

香溪河库湾春季水华期间水体光学特征及相关分析

徐耀阳^{1,2} 叶麟^{1,2} 韩新芹^{1,2} 蔡庆华¹

(1 中国科学院水生生物研究所; 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了香溪河库湾春季水华期间(2006年3月3日—4月16日)透明度水层可见光衰减系数 K_{sd} 的时空特征, 分析其与表层水叶绿素 a 浓度、DOC 浓度和透明度 S_d 的相关关系。结果表明: 香溪河库湾春季水华可见光衰减系数 K_{sd} 时空变异很大; 除峡口河段(样点 X7—X8)外, 可见光衰减系数 K_{sd} 的变化特征取决于叶绿素 a 浓度和 DOC 浓度的时空变化, 类似于深水湖泊; 除峡口河段(样点 X7—X8)外, 香溪河库湾可见光衰减系数 K_{sd} 和透明度之间呈反比的关系具有显著的相关, 但它们之间的反比关系因水体叶绿素 a 和无机悬浮颗粒的空间差异而有所不同。

关键词: 香溪河库湾; 春季水华; 光衰减系数; 叶绿素 a ; DOC 浓度; 透明度

中图分类号: Q178.05 文献标识码: A 文章编号: 1009-3207(2006)01-0084-05

由于水体中有色可溶性有机物(Colored dissolved organic matter, CDOM)、无机悬浮颗粒(Particulate inorganic matter, PIM)、浮游植物以及水体本身对太阳光的吸收和散射, 使其强度随深度增加而不断衰减^[1-3], 但这四类物质对太阳光谱中不同波长光的吸收和散射能力有明显差异。纯水本身强烈吸收长波辐射红光(680nm), 其吸收和散射是所有水体中共有的, 可认为是水体光衰减系数的本底(称背景值)^[3,4]。CDOM 是溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)的主要组成部分, 因此大多数学者常把 DOC 浓度作为 CDOM 的指标^[1,5]。水体中 CDOM 对太阳光谱中的紫外辐射(300nm)和可见光的蓝光(440nm)之间的波段有着强烈的吸收^[3,6,7], 其吸收强度随着波长的减少而呈指数上升^[4,8]。PIM 的主要组成部分是泥沙颗粒, 其吸收光谱与 CDOM 类似, 对蓝光有较强的吸收^[3], 但对紫外光在水中衰减的影响很小^[6]。水体光学特性的研究通常采用叶绿素 a 浓度作为浮游植物生物量的指标^[9]。叶绿素 a 是浮游植物中最重要也是最普遍的光合色素, 它在可见光谱的蓝光和红光波段有很强的吸收, 但对绿光(540nm)的吸收则很弱^[3]。因此, 可见光(400—700nm)在水体中的衰减程度取决于水中 DOC、PIM

和叶绿素 a 的含量。

香溪河系长江三峡水库湖北库区第一大支流, 其干流长 94km, 流域总面积 3099km², 地处东经 110°25′—111°06′, 北纬 30°57′—31°34′^[10,11]。三峡水库蓄水后, 香溪河下游河段水位随之升高, 水流减缓, 泥沙淤积, 水环境由典型的河流水体转变为类似湖泊的缓流水体(称为库湾)^[10-13]。本文根据香溪河库湾春季水华期间可见光辐照度、叶绿素 a 、溶解性有机碳和透明度的实测数据, 研究香溪河库湾春季水华可见光衰减系数时空特征, 分析其与叶绿素 a 、溶解性有机碳和透明度的相互关系, 探讨香溪河库湾水体光学特性, 对从光学角度探索三峡水库蓄水后对支流水环境和水生生态系统的影响具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 样点设置 在香溪河库湾黄阳畔渡口至峡口大桥水域及其支流高岚河河口共设 9 个样点(图 1), 由南至北依次分布如下: X1(黄阳畔渡口)、X2(官庄坪渡口)、X3(乔家坡)、X4(盐关五一桥)、X5(贾家店汇通港)、X6(屈原渡口)、X7(峡口镇)、X8(峡口大桥)、X9(高岚河河口)。于 2005 年 3 月 3 日至 4 月

收稿日期: 2005-08-31; 修订日期: 2005-09-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300); 国家自然科学基金重点项目(30330140)资助

作者简介: 徐耀阳(1982—), 福建泉州人; 硕士生。主要从事淡水生态学研究。邵晓阳、贾兴焕、周淑婵、李凤清等在实验过程中给予帮助, 谨致谢忱

通讯作者: 蔡庆华, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

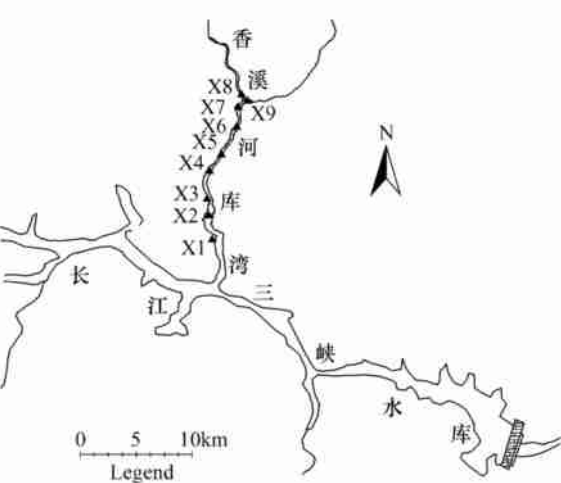


图 1 香溪河库湾采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xiangxi Bay

16 日期间每隔 1d 在所有样点进行光强测定和水样采集。

1.2 光强及有关数据的测定 观测所使用的仪器为美国 LI-COR 公司所生产的水下光量子仪(Li-cor192SA), 其感应波段为可见光波段(400—700nm)。每次采集数据前后将仪器擦干净, 在测量大气中的光合有效辐射前使传感器保持干燥, 测量时间集中在 10:00—14:00 以减少太阳高度角变化对测量结果的影响。对所有样点都测定表层(0⁺)、水深 0.5—5m 每隔 0.5m 的可见光光强。用 5L 采水器采集表层(0.5m)水样, 取 60mL 水样由预先处理过(450℃, 4h)的 WaterMan GF/F 滤膜过滤, 酸化至 pH<2, 低温保存, 由岛津公司 TOG-V CPH+ ASF-V 总有机碳分析仪分析。叶绿素 *a* 按有关湖泊调查规范测定^[14], 仪器为 UV-7201 分光光度计。透明度用直径为 30cm 的白色赛克圆盘(Secchi disc)测量。

1.3 可见光衰减系数的计算及数据处理 水下可见光光强与水深的关系式采用:

$$E(z) = b_0 \times b_1^z$$

其中 *z* 为水深, *E(z)* 为水深 *z* 处的光强, *b*₀ 和 *b*₁ 均为系数。

由该指数式和透明度 *S_d* 得出透明度 *S_d* 处的可见光光强 *E(S_d)*。于是, 透明度水层(0-*S_d*)的可见光衰减系数 *K_{Sd}* 由 Lambert-Beer 定律^[2-4,7]得出:

$$K_{Sd} = \frac{1}{Sd} \ln \frac{E(0)}{E(Sd)}$$

其中, *E*(0) 为起始面可见光辐照度。

上述分析以及光衰减系数 *K_{Sd}* 与其他参数的相关分析均采用 SPSS 10.0 软件进行^[15]。

2 结果与讨论

水下可见光光强与水深回归结果的判定系数 *r*² 都大于 0.98, 样本数 *N* 都在 9 以上(包括 9), 显著检验 *P* 值都小于 0.0001。

2.1 可见光衰减系数 *K_{Sd}* 时空特征

香溪河库湾可见光衰减系数 *K_{Sd}* 的空间分布见图 2(a)。结果表明: 整个采样期间样点 X1 和 X9 的 *K_{Sd}* 平均值较低, 分别为 0.8106 (m⁻¹) 和 0.7089 (m⁻¹); 样点 X8 的 *K_{Sd}* 平均值最高, 为 1.271 (m⁻¹); 其他样点(X2—X7) *K_{Sd}* 的平均值在 1.1—1.1m⁻¹ 之间; 各样点 *K_{Sd}* 都具有明显的变化。

香溪河库湾可见光衰减系数 *K_{Sd}* 的时间动态见图 2(b)。结果表明: *K_{Sd}* 在采样期间的变化大致分为 3 个阶段, 第一阶段(3 月 3 日—17 日)总体上呈递增趋势, 各样点在 3 月 3 日空间差异最小, 3 月 17 日空间差异最大, 3 月 4 日至 3 月 16 日空间差异比较一致; 第二阶段(3 月 17 日—25 日)呈逐渐递减趋势; 第三阶段(3 月 25 日—4 月 16 日)总体上又呈递增趋势, 各样点在 4 月 11 日和 12 日空间差异较小, 3 月 27 日空间差异略大些, 其他时间各样点空间差

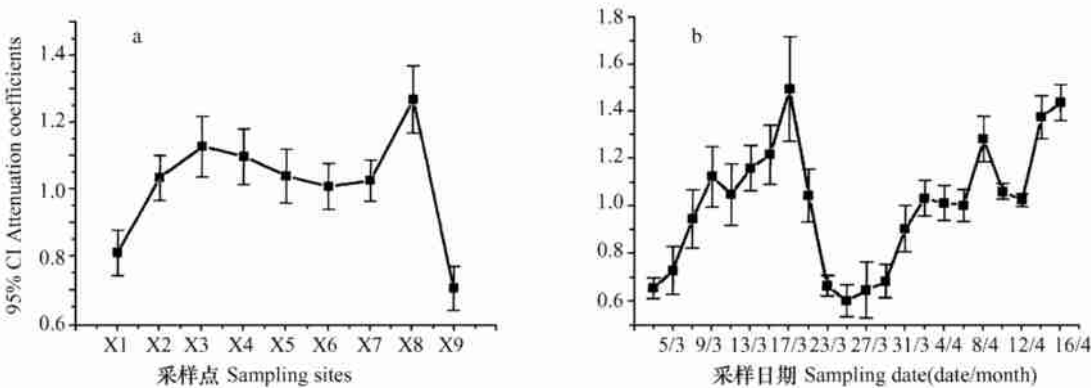


图 2 香溪河库湾可见光衰减系数 *K_{Sd}* 的空间分布(a)和时间动态(b)

Fig. 2 Spatial distribution (a) and temporal variation (b) of the PAR attenuation coefficients *K_{Sd}* in Xiangxi Bay

异也较为一致。

2.2 可见光衰减系数 K_{sd} 与叶绿素 a 浓度

不同类型的水体,光学衰减系数与叶绿素 a 的关系有明显差异,所呈现的关系并非与“包裹效应”理论(Packaging effect)^[3,16]相一致。浅水湖泊和其他水体沿岸带,可见光衰减系数的变化主要受有色可溶性有机物 CDOM、无机悬浮颗粒 PIM 的影响,而与叶绿素 a 浓度的相关性不好($r = 0.1769, n = 67, P < 0.14895$)^[4,17,18]。清洁的 I 类大洋水体和深水湖泊,水体光衰减主要取决于纯水及浮游植物,可见光衰减系数和叶绿素 a 具有很好的线性相关($r^2 = 0.87, n = 29$)^[3,16]。

对香溪河库湾 9 个样点可见光衰减系数 K_{sd} (m^{-1}) 与叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 分别进行线性回归,公式为:

$$K_{sd} = b_0 + b_1 \times chl. a$$

结果见表 1。表 1 表明: 峡口段(样点 X7—X8) $K_{sd}(m^{-1})$ 和叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 的相关程度比较低,可能受上游河道和公路改造带来较多的无机悬浮颗粒(泥沙)的影响;黄洋畔渡口至屈原渡口段(样点 X1—X6) $K_{sd}(m^{-1})$ 和叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 的相关程度比较高,有可能是水流减缓,泥沙淤积,水体上层光学特性受到无机悬浮物的影响较小;高岚河河口 $K_{sd}(m^{-1})$ 和叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 的相关性最好($r^2 = 0.900, n = 22, P = 0.000, F = 179.62$)。总的来说,香溪河库湾 $K_{sd}(m^{-1})$ 和叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 的关系具有显著的相关,但它们的关系具有一定差异,说明水华期间其水体可见光衰减系数的时空特征在很大程度上取决于浮游植物的时空变化,类似于深水湖泊。

表 1 香溪河库湾可见光衰减系数 $K_{sd}(m^{-1})$ 与叶绿素 a 浓度($\mu g/L$) 的线性关系

Tab. 1 Linear relationship between the attenuation coefficients of PAR $K_{sd}(m^{-1})$ and Chlorophyll $a(\mu g/L)$ in Xiangxi Bay

样点	b_0	b_1	样本	判定系数	显著检验	方差分析
Sampling sites	Constant	Regression coefficient	N	r^2	p	F
X1	0.438	0.0097	22	0.577	0.000	27.30
X2	0.534	0.0103	22	0.757	0.000	62.21
X3	0.514	0.0108	19	0.732	0.000	46.46
X4	0.476	0.0118	22	0.896	0.000	172.48
X5	0.601	0.0098	22	0.776	0.000	69.44
X6	0.684	0.0083	22	0.688	0.000	44.08
X7	0.811	0.0061	21	0.462	0.001	16.30
X8	0.945	0.0089	22	0.539	0.000	23.41
X9	0.473	0.0135	22	0.900	0.000	179.62

2.3 可见光衰减系数 K_{sd} 与 DOC 浓度

对香溪河库湾 9 个样点可见光衰减系数 K_{sd} (m^{-1}) 与 DOC 浓度($\mu g/L$) 分别进行幂函数回归,公式为:

$$K_{sd} = b_0 \times DOC^{b_1}$$

结果见表 2。表 2 表明: 黄阳畔渡口(样点 X1)和峡口河段(样点 X7, X8) $K_{sd}(m^{-1})$ 与 DOC 浓度($\mu g/L$) 的相关程度较低($r^2 \approx 0.40$); 官庄坪渡口至屈原渡口段 $K_{sd}(m^{-1})$ 与 DOC 浓度($\mu g/L$) 的相关程度较高($0.625 \leq r^2 \leq 0.726$); 高岚河河口 K_{sd} 与 DOC 浓度的相关性最好($r^2 = 0.785$)。总的来说,香溪河库湾水华期间 DOC 对可见光的衰减具有一定的影响,但其影响的大小有所不同。由此和表 1 分析可知: 香溪河库湾水华期间水体可见光衰减主要决定于浮游植物及其衍生物溶解性有机碳,而非无机悬浮泥沙颗粒,不同于有大量底泥再悬浮的浅水湖泊。

表 2 香溪河库湾可见光衰减系数 $K_{sd}(m^{-1})$ 与 DOC 浓度($\mu g/L$) 幂函数关系

Tab. 2 Power relationship between the attenuation coefficients of PAR $K_{sd}(m^{-1})$ and DOC($\mu g/L$) in Xiangxi Bay

样点	b_0	b_1	样本	判定系数	显著检验	方差分析
Sampling sites	Constant	Regression coefficient	N	r^2	p	F
X1	0.0039	0.727	22	0.406	0.001	13.65
X2	0.0012	0.901	22	0.762	0.000	63.94
X3	0.0018	0.857	19	0.732	0.000	46.47
X4	0.0011	0.934	22	0.728	0.000	53.47
X5	0.0060	0.713	22	0.663	0.000	39.40
X6	0.0228	0.534	22	0.625	0.000	33.30
X7	0.0562	0.420	22	0.375	0.003	11.42
X8	0.0502	0.467	21	0.376	0.002	12.07
X9	0.0038	0.784	22	0.785	0.000	73.10

2.4 可见光衰减系数 K_{sd} 与透明度 S_d

光学衰减系数和透明度都是反映水体光学性质的重要参数,它们之间存在一定的经验关系^[4,19]。Lorenzen 和张运林等得出光学衰减系数 K_{sd} 与透明度 $S_d(m)$ 呈反比的关系^[4,20]。对香溪河库湾 9 个样点 K_{sd} 与透明度 S_d 分别进行反函数回归,公式为:

$$K_{sd} = b_0 + \frac{b_1}{S_d}$$

结果见表 3。表 3 表明: 峡口大桥段(样点 X8) K_{sd} 与 S_d 的相关性不好($r^2 = 0.257$); 峡口段(样点 X7) K_{sd} 与 S_d 的相关性较好($r^2 = 0.257$); 黄阳畔渡口至屈原渡口段以有高岚河河口 K_{sd} 与 S_d 的相关程度很高($0.714 \leq r^2 \leq 0.867$); 各样点的反比关系式也具有

一定的差异。Steven 等(2002)研究表明, 悬浮泥沙含量高的水体其 K_{sd} 与 S_d 的关系不同于浮游植物为主的水体^[21]。香溪河库湾峡口段 K_{sd} 与 S_d 的相关程度较低, 有可能受上游河道和公路改造带来较多泥沙的影响。

表 3 香溪河库湾可见光衰减系数 $K_{sd}(\text{m}^{-1})$ 与透明度 $S_d(\text{m})$ 的反比关系

Tab. 3 Inverse relationship between the attenuation coefficients of PAR $K_{sd}(\text{m}^{-1})$ and Secchi disc $S_d(\text{m})$ in Xiangxi Bay						
样点 Sampling sites	b_0 Constant	b_1 Regression coefficient	样本 N	判定系数 r^2	显著检验 p	方差分析 F
X1	0.189	1.109	22	0.813	0.000	86.90
X2	0.196	1.212	22	0.857	0.000	119.74
X3	0.090	1.415	19	0.867	0.000	110.55
X4	0.148	1.351	22	0.818	0.000	89.98
X5	0.131	1.306	22	0.829	0.000	96.72
X6	-0.109	1.539	22	0.761	0.000	63.67
X7	0.142	1.143	22	0.534	0.000	21.75
X8	0.473	0.715	22	0.257	0.016	6.90
X9	0.051	1.180	22	0.714	0.000	49.96

参考文献:

[1] De Lange H J. The attenuation of ultraviolet and visible radiation in Dutch inland waters[J]. *Aquatic Ecology*, 2000, **34**: 215—226

[2] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's waters [J]. *Advances In Water Science*, 2003, **14**(4): 447—453[张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征. 水科学进展, 2003, **14**(4): 447—453]

[3] Han B P, Han Z G, Fu X. A lgal photosyntesis: mechanisms and models [M]. Beijing: Science Press, 2003[韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型. 北京: 科学出版社, 2003]

[4] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Regression analysis of beam attenuation coefficient under water in Lake Taihu [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2004, **35**(3): 209—213[张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化. 海洋与湖沼, 2004, **35**(3): 209—213]

[5] Yosef Z, James J A, Monika T, *et al.* Absorption spectroscopy of colored dissolved organic carbon in Georgia(USA) rivers: the impact of molecular size distribution[J]. *J. Limnol*, 2003, **62**(1): 41—46

[6] Rowena R, Clive H, *et al.* Penetration of solar ultraviolet radiation into New Zealand lakes: influence of dissolved organic carbon and catchment vegetation [J]. *Limnology*, 2001, **2**: 79—89

[7] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Study on optical properties of Lake Longgan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(2): 114—119 [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 龙感湖水体光学特性的观测. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 114—119]

[8] Laurion I, Vincent WF and Lean DRS. Underwater ultraviolet radiation: Development of spectral models for Northern high latitude lakes [J]. *Photochem Photobiol*, 1997, **65**: 107—114

[9] Feng, P, Steven W. Inorganic tripton in the Finger Lakes of New York: importance to optical characteristic s[J]. *Hydrobiologia*, 2005, **543**: 259—277

[10] Ye L, Li D F, Tang T, *et al.* Spatial distribution of water quality in Xiangxi River, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(11): 1959—1962[叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水质空间分布特性研究. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 1959—1962]

[11] Kuang Q J, Hu Z Y, Zhou G J, *et al.* Investigation on phytoplankton in Xiangxi River watershed and the evaluation of its water quality [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, **22**(6): 507—513[况琪军, 胡征宇, 周广杰, 等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价. 武汉植物学研究. 2004, **22**(6): 507—513]

[12] Luo G Y, Liu G T, Wang W B. About the control of eutrophication pollution to the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1999, **21**(3): 1—4[罗国源, 刘国涛, 王文标. 三峡库区水环境富营养化污染及其控制对策的思考. 重庆建筑大学学报, 1999, **21**(3): 1—4]

[13] Han Q W, Yang X Q. A review of the research work of reservoir sedimentation in China[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2003, **1**(3): 169—178[韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, **1**(3): 169—178]

[14] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. Observation and analysis of lake ecology [M]. Beijing: China Standard Press, 2000[黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准化出版社, 2000]

[15] Lu W D. SPSS for Windows Statistic Analysis(2nd edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002[卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2002]

[16] Stambler N, Lovengreen C, Tilzer M M. The underwater light field in the Bellingshausen and Amundsen seas (Antarctica). *Hydrobiologia*, 1997, **344**: 41—56

[17] 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]. *Limnol & oceanogr*, 1995, **40**: 416—421

[18] Battin T J. Dissolved organic matter and its optical properties in a blackwater tributary of the upper Orinoco river, Venezuela. *Org Geochem*, 1998, **28**(9): 561—569

[19] Li B H, Fu K C. The Study of Correlations between phytoplankton and the transparency, water color in Southern Yellow Sea [J]. *Journal of oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1999, **17**(3): 73—79[李宝华, 傅克付. 南黄海浮游植物与水色透明度之间的相关关系的研究. 黄渤海海洋, 1999, **17**(3): 73—79]

[20] Lorenzen MW. Phosphorus model and eutrophication[J]. *Water Pollution Microbiology*, 1978, **2**: 31—50

[21] Steven W, Mary Gail P, Nicholas O, *et al.* Tripton, transparency and light penetration in seven New York reservoirs[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **468**: 213—232

CHARACTERISTIC AND REGRESSION ANALYSIS OF THE PAR ATTENUATION COEFFICIENT IN XIANGXI BAY DURING SPRING BLOOM

XU Yao-Yang^{1,2}, YE Lin^{1,2}, HAN Xin-Qin^{1,2} and CAI Qing-Hua¹

(1. Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: During the period of spring bloom from March 3 to April 16, 2005 in Xiangxi Bay, The vertical attenuation coefficients (K_{sd}) of downward visible irradiance (PAR) and Secchi disc transparency (S_d) were measured with a scanning spectroradiometer and a 30 cm diameter black and white quadrant disc. Water chemistry variables such as chlorophyll-*a* and dissolved organic carbon (DOC) were measured to determine the relative contribution of attenuating constituent in explaining the substantial variation in the PAR attenuation coefficients K_{sd} . Based on the *in situ* investigation data obtained, The underwater light field in Xiangxi Bay was characterised and the relationship between these two optical properties of the underwater was quantified with SPSS software. The analyses including application of empirical theories demonstrate that temporal patterns and inter-system differences in K_{sd} and $1/S_d$ during the period were well correlated for most of the sampling sites, except in the Xiakou reach, and the inverse relationship these two optical properties is influenced by chlorophyll-*a* and inorganic tripton to some extent. Regression Analyses of these PAR attenuation coefficient data and observations of Chl*a* and DOC, document that Chlorophyll *a* and Dissolved organic carbon are the important constituents responsible for spatial distribution and temporal variation of the PAR attenuation coefficients K_{sd} in Xiangxi Bay, except in the Xiakou reach. In addition to application of empirical and deterministic modeling frameworks, those results demonstrate that the Xiangxi Bay in the optic characteristic during the period of spring bloom is similar to many deep lakes, and differ from many shallow lakes where increase of total suspended matter due to sediment resuspension results in decrease of transparency and increase of beam attenuation coefficient.

Key words: Xiangxi Bay; Spring Bloom; PAR Attenuation Coefficient; Secchi disc transparency; Chlorophyll *a*; Dissolved organic carbon