

太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性*

段洪涛, 马荣华, 孔维娟, 郝景燕, 张寿选

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 有色可溶性有机物(CDOM)吸收光谱特性研究对于水色定量遥感反演具有重要作用. 通过 2007 年 6 月 10 日至 6 月 18 日太湖沿岸 68 个 CDOM 吸收光谱曲线和水质参数实测数据, 分析了 CDOM 吸收光谱曲线特征以及 $a_g(440)$ 、 S_g 值及其相关关系等, 结果表明: 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱曲线表现为两种类型, 贡湖湾 CDOM 吸收系数明显高于太湖其他沿岸水域, $a_g(440)$ 最高值即出现在贡湖湾; 同时, 梅梁湾、贡湖湾、镇湖湾、光富湾等 $a_g(440)$ 高于沿岸水体平均值, 而南部 3 个湖湾皆低于平均值. 另外, 贡湖湾 S_g 值较小, 且与 $a_g(440)$ 呈现出较好的关系; 而沿岸其它水体 S_g 值与 $a_g(440)$ 虽然呈现负相关, 但关系不明显. 这对于了解太湖水体 CDOM 特性以及定量反演有一定的意义和作用.

关键词: 黄色物质; $a_g(440)$; S_g ; 贡湖湾

Optical properties of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu

DUAN Hongtao, MA Ronghua, KONG Weijuan, HAO Jingyan & ZHANG Shouxuan

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Researches on optical properties of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) has played an important role in quantitative water-color remote sensing retrieval. The optical properties of CDOM in coastal waters of Lake Taihu were investigated from June 10 to June 18 in 2007. The results show that the specific absorption coefficient of CDOM varied significantly and was higher apparently in Gonghu Bay than in other areas. The specific absorption coefficient at 440nm ($a_g(440)$) also showed a similar trend, and it reached the highest value in Gonghu Bay. The $a_g(440)$ in waters of Meiliang Bay, Zhenhu Bay and Guangfu Bay also showed an increased trend. On the contrary, the spectral slope coefficient (S_g) in Gonghu Bay was lower than others, and showed a better correlation with $a_g(440)$, while S_g in other bays was higher and showed a poor correlation with $a_g(440)$. The results demonstrated that it is important to learn the optical properties of CDOM in Lake Taihu, which would then allow higher precision in remote sensing applications.

Keywords: CDOM; $a_g(440)$; S_g ; Gonghu Bay

有色可溶性有机物(CDOM)是水体溶解有机碳(DOC)中可吸收光的部分(紫外到可见光), 占到可溶性有机物质的 10%–90%左右, DOC 的大部分(60%以上)^[1-4]. CDOM 现在也被表述为 Chromophoric Dissolved Organic Matter, Yellow Substance 以及 Gelbstoff, 较少区分其中的差异^[4]. 黄色物质是一种结构复杂的混合物, 由碳水化合物经麦拉德(Mallard)反应而形成的, 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^[2], 主要为土壤降解、动植物分解腐烂的产物^[3]. 黄色物质可能由氨基酸、糖、氨基糖和脂肪酸类组成; 另也还可能包含有类胡萝卜素、叶绿素、碳水化合物和酚等^[5]. 国际海洋水色协调工作组 2000 年 IOCCG 报告指出^[6], 黄色物质是一类含有腐殖酸和灰黄酸的可溶性有机物. CDOM 作为湖泊生态系统中的主要结构性成分, 其对光的吸收影响初级生产者对光的可获取性, 影响水体初级生产

* 国家自然科学基金(40801137, 40871168, 40671138)、中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动专项资金(07YJ011001)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助(CXNIGLAS200807)联合资助. 2008–10–04 收稿; 2008–12–04 收修改稿. 段洪涛, 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: htduan@niglas.ac.cn.

力^[7]. CDOM还可以有效的吸收短波辐射, 导致光化反应, 可以有效保护水生植被, 特别是在高纬度湖泊, 避免其遭受紫外线灼伤^[8]. 由于CDOM在湖泊生态系统中的重要性, 研究利用遥感方法提取大范围湖水中CDOM含量的方法非常重要^[9].

水色遥感中, 水体光谱信息取决于多种物质的复杂集合体, 它包括纯水、CDOM、浮游植物、悬浮物质等. 水体对光的吸收和散射特性可以用吸收、散射系数等固有光学特性参数表示^[3,10]. 而CDOM作为水体中一个重要的光吸收物质, 其固有光学特性能显著改变水下光场^[11-12]. 因此, 研究CDOM光吸收特性对于水色遥感以及CDOM的定量遥感反演有重要作用. 本文通过分析太湖沿岸CDOM数据, 比较了太湖各湖湾CDOM光吸收特性, 以及 $a_g(440)$ 和斜率参数 S_g 值的分布特征及其影响因素, 对于进一步研究太湖水体CDOM特性以及定量反演有一定的意义和作用.

1 研究方法

2007年6月10日至6月18日, 在太湖部分沿岸区域布设样点, 如图1所示, 共获取有效样点64个. 同步测量各点水体透明度、深度、表观光学量(AOPs)等现场数据, 并采集水样, 放冷藏箱回实验室进行分析. 事先用10%的盐酸中浸泡过得 $0.2\mu\text{m}$ 的聚碳酸脂(polycarbonate)滤纸, 在120-140mmHg的负压下, 过滤水样得到黄色物质样品, 同时按照与样品处理同样的步骤过滤超纯水得到超纯水空白. 样品立即进行分光光度计测量, 分光光度计使用的是岛津UV-2401, 测量时波长间隔1.6nm, 狭缝宽度2nm, 测量波长范围是400-600nm; 计算公式就是样品光学密度, 相对应的纯水参比光学密度以及零点校正:

$$a_g(\lambda) = \frac{2.303}{l} \left[[OD_g(\lambda) - OD_{bs}(\lambda)] - OD_{null} \right] \quad (1)$$

式中: l 为石英比色皿的长度(通常为 0.1m); $OD_g(\lambda)$ 黄色物质相对于参比纯水的的光学密度; $OD_{bs}(\lambda)$ 为经过与样品同样处理的纯水的的光学密度; OD_{null} 为在长波段可见光或近红外波长的明显残余吸收. 选取几条理想的 $OD_{bs}(\lambda)$ 曲线进行平均处理, 作为整个航次 $OD_{bs}(\lambda)$, 应用于黄色物质吸收系数计算. 叶绿素 a 含量采用分光光度法测定, 即用 Whatman GF/C 滤纸(平均孔径 $1.1\mu\text{m}$)过滤, 90%热乙醇提取, 然后用 7230 分光光度计检测、计算; 悬浮物含量的测定采用电子天平称重法, 即用灼烧后的 GF/C 滤纸过滤, 烘干, 冷却, 计算.

2 结果和讨论

2.1 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性

CDOM 的光谱吸收曲线变化一般随波长增加呈指数规律递减, 在短波处差异最为显著. 图 2 是太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱曲线, 明显呈两种曲线类型. 类型二样点主要分布在贡湖湾, 而类型一分布在除贡湖湾以外的太湖沿岸区域. 400-500nm 蓝光波段, 类型一吸收系数的变化范围为 $0.10-2.88\text{m}^{-1}$, 平均值为 0.71m^{-1} ; 类型二变化范围为 $0.44-2.99\text{m}^{-1}$, 平均值为 1.71m^{-1} . 500-600nm 绿光波段, 类型一吸收系数的变化范围为 $0.02-0.68\text{m}^{-1}$, 平均值为 0.22m^{-1} ; 类型二变化范围为 $0.44-1.59\text{m}^{-1}$, 平均值为 0.84m^{-1} . 由此可见, 分布在贡湖湾内的样点 CDOM 在蓝、绿光波段吸收系数都明显高于太湖其他沿岸水域.

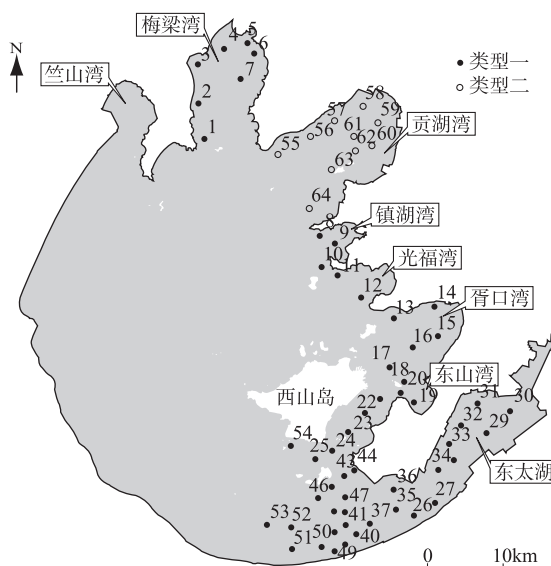


图1 太湖沿岸采样点分布
Fig.1 Sampling points in Lake Taihu

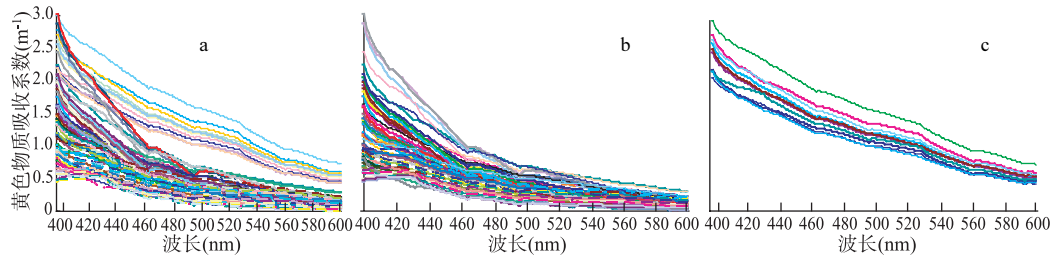


图 2 CDOM 吸收光谱曲线: 所有样点曲线(a); 类型一样点曲线(b); 类型二样点曲线(c)

Fig.2 Absorptions spectra of CDOM: all points(a); Type I(b); Type II (c)

CDOM 由于成分复杂, 浓度确定很困难, 最常用方法是用 355nm、375nm 和 440nm 等波长处的吸收系数来表示其度^[13-14]. 而针对海岸带和内陆水体遥感研究, 通常使用 440nm 波长处的吸收系数 $a_g(440)$ 表示^[15], 这是由于其对应着浮游植物色素的最大吸收处, 而在以往的研究中黄色物质在该波长的吸收通常被忽略^[16], 因而选择该波段可以更好的用于色素的遥感反演^[11]. $a_g(440)$ 越大, 说明对应样点的 CDOM 浓度越高. 太湖沿岸水体 $a_g(440)$ 吸收分布范围在 0.37–2.26 m^{-1} 之间(图 3), 平均值为 0.94 m^{-1} (表 1). 其中贡湖湾 55–64 号点 $a_g(440)$ 吸收明显偏大(图 3), 其范围主要在 1.52–2.26 m^{-1} 之间, 平均值为 1.78 m^{-1} , 明显大于太湖沿岸其它水体(范围 0.37–1.62 m^{-1} , 平均值 0.78 m^{-1}). 为了更好地比较太湖沿岸水体 CDOM 的吸收光谱特性, 根据样点的分布位置, 按照湖湾进行统计, 如表 1 所示. $a_g(440)$ 最高值出现在贡湖湾 57 号点, 最低值在东山湾 20 号点. 高于沿岸水体平均值的湖湾分别是梅梁湾、贡湖湾、镇湖湾、光福湾, 其余南部 3 个湖湾皆低于平均值. 从太湖沿岸 $a_g(440)$ 历史分布来看, 梅梁湾与 2004 年同期 7 月 1.06–1.70 m^{-1} 相比, 有所降低^[17], 而与 2004 年 10 月 0.58–1.81 m^{-1} 比较, 分布范围更为集中^[18]; 贡湖湾相对于 2004 年 10 月 0.89–1.38 m^{-1} , 也明显偏高; 东太湖 2004 年 10 月在 0.37–0.75 m^{-1} 之间, 而本研究采样期间较高^[18].

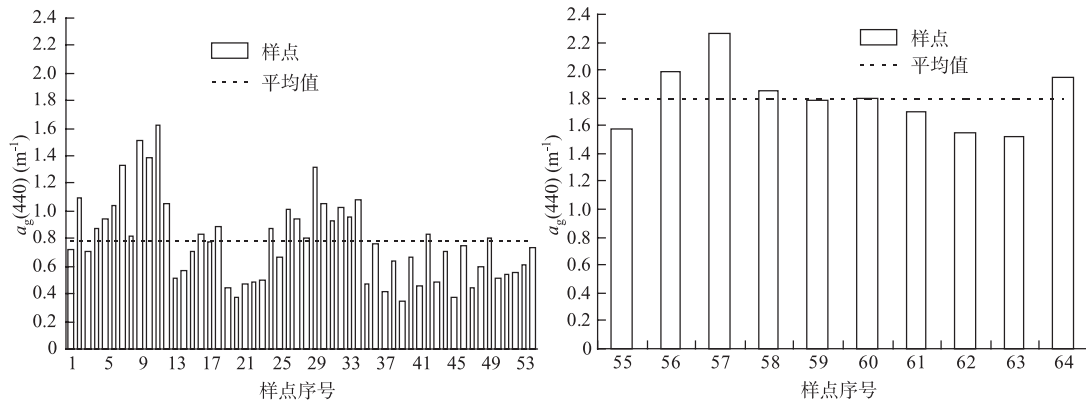


图 3 太湖沿岸水体 $a_g(440)$ 分布范围

Fig.3 $a_g(440)$ in coastwise water in Lake Taihu

表 1 太湖各湖湾 CDOM 吸收光谱特征参数

Tab.1 $a_g(440)$ and S_g of CDOM in Lake Taihu

	全部	梅梁湾	贡湖湾	镇湖湾	光福湾	胥口湾	东山湾	东太湖
$a_g(440)$ 范围	0.37–2.26	0.71–1.33	1.52–2.26	0.82–1.52	1.05–1.62	0.52–0.84	0.38–0.88	0.47–1.31
$a_g(440)$ 平均值	0.94	0.96	1.78	1.24	1.34	0.68	0.57	0.94
S_g 范围	0.0069–0.0232	0.0096–0.0160	0.0069–0.0078	0.0113–0.0166	0.0081–0.0140	0.0093–0.0121	0.0097–0.0204	0.0106–0.0232
S_g 平均值	0.0117	0.0116	0.0075	0.0141	0.0110	0.0106	0.0157	0.0149

一般认为, 黄色物质的来源主要分为两类: 近岸地表径流的陆源输入, 主要是江河径流携带; 浮游生物代谢以及底层沉积物释放生产^[19]. 而太湖水体, 特别是夏季, 水体中浮游藻类浓度较高, CDOM除了来自河流外, 浮游藻类死亡降解的产物也是其重要来源^[17]. 由于太湖各个湖湾位置、水文等情况不同, CDOM 来源也有所差异. 因此, 太湖沿岸水体黄色物质与历史相比, 部分湖湾 CDOM 浓度有所下降, 而另一部分却显著提高. 特别是贡湖湾, 由于处在望虞河河口, 2007年5月爆发太湖蓝藻, 通过望虞河实施“引江济太”工程, 仅2007年5月1日到6月3日, 进入太湖水量已达 $2.05 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[20], 长江水大量进入贡湖湾, 造成采样时段(2007年6月)陆源输入大为增加, CDOM 也相应提高. 也有部分原因可能是由于无锡周边受城市污染的河流入湖造成的. 贡湖湾悬浮物浓度平均值为 46.59mg/L, 远远大于太湖沿岸其它水体平均值 19.70mg/L, 也部分证明了贡湖湾陆源输入的增加.

2.2 S_g 值确定及其与 $a_g(440)$ 的关系

CDOM 吸收光谱特性研究中最关注的 2 个量值是 $a_g(440)$ 与 S_g . $a_g(440)$ 主要反映了测定水样中黄色物质含量的高低, 而 S_g 则反映了黄色物质指数吸收的衰减程度^[21]. 黄色物质吸收光谱的形状在不同的环境中都具有明显的特征, 吸收系数光谱一般随波长的增加呈指数衰减, 如下所示^[11]:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp[-S_g(\lambda_0 - \lambda)] \quad (1)$$

式中, λ_0 选定 440nm 为参考波长, 采用最小二乘法对 400–600nm 波段在 Matlab 中进行非线性拟合, 得到指数斜率参数 S_g .

太湖沿岸水体 S_g 在 0.0069–0.0232nm⁻¹ 之间, 平均值为 0.0117nm⁻¹. 不同的湖泊、同一湖泊的不同湖区、相同湖区在不同的季节, CDOM 吸收的影响因素可能不同, S_g 值也不同^[22]. 由表 1 所示, 东山湾 S_g 平均值最高, 分布范围较大, 在 0.0097–0.0204nm⁻¹ 之间; 而贡湖湾平均值最低, 普遍在 0.0069–0.0078nm⁻¹ 之间. 尽管先前很多研究认为 S_g 值的变化很小, Bricaud 等在墨西哥湾的研究中曾推荐使用 $S_g=0.0014\text{nm}^{-1}$ 模拟 CDOM 吸收光谱曲线, 用于遥感反演^[11]. 但事实上海岸带、内陆水体与大洋水体差异较大, S_g 值范围也大相径庭. Kalle 研究曾认为大洋水体 $S_g > 0.010$, 而内陆水体 S_g 值偏小^[22]. 另外, 就是同类型水体, 不同的研究者获取的 S_g 值范围差异也较大(表 2)^[23–28].

表 2 不同区域类型水体 S_g 值

Tab.2 S_g values for samples reported in the literature

研究区	年份	S_g 值(nm ⁻¹)	参考波长	模拟波段范围(nm)	作者
巢湖	2002	0.0133–0.0175	440	350–550	戴永宁等 ^[10]
太湖	1998	0.0120–0.0160	400	350–750	俞宏, 蔡启铭 ^[24]
太湖	2004	0.0099–0.0241	440	280–650	Ma <i>et al</i> ^[18]
		0.0135–0.0215		280–320	
		0.0116–0.0231		320–500	
		0.0085–0.0362		500–650	
太湖	2004 夏季	0.0140–0.0185	355	280–500	张运林, 秦伯强 ^[14]
(大太湖、梅梁湾)	2004 冬季	0.0143–0.0201			
太湖(梅梁湾)	2004	0.0147–0.0164	440	280–500	张运林等 ^[17]
淀山湖	2006	0.0117–0.0148	440	300–500	宋玲玲等 ^[25]
		0.0103–0.0132		500–750	
		0.0104–0.0133		300–750	
厦门湾	2003	0.0060–0.0230	355	300–600	李猛等 ^[26]
胶州湾	1999	0.0131–0.0180	400	380–680	吴永森等 ^[27]
黄东海	2003	0.0130–0.0220	440	380–500	朱建华, 李铜基 ^[28]
黄海	2007	0.0106–0.0180	440	380–500	王林等 ^[21]
Gulf of Guine	1978	0.0100–0.0200	375	375–500	Bricaud <i>et al</i> ^[11]
Hudson Strait, Hudson Bay	2005	0.0120–0.0180	355	250–400	Granskog <i>et al</i> ^[4]
Baltic Sea	1993–2004	0.02144±0.0037	400	350–550	Kowalczyk <i>et al</i> ^[29]
		0.02334±0.0028		300–650	

这与本研究的结果相似, S_g 值分布范围较大, 很难选择一个 S_g 值代表太湖沿岸水体. 由于太湖水体公众比较关注, 研究者较多, 也获得许多 S_g 值. 1998 年太湖 S_g 均值为 0.0140nm^{-1} ^[24], 这与 Bricaud 曾经推荐遥感反演使用的 0.0014nm^{-1} 相差 10 倍^[11]; 2004 年针对太湖的不同研究获得的 S_g 值也有较大差异^[14,17-18]. 特别是, 由于采用的模拟波段范围和参考波长不同, S_g 值计算时本身就会有差异. 针对同一水体水样, 研究者采用不同的参考波长和模拟波段范围, 都会造成 S_g 值的差异^[18,25,29].

事实上, CDOM 来源不同造成的 S_g 值的差异, 主要是由于 CDOM 组成成分灰黄酸(fulvic acids)和腐殖酸(humic acids)比例的不同造成的^[16,30]. S_g 越大, 灰黄酸所占比例越高, 腐殖酸比例越低. 而灰黄酸和腐殖酸的含量比值与黄色物质的陆源和生物自身降解有关. 黄色物质的陆源主要来自于河流携带有机成分的输入, 含有腐殖酸的比例偏大, 而由于腐殖酸的比吸收系数较大, 再加上黄色物质总体含量较高, 使得陆源输入的水体吸收系数偏高. 这样, 吸收系数较大水体通常得到的斜率经验值 S_g 较低. 表现在太湖沿岸水体上, 由于贡湖湾陆源输入较大, 造成 S_g 值远小于沿岸其它水体, 反映了 CDOM 生物光学特性的差异^[16,21]. 相反, 生物的自身降解含有灰黄酸的比例较大, 会导致 S_g 值偏高. 虽然太湖沿岸水体也存在生物的自身降解, 但由于陆源是沿岸水体 CDOM 的主要来源, 因此 S_g 值偏低更为突出.

图 4 所示为太湖沿岸水体 CDOM 特征参数 $a_g(440)$ 与 S_g 关系, 呈现一定的负相关关系. 由于吸收系数较大的水体通常得到的 S_g 较低, 吸收系数小的水体得到的 S_g 偏高, 宏观上说明二者存在负相关关系^[21]. 但由于腐殖酸与灰黄酸比例变化存在一定的不规则性, 造成负相关关系较为不稳定. 如图 4a 所示, 虽然太湖沿岸所有水体样点 $a_g(440)$ 与 S_g 呈现负相关, 但 R^2 较小, 负相关不明显; 而 4b 为贡湖湾样点, 两者呈现较为显著的负相关($P < 0.01$). 这是由于太湖沿岸水体特征差异较大, 腐殖酸与灰黄酸比例关系不稳定, 而贡湖湾水体区域较小, 陆源输入占明显主导作用, 腐殖酸比例偏高, 因此两者呈现较好的负相关关系.

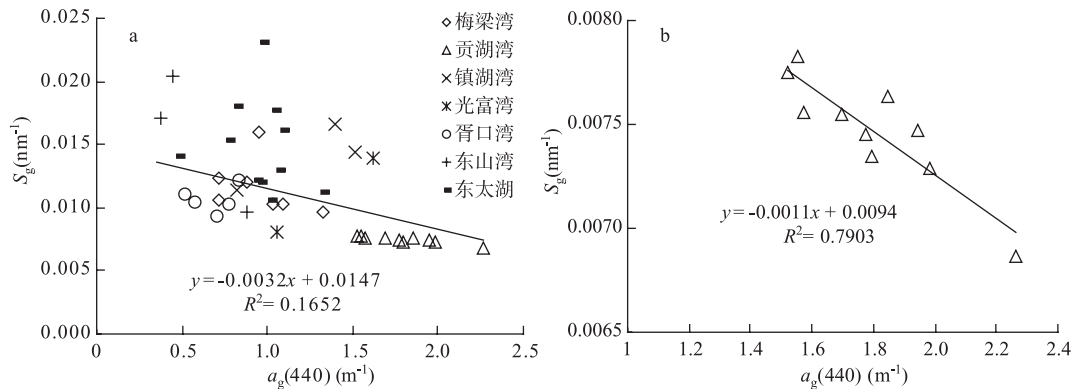


图 4 太湖沿岸水体 CDOM 特征参数 $a_g(440)$ 与 S_g 关系(a: 所有样点; b: 贡湖湾)

Fig.4 Correlation between $a_g(440)$ and S_g in Lake Taihu

3 结论

由于太湖各个湖湾位置、水文等情况不同, CDOM 来源也有所差异. 因此, 太湖沿岸水体黄色物质与历史相比, 部分湖湾 CDOM 浓度有所提高, 而另一部分却出现下降. 另外, 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱曲线明显呈两种类型: 贡湖湾内样点 CDOM 在蓝、绿光波段吸收系数都明显高于太湖其他沿岸水域, 而且 $a_g(440)$ 最高值即出现在贡湖湾 57 号点. 这是由于望虞河实施“引江济太”工程, 长江水大量进入贡湖湾, 造成陆源输入大为增加, CDOM 浓度也相应提高. 陆源输入较大, 势必引起 CDOM 中腐殖酸比例偏高, 造成 S_g 值远小于沿岸其它水体, 且与 $a_g(440)$ 呈现出较好的关系; 但也有部分原因可能是由于无锡周边受城市污染的河流入湖造成的. 梅梁湾、贡湖湾、镇湖湾和光富湾 $a_g(440)$ 高于沿岸水体平均值的湖湾, 而南部 3 个湖湾皆低于平均值. 而且除了贡湖湾外, 其它沿岸水体 $a_g(440)$ 和 S_g 值关系不稳定, 这说明沿岸水体中腐殖酸和灰黄酸关系不稳定, 也部分证明了其来源的复杂性. 这对于了解太湖水体 CDOM 特性以及定量反演有一定的意义和作用.

4 参考文献

- [1] 沈红, 赵冬至, 付云娜等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展. 遥感学报, 2006, **10**(6): 949-954.
- [2] Kalle K. The problem of the Gelbstoff in the sea. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1966, **4**: 91-104.
- [3] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (2nd ed). Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [4] Granskog MA, Macdonald RW, Mundy CJ *et al.* Distribution, characteristics and potential impacts of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Hudson Strait and Hudson Bay, Canada. *Continental Shelf Research*, 2007, **27**: 2032-2050.
- [5] Gagosian RR, Stuermer DH. The cycling of bio-genic compounds and their diagenetically, transformed products in seawater. *Marine Chemistry*, 1977, **5**(4-6): 605-632.
- [6] Sathyendranath S. Remote sensing of ocean colour in coastal, and optically-complex, waters. *Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group*, 2000, **3**: 9-21.
- [7] Jones RI. Phytoplankton, primary production and nutrient cycling. In: Hessen D, Tranvik L eds. Aquatic humic substances: Ecology and biogeochemistry. *Ecological Studies*, 1998, **133**: 145-175.
- [8] Pienitz R, Vincent WF. Effect of climatic change relative to ozone depletion on UV exposure in subarctic lakes. *Nature*, 2000, **404**: 484-487.
- [9] Kutser T, Pierson DC, Kallio KY *et al.* Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**: 535-540.
- [10] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 173-177.
- [11] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and Visible domains. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**: 43-53.
- [12] 张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展. 海洋湖沼通报, 2006, **3**: 119-127.
- [13] Rochelle EJ, Fisher TR. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 2002, **77**: 23-41.
- [14] 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. 水科学进展, 2007, **18**(3): 415-423.
- [15] Stedmon CA, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**: 267-278.
- [16] Carder KL, Steward RG, Harvey GR *et al.* Marine humic and fulvic acids: Their effect on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**: 68-81.
- [17] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. 生态学报, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [18] Ma R, Tang J, Dai J *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [19] Kowalczuk P. Seasonal variability of yellow substance absorption in the surface layer of the Baltic sea. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(C12): 30047-30058.
- [20] 太湖流域引江济太办公室. 引江济太简报(2007年第3期). <http://www.tba.gov.cn/ztbd/yjjt/index.asp>.
- [21] 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. 大连海事大学学报, 2007, **33**(S2): 179-182.
- [22] 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. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 120-126.
- [23] Kalle K. Zum problem des meereswasser-farbe. *Ann Hydrol Mar Mitt*, 1938, **66**: 1-13.
- [24] 俞宏, 蔡启铭. 太湖水体的光学特性及其参数化方案. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究. 北京: 气象出版社, 1998: 63-73.
- [25] 宋玲玲, 仇雁翎, 张洪恩. 淀山湖有色可溶性有机物的光谱吸收特性. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 250-254.
- [26] 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. 热带海洋学报, 2006, **25**(1): 9-14.
- [27] 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. 海洋与湖沼, 2002, **33**(4): 402-406.
- [28] 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. 海洋技术, 2004, **23**(2): 7-13.
- [29] Kowalczuk P, Stedmon CA, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll. *Marine Chemistry*, 2006, **101**: 1-11.
- [30] 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. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 234-241.