

## 官厅水库秋季悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性\*

雷霞, 郭子祺, 田野, 谢飞, 秦静欣

(中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 利用 2012 年 9 月 5 日在官厅水库采集的水体吸收系数数据, 对总悬浮颗粒物、浮游植物色素颗粒物、非色素颗粒物和有色可溶性有机物的吸收特性进行研究. 结果表明: 秋季官厅水库的颗粒物吸收以浮游植物色素吸收为主, 总颗粒物吸收光谱与浮游藻类吸收光谱相似; 非色素颗粒物和有色可溶性有机物的吸收系数随波长的增大接近指数规律衰减;  $a_d(440)$ 、 $a_d(675)$  与  $C_{\text{Chl. a}}$  呈显著相关, 表明官厅水库秋季的非色素颗粒物主要来源于浮游藻类降解产物, 陆源性输入较少;  $a_{\text{ph}}(440)$ 、 $a_{\text{ph}}(675)$  与  $C_{\text{Chl. a}}$  存在显著线性关系, 但其比吸收系数较为恒定, 与  $C_{\text{Chl. a}}$  基本无关; 不同采样点的不同组分吸收系数对总吸收系数的贡献不同, 大致有 4 种表现类型. 在富营养程度较高的妫库区, 浮游植物色素是水体光谱吸收的主导因子; 在富营养程度较低的中库区, 颗粒物与有色可溶性有机物共同主导水体光谱吸收.

**关键词:** 官厅水库; 秋季; 颗粒物; 有色可溶性有机物; 吸收系数

## Absorption characteristics of particulates and the CDOM in autumn in Guanting Reservoir

LEI Xia, GUO Ziqi, TIAN Ye, XIE Fei & QIN Jingxin

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China)

**Abstract:** Field work was carried out in Guanting Reservoir on September 5, 2012 to study the absorption characteristics of total particulates, phytoplankton pigment, tripton and chromophoric dissolved organic matter (CDOM). The results show that: (1) In autumn, phytoplankton pigment absorption plays a major role in total particulates absorption, thus the absorption of total particulates has the similar characteristics as that of phytoplankton pigment. (2) The absorption coefficients of CDOM and tripton decreased exponentially with wavelength increasing. The slope coefficient of tripton absorption spectral  $S_d$  is much smaller than that of other eutrophic waters (eg. Lake Taihu, Lake Dianchi, Lake Chaohu). The slope coefficient of CDOM absorption spectral  $S_g$  is similar to Lake Taihu and Lake Chaohu. (3) Significant linear relationship was found between  $a_{\text{ph}}(440)$ ,  $a_{\text{ph}}(676)$  and  $C_{\text{Chl. a}}$ , but the specific absorption of phytoplankton ( $a_{\text{ph}}^*$ ) at 440 nm and 675 nm keeps a stable level and has no obvious relationship with  $C_{\text{Chl. a}}$ . (4) Significant linear relationship was also found between  $a_d(440)$ ,  $a_d(676)$  and  $C_{\text{Chl. a}}$ , which indicates tripton in autumn Guanting Reservoir mainly comes from the degradation of phytoplankton. (5) Absorption coefficients of different components from different sites of Guanting Reservoir show four different types of contributions to the total absorption coefficients. In more eutrophic area (Gui Area), phytoplankton dominates water's light absorption, while in less eutrophic area (Zhong Area), particles and CDOM play the same important roles in light absorption.

**Keywords:** Guanting Reservoir; autumn; particulates; CDOM; absorption coefficient

自然水体的光谱吸收特性是水体固有光学特性的一种, 它不随光照条件的变化而变化, 只和水体水质组分的种类和浓度有关系, 是水质参数遥感反演的基础<sup>[1]</sup>. 不同于 I 类大洋水体, 在近岸的 II 类水体和内陆的湖泊水体中, 由于陆源的非色素颗粒物和有色可溶性有机物的大量输入, 导致水体的固有光学特性不再仅由浮游植物色素决定<sup>[2]</sup>. 现有研究结果表明, 影响内陆水体固有光学特性的物质主要有 4 种: 纯水、浮游植物色素、非色素颗粒物及有色可溶性有机物 (CDOM). 在给定波段, 内陆水体总的吸收系数等于各组分在

\* 国家自然科学基金项目(40971226)资助. 2013-02-04 收稿; 2013-04-25 收修改稿. 雷霞, 女, 1988 年生, 硕士研究生; E-mail: echo1988echo@163.com.

该波段的吸收系数之和<sup>[3]</sup>,即  $a = a_w + a_{ph} + a_d + a_{CDOM}$ ,其中  $a_w$ 、 $a_{ph}$ 、 $a_d$  和  $a_{CDOM}$  分别为纯水、浮游植物色素、非色素颗粒物和有色可溶性有机物的吸收系数。

官厅水库是新中国成立后建设的第一座大型水库,曾经是北京市的主要供水水源之一。1972 年以来,官厅水库的水质开始受到污染,到了 1990s 污染加重,被迫于 1997 年退出了北京市饮用水供水。经过几年的治理,水库整体水质好转,达到地表水Ⅲ类水质标准。但部分区域污染仍十分严重,富营养化程度较高<sup>[4-7]</sup>。所以在北京市饮用水告急,仅靠密云水库供水已不能满足用水需要的情况下,加强对官厅水库的监测及修复工作十分必要<sup>[7]</sup>。遥感技术能够快速、宏观、动态地获得整个水域水质的时空变化情况<sup>[1]</sup>,是有效监测水质的重要技术手段。但目前国内对于官厅水库水体中光学活性物质吸收特性的研究甚少,并且相比于国内富营养化较为严重的内陆湖泊水体如太湖、巢湖、滇池等,官厅水库属于轻度污染的Ⅱ类水体,其吸收特性是否与Ⅱ类水体相似,能否直接应用现有的生物-光学模型进行水质参数的遥感反演,还是有待解决的问题。

本文利用 2012 年 9 月官厅水库的野外采样数据,系统分析了官厅水库水体中光学活性物质的吸收特性与空间分布规律,建立了反映官厅水库水体吸收特性的光谱模型,为进一步建立官厅水库水质遥感监测提供数据基础。

## 1 实验与方法

### 1.1 官厅水库概况

官厅水库(40°13'~40°25'N,115°34'~115°50'E)位于河北省张家口市和北京市延庆县界内,建于 1951 年 10 月,1954 年 5 月竣工。入库河流为河北怀来永定河以及北京市延庆县妫水河,控制流域面积 43402 km<sup>2</sup>,总库容 41.6 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,设计水库面积 238 km<sup>2</sup>。水库建于北京市西北约 80 km 的永定河官厅山峡入口处,四周群山环抱,山峦起伏,使得水库呈现中间狭长、两头宽阔的形状。水库总长 28 km,平均宽度 3 km,9 月份采样时水面面积约 80 km<sup>2</sup>,平均水深 7~8 m,年降水量 401.9 mm,年蒸发量 1483.6 mm。水库水体中优势水生植物包括狐尾藻、菹草、大茨藻等沉水植物,槐叶萍、浮萍等漂浮植物以及芦苇、香蒲等挺水植物<sup>[8]</sup>;浮游藻类优势藻种主要有蓝藻、绿藻和硅藻<sup>[4,9-10]</sup>。造成官厅水库水质恶化的主要原因是上游地区工业、城乡生活污水以及农田化肥农药使用过量,使水体被有机污染和富营养化<sup>[11]</sup>。

### 1.2 采样时间和点位

2012 年 9 月 5 日在官厅水库共布设 18 个采样点,进行水样和水面同步光谱的采集。官厅水库分为北部与妫水河相通的妫库区、中库区以及南部与永定河相通的永库区。由于水库蓄水量逐年下降,近两年来中库区与永库区连接处几近断流,船只无法通过,故采样点主要分布在妫库区和中库区(图 1)。

### 1.3 采样和测量方法

使用标准采水器从水面至水下 20 cm 处采集水样,在 0~4℃ 下避光保存并在采样当天送至实验室进行过滤预处理,然后放入冰箱内冷藏保存。水样各主要组分固有光学特性以及总悬浮颗粒物浓度( $C_s$ )、叶绿素 a 浓度( $C_{Chl.a}$ ) 在 3 d 之内测定完毕。采样的同时测定透明度、水温、水深等参数。

总悬浮颗粒度和非色素颗粒物吸收系数采用定量滤膜技术(Quantitative Filter Technique, QFT)测定,其中,采用甲醇萃取法从总悬浮颗粒物中分离非色素颗粒物,即将滤膜上的浮游植物色素利用甲醇萃取、过滤之后得到非色素颗粒物。CDOM 吸收系数采用 GF/F 滤膜过滤的水样在分光光度计下测定吸光度然后根据公式计算得到,具体测定方法及计算公式参照文献[12]。

叶绿素 a 浓度采用热乙醇萃取的分光光度法测量吸光度,浓度的计算采用文献[13]中的公式:

$$C_{Chl.a} = \frac{V_{Ethanol} [11.95(OD_{664} - OD_{750}) - 1.54(OD_{647} - OD_{750}) - 0.08(OD_{630} - OD_{750})]}{V_{water}/1000} \quad (1)$$

式中, $V_{water}$  和  $V_{Ethanol}$  分别为过滤水样的体积与加入乙醇的体积,单位为 ml。计算所得叶绿素 a 浓度单位为 mg/m<sup>3</sup>。总悬浮颗粒物浓度采用过滤重量法测定。从北部的 1<sup>#</sup>到南部的 18<sup>#</sup>,透明度和水深呈现逐渐增大的趋势,叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度则在逐渐减小(图 2)。

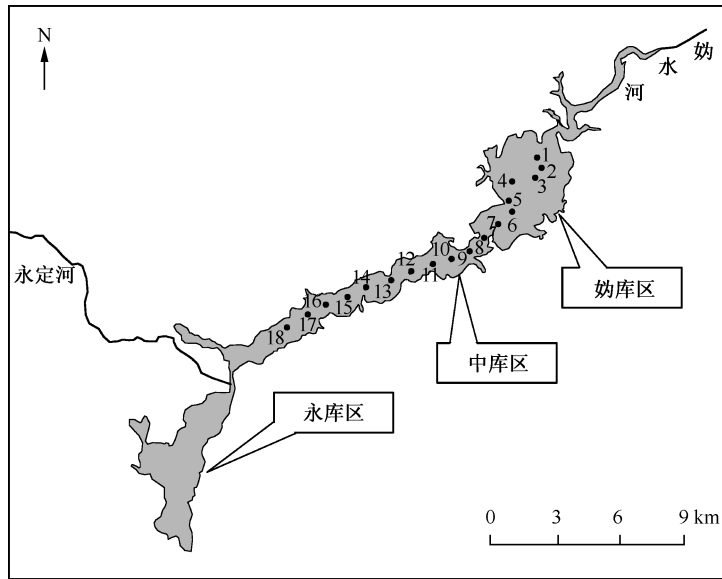


图 1 官厅水库采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Guanting Reservoir

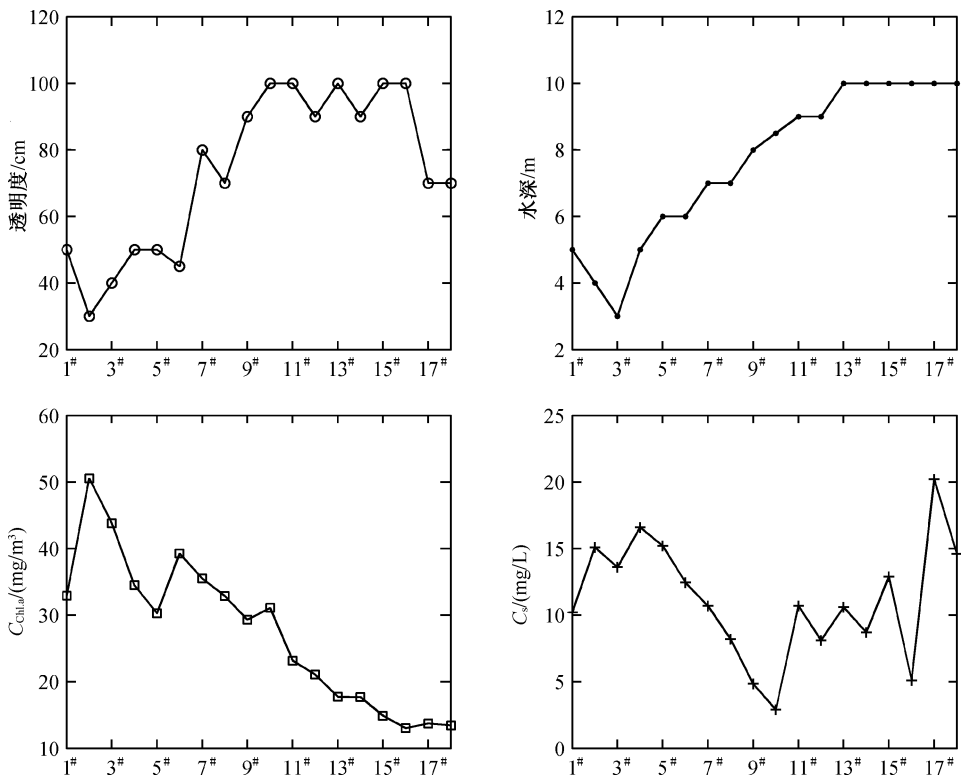


图 2 官厅水库各采样点透明度、水深、叶绿素 a 浓度和总悬浮颗粒物浓度

Fig. 2 Transparency, depth of water,  $C_{chl.a}$  and  $C_s$  of sampling sites in Guanting Reservoir

#### 1.4 数据分析方法

各参数的均值、标准差、方差、相关系数分析、线性及非线性拟合采用 Matlab 和 SPSS 软件计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 总颗粒物吸收

官厅水库秋季 18 个采样点总悬浮颗粒物吸收系数( $a_p$ )、非色素颗粒物吸收系数( $a_d$ )、浮游植物色素吸收系数( $a_{ph}$ )和 CDOM 吸收系数( $a_{CDOM}$ )的光谱曲线见图 3。从  $a_p$  的形状来看, 18 个站点的总颗粒物吸收曲线变化趋势大致相同, 且均与浮游植物色素的吸收曲线相似, 未发现与非色素颗粒物吸收曲线类似的站点。不同采样点总颗粒物的光谱吸收系数差异较大,  $a_p(440)$  的值在  $0.70 \sim 2.58 \text{ m}^{-1}$  之间变化, 均值为  $1.5175 \pm 0.5990 \text{ m}^{-1}$ , 低于国内已有固有光学特性测量数据的太湖梅梁湾<sup>[12]</sup> ( $3.58 \sim 9.86 \text{ m}^{-1}$ ) 和滇池 ( $3.4 \sim 8.4 \text{ m}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>, 与巢湖 (均值  $2.2 \text{ m}^{-1}$ )<sup>[14]</sup> 和部分云南高原湖泊 (均值  $1.39 \pm 1.44 \text{ m}^{-1}$ )<sup>[15]</sup> 较为接近, 大于三峡库区水体 ( $0.22 \sim 0.43 \text{ m}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>。曲线在 420、628 和 676 nm 处出现吸收峰, 在 480 nm 处出现肩峰, 在 550 和 650 nm 附近出现吸收系数极小值, 与滇池的总颗粒物吸收曲线<sup>[1]</sup> 相似。

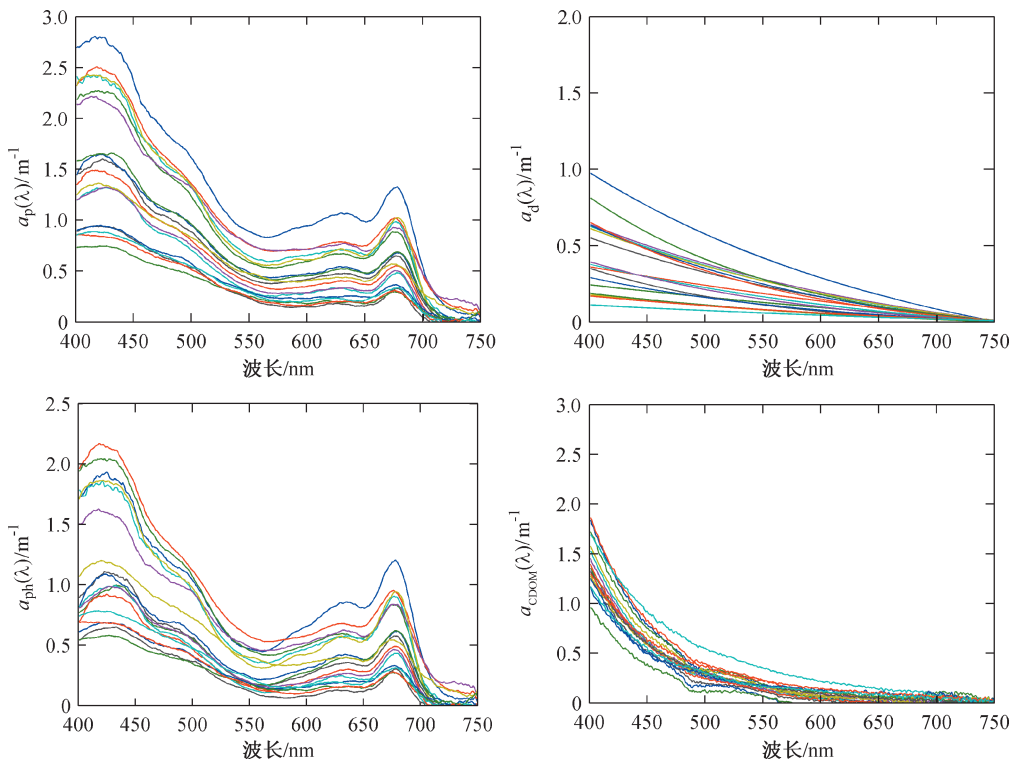


图 3 官厅水库秋季总颗粒物、非色素颗粒物、浮游植物色素和 CDOM 的光谱吸收系数

Fig. 3 Absorption spectras of total particles, depigment particles, phytoplankton and CDOM in autumn in Guanting Reservoir

通过对各采样点总颗粒物吸收系数均值、非色素颗粒物吸收系数均值、浮游植物色素吸收系数均值的比较可知, 官厅水库 9 月份的总颗粒物吸收以浮游植物色素吸收为主, 非色素颗粒物吸收作用相对较弱, 属于“总颗粒物吸收光谱与浮游植物色素吸收光谱相似”的吸收模式 (图 4)。采样点实测数据表明, 9 月份官厅水库水体中叶绿素 a 浓度较高 ( $13.04 \sim 50.56 \text{ mg/m}^3$ ), 悬浮颗粒物含量较低 ( $2.9 \sim 20.2 \text{ mg/L}$ ), 总颗粒物吸收模式与这一现象相符合。

表 1 计算了各组分特征波长吸收系数、叶绿素浓度和总悬浮物浓度之间的相关系数。与其它水体在

440 nm处存在吸收峰不同,官厅水库水体在短波段的吸收峰出现在 420 nm 处,因此也对  $a_p(420)$  与  $a_{ph}(420)$  进行了相关分析. 结果表明,  $a_p(420)$ 、 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 、 $a_{ph}(420)$ 、 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  与  $C_{Chl.a}$  均存在较高的正相关性 ( $R^2 > 0.79$ ),而与总悬浮物浓度的相关程度则一般(表 1). 进一步表明颗粒物吸收以浮游植物色素吸收为主,以非色素颗粒物吸收为辅.

## 2.2 非色素颗粒物吸收

与其它 II 类水体的非色素颗粒物吸收特性相类似,官厅水库采样点的  $a_d$  均呈现吸收系数随波长增长而减小的趋势.  $a_d(440)$  的变化范围为  $0.096 \sim 0.797 \text{ m}^{-1}$ ,均值为  $0.37 \pm 0.19 \text{ m}^{-1}$ ,远低于太湖、巢湖、滇池、云南高原湖泊水体,与三峡坝区、珠江口悬浮水体<sup>[17]</sup>较接近. 许多实测数据模拟表明,  $a_d(\lambda)$  随波长的变化分布十分接近指数衰减规律,且不同波段的吸收系数之间存在一定的关系. 本文选择在水色研究中较为重要的 440 nm 作为建立吸收模型的参考波段,对官厅水库各采样点的非色素颗粒物吸收曲线进行指数拟合:

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp(-S_d(\lambda - \lambda_0)) \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  为 440 nm,  $S_d$  为斜率. 拟合结果表明,各采样点非色素颗粒物吸收曲线指数拟合的指数斜率  $S_d$  值的变化范围是  $5.2 \sim 8.3 \mu\text{m}^{-1}$ ,均值为  $6.7 \pm 0.83 \mu\text{m}^{-1}$ ,非线性拟合的决定系数大于 0.97(图 5). 与国内其它水体,如太湖  $11.7 \pm 0.6 \mu\text{m}^{-1}$ 、滇池  $12.5 \pm 0.6 \mu\text{m}^{-1}$ 、巢湖  $11.9 \pm 1.0 \mu\text{m}^{-1}$ 、珠江口  $12.0 \pm 2.0 \mu\text{m}^{-1}$  和三峡水库  $11.5 \pm 1.6 \mu\text{m}^{-1}$  等相比,官厅水库水体的  $S_d$  值要低很多.

相关分析结果表明,  $a_d(440)$ 、 $a_d(675)$  与悬浮物浓度几乎不相关,呈现离散状;但与叶绿素浓度具有较高相关性,并且  $a_d(675)$  与  $C_{Chl.a}$  的相关性明显高于  $a_d(440)$ ,说明官厅水库 9 月份水体中浮游植物的降解产物对非色素颗粒物的贡献较大,陆源性的输入对非色素颗粒物的吸收影响不大.

表 1 颗粒物吸收系数与各组分浓度之间的线性相关系数

Tab. 1 Determination coefficients of absorption and components concentration

	$a_p(420)$	$a_{ph}(420)$	$a_p(440)$	$a_d(440)$	$a_{ph}(440)$	$a_p(675)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(675)$	$a_{CDOM}(440)$	$C_s$	$C_{Chl.a}$
$a_p(420)$	1.0000										
$a_{ph}(420)$	0.9526	1.0000									
$a_p(440)$	0.9993	0.9504	1.0000								
$a_d(440)$	0.6826	0.4278	0.6854	1.0000							
$a_{ph}(440)$	0.9571	0.9986	0.9569	0.4443	1.0000						
$a_p(675)$	0.9903	0.9275	0.9891	0.7154	0.9315	1.0000					
$a_d(675)$	0.8544	0.6722	0.8543	0.9280	0.6809	0.8842	1.0000				
$a_{ph}(675)$	0.9914	0.9416	0.9901	0.6843	0.9451	0.9989	0.8608	1.0000			
$a_{CDOM}(440)$	0.5971	0.6321	0.6091	0.2566	0.6470	0.5653	0.4331	0.5714	1.0000		
$C_s$	0.4432	0.5845	0.4308	-0.0896	0.5638	0.3872	-0.0044	0.4038	0.3568	1.0000	
$C_{Chl.a}$	0.8509	0.8409	0.8543	0.5037	0.8501	0.7926	0.6488	0.7970	0.5147	0.3803	1.0000

## 2.3 浮游植物色素吸收

官厅水库浮游植物色素的吸收光谱与总颗粒物吸收光谱相似,表现为:在 420、628 和 676 nm 处出现吸收峰,在 480 nm 处出现吸收肩峰,在 550 nm 和 650 nm 附近出现吸收谷.  $a_{ph}(420)$ 、 $a_{ph}(675)$  的变化范围分别为  $0.58 \sim 2.16$ 、 $0.27 \sim 1.19 \text{ m}^{-1}$ ,均值为  $1.22 \pm 0.54$ 、 $0.6 \pm 0.28 \text{ m}^{-1}$ ,对应叶绿素 a 浓度变化范围为  $13.04 \sim$

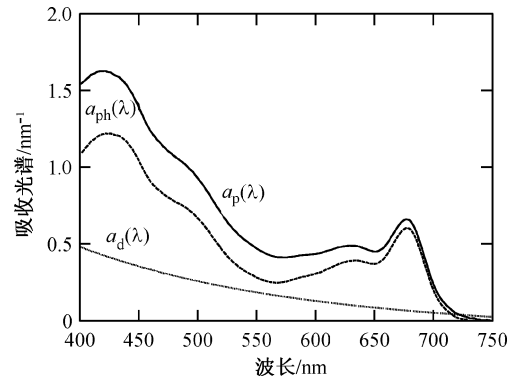


图 4 总悬浮物的典型吸收模式

Fig. 4 A typical absorption spectra pattern for total particulate

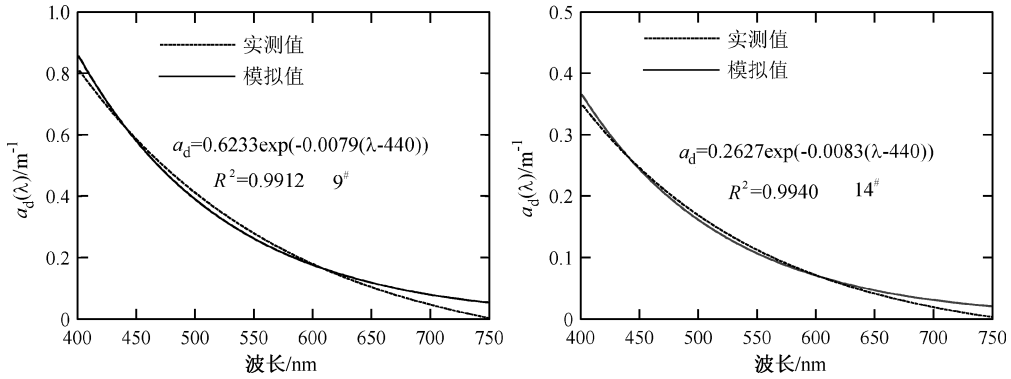


图5  $a_d(440)$  指数拟合(以9<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>为例)

Fig. 5 Simulation of  $a_d(440)$

50.56 mg/m<sup>3</sup>, 均值为 27.49 ± 11.20 mg/m<sup>3</sup>.

浮游植物色素吸收系数主要受水体中浮游藻类的浓度及种群组成的影响,随叶绿素浓度变化而变化<sup>[12]</sup>. 官厅水库浮游藻类种类以蓝藻和绿藻为主,650 nm 处的吸收谷和 628 nm 处的吸收峰由蓝藻造成; 480 nm 处的吸收肩峰由绿藻造成. 吸收系数  $a_{ph}(420)$ 、 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  与  $C_{Chl.a}$  均有较好相关性. 浮游植物色素比吸收系数  $a_{ph}^*(420)$ 、 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$  与  $C_{Chl.a}$  则几乎不相关(图 6). 说明官厅水库秋季浮游植物色素比吸收系数相对较为恒定,  $a_{ph}^*(420)$ 、 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$  的均值分别为 0.0453 ± 0.0107、0.0430 ± 0.0959 和 0.0220 ± 0.0054 m<sup>2</sup>/mg.

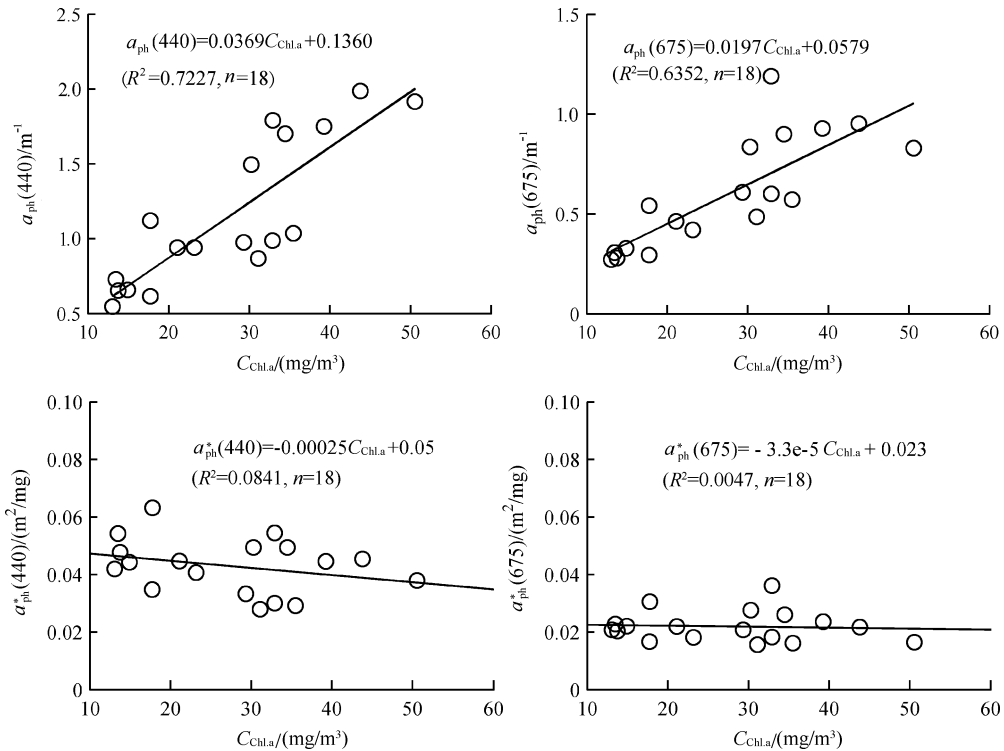


图6  $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 、 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(675)$  与  $C_{Chl.a}$  的线性关系

Fig. 6 Linear relationships between  $a_{ph}(440)$ ,  $a_{ph}(675)$ ,  $a_{ph}^*(440)$ ,  $a_{ph}^*(675)$  and  $C_{Chl.a}$

## 2.4 CDOM 吸收

与其它水体研究结果一致,官厅水库 CDOM 的吸收光谱  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$  也呈现随波长增加按指数规律递减的趋势,在长波 700 nm 处趋于零,越接近短波差异越明显.  $a_{\text{CDOM}}(440)$  的变化范围为  $0.4547 \sim 1.0279 \text{ m}^{-1}$ ,均值为  $0.7211 \pm 0.1420 \text{ m}^{-1}$ . 相关分析结果显示,  $a_{\text{CDOM}}(400)$  与  $C_{\text{Chl.a}}$  的相关性要高于  $a_{\text{CDOM}}(440)$ , 决定系数可达 0.5238 (图 7a), 表明浮游藻类降解对 CDOM 源也有一定贡献. 分别以 400、440 nm 作为参考波段对  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$  做指数拟合:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) \exp(-S_g(\lambda - \lambda_0)) \quad (3)$$

结果表明,参考波段的选择对形状因子  $S_g$  的影响并不明显 (图 7b). 400 nm 处  $S_g$  的变化范围为  $11.1 \sim 19.6 \mu\text{m}^{-1}$ , 均值为  $15.9 \pm 2.25 \mu\text{m}^{-1}$ ; 440 nm 处变化范围为  $10.5 \sim 19.6 \mu\text{m}^{-1}$ , 均值为  $15.5 \pm 2.64 \mu\text{m}^{-1}$ . 440 nm 处  $S_g$  值与太湖 ( $15.5 \pm 1.2 \mu\text{m}^{-1}$ )、巢湖 ( $15.4 \pm 1.3 \mu\text{m}^{-1}$ )、三峡水库 ( $15.9 \mu\text{m}^{-1}$ ) 持平, 比滇池 ( $12.5 \pm 0.6 \mu\text{m}^{-1}$ )、淀山湖<sup>[18]</sup> ( $11.8 \mu\text{m}^{-1}$ ) 和昆承湖<sup>[19]</sup> ( $12.2 \mu\text{m}^{-1}$ ) 略大. 各采样点  $S_g$  拟合决定系数  $R^2$  均大于 0.99, 因此在水色参数反演中可用  $a_{\text{CDOM}}(400)$ 、 $a_{\text{CDOM}}(440)$  估算 400 ~ 750 nm 可见光范围内的其余波段的  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ .

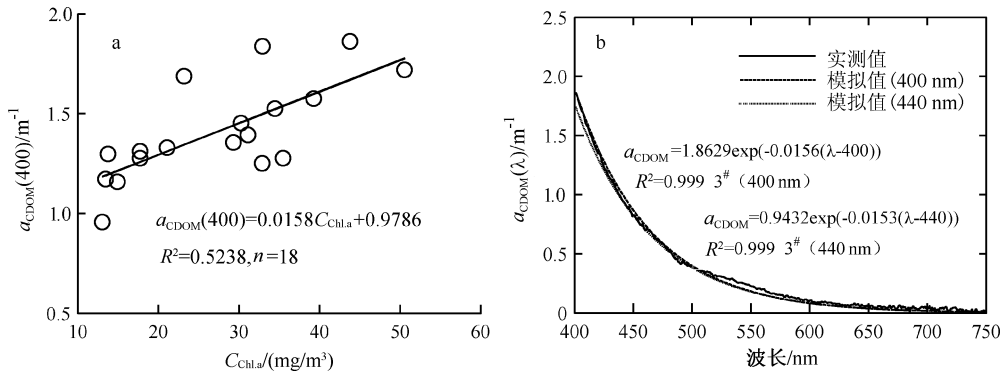


图 7  $a_{\text{CDOM}}(400)$  与  $C_{\text{Chl.a}}$  的线性关系 (a);  $a_{\text{CDOM}}(400)$ 、 $a_{\text{CDOM}}(440)$  指数拟合 (以 3# 为例) (b)

Fig. 7 Linear relationship between  $a_{\text{CDOM}}(400)$  and  $C_{\text{Chl.a}}$  (a); simulation of  $a_{\text{CDOM}}(400)$ ,  $a_{\text{CDOM}}(440)$  (b)

## 2.5 不同组分吸收系数对总吸收系数的贡献

计算不同组分吸收系数贡献率能从一定程度上衡量太阳光的有效利用率<sup>[19]</sup>, 并定性定量估算造成水下光衰减的主要影响因子, 可以为遥感反演中波段选择提供理论依据. 本文中  $a_w$  采用 Pope 等的测量结果<sup>[20]</sup>. 2012 年 9 月官厅水库不同采样点的吸收系数主导组分在不同波段各有差异. 按照总吸收系数在不同波段主导因子的不同, 可将各采样点组分贡献模式大致归纳为 4 种类型 (图 8).

在以 1#、4#、5#、6# 为典型代表的 (a) 和以 2#、3# 为典型代表的 (b) 两种类型中, 在 400 ~ 700 nm 之间,  $a_{\text{ph}}$  的贡献率都大于 50%, 是吸收系数的主导因子. 原因可能是由于 1# ~ 6# 点位于官厅水库北部与妫水河相通的妫库区, 妫库区上游妫水河段由于邻近县城, 生活污水和工业废水排放较多, 水体中亚硝酸盐含量较高. 有文献报道<sup>[4-7]</sup>, 近几年来妫库区富营养程度一直较高, 并有逐年加重的趋势; 加之库区内有水产养殖区, 从而导致与妫水河相通的妫库区浮游植物含量较高, 各采样点实测  $C_{\text{Chl.a}}$  值的变化趋势也证明了这一现象. (a) 与 (b) 的主要区别在于, 属于 (b) 类型的 2#、3# 的非色素颗粒物的贡献率要远小于属于 (a) 类型的 1#、4#、5#、6#, 尤其是在浮游植物色素吸收较弱的 550 nm 处. 这可能是由于 2#、3# 的  $C_{\text{Chl.a}}$  要远高于周围的 1#、4#、5#、6#, 浮游植物色素贡献率偏高, 相比之下非色素颗粒物贡献率降低. 以 7# ~ 12# 为代表的 (c) 和 13# ~ 18# 为代表的 (d) 类型中,  $a_{\text{ph}}$  的贡献不再是总吸收系数的主导因子. (c) 类型表现为, 在 400 ~ 600 nm 之间,  $a_{\text{ph}}$ 、 $a_{\text{d}}$ 、 $a_{\text{CDOM}}$  的贡献率较为均衡, 600 ~ 700 nm 之间  $a_{\text{ph}}$  与  $a_w$  贡献率持平, 共同占主要地位; (d) 类型表现为, 在 400 ~ 600 nm 之间,  $a_{\text{ph}}$  与  $a_{\text{CDOM}}$  贡献率较为接近, 共同成为主导因子, 600 ~ 700 nm 之间  $a_w$  是主导因子, 其次是  $a_{\text{ph}}$ 、

$a_d$  与  $a_{CDOM}$  逐渐趋于零,  $a_d$  在整个可见光波段的贡献率均比较小. 导致 (c) 和 (d) 类型出现的原因可能是, 7# 以后的各采样点位于官厅水库的中库区, 两岸是芦苇荡和河滩, 生活污水和工业废水的排放量小很多, 水库水体中有机物含量逐渐被稀释, 浮游植物色素含量降低,  $a_{ph}$  对总吸收系数的贡献率减小,  $a_d$ 、 $a_{CDOM}$  与  $a_w$  贡献率相对升高.

在 4 种类型中,  $a_{CDOM}$  的贡献率均随波长的增加逐步降低, 没有太明显的峰谷起伏现象.  $a_{ph}$  在 675 nm 处均有明显的吸收系数贡献峰值, 可作为  $C_{chl.a}$  遥感反演的参考波段. 在叶绿素浓度较低的区域,  $a_{CDOM}$  与  $a_{ph}$  贡献率较为接近, 在遥感反演时可能会互相干扰, 需予以注意和区分.

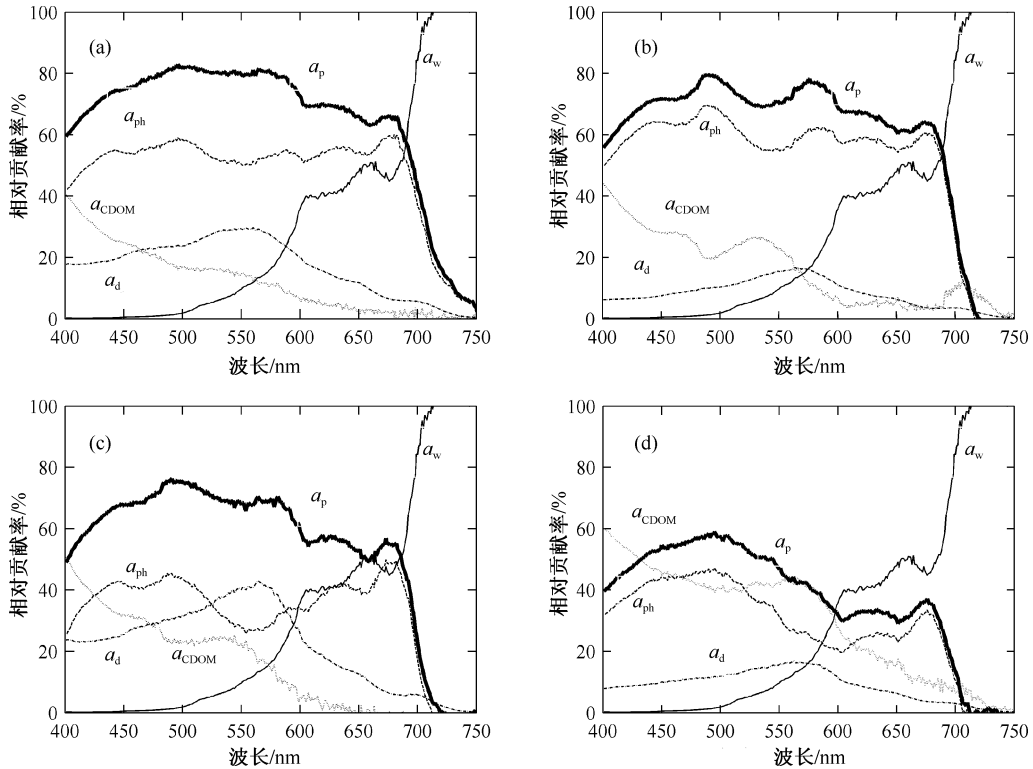


图 8 四种类型(a、b、c、d)组分  $a_d(\lambda)$ 、 $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_{CDOM}(\lambda)$  和  $a_w(\lambda)$  对总吸收系数的相对贡献率

Fig. 8 Relative contribution of the absorption coefficients of  $a_d(\lambda)$ ,  $a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{CDOM}(\lambda)$  and  $a_w(\lambda)$  to the total absorption coefficient  $a(\lambda)$  in different types (a, b, c and d)

### 3 结论

1) 官厅水库秋季总颗粒物的吸收光谱与浮游藻类吸收光谱一致,  $a_{ph}$  大于  $a_d$ ,  $a_p(440)$  变化范围为  $0.70 \sim 2.58 \text{ m}^{-1}$ . 在纳库区, 浮游植物色素是主导光衰减的首要因子, 颗粒物吸收对总吸收的贡献率在 60% 以上. 在中库区, 浮游植物色素、非色素颗粒物、CDOM、纯水共同造成光衰减, 颗粒物吸收占总吸收的 40% 以上.

2) 非色素颗粒物和 CDOM 的吸收随波长增加大致按指数规律下降.  $a_d(440)$  和  $a_{CDOM}(440)$  的变化范围分别为  $0.096 \sim 0.797 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.4547 \sim 1.0279 \text{ m}^{-1}$ . 非色素颗粒物在  $400 \sim 750 \text{ nm}$  波段的指数函数斜率  $S_d$  的平均值为  $6.7 \pm 0.83 \mu\text{m}^{-1}$ , CDOM 在  $400 \sim 750 \text{ nm}$  波段的指数函数斜率  $S_g$  的平均值为  $15.5 \pm 2.64 \mu\text{m}^{-1}$ .

3) 由于蓝藻和绿藻的共同吸收, 浮游植物色素吸收光谱在 420、628 和 676 nm 处出现吸收峰, 在 480 nm 处出现吸收肩峰, 在 550 和 650 nm 附近出现吸收谷.  $a_{ph}(420)$ 、 $a_{ph}(675)$  的变化范围分别为  $0.58 \sim 2.16$ 、 $0.27 \sim 1.19 \text{ m}^{-1}$ . 并且其比吸收系数较为恒定.



4)  $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 、 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$  与  $C_{chl.a}$  均存在显著相关性 ( $R^2$  为 0.79 以上), 表明官厅水库水体秋季吸收主要以浮游植物色素吸收为主,  $a_d(675)$ 、 $a_{CDOM}(400)$  与  $C_{chl.a}$  也存在较好相关性 ( $R^2 = 0.6488$ 、 $0.5238$ ), 表明非色素颗粒物与 CDOM 也主要来源于浮游藻类的降解产物。

5) 不同采样点的不同组分吸收系数对总吸收系数的贡献不同, 大致可归纳为 4 种表现类型。在富营养程度较高的库区, 浮游植物色素是水体光谱吸收的主导因子; 在富营养程度较低的中库区, 颗粒物与有色可溶性有机物共同主导水体光谱吸收。

由于官厅水库污染程度较轻, 不同季节的光谱吸收主导因子可能存在显著变化, 是使水体组分浓度遥感反演模型可移植性变差的原因之一。因此下一步需要对官厅水库水体的悬浮颗粒物和 CDOM 吸收系数展开季节性分析, 为不同季节的水体组分生物光学模型的构建提供数据支持。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] 张 红, 黄家柱, 李云梅等. 滇池水体光学物质的研究吸收特性. 环境科学, 2011, **32**(2):452-463.
- [ 2 ] IOCCG. IOCCG Report number 5: remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms and applications, 2006.
- [ 3 ] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994:61.
- [ 4 ] 郭 凯, 赵 文, 徐 锋等. 官厅水库(北京段)水体富营养化评价与分析. 大连水产学院学报, 2009, **24**(5):453-458.
- [ 5 ] 刘 浩, 徐志侠, 陈 超等. 官厅水库库区富营养化评价. 水电能源科学, 2011, **29**(1):13-16.
- [ 6 ] 张世禄, 周绪申, 许 维等. 官厅水库水体富营养化现状及变化趋势分析. 海河水利, 2012, (2):25-26.
- [ 7 ] 王 静, 尚 鹤, 曹吉鑫等. 北京官厅水库硝和氨氮分布特征及水质变化. 湿地科学与管理, 2012, **8**(3):61-64.
- [ 8 ] 甄 姿, 宫兆宇, 赵文吉等. 官厅水库库区水生植物演变格局时空变化特征分析. 农业环境科学学报, 2012, **31**(8):1586-1595.
- [ 9 ] 杜桂森, 王建厅, 张为华等. 官厅水库水体营养状况分析. 湖泊科学, 2004, **16**(3):277-281.
- [ 10 ] 李慧敏, 杜桂森, 姜树君等. 官厅水库的微囊藻毒素及其与水环境的相关性. 生态学报, 2010, **30**(5):1322-1327.
- [ 11 ] 袁博宇. 官厅水库水质现状及趋势分析. 北京水利, 2000, (5):29-31.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Jeffrey SW, Humphrey GF. New spectrophotometric equation for determining chlorophylls a, b, c1, and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem Physiol Pflanz*, 1975, **167**:191-194.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 张运林, 张思楼, 刘明亮. 云南高原湖泊有色可溶性有机物和颗粒物光谱吸收特性. 湖泊科学, 2009, **21**(2):255-263.
- [ 16 ] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. 三峡坝区水体吸收系数的特征研究. 遥感学报, 2010, **14**(2):323-332.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 宋玲玲, 仇雁翎, 张洪恩等. 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.
- [ 19 ] 柳彩霞, 郭子祺, 张宝钢等. 太湖流域昆承湖春季颗粒物和有色可溶性有机物吸收特性. 湖泊科学, 2011, **23**(5):773-782.
- [ 20 ] Pope RM, Fry ES. Absorption spectrum (380-700nm) of pure water( II ): Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, **36**(33):8710-8723.