

太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同

施坤, 李云梅*, 王桥, 杨煜, 金鑫, 王彦飞, 张红, 尹斌

(南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 南京 210046)

摘要: 2009 年 4、6 月, 分别对太湖、巢湖进行了野外试验. 利用光谱微分技术分析了 2 个湖泊 CDOM 吸收光谱的变化特征, 根据吸收系数的光谱微分特征, 对 240 ~ 450 nm 的吸收系数进行分段, 分别对每一段计算光谱斜率 S 值. 在 A 段, 巢湖、太湖 CDOM 的 S 值分别在: $0.0166 \sim 0.0102 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0132 \pm 0.0017) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.029 \sim 0.017 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0214 \pm 0.0024) \text{ nm}^{-1}$] 之间, 在 B 段, 其 S 值分别在: $0.0187 \sim 0.0148 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0169 \pm 0.001) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.0179 \sim 0.0055 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0148 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$] 之间, 在 C 段, 其 S 值分别在: $0.0208 \sim 0.0164 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0186 \pm 0.0009) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.0253 \sim 0.0161 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0197 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$] 之间. 结果表明: ①太湖水体的吸收系数及对各组分吸收的贡献要小于巢湖水体的, 标准化吸收系数要大于巢湖水体的. ②不管是太湖还是巢湖, CDOM 的吸收系数的微分光谱在 260 nm 左右为谷值, 在 290 nm 左右为峰值, CDOM 吸收系数可以分成 (A、B、C) 3 段. ③太湖水体中 CDOM 腐殖酸的相对含量整体要低于巢湖水体的. ④ S 值反映 CDOM 组成的敏感性, 与 CDOM 的组成有关, 当 CDOM 中腐殖酸相对含量较高时, 敏感性最强的是 B 段的 S 值, 其次是 C 段的; 反之, 敏感性最高的是 C 段的, 其次是 A 段的, 最弱的是 B 段的.

关键词: 太湖; 巢湖; 有色可溶性有机物; 吸收系数; 光谱微分

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1183-09

Similarities and Differences in Absorption Characteristics and Composition of CDOM Between Taihu Lake and Chaohu Lake

SHI Kun, LI Yun-mei, WANG Qiao, YANG Yu, JIN Xin, WANG Yan-fei, ZHANG Hong, YIN Bin

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

Abstract: Field experiments are conducted separately in Taihu Lake and Chaohu Lake on Apr. and Jun. 2009. The changes in absorption spectra of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) characteristics are analyzed using spectral differential analysis technology. According the spectral differential characteristic of absorption coefficient; absorption coefficient from 240 to 450 nm is divided into different stages, and the value of spectral slope S is calculated in each stage. In Stage A, S value of CDOM in Taihu Lake and Chaohu Lake are $0.0166 \sim 0.0102 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0132 \pm 0.0017) \text{ nm}^{-1}$], $0.029 \sim 0.017 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0214 \pm 0.0024) \text{ nm}^{-1}$]. In Stage B, S values are $0.0187 \sim 0.0148 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0169 \pm 0.001) \text{ nm}^{-1}$], $0.0179 \sim 0.0055 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0148 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$]. In Stage C, S values are $0.0208 \sim 0.0164 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0186 \pm 0.0009) \text{ nm}^{-1}$], $0.0253 \sim 0.0161 \text{ nm}^{-1}$ [average $(0.0197 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$]. The results can be concluded as; ① Absorption coefficient of water in Taihu Lake, and its contribution to absorption of each component is less than that of water in Chaohu Lake, however the standardized absorption coefficient is larger than that in Chaohu Lake. ② Both in Taihu Lake and Chaohu Lake, derivative spectra of CDOM absorption coefficient reached valley at 260nm, then rise to top at 290 nm, CDOM absorption coefficient can be delivered into three stages. ③ Generally speaking, content of CDOM in Taihu Lake is less than in Chaohu Lake. ④ Spectrum slope (S value) of CDOM is related to composition of CDOM, when content of humic acid in CDOM gets higher, S value of Stage B is the most sensitive value, then is the S value of Stage C. Oppositely, S value of Stage B gets the most sensitive value, then is the S value of Stage A; the least sensitive value is in Stage B.

Key words: Taihu Lake; Chaohu Lake; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); absorption coefficient; spectral differential

可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 存在于所有水体中, 是溶解性有机物的重要组成部分, 主要由腐殖酸和富里酸组成^[1]. CDOM 主要由陆源物质和浮游植物降解产生, 在大洋水体中以浮游植物降解为主, 而在近海及内陆水体, 陆源物质成为其主要来源. CDOM 的光学特性反映了其组成中腐殖酸与富里酸的比例, 并在一定程度上指示水体的污染状况^[2]. 此外, CDOM 是影响二类水体光谱特性的 3 个主要因子之一, 因此, 对其光学特性的研究是水色遥感研究的重要内容. 国内外

学者针对不同的研究区观察到了不同的 CDOM 吸收特性^[3-30]. 张运林等^[20]利用 M 值 (CDOM 在 250nm 吸收系数与在 365nm 吸收系数的比值) 等指标对太湖草型、藻型湖区 CDOM 的组成和来源进行讨论, 得出不同类型湖区的 CDOM 组成和来源具有

收稿日期: 2009-07-17; 修订日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971215); 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05)

作者简介: 施坤 (1985 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境遥感, E-mail: ahuishikun@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

较大的差异.陈晓玲等^[21]对长江中下游湖泊的 CDOM 的吸收特性和来源进行分析,发现洪湖 CDOM 主要来自入湖河流,而梁子湖 CDOM 主要来自浮游植物的分解.

太湖、巢湖均属我国五大淡水湖泊,是典型的内陆富营养化水体.对这 2 个湖泊 CDOM 光学特性的研究,将有助于分析不同湖泊 CDOM 的来源和组成,揭示不同水体光学特性形成机制.本研究对 2 个湖泊的 CDOM 的吸收特性和水质参数进行分析,以期得到不同湖泊 CDOM 的组成、光学特性的异同,更好地理解 CDOM 的组成与光学特性之间的关系.

1 材料与方法

1.1 研究区及样点分布

2009 年 4、6 月进行了太湖、巢湖野外实验.分别对太湖 54 个、巢湖 32 个样点进行了观测(图 1、2).测量的参数包括水体中总悬浮物衰减系数、吸收系数、总悬浮物浓度、叶绿素浓度.其中,总悬浮物的衰减系数与吸收系数在野外直接观测,总悬浮物浓度、叶绿素浓度、CDOM 的吸收系数等参数通过室内分析获得.

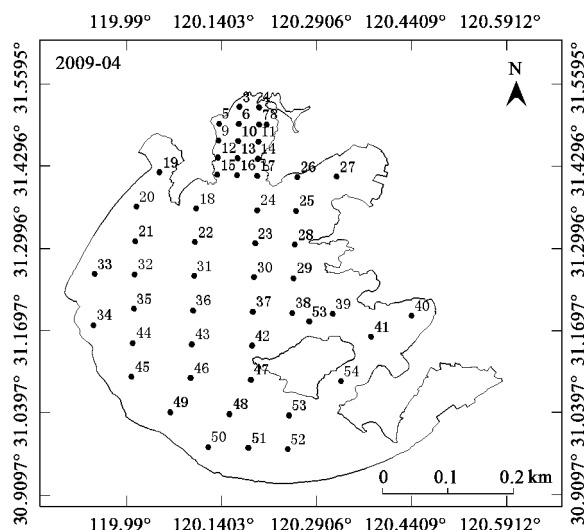


图 1 太湖样点分布示意

Fig. 1 Sample sites in Taihu Lake

1.2 参数的测定

野外采集水样的同时运用 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)获得太湖水体总悬浮物的吸收系数^[26],为了得到更为精确的吸收系数数据,需对吸收系数作温度和散射纠正,纠正方法见文献^[26].

CDOM 吸收系数的测量在室内进行.首先,使用

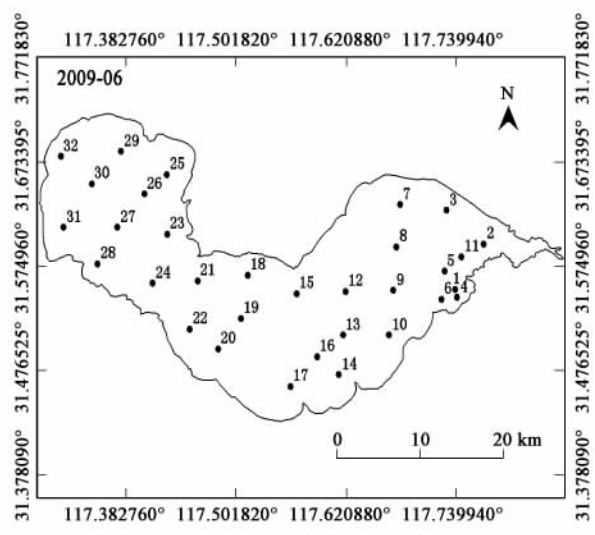


图 2 巢湖样点分布示意

Fig. 2 Sample sites in Chaohu Lake

0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤得到 CDOM 水样,其次,将 CDOM 水样放入比色皿中,利用分光光度计测量 CDOM 的吸光度,然后利用式(1)计算各波长的吸收系数^[26],并做散射校正:

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

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750 \quad (1)$$

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}), $a(\lambda)$ 为校正后的吸收系数(m^{-1}), λ 为波长(nm).

总悬浮物浓度的测定采用重量法进行.叶绿素浓度的测量采用常规的化学分析方法^[26].

1.3 CDOM 吸收系数的微分光谱、标准化吸收谱、吸收光谱斜率 S 值、 M 值的计算

利用 CDOM 吸收系数的光谱微分,确定 CDOM 吸收特性差异性较大的波段范围,利用 M 值,研究 CDOM 的组成特征的变化,利用吸收光谱斜率和标准化吸收谱研究 CDOM 吸收特性的差异.

光谱微分计算方法见式(2).

$$a'_{\text{cdom}}(\lambda) = \frac{a_{\text{cdom}}(\lambda - 1) - a_{\text{cdom}}(\lambda + 1)}{2} \quad (2)$$

式中, $a'_{\text{cdom}}(\lambda)$ 为 CDOM 吸收系数的微分值; $a_{\text{cdom}}(\lambda)$ 为 CDOM 的吸收系数(m^{-1}); λ 为波长(nm).

标准化吸收谱是对 CDOM 吸收系数的标准化的结果,能够很好地避免 CDOM 浓度对波形的影响,尽最大程度地反应 CDOM 组成的差异对波形的影响^[28].由于 CDOM 吸收系数的变化主要体现在短波波段,本研究主要探讨 CDOM 在 240 ~ 450 nm 处的吸收系数的变化特征,可由式(3)、(4)计算^[28].

$$\bar{a}_i = \frac{\int a_i(\lambda) d\lambda}{450 - 240} \quad (3)$$

$$a_i^n(\lambda) = \frac{a_i(\lambda)}{\bar{a}_i} \quad (4)$$

式中, $\bar{a}_i$ 是 240 ~ 450 nm 波段范围内 CDOM 的平均吸收系数; i 是采样点; $a_i^n(\lambda)$ 是第 i 个采样点的标准化吸收系数; λ 为波长。

S 值是 CDOM 吸收系数曲线的斜率, 反映 CDOM 吸收系数的衰减, 其值的大小与波段选取的范围和 CDOM 组成有关^[18], 光谱微分能够很好的描述光谱斜率随波段的变化情况, 本研究采取光谱微分对 240 ~ 450 nm 的吸收系数进行分段, 对每一段的吸收系数分别提取 S 值。CDOM 在不同的水体中具有不同的吸收特征, 不同的 CDOM 的吸收都遵守指数衰减规律^[10] (如式 5)。

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (5)$$

式中, $a(\lambda)$ 为 CDOM 的吸收系数; λ_0 为参考波长; λ 为波长; S 为光谱斜率值, 利用 Matlab 软件, 采用最小二乘法拟合得到。

M 值是 CDOM 在 250 nm 处的吸收系数与在 360 nm 处吸收系数的比值, 能较好地反映 CDOM 相对分子质量的大小^[29,30]。

2 结果与分析

2.1 CDOM 吸收特性的差异

2.1.1 CDOM 吸收系数差异

图 3 显示了太湖、巢湖水体 CDOM 在 240 ~ 450 nm 的吸收系数。由图 3 可知, 巢湖、太湖 CDOM 的吸收系数无明显的峰值和谷值, 长波波段遵守指数衰减规律, 随着波长的增加而下降, 然而在紫外波段的吸收谱形状有着明显的特征, 黄昌春^[31]、赵巧华^[28]、Warnock^[32]等发现在 275 ~ 290 nm 左右有一个显著的吸收肩, 如果不分段来对 CDOM 吸收特性进行研究, 就会对 CDOM 吸收参数化产生较大的误差。光谱微分能够较好地反映光谱波形的变化, 可以用来确定 CDOM 吸收特性差异性较大的波段, 因此本研究试图利用光谱微分, 以期得到 CDOM 吸收特性差异较大的波段, 从而分段研究 CDOM 吸收特性。

由图 4、5 可知, 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收系数的微分光谱都具有相同的特征, 在 260 nm 左右有个谷值, 在 290 nm 有个峰值, 根据峰值和谷值, 把整个光谱曲线分成 (A、B、C) 3 段, A 段从 240 ~ 260

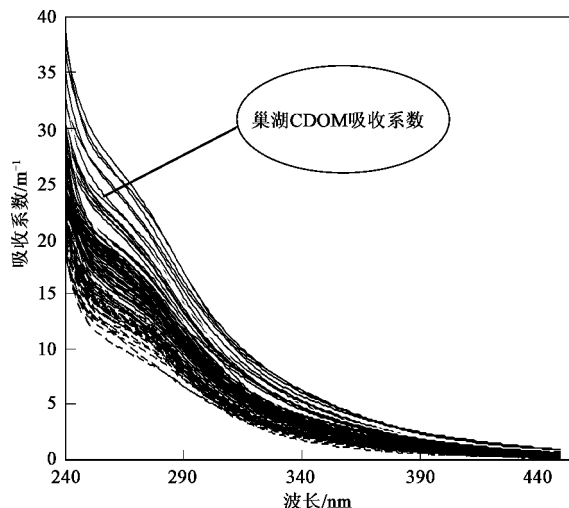


图 3 太湖、巢湖 CDOM 240 ~ 450 nm 的吸收系数

Fig. 3 Absorption coefficient of CDOM (240-450nm) in Taihu Lake and Chaohu Lake

nm, B 段为 261 ~ 290 nm, C 段为 291 ~ 450 nm。A 和 B 段的微分值都随着波长的增加而下降, 而 C 段则相反, A 段和 B 段吸收系数的变化率也是随着波长的增加而下降的, 吸收系数的光谱曲线变得更加平滑, 而 C 段吸收系数的变化率随波长的增加而上升, 吸收系数的光谱曲线变得更加陡峭。因此, 在 270 ~ 290 nm 附近 CDOM 吸收光谱有吸收肩。这可能是 CDOM 中某种物质在该波段较为敏感所导致的。图 6、7、8 分别显示了太湖、巢湖水体 CDOM 在 A 段、B 段、C 段的吸收系数。太湖水体 CDOM 在 440 nm 的吸收系数分别在: $0.138 \sim 1.119 \text{ m}^{-1}$ [平均值 $(0.45 \pm 0.18) \text{ m}^{-1}$] 之间; 巢湖水体 CDOM 在 440 nm 的吸收系数在 $0.472 \sim 1.093 \text{ m}^{-1}$ [平均值 $(0.7 \pm 0.17) \text{ m}^{-1}$] 之间, 这与孙德勇等^[26]、张运林等^[17-20]研究结果一致。巢湖水体 CDOM 在 440 nm 处的吸收系数最大值出现在西半湖, 西半湖的平均值要大于东半湖的。主要是由于东半湖 CDOM 的腐殖酸相对含量、叶绿素浓度要低于西半湖所致。太湖水体 CDOM 吸收系数最高的样点出现在叶绿素浓度较高的梅梁湾。由图 9、10 可以看出巢湖、太湖 CDOM 的吸收系数的空间分布与叶绿素浓度的空间分布是一致的。

由图 3、6、7、8 可看出, 太湖和巢湖水体的 CDOM 吸收系数具有很明显的界限, 其中上半部分为巢湖水体 CDOM 的吸收系数, 下半部分为太湖水体的, 巢湖水体的 CDOM 的吸收系数整体上都大于太湖水体的。在 A 段两者的吸收系数的差距开始变

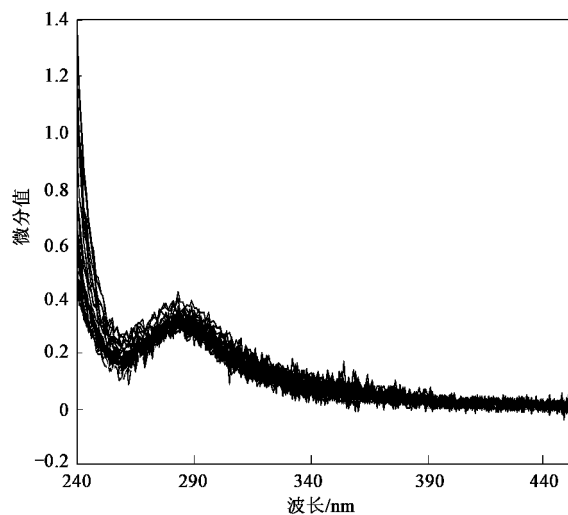


图4 太湖水体 CDOM 吸收系数的微分光谱

Fig. 4 Differential spectrum of CDOM absorption coefficients in Taihu Lake

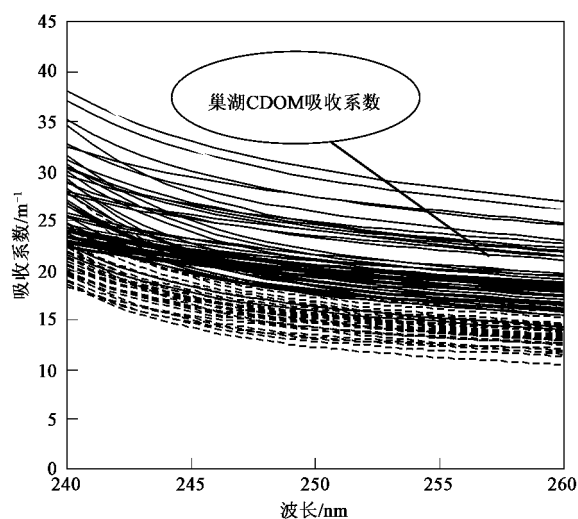


图6 太湖、巢湖 CDOM (240 ~ 260 nm) 的吸收系数

Fig. 6 Absorption coefficient of CDOM (240-260 nm) in Taihu Lake and Chaohu Lake

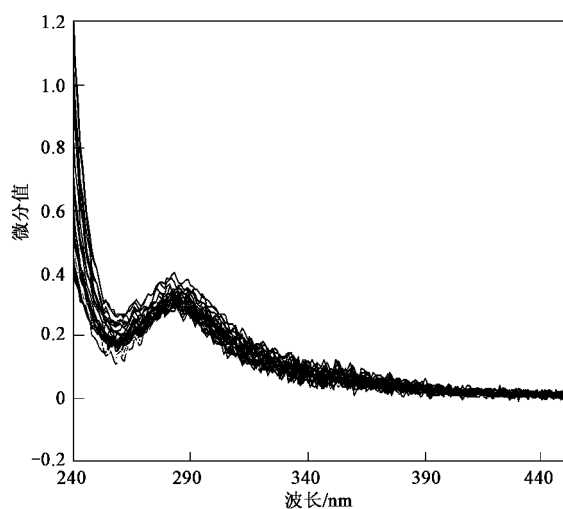


图5 巢湖水体 CDOM 吸收系数的微分光谱图

Fig. 5 Differential spectrum of CDOM absorption coefficients in Chaohu Lake

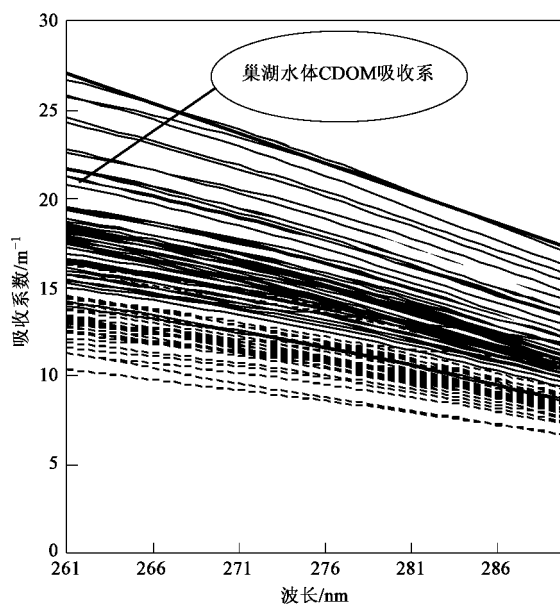


图7 太湖、巢湖 CDOM (261 ~ 290 nm) 的吸收系数

Fig. 7 Absorption coefficient of CDOM (261-290 nm) in Taihu Lake and Chaohu Lake

大,直到 B 段后两者之间的吸收系数的差距达到最大,之后差距开始变小.太湖水体和巢湖水体 CDOM 吸收系数差距最大的波段范围在 B 段,B 段的吸收系数能较大程度上反映 2 种不同组成的 CDOM 的差异.太湖水体中 CDOM 腐殖酸的相对含量要低于巢湖水体的,由于腐殖酸的比吸收系数远大于富里酸的^[33],因而造成太湖水体的 CDOM 吸收系数要小于巢湖水体的.图 9、10 分别显示了巢湖、太湖水体 CDOM 的吸收系数与叶绿素浓度的空间分布关系.太湖水体 CDOM 在 440 nm 的吸收系数与叶绿素的相关性较高,为 0.78,而与总悬浮物浓度的相关性

比较低,巢湖水体 CDOM 在 440 nm 的吸收系数与叶绿素浓度和总悬浮物浓度都具有较好的相关性.太湖水体 CDOM 主要来自浮游植物的分解产物,而陆源的相对较小.而对于巢湖水体,浮游植物的分解产物、陆源物质都是其 CDOM 的主要来源.

太湖水体 CDOM 对总吸收(除去纯水的吸收)的贡献在 1% ~ 36% 之间(平均为 11.6%),巢湖水体 CDOM 对总悬浮物吸收的贡献在 6% ~ 31% 之间

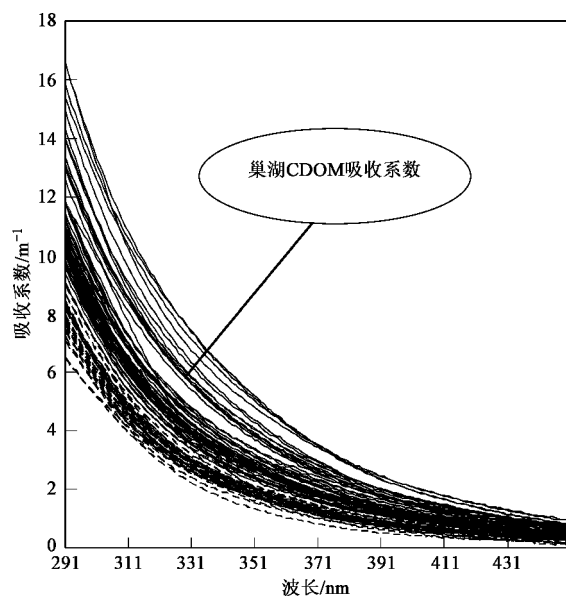


图 8 太湖、巢湖 CDOM (291 ~ 450 nm) 的吸收系数

Fig. 8 Absorption coefficient of CDOM (291-450 nm) in Taihu Lake and Chaohu Lake

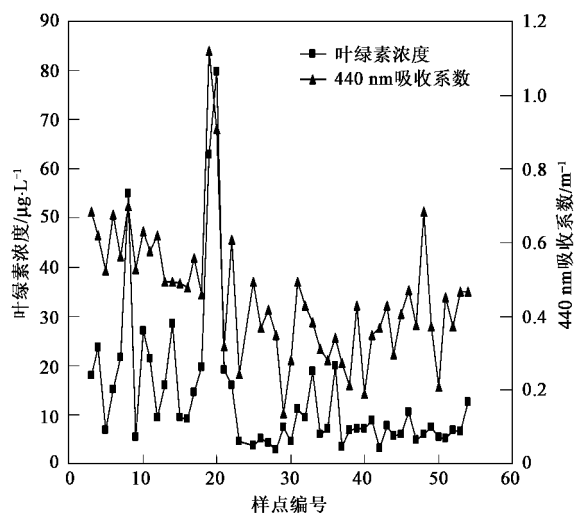


图 10 太湖 CDOM (440 nm) 吸收系数与叶绿素浓度的分布空间关系

Fig. 10 Spatial relationship between $a(440)$ and chlorophyll concentration in Taihu Lake

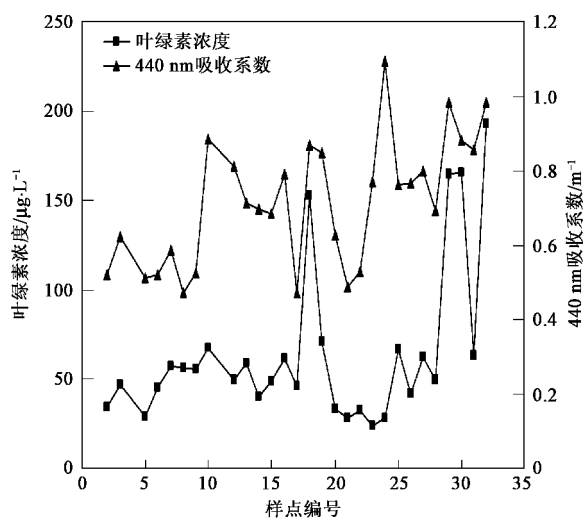


图 9 巢湖 CDOM (440 nm) 吸收系数与叶绿素浓度的分布空间关系

Fig. 9 Spatial relationship between $a(440)$ and chlorophyll concentration in Chaohu Lake

(平均为 15.6%)。巢湖水体 CDOM 对吸收的贡献要大于太湖水体,则其对遥感反演叶绿素、总悬浮物浓度的影响要大于太湖。图 11 显示了 M 值与 CDOM 对总悬浮物吸收的贡献率之间的关系, M 值越大贡献率就越小,CDOM 对总的水体吸收影响就小,CDOM 中腐殖酸含量较高的水体对总悬浮物吸收的贡献就大,对遥感反演其他水质参数的影响就越大。

图 12 显示了太湖、巢湖水体 CDOM 标准化吸

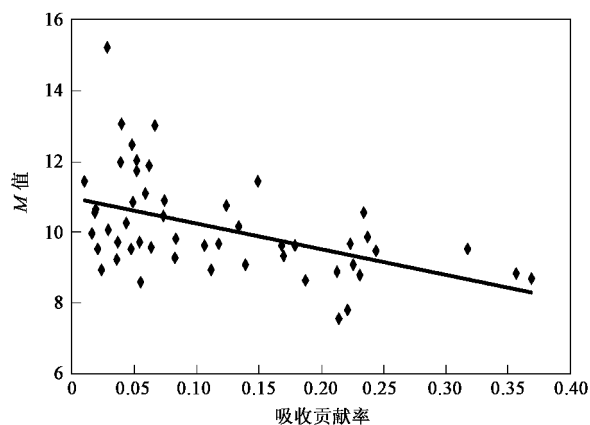


图 11 M 值与 CDOM 对悬浮物吸收的贡献率之间的关系

Fig. 11 Relationship between M value and contribution to total suspended matter by CDOM absorption

收系数,两者具有相似的曲线特征:标准化吸收系数随着波长的增加而不断减小;在 260 ~ 290 nm 有一个肩峰,这与吸收系数类似,况且这个肩峰随着吸收系数的增大而往长波方向移动;不同组成的 CDOM 交汇于 260 nm 和 290 nm 处,在 260 nm 以前和 290 nm 以后的标准化吸收系数的分布与 260 ~ 290 nm 之间的分布呈相反的趋势。这与赵巧华等^[28]的研究结果具有相似之处。2 种不同类型的 CDOM 具有明显的分界线,图 12 中上半部分是太湖水的,下半部分是巢湖水体的,太湖的标准化吸收系数与 M 值正相关,腐殖酸含量较高的 CDOM 具有较低的标准化吸收系数,巢湖水体 CDOM 标准化吸收系数要小于

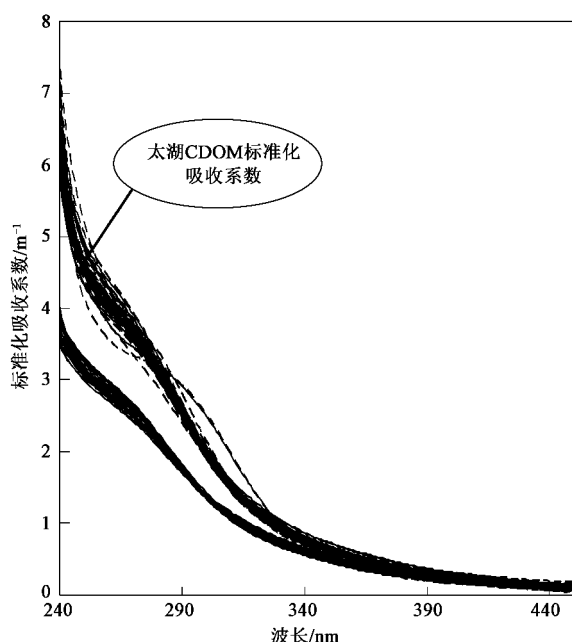


图 12 太湖、巢湖 CDOM 标准化吸收系数

Fig. 12 Normalized absorption coefficient of CDOM in Taihu Lake and Chaohu Lake

太湖水体的标准化吸收系数.

2.1.2 CDOM 光谱斜率 S 值的差异

黄昌春等^[31]把短波波段分为 UV-R、UV-A、UV-B、UV-C 分别计算 S 值. 孙德勇等^[26]根据光谱进行分段, 得到红光、蓝光、紫光波段范围内的 S 值. 而本研究根据 CDOM 吸收系数的微分光谱特征, 分 3 段, 分别拟合 CDOM 吸收系数光谱斜率 S 值. 在 A 段, 巢湖、太湖 CDOM 的 S 值分别在: $0.0166 \sim 0.0102 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0132 \pm 0.0017) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.029 \sim 0.017 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0214 \pm 0.0024) \text{ nm}^{-1}$] 之间, 在 B 段, 其 S 值分别在: $0.0187 \sim 0.0148 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0169 \pm 0.001) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.0179 \sim 0.0055 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0148 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$] 之间, 在 C 段, 其 S 值分别在: $0.0208 \sim 0.0164 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0186 \pm 0.0009) \text{ nm}^{-1}$] 和 $0.0253 \sim 0.0161 \text{ nm}^{-1}$ [平均值 $(0.0197 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$] 之间. 图 13、14 显示了巢湖、太湖水体 CDOM 吸收系数 3 个波段范围内的光谱斜率. 巢湖水体 CDOM 在 (B、C) 2 段的 S 值, 东半湖的都大于西半湖的, 太湖水体 (B、C) 2 段 S 值梅梁湾的要小于其他区域的, 腐殖酸相对含量较高的区域要小于腐殖酸相对含量较低的区域, 而 A 段的 S 值却与 B、C 段的相反.

太湖水体不同波段范围 S 值的大小顺序为: A

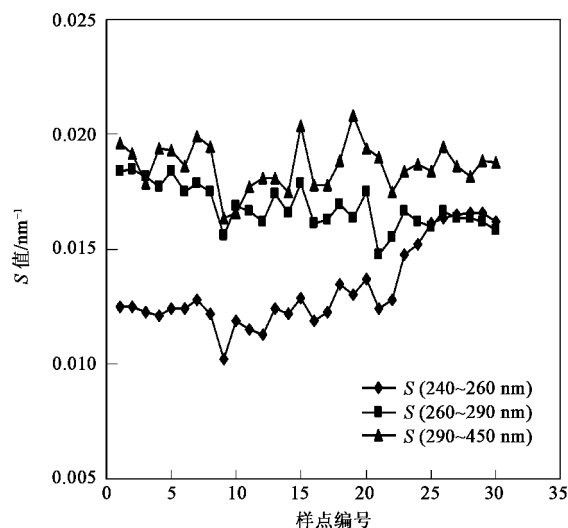
图 13 巢湖水体 S 值的空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of S values in Chaohu Lake

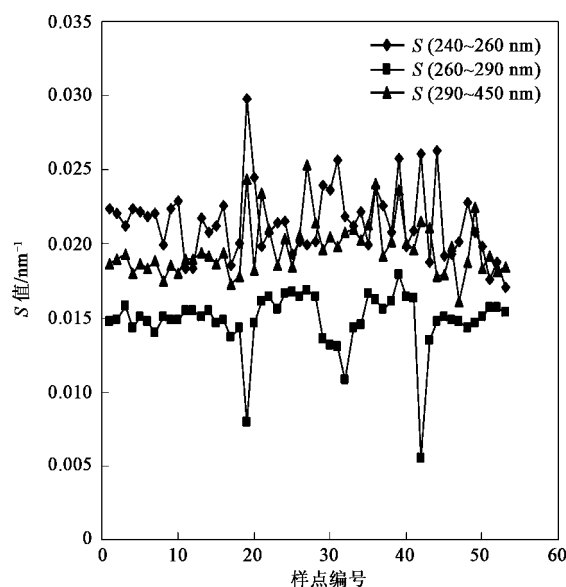
图 14 太湖水体 S 值的空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of S values in Taihu Lake

段的 $>C$ 段的 $>B$ 段的; 对于巢湖水体: C 段的 $>B$ 段的 $>A$ 段的. 太湖水体 A 段、 C 段的 S 值大于巢湖水体的, 而 B 段的却小于巢湖水体的. 这种差异应当归因于太湖和巢湖水体其组成成分的差异上^[26], 由此可以看出在不同波段范围内的 S 值对腐殖酸和富里酸的敏感程度. 表 1 显示了不同研究者对太湖和巢湖水体 CDOM 吸收光谱斜率 S 值的差异, 不同的水体 S 值具有较大的差异, 即使是在太湖地区不同湖区光谱斜率 S 值差异性都很大^[5,6,17-20]. 通过对这 2 个湖泊 CDOM 在 3 个波段范围内 S 值与 M 值相关分析发现: 在太湖, M 值与 C 段的 S 值相关

表 1 巢湖水体、太湖水体 S 值的差异
Table 1 S values for samples reported in the literature of Taihu Lake and Chaohu Lake

研究区	年份	参考波长/nm	S 值范围	模拟波段范围/nm	文献
巢湖	2002	350 ~ 550	0.013 3 ~ 0.017 5	440	[34]
太湖	1998	350 ~ 750	0.012 0 ~ 0.016 0	440	[15]
太湖	2004	280 ~ 650	0.009 9 ~ 0.024 1	440	[35]
		280 ~ 320	0.013 5 ~ 0.021 5	440	
		320 ~ 500	0.011 6 ~ 0.023 1	440	
		500 ~ 650	0.008 5 ~ 0.036 2	440	
太湖	2004 夏	280 ~ 500	0.014 0 ~ 0.018 5	355	[20]
大太湖梅梁湾	2004 冬		0.014 3 ~ 0.020 1		
梅梁湾	2004	280 ~ 500	0.014 7 ~ 0.016 4	400	[36]

性最好,达到 0.89,而与 B 波段的 S 值相关性最差,仅为 0.06;而在巢湖,M 值与 B 段的 S 值相关性最好,达到 0.81,而与 A 段的相关性最差,仅为 0.2.

2.2 CDOM 组成差异

根据 Haan 等^[29]、Peuravuori 等^[30]学者的研究,CDOM 相对分子质量大小可以通过其吸收系数的比值 M 值进行示踪,反映了腐殖酸和富里酸在 CDOM 中的比例.M 值越大,则 CDOM 中腐殖酸的相对含量越低,富里酸的相对含量就越高,相对分子质量就越小.

图 15、16 显示了巢湖、太湖水体 M 值的空间分布特征,巢湖水体 M 值在:8.57 ~ 15.22 (平均值为 10.6 ± 1.57) 之间;太湖水体的 M 值在 6.94 ~ 9.88 (平均值为 8.66 ± 0.088) 之间.由图 3 可知,巢湖水体西半湖的 M 值要小于东半湖的,M 值最低点出现在西半湖,最高点出现在东半湖,巢湖水体 CDOM 腐殖酸相对含量西半湖的要高于东半湖的.CDOM 中的腐殖酸主要来自浮游植物等的分解而来,西半湖藻华现象严重,叶绿素浓度比东半湖的高,这主要由于西半湖毗连合肥市,大批的工业废水和生活污水通过南淝河排到巢湖中.据研究统计,通过南淝河排到巢湖的污染物占整个巢湖污染物的 80% 以上,东半湖并无明显的排污河流,东半湖的水质要好于西半湖的^[25];因而巢湖西半湖的 CDOM 腐殖酸的相对含量要高于东半湖的,王志刚等^[25]利用 CDOM 的三维荧光特性也得到相同的结果.太湖水体中,最低的 M 值出现在梅梁湾、竺山湾,说明太湖水体梅梁湾、竺山湾 CDOM 中腐殖酸的相对含量要大于太湖其他区域的,这与黄昌春等^[41]的研究结果一致.太湖水体叶绿素浓度较高的点主要集中在梅梁湾、竺山湾,而太湖其他区域叶绿素浓度都相对较低.春夏季太湖盛行东南风^[24],梅梁湾、竺山湾位于太湖的西北部,几乎是一个封闭的湾,可将太湖其他区域的

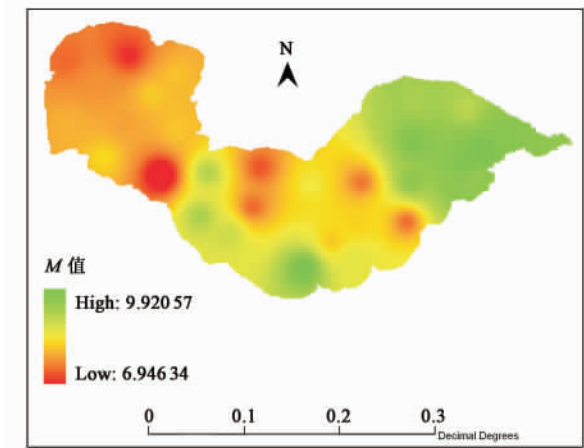


图 15 巢湖水体 M 值空间分布
Fig. 15 Spatial distribution of M values in Chaohu Lake

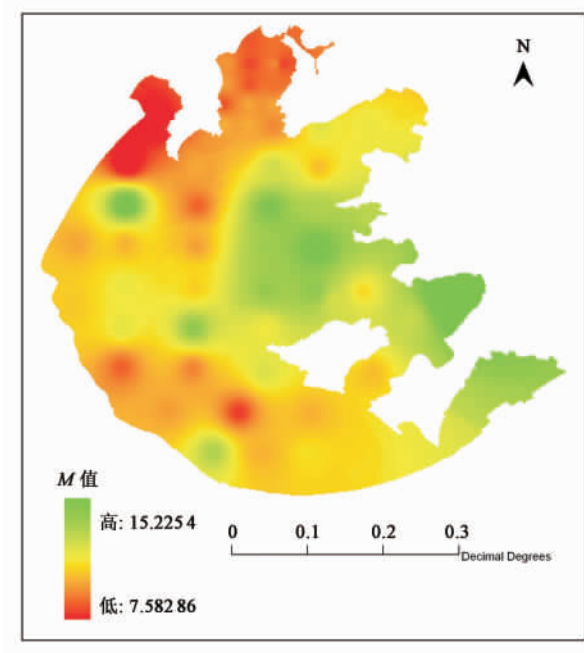


图 16 太湖水体 M 值空间分布
Fig. 16 Spatial distribution of M values in Taihu Lake
蓝藻聚集于此,况且,梅梁湾紧靠无锡市区,其污染

物的排放量较大. 因此在梅梁湾、竺山湾的 CDOM 腐殖酸相对含量要高于太湖其他区域.

不同波段范围内的 S 值, 对 CDOM 的组成反映灵敏度是不同的, 对于腐殖酸相对含量较高的 CDOM, B 段的 S 值能较好地反映其组成, 对于腐殖酸含量较低的 CDOM, C 段的 S 值能较好地反映其组成, 黄昌春等^[31]的研究也说明了不同波段范围内的 S 值对 CDOM 组成反映的灵敏程度不一, 本研究与其研究所划分的波段范围不同; B 段的 S 值对 CDOM 中腐殖酸的含量较为敏感.

巢湖水体的 M 值要低于太湖水体的, 反映其 CDOM 中腐殖酸的相对含量要大于太湖水体的, 而且巢湖水体 CDOM 组成的空间差异要小于太湖水体的. 这可能因为巢湖水体叶绿素浓度高于太湖水体的, 巢湖的叶绿素浓度在 $23.815 \sim 192.9 \mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 $64.2 \mu\text{g/L}$, 而太湖的叶绿素浓度在 $2.9 \sim 79.7 \mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 $13.79 \mu\text{g/L}$, 巢湖浮游植物等分解产生的腐殖酸的相对量要高于太湖水体的. 巢湖水体、太湖水体叶绿素、总悬浮物浓度都具有很大的差异性(表 2), 巢湖水体的湖面面积较小, 周边环境较为单一^[25], 巢湖水体的 CDOM 来源较为单一, 所以巢湖水体 CDOM 组成的空间差异要小于太湖的. 不管是太湖还是巢湖, M 值较低点都出现在叶绿素浓度较高的区域, 浮游植物的都是 CDOM 中腐殖酸的重要来源之一.

表 2 太湖、巢湖主要水质参数

Table 2 Chlorophyll concentration and total suspended material concentration in Taihu Lake and Chaohu Lake

水质参数	巢湖		太湖	
	叶绿素 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	总悬浮物 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	叶绿素 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	总悬浮物 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
均值	64.6	43.7	13.7	71.7
最大值	192.8	83.9	79.7	244.9
最小值	23.8	15.7	2.9	11.4
标准差	43.9	17.5	14.7	62.2

3 结论

(1) 太湖水体的吸收系数、太湖水体对各组分吸收的贡献要小于巢湖水体的, 标准化吸收系数要大于巢湖水体的.

(2) 不管是太湖, 还是巢湖, CDOM 的吸收系数的微分光谱在 260 nm 左右为谷值, 在 290 nm 左右为峰值, CDOM 吸收系数可以分成(A、B、C)3 段.

(3) 太湖水体中 CDOM 腐殖酸的相对含量要整体低于巢湖水体的.

(4) CDOM 的光谱斜率 S 值与 CDOM 组成的敏感性和 CDOM 的组成有关, 当 CDOM 中腐殖酸含量较高时, 敏感性最强的是 B 段的 S 值, 其次是 C 段的; 反之, 敏感性最高的是 C 段的, 其次是 A 段的, 最弱的是 B 段的; B 段的 S 值对 CDOM 中腐殖酸的相对含量较为敏感.

参考文献:

- [1] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. Mar Chem, 2002, 77: 23-41.
- [2] Vahatalo A V, Wetzel R G, Paerl H W. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the grainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina (U. S. A) [J]. Freshwater Biol, 2005, 50 (3): 477-493.
- [3] Williamson C E, Stemberger R S, Morris D P, et al. Ultraviolet radiation in North American lakes: Attenuation estimates from DOC measurements and implications for plankton communities [J]. Limnol Oceanogr, 1996, 41(5): 1024-1034.
- [4] 沈红, 赵冬至, 付云娜, 等. 黄色物质光学特性及其遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 949-954.
- [5] 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.
- [6] 张运林, 吴生才, 秦伯强. 太湖梅梁湾有色可溶有机物对光的吸收[J]. 中国环境科学, 2004, 24(4): 405-413.
- [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): 7-15.
- [8] 韩宇超, 郭卫东, 程远月. 海洋 CDOM 光吸收研究中若干问题的探讨[J]. 台湾海峡, 2005, 24(3): 289-296.
- [9] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [10] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. Limnol Oceanogr, 1981, 26: 43-53.
- [11] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters [J]. Estuar Coast Shelf S, 2000, 51(2): 267-278.
- [12] Kalle K. The problem of the Gelbstoff in the sea [J]. Oceanogr Mar Biol Ann Rev, 1996, 4: 91-104.
- [13] Twardowski M S, Boss E, Sullivan J M, et al. Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter [J]. Mar Chem, 2004, 89: 69-88.
- [14] Piccolo A, Zaccheo P, Genevini P G. Chemical characterization of humic substances extracted from organic waste-amended soils [J]. Bioresource Technol, 1992, 40: 275-282.
- [15] 俞宏, 蔡启铭, 吴敬禄. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 46-49.
- [16] 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.
- [17] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[D]. 南京:

- 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陈晓玲, 陈莉琼, 于之峰, 等. 长江中下游湖泊 CDOM 的光学特性及其空间对比[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 248-254.
- [22] 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.
- [23] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰, 等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春夏复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1313-1318.
- [24] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1-2.
- [25] 王志刚, 刘文清, 李宏斌, 等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 275-279.
- [26] 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.
- [27] 陈宇炜, 陈开宇, 胡耀辉, 等. 浮游植物叶绿素 a 测定的热乙醇法及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1): 550-552.
- [28] 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.
- [29] Haan D H. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 38(5): 1072-1076.
- [30] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337: 133-149.
- [31] 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.
- [32] 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]. *J Geophys Res*, 1999, 42: 169-178.
- [33] 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: 68-81.
- [34] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 173-177.
- [35] Ma R, Tang J, Dai J, *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China [J]. *Int J Remote Sens*, 2006, 27(19): 4277-4304.
- [36] 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[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 3969-3979.