

文章编号: 1000-582X(2011)09-102-07

## 三峡小江回水区水体光学特征及分析

方芳<sup>1</sup>, 周红<sup>1</sup>, 李哲<sup>1</sup>, 郭劲松<sup>1</sup>, 陈永柏<sup>2</sup>, 孙志禹<sup>2</sup>

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国长江三峡工程开发总公司 湖北宜昌 443002)

**摘要:**为探讨三峡水库运行初期小江回水区水体的光学特性,研究了 2008 年 1 月至 12 月期间小江回水区 5 个断面可见光衰减系数  $K_d$  (PAR) 与透明度的时空分布特征及二者的相关性,进一步分析了可见光衰减系数与透明度、悬浮物浓度、溶解性有机物及叶绿素等水质指标的相关关系。研究区域可见光衰减系数和透明度空间分布差异不明显,但季节变化显著。可见光衰减系数在  $0.23 \sim 4.82 \text{ m}^{-1}$  之间变化,均值为  $(1.03 \pm 0.07) \text{ m}^{-1}$ , 冬季最高,夏季最低。统计分析表明,可见光衰减系数与透明度有显著的相关性 ( $R^2 = 0.7791$ ), 表明两者可相互反演。与总颗粒态物质浓度,总无机颗粒态物质浓度的相关性显著 ( $R^2 = 0.7285$ ,  $R^2 = 0.7637$ ), 与溶解性有机碳有一定的相关性 ( $R^2 = 0.1289$ ), 与叶绿素 a 相关性不明显 ( $R^2 = 0.006$ ), 分析表明总无机颗粒态物质是小江回水区水体光学特征的最主要影响因素。

**关键词:**三峡水库; 小江回水区; 可见光衰减系数; 透明度; 总颗粒态物质

**中图分类号:** X143

**文献标志码:** A

## Optical properties of water body in Xiaojiang River backwater area, Three Gorges Reservoir

FANG Fang<sup>1</sup>, ZHOU Hong<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, GUO Jing-song<sup>1</sup>, CHEN Yong-bo<sup>2</sup>, SUN Zhi-yu<sup>2</sup>

(1. Faculty of Urban & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei 443002, P. R. China)

**Abstract:** To discuss the optical properties of water body in Xiaojiang river backwater area for the early impounding stage of the Three Gorges Reservoir (TGR), the spatiotemporal variations of visible light attenuation coefficients ( $K_d$ ) and Secchi Disc transparency (SD) are investigated during the period from January, 2008 to December, 2008. The correlations between  $K_d$  and SD, total particulate matters (TPM), dissolved organic carbon (DOC) and chlorophyll-a (Chla) are also analyzed according to the monitoring data. In the study area, there are no significant spatial variations in the mean  $K_d$  at five sampling stations, but the seasonal variations are obvious with the highest value of  $K_d$  in the winter and the lowest value in the summer. The range of  $K_d$  is  $0.23 \sim 4.82 \text{ m}^{-1}$ , and the mean value is  $(1.03 \pm 0.07) \text{ m}^{-1}$ . Statistics analysis suggests that there are remarkable correlations between  $K_d$  and SD, TPM, TIM as revealed by the coefficient of determination  $R^2 = 0.7791$ ,  $R^2 = 0.7285$  and  $R^2 = 0.7637$ , respectively. The relationship between  $K_d$  and DOC is less significant as shown by the low value of  $R^2 = 0.1289$ . However, the correlation between  $K_d$  and Chla is weak which can be seen from the value of  $R^2 = 0.006$ . The analysis

收稿日期: 2011-04-03

基金项目: 国家水专项资助项目(2009ZX07104-002; 2009ZX07104-003); 国家科技支撑计划资助项目(2008BAD98B04)

作者简介: 方芳(1973-), 女, 重庆大学教授, 博士, 主要研究方向为水环境质量演变与水污染控制,

(E-mail)fangfangcq@cqu.edu.cn.



物质(TPM)、总无机态物质(TIM)和溶解性有机碳(DOC)等相关指标的分析测试工作。

透明度用直径为 30 cm 的赛克盘(Secchi Disc)测量。水下光合有效辐照度采用美国 LI-COR 公司生产的水下光量子仪(Li-cor192SA),其感应波段为可见光波段(400~700 nm)。可见光衰减系数  $K_d$  (PAR)表征可见光波段(400~700 nm)光在水体的衰减程度,可按下式计算<sup>[7]</sup>

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{z} \ln \frac{E_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, 0)}, \quad (1)$$

式中: $K_d(\lambda)$ 为漫射衰减系数,  $m^{-1}$ ;  $\lambda$ 为光波长,可见光 PAR 波长范围为 400~700 nm,  $z$ 为从水面到测量处的深度, m;  $E_d(\lambda, z)$ 为深度  $z$  处的辐照度,  $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ ;  $E_d(\lambda, 0)$ 为水面起始辐照度,  $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。 $K_d(\lambda)$ 值通过对现场测试采样点表层以下 0.5、1、2、3、5、8 m 不同深度的水下辐照度进行指数回归得到,回归效果只有当  $R^2 \geq 0.95$ , 深度数  $N \geq 3$  时其  $K_d(\lambda)$  值才被接受<sup>[11]</sup>。

原水样通过 0.70  $\mu m$ (GF/F)微孔滤膜过滤,用称重法测定总颗粒态物质(TPM)、总无机态物质(TIM)2个指标。采用德国 ELEMENTAR 总有机碳 TOC(总氮)分析仪 LiquiTOC/ TNb 测定过滤水中的溶解性有机碳(DOC)。叶绿素 a(Chla)的测试水样经过 1.2  $\mu m$ (GF/C)微孔滤膜抽滤处理,使用丙酮萃取法提取并测定。水质分析方法参考《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[12]</sup>。

对 2008 年 1 月至 12 月期间 5 个断面 24 次采

样共 120 个数据样本进行分析。根据全年气温,水温变化并参照重庆地区季节变化规律,将研究期间季节变化划分为:春季 3 月至 5 月上旬;夏季 5 月中旬至 9 月中旬;秋季 9 月下旬至 11 月下旬;冬季 12 月至次年 2 月。所有数据录入 EXCEL 和 SPSS 进行相关分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小江回水区透明度与可见光衰减系数时空特征

表 1 为水体光学指标与主要水质指标的季节变化,小江回水区水体光学性质呈显著的季节变化。图 2 为透明度与可见光衰减系数的全年变化趋势。2008 年小江回水区水体透明度介于 0.20~5.50 m, 均值(1.62±0.10)m。最高值出现在春季高阳平湖断面,最低值出现在夏季渠马断面;春季透明度均值为(1.71±0.27)m,夏季保持(0.74±0.05)m的较低水平,入秋后,透明度回升到(1.67±0.19)m,在高水位时期的冬季则高达(2.73±0.13)m。可见光衰减系数介于 0.23~4.82  $m^{-1}$ ,均值(1.03±0.07) $m^{-1}$ 。最高值出现在夏季河口,最低值出现在春季河口;夏季可见光衰减系数的均值最高,为(1.45±0.13) $m^{-1}$ ,春季(0.91±0.10) $m^{-1}$ 和秋季(1.12±0.13) $m^{-1}$ 次之,冬季最低为(0.49±0.02) $m^{-1}$ ,其变化趋势与透明度刚好相反。

表 1 小江回水区水体光学指标与主要水质指标的季节变化

	SD/m	$K_d$ (PAR)/ $m^{-1}$	TPM/( $mg \cdot L^{-1}$ )	TIM/( $mg \cdot L^{-1}$ )	DOC/( $mg \cdot L^{-1}$ )	Chla/( $\mu g \cdot L^{-1}$ )
全年	平均值 1.62±0.10	1.03±0.07	8.83±0.95	5.27±0.84	4.70±0.36	12.96±1.83
( $n=120$ )	范围 0.20~5.50	0.23~4.82	0.33~71.17	0.00~63.67	0.03~14.87	0.00~140.75
春季	平均值 1.71±0.27	0.91±0.10	6.64±1.04	3.75±0.82	3.05±0.63	16.68±3.79
( $n=25$ )	范围 0.50~5.50	0.23~2.00	0.33~18.93	0.33~12.20	0.09~7.11	0.27~65.40
夏季	平均值 0.74±0.05	1.45±0.13	15.11±2.28	9.74±2.14	6.29±0.44	20.30±4.25
( $n=40$ )	范围 0.20~1.40	0.62~4.82	4.60~71.17	0.53~63.67	1.24~14.87	0.00~140.75
秋季	平均值 1.67±0.19	1.12±0.13	7.59±1.18	4.09±0.99	6.99±0.67	6.20±1.50
( $n=25$ )	范围 0.50~4.50	0.45~2.27	2.27~25.07	0.00~19.73	2.19~14.20	1.08~29.08
冬季	平均值 2.73±0.13	0.49±0.02	2.97±0.12	1.29±0.15	1.56±0.56	5.14±1.60
( $n=30$ )	范围 1.40~4.70	0.31~0.94	2.07~4.13	0.00~2.87	0.03~14.58	0.19~30.77

图 3 为小江回水区水体透明度与可见光衰减系数空间变化图,由组间方差分析结果显示,小江回水区 5 个断面的 SD、 $K_d$ (PAR)无显著差异(Sig > 0.5),表明小江回水区水体光学特性空间差异并不明显,这不同于对浅水湖泊太湖<sup>[13,14]</sup>,深水湖泊抚仙

湖<sup>[15]</sup>等的研究。太湖水体光学指标在沿岸区、湖心区、河口区以及相对开阔、封闭的区域存在明显的空间差异。抚仙湖在湖心区域和沿岸浅水区域透明度也存在显著的空间差异。

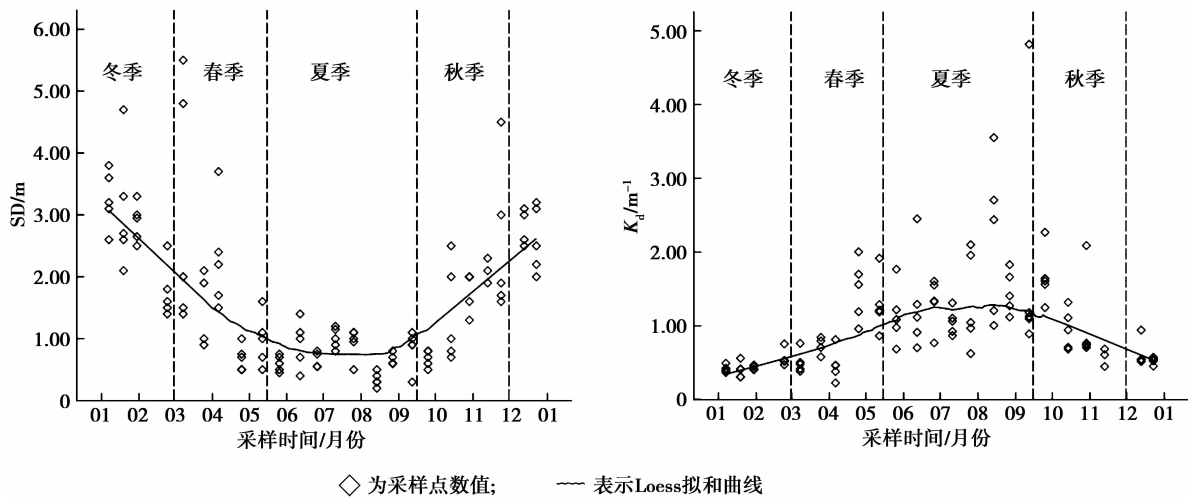
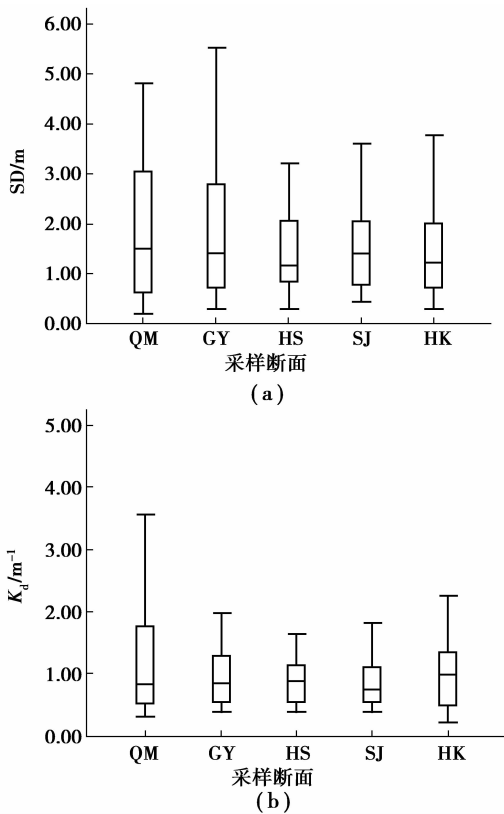


图 2 小江回水区水体透明度与可见光衰减系数时间变化



QM, GY, HS, SJ, HK 分别代表渠马、高阳平湖、石镇、双江大桥和小江河口 5 个断面

图 3 小江回水区水体透明度与可见光衰减系数空间变化

### 2.2 可见光衰减系数与透明度相关性分析

透明度是水体能见程度的一个量度,在一定程度上可直观表明水体的污染程度<sup>[10]</sup>。由于采用塞氏盘测量透明度存在一定的不准确性,从光学角度

引入可见光衰减系数的概念。太阳辐射中波长位于 400~700 nm, 可被绿色植物用来进行光合作用那部分太阳辐射能量称为光合有效辐射, 简称 PAR。可见光衰减系数是通过 PAR 的非线性拟合得到, 其大小也在一定程度上反映了水下光场即浮游植物生长的光学环境的性质。将 2008 年小江回水区可见光衰减系数与 SD 进行回归, 图 4 为其拟合图, 得到表达式

$$K_d(\text{PAR}) = 1.0058(\text{SD})^{-0.7221} \quad (R^2 = 0.7791, N = 120, P \leq 0.005), \quad (2)$$

式中:  $K_d(\text{PAR})$ 、SD 分别表示 PAR 漫射衰减系数,  $\text{m}^{-1}$ ; 透明度, m。由式(2)可知, 透明度与可见光衰减系数呈显著负相关, 表明水体透明度与可见光衰减系数可相互反演。

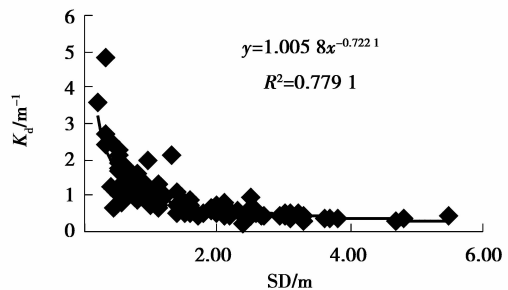


图 4 可见光衰减系数与透明度的相关性

### 2.3 可见光衰减系数与 TPM, DOC, Chla 相关性分析

为探讨小江回水区水体光学特征与 TPM、DOC、Chla 的相关性将可见光衰减系数  $K_d$  与 TPM、DOC、Chla 进行回归, 图 5 为其拟合图, 得到

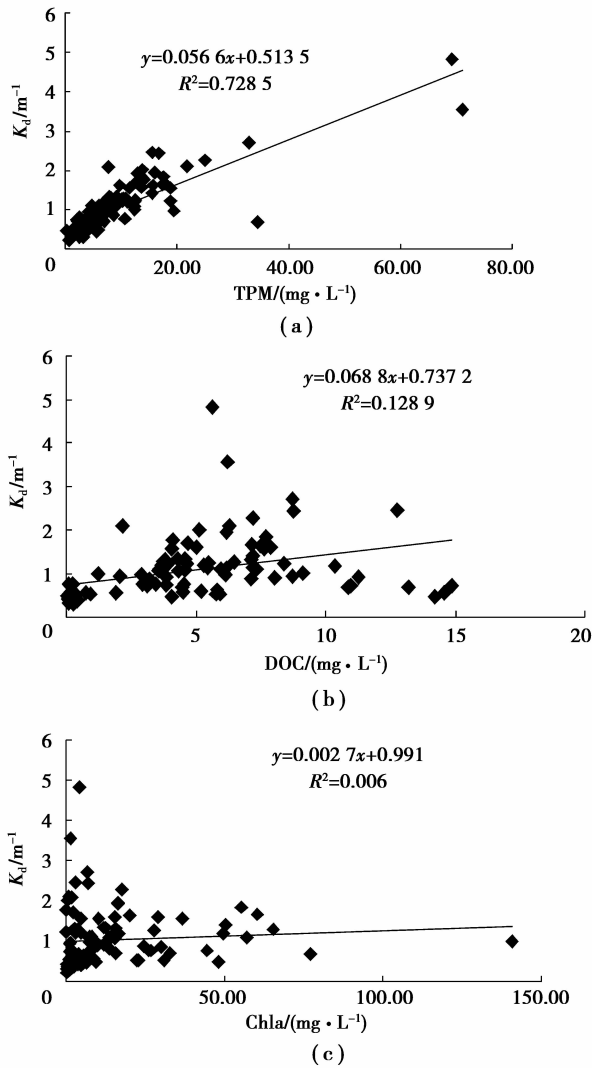


图 5 可见光衰减系数与 TPM、DOC、Chla 的相关性

表达式

$$K_d=0.0566(\text{TPM})+0.5135(R^2=0.7285, N=120, P\leq 0.005), \quad (3)$$

$$K_d=0.0688(\text{DOC})+0.7372(R^2=0.1289, N=120, P\leq 0.005), \quad (4)$$

$$K_d=0.0027(\text{Chla})+0.991(R^2=0.006, N=120, P\leq 0.005), \quad (5)$$

式中: TPM、DOC、Chla 分别表示总颗粒态物质, mg/L; 溶解性有机碳, mg/L; 叶绿素 a 浓度,  $\mu\text{g/L}$ 。从可见光衰减系数与其他水质指标拟合的相关程度来看, 水体中总颗粒态物质与可见光衰减系数的决定系数  $R^2$  为 0.7285; 溶解性有机物也有一定的影响, 但相对于总颗粒态物质, 相关性较弱 ( $R^2=0.1289$ ), 叶绿素无相关性 ( $R^2=0.006$ )。

由可见光衰减系数与水质指标的相关性分析可知, 小江回水区水体光学特征受到总颗粒态物质和溶解性有机物的影响。为识别二者的影响大小, 对

小江回水区可见光衰减系数与总颗粒态物质, 溶解性有机物, 叶绿素 a 进行多元回归, 结果见式(6):

$$K_d=0.440(\pm 0.063)+0.055(\pm 0.003)\text{TPM}+0.031(\pm 0.010)\text{DOC}+0.004(\pm 0.002)\text{Chla}(R^2=0.767, N=120, P<0.005). \quad (6)$$

从回归公式(6)中可知, 可见光衰减系数与 TPM 的复相关系数为 0.055, 与 DOC 的复相关系数为 0.031, 而与 Chla 的复相关系数只有 0.004; 据此判断总颗粒态物质对光学衰减影响最为显著, 以 DOC 浓度表示的溶解性有机物也有一定的贡献, 叶绿素 a 的影响不明显, 这与上述的影响分析是一致的。总体上, 引起小江水体光学衰减系数发生变化的主要是水中总颗粒态物质, 而并不是人们想象中的浮游藻类颗粒, 其性质类似于浅水湖泊太湖<sup>[14]</sup>, 而与海洋, 深水湖泊则相差迥异<sup>[16,17]</sup>。

一般地, 总颗粒态物质(TPM)又包含总无机态颗粒(TIM)和有机态颗粒(POM), 其中无机颗粒对光的衰减主要为散射, 而有机颗粒则主要表现为吸收, 它们对光的衰减不一样<sup>[11]</sup>。将可见光衰减系数与 TIM, POM 进行线性回归, 如图 6 所示。

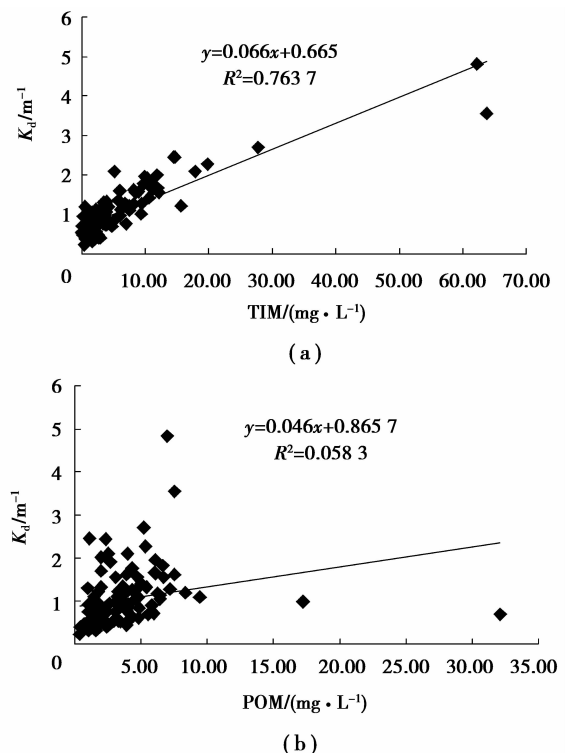


图 6 可见光衰减系数与 TIM、POM 的相关性

相关表达式为:

$$K_d=0.066(\text{TIM})+0.665(R^2=0.7637, N=120, P\leq 0.005), \quad (7)$$

$$K_d = 0.046(\text{POM}) + 0.8657(R^2 = 0.0583, N = 120, P \leq 0.005). \quad (8)$$

一元回归表明,可见光衰减系数与颗粒态物质中的无机物质的决定系数为( $R^2 = 0.7637$ ),与有机物质的决定系数为( $R^2 = 0.0583$ )。为了解释影响光学衰减系数的首要因子,对可见光衰减系数与无机颗粒和有机颗粒浓度进行多元线性回归,结果如下:

$$K_d = 0.609(\pm 0.047) + 0.065(\pm 0.004)\text{TIM} + 0.018(\pm 0.009)\text{POM} \quad (R^2 = 0.772, N = 120, P < 0.005). \quad (9)$$

多元回归分析显示,可见光衰减系数与TIM复相关系数(0.065)远高于与POM的复相关系数(0.018),可见悬浮物质中的无机颗粒在对PAR衰减系数变化的影响中占绝对主导地位,这与Phlips等<sup>[18]</sup>对美国Florida湾, Pierson等<sup>[19]</sup>对瑞典Mälaren湖以及小江回水区2007年的研究一致<sup>[20]</sup>,但有别于对太湖的研究<sup>[21]</sup>。

#### 2.4 讨论

可见光在水体中的衰减主要受水体中悬浮物质,藻类和溶解性有机物的影响<sup>[8,9]</sup>,对于不同类型的水体,各因素的影响程度不一样。水体中颗粒态物质的含量的提高会增强对光辐射的衰减,从而降低水体的透明度,影响水体光学性质。结合表1和图3可知,2008年小江回水区TPM存在明显的季节差异,但空间差异不大。夏季水体中颗粒物浓度均值较高,达到 $(15.11 \pm 2.28)\text{mg/L}$ ,导致透明度降低,可见光衰减系数升高。冬季颗粒态物质浓度则只有 $(2.97 \pm 0.12)\text{mg/L}$ ,透明度达到峰值,可见光衰减系数较低。

水中的溶解性有机物,特别是有色溶解性有机物对水体光线有很强的吸收,从而使光照得到衰减<sup>[22]</sup>。由于溶解性有机碳是溶解性有机物重要的一部分,通常用DOC浓度来表征水体中的溶解性有机物。如表1,小江回水区2008年DOC平均值 $(4.70 \pm 0.36)\text{mg/L}$ ,各断面无显著差异,但季节差异明显。夏、秋季节DOC相对较高;春、冬季较低。外源陆地溶解性物质和内源浮游植物衍生物构成小江回水区水体溶解性有机物的主要来源<sup>[23]</sup>,溶解性有机物丰度的差异一定程度上造成了可见光在水体中衰减程度的不同。

藻类的大量增殖增强可见光的吸收和散射,阻碍光线在水体中传播,从而降低水体透明度。小江回水区表征藻类含量的叶绿素浓度均值为 $(12.96 \pm 1.83)\mu\text{g/L}$ ,春、夏季含量偏高,秋、冬季含量较低。

但是在水体中总颗粒态物质占绝对优势的情况下,叶绿素对水体光学特性的影响甚微,其研究结果有别于Apopka湖<sup>[24]</sup>、滇池<sup>[25]</sup>等研究结果。

### 3 结论

1)小江回水区2008年水体光学性质在空间上无明显差异,但季节变化显著。透明度在0.20~5.50m之间,均值 $(1.62 \pm 0.10)\text{m}$ ,冬季最高,春、秋季次之,夏季最低;可见光衰减系数在0.23~4.82 $\text{m}^{-1}$ 之间,均值 $(1.03 \pm 0.07)\text{m}^{-1}$ ,其季节变化趋势与透明度相反。

2)小江回水区2008年透明度与可见光衰减系数的指数方程为 $K_d(\text{PAR}) = 1.0058(\text{SD})^{-0.7221}$ , ( $R^2 = 0.7791$ ,  $N = 120$ ,  $P < 0.005$ ),透明度与可见光衰减系数呈显著的负相关性,表明可用水体透明度来模拟反演可见光衰减系数。

3)可见光衰减系数与水质指标的拟合结果表明,总颗粒态物质中的无机颗粒物质(TIM)与可见光衰减系数的线性拟合相关性很好( $R^2 = 0.7637$ ),表明TIM对水体光学衰减的影响显著;溶解性有机质有一定的影响,但对PAR衰减不是很显著( $R^2 = 0.1289$ ),叶绿素a影响甚微。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府网. 三峡工程简介[EB/OL]. [2006]http://www.gov.cn/test/2006-05/12/content\_278989.htm.
- [2] LI Y C, LIU C X, YUAN X Z, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(1): 81-94.
- [3] LI F Q, YE L, LIU R Q, et al. Dynamics of main nutrient input to Xiangxi Bay of the Three-Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2073-2079.
- [4] 龙天渝, 吴磊, 刘腊美, 等. 三峡库区小江流域溶解态氮素污染模拟[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(10): 1181-1186.  
LONG TIAN-YU, WU LEI, LIU LA-MEI, et al. Simulation of dissolved nitrogen pollution in Xiaojiang river basin of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(10): 1181-1186.
- [5] ZENG H, SONG L R, YU Z G, et al. Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons [J]. Science of the Total Environment, 2006, 367(2/3): 999-1009.
- [6] 袁辉, 黄川, 崔志强, 等. 三峡库区消落带与水环境响应关系预测[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007,

- 30(9): 134-138.  
YUAN HUI, HUANG CHUAN, CUI ZHI-QIANG, et al. Forecast of the relation between the water quality and the wet-dry zone of the Three Gorges Area[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(9): 134-138.
- [7] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [8] REINART A, ARST H, PIERSON D C. Optical properties and light climate in Lake Verevi [J]. Hydrobiologia, 2005, 182: 41-49.
- [9] DEVLIN M J, BARRY J, MILLS D K, et al. Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 79(3): 429-439.
- [10] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] HUOVINEN P S, PENTTOL H, SOIMASUO M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland [J]. Chemosphere, 2003, 51(3): 205-214.
- [12] 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003, 25(2): 30-36.  
ZHANG YUN-LIN, QIN BO-QIANG, CHEN WEI-MIN, et al. Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, 25(2): 30-36.
- [14] ZHANG Y L, QIN B Q, HU W P, et al. Spatial-temporal variations of euphotic depth and its ecological significance of Lake Taihu[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(4): 431-442.
- [15] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 681-686.  
PAN JI-ZHENG, XIONG FEI, LI WEN-CHAO, et al. Spatial-temporal dynamic changes of the water transparency and their influencing factors in Lake Fuxian, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5): 681-686.
- [16] PHILIPS E J, ALDRIDGE F J, SCHELSKE C L, et al. Relationships between light availability, chlorophyll a, and tripton in a large, shallow subtropical lake [J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(2): 416-421.
- [17] BATTIN T J. Dissolved organic matter and its optical properties in a black water tributary of the upper Orinoco river, Venezuela [J]. Organic Geochemistry, 1998, 28(9): 561-569.
- [18] PHILIPS E J, LYNCH T C, BADYLAK S. Chlorophyll a, tripton, color, and light availability in a shallow tropical inner-shelf lagoon [J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 127: 223-234.
- [19] PIERSON D C, MARKRNSTEN H, STROMBECK N. Long and short term variations in suspended particulate material; the influence on light available to the phytoplankton community [J]. Hydrobiologia, 2003, 494(1/3): 299-304.
- [20] 方芳, 周红, 李哲, 等. 三峡小江回水区真光层深度及其影响因素分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 113-119.  
FANG FANG, ZHOU HONG, LI ZHE, et al. Spatiotemporal variations of euphotic depth and its causing factors in Xiaojiang River backwater area of Three Gorges [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 113-119.
- [21] 张运林, 冯胜, 马荣华, 等. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 380-388.  
ZHANG YUN-LIN, FENG SHENG, MA RONG-HUA, et al. Spatial pattern of euphotic depth and estimation of phytoplankton primary production in Lake Taihu in autumn 2004 [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 380-388.
- [22] FODEN J, SIVYER D B, MILLS D K, et al. Spatial and temporal distribution of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) fluorescence and its contribution to light attenuation in UK water bodies [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 79(4): 707-717.
- [23] FANG F, ZHOU H, GUO J S, et al. Three-dimensional fluorescence spectra characterization of dissolved organic matter in Xiaojiang Backwater Area, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2009, 8: 63-70.
- [24] BACHMANN R W, HOYER M V, CANFOELD D E. Evaluation of recent limnological changes at Lake Apopka [J]. Hydrobiologia, 2001, 448(1/3): 19-26.
- [25] 赵碧云, 贺彬, 朱云燕, 等. 滇池水体中透明度的遥感定量模型研究[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(2): 16-17.  
ZHAO BI-YUN, HE BIN, ZHU YUN-YAN, et al. Modelling for dynamic monitoring transparency of Lake Dianchi water-body [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 26(2): 16-17.