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

(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 Fang¹, ZHOU Hong¹, LI Zhe¹, GUO Jing-song¹, CHEN Yong-bo², SUN Zhi-yu²

(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 $(1.03\pm0.07) \text{ m}^{-1}$. Statistics analysis suggests that there are remarkable correlations between K_d and SD, TPM, TIM as revealed by the coefficient of determination $R^2 = 0.779 \text{ 1}$, $R^2 = 0.728 \text{ 5}$ and $R^2 = 0.763 \text{ 7}$, respectively. The relationship between K_d and DOC is less significant as shown by the low value of $R^2 = 0.128 \text{ 9}$. 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。

suggests that total inorganic particulate matters largely influenced the optical properties of water body in Xiaojiang river backwater area.

Key words: Three Gorge Reservoir (TGR); Xiaojiang river backwater area; visible light attenuation coefficient; Secchi Disc transparency; total particulate matters

三峡水库作为三峡水电站建成蓄水后形成的人 工河道型湖泊,长期受到回水顶托,水流速度减缓, 支流水体富营养化现象及其生态环境效应在短期内 凸现并受到广泛关注^[1]。自 2003 年三峡水库初次 蓄水以来,诸多学者围绕三峡库区水土流失^[2],营养 盐输入与数学模型^[3,4],水体浮游植物生长与群落演 替^[5]、消落带与水环境响应^[6]等方面分析了与库区 水体相关的问题,但从水体光学特征探讨库区支流 富营养化问题少有报道。

光照是影响浮游植物生长的主要因素之一,是 水生生物体及其光化学反应过程在水体中呈分层分 布的重要决定因素,因此水体的光学特征在一定程 度上对水体富营养化起到指示作用^[7]。可见光衰减 系数(Visible Light Attenuation Coefficient, *K*_d (PAR))和透明度(Secchi Disc Transparency, SD) 均可作为表征水体光学特征的指标,其大小受水体 中悬浮颗粒,藻类,有色溶解性有机物等含量的影 响,并进而影响水中浮游植物生境改变、种群分布和 群落演替^[8,9]。因此,可见光衰减系数和透明度也 是评价水体富营养化状况的重要指标^[10]。

根据三峡水库小江回水区 2008 年全年水质监 测资料,分析了小江回水区水体光学特征及其与总 颗粒态物质(Total Particulate Matters,TPM),叶绿 素 a(Chlorophyll-a, Chla)及溶解性有机碳 (Dissolved Organic Carbon,DOC)的相互关系,以 揭示小江回水区可见光衰减系数和透明度的分布特 点、变化规律及主要影响因素,为从光学角度探索三 峡水库蓄水初期对支流富营养化形成原因提供科学 依据。

1 材料与方法

1.1 采样方案

小江流域如图 1 所示,干流全长 182.4 km,流 域面积 5 172.5 km²,介于北纬 30°49'~31°42',东经 107°56'~108°54'之间,河口距三峡大坝约 250 km, 是长江北岸、三峡库区中段的重要次级河流。本研 究中涉及的小江回水区域位于重庆市云阳县境内。 根据该区域的河道特征,将其划分为 4 个典型河段, 分别为:杨家坝—小江电站(约 13 km);小江电站— 代李子(约 7 km);代李子—牛栏溪(约 11 km)以及 牛栏溪一小江河口(约 10 km)。其中,杨家坝一小 江电站与代李子—牛栏溪河段均为峡谷型河道,河 道狭长且断面变化不大,水力条件相对单一;而小江 电站—代李子段则为小江回水区在蓄水后形成的面 积约 4~5 km² 的水域,水深较浅,近似于浅水湖泊; 牛栏溪以下河段,河道断面放宽,水力条件上易受长 江干流回灌影响。据此,在上述河段内设置了 5 个 采样断面(图 1),分别为:杨家坝一小江电站河段的 渠马渡口($31^{\circ}07'50.8''N,108^{\circ}37'13.9''E$),小江电 站—代李子河段的高阳平湖($31^{\circ}07'50.5''N$, $108^{\circ}40'29.5''E$),代李子—牛栏溪河段的黄石镇 ($31^{\circ}00'29.4''N,108^{\circ}42'39.5''E$)以及下游的双江大 桥($30^{\circ}56'51.1''N,108^{\circ}41'37.5''E$)和小江河口 ($30^{\circ}57'03.8''N,108^{\circ}39'30.6''E$)。各断面采样点均 位于河道深泓线处。



图 1 小江流域采样点分布图

1.2 测定分析与数据处理

小江回水区水质监测频率为每月 2 次,现场测 试采样点表层以下 0.5、1、2、3、5、8 m(为藻类和悬 浮物的主要集中区域)水深处的水下光合作用有效 辐射强度(Photosynthetically Active Radiation, PAR)、透明度、温度等指标,不同点位的采样层次均 一致。同时采集同水深处水样并进行等量混合,混 合后水样于 48 h 内完成叶绿素 a(Chla)、总颗粒态 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^[7]

$$K_{\rm d}(\lambda) = -\frac{1}{z} \ln \frac{E_{\rm d}(\lambda,z)}{E_{\rm d}(\lambda,0)}, \qquad (1)$$

式中: $K_{d}(\lambda)$ 为漫射衰减系数, m^{-1} ; λ 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 $R^{2} \ge 0.95$,深度 数 $N \ge 3$ 时其 $K_{d}(\lambda)$ 值才被接受^[11]。

原水样通过 0.70 μ 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 μ 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)》^[12]。

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

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。

		SD/m	$K_{\rm d}({\rm PAR})/{\rm m}^{-1}$	$TPM/(mg \cdot L^{-1})$	$TIM/(mg \boldsymbol{\cdot} L^{-1})$	$\text{DOC}/(\text{mg} \boldsymbol{\cdot} L^{-1})$	$Chla/(\mu g \bullet L^{-1})$
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
(<i>n</i> =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
(<i>n</i> =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 \pm 4.25
(<i>n</i> =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 \pm 1.18	4.09±0.99	6.99 ± 0.67	6.20 ± 1.50
(<i>n</i> =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 \pm 0.12	1.29 ± 0.15	1.56 ± 0.56	5.14 \pm 1.60
(<i>n</i> =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

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

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、K₄ (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^[13,14],深水湖泊抚仙 湖^[15]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^[10]。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的那 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对 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

 $K_{\rm d}({\rm PAR}) = 1.005 \ 8({\rm SD})^{-0.7221} (R^2 = 0.7791, N = 120, P \leq 0.005),$ (2)

式中: K_{d} (PAR)、SD分别表示 PAR 漫射衰减系数, 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_a 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

 $K_d = 0.056\ 6(\text{TPM}) + 0.513\ 5(R^2 = 0.728\ 5),$ $N = 120, P \le 0.005),$ (3) $K_d = 0.068 \ 8(\text{DOC}) + 0.737 \ 2(R^2 = 0.128 \ 9),$ $N = 120, P \le 0.005)$, (4) $K_{\rm d} = 0.002$ 7 (Chla) + 0.991 ($R^2 = 0.006$, N = $120, P \leq 0.005),$ (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, $\mu g/L$ 。 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 0.728 5;溶解性有机物也有一定的影 n_{0} ,但相对于总颗粒态物质,相关性较弱(R^{2} = 0.128 9),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):

 $K_{\rm d} = 0.440(\pm 0.063) + 0.055(\pm 0.003) \text{ TPM} + 0.031(\pm 0.010) \text{ DOC} + 0.004(\pm 0.002) \text{ Chla}(R^2 = 0.767, N = 120, P < 0.005)_{\circ}$ (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^[14], 而与海洋,深水湖泊则相差迥异^[16,17]。

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^[11]。将可见光衰减系数 与 TIM, POM 进行线性回归,如图 6 所示。





相关表达式为:

 $K_{\rm d} = 0.066 \,({\rm TIM}) + 0.665 \,(R^2 = 0.7637, N = 120, P \leqslant 0.005),$ (7)

 $K_{\rm d} = 0.046 \,({\rm POM}) + 0.865 \,7 \,(R^2 = 0.058 \,3, N = 120, P \leqslant 0.005)$ (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_{\rm d} = 0.\ 609\ (\pm\ 0.\ 047\) + 0.\ 065\ (\pm\ 0.\ 004\)\ {\rm TIM} + 0.\ 018\ (\pm\ 0.\ 009\)\ {\rm POM}\ (R^2 = 0.\ 772\, N = 120\, P < 0.\ 005\)_{\circ}$ (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^[18] 对 美 国 Florida 湾, Pierson 等^[19] 对 瑞 典 Mälaren湖以及小江回水区 2007 年的研究一致^[20], 但有别于对太湖的研究^[21]。

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^[8,9],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。夏季水体中颗粒物质浓 度均值较高,达到(15.11±2.28)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±0.12)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^[22]。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±0.36)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^[23],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± 1.83)µg/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^[24]、滇池^[25]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~ 5.50 m之间,均值(1.62±0.10)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 m⁻¹之间,均值(1.03±0.07)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 (PAR) = 1.005 8(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]. Hydrobologia, 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. Spatialtemporal variations of eupthotic 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] PHLIPS 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] PHLIPS 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. Threedimensional 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.

(编辑 郑 洁)