

太湖水体光学衰减系数的特征及参数化*

张运林 秦伯强[†] 陈伟民[†] 杨顶田

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008; 中国科学院研究生院 北京 100039)

[†](中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

摘要 利用 2001—2002 年周年太湖全湖不同湖区湖泊光学及表层水样的实测资料, 分析了太湖水体表层光学衰减系数与透明度、无机和有机颗粒物物质及叶绿素 *a* 的相关关系, 建立了表层水光学衰减系数与无机、有机颗粒物物质及叶绿素 *a* 多元线性回归方程。结果表明, 光学衰减系数与透明度的关系为: $K_d = 0.096 + \frac{1.852}{ST}$; 表层水光学衰减系数与无机、有机颗粒物物质及叶绿素 *a* 多元线性回归方程为: $K_d = 0.219 + 0.0768 C_{iss} + 0.214 C_{det} + 0.006 C_{chl}$; 光学衰减系数变化的主要影响因子是无机及有机颗粒物。

关键词 光学衰减系数, 无机颗粒, 有机颗粒, 叶绿素 *a*

中图分类号 P733.3

湖泊水下光照对水生生态系统影响深刻, 不仅影响了浮游藻类、沉水植物的生长、繁殖, 还决定了浮游动物和鱼类的捕食。湖水对太阳光的衰减包括吸收和散射两方面。吸收效应是由湖水中的水分子、溶解性物质、浮游植物和悬浮颗粒对光的直接吸收产生的; 散射效应主要是由水分子、浮游生物和悬浮颗粒对光的散射使光束偏离原来的路径而造成光能损失。光学衰减系数反映的是两者总效应。由于水中有机物、浮游植物和无机物本身受温度、溶解氧、营养盐、湖底沉积物及风浪等因素的影响和制约, 所以湖水的光学衰减系数在一定程度上是湖泊生物、水文要素和水化学要素的综合反映。作者根据辐照度、有机颗粒、无机颗粒及浮游植物的实测资料, 建立了湖水光学衰减系数与它们之间的数学关系, 旨在通过对光学衰减系数变化规律的研究, 了解湖水中无机和有机物质、浮游植物的分布和变化。

1 测点的布设及数据处理

为了反映太湖全湖不同水域水体表层光学衰减系数与无机颗粒、有机颗粒及浮游植物的关系, 研究期间在太湖不同湖区均布有测点, 各测点具

体位置见图 1, 各点经纬度见表 1。全年分夏、秋、冬 3 季采样(春季和秋季水下辐照度相近, 因而不再进行采样分析), 时间分别选择在 8 月 16—17 日、11 月 16—17 日、3 月 16—17 日。现场观测项目包括标量辐照度、向上辐照度、向下辐照度、透明度、水温, 并同时采集水样回实验室分析悬浮有机颗粒、无机颗粒及叶绿素 *a* 浓度, 其中采集的水样是水下 50cm 以上的表层水。辐照度观测从湖面开始分 5 层测定, 分别为 0、-20、-50、-100、-150cm, 但计算光学衰减系数与各影响因子的关系时主要用 0—50cm 水层的衰减系数, 在进行回归分析时采用全年不同湖区的所有资料, 旨在探讨各因子对光学衰减系数的影响程度。

分析所用的辐照度数据都是由现场测定所得, 但没有考虑波浪所引起水层深度的变化。对数据的处理主要包括测量值的仪器误差订正、水中辐照度测量期间, 因天空状态变化引起的水中辐照度测量值误差的修正和剔除个别不合理数据。

2 实验仪器、原理及方法

辐照度测量所选用的仪器为英国 Macam 公

* 中国科学院知识创新工程项目, KZCX1-SW12 号 和 KZCX2-311 号。张运林, 博士生, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

收稿日期: 2002-07-22, 收修改稿日期: 2003-05-16

表 1 各测点的位置及所属湖区

Tab.1 The location and lake region located of supervision points

点号	0	1	3	5	7	8
位置	梁溪河口	三山岛边	二号航标	四号航标	六号航标	八号航标
纬度(N)	31°28.60'	31°30.78'	31°28.60'	31°24.69'	31°20.36'	31°15.91'
经度(E)	120°13.38'	120°11.49'	120°11.61'	120°11.25'	120°10.85'	120°10.40'
所属湖区	五里湖	梅梁湾	梅梁湾	梅梁湾	湖心区	湖心区
点号	9	10	11	12	13	
位置	五里湖	大浦口	小梅口	东太湖	大贡山	
纬度(N)	31°30.78'	31°18.87'	30°57.82'	31°01.30'	31°23.19'	
经度(E)	120°15.19'	119°56.73'	120°07.12'	120°27.23'	120°17.73'	
所属湖区	五里湖	沿岸区	沿岸区	东太湖	贡湖	

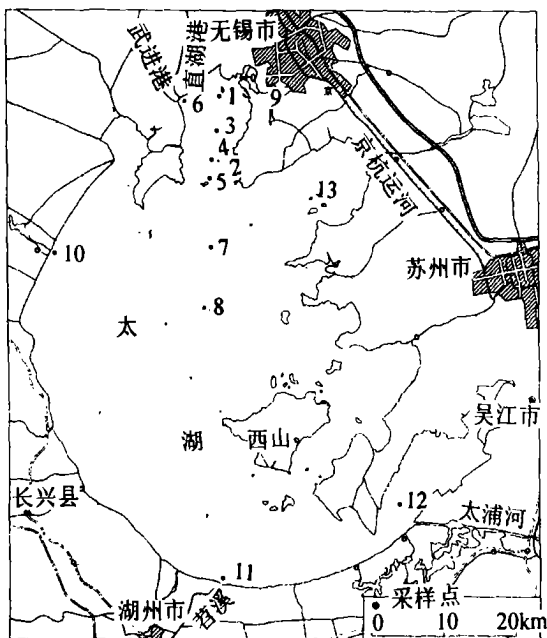


图 1 监测点分布

Fig.1 The distribution of supervision points

司生产的 SR9910-PC 型水下光辐谱仪,其携带两个探头:一个测标量辐照度,一个测向下向上辐照度。测量波段范围为 240—800nm,包括紫外和可见光波段。但在实验期间主要测量 400—700nm 光合有效辐射波段(在没有特别说明的情况下,所论述的辐照度都是指 400—700nm 波段),波长精度为 $\pm 0.5\text{nm}$,焦距长 100mm,探头接收到的光信号经数据线由 RS232 接口传送到计算机上,转变为电信号经电子线路对讯号放大、处理,然后在计算机上进行显示和存储。仪器经计量单位标定以保证测量数据的可靠性。

透明度采用直径为 30cm 的白色赛克圆盘进行测量。

无机和有机颗粒的测定按图 2 实验流程进行 (Gons *et al*, 1998)。

上述测定中有 3 次称重,其中 W2-W1 为总悬浮质重,W3-W1 为无机颗粒重,W2-W3 为有机颗粒重。

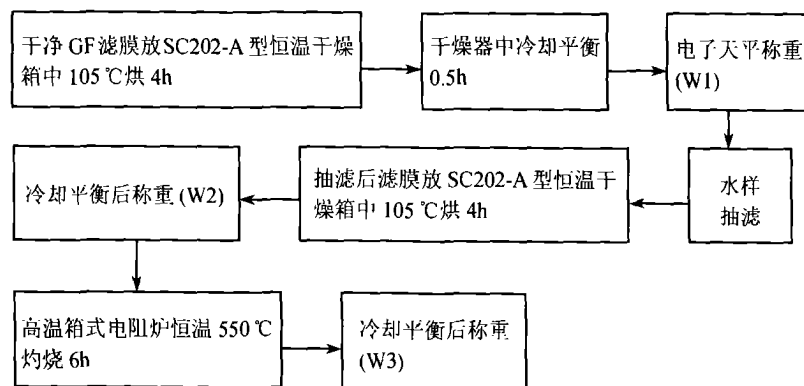


图 2 无机和有机颗粒测定的实验流程

Fig.2 The measurement process of inorganic and organic suspended matter

叶绿素的测定按有关湖泊调查规范进行(黄祥飞等,1999),选用的仪器为上海仪器厂生产的7230分光光度计。

3 结果与讨论

3.1 光学衰减系数的计算式

由于不同湖水组成物质不一样,其对不同波长的太阳光的吸收和散射也不一样,因此不同波长的辐照度在不同水层随深度衰减各不相同,并且光学衰减系数还与入射光场的太阳高度角、天气状况和湖面粗糙度有关。但大部分学者采用一种简化的模式,即认为 $K(\lambda)$ 在观测深度范围内不随波长而变化,可近似地看为常数,从而得到衰减系数的下述计算式(Kirk,1994;李武等,1997):

$$K_d = \frac{1}{z} \ln \frac{E(z)}{E_0} \quad (1)$$

式中: K_d 为光学衰减系数(m^{-1}), z 为从湖面到测量处的深度, $E(z)$ 为深度 z 处的辐照度, E_0 为起始面辐照度。 K_d 值变化很大,在清洁海水中 K_d 仅为 $0.03m^{-1}$,到浑浊的河湖及入海口处 K_d 则增至 $15m^{-1}$ (Kirk,1994)。湖水的衰减系数主要由纯水、黄色物质、悬浮颗粒及浮游植物的吸收和散射组成,其中,纯水的吸收和散射是一切湖水所共有的,可以认为是湖水衰减系数的本底(又称背景值)。因此湖水衰减系数的变化部分是由溶解性物质、悬浮颗粒和浮游植物的成分和数量的变化所决定的。太湖是个大型浅水湖泊,不同湖区、不同时间以及不同深度的水层中溶解物质、悬浮颗粒和浮游植物的成分和数量都存在差异,其水体光学衰减系数的时空分布、垂直变化及光谱特性参见文献(张运林等,2003)¹⁾。

3.2 光学衰减系数与透明度的关系

透明度和光学衰减系数同为反映湖水光学性质的重要参数,它们之间存在一定的经验关系(李武等,1993)。太阳光在湖水中的传播随深度的增加呈指数衰减(Jerlov,1976),Lorenzen(1978)曾近似地认为透明度深度上的光强等于表面光强的 20×10^{-2} ,从而得到透明度与光学衰减系数的关系式(Lorenzen,1978):

$$ST = \frac{-\ln(0.2)}{K_d} \quad (2)$$

式中 ST 为透明度(m), K_d 为光学衰减系数(m^{-1})。由上式可知,透明度与光学衰减系数呈反比关系。李宝华等(1999)用上式来反映由浮游植物和悬浮物引起的衰减系数与海水透明度的关系。作者根据测得的透明度的倒数和光学衰减系数进行线性回归,发现它们相关性很好。回归结果为:

$$K_d = 0.096 + \frac{1.852}{ST} \quad (3)$$

($R = 0.92, SD = 1.147, n = 34, P < 0.0001$)

式中 K_d 为光学衰减系数(m^{-1}), ST 为透明度(m), R 为相关系数, SD 为标准离差, n 为样本数, P 为检验的显著性水平。

3.3 光学衰减系数与悬浮质关系

悬浮质是影响光学衰减系数的一个重要因子,早在20世纪60年代 Jones 就曾研究过光学衰减与河口处的悬浮体浓度关系(Jones *et al.*,1965);国内马树斌等(1995)曾就南黄海研究过光学衰减系数与悬浮质的关系;作者对光学衰减系数与湖水中悬浮质浓度进行线性回归,结果为:

$$K_d = 0.8813 + 0.0931 C_{ss} \quad (4)$$

($R = 0.82, SD = 1.0385, n = 67, P < 0.0001$)

式中 K_d 为光学衰减系数(m^{-1}), C_{ss} 为总悬浮物浓度(mg/L), R 为相关系数, SD 为标准离差, n 为样本数, P 为检验的显著性水平,回归效果见图3。由图3和回归方程可知,光学衰减系数与悬浮

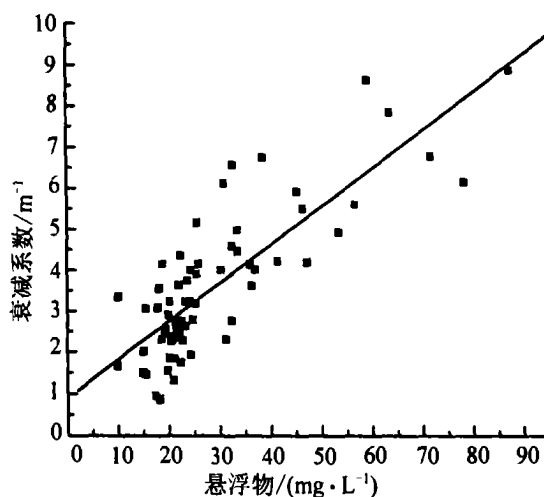


图3 衰减系数与悬浮物的相关图

Fig.3 The relation between attenuation coefficient and total suspended matter

1) 张运林,秦伯强,陈伟民等,2003.太湖水体光学衰减系数的分布变化特征(研究资料)

质存在良好的线性关系。由于光学衰减系数的测定比较困难,因而可根据测得的悬浮物浓度计算光学衰减系数,了解湖水光学状况;反过来,也可以由测定的光学衰减系数来估算湖水中悬浮物含量。

悬浮物中包括无机和有机颗粒,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。为掌握光学衰减系数的主要影响因子,对光学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:

$$K_d = 0.308 + 0.0738 C_{iss} + 0.236 C_{det} \quad (5)$$

式中 K_d 为光学衰减系数 (m^{-1}), C_{iss} 为无机颗粒物浓度 (mg/L); C_{det} 为有机颗粒物浓度 (mg/L)。由式(5)可知,对光的衰减率有机颗粒要高于无机颗粒,但由于太湖水体悬浮物中主要以无机颗粒为主,因此尽管其衰减率低,其对光的衰减仍然占主导地位。如果进行逐步回归,有机颗粒则会被剔除掉。由此可见,光学衰减系数的首要影响因子是无机颗粒,但在五里湖和梅梁湾内,由于悬浮物中有机颗粒含量较高,在这些湖区有机颗粒对光的衰减有时可能会多于无机颗粒。

3.4 光学衰减系数与叶绿素 a 的关系

浮游藻类含有色素吸收光照进行光合作用,叶绿素 a 是浮游藻类中最丰富的色素,因而浮游藻类对光衰减主要表现在叶绿素 a 对光的衰减,为此作者建立了光学衰减系数与叶绿素 a 线性关系:

$$K_d = 3.2970 + 0.01114 \text{Chl. } a \quad (6)$$

($R = 0.1769, SD = 1.7672, n = 67, P < 0.14895$)

图4和上述回归方程反映了光学衰减系数与叶绿素 a 的浓度相关性并不是很好,其相关程度远远不如衰减系数与悬浮质,说明叶绿素 a 不是影响水下光照衰减和分布的首要因子。一方面是由于悬浮质浓度中本身就包括浮游植物和叶绿素 a ,因而其相关性自然要高些。另外叶绿素 a 对光的衰减与叶绿素的生理状况有关,主要集中在其吸收峰光谱,用整个光合有效辐射波段的衰减系数与叶绿素 a 浓度进行回归分析过于粗略。此外叶绿素 a 浓度大小随季节变化很大。为了更好的反映光学衰减系数与叶绿素 a 浓度的关系,为此作者计算了叶绿素 a 的 660nm 吸收峰的光学衰减系数,并与叶绿素 a 的浓度进行线性回归,结果为:

$$K_{d(660)} = 2.1268 + 0.028 \text{Chl. } a \quad (7)$$

($R = 0.5427, SD = 1.4672, n = 67, P < 0.0001$)

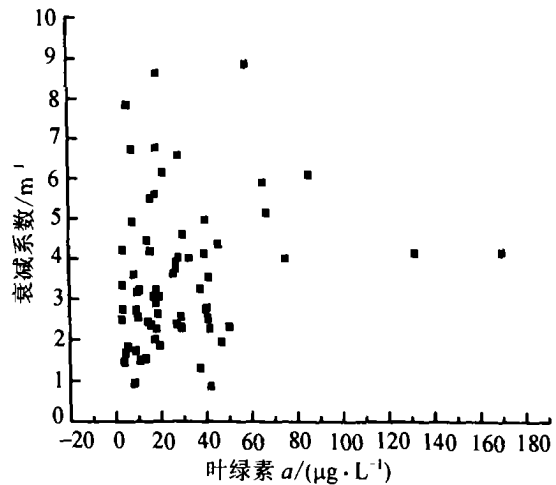


图4 衰减系数与叶绿素 a 的相关图

Fig.4 The relation between attenuation coefficient and chlorophyll a

与前面的拟合相比,用 660nm 单色波的光学衰减系数与叶绿素 a 拟合比,利用整个光合有效辐射波段衰减系数更为合理,其相关系数也明显上升;但与悬浮物相比,其相关系数仍比较低,并且只对部分波段衰减强烈,说明叶绿素 a 是影响光学衰减系数的一重要因子,但并不是首要因子。

3.5 光学衰减系数与悬浮质、叶绿素 a 的多元线性回归

国外学者研究了光学衰减系数与无机颗粒、有机颗粒、叶绿素 a 浓度之间的关系,提出了一些具体湖泊的线性表达式(Van Duin *et al.*, 2001)。Ditoro (1978)基于半理论的辐射传输分析,提出下式:

$$K_d = 0.0 + 0.052 C_{iss} + 0.174 C_{det} + 0.031 C_{chl} \quad (8)$$

式中 K_d 为光学衰减系数 (m^{-1}); C_{iss} 为无机颗粒物浓度 (mg/L); C_{det} 为溶解性有机质浓度 (mg/L); C_{chl} 为叶绿素 a 浓度 (mg/L)。

Blom 等(1994)对瑞士的 Veluwe 湖进行多元线性回归,得到:

$$K_d = 1.337 + 0.019 C_{iss} + 0.054 C_{det} + 0.015 C_{chl} \quad (9)$$

Buiteveld(1995)从淡水的吸收、散射和衰减的理论模式入手,推出如下公式:

$$K_d = 0.627 + 0.050 a_g(380) + 0.025 C_{iss} + 0.049 C_{det} + 0.021 C_{chl} \quad (10)$$

作者对 2001—2002 年度实测的光学衰减系数、无机颗粒、有机颗粒、叶绿素 a 作多元线性回归,得到全湖平均光学衰减系数与各影响因子的关系式:

$$K_d = 0.219 + 0.0768 C_{iss} + 0.214 C_{del} + 0.006 C_{chl}$$

4 结语

4.1 太湖水体的两个重要光学参数:光学衰减系数与透明度存在 $K_d = 0.096 + \frac{1.852}{ST}$ 半理论半经验统计关系。

4.2 光学衰减系数与无机颗粒、有机颗粒、叶绿素 a 的多元线性回归方程为: $K_d = 0.219 + 0.0768 C_{iss} + 0.214 C_{del} + 0.006 C_{chl}$ 。

4.3 根据 2001—2002 年度资料的计算结果表明,太湖水体光学衰减系数的主要影响因素是无机及有机颗粒物,而非叶绿素 a ,这与海洋及清澈的深水湖泊有较大差别。

参 考 文 献

- 马树斌,钱正绪,1995. 南黄海水团和悬浮体分布及其光学性质. 海洋与湖沼增刊,26(5):8—15
- 李 武,张士魁,吴曙初等,1997. 北黄海水体中辐照度的分布变化特征. 黄渤海海洋,15(2):16—24
- 李 武,梁蚶钢,陈 涛,1993. 海洋准直光衰减系数与透明度盘深度的经验关系. 海洋学报,15(5):130—135
- 李宝华,傅克村,1999. 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,17(3):73—79
- 黄祥飞主编,1999. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,77—79
- Blom G, Van Duin E H S, Lijklema L, 1994. Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes. Wat Sci Technol, 30: 243—252
- Buiteveld H A, 1995. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and secchi depth. Neth J Aquat Ecol, 29: 55—65
- DiToro, D M, 1978. Optics of turbid estuarine waters: approximations and applications. Wat Res, 12: 1059—1068
- Gons H J, Ebert J, Kromkamp J, 1998. Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid inland waters. Aquatic Ecology, 31: 299—311
- Jerlov N G, 1976. Marine Optics. Elsevier Scientific Publishing Company, 231
- Jones D, Wills M S, 1965. The attenuation of light in sea and estuarine waters in relation to the concentration of suspended solid matter. J Mar Bio Assoc, 35: 431—444
- Kirk J T O, 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem. Cambridge University Press, Cambridge, Britain, 129—144
- Lorenzen M W, 1978. Phosphorus model and eutrophication. Water Pollution Microbiology, 2: 31—50
- Van Duin E H S, Blom G, Los F G *et al*, 2001. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth. Hydrobiologia, 444: 25—42

REGRESSION ANALYSIS OF BEAM ATTENUATION COEFFICIENT UNDER WATER IN LAKE TAIHU

ZHANG Yun-Lin, QIN Bo-Qiang[†], CHEN Wei-Min[†], YANG Ding-Tian

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008;

School of Postgraduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039)

[†](Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008)

Abstract The effects of the most important factors contributing to the attenuation of light under water in Lake Taihu were described. Empirical relations and differences in the attenuation coefficient, secchi disc transparency, total suspended matter, organic and mineral contents of the suspended matter and chlorophyll a were analyzed in Lake Taihu water, based on the *in situ* investigation data obtained during the period from 2001 to 2002. The multiple linear regression formula is presented including the attenuation coefficient, inorganic suspended matter, organic suspended matter and chlorophyll a . The results are thus: the attenuation coefficient and secchi disc transparency are illustrated below $K_d = 0.096 + \frac{1.852}{ST}$; The multiple regression equation based on the surface water samples is: $K_d = 0.219 + 0.0768 C_{iss} + 0.214 C_{del} + 0.006 C_{chl}$. In large, shallow lakes such as Lake Taihu, the largest contribution to under water light attenuation often originates not from phytoplankton but from suspended matter. The contribution of chlorophyll a to the attenuation coefficient is higher in eutrophic zones during periods of algae bloom.

Key words Beam attenuation coefficient, Inorganic suspended matter, Organic suspended matter, Chlorophyll a