶仃洋, 在内伶仃洋 (图 4 虚线中部) 呈现一个峰值, 往外伶仃湾口方向又逐渐降低; 落潮的均值高点位于中部的 S08 以及口门内 S01, 低点位于湾口的 S12、S13、S16。涨潮时, 外海的大洋水沿着伶仃洋深槽向河口上溯, 稀释了内伶仃的 CDOM 浓度, 位于内伶仃洋的观测点 (S07 - S16) 之间 CDOM 浓度差异不大, 高点出现在口门内的 S01, 而低点出现在了湾口的 S16 以及同样位于口门内 S05。S05 位于虎门口左岸, 相比于内伶仃的观测点, 没有其他口门的径流汇入, CDOM 浓度的高低主要取决于径流携带, 当径流携带较少时, 浓度就低。

分区域统计各个观测点 $a_g(355)$ 涨落潮的均值如表 2: 由于潮水注入稀释作用, 位于口门内及内伶仃洋的观测点 CDOM 浓度落潮时高于涨潮。尤其内伶仃洋的观测点, 其受潮流的影响较大, 因此涨落潮的均值差异更为明显。但位于外伶仃洋的观测点却呈现相反的特征。总体来看, 珠江河口落潮 CDOM 含量高于涨潮, 由于落潮时径流输入的淡水团占主导, 间接证明了由珠江口的 CDOM 以陆源输入为主。

2.2 S_g 涨落潮特征分析

S_g 的差异主要由富里酸以及腐殖酸的比例不同造成^[18-19]。富里酸比吸收系数小, 曲线斜率 S_g 高, 腐殖酸比吸收系数大, 曲线斜率 S_g 低。海水中的 CDOM 主要来自于生物降解, 含富里酸的比例非常大 (一般是腐殖酸的十倍至数十倍), 而淡水中 CDOM 主要来自于人工排放和河流携带有机物的输入, 含腐殖酸的比例较高。因此, 对于咸淡水交换频繁的珠江口而言, 咸淡水的比例影响着 CDOM 的吸收系数以及 S_g 的数值, 而咸淡水的交换与潮汐关系密切。

如图 5 所示, 各个观测点 S_g 波动与 $a_g(355)$ 的变化特征相似: 位于口门内的 S01 - S06 以及内伶仃洋的 S07 - S11 观测点落潮波动小于涨潮, 其

表 2 各个观测点涨落潮 CDOM 光学特性分区域均值对比

Table 2 The averaged $a_g(355)$ in different sections of the estuary at flood and ebb tides

观测点	口门内 (S01 - S06)	内伶仃洋 (S07 - S11)	外伶仃洋 (S12 - S16)	所有观测点
涨潮	1.16	1.02	0.87	1.01
落潮	1.38	1.37	0.75	1.18
涨落潮差异	-0.23	-0.35	0.11	-0.17

落潮、涨潮方差分别为 0.001 3、0.002 4；而 S12 - S16 则相反，其落潮、涨潮方差分别为 0.003 5、0.002 7。与 2.1 中的分析相同，洪季内伶仃洋及以上落潮时持续被淡水团控制，CDOM 光学性质稳定，涨潮时，咸水团注入的改变了 CDOM 的组成成分，引起 S_g 波动。而外伶仃洋以咸水团为主，对比涨潮时的咸水上溯与落潮时的淡水下泄，落潮的淡水团的注入使得 S_g 的浓度出现较大波动。整体上看，外伶仃的观测点比内伶仃洋及口门内观测点的 S_g 波动大。

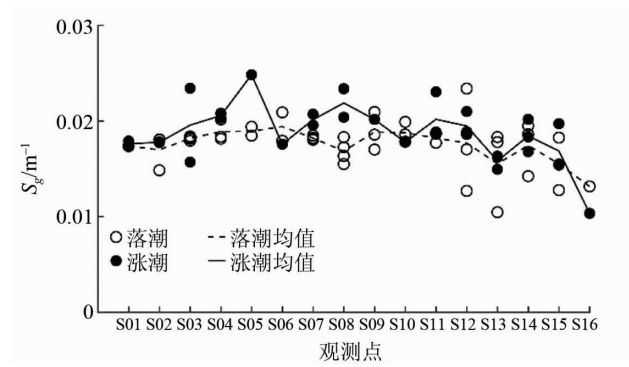


图 5 观测点 S_g 涨落潮分布散点及均值对比图

Fig. 5 The averaged and horizontal distribution of for each sampling sites at flood and ebb tides

从空间分布来看，落潮时研究区的 CDOM 的光学性质更为稳定：涨潮时 S_g 变化范围为 0.010 3 ~ 0.024 8，均值 $0.018 6 \pm 0.002 9$ ；落潮时 S_g 值变化范围为 0.010 5 ~ 0.023 4，均值 $0.017 7 \pm 0.002 3$ ，涨潮时 S_g 普遍高于落潮。对比其他学者在研究区所作的研究成果^[9-12]，由于采样时间、采样点的分布范围以及参考波段都不尽相同， S_g 无

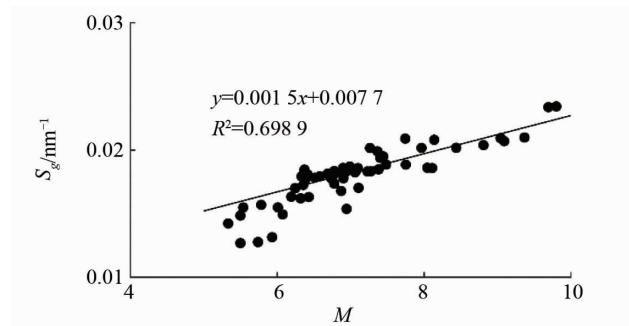


图 6 S_g 与 M 相关性分析

Fig. 6 Spectral slopes S_g vs molecular size M for all samples

法比对。总之，建议在对研究区进行水质遥感反演时， S_g 的选取应考虑成像时刻的潮汐状况，落潮时的影像可以选择统一的 S_g ，涨潮时则建议分区取值。

2.3 相对分子量涨落潮特征分析

相对分子量 M 指 250 nm 和 365 nm 处的吸收系数比值。根据文献 [20 - 21] 认为 M 可以反映水中富里酸以及腐殖酸的比例， M 值越大，CDOM 中富里酸的相对含量越高，腐殖酸则相对越低。所以， M 与 S_g 同样能反应 CDOM 的组成。

图 6 显示， S_g 与 M 存在明显的正相关关系。统计 16 个站点涨落潮的 M 值发现，涨潮时 M 变化范围为 5.78 ~ 9.80，均值 7.46 ± 1.15 ；落潮时 M 变化范围为 4.61 ~ 9.27，均值 6.70 ± 0.95 ，涨潮时 M 大于落潮，说明落潮时水中的腐殖酸含量更高。从各个点来看 M 随涨落潮的变化（如图 7），由于洪季珠江口口门内径流强势，口门内的观测点受潮汐影响较小，涨落潮的 M 值差异不大；而伶仃洋的径流势力减弱，涨潮流入侵时，观测点的 M 值发生变化，造成伶仃洋观测点涨落潮 M 值差异比口门内明显。而落潮时的 M 均值曲线较涨潮时更平缓，说明在落潮时，珠江河口 CDOM 的海陆源组成较涨潮时稳定。总体来看，滇池均值为 7.678 ± 0.164 ^[22]、太湖 M 均值为 8.66 ± 0.088 ^[23]、巢湖均值为 10.6 ± 1.57 ^[23] 相比，相比而言珠江口的 M 值偏小，说明珠江口的 CDOM 含量以腐殖酸为主。

2.4 不同潮汐条件下的黄色物质与盐度相关性分析

国内外研究表明在河口水域，作为淡水示踪的黄色物质与作为海水示踪的盐度呈负相关关系^[7-9,23-28]，因此有学者试图利用 CDOM 反演河

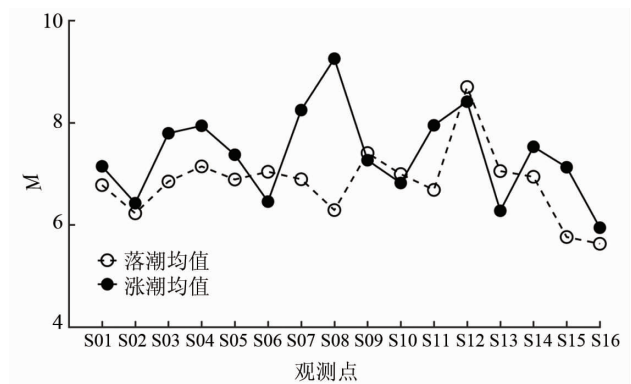


图 7 不同潮汐条件下各个观测点 M 值

Fig. 7 The averaged M of each sampling sites at flood and ebb tides

口盐度^[29-30]。本文在珠江口得到的不同潮汐条件下各个观测点盐度与 $a_g(355)$ 的散点图如图 8 所示。

本次实验采样时间为洪季, 口门内的观测点盐度全为 0, 因此, 整体看来 CDOM 与盐度的负相关关系并不好 (图 8a、b)。而文献 [8-9] 中口门内未布设观测点; 文献 [10] 在虎门口内布设了 2 个观测点, 但其采样时间为枯季, 径流弱势。因此, 若仅关注伶仃洋水域 S07-S16 观测点 (如图 8c、d 所示), 相关性则得到了明显的提高, 且落潮时的相关性优于涨潮。究其原因, 这一相关性的

存在是基于河口水域的 CDOM 以陆源输入为主的假设, 由于淡水的注入使得水表盐度出现变化, 淡水输入越多, CDOM 越多, 盐度值越低, 故两者呈现负相关。落潮时, 径流下泄携带大量陆源 CDOM 注入伶仃洋, 这一假设成立; 而涨潮时, 涨潮流携带了海源的 CDOM 上溯, 水体中同时存在陆源和海源的 CDOM, 这种负相关关系于是被削弱。

本次实验结果表明, 这种盐度与 CDOM 的负相关关系, 仅存在于冲淡水控制的口门外区域, 且落潮时的关系要优于涨潮; 对于洪季被径流控制的口门内, 这种关系并不存在。

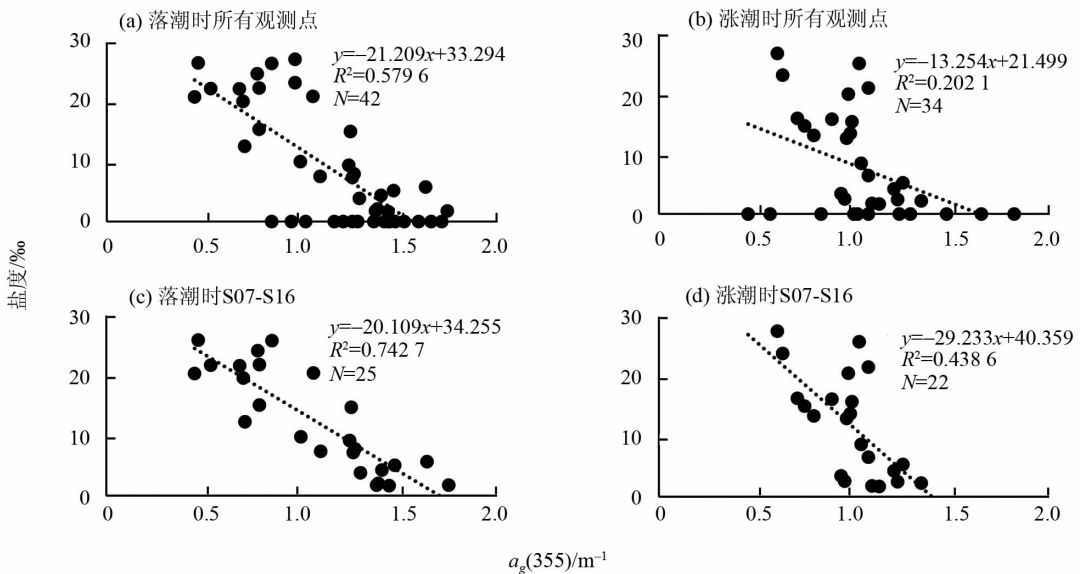


图 8 不同潮汐条件下各个观测点盐度与 $a_g(355)$ 相关性分析

Fig. 8 Scatter plots of the linear model of $a_g(355)$ and salinity at ebb and flood tides

2.5 不同潮汐条件下的 $a_g(355)$ 、 S_g 相关性分析

研究发现, 黄色物质特定波段处的吸收系数与吸收光谱的斜率经验值存在一定的负相关关系。有学者研究认为^[31], 理想状况下近岸水体 $a_g(\lambda_0)$ 与 S_g 存在负相关关系, 而大洋水体 $a_g(\lambda_0)$ 与 S_g 存在正相关关系。但这种相关并不是绝对的, 很多研究中就没有得出相关关系。例如, 文献 [32] 对 Arabian Sea 的研究发现, $a_g(350)$ 与 S_g 之间存在非常微弱的负相关关系; 文献 [33] 对欧洲沿海的研究得到 $a_g(443)$ 与 S_g 并不存在相关性的结论。珠江河口水体属于近岸水体, 根据我们的观测数据显示 (图 9a、b), $a_g(355)$ 与 S_g 存在较为微弱的负相关关系。

根据文献 [31] 的研究, 近岸水体的理想状况基于两种假设: ① 陆源黄色物质的性质相对稳定; ② 海源生产的黄色物质较少且相对稳定, 但其富里酸含量很大, 腐殖酸可忽略。而根据我们前面对 $a_g(355)$ 以及 S_g 的分析, 现实情况下对于外伶仃洋的观测点 (S12-S16), 这两个假设并不成立。若把这些观测点剔除, 这种负相关关系就得以显现出来 (图 9c、d)。与盐度与 $a_g(355)$ 的关系相似, 由于采样时间是洪季, 下泄径流强势, 落潮时珠江口的 CDOM 输入以陆源输入占绝对优势, 而涨潮时咸水上溯使得水体中海源 CDOM 的含量增多, 因此落潮时 $a_g(355)$ 与 S_g 的负相关关系要优于涨潮。

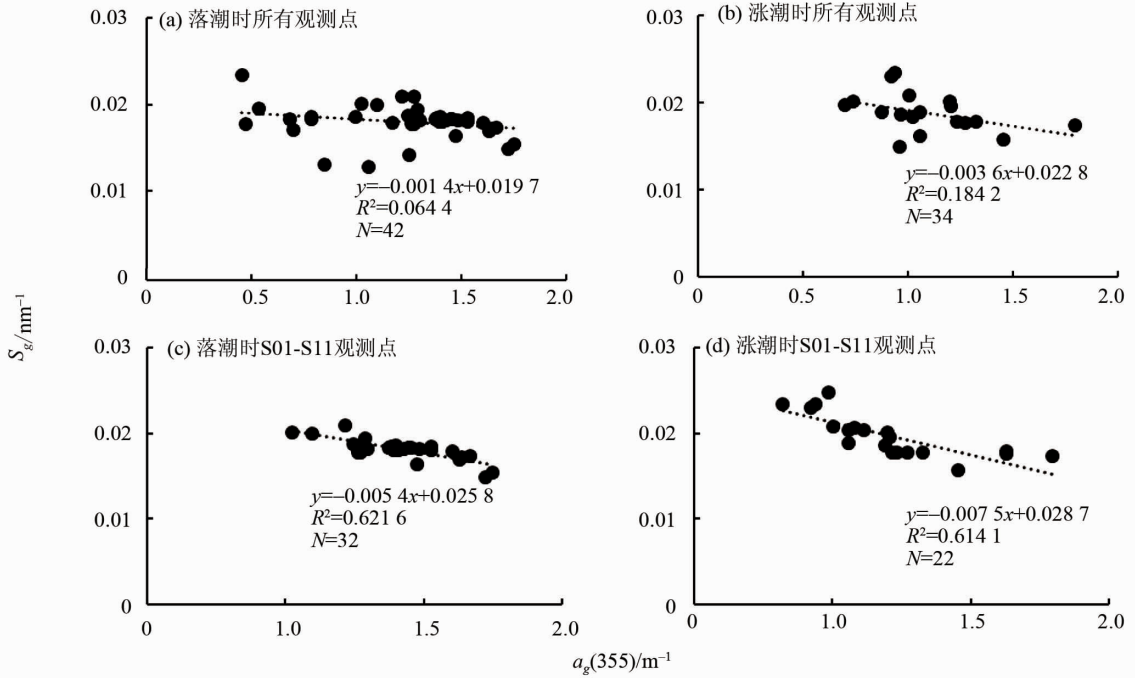


图9 不同潮汐条件下各个观测点 $a_g(355)$ 与 S_g 相关性分析

Fig. 9 Scatter plots of the linear model of CDOM concentrations $a_g(355)$ and spectral slopes S_g at ebb and flood tides

3 结 论

海源与陆源的 CDOM 的吸收光学特性具有明显的区别，而河口是一个海-陆耦合作用区，因此研究潮汐对于珠江河口 CDOM 光学特性的影响是十分必要的。本文基于定点连续观测实验采集了珠江口不同潮汐条件下的水样，分析了涨、落潮时珠江口 CDOM 的光谱吸收特性如下：

1) 珠江河口 CDOM 浓度落潮时普遍高于涨潮，径潮都很强势的伶仃洋涨落潮的差异最大；湾口以上区域落潮时 CDOM 浓度波动较小，而湾口区涨潮时 CDOM 浓度波动较小。总体而言，湾口外的浓度低于口门内，而落潮时各口门径流携带的 CDOM 汇入伶仃洋中部，在此形成高值区。

2) 表征 CDOM 物质组成与成分的 S_g 与 M 在不同潮汐条件下的变化特征基本一致，落潮时珠江口的 S_g 、 M 的空间分异很小，说明落潮时 CDOM 光学性质更趋于稳定，尤其对于内伶仃洋及上游区域。在 $a_g(355)$ 与 S_g 的相关分析中也证明了这一点：珠江口内伶仃洋及以上区域 $a_g(355)$ 与 S_g 表现为负相关关系，且落潮时相关性优于涨潮，而负相关的成立表明陆源 CDOM 的性质相对稳定且海源生产的黄色物质较少且相对稳定。

3) 在冲淡水控制的珠江河口口门外区域， $a_g(355)$ 与盐度存在较明显的负相关关系，且落潮

时的关系要优于涨潮；对于洪季被径流控制的口门内，这种关系并不存在。因此，在基于 CDOM 进行盐度反演时，应注意影像成像时间及涨落潮影响。

综上，水体组分的固有光学量是半分析、分析模型中一个必需的参数，然而大量的研究成果表明，固有光学量并非“固有”不变，其具有一定的区域、时间特性。无法获取准确的固有光学模型一定程度上限制了水质遥感模型的应用广度和精度，建立精确的区域水体组分固有光学模型意义重大。本文探索性的分析了不同潮汐条件下的 CDOM 吸收光学特性，尝试对区域水体组分的固有光学模型进行更进一步的细分，以期水质遥感模型提供基础数据。而后续可对不同的水体组分固有光学量的潮汐变化做进一步深入的研究。

参考文献：

- [1] FORGET P, OUILLOIN S, LAHET F, et al. Inversion of reflectance spectra of nonchlorophyllous turbid coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 264 - 272.
- [2] MUELLER J L, FARGION G S, McCLAIN C R, et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation[J]. British Journal of Surgery, 2016, 47(201): 111 - 112.

- [3] 马荣华,戴锦芳,张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 120 - 126.
RONGHUA M A, DAI J A, ZHANG Y. Influence factors and slope coefficients of spectral absorption of coloured dissolved organic matter (CDOM) in east Taihu Lake, China[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(2): 120 - 126.
- [4] 孙德勇,李云梅,黄家柱,等. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 749 - 760.
SUN D Y, LI Y M, HUANG J Z, et al. Spectral absorption characteristics and slope coefficients analysis of in-water constituents in Meiliang Bay of Lake Taihu in the summer season [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 749 - 760.
- [5] 黄昌春,李云梅,王桥,等. 太湖水体悬浮颗粒物生物光学模型及 MERIS 数据反演[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(4): 367 - 374.
HUANG C C, LI Y M, WANG Q, et al. Bio-optical retrieval model of suspended particles in Tai Lake using MERIS image [J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2012, 31(4): 367 - 374.
- [6] 杨顶田,曹文熙,杨跃中,等. 珠江口水体的光学特征及分析[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 1 - 4.
YANG D T, CAO W X, YANG Y Z, et al. Optical characteristics of water in the Pearl River mouth[J]. Ecological Science, 2004, 23(1): 1 - 4.
- [7] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1876 - 1882.
CAO W X, YANG Y Z, XU X Q, et al. Spectral absorption features and regional models of suspended particulate in the Pearl River Estuary[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17): 1876 - 1882.
- [8] CHEN C, SHI P, YIN K, et al. Absorption coefficient of yellow substance in the Pearl River estuary[J]. Ocean Remote Sensing and Applications, 2003, 4892: 215 - 221.
- [9] CHEN Z, LI Y, PAN J. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1845 - 1856.
- [10] HONGH, WUJ, SHANGS, et al. Absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, South China [J]. Marine Chemistry, 2005, 97(1/2): 78 - 89.
- [11] 王珊珊,王永波,扶卿华,等. 珠江口水体组分的吸收特性分析[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4511 - 4521.
WANG S S, WANG Y B, FU Q H, et al. Spectral absorption properties of the water constituents in the estuary of Zhujiang River [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4511 - 4521.
- [12] 王桂芬,曹文熙,杨跃忠,等. 珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(2): 52 - 58.
WANG G F, CAO W X, YANG Y Z, et al. Variations of absorption coefficient of seawater in the Pearl River Estuary and a hyperspectral retrieval model for an algal bloom [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(2): 52 - 58.
- [13] BRICAUD A, MOREL A, PRIEUR L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains [J]. Limnology & Oceanography, 1981, 26(1): 43 - 53.
- [14] 张运林,秦伯强,马荣华,等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 142 - 147.
ZHANG Y L, QIN B Q, MA R H, et al. Chromophoric dissolved organic matter absorption characteristics with relation to fluorescence in typical macrophyte, algae lake zones of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 142 - 147.
- [15] GALLEGOS C L, CORRELL D L, PIERCE J W. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary [J]. Limnology & Oceanography, 1990, 35(7): 1486 - 1502.
- [16] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. 2nd ed. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [17] 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): 949 - 954.
SHEN H, ZHAO D Z, FU Y N, et al. An overview of optics characteristic and remote sensing of CDOM [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6): 949 - 954.
- [18] CARDER K L, STEWARD R G, HARVEY G R, et al. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll [J]. Limnology & Oceanography, 1989, 34(1): 68 - 81.
- [19] TWARDOWSKI M S, BOSS E, SULLIVAN J M, et al. Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter [J]. Marine Chemistry, 2004, 89(1/2/3/4): 69 - 88.
- [20] HAAN H D. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [J]. Limnology & Oceanography, 1993, 38(5): 1072 - 1076.
- [21] PEURAVUORI J, PIHLAJA K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic sub-

- stances[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337(2): 133 - 149.
- [22] 张红, 黄家柱, 李云梅, 等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 452 - 463. ZHANG H, HUANG J Z, LI Y M, et al. Spectral absorption coefficients of optically active substances in Lake Dianchi [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 452 - 463.
- [23] 施坤, 李云梅, 王桥, 等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1183 - 1191. SHI K, LI Y M, WANG Q, et al. Similarities and difference in absorption characteristic and composition of CDOM between Taihu Lake and Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 1183 - 1191.
- [24] JERLOV N G. *Optical oceanography*[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publications, 1968.
- [25] McKEE D, CUNNINGHAM A, JONES K. Simultaneous measurements of fluorescence and beam attenuation; instrument characterization and interpretation of signals from stratified coastal waters [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 1999, 48(1): 51 - 58.
- [26] BOWERS D G, HARKER E L, SMITH P S D, et al. Optical properties of a region of freshwater influence (the Clyde Sea) [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2000, 50(5): 717 - 726.
- [27] BINDINGCE, BOWERS D G. Measuring the salinity of the Clyde Sea from remotely sensed ocean colour [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2003, 57(4): 605 - 611.
- [28] BOWERS D G, EVANS D, THOMAS D N, et al. Interpreting the colour of an estuary [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2004, 59(1): 13 - 20.
- [29] FANG L G, CHEN S S, LI H L, et al. Monitoring water constituents and salinity variations of saltwater using EO-1 Hyperion satellite imagery in the Pearl River Estuary, China [C] // *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, USA, 2008.
- [30] 丁晓英, 余顺超. 基于遥感的珠江口表层盐度监测研究[J]. *遥感信息*, 2014, 29(5): 96 - 100. DING X Y, YU S C. Water salinity in Pearl river estuary based on remote sensing [J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(5): 96 - 100.
- [31] 王林, 赵冬至, 傅云娜, 等. 黄色物质吸收系数 $a_g(440)$ 与斜率 S_g 相关关系 [J]. *大连海事大学学报*, 2007, 33(S2): 179 - 182. WANG L, ZHAO D Z, FU Y N, et al. Correlation between absorption coefficient $a_g(440)$ and the slope S_g of CDOM [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2007, 33(S2): 179 - 182.
- [32] BREVES W, REUTER R. Bio - optical properties of gelbstoff in the Arabian Sea at the onset of the southwest monsoon [J]. *Journal of Earth System Science*, 2000, 109(4): 415 - 425.
- [33] BABIN M, STRAMSKI D, FERRARI G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2003, 108(C7), doi: 10.1029/2001JC000882.