

文章编号:1004-8227(2011)06-0736-08

# 湖北东湖、梁子湖和洪湖 颗粒物吸收光谱特征分析

时志强<sup>1,2</sup>, 张运林<sup>2\*</sup>, 刘明亮<sup>3</sup>, 袁旭音<sup>1</sup>, 殷燕<sup>2,4</sup>, 刘笑菡<sup>2,4</sup>

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 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, 江苏 南京 210008; 3. 杭州市环境保护科学研究所, 浙江 杭州 310005; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**通过对2007年9月底和10月初湖北东湖、梁子湖、洪湖水体中悬浮颗粒物的吸收系数进行研究,系统分析了3个湖泊水体中颗粒物吸收系数变化规律及影响因素。结果表明:总颗粒物吸收表现出明显浮游植物吸收特征,反映颗粒物中浮游植物贡献比较高;东湖和梁子湖吸收系数显著大于洪湖,表明东湖和梁子湖水下光场条件不如洪湖。武汉东湖各点颗粒物吸收系数变化不大,而梁子湖和洪湖各点则存在较大空间差异。3个湖泊非藻类颗粒物吸收光谱谱型一致,随波长增加大致按指数规律衰减。武汉东湖、梁子湖、洪湖指数函数斜率平均值分别为 $12.31 \pm 0.32 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $11.96 \pm 0.84 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $11.98 \pm 1.68 \mu\text{m}^{-1}$ 。浮游植物特征波长的吸收系数与浮游植物色素浓度具有显著性正相关,可以通过色素浓度测定反推浮游植物吸收系数。总颗粒物、非藻类颗粒物吸收系数与总悬浮物、有机颗粒物、无机颗粒物均存在显著性正相关。浮游植物吸收系数与有机颗粒物也有很好的线性相关,证明有机颗粒物主要以浮游植物为主。

**关键词:**东湖;梁子湖;洪湖;悬浮颗粒物;浮游植物;吸收光谱

文献标识码:A

悬浮颗粒物的光谱吸收是水体的固有光学特性,是水色遥感的生物-光学模式、光辐射传输、初级生产力估算和生态过程模拟的基本参数<sup>[1]</sup>。从传统的无机有机组成成分,悬浮颗粒物可以分为无机颗粒物和有机颗粒物<sup>[2]</sup>。但从其对光的吸收、散射、衰减等水光学角度分,悬浮颗粒物可以分为浮游植物和非藻类颗粒物。浮游植物通过光合色素进行光合作用固定光能,它的浓度决定了水体里的初级生产力;而不含光合色素的非藻类颗粒物包括无机颗粒物、藻类降解碎屑、微生物、浮游动物残体等<sup>[3]</sup>,其浓度往往决定了浅水湖泊真光层深度和沉水植被分布<sup>[4]</sup>。海洋以及国外内陆水体关于悬浮颗粒物的吸收光谱研究较多<sup>[5~9]</sup>,国内关于内陆水体颗粒物吸收光谱的研究多集中于污染较为严重的富营养化浅水湖泊太湖水体<sup>[10,11]</sup>。湖北省地区长江中游,号称千湖之省,拥有不同富营养化程度、不同生态系统类型的湖泊,然而关于水体颗粒物吸收等生物光学特

性的报道甚少。本研究以2007年9月底和10月初在东湖、梁子湖、洪湖的采样数据为基础,旨在探讨3个不同水体中的总悬浮颗粒物、非藻类颗粒物、浮游植物的光谱吸收系数的分布、变化规律及主要影响因素,并与同类研究进行比较,为进一步研究水下光场与浮游植物、沉水植物分布以及湖泊水质遥感提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间和站位

数据采自湖北省武汉市的东湖、武汉、鄂州等市的梁子湖和洪湖市的洪湖,其中东湖属于富营养化湖泊,梁子湖和洪湖属于中营养到富营养化过渡湖泊。2007年9月27日、10月1~3日,分别在东湖、梁子湖、洪湖布设9个、10个和16个站点进行水下光场测定及水样采集(图1),共采集了35个样品。

收稿日期:2010-10-10;修回日期:2011-01-17

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-QN312);国家自然科学基金项目(40971252);江苏省自然科学基金项目(BK2009336);香港研究资助局项目(GRF 2120344);香港创新及技术基金(ITF 8118036)

作者简介:时志强(1985~),男,安徽省界首人,硕士,主要从事湖泊光学研究。E-mail:szq19850518@126.com

\* 通讯作者 E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

野外用中国科学院水生生物研究所研制的有机玻璃采水器采集表层水样(0~0.5 m),装入干净的朔料

桶并置于冷藏箱内黑暗低温保存,带回实验室分析颗粒物吸收系数以及悬浮物、浮游植物色素浓度等。

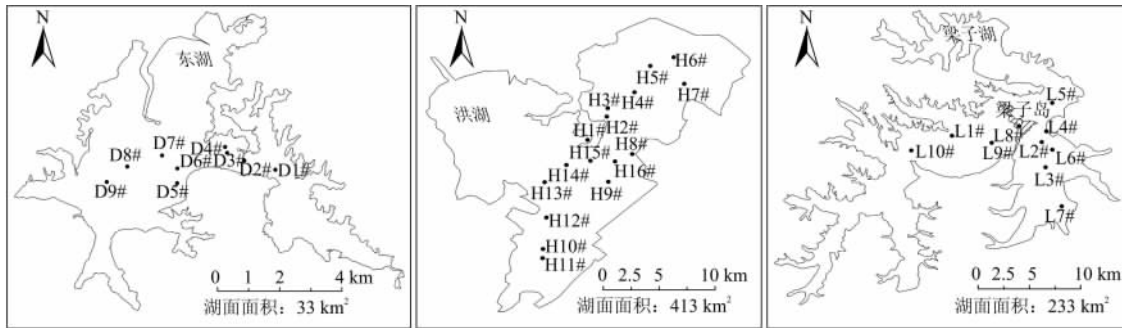


图 1 2007 年湖北 3 个湖泊采样站点示意图

Fig. 1 Location of Sampling Stations in Three Lakes of Hubei Province in 2007

## 1.2 颗粒物吸收系数测定

颗粒物吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定,用直径 47 mm 的 GF/F(Whatman 公司)滤膜过滤水样(根据水中悬浮物浓度决定过滤的体积以保证测定的吸光度小于 0.4),在 UV-2401PC 型分光光度计下测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,为减少散射误差,被测滤膜尽量靠近分光光度计的接受窗口,在 350~800 nm 间每隔 1 nm 测定一个吸光度,用各波段的吸光度减去 750 nm 波长的吸光度,采用 Cleveland 等<sup>[12]</sup>提出的如下公式进行放大因子校正:

$$OD_s = 0.378OD_f + 0.523OD_f^2 \quad OD_f \leq 0.4 \quad (1)$$

式中: $OD_s$  为校正后的滤膜上悬浮颗粒物吸光度; $OD_f$  为直接在仪器上测定的滤膜上悬浮颗粒物吸光度。

滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数按下式进行计算得到:

$$a_p(\lambda) = 2.303OD_s(\lambda)S/V \quad (2)$$

式中: $V$  为被过滤水样的体积(mL); $S$  为沉积在滤膜上的颗粒物的有效面积(mm<sup>2</sup>)。

用 10~20 mL 热甲醇浸泡滤膜 4 h 左右<sup>[5,10]</sup>,将色素萃取掉,滤膜上只剩下非藻类颗粒物,使用同样浸泡过的空白滤膜作参比,按与总颗粒物吸收系数同样的方法测定得到非藻类颗粒物吸收系数。由于颗粒物的吸收是非藻类颗粒物和藻类色素吸收的简单线性叠加,因而由总悬浮物颗粒物的光谱吸收系数  $a_p(\lambda)$  减去非藻类颗粒物光谱吸收系数  $a_d(\lambda)$  就得到浮游植物的光谱吸收系数  $a_{ph}(\lambda)$ <sup>[5,6,10]</sup>。

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (3)$$

非藻类颗粒物光谱吸收系数随波长的增加而减

小,可以用式(4)指数函数模型模拟获得其光谱斜率<sup>[5,6,10]</sup>,拟合的波段为 400~700 nm。

$$a_d(\lambda) = a_d(440)\exp[S_d(440 - \lambda)] \quad (4)$$

式中: $a_d(\lambda)$ 、 $a_d(440)$  是分别为波长  $\lambda$  和 440 nm 处非藻类颗粒物吸收系数; $S_d$  是光谱斜率。

## 1.3 悬浮物和浮游植物色素浓度测定

悬浮物用 GF/F 滤膜过滤,采用电子天平称重法测定。叶绿素 a 的测定采用分光光度法,用 GF/F 滤膜过滤水样,然后将滤膜置于冰箱中冷冻 48 h 以上,取出用 90% 的热乙醇萃取,然后在岛津 UV2401 分光光度计上测定 665、750 nm 处吸光度,并加入 1 滴 1% 稀盐酸酸化,换算得到叶绿素 a (Chla)和脱镁叶绿素浓度(Pa)。浮游植物色素浓度(Chla+Pa)为叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度之和<sup>[13]</sup>。

## 1.4 统计分析

运用 SPSS16.0 进行数据统计分析,包括计算平均值、标准差、方差分析、线性回归等。不同湖泊间参数差异性分析采用独立样品  $t$  检验,显著性水平  $p$  值小于 0.5 表示存在显著性差异。非色素颗粒物吸收系数光谱斜率计算在 Matlab 软件支持下完成,利用 Matlab 里面的优化工具箱,采用最小二乘法计算得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 总颗粒物吸收光谱

3 个湖泊 440 nm 处颗粒物吸收系数  $a_p(440)$  值变化范围分别为东湖 1.47~2.20 m<sup>-1</sup>、梁子湖 0.43~2.71 m<sup>-1</sup>、洪湖 0.23~2.49 m<sup>-1</sup>,均值分别为 1.76±0.27 m<sup>-1</sup>、1.64±0.93 m<sup>-1</sup>、1.17±0.73 m<sup>-1</sup>(表 1)。统计检验显示,洪湖颗粒物吸收显著小

于东湖和梁子湖( $t$ -test,  $p < 0.001$ )。东湖、梁子湖和洪湖颗粒物吸收的变异系数分别为 15.3%、56.7%、62.4%，反映了东湖各点颗粒物吸收系数的变化远小于梁子湖和洪湖。从光谱曲线的形状来看从 400 nm 开始吸收系数随波长的增加逐渐降低(图 2)，但在 675 nm 附近浮游植物色素的吸收峰 3 个湖泊却存在明显差异，东湖各点浮游植物色素的吸收峰非常明显，但各站点差异不大，而梁子湖和洪

湖各点之间存在着较大差异，这与浮游植物在此波段的特征吸收有关。另外对比 3 个湖泊总颗粒物吸收光谱，可发现东湖各站点吸收光谱差别不大，梁子湖和洪湖各点之间存在明显差异。从表 1 可知武汉东湖各点悬浮物和浮游植物色素浓度都不低且相差并不大，而梁子湖和洪湖各点悬浮物、浮游植物色素浓度却存在着明显差异。

表 1 3 个湖泊特征波长颗粒物吸收系数、悬浮物及浮游植物色素浓度统计参数值

Tab. 1 Absorption Coefficients of Total Particulates, Detritus, Phytoplankton, Absorption Coefficients of Phytoplankton at 440, 675 nm and Total Suspended Solids (TSS), Organic Suspended Solids (OSS), Inorganic Suspended Solids (ISS), Phytoplankton Pigment (Chla+Pa) Concentrations in Three Lakes

湖泊	参数	$a_p(\lambda) (m^{-1})$		$a_d(\lambda) (m^{-1})$		$a_{ph}(\lambda) (m^{-1})$		Chla+Pa ( $\mu g/L$ )	TSS (mg/L)	OSS (mg/L)	ISS (mg/L)	OSS/TSS (%)
		440 nm	675 nm	440 nm	675 nm	440 nm	675 nm					
东湖	最小值	1.465	0.346	0.912	0.051	0.493	0.269	17.82	13.80	7.64	5.20	35.80
	最大值	2.198	0.526	1.621	0.118	0.629	0.42	29.19	23.76	10.56	15.16	62.30
	中值	1.791	0.372	1.229	0.078	0.571	0.305	22.30	20.43	8.46	10.63	48.00
	均值	1.762 8	0.403 3	1.204 9	0.081 8	0.557 8	0.321 8	23.08	18.72	8.59	10.13	47.50
	标准差	0.267 9	0.066 5	0.253 3	0.023 1	0.0390	0.048 8	3.44	4.20	1.00	3.81	9.22
梁子湖	最小值	0.427	0.053	0.281	0.026	0.132	0.028	2.42	2.83	2.50	0.33	28.20
	最大值	2.705	0.664	1.987	0.16	0.931	0.553	41.96	26.85	14.65	18.68	88.50
	中值	1.743	0.431	0.977	0.065 5	0.672 5	0.345	30.02	11.39	6.85	4.09	69.55
	均值	1.635 1	0.360 2	1.093 3	0.075 9	0.541 7	0.284 5	22.96	12.41	6.75	5.66	67.47
	标准差	0.925 5	0.248 2	0.626 4	0.048 2	0.336 9	0.205 9	16.43	9.26	3.78	6.24	21.18
洪湖	最小值	0.228	0.037	0.112	0.002	0.1	0.005	2.32	2.24	1.72	0.52	35.90
	最大值	2.483	0.634	1.647	0.138	0.999	0.571	53.07	25.66	11.20	16.06	88.60
	中值	0.942 5	0.197 5	0.642 5	0.053	0.371 5	0.1470	13.15	8.06	5.22	2.39	66.45
	均值	1.155 6	0.243 1	0.767 9	0.060 1	0.436 9	0.216 3	18.27	10.98	5.52	5.46	62.25
	标准差	0.724 6	0.191 7	0.526 2	0.043 3	0.278 8	0.182 1	16.54	8.18	2.69	5.74	20.12

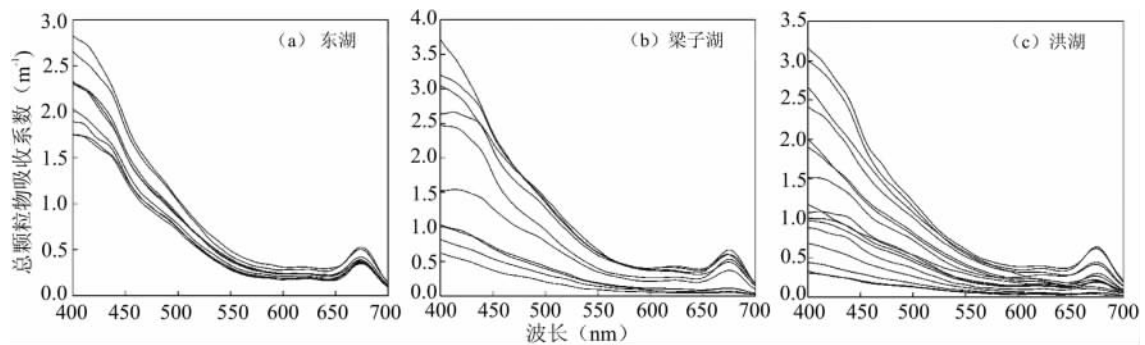


图 2 2007 年湖北 3 个湖泊悬浮颗粒物光谱吸收系数

Fig. 2 Absorption Spectra of Total Particulates in Three Lakes of Hubei Province in 2007

不同湖泊颗粒物吸收这种空间差异与湖泊面积、生态系统结构密切相关。东湖湖区面积较小，20 世纪 80 年代后全湖都表现为富营养化状态，各点位藻类颗粒物含量变化不大，空间异质性比较小；而梁子湖和洪湖则面积相对较大，尽管 20 世纪 80 年代后也出现不同程度富营养化，但富营养化程度低于

东湖，目前仍分布有藻型和草型不同生态系统类型，如梁子湖水生植被覆盖率达 54.27%，其中又以沉水植物群落占绝对优势<sup>[14]</sup>。同样，洪湖水生植被生长也比较茂盛，据研究 2006 年平均植被百分比能达 45.0%<sup>[15]</sup>。由于沉水植物能抑制浅水湖泊沉积物再悬浮，并对颗粒物起到吸附沉降作用<sup>[4]</sup>，因此不同生态系统类型、不同点位之间悬浮物及藻类颗粒物

含量存在较大差异,呈现显著的空间异质性。不同湖泊颗粒物吸收系数的差异也体现湖泊富营养化进程以及草型清澈型生态系统往藻型浑浊型生态系统的稳态转换。湖泊富营养化加剧藻类大量生长,浮游植物吸收散射造成水下光照迅速衰减,沉水植物消退,底泥易发生再悬浮,进一步造成水体非藻类悬浮颗粒物含量增加,透明度进一步降低,生态系统类型发生转换。

对 3 个湖泊各采样点颗粒物吸收系数光谱分布进行分析发现,总体上可以分为 2 种类型:第 1 种类型,浮游植物吸收系数一般都大于非藻类颗粒物吸收系数,总颗粒物吸收系数在 675、440 nm 有 2 个峰值,675 nm 峰值非常明显,而 440 nm 处由于受非藻类颗粒物吸收系数影响有时表现的不是特别明显,这种光谱类型的站点主要分布在色素浓度较高,同时无机颗粒物浓度较低,有机颗粒物占总颗粒物比例超过 40% 的站点,在外海一类水体以及一些藻类比例比较高的湖泊、沿岸带海域颗粒物的吸收基

本上以这种类型为主<sup>[5,6,8]</sup>。本研究 3 个湖泊虽不是一类水体,但是由于其有机颗粒物含量较高,所以东湖各点和梁子湖、洪湖的大部分点位总颗粒物吸收光谱均呈现该光谱类型。第 2 种类型,总颗粒物吸收系数只在 675 nm 有个峰值,浮游植物吸收大于非藻类颗粒物,其他波段浮游植物吸收均淹没在非藻类的吸收光谱中,这类站点主要分布在色素浓度低以及无机颗粒物浓度高的地方<sup>[10]</sup>,在属于第 2 种类型的 H6、H9、H11、H12、LZ9、LZ10 点(图 1),色素含量明显低于其他点位。

对 3 个湖泊样品的总颗粒物分别在 440、675 nm 波长的吸收系数与浮游植物色素浓度做统计分析,发现 3 个湖泊总颗粒物吸收系数在 440、675 nm 处与浮游植物色素浓度都有很好的相关性(表 2)。这是由于 3 个湖泊的无机颗粒物含量较少,浮游植物色素浓度较高引起的(表 1)。另外,梁子湖的相关性好于东湖和洪湖,这是因为梁子湖总颗粒物中色素所占比例较高所致(表 1)。

表 2 特征波长颗粒物吸收系数、悬浮物及浮游植物色素浓度之间的相关性分析

Tab. 2 Determination Coefficients of Absorption Coefficients of Total Particulates, Detritus, Phytoplankton Absorption Coefficients of Phytoplankton at 440, 675 nm and Total Suspended Solids (TSS), Organic Suspended Solids (OSS), Inorganic Suspended Solids (ISS), Phytoplankton Pigment Concentrations (Chla+Pa)

	$a_p(440)$	$a_p(675)$	$a_d(440)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(440)$	$a_{ph}(675)$	Chla+Pa	TSS	OSS	ISS	
东湖	$a_p(440)$	1.000									
	$a_p(675)$	0.929	1.000								
	$a_d(440)$	0.990	0.882	1.000							
	$a_d(675)$	0.901	0.831	0.927	1.000						
	$a_{ph}(440)$	0.439	0.654	0.309	0.172	1.000					
	$a_{ph}(675)$	0.838	0.966	0.762	0.658	0.804	1.000				
	Chla+Pa	0.777	0.870	0.690	0.500	0.850	0.945	1.000			
	TSS	0.746	0.576	0.767	0.691	0.143	0.459	0.495	1.000		
	OSS	0.820	0.935	0.769	0.777	0.637	0.903	0.806	0.492	1.000	
	ISS	0.607	0.390	0.644	0.557	-0.009	0.269	0.334	0.974	0.280	1.000
	梁子湖	$a_p(440)$	1.000								
$a_p(675)$		0.961	1.000								
$a_d(440)$		0.979	0.895	1.000							
$a_d(675)$		0.930	0.899	0.946	1.000						
$a_{ph}(440)$		0.926	0.976	0.830	0.796	1.000					
$a_{ph}(675)$		0.940	0.995	0.857	0.850	0.990	1.000				
Chla+Pa		0.958	0.991	0.890	0.887	0.976	0.987	1.000			
TSS		0.929	0.847	0.961	0.961	0.764	0.796	0.861	1.000		
OSS		0.841	0.869	0.828	0.938	0.770	0.829	0.852	0.873	1.000	
ISS		0.869	0.731	0.924	0.858	0.667	0.680	0.761	0.955	0.690	1.000
洪湖		$a_p(440)$	1.000								
	$a_p(675)$	0.817	1.000								
	$a_{ph}(440)$	0.976	0.690	1.000							
	$a_{ph}(675)$	0.981	0.865	0.948	1.000						
	$a_{ph}(440)$	0.670	0.871	0.531	0.684	1.000					
	$a_{ph}(675)$	0.641	0.874	0.509	0.667	0.968	1.000				
	Chla+Pa	0.660	0.896	0.527	0.689	0.975	0.990	1.000			
	TSS	0.670	0.776	0.583	0.683	0.914	0.896	0.896	1.000		
	OSS	0.617	0.790	0.512	0.646	0.900	0.916	0.906	0.938	1.000	
	ISS	0.666	0.736	0.591	0.671	0.881	0.848	0.853	0.987	0.869	1.000

## 2.2 非藻类颗粒物吸收光谱

由图 3 知非藻类颗粒物吸收系数光谱随波长的增加而减小,并且呈指数规律衰减。用最小二乘法对 400~700 nm 的非藻类颗粒物吸收系数进行指数关系拟合,得到吸收系数光谱斜率  $S_d$  值,东湖 12.01~13.05  $\mu\text{m}^{-1}$  (均值  $12.31 \pm 0.32 \mu\text{m}^{-1}$ ),梁子湖 10.82~13.40  $\mu\text{m}^{-1}$  (均值  $11.96 \pm 0.84 \mu\text{m}^{-1}$ ),洪湖 9.80~16.39  $\mu\text{m}^{-1}$  (均值  $11.98 \pm 1.68$

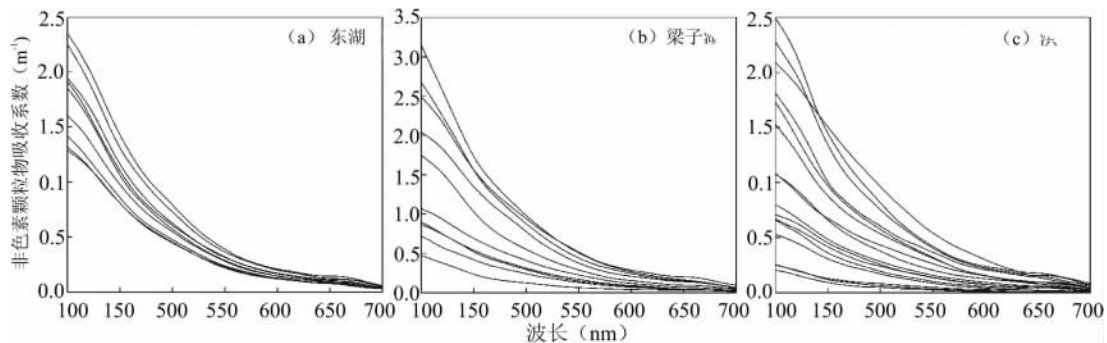


图 3 2007 年湖北 3 个湖泊非藻类颗粒物光谱吸收系数

Fig. 3 Absorption Spectra of Nonalgal Particles in Three Lakes of Hubei Province in 2007

440 nm 非藻类颗粒物吸收系数的变化范围为东湖 0.91~1.62  $\text{m}^{-1}$  (均值  $1.2 \pm 0.25 \text{m}^{-1}$ ),梁子湖 0.28~1.99  $\text{m}^{-1}$  (均值  $1.09 \pm 0.63 \text{m}^{-1}$ ),洪湖 0.11~1.65  $\text{m}^{-1}$  (均值  $0.77 \pm 0.53 \text{m}^{-1}$ )。非藻类颗粒物吸收系数大小的变化主要是由无机悬浮颗粒物以及一些非色素的有机颗粒物引起的,由吸收系数可以看出,东湖在 440nm 处吸收系数要大于梁子湖和洪湖,这个结果与无机颗粒物的浓度的变化是一致的。

表 2 给出非藻类颗粒物特征波长吸收系数与总悬浮、无机悬浮物、有机悬浮物及浮游植物色素浓度之间的相关性分析结果。由表 2 可知,梁子湖和洪湖  $a_d(440)$  与总悬浮物相关性最好,其次是无机悬浮物,与有机悬浮物相关性稍微要差些,而武汉东湖  $a_d(440)$  与有机悬浮物的相关性要好于无机悬浮物,说明非藻类颗粒物既有无机也有有机的组分,而有机部分则主要是浮游生物残体及降解产物,由于武汉东湖是一个富营养化较为严重的湖泊,所以有机成分对非藻类吸收的影响要大于其他 2 个湖泊。

## 2.3 浮游植物吸收光谱

由图 4 知浮游植物的吸收光谱表现为在 440、675 nm 附近有 2 个特征吸收峰,但不同采样点由于色素浓度有所差异,相应的浮游植物的吸收系数变化也不同。3 个湖泊  $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  的变化范围

$\mu\text{m}^{-1}$ )。与 Binding 等<sup>[5]</sup>报道的伊利湖均值 11.0  $\mu\text{m}^{-1}$  以及张运林等<sup>[10]</sup>报道的太湖梅梁湾均值  $10.91 \pm 0.62 \mu\text{m}^{-1}$  相比,3 个湖泊  $S_d$  值比其稍大。不同点位以及不同湖泊间  $S_d$  值有所不同,这主要是由于非藻类颗粒物组成、粒径等不同引起的。Binding 等<sup>[5]</sup>在伊利湖研究发现,越低的光谱斜率对应颗粒物中有机颗粒物比例较高,这与本研究结果比较一致。

分别为东湖 0.493~0.629、0.269~0.420  $\text{m}^{-1}$ 、梁子湖 0.132~0.931、0.028~0.553  $\text{m}^{-1}$ 、洪湖 0.0997~0.999、0.00469~0.571  $\text{m}^{-1}$ ,均值分别为  $(0.558 \pm 0.039, 0.322 \pm 0.0489) \text{m}^{-1}$ ,  $(0.542 \pm 0.337, 0.284 \pm 0.206) \text{m}^{-1}$ ,  $(0.437 \pm 0.279, 0.216 \pm 0.182) \text{m}^{-1}$ ,可以看出东湖浮游植物吸收系数相对于洪湖和梁子湖变化较小,对应的浮游植物色素浓度的变化范围为 17.82~29.19  $\mu\text{g/L}$ 、2.42~41.96  $\mu\text{g/L}$ 、2.32~53.07  $\mu\text{g/L}$ ,3 个湖泊在特征吸收波段的变化,与色素浓度的变化是一致的。

浮游植物吸收系数主要受水体中浮游植物的浓度及种群组成的影响,随色素浓度的变化而变化。在远海一类水体和河口区、沿岸带、湖泊等二类水体的一些研究结果均显示浮游植物吸收系数与其色素浓度存在线性或非线性关系。如 Binding 等<sup>[5]</sup>在伊利湖以及张运林等<sup>[10]</sup>在内陆湖泊太湖梅梁湾研究显示两者有很好的线性关系;而 Babin 等<sup>[7]</sup>在欧洲沿岸带海域以及 Bricaud 等<sup>[8]</sup>在太平洋海域的一类水和二类水体得出指数函数关系。此次对 3 个湖泊的研究结果显示其与其它地区内陆湖泊的研究结果比较一致,显示两者有很好的线性关系。由图 5 比较 675 和 440 nm 处浮游植物吸收系数与浮游植物色素的相关性发现,675 nm 处的相关性要好于 440 nm,分析原因主要是由于 440 nm 浮游植物吸收系

数会受非藻类颗粒物的影响,因为采用甲醇浸泡来分离浮游植物和非藻类颗粒物吸收,在浸泡前后两次过滤中往往会造成非藻类颗粒物以及非光合作用色素的损失,从而导致在 500 nm 以下波段浮游植物吸收人为增加,降低了吸收系数与浮游植物色素浓度的相关性。而在 675 nm 非藻类颗粒物的吸收系数很小,其对浮游植物吸收系数的干扰要小得多,因而相关性会提高<sup>[10]</sup>。此外 Binding 等<sup>[5]</sup>还认为颗粒物上吸附的有色可溶性有机物也干扰了短波部分浮游植物吸收与色素浓度之间的定量关系。

由图 5 可知,在本研究中,在色素的两特征吸收波段 440 和 675 nm 处,东湖浮游植物吸收系数与色素浓度的相关性明显不如梁子湖和洪湖好。分析原因主要是,在 3 个湖泊中,东湖无机颗粒物所占总颗粒物的比例远高于洪湖和梁子湖,由于非藻类颗粒物会对浮游植物色素的吸收起屏蔽作用,使单位色素浓度的吸收系数减少,同时干扰了浮游植物吸收系数的精确分离,导致东湖浮游植物吸收系数与色素浓度的相关性明显不如梁子湖和洪湖好。

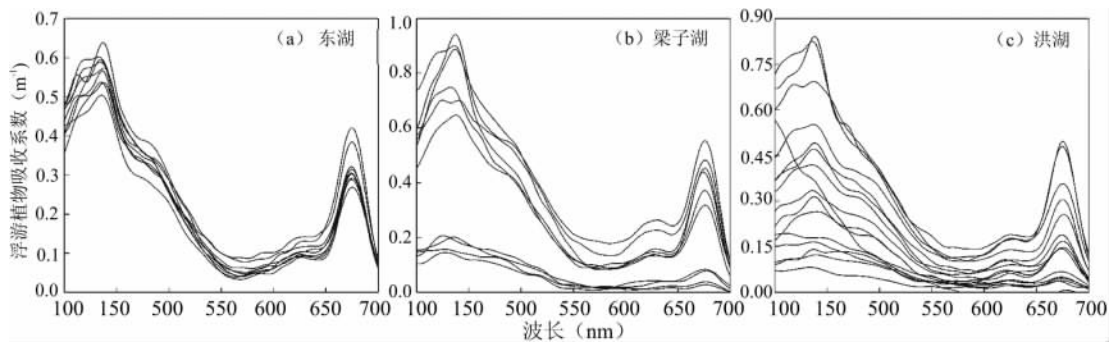


图 4 2007 年湖北 3 个湖泊浮游植物颗粒物光谱吸收系数  
Fig. 4 Absorption Spectra of Phytoplankton in Three Lakes of Hubei Province in 2007

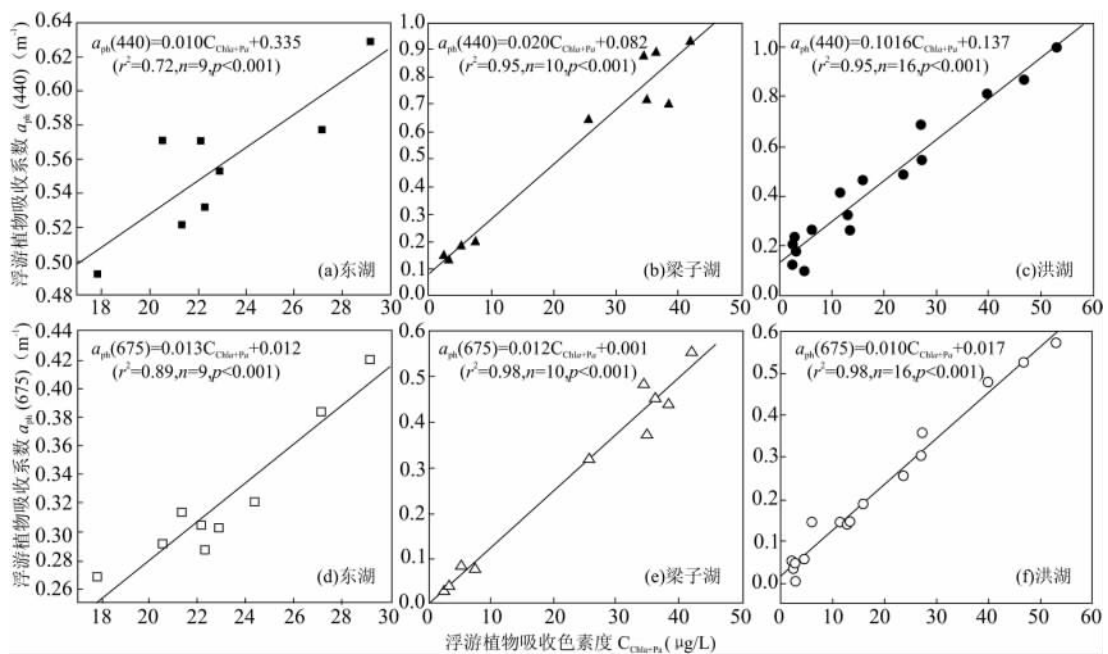


图 5 浮游植物吸收系数  $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  与浮游植物色素浓度的关系  
Fig. 5 Correlations Between  $a_{ph}(440)$ ,  $a_{ph}(675)$  and Phytoplankton Pigment Concentration

### 3 结论

(1) 3 个湖泊总颗粒物吸收光谱与浮游植物吸

收光谱相似,675 nm 处有明显的波峰,在 440 nm 处由于非色素颗粒物吸收系数影响峰值不如 675 nm 明显。东湖由于湖面面积较小,生态系统类型单一,水体易发生混合,各点之间光谱差异不大,洪湖和梁

子湖由于湖面面积较大,生态系统类型多样,存在较大空间异质性。

(2) 非藻类颗粒物吸收光谱谱型一致,均随波长增加按指数规律衰减,但由于非藻类颗粒物组成及粒径不一样,光谱斜率在不同湖泊间存在一定差异。

(3) 浮游植物特征波长的吸收系数与水体中的色素浓度具有显著性正相关,由于非藻类颗粒物及有色可溶性有机物影响 440 nm 处相关性不如 675 nm 处。由于东湖非藻类颗粒物浓度较高,会对浮游色素的吸收起屏蔽作用,使单位色素浓度的吸收系数减少,所以梁子湖和洪湖在特征吸收波长的吸收系数与色素浓度的相关性要好于武汉东湖。

## 参考文献:

- [1] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体中悬浮物研究[J].长江流域资源与环境,2004,13(3):266~271.
- [2] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [3] BRIEAND A, STRIMMKI D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling and the Sargasso Sea[J]. Limnology and Oceanography, 1990, 35: 562~582.
- [4] ZHANG Y L, ZHANG B, MA R H, et al. Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 2007, 170: 11~19.
- [5] BINDING C E, JERMOE J H, BUKATA R P, et al. Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 1702~1711.
- [6] SASAKI H, MIYAMURA T, SAITOH S. Seasonal variation of absorption by particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 64: 447~458.
- [7] 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 Geophysical Research, 2003, 108 (C7), 3211, doi: 10. 1029/2001JC000882.
- [8] BRICAUD A, BABIN M, CLAUSTRE H, et al. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters[J]. Journal Geophysical Research, 2010, 115, C08009, doi: 10. 1029/2009JC005517.
- [9] LEONG S C Y, TAGUCHI S. Optical characteristics of the harmful dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in response to different nitrogen sources[J]. Harmful Algae, 2005, 4: 211~219.
- [10] 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.
- [11] 赵巧华,张运林,秦伯强.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数的分离[J].湖泊科学,2006,18(4):356~362.
- [12] CLEVELAND J S, WEIDEMANN A D. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filter[J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38: 1321~1327.
- [13] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1999:77~79.
- [14] 葛继稳,蔡庆华,刘建,等.梁子湖湿地植物多样性现状与评价[J].中国环境科学,2003,23(5):451~456.
- [15] 王学雷,厉恩华,余璟,等.生态恢复前后洪湖水生植被景观各向异性动态变化研究[J].湿地科学,2010,8(2):102~103.

## SPECTRAL ABSORPTION COEFFICIENTS OF PARTICULATE MATTER IN LAKE DONGHU, LAKE LIANGZIHU AND LAKE HONGHU

SHI Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-lin<sup>2</sup>, LIU Ming-liang<sup>3</sup>, YUAN Xu-yin<sup>1</sup>, YIN Yan<sup>2,4</sup>, LIU Xiao-han<sup>2,4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineer, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310005, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The spectral absorption coefficients of particulate matter in Lake Donghu, Lake Liangzihu and Lake Honghu were studied based on the data collected on 27 September and 1~3 October 2007. The absorption spectra of total particulates were similar to those of phytoplankton, suggesting that phytoplankton accounted for a large contribution of particulate matter. Significant higher absorption coefficients were recorded in Lake Donghu and Lake Liangzihu than in Lake Honghu, indicating that the underwater climate was better in Lake Honghu than in Lake Donghu and Lake Liangzihu. Larger spatial differences of particulate matter absorption coefficients were found in Lake Liangzihu and in Lake Honghu than in Lake Donghu. The absorption spectra of nonalgal particles of the three lakes showed the same pattern, following an exponential increase toward short wavelengths with an average slope of  $12.31 \pm 0.32 \mu\text{m}^{-1}$ ,  $11.96 \pm 0.84 \mu\text{m}^{-1}$ ,  $11.98 \pm 1.68 \mu\text{m}^{-1}$  over the 400~700 nm interval in Lake Donghu, Liangzihu and Honghu, respectively. Significant positive relationships were found between phytoplankton absorption coefficients  $a_{\text{ph}}(440)$ ,  $a_{\text{ph}}(675)$  and phytoplankton pigment concentration ( $p < 0.005$ ), suggesting that phytoplankton absorption coefficients could be calculated from phytoplankton pigment concentration. There were significant correlations between total particulate matter, non-algal particulate absorption coefficients and the concentrations of total suspended solids, organic suspended solids, inorganic suspended solids. A significant linear relationship was found between phytoplankton absorption coefficients and organic suspended solids concentration, suggesting phytoplankton dominated in organic suspended solids.

**Key words:** Lake Donghu; Lake Liangzihu; Lake Honghu; total suspended solid; phytoplankton; absorption spectra