

## 长春市石头口门水库颗粒物光谱吸收特性\*

李 方<sup>1</sup>, 徐京萍<sup>1,2\*\*</sup>, 何艳芬<sup>3</sup>, 张 柏<sup>1</sup>, 刘殿伟<sup>1</sup>, 宋开山<sup>1</sup>, 王宗明<sup>1</sup>, 章光新<sup>1</sup>

(1: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 西北大学城市与资源学系, 西安 710069)

**摘 要:** 针对东北地区水体, 以长春市重要水源地石头口门水库为例, 分别于 2008 年 6 月 13 日和 9 月 23 日对该水库进行了水体颗粒物吸收特性研究. 结果显示: 2008 年 6 月水库悬浮物含量高于 9 月, 而叶绿素 a 含量低于 9 月; 总颗粒物的吸收光谱曲线类似于非色素颗粒物, 非色素颗粒物吸收对其的贡献明显大于浮游植物色素, 9 月份浮游植物吸收对其的贡献略有增加, 吸收曲线在 440nm 左右能明显看到浮游植物引起的吸收峰; 非色素颗粒物在 440nm 的吸收系数与悬浮物浓度存在较好的函数关系, 而与叶绿素 a 浓度的相关性较弱; 浮游植物色素吸收系数较低, 色素组成中叶绿素 a 占主导地位, 浮游植物在 440nm 和 675nm 的吸收系数与叶绿素 a 含量均存在较好的指数函数关系; 6 月浮游植物比吸收系数在 440nm 和 750nm 的均值分别为 0.0483m<sup>2</sup>/mg 和 0.0263m<sup>2</sup>/mg, 而 9 月份的均值分别为 0.0337m<sup>2</sup>/mg 和 0.0187m<sup>2</sup>/mg.

**关键词:** 吸收特性; 总悬浮颗粒物; 非色素颗粒物; 浮游植物; 石头口门水库

## Spectral absorption properties of particulate matters in the Shitoukoumen Reservoir of Changchun City

LI Fang<sup>1</sup>, XU Jingping<sup>1,2</sup>, HE Yanfen<sup>3</sup>, ZHANG Bai<sup>1</sup>, LIU Dianwei<sup>1</sup>, SONG Kaishan<sup>1</sup>, WANG Zongming<sup>1</sup> & ZHANG Guangxin<sup>1</sup>

(1: *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, P.R.China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Department of Urban and Resources Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, P.R.China*)

**Abstract:** The Shitoukoumen Reservoir, an urban water resource of Changchun City, was chose as a represent case of waters in Northeast of China, and then its spectral absorption properties of particulates were analyzed using the field data on June 13th and September 23rd 2008, respectively. Results showed that the content of total suspended matters (TSM) was higher but content of chlorophyll-a (Chl.a) was lower in June than that in September. The spectral curves of TSM were similar to that of tripton. Tripton contributed much more than phytoplankton in the absorption by TSM. In September, the contribution coming from phytoplankton slightly increased, which resulted in an obvious absorption peak around 440nm in the spectral absorption curves of TSM. Absorption by tripton at 440nm had a good relationship with TSM but not with Chl.a. The absorption of phytoplankton in Shitoukoumen Reservoir was generally low. Chl.a held the majority of the pigment composition and had good exponential relationships with its absorption at 440nm and 675nm, respectively. The average values of phytoplankton specific absorption coefficient at 440nm and 675nm in June were 0.0483m<sup>2</sup>/mg and 0.0263m<sup>2</sup>/mg respectively, while the data in September were 0.0337m<sup>2</sup>/mg and 0.0187m<sup>2</sup>/mg respectively.

**Keywords:** Spectral absorption properties; total suspended matters; tripton; phytoplankton; Shitoukoumen Reservoir

\* 中国科学院“东北之春”项目、吉林省与中国科学院科技合作项目、国家自然科学基金项目(50609021)和“多时相遥感影像自动相对辐射校正研究”(07JK411)项目联合资助. 2008-10-30 收稿; 2008-12-03 收修改稿. 李方, 男, 博士, 助理研究员; E-mail: lfwhy@neigae.ac.cn.

\*\* 通讯作者; E-mail: xjingping@gmail.com.

水色遥感的定量反演主要是通过水质参数与光谱特征之间的响应关系建立水质遥感估测模型<sup>[1-2]</sup>。对于二类水体, 如何确定光谱信息中不同成分的贡献率对于实现水色遥感信息定量化显得尤其重要。近年来, 随着水色遥感的发展, 基于水体辐射传输理论的生物光学模型可较好的解释水体固有光学特性与表观光学特性间的关系, 并被越来越多的学者加以研究应用到水质参数反演上<sup>[3-4]</sup>。与传统经验或半经验模型相比, 生物光学模型不论是在精度方面还是在普适性方面上都会有较大提高。但由于该模型所依赖的水体固有光学特性参数具有一定的区域性, 因此需要大量不同研究水体的试验数据加以支撑、验证和调整。作为水体的固有光学特性, 颗粒物(包括非色素颗粒物和浮游植物色素颗粒物)的光谱吸收是水色遥感生物光学模型中的重要参数, 它可直接影响太阳辐射在水下的传输和分布, 并进一步影响水生系统的结构和功能<sup>[5]</sup>。虽然国外早已有较多关于水体颗粒物吸收特性的研究报告<sup>[6-8]</sup>, 但在国内关于这方面的研究仍然比较缺乏<sup>[9]</sup>, 并且多数研究都是针对海洋水体和长江中下游的内陆二类水体<sup>[10-12]</sup>, 这在一定程度上限制了生物光学模型的广泛应用。

作为五大湖区之一, 东北平原-山地湖区在中国水资源的利用方面发挥了重要作用。由于其所处的地理环境特点及南北经济差异所带来的污染状况不同, 位于该湖区的二类水体必然存在着与其他湖区水体不同的光学特性。因此, 本研究将立足于东北地区水体的区域背景特点, 以长春市重要水源地石头口门水库作为研究对象, 分析水体颗粒物吸收特性, 并对其区域模式进行参数化, 以便为将来发展针对东北地区水体的生物光学模型奠定一定的基础。

## 1 研究区概况与数据获取

### 1.1 研究区概况

石头口门水库位于长春市东约30km, 坐落在饮马河的中游, 是一座以供水为主兼有灌溉、旅游、防洪、发电和渔业等功能的大型水库。其地处北温带大陆半湿润季风性气候区, 年均气温5.3℃, 年降水量369.9-667.9mm, 年蒸发量为1658.1mm。每年的11月至来年的4月为其冰封期。水库最大水域面积94.2km<sup>2</sup>, 平均水深3.3m, 控制流域面积4975.6km<sup>2</sup>, 总库容12.8×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 每年可向长春市供水2.64×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 是长春市的重要水源地, 也是引松工程的重要中转站。库区呈狭长型, 下游两侧为山区和丘陵区, 山间支流两侧多有房屋和旱地。库区上游有岔路河、双阳河两大支流, 库区末端至岔路河、双阳河下游处地势平坦, 土质肥沃, 良田集中, 人口稠密。总体而言, 石头口门水库水质情况较好, 适宜做城市饮用水源。但近年来, 由于滥砍滥伐、乱开荒、无计划采石、挖沙、开矿等原因使得水库上游部分地区水土流失严重, 大量泥沙淤积, 抬高水库库底, 同时泥沙携带的农药、化肥也给库水造成一定的污染。

### 1.2 野外采样与参数测定

分别于2008年6月13日和9月23日对石头口门水库代表点位进行野外水样采集, 同步测量水体透明度(SDD)和光谱曲线, 并用GPS记录下每个点位的经纬度。2次采样点的位置基本一致。图1显示了石头口门水库和代表采样点的位置。

总悬浮物浓度(TSM)的测定采用的是称重法。即用孔径为0.45μm的聚碳酸酯滤膜过滤一定量的水样, 将载有悬浮物的滤膜于103-105℃烘干至恒重, 以0.0001g天平称重并计算总悬浮物的浓度。叶绿素a浓度(Chl.a)的测定采用的是分光光度计法, 将样品过滤到WhatmanGF/F滤膜上, 用90%的热酒精萃取, 将离心后得到的清液放置在分光光度计中测定吸光度并计算叶绿素a浓度。

颗粒物的吸收采用的是定量滤膜技术(QFT)测定<sup>[13]</sup>。用直径为47mm的GF/F玻璃纤维滤纸过滤200-500ml的水样, 在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。以750nm的吸光度为基准对其他波段进行校正, 并按下式进行放大因子校正:

$$OD_s = 0.392OD_f + 0.665OD_f^2 \quad (1)$$

其中:  $OD_s$  为校正后颗粒物的吸光度;  $OD_f$  为仪器测量的吸光度值与750nm波长处吸光度值之差。此时, 总颗粒物的光谱吸收系数  $a_p(\lambda)$  可按下式进行计算<sup>[13]</sup>:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (2)$$

其中:  $V$  为过滤水样的体积( $m^3$ );  $S$  为沉积在滤膜上颗粒物的有效面积( $m^2$ ).

再将上述载有总悬浮颗粒物的滤膜在甲醇中浸泡 1h 以萃取掉滤膜上的色素, 用同样的方法测定计算留在滤膜上非色素颗粒物的吸收系数  $a_d(\lambda)$ . 而浮游植物色素的光谱吸收  $a_{ph}(\lambda)$  可通过计算总颗粒物吸收系数与非色素颗粒物吸收系数之差得到:

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

由于浮游植物色素的比吸收系数  $a^*_{ph}(\lambda)(m^2/mg)$  表征的是单位色素浓度的吸收能力, 因此可通过下式计算:

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

其中  $Chl.a$  为叶绿素 a 浓度( $\mu g/L$ ).

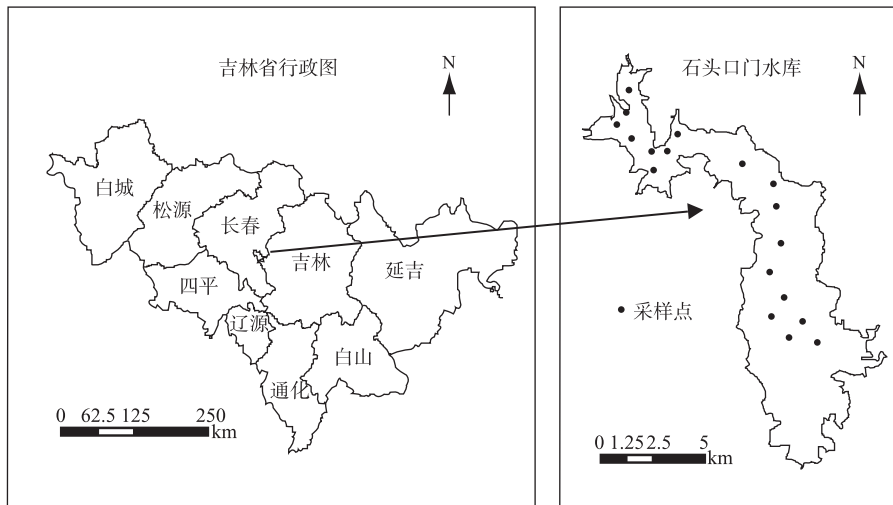


图 1 石头口门水库采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in the Shitoukoumen Reservoir

## 2 结果

表 1 是石头口门水库在两次实验中总悬浮物含量、叶绿素 a 浓度和透明度的数据统计表. 与 9 月份相比, 6 月份水体中总悬浮物含量略高, 而叶绿素 a 含量和透明度略低. 相对于水库水深而言, 低透明度表明石头口门水库是一具有光学深度的水体.

表 1 石头口门水库总悬浮物含量、叶绿素 a 浓度和透明度统计表

Tab.1 Statistic information of total suspended matters, Chl.a and SDD in Shitoukoumen Reservoir

| 采样时间  | 样点数 | TSM( $mg/L$ ) |       |       | Chl.a( $\mu g/L$ ) |       |       | SDD(m) |      |      |
|-------|-----|---------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------|------|------|
|       |     | 最大值           | 最小值   | 平均值   | 最大值                | 最小值   | 平均值   | 最大值    | 最小值  | 平均值  |
| 6月13日 | 20  | 121.00        | 12.50 | 40.03 | 36.38              | 12.90 | 24.76 | 0.84   | 0.14 | 0.34 |
| 9月23日 | 20  | 57.29         | 15.29 | 23.79 | 47.52              | 15.75 | 35.23 | 0.59   | 0.30 | 0.47 |
| 总计    | 40  | 121.00        | 12.50 | 31.91 | 47.52              | 12.90 | 29.99 | 0.84   | 0.14 | 0.41 |

### 2.1 总悬浮颗粒物吸收光谱特性

总体而言, 石头口门水库水体不同采样点的总颗粒物吸收系数变化较大, 表明总颗粒物的组成或含量存在很大时空差异(图 2). 6 月份  $a_p(440)$  的变化范围在  $1.90-13.04m^{-1}$  之间(均值为  $4.52m^{-1}$ );  $a_p(675)$  的变化范围在  $0.50-1.28m^{-1}$  之间(均值为  $0.88m^{-1}$ ). 9 月份  $a_p(440)$  的变化范围在  $2.48-5.95m^{-1}$  之间(均值为

$3.19\text{m}^{-1}$ );  $a_p(675)$ 的变化范围在  $0.54\text{--}1.22\text{m}^{-1}$  之间(均值为  $0.84\text{m}^{-1}$ )。通常总悬浮颗粒物的吸收光谱曲线有 3 种类型: ①与非色素颗粒物的吸收相似; ②与浮游植物色素的吸收相似; ③与非色素颗粒物和浮游植物色素的吸收光谱都不相似。对于石头口门水库, 图 2 和图 3 显示了在 2008 年 6 月其水体总悬浮颗粒物吸收光谱属类型①, 非色素颗粒物的吸收一般都明显大于浮游植物色素的吸收。虽然光谱曲线在  $675\text{nm}$  处仍然可以观察到由浮游植物色素吸收所造成的峰值, 但并不明显; 在另一个浮游植物色素特征吸收波段  $440\text{nm}$  则观察不到吸收峰, 主要是因为非色素颗粒物在总悬浮颗粒物中占有绝对优势, 除了  $660\text{--}695\text{nm}$  的浮游植物色素强吸收波段外, 非色素颗粒物吸收在其他波段的贡献要远远大于浮游植物, 致使浮游植物色素的吸收特征淹没在其中(图 3)。与 6 月相似, 9 月份的总颗粒物吸收光谱也属于类型①, 但浮游植物色素吸收的贡献有所增强, 光谱曲线在  $675\text{nm}$  处的吸收峰值明显增加, 在  $440\text{nm}$  左右也能观察到浮游植物色素的另一个特征吸收峰。尽管如此, 非色素颗粒物的吸收还是具有明显优势。这主要是因为作为城市重要水源地, 同时受东北气温较低以及上游水土流失的影响, 石头口门水库的藻类污染不是很严重, 而泥沙颗粒物的含量较高。

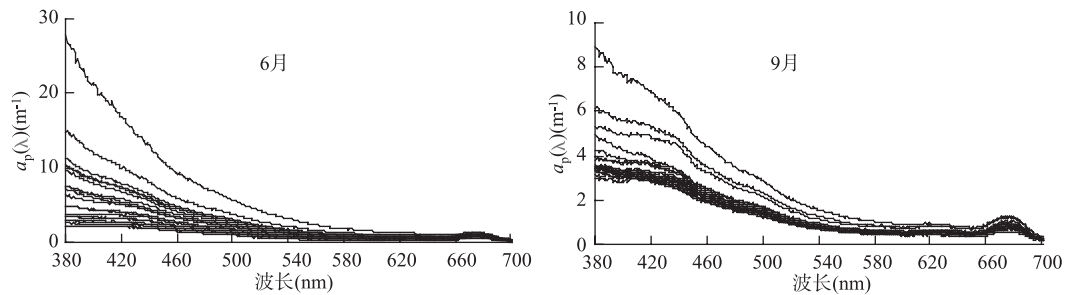


图 2 石头口门水库总悬浮颗粒物的光谱吸收曲线

Fig.2 Spectral curves of total suspended matters absorption in Shitoukoumen Reservoir

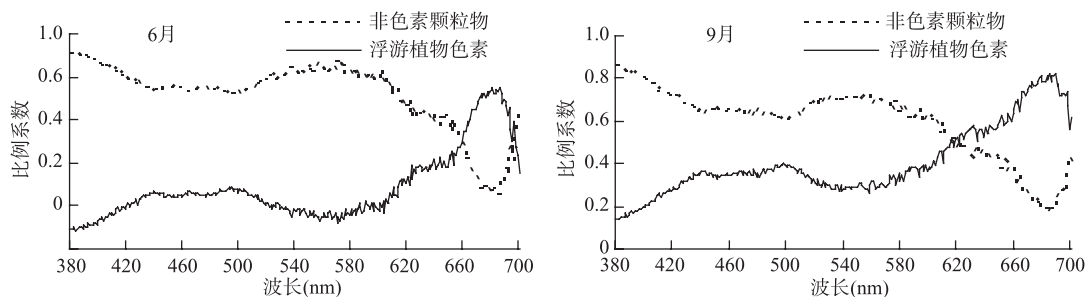


图 3 非色素颗粒物吸收和浮游植物色素吸收占总颗粒物吸收的比例

Fig.3 Absorption contribution of tripton and phytoplankton to total suspended matters

## 2.2 非色素颗粒物吸收光谱特性

与其他二类水体相类似, 石头口门水库水体非色素颗粒物的光谱吸收值随波长增大呈指数递减(图4):

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[S_d(\lambda_0 - \lambda)] \quad (5)$$

其中,  $a_d(\lambda)$  为非色素颗粒物在波长  $\lambda$  的吸收系数( $\text{m}^{-1}$ );  $\lambda_0$  是参照波长( $\text{nm}$ ), 一般取  $440\text{nm}$ ;  $S_d$  是指数函数曲线斜率参数( $\mu\text{m}^{-1}$ )。6 月份参考波长  $440\text{nm}$  处非色素颗粒物吸收系数的变化范围较大, 在  $1.13\text{--}10.95\text{m}^{-1}$  之间(均值为  $3.31\text{m}^{-1}$ ); 而 9 月份的变化范围较小( $1.57\text{--}3.85\text{m}^{-1}$ ), 均值为  $2.02\text{m}^{-1}$ , 也小于 6 月的。用最小二乘法对所有样品的非色素颗粒物吸收系数在  $400\text{--}650\text{nm}$  进行曲线拟合计算  $S_d$  值(决定系数均大于 0.98)。结果显示 6 月和 9 月  $S_d$  的变化范围都不大, 且均值相近, 分别为  $11.78\mu\text{m}^{-1}$  和  $11.38\mu\text{m}^{-1}$ 。对于一类水体, 已

有较多的研究表明, 非色素颗粒物的吸收系数与叶绿素 a 浓度之间存在明显的相关关系, 并认为一类水体的非色素颗粒物主要来源于浮游植物的降解产物. 但通过对石头口门水库水体的  $a_d(440)$  与悬浮物浓度和 Chl.a 浓度进行相关分析, 发现 2 次实验中  $a_d(440)$  与 Chl.a 相关系数仅为 0.52 和 0.06, 远低于其与总悬浮颗粒物浓度的相关系数 0.98 和 0.92, 说明对于像石头口门水库这样的二类水体, 非色素颗粒物主要是陆源性的, 但也有一少部分来自于浮游植物的降解产物. 比较分析并综合两次实验的 40 个样点, 可得以下表示  $a_d(440)$  与总悬浮物浓度(TSM)的函数关系式:

$$a_d(440) = 0.0757TSM + 0.2523 \quad (N=40, R^2=0.94) \quad (6)$$

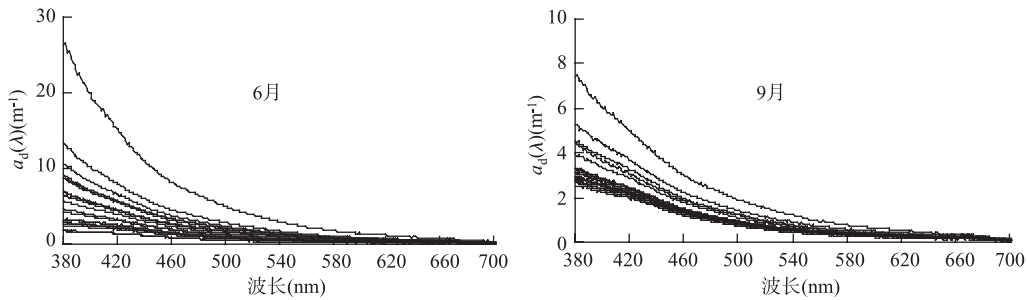


图 4 石头口门水库非色素颗粒物的光谱吸收曲线

Fig.4 Spectral curves of tripton absorption in the Shitoukoumen Reservoir

### 2.3 浮游植物色素吸收光谱特性

图 5 显示, 石头口门水库浮游植物色素在 440nm 和 675nm 处分别有吸收峰. 675nm 处的吸收主要是 Chl.a 的贡献, 但在 440nm 处, 除了 Chl.a, 还包含了其他色素成分的贡献, 因此蓝红比  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  在一定程度上反映了辅助色素与叶绿素 a 浓度的组成比例<sup>[4]</sup>. 经计算, 石头口门水库各样点间  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  值没有太大差异, 说明水库水体浮游植物组成较为一致. 已有研究表明浮游植物色素的蓝红比在外海的上层水体较大, 而在近海岸水体较小<sup>[4]</sup>. 由于石头口门水库属典型的二类水体, 性质类似于近岸水体, 其 6 月的  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  均值 1.87 低于南海北部水体的值, 也低于 Sosik 等<sup>[6]</sup>、Millán-Núñez 等<sup>[5]</sup>在加利福尼亚湾流海区的研究结果, 表明石头口门水库浮游植物色素以 Chl.a 为主. 受 Chl.a 浓度增加的影响, 9 月的  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  均值有所降低, 为 1.79. 目前已有不少区域的研究结果显示, 一类水体和二类水体的浮游植物吸收系数与 Chl.a 浓度存在非线性关系. 如 Bricaud 等人<sup>[16]</sup>对马尾藻海、河口与海湾、地中海、大西洋等海区的一类和二类水体数据的综合分析结果显示  $a_{ph}(443)$  与 Chl.a 存在很好的指数函数关系. 曹文熙等<sup>[11]</sup>发现珠江口水体浮游植物吸收系数与 Chl.a 存在较好的幂函数关系. 而本研究的结果表明, 用指数函

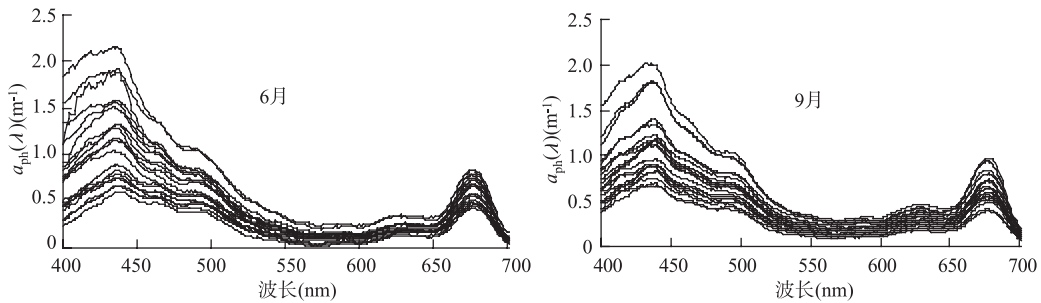


图 5 石头口门水库浮游植被的光谱吸收曲线

Fig.5 Spectral curves of phytoplankton absorption in the Shitoukoumen Reservoir

数描述石头口门水库6月和9月 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 与Chl.a的关系均最佳,说明浮游植物吸收并非随Chl.a浓度的上升而呈直线增加,其比吸收系数还是存在一定差异。

在建立水色遥感生物光学模型中,浮游植物比吸收系数 $a_{ph}^*$ 是个很关键的参数。目前二类水体叶绿素遥感精度较低,其主要原因之一就是假定浮游植物的比吸收系数为一定值,但事实上它是一生物学变量,随不同地区、不同季节、不同光照强度和浮游植物种群结构的变化而变化<sup>[6,17-18]</sup>。图6显示了石头口门水库浮游植物比吸收光谱。与吸收光谱的变化趋势相似, $a_{ph}^*$ 在440nm和675nm处分别有个吸收峰。一般贫营养水体浮游植物比吸收系数高于富营养水体<sup>[16]</sup>。例如Sasaki等<sup>[19]</sup>在北太平洋2个站点研究发现,在表层海水中 $a_{ph}^*(440)$ 的均值分别为0.042m<sup>2</sup>/mg、0.064m<sup>2</sup>/mg,在25m深度处其值分别为0.031m<sup>2</sup>/mg、0.064m<sup>2</sup>/mg。而富营养化的太湖在夏季 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 的变化范围分别为0.0135-0.0521m<sup>2</sup>/mg(均值为0.0282m<sup>2</sup>/mg)、0.0088-0.0250m<sup>2</sup>/mg(均值为0.0159m<sup>2</sup>/mg)<sup>[20]</sup>。对于石头口门水库,6月份浮游植物在蓝、红波段吸收峰处的比吸收系数 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 的变化范围分别为0.0333-0.0686m<sup>2</sup>/mg和0.0197-0.0339m<sup>2</sup>/mg,均值为0.0483m<sup>2</sup>/mg和0.0263m<sup>2</sup>/mg;9月份 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 的变化范围分别为0.0205-0.0580m<sup>2</sup>/mg和0.0122-0.0313m<sup>2</sup>/mg,均值为0.0337m<sup>2</sup>/mg和0.0187m<sup>2</sup>/mg。比吸收系数表现出来的总体趋势为低于海洋的值,但高于太湖的值。

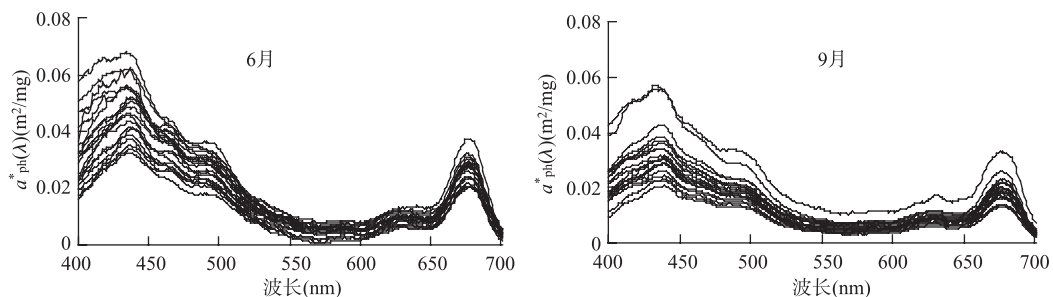


图6 石头口门水库浮游植被比吸收系数曲线

Fig.6 Spectral curves of phytoplankton specific absorption in the Shitoukoumen Reservoir

### 3 讨论

石头口门水库水体2个月份的非色素颗粒物吸收光谱存在较大差异,而浮游植物色素吸收光谱差异不大,导致2个月份的总颗粒物吸收光谱也存在较大差异。这是由于该地区在2008年6月上旬之前低温多雨,水库上游水土流失加剧,水体中泥沙含量较高,而泥沙作为水库中非色素颗粒物的主要成分则产生较高的吸收。9月份该地区降水偏少,使得水库上游水土流失得到一定的缓解,泥沙含量有所减少,产生较小的吸收。

虽然石头口门水库浮游植物色素吸收和比吸收在2个月份的平均吸收水平没有太大差异,但不同点位之间还是存在一定的差异,尤其是在440nm和675nm处的2个吸收峰。经相关分析发现,比吸收系数与Chl.a浓度存在明显的非线性关系,即单位浓度色素对光的吸收系数存在变动,其主要原因是色素的打包效应。该效应与细胞内色素的成分、浓度及细胞的粒径有关。与其他类似水体相比,石头口门水库水体 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$ 变化范围不大,色素打包效应不是很明显。其主要原因是石头口门水库水体的色素组成较稳定,富营养化程度不是很高,而一般认为贫营养水体的藻类细胞较小,打包效应影响小;中、高营养的藻类细胞大,打包效应影响也大<sup>[21]</sup>。此外,本研究中的水样均来自于表层水,而在水体垂直结构上,因为光适应性,表层藻类细胞色素浓度相对深层的藻类细胞内色素浓度低,打包效应也较小<sup>[22]</sup>。

与海洋或其它二类水体相比,例如太湖<sup>[20]</sup>、南海北部<sup>[10,14]</sup>、珠江口<sup>[11]</sup>、Erie<sup>[23]</sup>、Lee和Carder报道中的Baja California<sup>[24]</sup>等,石头口门水库水体非色素颗粒物吸收系数变化不大,与总悬浮颗粒物的吸收均要明显高于海洋水体和大部分其他二类水体,略低于太湖,非色素颗粒物的指数衰减曲线斜率 $S_d$ 与太湖相近,略低于珠江口,高于其他水体;浮游植物色素的吸收也高于海洋水体,而低于像太湖这样污染严

重的水体. 解释上述原因为石头口门水库作为典型的内陆二类水体, 其颗粒物含量和 Chl.a 浓度要明显高于一类海洋水体, 但同时作为城市水源地其水质污染状况相对于国内位于长三角和珠三角等经济发展比较迅速的二类水体而言要略好一些.

#### 4 结论

作为长春市重要水源地, 石头口门水库的藻类污染不是很严重. 由于上游水土流失较为严重, 水库总悬浮物含量普遍较高. 其总颗粒物的吸收中, 除了浮游植物强吸收的红波段外, 非色素颗粒物的吸收在其他波段的贡献要明显大于浮游植物. 非色素颗粒物的指数函数曲线斜率参数  $S_d$  在 2008 年 6 月和 9 月的 2 次实验中较为接近, 分别为  $11.78\mu\text{m}^{-1}$  和  $11.38\mu\text{m}^{-1}$ . 在非色素颗粒物的组成中, 陆源性有机和无机颗粒物占有主要成分, 但也有少部分来自于浮游植物的降解产物.  $a_d(440)$  与悬浮物浓度存在较好的函数关系, 而与 Chl.a 的相关性较差. 浮游植物色素的吸收系数较低, 在蓝红波段的吸收峰分别位于 440nm 和 675nm 左右, 其比值没有太大差异, 水库水体浮游植物色素组成较为一致, 以 Chl.a 为主.  $a_{ph}(440)$  和  $a_{ph}(675)$  与 Chl.a 存在较好的指数函数关系, 其浮游植物比吸收系数并非一定值, 而是存在一定差异.

#### 5 参考文献

- [1] Miller RL, McKee BA. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**: 259-266.
- [2] Brivio PA, Giardino C, Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(2,3): 487-502.
- [3] Ma R, Tang J, Dai J. Bio-optical model with optical parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4305-4328.
- [4] Dall'Olmo G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 412-422.
- [5] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [6] Sosik HM, Mitchell BG. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current system. *Deep-Sea Research*, 1995, **42**(10): 1717-1748.
- [7] Bowers DG, Harker GEL, Stephan B. Absorption spectra of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**: 2449-2460.
- [8] 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*, 2003, **108**: 1-20.
- [9] 马荣华, 唐军武. 湖泊水色遥感参数获取与算法分析. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 720-726.
- [10] 王桂芬, 曹文熙, 许大志等. 南海北部海区非藻类颗粒物吸收系数的变化特性. *海洋技术*, 2007, **26**(1): 45-49, 53.
- [11] 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.
- [12] Ma R, Tang J, Dai J *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: absorption. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [13] Cleveland JS, Weidemann AD. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnol & Oceanogr*, 1993, **38**(6): 1321-1327.
- [14] 王桂芬, 曹文熙, 许大志等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化. *热带海洋学报*, 2005, **24**(5): 1-10.
- [15] Mill  $\acute{a}$  n-N  $\acute{u}$  ñez E, Sierackib EM, Mill  $\acute{a}$  n-N  $\acute{u}$  ñez R *et al.* Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Research*(II), 2004, **51**: 817-826.
- [16] Bricaud A, Babin M, Morel A *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *J Geophys Res*, 1995, **100**: 13321-13332.
- [17] Lutz VA, Sathyendranath S, Head EJJ. Absorption coefficient of phytoplankton: regional variations in the North Atlantic. *Mar Ecol Prog Ser*, 1996, **135**: 197-213.



- [18] Stuart V, Sathyendranath S, Head EJH *et al.* Bio-optical characteristics of diatom and prymnesiophyte populations in the Labrador Sea. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, **201**: 91-106.
- [19] Sasaki H, Saitoh SI, Kishino M. Bio-optical properties of seawater in the western subarctic Gyre and Alaskan Gyre in the subarctic north Pacific and the southern Bering sea. *Journal of Oceanography*, 2001, **57**: 275-284.
- [20] 张运林. 太湖水体生物—光学特性及其生态学意义[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [21] Morel A, Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep Sea Res*, 1981, **28A**(11): 1375-1393.
- [22] Allali K, Bricaud A, Claustre H. Spatial variations in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific. *J Geophys Res*, 1997, **102**: 12413-12423.
- [23] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2007, doi: 10.1016/j.res.2007.08.017.
- [24] Lee ZP, Carder KL. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**: 361-368.