

# 水体中有色可溶性有机物的测量及其变化

付 宇 , 韦玉春 , 周 宇

( 南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室 , 江苏 南京 210046 )

**[摘要]** 有色可溶性有机物( CDOM) 是水体遥感的重要组成部分之一, 在水生生态系统、光学遥感、有机污染、全球碳循环等方面具有重要的研究意义, 这已成为国内外学者研究的热点. 本文系统总结了国内外 CDOM 测量计算的方法、测量中存在的问题、CDOM 的时空变化特点及其相关因素, 以期为相关的工作提供参考. 目前 CDOM 的常规测量计算方法包括光谱吸收系数和荧光光谱法两种, 前者使用 355 nm、375 nm、440 nm 等波长处的吸收系数来表示 CDOM 的浓度, 后者采用 200 nm ~ 435 nm 激发波长和 250 nm ~ 600 nm 发射波长的荧光强度来表示 CDOM 的浓度. CDOM 吸收系数在不同时间段、不同区域、不同深度或不同类型水体中均存在差异, 且其值大小与盐度、叶绿素 a 浓度、DOC、悬浮泥沙浓度等因素存在一定的相关性.

**[关键词]** 有色可溶性有机物 吸光度 水色 碳循环

**[中图分类号]** X832 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616( 2012) 01-0095-09

## The Measurement and Changes of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Water

Fu Yu , Wei Yuchun , Zhou Yu

( Key Lab of Virtual Geographic Environment , Ministry of Education , Nanjing Normal University , Nanjing 210046 , China )

**Abstract:** Chromophoric dissolved organic matter ( CDOM) is one of the major constituents in water color remote sensing. It is significantly important in the research field such as aquatic ecosystem, optical remote sensing, organic pollution and global carbon circulation, and becoming a hot research topic. This paper systematically summed up the measurement and calculation methods of CDOM, measurement problems, spatial and temporal changes of CDOM and its correlative factors, so as to provide a reference for related work. Presently, routine measurement and calculation methods of CDOM include spectral absorption coefficient and fluorescence spectrum method, CDOM concentration is expressed by absorption coefficient at 355 nm, 375 nm or 440 nm in the former, and expressed by fluorescence intensity at excitation wavelength between 200 nm and 435 nm, and emission wavelength between 250 nm and 600 nm in the latter. CDOM absorption coefficient in water varying with time, region, depth or water body type, and its value is correlated with factors such as salinity, chlorophylla concentration, DOM ( dissolved organic matter), suspended sediment concentration and others.

**Key words:** chromophoric dissolved organic matter, absorbency, water color, carbon circulation

有色可溶性有机物最早称为黄色物质, 黄色物质的研究开始于 20 世纪 30 年代, 最初英文表示为 *Gelbstoff*, 原指海水中的粘质胶性溶解物.

随着研究的深入, 人们还发现自然水体中的黄色物质由可溶性有机物碎片组成. 大部分学者认为黄色物质有两种来源: 一种来源于陆地, 主要是江河径流携带; 另一种由海洋浮游植物有机体化学降解而形成. 在近海, 江河径流携带入海为主要来源, 而在大洋则主要是由海洋有机物自身降解所产生的. 因此海水中的黄色物质分为“海洋”和“陆地”两种起源<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 2011-09-15.

基金项目: 江苏省普通高校自然科学研究计划资助( 09KJA420001 )、国家自然科学基金( 40771152 ) .

通讯联系人: 付 宇, 硕士, 研究方向: 遥感与 GIS 应用. E-mail: fuyu1203@ gmail. com

为了更准确地表达黄色物质的理化属性,目前国际上称其为“有色可溶性有机质”(Chromophoric dissolved organic matter, CDOM)。

CDOM 是水体中重要的光衰减因子,也是生物光学模型构建的主要组成部分,其光学特性比较单一,主要表现为对光的吸收。CDOM 浓度和光学特性显著地改变了水体水色和水下光场强度及光谱的分布<sup>[2]</sup>,由于 CDOM 对光的衰减作用主要表现为吸收,且在紫外和蓝光波段随波长的增加呈指数下降<sup>[3]</sup>;由于其在蓝光波段的吸收与叶绿素 a 吸收重叠<sup>[3]</sup>,直接干扰了水色遥感,导致了水体中叶绿素 a 浓度估算偏高,因此 CDOM 也成为遥感专家关注的重点。

## 1 研究意义

CDOM 作为水色遥感的重要组分之一,其吸收能力主要分布在紫外光及可见光的蓝光部分。由于其有效地吸收了紫外光波段,可以限制对生物有害的 UVB 辐射(280 nm ~ 320 nm) 穿透深度保护了水生生物,同时,CDOM 吸收紫外辐射后容易发生光化学降解,释放碳、氮等元素参与营养盐的循环,是湖泊富营养化进程的重要驱动因子<sup>[4]</sup>,而其在蓝光区的吸收作用,与浮游植物和非藻类颗粒物的吸收重叠,干扰了浮游植物生物量、初级生产力和悬浮物的定量遥感<sup>[5]</sup>,而且降低了水中蓝光的能量及传输深度,一定程度上抑制了水体中叶绿素的光合作用。另外,CDOM 还是一种荧光物质,在紫外短波光的激发下会发出长于吸收光波长的荧光。其含量与光学特性显著地改变了湖泊水色及水下光强和光谱分布<sup>[6]</sup>,在水环境及水生生态系统中具有重要地位。因此,研究利用遥感方法提取大范围水体中 CDOM 含量对于湖泊水质和富营养化的遥感监测、水下光场结构改善等都非常重要。

CDOM 在海水中的化学性质比较稳定,是重要的水质参数之一。在以陆源黄色物质为主的近岸海域,黄色物质浓度可以作为海水污染程度的“指示剂”,黄色物质对海水中污染物质的形态、毒性、运移产生重要影响。在海陆相互作用研究中,陆源黄色物质可以作为陆地向海洋的化学物质输送的代表性参数之一<sup>[7]</sup>。因而研究 CDOM 对有机污染物的迁移循环以及生态系统动力学过程有重要意义。

CDOM 吸收系数与溶解有机碳(DOC) 浓度可以建立很好的区域关系,用以反演得出非光学活性的 DOC。CDOM 具有稳定的荧光特性,对于 CDOM 相对主导的海区,可以用某一激发波长对其进行高灵敏度荧光测定,再根据线性关系反演吸收系数,从而实现海洋水色和叶绿素 a 浓度的遥感校正。另外,对近岸尤其对河口区,还可以通过建立 CDOM 吸收系数与盐度的相关关系,利用遥感间接获得盐度等物理参数<sup>[8]</sup>。因此,研究其光谱吸收性质具有重要的实际意义。

CDOM 吸收紫外光后可产生能被浮游生物利用的低分子量含碳气体(如 CO<sub>2</sub>) ,海水中的 CDOM 被推测是地球表面的最大碳源,研究 CDOM 的属性对海中碳含量的估算具有重大影响,因此对黄色物质的光研究是全球碳系统研究的重要组成部分,对储藏于大气层中 CO<sub>2</sub> 问题的研究具有重要意义<sup>[9]</sup>。

## 2 物质构成

Kalle 指出黄色物质由碳水化合物经麦拉德反应形成,即含有碱和氨基酸的溶液经化学反应受热形成黄色或棕色的类黑精终产物<sup>[10]</sup>。随着研究的深入,Gagosian 于 1977 年指出黄色物质可能由下列成分组成:氨基酸、糖、氨基糖和脂肪酸类,另外也可能含有类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚等<sup>[11]</sup>。随着全球碳循环研究的进展,发现海水中碳的存在形式主要有颗粒有机碳(POC) 和溶解有机碳(DOC) 两种<sup>[1]</sup>。在溶解有机碳中,在黄光波段吸收较小且呈黄色的那部分物质被称为黄色物质,此时将黄色物质的英文名称改为 Yellow Substance。

Carder K L 研究发现,黄色物质是与悬浮物和浮游植物并列的海洋水色遥感的 3 个重要组分,直接影响和间接减少了浮游植物的光合作用,严重干扰了光学遥感确切估算海洋初级生产力和海洋悬浮泥沙含量<sup>[12]</sup>。

## 3 光谱特征

对黄色物质的光吸收研究可追溯到 20 世纪 30 年代,Kalle、Jerlov 等人进一步对黄色物质吸收光谱开展研究,发现黄色物质的吸收与吸收光波波长呈指数变化;Morel 等<sup>[13]</sup>给出了黄色物质光吸收系数的指数

表达式; 1981 年 Bricaud 得出 CDOM 光谱吸收曲线变化与非藻类颗粒物相似, 在可见光区域随波长增加呈负指数规律递减<sup>[3]</sup>; Babin M, Sasaki H 等人研究表明, CDOM 具有相对稳定的吸收光谱特征, 可用指数衰减率来定量表示. 黄色物质的光吸收特性表现为在紫外可见光区最高, 到红外光谱区降为零<sup>[14]</sup>.

在我国, 孔德星等通过对长江口海域黄色物质的研究发现, 随着波长的增加, 吸收系数基本呈指数衰减<sup>[15]</sup>, 这与朱建华等对东海的研究<sup>[16]</sup>、李猛等对厦门湾的研究<sup>[17]</sup>是一致的, 也符合 Bricaud 的指数模型; 但周虹丽等对青海湖水色要素吸收光谱的研究发现光谱在 750 nm 波段有强烈的吸收峰<sup>[18]</sup>; 黄昌春等对太湖水体的 CDOM 光谱吸收系数研究中发现, 在 275 nm 附近存在一显著的肩<sup>[19]</sup>, 该肩值与类似研究<sup>[20-21]</sup>的报道结果一致; 张运林等通过对云南高原湖泊群的黄色物质光谱吸收特性的研究发现, 越到短波不同湖泊的黄色物质吸收曲线差异越大<sup>[22]</sup>.

## 4 常用测量计算方法

目前对 CDOM 的研究方法有两大类: 化学方法和物理方法.

化学方法一般采用吸浮法, 过程很复杂, 而且只能获得 CDOM 的主要成分, 限制了人们对它的研究, 因此, CDOM 的形成、成分和演化机理的研究逐渐从生化领域跨到物理领域. 由于水体中 CDOM 含量很低, 组成复杂, 物理方法通常以水体光学性质为基础, 以此获得 CDOM 有关指标, 并根据其光吸收特点对水体中 CDOM 进行相对定量、定性研究. 由于 CDOM 具有荧光特性, 荧光光谱技术已成为开展 CDOM 研究的重要手段, 被用于 CDOM 的定性定量及来源、分布及其变化规律的研究<sup>[23]</sup>.

### 4.1 光谱吸收系数

#### 4.1.1 测量计算

由于黄色物质成分的复杂性, 目前尚无法确定其浓度, 常用的方法是用 355 nm、375 nm、440 nm 等波长处的吸收系数来表示 CDOM 的浓度<sup>[24]</sup>, 并以 375 nm 和 380 nm 处的吸收系数作为表征黄色物质浓度居多. 吸收系数越大, 对应的 CDOM 浓度就越高.

CDOM 吸收系数的测定相对比较简单、方法成熟. 根据张运林<sup>[24]</sup>对太湖区域、孔德星等对长江口海域的研究<sup>[15]</sup>, 总结得出目前一般采用 0.7  $\mu\text{m}$  GF/F 过滤掉水样中大的颗粒和浮游生物细胞, 然后用经过酸和 Milli-Q 处理过的 0.2  $\mu\text{m}$  的聚碳酸酯滤膜 (10% HCl 浸泡 15 min 后, 再用纯净水充分淋洗) 对其进行过滤. 过滤后的样品采用分光光度计测量吸光度. 根据设计的光谱, 对水样的光密度进行测量, 可得到不同波长的光密度  $D(\lambda)$ .

$$D(\lambda) = 2.303 \times [OD_s(\lambda) - OD_b(\lambda)] / \gamma. \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为比色皿(光程)长度,  $OD_s(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  时水样的光密度,  $OD_b(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  时空白的光密度<sup>[25-28]</sup>. 目前专家学者多用光吸收系数来作为表征黄色物质浓度的有效参数. 尽管它并不是真正意义上以 mg/L 来表示的绝对浓度, 但考虑到目前测量的可靠性和技术实现的可行性, 认为吸收系数可以比较准确地表征海水中所含黄色物质的浓度<sup>[29]</sup>.

空白是校正分析方法、提高分析准确度的一种手段. 而目前国际上对如何选取空白还没有一个统一的规范, 归纳起来有以下 2 种做法: (1) 直接用纯水作为空白, 以此来消除纯水对所测光密度的贡献<sup>[30]</sup>; (2) 将经过过滤的纯水作为空白<sup>[31]</sup>, 从理论上讲这种做法可以更好地消除过滤器皿对样品测定结果的影响, 因而更为科学<sup>[32]</sup>.

Green 等认为由于淡水和海水折射率的不同, 会引起基线的漂移, 为了消除这种漂移, CDOM 的光密度  $D(\lambda)$  需要经过校正. 具体方法是将各个波长的光密度扣除 700 nm ~ 800 nm 光密度的平均值, 然后再由公式 (1) 将校正后的光密度  $D(\lambda)$  转换为 CDOM 的吸收系数  $a(\lambda)$ <sup>[33]</sup>. Kowalczyk 等<sup>[34]</sup>也认为样品的光密度应该首先进行校正, 但作法略有不同, 其扣除的是 650 nm ~ 700 nm 光密度的平均值.

Keith 等<sup>[3]</sup>认为由公式 (1) 所得的吸收系数并非 CDOM 的真实吸收系数, 该数值仍包含了透过滤膜的细颗粒物质和胶体的反射和散射的影响. 利用方程 (1) 所得的吸收系数需要按照 Bricaud 等提出的方法进行校正:

$$a(\lambda)_{\text{corr}} = a(\lambda) - a_{700}(\lambda/700). \quad (2)$$

其中:  $a(\lambda)_{\text{corr}}$  是在给定波长  $\lambda$  时, 经过散射校正后的吸收系数.

此外,对测量结果的影响还存在一些其他因素.吴永森对青岛近岸现场水样进行处理,分析发现与 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜相比,采用 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜可以更有效地过滤水样中剩余粒子,所测得的黄色物质吸收系数能更有效地反映黄色物质本身的基本量值形态,其数据更为客观、可靠<sup>[29]</sup>.测量时,比色皿宽度越宽,分光光度计检测出的信号越强,信噪比越低.在 CDOM 浓度较高的内陆,水体比色皿宽度在 1 cm ~ 5 cm 均可,对于 CDOM 浓度非常低的大洋和高山深水湖泊水体,比色皿宽度一般要达到 10 cm 甚至更宽<sup>[35]</sup>.

#### 4.1.2 指数吸收模型

Bricaud 采集不同水域的 105 个样品,进行了黄色物质光吸收测量,发现从紫外到可见光波段吸收系数与波长之间近似呈指数关系,可用(3)式来模拟<sup>[31]</sup>:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (3)$$

式中  $a(\lambda)$  是 CDOM 的吸收系数( $\text{m}^{-1}$ ),  $\lambda$  是波长(nm),  $\lambda_0$  是参照波长(nm),一般取 440 nm,  $S$  是指数函数曲线斜率参数,是 CDOM 吸收光谱特性研究中最关注的量值之一,反映了黄色物质指数吸收的衰减程度<sup>[36]</sup>.当无法测定 CDOM 吸收光谱时,可以测定特征波长 440 nm 处吸收系数,根据文献中报道的指数函数斜率  $S$  值,利用式(3)计算得到各波长的吸收系数.指数函数斜率  $S$  值大小反映了 CDOM 吸收系数随波长增加而递减的程度,其与 CDOM 浓度无关,但与 CDOM 组成及波段的选择有关.影响  $S$  值的因素主要有两个:一是选用的拟合波段,不同波长范围内的  $S$  值对 CDOM 的分子组成(或 CDOM 的分子中胡敏酸和富里酸)的敏感性具有一定的差异性,UVR 的  $S$  值对 CDOM 的分子组成最为敏感,其次是 UVA,再次为 UVB,UVB 最为不敏感<sup>[19]</sup>.Stedmon 等<sup>[30]</sup>对不同波段进行拟合分析发现,  $S$  值和拟合的精度随波长的增加而降低.

另一个是 CDOM 的组成和分子大小.根据 Carder 的研究,黄色物质吸收光谱比例系数( $S$ )的变化与黄色物质的成分有关,并指出海洋中灰黄酸的比例系数为 0.019  $\text{nm}^{-1}$ ,海洋中腐殖酸比例系数为 0.011  $\text{nm}^{-1}$ <sup>[12]</sup>.Keith 和 Yoder 认为  $S$  值的大小也会反映黄色物质组成成分的比例.以灰黄酸为主要组分的黄色物质,其  $S$  值是腐殖酸占主要成分的黄色物质的两倍.Yacobi 等的研究显示,CDOM 分子越大,  $S$  值越小,与 440 nm 处的吸收系数  $a^*(440)$  存在显著的负相关<sup>[37]</sup>,而张运林在对长江中下游湖泊 CDOM 进行研究时也发现  $S$  值与  $a^*(355)$  存在显著的负相关<sup>[38]</sup>.

早在 1975 年, Maul G A 等提出海水中  $S$  值为 15  $\mu\text{m}^{-1}$ <sup>[39]</sup>,之后 Bricaud 发现  $S$  值在 10  $\mu\text{m}^{-1}$  ~ 20  $\mu\text{m}^{-1}$  之间变化,平均值为 14  $\mu\text{m}^{-1}$ <sup>[3]</sup>,这也是海洋水色遥感生物光学模式中使用的值.之后大多数研究者的结果基本上都落入 Bricaud 提出的范围内.随后 Markager、Vincent 和 Stedmont 等认为应在方程(3)中引入背景常数  $K$ ,用  $K$  值来规避不是由有机物所造成的基线的抬高和降低<sup>[4]</sup>:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] + K \quad (4)$$

通过上式对大量数据进行计算得到淡水湖泊中的  $S$  值在 10  $\mu\text{m}^{-1}$  ~ 25  $\mu\text{m}^{-1}$  之间,平均值为(17.7  $\pm$  0.8)  $\mu\text{m}^{-1}$ ,海水中  $S$  值在 11  $\mu\text{m}^{-1}$  ~ 17.2  $\mu\text{m}^{-1}$  间变化,平均值为(14.1  $\pm$  0.4)  $\mu\text{m}^{-1}$ .

目前模拟 CDOM 光谱吸收常用的 3 种指数模型如表 1 所示<sup>[22]</sup>.

表 1 CDOM 光谱吸收系数模型

Table 1 Three spectra absorption coefficient models of CDOM

| 模型描述                    | 函数表达式   | 模型参数          | 拟合方法  |
|-------------------------|---|---------------|-------|
| 模型 1: 吸收系数取自然对数线性拟合指数模型 | $\ln a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_1 - S_1 \lambda$          | $a_1, S_1$    | 线性拟合  |
| 模型 2: 非线性拟合指数模型         | $a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_2 e^{s_2(440 - \lambda)}$     | $a_2, S_2$    | 非线性拟合 |
| 模型 3: 增加背景项指数模型         | $a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_3 e^{s_3(440 - \lambda)} + K$ | $a_3, S_3, K$ | 非线性拟合 |

张运林等使用这 3 种指数模型对云南高原湖泊(碧沽天池、碧塔海、洱海、拉什海等 34 个湖泊)的 CDOM 进行模拟对比,发现增加背景项后的指数函数模型模拟的结果最好( $R^2$  最大、RMSE 最小),而模型 1 的拟合结果是最差的<sup>[22]</sup>.模型 3 相对于模型 1 光谱斜率  $S$  均值增加 6.2%,这与其他人的研究结果一致.如 Stedmon 等对丹麦沿海水域的研究发现,模型 3 在 300 nm ~ 650 nm 范围内  $S$  均值比模型 1 增加了 13%<sup>[30]</sup>.

#### 4.2 荧光光谱法

##### 4.2.1 测量方法

CDOM 的一个重要特征是吸收紫外光后可发射长于吸收光波长的荧光,所以也称为溶解荧光有机物

(Fluorescent dissolved organic matter, 简称 FDOM), 可用荧光法进行检测. 荧光法具有操作简便、灵敏度高 ( $10^{-9}$  g/mL  $\sim 10^{-12}$  g/mL)、选择性好、特效检出等优点, 且不需对目标物进行分离预处理, 近年来已被广泛应用于天然水体中 CDOM 的检测和分析<sup>[41]</sup>. 三维荧光光谱 (EEMS) 可以作为激发光谱、发射光谱及同步荧光光谱进行分析, 且其操作简便、灵敏度高、选择性好、特效检出等优点, 已经被广泛地用于 CDOM 的定性和定量研究<sup>[42]</sup>. 测量时采用荧光分光光度计测定, 激发和发射夹缝宽度为 5 nm, 激发波长为 200 nm  $\sim$  435 nm, 间隔为 5 nm, 发射波长为 250 nm  $\sim$  600 nm, 以 1 nm 间隔得到荧光光谱, 减去 Milli-Q 超纯水三维荧光光谱以校正水的拉曼散射<sup>[43]</sup>.

#### 4.2.2 模型关系

柳先平等研究发现, 在浓度低于 75 mg/L 时, CDOM 水溶液荧光强度 ( $\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 320/410$  nm) 与浓度呈良好的线性关系, 可用线性公式  $y = 5.519x + 18.898$  ( $r^2 = 0.9881$ ) 表示, 在低浓度范围内, 利用荧光强度与浓度间的线性关系对水体中的 CDOM 进行定量分析<sup>[23]</sup>. 夏达英研究发现, 海水中黄色物质浓度范围在  $5 \times 10^{-5}$  g/mL  $\sim 1 \times 10^{-9}$  g/mL 时, 黄色物质浓度与荧光强度之间具有良好的线性关系<sup>[44]</sup>. 季乃云等研究发现海洋可溶性有机物的荧光强度随着荧光溶解有机物含量的增加而线性增加, 而受环境因子的影响较小<sup>[45]</sup>. 柳先平等研究发现, CDOM 水溶液的发射光谱峰面积与超纯水的拉曼峰面积的比值与浓度呈良好的线性关系 ( $r^2 = 0.9823$ ), 且能避免因在不同发射波长下取荧光强度值而导致对同一水样 CDOM 的定量结果的差异, 从而更能真实地反映实际水样的 CDOM 量. 当 CDOM 的浓度范围在 0.17 mg/L  $\sim$  1.36 mg/L 时, 面积比值与浓度之间的关系可用线性公式  $y = 3.1457x + 3.2207$  ( $r^2 = 0.9997$ ) 来表示, 用此关系式反算配制的 CDOM 标准溶液浓度, 差值与真值之比在 3%  $\sim$  45% 之间<sup>[23]</sup>. 当 CDOM 的浓度范围在 1.36 mg/L  $\sim$  37.50 mg/L 时, 面积比值与浓度之间的关系可用线性公式  $y = 1.837x + 5.0466$  ( $r^2 = 0.9993$ ) 来表示, 用此关系式反算配制的 CDOM 标准溶液浓度, 差值与真值之比在 6%  $\sim$  3.0% 之间<sup>[23]</sup>.

### 5 CDOM 的时空变化规律

#### 5.1 同一区域、不同时间段 CDOM 吸收系数存在差异

雷惠等对东海 4 个季节水体 CDOM 样品进行光谱测量和分析, 发现 CDOM 吸收系数在短波段受陆源输入影响程度的不同, 有明显的差异: 春秋季高值区向外海扩展较广, 而且秋季向南延伸明显远于春季, 对应于冲淡水转向和东南沿岸流的季节变化. 吸收系数值低值区与东海表层水团、台湾暖流以及上升流有一定的关系, 需要进一步研究<sup>[8]</sup>. 郭卫东等通过对九龙江口 CDOM 的研究结果也确认了其吸收系数的季节变化, 并认为是丰水期径流量增加导致入海陆源物质增加, 使 CDOM 吸收系数值增大, 因此建立 CDOM 吸收系数相关算法时需要考虑季节因素<sup>[41]</sup>. 就广为关注的太湖水体, 黄昌春等认为 8 月份 CDOM 吸收系数的平均值最大, 其次是 11 月, 3 月最小, 且 8、11 月份的 CDOM 吸收系数最大值约为 3 月份最大值的 4 倍<sup>[19]</sup>. 乐成峰等认为太湖梅梁湾 CDOM 吸收系数夏季最大, 春季最小, 特别是在短波紫外波段的吸收系数具有明显的差异性, 且夏季的 CDOM 吸收系数最大值约为春季最大值的 10 倍<sup>[46]</sup>. 张运林等在同一年份对梅梁湾、大太湖的研究后认为, 夏季 CDOM 的吸收要明显高于冬季<sup>[5]</sup>. 由此可见, 太湖水体 CDOM 的吸收系数大致变化规律是夏季最大、秋季次之、春季最小.

然而, 王鑫等对太湖北部湖区试验, 代表夏、秋、冬、春 4 个月各采样点 280 nm 处的吸收系数平均值进行比较发现, 1 月  $>$  4 月  $>$  7 月  $>$  10 月, 可以看出, 水体中 CDOM 的吸收系数从冬季到次年秋季逐渐递减<sup>[6]</sup>. 原因可能与 CDOM 组成有关, 其构成主要是腐殖酸、棕黄酸等. 在冬季, 生长 1 年的浮游植物和水生生物都已经死亡, 其残体和腐烂产物使水体中的可溶性有机物含量增加, 而随着季节的转暖, 浮游植物开始萌发, 作为植物所需的营养物质, 其生长必定会消耗掉一定的 CDOM, 从而使水体中的 CDOM 比例降低, 而且夏季炽热的阳光下, 至少表层的 CDOM 会发生明显的光化学降解, 从而影响水体中 CDOM 的组成和吸收<sup>[6]</sup>.

#### 5.2 同一水体、不同区域 CDOM 吸收系数存在差异

雷惠等对东海水体 CDOM 样品进行光谱测量和分析, 发现 CDOM 吸收系数有明显的区域性差异: 近岸特别是杭州湾为吸收系数高值区域, 反映出以长江冲淡水为主的陆源输入特性; 向外海扩展受到海水的混合稀释作用愈显著, 吸收系数值逐渐减小<sup>[8]</sup>. 王鑫等对太湖北部湖区试验发现, CDOM 吸收系数在空间

上表现为:竺山湾 > 梅梁湾 > 贡湖湾 > 大太湖,入湖河道附近的 CDOM 吸收系数高于其邻近水面<sup>[6]</sup>. 赵巧华等利用模糊聚类的方法分析了冬、夏季全太湖有色溶解有机质(CDOM)的吸收系数谱的时空演变特征,结果表明在冬夏两季中北部湾区的 CDOM 的浓度均大于其南部区域,且南部 CDOM 浓度的空间变化较北部平缓,冬季全太湖 CDOM 组成的空间变化较夏季更为均匀<sup>[20]</sup>. 张运林等对太湖梅梁湾研究发现,总体上呈现河口和湾内各点 CDOM 浓度一般还是要高于湾口各点. 梅梁湾内 CDOM 浓度呈现从河口往湾内、湾口递减的趋势<sup>[38]</sup>. Del Castillo 在研究 Caribbean 海湾时发现类似现象,离河流入海口越近,DOC 浓度越高,CDOM 对光的吸收越强烈<sup>[47]</sup>. 张运林等发现草型湖区的东太湖 CDOM 浓度明显要小于藻型湖区的梅梁湾. 在梅梁湾,CDOM 吸收系数大致呈现从湾内向湾口递减的趋势,并且位于梁溪河和直湖港入湖口的采样点 CDOM 吸收系数明显要大于其他各点,受湖水稀释,到湾口逐渐降到最低值,体现了入湖河流带来大量 CDOM<sup>[48]</sup>. Frenette 等对大型浅水湖泊 SaintPierre 湖的研究也显示在河流入湖区的 CDOM 浓度均明显高于湖体本身<sup>[49]</sup>,而在许多海湾的 CDOM 的研究中这种分布趋势更为明显<sup>[50-51]</sup>. 段洪涛等对太湖沿岸水体研究发现,贡湖湾 CDOM 吸收系数  $a(440)$  明显高于太湖其他沿岸水域;同时,梅梁湾、贡湖湾、镇湖湾、光富湾等  $a(440)$  高于沿岸水体平均值,而南部 3 个湖湾皆低于平均值<sup>[52]</sup>. 陈晓玲等调查的长江中游地区 3 个湖泊 CDOM 发现,离湖岸较近站点的  $a(400)$  高于离湖岸较远的站点<sup>[53]</sup>. 刘明亮等研究发现太湖入河口区和开敞区 CDOM 吸收系数  $a(355)$  存在显著空间差异,河口区明显大于开敞区,  $a(355)$  最大值出现在大浦河口和竺山湾漕桥河口附近,最小值出现在东太湖和胥口湾<sup>[4]</sup>. 宋玲玲等测得淀山湖 19 个采样点的水样在 355 nm 波长处的吸收系数不高,平均吸收系数为  $8.84 \text{ m}^{-1}$ ,范围在  $6.95 \text{ m}^{-1} \sim 10.28 \text{ m}^{-1}$ ,且湖南区略高于湖北区<sup>[54]</sup>. 周虹丽等对青海湖研究发现,总体上黄色物质 440 nm 吸收系数由岸边向湖心递减,最小值出现在海心山东边的站点. 在靠近海心山周围的湖区,黄色物质的吸收系数有增大的趋势,但量值小于湖边值<sup>[18]</sup>. 孔德星等对长江口海域进行测定得到长江口表层水 CDOM 的  $a_g(440)$  变化范围为  $1.152 \text{ m}^{-1} \sim 8.751 \text{ m}^{-1}$ ,平均为  $4.9282 \text{ m}^{-1}$ ,呈现从口门外向口门内增加的趋势<sup>[15]</sup>. 邢小昱等通过对渤海水域的研究发现,黄色物质的  $a_g(440)$  的空间变化不大,平均值最大出现在渤海湾,为  $0.7322 \text{ m}^{-1}$ ,辽东湾最小,为  $0.4613 \text{ m}^{-1}$ ,莱州湾  $0.5793 \text{ m}^{-1}$ ,秦皇岛外海  $0.5363 \text{ m}^{-1}$ <sup>[55]</sup>. 说明渤海海域的黄色物质在整个夏季是比较稳定的. 朱建华等测得春季黄海海区近岸站点的黄色物质的吸收系数大于离岸站点的吸收系数<sup>[56]</sup>. 李猛等测得厦门湾 CDOM,九龙江口具有最高值,西海域和同安湾次之,东侧水道最低<sup>[17]</sup>.

总结来看,可发现规律:一般近河口较高,从湖岸到湖中间,从海岸到海洋深处减少.

### 5.3 同一水体,不同深度 CDOM 吸收系数的差异

朱建华等测得春季黄海海区表层的黄色物质 440 nm 的吸收系数在  $0.05 \text{ m}^{-1} \sim 0.1 \text{ m}^{-1}$  之间,最大值吸收系数为  $0.18 \text{ m}^{-1}$ ,最小值吸收系数为  $0.03 \text{ m}^{-1}$ . 10 m 深水层的黄色物质 440 nm 的吸收系数在  $0.05 \text{ m}^{-1}$  左右,最大值为  $0.25 \text{ m}^{-1}$ ,最小值为  $0.015 \text{ m}^{-1}$ . 近岸站点的表层值大于 10 m 层值的现象明显,离岸站点的表层值减小,接近 10 m 层的吸收值<sup>[56]</sup>. 李猛等测得厦门湾表层水 CDOM 的  $a(355)$  变化范围为  $0.29 \text{ m}^{-1} \sim 3.80 \text{ m}^{-1}$ ,平均为  $0.94 \text{ m}^{-1}$ ;底层水  $a(355)$  的变化范围为  $0.30 \text{ m}^{-1} \sim 3.15 \text{ m}^{-1}$ ,平均为  $0.64 \text{ m}^{-1}$ ;表层高于底层,主要受水文和生物因素影响<sup>[17]</sup>.

### 5.4 不同类型水体中 CDOM 吸收系数的差异

杨顶田等对长江中下游湖泊的巢湖和龙感湖作了一些对比性研究,发现藻型湖泊的 CDOM 浓度明显高于草型湖泊,这在太湖草、藻型湖区也得到进一步验证<sup>[57]</sup>. 张运林等发现草型湖区的东太湖 CDOM 浓度明显要小于藻型湖区的梅梁湾<sup>[58]</sup>. 陈晓玲等调查的长江中游地区 3 个湖泊 CDOM 在 400 nm 处吸收系数( $0.37 \text{ m}^{-1} \sim 1.77 \text{ m}^{-1}$ )<sup>[53]</sup>与同季节长江下游地区太湖( $0.84 \text{ m}^{-1} \sim 3.2 \text{ m}^{-1}$ )研究结果基本吻合<sup>[59]</sup>,与国外学者对湖泊 CDOM 调查的结果( $0.20 \text{ m}^{-1} \sim 4.72 \text{ m}^{-1}$ )也较接近,但明显高于海岸带与海洋中的 CDOM 吸收系数<sup>[60-62]</sup>. 但从各站点的数据对比来看,CDOM 吸收系数在洪湖最高、梁子湖最低.

张运林等发现太湖 CDOM 吸收系数<sup>[58]</sup>与 Frenette 等人在河相的大型浅水湖泊 SaintPierre 湖的研究结果比较接近<sup>[49]</sup>,此外与 Morris 等人在美国东北部及科罗拉多州、阿拉斯加州的湖泊调查结果一致<sup>[60]</sup>,并且都落在 Kirk 报道的吸收系数范围之内<sup>[63]</sup>,但明显高于沿岸带和海洋中的值<sup>[26-63]</sup>. 张运林等对云南高原湖泊 CDOM 研究发现,不同湖泊间差异非常明显,最高值为最低值的 21.6 倍<sup>[22]</sup>. 与世界上同海拔高度的阿尔卑斯湖泊相比<sup>[64]</sup>,云南高原湖泊水体中 CDOM 浓度明显偏高,与太湖等长江中下游富营养浅水湖泊

相比<sup>[37,40]</sup>, 云南高原湖泊 CDOM 吸收系数要小得多。

## 6 CDOM 的相关因素分析

在沿海带水体, 盐度可以作为调查 CDOM 的保守性示踪物, 许多研究显示 CDOM 吸收系数与盐度存在显著性负相关<sup>[34]</sup>, 如孔德星对长江口海域研究发现  $a(440)$  随盐度增加而减小, 且线性相关性明显 ( $R^2 = 0.9952$ )<sup>[15]</sup>。李猛等在厦门湾也发现了类似情况 ( $R^2 = 0.8878$ ,  $n = 39$ )<sup>[17]</sup>。Susanne Kratzer 等在波罗的海的调查也表明: 调查海域、盐度和 CDOM 在 449 nm 处的吸收系数之间呈逆关系, 随着从西莫海域到波罗的海开阔海域盐度的增加, CDOM 浓度在降低, 相关系数为 0.73,  $p = 0.002$ <sup>[65]</sup>。反映了 CDOM 的来源为陆源, 然而在一些 CDOM 吸收系数非常低的沿岸地区, 这种相关性则不复存在<sup>[34]</sup>, 说明在此种情况下, CDOM 形成则不完全来自于陆源输入。

在 CDOM 吸收系数非常低的远海及内陆湖泊, CDOM 吸收与叶绿素 a 浓度有时存在一种线性相关, 如陈晓玲等对长江中游湖泊研究发现, 在梁子湖, CDOM 吸收系数主要受到浮游植物降解贡献, 与叶绿素浓度具有显著的正相关关系<sup>[53]</sup>。马荣华等对东太湖春季水体研究<sup>[66]</sup>以及张运林等对夏季梅梁湾及大太湖的研究<sup>[5]</sup>均有类似结果, 说明在此时 CDOM 主要来源于浮游植物自身降解的产物。

由于 CDOM 是溶解性有机物的重要组成部分, 因而大多数研究均显示 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度存在显著性线性相关, 并大致随波长的降低而相关性逐渐增加<sup>[67]</sup>。如杨顶田等对太湖、巢湖、龙感湖水体中的 CDOM 研究发现, DOC 含量与  $a(350)$  之间呈现较强的线性关系, 其相关值达到 0.673 ( $n = 284$ )<sup>[59]</sup>。张运林等对太湖典型草、藻型湖区研究发现, CDOM 的吸收系数与 DOC 浓度的相关性随波长的降低而增加, 在短波部分存在明显的正相关, 在对太湖梅梁湾不同湖区研究发现, DOC 与 CDOM 吸收系数在波长 320 nm 以下存在显著性相关<sup>[58]</sup>。

在一些海岸带水体及湖岸区域, CDOM 与悬浮泥沙浓度存在相关性, 如 Boss 在对海岸带水体进行光学特性研究时发现所研究海域内悬浮泥沙吸收系数与 CDOM 吸收系数呈现共同变化趋势, 并以此认为沉积物的再悬浮是水体 CDOM 的来源之一<sup>[68]</sup>。陈晓玲等对长江中游湖泊研究发现, 洪湖 CDOM 与悬浮泥沙浓度中度相关, 相关系数达到 0.714<sup>[53]</sup>。

## 7 展望

CDOM 作为一种重要的水色组分, 近年来众多学者已对 CDOM 的吸收及荧光特性做了不少的探索, 发现其特性随时间、空间的转移会发生显著的变化, 这与温度、光照、盐度、水体有机物含量、浮游植物生长变化等条件有密切的关系, 因此研究不同区域水体中的 CDOM 特性具有不可取代的意义。目前, 由于我国水体富营养化问题突出, CDOM 作为其重要的驱动因子, 在内陆湖泊和河流中的研究已经得到了众多学者的关注。随着遥感技术的发展与常规的测量相结合, 大型水体中的 CDOM 含量的遥感将会变得越来越重要。

### [参考文献]

- [1] 沈红, 赵东至, 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.
- [2] Zhang Y L, Wu S C, Qin B Q, et al. Absorption of light by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2004, 24(4): 405-409.
- [3] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains [J]. Limnol Oceanogr, 1981, 26(1): 43-53.
- [4] 刘明亮, 张运林, 王鑫, 等. 太湖有色可溶性有机物 4 种光谱模型的对比[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 42-46.
- [5] 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.
- [6] 王鑫, 张运林, 张文宗. 太湖北部湖区 CDOM 光学特性及光降解研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 130-136.
- [7] 陈楚群, 潘志林, 施平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 33-39.
- [8] 雷惠, 潘德炉, 陶邦, 等. 东海典型水体的黄色物质光谱吸收及分布特征[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 57-62.
- [9] 张绪琴, 张士魁, 吴永森, 等. 海水黄色物质研究进展[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(1): 89-92.
- [10] Kalle K. The problem of the Gelbstoff in the Sea [J]. Oceanography and Marine Biology, 1996, 34: 91-104.

- [11] Gagosian R R , Stuermer D H. The cycling of biogenic compounds and their diagenetically , transformed products in seawater [J]. *Mar Chem* , 1977 , 5 ( 4/6 ) : 605-632.
- [12] 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]. *Limnol Oceanogr* , 1989 , 34( 1 ) : 68-81.
- [13] 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.
- [14] Stedmon C A , Markager S. Behaviour of the optical properties of coloured dissolved organic matter under conservative mixing [J]. *Est Coast Shelf Sci* , 2003 57: 973-979.
- [15] 孔德星 杨红 吴建辉. 长江口海域黄色物质光吸收特性 [J]. *海洋环境科学* 2008 27( 6 ) : 629-631.
- [16] 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.
- [17] 李猛 郭卫东 夏恩琴 等. 厦门湾有色溶解有机物的光吸收特性研究 [J]. *热带海洋学报* 2006 25( 1 ) : 9-14.
- [18] 周虹丽 朱建华 李铜基 等. 青海湖水色要素吸收光谱特性分析 [J]. *海洋技术* 2005 24( 2 ) : 55-58.
- [19] 黄昌春 李云梅 孙德勇 等. 太湖 CDOM 紫外吸收特性及其分子量时空分布特征 [J]. *中国环境科学* 2009 29( 3 ) : 261-268.
- [20] 赵巧华 秦伯强. 太湖有色溶解有机质光谱吸收空间的分异特征 [J]. *中国环境科学* 2008 28( 4 ) : 289-293.
- [21] Warnock R E , Gieskes W C. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the southern bight of the North Sea [J]. *Journal of Sea Research* , 1999 42( 3 ) : 169-178.
- [22] 张运林 张恩楼 刘明亮. 云南高原湖泊有色可溶性有机物和颗粒物光谱吸收特性 [J]. *湖泊科学* 2009 21( 2 ) : 255-263.
- [23] 柳先平 李磊 戴金凤 等. 不同水体中有色可溶性有机物质荧光光谱定量分析研究 [J]. *光谱学与光谱分析* 2007 , 27( 10 ) : 2 083-2 087.
- [24] Zhang Y L , Zhang B , Wang X , et al. A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu [J]. *Hydrobiologia* , 2007 , 592( 1 ) : 105-120.
- [25] Hoge F E , Vodacek A , Blough N V. Inherent optical properties of the ocean: Retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurement [J]. *Limnol Oceanogr* , 1993 38( 7 ) : 1 394-1 402.
- [26] Ferrari G M , Dowell M D. CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the Southern Baltics Sea [J]. *Est Coast Shelf Sci* , 1998 47( 1 ) : 91-105.
- [27] Stedmon C A , Markager S. The optics of chromophoric dissolved organic matter ( CDOM ) in the Greenland Sea: An algorithm for differentiation between marine and terrestrially derived organic matter [J]. *Limnol Oceanogr* 2001 46( 1 ) : 2 087-2 093.
- [28] Rochelle Newall E J , Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Mar Chem* , 2002 , 77( 1 ) : 23-41.
- [29] 吴永森 吴绍渊 魏然 等. 不同过滤条件下黄色物质的吸收光谱演化特征分析 [J]. *海洋与湖泊* 2008 39( 6 ) : 585-590.
- [30] Stedmon C A , Markager S , Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter ( CDOM ) in Danish coastalwaters [J]. *Est Coast Shelf Sci* , 2000 , 51( 2 ) : 267-278.
- [31] Keith D J , Yoder J A , Freeman S A. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter ( CDOM ) in Narragansett Bay , Rhode Island: Implications for phytoplankton in coastalwaters [J]. *Est Coast Shelf Sci* , 2002 , 55: 705-717.
- [32] Fargion G S , Mueller J L. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation , revision [R]. Greenbelt: National Aeronautical and Space Administration , 2000: 125-153.
- [33] Green S A , Blough N V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organicmatter in naturalwaters [J]. *Limnol Oceanogr* , 1994 , 39( 8 ) : 1 903-1 916.
- [34] Kowalczyk P , Cooper W J , Whitehead R F , et al. Characterization of CDOM in an organic rich river and surrounding coastal ocean in the South Atlantic Bight [J]. *Aquat Sci* , 2003 , 65( 4 ) : 384-401.
- [35] 王鑫 张运林 赵巧华. 水体各组分吸收系数的测量方法研究 [J]. *安全与环境学报* 2007 7( 4 ) : 97-102.
- [36] 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.
- [37] Yacobi Y Z , Alberts J J , Takacs M , et al. Absorption spectroscopy of colored dissolved organic carbon in Georgia USA rivers: the impact of molecular size distribution [J]. *Journal of Limnology* , 2003 , 62( 1 ) : 41-46.
- [38] 张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展 [J]. *海洋湖沼通报* 2006 3: 119-127.
- [39] Maul G A , Gordon H R. On the use of the earth resources technology satellite ( Landsat-1 ) in optical oceanography [J]. *Remote Sensing Environ* , 1975 , 4: 95-128.



- [40] Markager S, Vincent W. Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters [J]. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45: 642-650.
- [41] 郭卫东, 夏恩琴, 韩宇超, 等. 九龙江口 CDOM 的荧光特性研究 [J]. *海洋与沼* 2005, 36(4): 349-357.
- [42] 韩宇超, 郭卫东. 河口区有色溶解有机物( CDOM) 三维荧光光谱的影响因素 [J]. *环境科学学报* 2008, 28(8): 1646-1653.
- [43] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征 [J]. *湖泊科学* 2009, 21(2): 234-241.
- [44] 夏达英, 李宝华, 吴永森, 等. 海水黄色物质荧光特性的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 719-724.
- [45] 季乃云, 赵卫红. 海洋溶解有机物荧光特征研究进展 [J]. *海洋环境科学* 2007, 26(1): 95-100.
- [46] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析 [J]. *环境科学* 2008, 29(9): 2448-2455.
- [47] Castillo C D, Coble P G, Morell J M, et al. Analysis of the optical properties of the Orinoco River plume by absorption and fluorescence spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1999, 66: 35-51.
- [48] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物的空间分布及光学行为 [J]. *湖泊科学* 2006, 18(4): 319-326.
- [49] Frenette J J, Arts M T, Morin J. Spectral gradients of downwelling light in a fluvial lake( Lake Saint-Pierre, St-Lawrence River) [J]. *Aquatic Ecology*, 2003, 37(1): 77-85.
- [50] Seritti A, Russo D, Nannicini L, et al. DOC, absorption and fluorescence properties of estuarine and coastal waters of the Northern Tyrrhenian Sea [J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 1998, 10(3): 95-106.
- [51] Clementson L A, Parslow J S, Turnbull A R, et al. Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in southeast Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* [J]. *Est Coast Shelf Sci*, 2004, 60(1): 101-112.
- [52] 段洪涛, 马荣华, 孔维娟. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性 [J]. *湖泊学* 2009, 21(2): 242-247.
- [53] 陈晓玲, 陈莉琼, 于之锋, 等. 长江中游湖泊 CDOM 光学特性及其空间分布对比 [J]. *湖泊科学* 2009, 21(2): 248-254.
- [54] 宋玲玲, 仇雁翎, 张洪恩, 等. 淀山湖有色可溶性有机物的光谱吸收特性 [J]. *湖泊科学* 2007, 19(3): 250-254.
- [55] 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.
- [56] 朱建华, 李铜基. 探讨黄色物质吸收曲线参考波长选择 [J]. *海洋技术* 2003, 22(3): 10-14.
- [57] 杨顶田, 陈伟民, 吴生才, 等. 湖泊中有色可溶性物质对近紫外及蓝光衰减的影响 [J]. *湖泊科学* 2003, 15(3): 269-274.
- [58] 张运林, 秦伯强, 马荣华. 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.
- [59] 杨顶田, 陈伟民, 曹文熙. 长江下游湖泊水体中有色可溶性物质的生物光学模式 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 387-393.
- [60] Morris D P, Zagarese H, Williamson C E, et al. The attenuation of Solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon [J]. *Limnol Oceanogr*, 1995, 40(8): 1381-1391.
- [61] Schwarz J N, Kowalczyk P, Kaczmarek S, et al. Two models for absorption by coloured dissolved organic matter ( CDOM) [J]. *Oceanologia*, 2002, 44(2): 209-241.
- [62] Chen Z, Hu C, Conmy R N, et al. Colored dissolved organic matter in Tampa Bay, Florida [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 104: 98-109.
- [63] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem* [M]. England: Cambridge University Press, 1994.
- [64] Laurion I, Ventura M, Catalan J, et al. Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among-and within-lake variability [J]. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45(6): 1274-1288.
- [65] Kratzer S, Sahl I N B H. Assessing secchi and photic zone depth in the Baltic sea from satellite data [J]. *Ambio*, 2003, 32(8): 572-579.
- [66] 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.
- [67] 张运林, 秦伯强, 杨龙元, 等. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性 [J]. *生态学报* 2006, 26(12): 2127-2131.
- [68] Boss E, Pegau W S, Zaneveld J R V, et al. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2001, 106(C5): 9499-9507.

[责任编辑:黄敏]