

# 巢湖秋冬季水体生物光学特性对比研究

张运林<sup>1,2</sup>, 朱广伟<sup>1</sup>, 吴生才<sup>1,2,3</sup>, 陈伟民<sup>1</sup>, 杨顶田<sup>4</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 盐城师范学院, 江苏 盐城 224002; 4. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

**摘要:** 基于 2002—2003 年秋、冬 2 季原位水下光场观测资料, 分析了巢湖不同湖区水体的生物光学特性, 探讨了水下辐照度光谱分布, 光衰减系数的光谱分布、季节变化及湖区分布, 影响光衰减系数的主要因子。结果表明, 水表面光谱最强出现在 550~560 nm 绿光波段, 水下光谱在紫光波段衰减最强烈, 其次是蓝、绿光, 红光衰减最弱, 随着深度增加, 绿、红光在整个光谱成分中比例越来越高; 秋季 360~750 nm 波段衰减系数在 1.29~11.66 m<sup>-1</sup> 间变化, 冬季在 1.56~18.01 m<sup>-1</sup> 间变化; 光衰减系数的空间分布是位于巢湖东部的 C4 点要好于中西部的 C1—C3; 光学衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋势, 但到近红外又有所增加; 衰减系数跟悬浮物的相关性最好, 平均相关系数平方为 0.55, 其次是溶解性有机碳, 为 0.32, 跟叶绿素 a 的相关性最弱, 仅为 0.27, 衰减系数与悬浮物、溶解性有机碳、叶绿素 a 的多元线性回归在短波部分要好于长波部分。

**关键词:** 巢湖; 光学特性; 衰减系数; 悬浮物; 溶解性有机碳; 叶绿素 a

**中图分类号:** X122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2004)05-0949-05

## Optical and Biological Properties of Lake Chaohu in Autumn and Winter

ZHANG Yun-lin<sup>1,2</sup>, ZHU Guang-wei<sup>1</sup>, WU Sheng-cai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Wei-min<sup>1</sup>, YANG Ding-tian<sup>4</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Yancheng Teachers College, Yancheng 224002, China; 4. South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** Underwater light climate and optical and biological properties in Lake Chaohu were studied through analyzing the in situ measurement data from 2002 to 2003. The seasonal dynamics and regional distribution of light attenuation, the spectral distribution of attenuation coefficients, and the relative roles of total suspended solid (SS), dissolved organic carbon (DOC), chlorophyll a (Chla) as light attenuators were assessed. The attenuation of light in Lake Chaohu was rather high, with spectral attenuation coefficient from 360 to 750 nm being 1.29~11.66 m<sup>-1</sup> in autumn, and being 1.56~18.01 m<sup>-1</sup> in winter. The eutrophic depth ranged from 1 to 1.5 m. The ultraviolet waveband was attenuated most strongly because of the higher levels of colored dissolved organic matter. Green light basically penetrated as far as red although red maybe was the most penetrating waveband. The spatial distribution showed that attenuation coefficient was larger at sampling site C4 than those at sampling sites C1—C3. The attenuation coefficient decreased with the increase of wavelength, but increased in near-infrared wavelength. The higher correlation coefficient was obtained between attenuation coefficient and total suspended solid than dissolved organic and chlorophyll a, with mean correlation coefficient square being 0.55 from 360 to 750 nm, and multiple linear regression analysis showed that the correlation was better in shorter wavelength than in longer wavelength. Total suspended matter and color dissolved organic matter were the main light attenuators in Lake Chaohu in autumn and winter.

**Keywords:** Lake Chaohu; optical properties; attenuation coefficient; total suspended solid; dissolved organic carbon; Chlorophyll a

随着光学技术和遥感技术的迅速发展, 利用光学遥感手段来大范围监测叶绿素 a、悬浮物和溶解性有

机物等水质因子, 已逐步受到国内外学者以及管理者的高度重视, 国内外许多学者在基于对 I 类大洋水体和 II 类海洋沿岸水体水色遥感研究的基础上, 对内陆水体的水色遥感也进行了大量研究<sup>[1-3]</sup>, 得到许多理论、半理论-半经验、经验的遥感反演算法。李素菊等<sup>[4]</sup>曾基于高光谱地物光谱仪探讨了巢湖浮游植物

收稿日期: 2004-02-19

基金项目: 中科院知识创新工程项目(KZCX1-SW-12); 国家自然科学基金项目(40203007); 863 项目(2002AA0601011)

作者简介: 张运林(1976—), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事湖泊光学和湖泊生态学研究。E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

叶绿素含量与反射光谱特征的关系,但并未涉及巢湖水体生物光学特性。关于巢湖这样一个大型浅水湖泊水体生物光学特性的研究一直未见报道。但国内外学者在湖泊内水下光场的时空分布、湖泊的生物光学特性等方面都进行了大量研究<sup>[5~8]</sup>。本文基于2002年10月及2003年1月在巢湖进行的野外原位水下光场测定,重点探讨不同季节、不同湖区水下辐照度的光谱分布、光衰减系数的光谱变化以及光衰减系数与主要水色因子悬浮物、叶绿素a以及溶解性有机物的关系,并与世界上类似的湖泊进行比较,为巢湖大范围水色遥感提供基础资料和信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 巢湖概况

巢湖是中国第四大淡水湖,位于长江北岸安徽合肥市和巢湖市之间,面积770 km<sup>2</sup>,平均水深2.69 m<sup>[9]</sup>。巢湖从20世纪80年代初就出现蓝藻水华暴发,至今仍十分严重,为一富营养化藻型湖泊。

### 1.2 采样时间与站位

2002年10月11日、2003年1月14日分别在巢湖自西向东设置4个采样点(C1、C2、C3、C4)、进行全湖巡测,各自代表秋季和冬季过程。为减小太阳高度角变化对水下光谱测量结果的影响,测量集中在10:00—14:00进行,观测期间天空晴朗无云,其中2002年10月11日基本上无风,湖面较为平静,2003年1月14日风速在4 m·s<sup>-1</sup>左右,湖面存在一定波浪,波高大概在3~5 cm。巢湖的采样点位置见图1。



图1 巢湖采样点位置图

Figure 1 Distribution of sampling sites in Lake Chaohu

### 1.3 采样与测量方法

光谱的测量选用Macam公司的水下光谱仪,仪器的相关参数参见文献<sup>[8,10]</sup>。叶绿素a的测定采用分光光度法测量,选用的仪器为上海仪器厂生产的7230分光光度计。DOC的测定方法是现场用Whatman GF/F玻璃纤维滤膜(直径为25 mm,孔径为0.45 μm)过滤水样,在1020型TOC仪进行测定。悬浮物采用称重法测定,透明度用直径为30 cm的白色赛克圆盘进行测量。

## 1.4 光学衰减系数的计算

水下辐照度在光学性质均一的水体中的衰减遵从下列衰减规律<sup>[11]</sup>:

$$K_d = -\frac{1}{z} \ln \frac{E(z)}{E(0)} \quad (1)$$

式中:  $K_d$  为光学衰减系数,  $z$  为从湖面到测量处的深度,  $E(z)$  为测量处的辐照度,  $E(0)$  为起始面辐照度。  $K_d$  值通过对不同深度处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  $K_d$  值才被接受,否则视为无用值。

## 2 结果与分析

### 2.1 采样点理化状况

表1给出了与湖泊水体生物光学特性相关的部分理化参数。由表1可知,冬季水位明显要低于秋季,由于冬季水位较低、湖泊蓄水量减小,水体的自净能力下降可能导致冬季水质要差于秋季,这从秋、冬两季的透明度、营养盐指标上也能得到体现。秋季各点悬浮物浓度差异比较显著,而冬季则差异不大,但全湖的透明度随着悬浮物增加而降低,悬浮物与透明度存在显著性负相关:  $SS = 95.71(\pm 12.21) - 139.91(\pm 31.05)SD$  ( $r^2 = 0.77$ ,  $P < 0.005$ ),说明悬浮物是引起湖水透明度变化的主要因子之一。

### 2.2 水下辐照度的光谱分布

为探讨水下辐照度的光谱分布,我们选取2002年10月份在C4点的数据加以分析,其光谱以及紫(380 nm)、蓝(440 nm)、绿(550 nm)、红(690 nm)4种单色光垂直分布见图2。由图2可知,由于太阳光本身波谱成分的差异加之水体中各组成物质对光的选择性吸收,同一深度不同光谱的辐照度是不同的,在水表面0 m处其最大值一般为550~560 nm,并且高值和低值差异显著,随着深度增加,波谱成分出现红移现象。水下光谱在紫光波段衰减最强烈,其次是蓝光、绿光,红光衰减最弱,随着水深度的加深,紫、蓝光在整个光谱中所占的份量越来越小,而红光所占的比例越来越大,上述结论与在太湖的研究结果较为相似<sup>①</sup>。此外,这些结论与Kirk等人报道的在内陆淡水水体里,由于可溶性有机质和悬浮物的吸收、散射往往是绿光和红光穿透深度最深的结论一致<sup>[11]</sup>,与世界上其他地区许多内陆湖泊研究结果也较为一致<sup>[12,13]</sup>。从光穿透的深度来看,到水下1.5 m其光强已基本不足水表面光强的1%。

①张运林,秦伯强,陈伟民. 水下光场及其影响机制的水槽模拟实验研究. 自然科学进展,待刊。

表 1 采样点部分理化参数

Table 1 Physical and chemical parameters of sampling sites

时间	秋季(2002年10月11日)				冬季(2003年1月14日)			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
水深/m	2.7	3.3	3.8	3.4	2.3	2.4	2.9	2.6
透明度/m	0.30	0.40	0.45	0.60	0.35	0.30	0.30	0.35
表水温/°C	25.0	21.8	22.0	22.1	3.8	3.9	4.2	4.1
pH	8.38	8.15	8.36	7.90	8.58	8.19	8.22	7.77
DO/mg·L <sup>-1</sup>	5.46	4.94	4.3	4.38	12.77	11.15	12.4	10.6
表层SS/mg·L <sup>-1</sup>	59.68	53.16	23.28	13.49	46.36	47.33±4.50	57.30	38.36
表层Chla/μg·L <sup>-1</sup>	1.12	5.02	6.14	1.12	20.65	11.53±2.26	13.35	10.60
表层DOC/mg·L <sup>-1</sup>	8.164	10.661	10.741	9.28	5.352	5.158±0.061	4.376	4.632
表层TN/mg·L <sup>-1</sup>	2.18	1.85	0.95	0.66	6.06	3.05±0.10	1.86	2.52
表层TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.14	0.11	0.07	0.05	0.21	0.10±0.02	0.07	0.04

注:2003年1月14日C2点的值为3个平行样的均值。

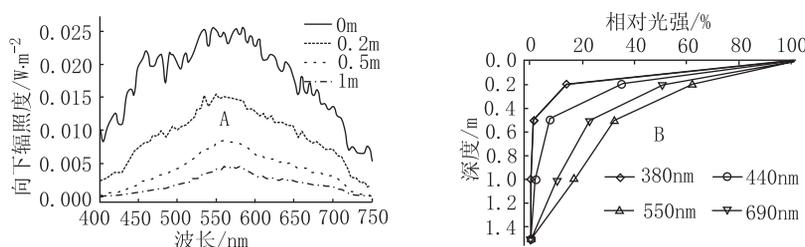


图 2 C4 点水下辐照度的光谱分布及紫、蓝、绿、红 4 种单色随深度衰减

Figure 2 Spectral distribution of underwater downward irradiance and attenuation of ultraviolet, blue, green and red at sampling C4 on Oct. 16 in 2002

### 2.3 光衰减系数的变化

图 3 给出了巢湖秋、冬季 C1—C4 点 360~750 nm 波段衰减系数的光谱分布, 秋季全湖衰减系数在 1.29~11.66 m<sup>-1</sup> 间变化, 冬季在 1.56~18.01 m<sup>-1</sup> 间变化, 其值跟在太湖研究结果比较接近<sup>[14]</sup>。从光衰减系数的季节变化来看, 冬季的光衰减系数值总体上要高于秋季, 说明冬季水体更为混浊, 水质不如秋季, 其中又以 C3、C4 点最为明显。从空间分布来看, C4 点的光衰减系数无论是秋、冬季其值都是最低的, C3 点在秋季比 C1、C2 点也明显要低, 但冬季则与 C1、C2 差异不大。由于合肥是巢湖污水的主要来源, 加之巢湖西部的丰乐河是巢湖最大的入湖河流, 其携带的大量污染物进入巢湖, 因而巢湖总体上是西部水质要比东部差(表 1), 光衰减系数的空间分布也反映了巢

湖水质空间差异的现状。冬季光衰减系数的波动明显要大于秋季, 这主要与观测期间的风浪有关, 据现场观测记录, 秋季采样基本上是风平浪静, 而冬季采样观测到的风速在 1.5~4.5 m·s<sup>-1</sup> 间变化。从两次光衰减系数的波动来看, 建议在进行水下光场观测时尽量选择风平浪静的天气, 可以避免测量得到的水下辐照度不能真正反映光在湖里衰减的情况, 提高测试的精度。

衰减系数的光谱分布是从近紫外短波的 360 nm 到 580 nm 左右呈显著下降趋势, 至 580 nm 左右黄绿光波段达最小值后到红光波段又有所增加, 尤其在到 700 nm 以上的近红外波段表现更为突出, 这些结果跟在太湖的研究相似<sup>①</sup>, 但以前在太湖的研究常常发现在 670 nm 附近出现由于叶绿素的特征吸收而形成的峰

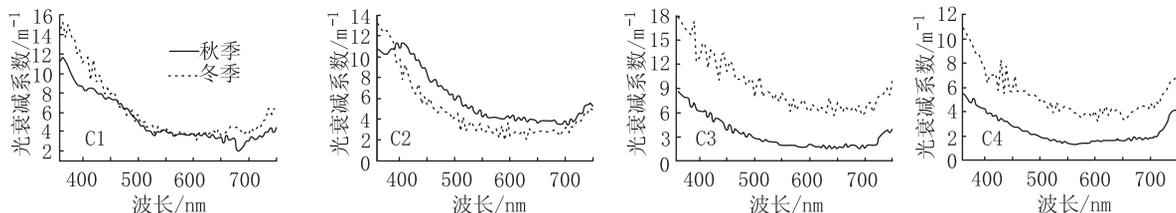


图 3 巢湖不同采样点秋、冬季衰减系数的光谱分布

Figure 3 Spectral distributions of downward attenuation coefficients at different sampling sites of Lake Chaohu in autumn and winter

值,但在巢湖秋、冬季节这个峰值并没有出现,说明巢湖进入秋、冬季后由于浮游藻类的大量死亡和进入越冬期,叶绿素 a 浓度较低,浮游藻类对光的吸收和散射很小被其他光衰减因子掩盖掉,致使特征吸收峰值没有凸现出来。而太阳辐射在蓝光的强烈衰减跟太湖一样主要来自于溶解性有机物的吸收所致,红光特别是近红外波段衰减系数的增加部分来自于纯水的自身吸收,因为纯水对 600 nm 波段后的红光吸收显著增加。巢湖水体衰减系数的光谱分布与国外许多浅水湖泊和浅水海湾、湖湾的研究结果也较为相似<sup>[10,12,13]</sup>。

#### 2.4 衰减系数与透明度、悬浮物、溶解性有机碳及叶绿素 a 的关系

图 4 给出了不同波段光衰减系数与透明度 (SD) 及主要光衰减因子悬浮物 (SS)、溶解性有机碳 (DOC)、叶绿素 a (Chla) 线性拟合得到的相关系数平方值。从图 4 可知,光衰减系数与透明度的相关性在

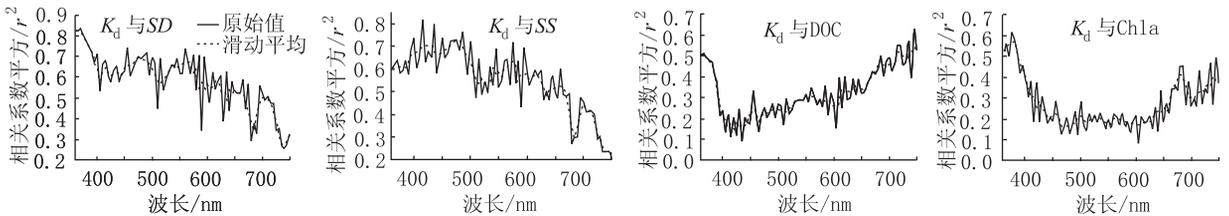


图 4 各波段衰减系数与透明度、悬浮物、溶解性有机碳及叶绿素 a 的相关性

Figure 4 Correlations between spectral attenuation coefficients and transparency, suspended solids, dissolved organic carbon, chlorophyll a

( $r^2 = 0.51, N = 8, P = 0.455$ )

国外许多学者在研究了光学衰减系数与衰减因子的关系时提出一些具体湖泊的多元线性回归方程<sup>[15,16]</sup>。对不同波段衰减系数作多元线性拟合,以下给出紫 (380 nm)、蓝 (440 nm)、绿 (550 nm)、红 (690 nm) 光衰减系数与悬浮物、溶解性有机碳及叶绿素 a 多元线性回归方程。从回归结果来看,短波部分相关性最好,到近红外的长波相关性最差,这是因为无论是 DOC 还是悬浮物,其在短波的吸收系数均要明显大于长波部分,而叶绿素 a 只在 440 nm 和 660 nm 存在两个吸收峰,到长波部分纯水本身的吸收开始占主导地位,而在回归方程中未考虑纯水这个因子,造成长波相关性显著下降。

$K_d(380) = 3.557 + 0.123SS - 0.084DOC + 0.282Chla$   
( $r^2 = 0.91, N = 8, P < 0.05$ )

$K_d(440) = 1.862 + 0.122SS - 0.062DOC + 0.082Chla$   
( $r^2 = 0.62, N = 8, P = 0.232$ )

$K_d(550) = 2.042 + 0.078SS - 0.221DOC + 0.027Chla$   
( $r^2 = 0.61, N = 8, P = 0.241$ )

$K_d(690) = 3.355 + 0.038SS - 0.259DOC + 0.033Chla$

短波最好,随着波长的增加,相关系数平方值大致呈下降趋势,到近红外相关性最弱。这大概是因为短波光衰减系数比长波大,因而使得白色透明度盘更易被观察到,加之人的视觉在近红外识别能力下降所致。从光衰减系数与主要衰减因子的拟合来看,悬浮物跟衰减系数的相关性最好,平均相关系数平方为 0.55,其次是 DOC,为 0.32,跟叶绿素 a 的相关性最弱,仅为 0.27。衰减系数跟悬浮物的相关性 650 nm 以前均较好,650 nm 之后急剧下降,这是因为悬浮物在 650 nm 之后对光的吸收显著下降,到 750 nm 附近基本上接近 0,因而许多作者在研究悬浮物对光的吸收时常选择 750 nm 的值做散射订正。尽管前面在探讨衰减系数的光谱分布时没有发现 670 nm 附近叶绿素 a 特征吸收峰,但从衰减系数与叶绿素 a 相关分析中能发现其在 670 nm 附近相关性显著增加,证明在此波段 Chla 对光的吸收还是起到了一定作用。

### 3 结论

(1) 水表面光谱光强最强出现在 550 ~ 560 nm 绿光波段,水下光谱在紫光波段衰减最强烈,其次是蓝、绿光,红光衰减最弱,随着深度增加,绿、红光在整个光谱成分中的比例越来越高,到 1.5 m 深度处其光强基本上已不足表面光强的 1%。

(2) 秋、冬季巢湖光谱衰减系数值都比较高,其中又以冬季高于秋季,秋季 360 ~ 750 nm 波段衰减系数在  $1.29 \sim 11.66 \text{ m}^{-1}$  间变化,冬季在  $1.56 \sim 18.01 \text{ m}^{-1}$  间变化;从空间分布来看,C4 点的光衰减系数明显低于 C1、C2、C3 点。光学衰减系数的光谱分布是随着波长的增大呈下降趋势,但到近红外又有所增加。

(3) 衰减系数与主要光衰减因子相关分析显示,与悬浮物的相关性最好,平均相关系数平方为 0.55,其次是 DOC,为 0.32,跟叶绿素 a 的相关性最差,仅为 0.27,衰减系数与悬浮物、溶解性有机碳、叶绿素 a 的多元线性回归在短波部分要好于长波部分。

## 参考文献:

- [1] Gons H J, Rijkeboer M, Bagheri S, et al. Optical teledetection of chlorophyll a in estuarine and coastal waters[J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34: 5189 – 5192.
- [2] Pulliainen J, Kallio K, Eloheino K, et al. A semi – operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data[J]. *The science of the total environment*, 2001, 268: 79 – 93.
- [3] Flink P, Lindell T, östlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes[J]. *The science of the total environment*, 2001, 268: 155 – 1697.
- [4] 李素菊, 吴 倩, 王学军, 等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 228 – 234.
- [5] 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]. *Limnol. Oceanogr*, 1995, 40: 416 – 421.
- [6] Cobelas M A, Baltanús A, Velasco J L, et al. Daily variations in the optical properties of a small lake[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47: 1051 – 1063.
- [7] Højerslev N K, Aarup T. Optical measurements on the Louisiana shelf off the Mississippi river[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55: 599 – 611.
- [8] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及变化特征[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 447 – 453.
- [9] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] Schubert H Sagert S, Forster R M. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary[J]. *Helgol Mar Res*, 2001, 55: 12 – 22.
- [11] Kirk, J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem[M]. Cambridge University Press. Cambridge, Britain, 1994. 47 – 84, 129 – 144.
- [12] Reinart A, et al. Optical and biological properties of Lake ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake ülemiste [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2001, 6: 75 – 84.
- [13] Arst H, et al. Optical investigations of Estonian and Finnish lakes[J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1996, 2: 187 – 198.
- [14] 杨顶田, 陈伟民, 张运林, 等. 太湖水体光学特征及其对水中初级生产力的影响[J]. *农村生态环境*, 2003, 19(2): 24 – 28.
- [15] Buiteveld H A. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and secchi depth[J]. *Neth J aquat Ecol*, 1999, 529: 55 – 65.
- [16] Van Duin E H S, Blom G, Los F G, et al. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 444: 25 – 42.