夏季新安江水库(千岛湖)颗粒物吸收光谱特征分析*

殷燕¹, 刘明亮¹, 王明珠², 何剑波¹, 高玉蓉¹, 虞左明^{1**}

(1: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 通过对 2013 年夏季新安江水库(千岛湖)53 个站点悬浮颗粒物的吸收光谱进行研究, 系统分析了总颗粒物吸收系数 $a_p(\lambda)$ 、非藻类颗粒物吸收系数 $a_d(\lambda)$ 和浮游藻类光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 的变化规律以及影响因素. 结果表明: 总颗粒物吸收除西北河流水上游段外, 其他各站点均呈现出明显的浮游藻类吸收特性, 反映新安江水库总颗粒物中浮游藻类贡献较高. 全库 $a_p(440)$ 在 $0.068 \sim 0.629 \text{ m}^{-1}$ 之间变化, 西北河流水总颗粒物吸收系数显著大于其他水域, 而湖泊区与西南河流水则显著小于其他水域. 非藻类颗粒物吸收光谱随着波长增加大致呈现出指数函数衰减的规律, 其光谱斜率 S_d 均值为 $8.52 \pm 1.62 \mu\text{m}^{-1}$, 存在显著的空间差异, 但整体偏低, 与新安江水库无机颗粒物含量低有关. $a_d(440)$ 与浮游藻类色素浓度存在显著的线性相关, 表明夏季新安江水库非藻类颗粒物可能主要来源于浮游藻类降解. 浮游藻类的吸收光谱在 440 和 675 nm 附近有明显的吸收峰. $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 存在显著的空间差异, 其与浮游藻类色素浓度存在极显著的正线性关系, 而与总悬浮颗粒物浓度相关性较弱.

关键词: 新安江水库(千岛湖); 非藻类颗粒物; 浮游藻类; 浮游藻类色素浓度; 吸收光谱

Coefficients of summer spectral absorption of particulate matter in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao)

YIN Yan¹, LIU Mingliang¹, WANG Mingzhu², HE Jianbo¹, GAO Yurong¹ & YU Zuoming¹

(1: Hangzhou Institute of Environmental Science, Hangzhou 310014, P. R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: The spectral absorption coefficients of total particles $a_p(\lambda)$, nonalgal particles $a_d(\lambda)$ and phytoplankton $a_{ph}(\lambda)$ in Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao) were studied based on the data of 53 sampling sites in the summer of 2013. The results showed that the absorption spectra of total particles were similar to those of phytoplankton except the data at sites 9 and 10. It indicated that phytoplankton made larger contribution to the total particles. The values of the total particulate matter at 440 nm $a_p(440)$ ranged between 0.068 and 0.629 m^{-1} in the water body. Moreover, the values of $a_p(\lambda)$ in the northwestern area were significantly larger than those in other areas, while the values of $a_p(\lambda)$ in the lake district and the southwestern riverine areas were the smallest. Absorption coefficients of nonalgal particles decreased exponentially from the short to the long wavelength. There were marked spatial variations of the exponential spectral slope coefficients of nonalgal particles S_d with the average value of $8.52 \pm 1.62 \mu\text{m}^{-1}$. However, the values of S_d in Xin'anjiang Reservoir were generally low due to the low values of the inorganic suspended solids. Significant positive relationships were found between $a_d(440)$ and phytoplankton pigment concentrations, suggesting that the degradation of phytoplankton was an important source of the nonalgal particles in summer. There were distinctive absorption peaks at the wavelength of 440 and 675 nm in the absorption spectra of phytoplankton. In addition, there were significant spatial variations of the phytoplankton absorption coefficients at 440 nm ($a_{ph}(440)$) and 675 nm ($a_{ph}(675)$). Significant positive linear relationships were found between $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$ and phytoplankton pigment concentration, respectively, while weak rela-

* 杭州市科技局重大项目(20122513A01)、杭州市环境保护局项目(201006)、浙江省自然科学基金项目(Y5110314)和杭州市科技发展计划项目(20120433B02)联合资助. 2013-10-01 收稿; 2013-12-16 收修改稿. 殷燕(1987~), 女, 硕士; E-mail: yinyan19870829@163.com.

** 通信作者; E-mail: yzm0571@163.com.

tionships were showed between $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$ and the total suspended solids, respectively.

Keywords: Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao); nonalgal particles; phytoplankton; phytoplankton pigment concentration; absorption spectra

水体光学特性通过影响光的吸收及水下光场结构进而影响水体水生生物群落结构和功能^[1], 悬浮颗粒物光谱吸收作为水体固有光学特性之一在水色遥感生物—光学模型、光辐射传输、水体初级生产力估算等多个领域具有重要的意义^[2-4], 如浮游藻类色素浓度遥感反演的生物光学模型是通过从遥感反射率中分离浮游植物吸收进而建模. 相关文献认为水体总悬浮颗粒物吸收光谱可假定为浮游藻类吸收光谱与非藻类颗粒物吸收光谱的简单线性叠加, 其各自的吸收光谱及贡献份额决定水体光学分类及适用的生物光学模型^[5-6], 因此有必要单独对水体中浮游藻类吸收光谱及非藻类颗粒物吸收光谱进行深入研究. 浮游藻类吸收光谱反映了水体色素组成、种类及比例^[7], 有关其与叶绿素 a 浓度之间的线性或非线性相关关系已在 I 类或 II 类水体被研究^[1,4,8-10]. 而对于非藻类颗粒物吸收光谱而言, 其指数函数光谱斜率 S_d 值受颗粒物组成、粒径等多种因素的影响, 一般需根据具体水域情况而定. 例如, 曹文熙等^[4]在珠江口测得 S_d 值约为 $12.0 \mu\text{m}^{-1}$, 而张运林等^[1]在太湖梅梁湾得到的 S_d 值范围为 $9.4 \sim 12.0 \mu\text{m}^{-1}$. 总体上, 国内对于悬浮颗粒物吸收光谱主要集中在富营养化湖泊或者污染较重的河流、河口^[1,4,5], 目前尚未见到对水质较好的大型水库例如新安江深水水库水体颗粒物吸收光谱的研究, 此方面研究的缺失阻碍了大型水库水色遥感反演工作的开展及水体生物—光学模型的建立.

新安江水库是我国大型深水水库之一, 其巨大的水资源量对当地及长江三角洲的经济和社会发展具有重大影响^[11]. 近几年来, 在新安江水库开展了多方位的研究, 但主要集中在对其水体理化特征及浮游生物状况的研究^[11-13], 而对其水体光学特性(包括固有光学特性和表观光学特性)的研究还未见报道. 随着水色遥感的发展, 利用传感器探测和反演水体水色要素参数(主要包括叶绿素、悬浮颗粒物、有色可溶性有机物)已经成为水体水质监测与预测预警新的技术手段^[14-15]. 因此, 本研究以 2013 年 7 月 17—19 日在新安江水库的采样数据为基础, 分析新安江水库夏季不同水域总颗粒物、非藻类颗粒物和浮游藻类吸收系数的光谱特征, 探讨颗粒物吸收与浮游藻类色素浓度、悬浮物浓度等指标之间的相关关系, 为进一步探索新安江水库水质遥感及水体参数遥感反演算法奠定科学理论依据并提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点设置

新安江水库($29^{\circ}22' \sim 29^{\circ}50'N$, $118^{\circ}34' \sim 119^{\circ}15'E$), 又名千岛湖, 地处钱塘江上游与安徽省交界处, 是 1959 年新安江水库大坝建成后形成的大型深水水库. 千岛湖流域面积 10442 km^2 , 其中 60% 在安徽省境内, 正常高水位 108 m, 相应水面面积 580 km^2 , 其中约 98% 水域在淳安县境内, 相应库容量 $178.4 \times 10^8 \text{ m}^3$. 多年平均入湖水量 $94.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中安徽过境水量 $48.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 经新安江大坝流出的年出湖水量 $91.07 \times 10^8 \text{ m}^3$. 新安江水库是一个集旅游、航运、水力发电、水资源供应和渔业生产等多个社会功能于一体的人工深水水库^[11-12].

本研究于 2013 年 7 月 17—19 日对整个新安江水库进行调查监测. 整个水库共设置 53 个采样站点, 涵盖了各个支流及不同类型的水域(图 1). 东北河流域: 1[#]~8[#]; 西北河流域: 9[#]~17[#], 除街口位于安徽省境内, 其他站点均位于浙江省境内, 是新安江主要的入库地表径流, 占入库总径流量的 60%; 西南河流域: 23[#]~35[#], 主要占入库径流量的 25%; 东南湖泊区: 36[#]~52[#], 是新安江水库唯一的出水口; 过渡缓冲区: 18[#]~22[#], 53[#]. 野外采样过程中利用全球定位系统(GPS3000 型导航仪)现场空间定位, 误差小于 2 m. 采样期间天气晴朗无云, 尽管千岛湖是深水水库, 但为开展同步水色遥感实验, 仅采集表层(0~50 cm)水样, 未采集分层水样, 水样采集后放入 2.5 L 的塑料桶中并置于暗室保存, 当天带回实验室进行过滤预处理, 然后放入冰箱内冷藏保存. 颗粒物、浮游藻类色素、悬浮物浓度等指标在野外实验结束后 2~3 d 内分析完成.

1.2 参数测定

1.2.1 颗粒物吸收系数测定 颗粒物吸收系数采用定量滤膜技术 QFT(Quantitative Filter Technique)^[16]测

图1 新安江水库采样站点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Xin'anjiang Reservoir

定,用直径 25 mm 的 Whatman GF/F 膜过滤原水样(过滤体积由水中悬浮物浓度决定,一般保证测定的吸光度小于 0.4^[17]),同样湿润程度的空白膜作为参比膜,在 UV-2550 PC 型分光光度计下用 ISR-240A 型积分球在反射率模式下采用 T-R 方法测定滤膜上颗粒物在 350 ~ 800 nm 波长范围的吸光度,随后用各波段吸光度减去 750 nm 波长处的吸光度,采用 Tassan 等^[18]提出的方法进行放大因子校正,公式为:

$$OD_s(\lambda) = 0.423OD_f(\lambda) + 0.479OD_f(\lambda)^2, OD_s(\lambda) \leq 0.4 \quad (1)$$

式中, $OD_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮颗粒物的吸光度, $OD_f(\lambda)$ 为在仪器上直接测得的滤膜上悬浮颗粒物的吸光度。

滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数公式为:

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

式中, $a_p(\lambda)$ 为波长 λ 处的悬浮颗粒物吸收系数(m^{-1}), S 为滤膜上颗粒物的有效面积(m^2), V 为过滤的水样体积(ml)。

用次氯酸钠浸泡滤膜,主要目的是将滤膜上的色素漂白掉,使得滤膜上只留下不能被次氯酸钠漂白的非藻类颗粒物^[1,9],按与上述颗粒物吸收测定的方法得到非藻类颗粒物吸收系数 $a_d(\lambda)$ 。总颗粒物吸收系数由浮游植物吸收系数和非藻类颗粒物吸收系数线性相加^[5-6],由此浮游植物的吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 即由如下公式得到:

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

由此浮游植物比吸收系数可以表示为:

$$a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/Chl. a \quad (4)$$

式中, $a_{ph}^*(\lambda)$ 和 $a_{ph}(\lambda)$ 分别为波长 λ 处浮游植物的比吸收系数($m^2/(mg \cdot Chl. a)$)和吸收系数(m^{-1}), $Chl. a$ 为叶绿素 a 浓度($\mu g/L$)。

1.2.2 浮游藻类色素浓度和悬浮物浓度的测定 取 800 ~ 1500 ml 水样,用 Whatman GF/F 滤膜抽滤,滤膜放置冰箱冷冻超过 24 h 后,加入 90% 的热乙醇暗室萃取 4 ~ 6 h 后,记录总体积,在 UV-2550 分光光度计上用 90% 乙醇作为参比液进行比色,分别测定波长在 665 和 750 nm 处的吸光度,之后加入 1 ~ 2 滴 1% 的稀盐酸进行酸化并重新测定吸光度。通过计算得到叶绿素 a 和脱镁叶绿素(phaeophytin-a, Pha. a)浓度,浮游藻类色

素浓度为 Chl. a 和 Pha. a 的浓度之和. 悬浮物浓度采用灼烧称重法进行测定^[19].

1.2.3 指数函数斜率的计算 非藻类颗粒物吸收系数随波长增加呈现指数衰减的规律^[11], 公式为:

$$a_d(\lambda) = a_d(440) \exp[S_d(440 - \lambda)] \quad (5)$$

式中, $a_d(\lambda)$ 为波长 λ 处的非藻类颗粒物吸收系数, 而 $a_d(440)$ 为选取的 440 nm 作为参照波长处的非藻类颗粒物吸收系数, S_d 为利用最小二乘法拟合得到的指数函数光谱斜率, 拟合波段范围为 400 ~ 700 nm.

1.3 分析与统计

运用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析, 包括方差分析、平均值等, 显著性水平为: $P < 0.01$ 为极显著相关; $0.01 < P < 0.05$ 为显著相关; $P > 0.05$ 无显著相关. 利用 Origin 7.5 软件进行回归分析作图, ArcGIS 9.3 软件作空间分布的等值线图.

2 结果与讨论

2.1 总颗粒物吸收光谱

夏季新安江水库不同水域共 53 个站点的总颗粒物光谱吸收系数表明, 不同采样点总颗粒物吸收光谱差异较大(图 2). 西北河流区 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 的变化范围分别为 0.233 ~ 0.629、0.090 ~ 0.187 m^{-1} ; 而湖泊区 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 的变化范围分别为 0.068 ~ 0.141、0.020 ~ 0.061 m^{-1} (表 1). 通过分析发现, 西北河流区总颗粒物吸收系数显著大于其他水域, 而湖泊区与西南河流区则显著小于其他水域($P < 0.01$)(图 2f).

从光谱形状来看, 大致呈现出随着波长增加吸收系数逐渐降低的趋势, 而在 675 nm 附近有明显的叶绿素 a 吸收峰, 此吸收峰与浮游藻类在此波段特征吸收有关^[1,4,17], 但 675 nm 处吸收峰峰值在各水域存在显著差异, $a_p(675)$ 平均值呈现出如下规律: 西北河流区 > 东北河流区 > 过渡缓冲区 > 西南河流区 > 湖泊区(图 2). 另外, 对这 53 个站点总颗粒物吸收系数光谱分布进行分析, 总体上存在 2 种类型. 第 1 种类型, 总颗粒物的吸收光谱分布与非藻类颗粒物吸收光谱分布相似; 第 2 种类型, 总颗粒物的吸收光谱分布与浮游藻类吸收光谱相似.

对于第 1 种类型(图 3a), 本文选取位于西北河流区街口处的 9[#] 站点进行分析. 此种类型总颗粒物吸收光谱只有 675 nm 附近有峰值, 并且除 675 nm 处浮游藻类吸收系数大于非藻类吸收系数, 其他波段均小于非藻类吸收系数. 而对于第 2 种类型(图 3b), 本研究选取位于过渡缓冲区的 21[#] 站点进行分析, 此站点位于新安江水库的中心位置. 此种类型总颗粒物吸收光谱在 440、675 nm 附近都有明显的吸收峰, 尤其是 675 nm 处峰值最明显. 浮游藻类吸收系数一般都大于非藻类颗粒物吸收系数. 经过分析发现, 第 1 种类型多出现于无机颗粒物含量相对较高的站点, 例如 9[#] 站点, 无机颗粒物占总悬浮物浓度的 58.6%. 此种光谱类型多出现于河流、河口、沿岸带水体中^[1,20]. 第 2 种类型多见于浮游植物色素浓度较高而有机颗粒物浓度占总悬浮物浓度较高的站点, 时志强等^[21] 对夏季博斯腾湖的水下光场研究发现, 总颗粒物光谱吸收呈现出显著的浮游植物吸收特性, 主要是由于水体内无机颗粒物含量很低, 这与本文研究结果相似. 西南河流区及湖泊区大多数站点无机颗粒物含量很低或者几乎为 0, 例如 21[#] 典型站点有机颗粒物占总悬浮物浓度的比例为 73.9%(表 1). 由此可见, 西北河流区 9[#] 和 10[#] 站点总颗粒物吸收光谱呈现出第 1 种类型(图 2). 这 2 个站点位于新安江水库上游, 水质相较其他水域差, 平均透明度在 1.7 m 左右, 水体悬浮物浓度对总颗粒物吸收系数影响较大. 而其他水域各站点总颗粒物吸收光谱基本呈现出第 2 种类型, 有些站点 440 nm 处由于受到非藻类颗粒物影响有时表现的不是很明显.

除去 9[#] 和 10[#] 点位, 把属于第 2 种类型光谱的站点总颗粒物在 440 和 675 nm 波长的吸收系数与浮游植物色素浓度进行统计分析, 发现 $a_p(440)$ 及 $a_p(675)$ 与浮游植物色素浓度存在显著的线性关系(图 4). Bricaud 等^[10] 基于海洋 I 类水体的 1166 个样品研究发现, $a_p(440)$ 与叶绿素 a 浓度存在显著的幂函数关系, 决定系数达到 0.91. 新安江水库除上游街口处, 夏季其他水域总颗粒物吸收光谱主要受水体浮游藻类等有机颗粒物影响(图 4), 这与新安江水库无机颗粒物含量低的特点保持一致. 由此, 此类亚热带大型深水水库所呈现出的总颗粒物光谱特征与近岸带 II 类水体如太湖总颗粒物吸收特征有着显著差异, 后者主要受非藻类颗粒物的影响^[1,22].

图2 2013 年夏季新安江水库总悬浮颗粒物光谱吸收系数
Fig. 2 Absorption spectra of total particles in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

表 1 2013 年夏季新安江水库不同水域特征波长吸收系数、浮游植物色素浓度及悬浮物浓度的统计分析
Tab. 1 Absorption coefficients at 440 and 675 nm, phytoplankton pigment concentration (Chl. a + Pha. a) ,
total suspended solids (TSS) , organic suspended solids (OSS) , inorganic suspended solids (ISS)
in different areas in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

水域	参数	$a_p(\lambda)/m^{-1}$		$a_d(\lambda)/m^{-1}$		$a_{ph}(\lambda)/m^{-1}$		TSS/ (mg/L)	OSS/ (mg/L)	ISS/ (mg/L)	Chl. a + Pha. a/ ($\mu g/L$)
		440 nm	675 nm	440 nm	675 nm	440 nm	675 nm				
东北河流区	平均值	0.216	0.083	0.059	0.007	0.157	0.076	2.93	1.95	0.98	5.95
	标准差	0.030	0.013	0.016	0.002	0.034	0.012	0.35	0.28	0.16	1.28
	最大值	0.262	0.104	0.089	0.009	0.213	0.096	3.47	2.48	1.31	7.84
	最小值	0.175	0.063	0.041	0.004	0.105	0.058	2.48	1.62	0.81	3.69
西北河流区	平均值	0.420	0.145	0.154	0.019	0.265	0.126	3.66	2.64	1.02	10.18
	标准差	0.128	0.034	0.110	0.010	0.061	0.032	1.50	0.55	1.37	3.26
	最大值	0.629	0.187	0.403	0.040	0.341	0.170	7.04	3.44	3.60	14.31
	最小值	0.233	0.090	0.062	0.008	0.171	0.082	2.19	1.99	0.00	5.61
西南河流区	平均值	0.111	0.041	0.041	0.007	0.070	0.034	1.44	1.41	0.03	2.67
	标准差	0.034	0.014	0.015	0.002	0.022	0.013	0.36	0.33	0.07	0.81
	最大值	0.199	0.076	0.081	0.013	0.118	0.064	2.22	2.22	0.22	4.25
	最小值	0.076	0.026	0.029	0.004	0.046	0.021	0.96	0.96	0.00	1.36
过渡缓冲区	平均值	0.159	0.061	0.040	0.005	0.119	0.056	1.93	1.67	0.26	4.15
	标准差	0.039	0.020	0.006	0.001	0.037	0.019	0.28	0.24	0.21	1.44
	最大值	0.213	0.091	0.046	0.007	0.173	0.084	2.34	2.12	0.61	6.52
	最小值	0.102	0.036	0.030	0.003	0.072	0.031	1.62	1.43	0.00	2.48
湖泊区	平均值	0.104	0.038	0.035	0.007	0.069	0.032	1.41	1.36	0.05	2.45
	标准差	0.020	0.011	0.007	0.003	0.019	0.010	0.22	0.21	0.08	0.91
	最大值	0.141	0.061	0.047	0.013	0.100	0.048	2.07	2.07	0.23	4.34
	最小值	0.068	0.020	0.024	0.002	0.037	0.013	1.14	1.14	0.00	1.26

图3 2013年夏季新安江水库2种典型的总颗粒物吸收光谱(a代表第1种类型,b代表第2种类型)

Fig. 3 Absorption spectra of total particles of two types in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013
(a represents the first type, and b represents the second type)

图4 2013年夏季新安江水库总颗粒物吸收系数 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与浮游植物色素浓度的相关关系

Fig. 4 Linear correlations between total particulate absorption coefficients $a_p(440)$, $a_p(675)$ and phytoplankton pigment concentration in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

2.2 非藻类颗粒物吸收光谱

非藻类颗粒物吸收随着波长增加大致按指数规律衰减^[1,22-23](图5),用最小二乘法对400~700 nm的非藻类颗粒物吸收系数按照公式(5)进行指数函数关系拟合,得到非藻类颗粒物吸收光谱斜率 S_d 值.新安江水库 S_d 均值为 $8.52 \pm 1.62 \mu\text{m}^{-1}$,其中东北河流区为 $7.91 \sim 12.40 \mu\text{m}^{-1}$ ($9.78 \pm 1.69 \mu\text{m}^{-1}$)、西北河流区为 $7.32 \sim 10.60 \mu\text{m}^{-1}$ ($9.32 \pm 1.30 \mu\text{m}^{-1}$)、西南河流区为 $6.84 \sim 8.65 \mu\text{m}^{-1}$ ($7.84 \pm 0.49 \mu\text{m}^{-1}$)、过渡缓冲区为 $7.71 \sim 12.13 \mu\text{m}^{-1}$ ($9.44 \pm 1.55 \mu\text{m}^{-1}$)、湖泊区为 $5.03 \sim 10.68 \mu\text{m}^{-1}$ ($7.69 \pm 1.69 \mu\text{m}^{-1}$).西南河流区 S_d 值的变异系数为6.24%,说明其空间分布比较均匀(图6a),而 S_d 的高值区($>10 \mu\text{m}^{-1}$)分别出现在西北河流区、东北河流区入库径流的源头处以及过渡缓冲区的20#站点.本研究区域的 S_d 值低于张运林等^[1]报道的梅梁湾的 S_d 值,也远低于珠江口^[4]以及东湖、梁子湖的 S_d 值^[17].新安江水库 S_d 值存在显著的空间分布差异,表征不同水域其非藻类颗粒物组成及粒径存在显著差异,而研究发现,非藻类颗粒物光谱斜率越低,表明其水体中有机颗粒物含量比例越高^[5],这与新安江水库绝大多数站点无机颗粒物含量很低或者几乎没有的特征一致.

全库 $a_d(440)$ 的变化范围为 $0.024 \sim 0.403 \text{ m}^{-1}$ (表1),远低于湖泊、河口等水体的 $a_d(440)$ 值^[1,4].除西北河流区外,其他站点 $a_d(440)$ 均小于 0.1 m^{-1} (图6b).对 $a_d(440)$ 与浮游植物色素浓度、总悬浮物浓度、有机颗粒物浓度进行相关性分析发现存在如下线性回归关系式:

$$a_d(440) = 0.015C_{\text{Chl. a} + \text{Pha. a}} - 0.010 \quad (R^2 = 0.669, N = 53, P < 0.001) \quad (5)$$

$$a_d(440) = 0.032 \text{ TSS} - 0.002 (R^2 = 0.381, N = 53, P < 0.001) \quad (6)$$

$$a_d(440) = 0.047 \text{ OSS} - 0.021 (R^2 = 0.191, N = 53, P < 0.001) \quad (7)$$

除去总颗粒物光谱分布为第1种类型的9[#]和10[#]点位后, $a_d(440)$ 与浮游植物色素浓度回归方程的决定系数 R^2 提高至0.734,而与有机颗粒物的回归方程的 R^2 提高至0.473. 由此可以得出,在新安江水库非藻类颗粒物可能主要来源于浮游植物的降解,而在其他一些Ⅱ类水体研究中显示,非藻类颗粒物吸收系数与浮游植物色素浓度之间无显著相关性^[4].

图5 2013年夏季新安江水库非藻类颗粒物光谱吸收系数

Fig. 5 Absorption spectra of nonalgal particles in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

图6 2013年夏季新安江水库 S_d 值(a) 与 $a_d(440)$ 值(b) 的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of S_d (a) and $a_d(440)$ (b) in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

2.3 浮游藻类吸收光谱

新安江水库夏季不同站点浮游藻类吸收光谱形状相似,受叶绿素a、类胡萝卜素等的影响,在440和675 nm附近都有明显的吸收峰,但由于各站点浮游藻类色素浓度不同,导致浮游藻类吸收系数存在显著差异(图7). 水库 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 平均值分别为 0.136 ± 0.081 、 $0.065 \pm 0.039 \text{ m}^{-1}$,变化范围分别为 $0.341 \sim 0.037$ 、 $0.170 \sim 0.013 \text{ m}^{-1}$. 浮游藻类色素浓度变化范围为 $1.26 \sim 14.31 \text{ } \mu\text{g/L}$ (表1). 西北河流区平均 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 值最大,是湖泊区对应值的3.8和4.0倍,而湖泊区与西南河流区平均浮游藻类吸

收光谱几乎重叠(图7f). 在上文中也讨论过, 新安江水库总颗粒物吸收光谱主要是受浮游藻类的影响, 为更好地分析整个新安江水库浮游藻类吸收系数特征, 图8给出了夏季 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、浮游植物色素浓度以及总悬浮物浓度的空间分布情况.

图7 2013年夏季新安江水库浮游藻类颗粒物光谱吸收系数

Fig. 7 Absorption spectra of phytoplankton in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

图8 2013年夏季新安江水库 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、浮游植物色素浓度以及总悬浮物浓度的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$, phytoplankton pigment concentration and total suspended solids in Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2013

$a_{ph}(440)$ (图 8a)、 $a_{ph}(675)$ (图 8b) 以及浮游藻类色素浓度 (图 8c) 的空间分布相似, 均呈现出如下规律: 自上游最主要的入库径流到过渡缓冲区, 最后至下游全库唯一的出水口大坝逐渐递减的规律, 东北河流域区呈现出自富强溪入湖口往过渡缓冲区逐渐递增的规律, 而整个西南河流域区 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 以及浮游藻类色素浓度较低, 分布比较均匀, 平均值及标准差分别为 $0.070 \pm 0.022 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.034 \pm 0.013 \text{ m}^{-1}$ 、 $2.67 \pm 0.81 \text{ } \mu\text{g/L}$ (表 1)。新安江水库 TSS 空间分布与浮游藻类色素浓度空间分布存在显著差异 (图 8d), 高值区分布在西北河流域区威林坪场附近, 次高值区位于东北河流域区, 而湖泊区以及西南河流域区 TSS 值均小于 2 mg/L 。

由此对浮游藻类特征波段 440、675 nm 处吸收系数与浮游藻类色素浓度 (除去 9[#] 和 10[#] 站点数据)、TSS 进行相关分析, 结果表明 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 均与浮游藻类色素浓度存在极显著的正相关关系, 且 440 nm 处相关性与 675 nm 处相关性的决定系数相似 (图 9a, 9b), 这与大多数文献报道的浮游藻类吸收系数与浮游藻类色素浓度 675 nm 处相关性比 440 nm 处相关性好的结果不同^[1,17], 原因在于首先本研究采用次氯酸钠法来分离浮游藻类和非藻类颗粒物吸收, 使得 440 nm 处浮游藻类吸收系数不会受到非藻类颗粒物的影响, 此种方法已在许多文献中得到认可^[24-25]; 其次对于新安江水库来说, 其水体无机颗粒物含量非常低, 削弱了非藻类颗粒物对浮游藻类色素的吸收包裹干扰效应。国内外在河口、沿岸带等水体研究中均发现, $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与浮游藻类色素浓度存在线性或非线性关系^[1,4,8-10]。Zhang 等^[8-9] 在太湖研究发现两者有很好的非线性关系; 曹文熙等^[4] 对珠江口流域研究得出两者呈现幂函数关系, 并且 R^2 值大于 0.8。本文的结果表明, 线性关系能很好地表征夏季新安江水库浮游藻类色素浓度与 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$, 说明浮游藻类吸收系数数值相对比较稳定, $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 平均值分别为 0.0303 ± 0.0041 、 $0.0141 \pm 0.0022 \text{ m}^2/(\text{mg}(\text{Chl. a}))$, 与前人所报道的特征波段 440 和 675 nm 的比吸收系数范围相吻合^[7,26]。这对于今后遥感反演新安江水库叶

图 9 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与浮游藻类色素浓度、TSS 浓度的线性关系

Fig. 9 Linear correlations between $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$ and phytoplankton pigment concentration, TSS concentration

色素 a 浓度奠定了理论依据. 另外, $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与水体 TSS 浓度存在一般的线性关系 (图 9c, 9d), 相关性弱于与浮游藻类色素浓度之间的相关性, 从而也可说明浮游藻类吸收系数主要受水体中浮游藻类浓度的影响.

3 结论

1) 夏季新安江水库除西北河流区入库径流源头的 9[#] 和 10[#] 站点外, 其他水域各站点总颗粒物吸收光谱均呈现浮游藻类吸收光谱特征, 在 440 和 675 nm 处有明显的吸收峰. 另外, $a_{ph}(675)$ 呈现出如下规律: 西北河流区 > 东北河流区 > 过渡缓冲区 > 西南河流区 > 湖泊区. 总颗粒物吸收光谱主要受水体浮游藻类等有机颗粒物决定, 这与新安江水库无机颗粒物含量低的特点保持一致.

2) 非藻类颗粒物吸收随着波长增加大致呈指数规律衰减, 光谱斜率 S_d 值存在显著的空间差异, 而非藻类颗粒物在 440 nm 处吸收系数除西北河流区外, 其他各水域分布均匀. 在新安江水库非藻类颗粒物可能主要来源于浮游植物的降解.

3) 各站点浮游藻类色素浓度不同, 导致浮游藻类吸收系数存在显著差异. $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 存在显著的空间差异, 其与浮游藻类色素浓度存在极显著的正相关关系, 而与 TSS 相关性较弱.

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所的施坤、蒋浩、周永强提供帮助并参加了 2013 年新安江水库野外遥感大采样工作, 在此表示感谢.

4 参考文献

- [1] 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): 3969-3978.
- [2] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(3): 562-582.
- [3] 孙德勇, 李云梅, 王 桥等. 太湖水体中悬浮颗粒物的比吸收光谱特性及其参数化分析. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1820-1829.
- [4] 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. 科学通报, 2003, 48(17): 1876-1882.
- [5] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1702-1711.
- [6] Zhang YL, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu. China. *Hydrobiologia*, 2007, 592(1): 105-120.
- [7] 殷 燕, 张运林, 王明珠等. 光照强度对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长及吸收特性的影响. 湖泊科学, 2012, 24(5): 755-764.
- [8] Zhang YL, Feng LQ, Li JS *et al.* Seasonal-spatial variation and remote sensing of phytoplankton absorption in Lake Taihu, a large eutrophic and shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(7): 1023-1037.
- [9] Zhang YL, Yin Y, Wang MZ *et al.* Effect of phytoplankton community composition and cell size on absorption properties in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11882-11898.
- [10] Bricaud A, Morel A, Babin M *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(13): 31033-31044.
- [11] 吴志旭, 刘明亮, 兰 佳等. 新安江水库 (千岛湖) 湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征. 湖泊科学, 2012, 24(3): 460-465.
- [12] 李培培, 史 文, 刘其根等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析. 湖泊科学, 2011, 23(4): 568-574.
- [13] 余员龙, 任丽萍, 刘其根. 2007-2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素. 湖泊科学, 2010, 22(5): 684-692.
- [14] 马荣华, 唐军武, 段洪涛等. 湖泊水质遥感研究进展. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-158.
- [15] 张运林. 湖泊光学研究进展及其展望. 湖泊科学, 2011, 23(4): 483-497.
- [16] Mitchell BG. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter tech-

- nique (QFT). *Proceeding of SPIE*, 1990, **1302**: 137-148.
- [17] 时志强, 张运林, 刘明亮等. 湖北东湖、梁子湖和洪湖颗粒物吸收光谱特征分析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(6): 736-743.
- [18] Tassan S, Ferrari GM. A sensitivity analysis of the 'Transmittance-Reflectance' method for measuring light absorption by aquatic particles. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(8): 757-774.
- [19] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.
- [20] Vähätalo A, Wetzel RG, Paerl HW. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the drainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina (U. S. A). *Freshwater Biology*, 2005, **50**(3): 477-493.
- [21] 时志强, 张运林, 殷 燕等. 博斯腾湖夏季水下光场特征分析及影响因素探讨. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2969-2977.
- [22] 王 鑫, 张运林, 张文宗. 太湖北部湖区颗粒物吸收特性的时空变化. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1455-1460.
- [23] Roesler CS. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(7): 1649-1660.
- [24] Darecki M, Weeks A, Sagan S *et al.* Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*, 2003, **23**(3/4): 237-250.
- [25] Babin M, Stramski D, Ferrari GM *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, **108**(7): 1-20.
- [26] Sathyendranath S, Lazzara L, Prieur L. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1987, **32**(2): 403-415.