

太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究

俞 宏^{1,2,3}, 蔡启铭², 吴敬禄²

(1. 中国人民解放军理工大学气象学院大气探测工程系, 江苏 南京 211101;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 湖泊水体光学特性是进行湖泊水体光学及水体光学遥感研究的基础。计算了太湖冬、夏季水体的吸收系数和散射系数, 并在分析水体吸收特性的基础上对水体的光学类型进行了分类。结果表明: 冬季太湖水体的光学类型属 PY 型(悬浮粒和黄质共同作用型), 即水体的吸收特性受悬浮质和黄质的共同作用, 而夏季则属 CPY 型(浮游藻类、悬浮粒和黄质共同作用型), 即水体的吸收特性受悬浮质、黄质和浮游藻类三者的共同作用; 不论冬季还是夏季, 非色素悬浮粒是影响太湖水体散射特性的主要因子。

关键词: 太湖; 吸收系数; 散射系数

中图分类号: P 343.3; P 422.31 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2003)01-046-04

水下光照是湖泊生态系统中最重要物理因子, 水体的光学特性是决定水下光照的最基本因素^[1]。水体的光学性质和水体水质有密切联系, 其表现现象表现为水色的差异。近年来, 利用遥感资料监测水色, 对水体光学特性作定量化研究已受到瞩目^[2~4]。从遥感资料成功获取精确的水体光学参量的反演结果, 最基本的问题就是要了解影响水体光学性质的机理, 但从已发表的相关论文看, 很少有涉及水体光学特性的理论研究。国内关于水体光学性质的研究报道亦很少, 杨平等^[4]曾对太湖水体的光学特性作过讨论, 但对水体的光学类型及散射特性都未作研究。太湖是一个大型浅水湖泊, 在湖泊水动力、湖泊物理及生物等方面已取得了较好的研究成果, 为开展此项研究积累了一些基础资料^[5,6]。本文以太湖为例侧重探讨影响水体光学性质的机理, 为进一步求解水下光照分布及有效地进行水体水质遥感方面研究提供科学依据。

1 太湖水体吸收系数和散射系数的参数化模型

水体中有四种物质影响其光学特性^[1]: 水分子, 对光具有吸收和散射的特性; 浮游植物, 主要是浮游藻类, 它们的细胞中含有色素, 同时具有吸收和散射的双重光学特性, 而且还表现为选择性吸收的光谱特点; 由浮游植物死亡而产生的有机碎屑以及陆生或湖底泥经再悬浮而产生的无机悬浮颗粒, 这类物质总称为非色素悬浮质, 它们对光也具有吸收和散射的双重作用; 由黄腐酸、腐殖酸组成的溶解性有机质, 通常称为黄质(yellow substance 或 gilvin), 它使水带有一定的颜色, 黄质对光具有单一的吸收作用。

本文将计算和讨论水体的两个固有光学参量, 即水体的吸收系数和散射系数, 它们是水光学研究须涉及的主要参量。

(1) 吸收系数 $a(\lambda)$ 水体的吸收系数是黄质、浮游藻类、非色素悬浮粒的吸收系数以及纯水的吸收系数之和, 即

$$a(\lambda) = a_y(\lambda) + a_c(\lambda) + a_p(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (1)$$

式中 下标 y 、 c 、 p 、 w 分别指黄质、浮游藻类、非色素悬浮粒及纯水(下同), $a_y(\lambda)$ 、 $a_c(\lambda)$ 、 $a_p(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$ 分

收稿日期: 2001-11-07; 修订日期: 2002-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40071019); 江苏省‘333’工程资助项目

作者简介: 俞 宏(1969-), 女, 江苏江阴人, 讲师, 硕士研究生, 从事大气与环境遥感研究。

别是上述四种物质的吸收系数。

$$(2) \text{ 散射系数 } b(\lambda) = b_c(\lambda) + b_p(\lambda) + b_w(\lambda) \quad (2)$$

式中 $b_c(\lambda)$ 、 $b_p(\lambda)$ 、 $b_w(\lambda)$ 分别是浮游藻类、非色素悬浮粒和纯水的散射系数。

黄质的吸收是决定水体总吸收光谱的重要因子之一^[11], 其吸收系数 $a_y(\lambda)$ 与波长呈负指数关系^[7, 8], 即有

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (3)$$

式中 S 为指数函数斜率参数, 它与波长及黄质浓度(以浓度参数 $a_y(440 \text{ nm})$ 表示)无关, 通常取参考波长 $\lambda_0 = 400 \text{ nm}$ 。以 1994 - 1995 年不同月份 30 次黄质水样(水样经过滤后的滤液即为黄质水样)用分光光度计进行实验测定, 经散射效应修正后作指数回归。结果表明, 30 次黄质水样的 S 平均值为 $0.014/\text{nm}$, 其标准差为 0.001 , S 值随波长和浓度的变化不大, S 值基本稳定。可见, 决定黄质吸收大小的主要因子是其浓度。

浮游藻类的吸收系数 $a_c(\lambda)$ 可表示为比吸收系数 $a_c(\lambda)$ 和叶绿素浓度 C 的乘积, 比吸收系数是通过分光光度计测定藻类色素的丙酮提取液的吸收光谱来获得。浮游藻类的散射系数是引用 Morel 等的参数化方案^[9, 10]:

$$b_c(\lambda) = 0.12(\text{chl-}a + \text{pheochl-}a)^{0.63} \cdot 550 \quad (4)$$

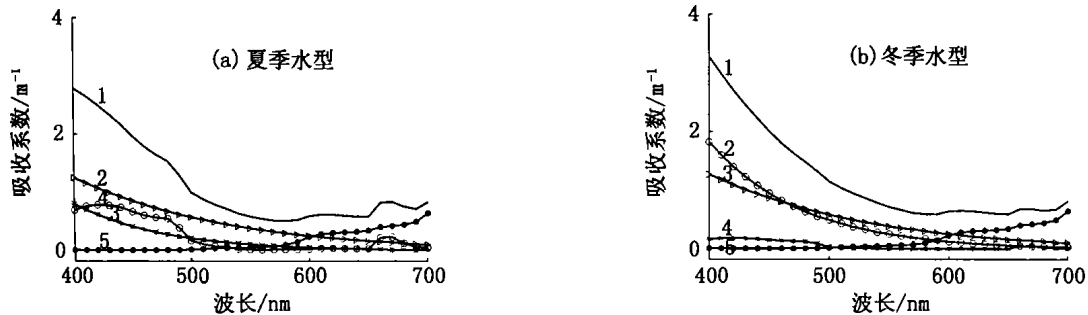
式中 chl- a 和 pheochl- a 分别表示叶绿素 a 与脱镁叶绿素 a 的浓度, mg/m^3 。

太湖是一个浅水湖泊, 水面开阔, 风浪很大。风浪的扰动作用易使有机碎屑和底泥沙粒悬于水中。在海洋光学研究中, 非色素悬浮质的作用往往被忽略, 而对太湖它却是一个必须考虑的因子。但利用实验技术测定水体中非色素悬浮质的光学性质比较困难^[11, 12], 因此, 本文利用太湖实测悬浮质粒径分布, 应用 Mie 理论进行数值计算来确定悬浮质的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 和散射系数 $b_p(\lambda)$ ^[13]。

纯水分子的吸收系数和散射系数可用 Rayleigh 散射理论进行求解, 因已相当成熟, 本文直接应用其结果。

2 计算结果

以两个典型季节, 即冬季和夏季来讨论太湖水体的吸收系数和散射系数。并以梅梁湾口为样点, 选 1994 年 6~8 月的平均值代表夏季, 11、12 月的平均值代表冬季。夏季 3 种物质的浓度分别为: 悬浮粒 (SS) = $42.3 \text{ mg}/\text{L}$ 、黄质(浓度参数用 a_y (以 440 nm 表示)) = $0.34/\text{m}$ 、叶绿素 $a = 21.93 \mu\text{g}/\text{L}$; 冬季 3 种物质的浓度分别为: 悬浮粒 $42.85 \mu\text{g}/\text{L}$ 、黄质 $0.81/\text{m}$ 、叶绿素 $a = 5.33 \mu\text{g}/\text{L}$ 。利用上述参量计算出的吸收系数和散射系数分别列于图 1 和图 2。比较图 1(a)、图 1(b), 可发现, 冬、夏两季水体的吸收有明显差异。在较短波段, 即蓝绿波区 ($400 \sim 500 \text{ nm}$), 夏季水体吸收受悬浮粒、黄质和藻类的共同作用, 由于悬浮粒和黄质在这一波区的吸收较强, 虽然夏季水体中叶绿素 a 含量较高 ($21.93 \mu\text{g}/\text{L}$), 藻类在 440 nm 附近的特征吸收峰在总吸收谱中表现并不明显(图 1(a) 中曲线 1); 在较长波段, 即橙红光区 ($600 \sim 700 \text{ nm}$), 主要是纯水的吸收, 悬浮粒和黄质吸收较弱, 但夏季水体的总吸收谱在 675 nm 附近表现出较明显的藻类的次吸收峰, 水体在这一波长处的吸收大小反映了水体中



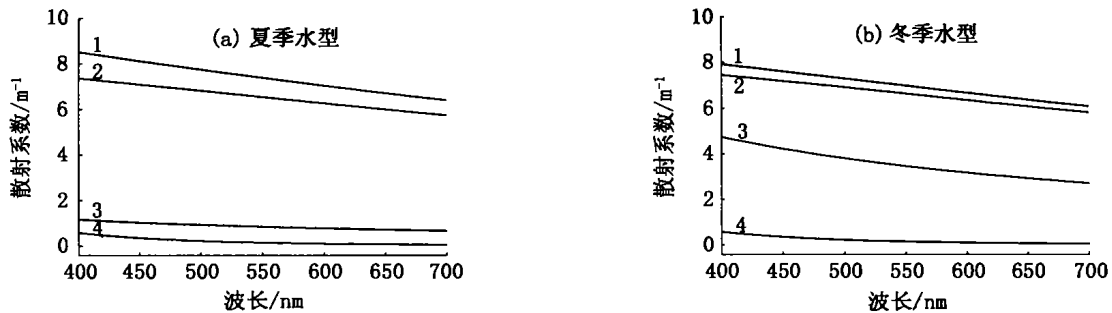
1 - 总吸收谱; 2 - 悬浮粒; 3 - 黄质; 4 - 浮游藻类; 5 - 纯水

图 1 太湖冬、夏季水型水体的吸收系数

Fig. 1 Absorption coefficients of Taihu Lake waters in summer and winter

叶绿素(*a*)的浓度,因此,这是进行水色遥感的有用波段。冬季水体的吸收受黄质和悬浮粒的共同影响,在蓝绿波区,主要体现这两者的吸收特征,由于冬季水体中叶绿素(*a*)浓度较低,藻类的吸收在整个可见光波段表现均不明显。因此,根据 Prieur 等^[15]的“三角关系式”水体光学类型的划分方法,基本上可将太湖的夏季水型划分为 CPY 型(即浮游藻类、悬浮粒和黄质共同作用型),而冬季水型则可划分为 PY 型(即悬浮粒和黄质共同作用型)。这种划分在一定程度上反映了太湖水体的平均状况。对于某一天特定的情况,例如有风暴影响或水华爆发时,水体的光学状况会有很大的不同。

图 2 给出了冬、夏两种水型的散射系数,图中曲线 4 表示乘 100 倍后的数值,图 2(b)中曲线 3 则是乘 10 倍后的数值。由图 2 可知,不论是冬季还是夏季,非色素悬浮粒均是影响太湖水体散射系数的主要因子,浮游藻类的散射贡献相对要小得多。



1 - 总散射谱; 2 - 悬浮粒; 3 - 浮游藻类; 4 - 纯水

图 2 太湖冬、夏季水型水体的散射系数

Fig. 2 Scattering coefficients of Taihu Lake waters in summer and winter

表 1 给出了太湖水体的散射系数与国外资料的对比。其中,对太湖水体,设定叶绿素(*a*)含量为 $10 \mu\text{g/L}$,但取 3 种 SS 值: 15 mg/L (清洁水体)、 42.3 mg/L (一般水体)和 120.0 mg/L (混浊水体)。从表 1 可以看出,太湖水体的散射系数受悬浮粒的影响很大,也就是说,由于太湖水浅,悬浮粒受风浪扰动的影响,时间和空间的变化都可能很大,但总的来说,太湖水体的散射系数与国外某些湖泊或水库(Burrinjuck Dam)的散射系数数值相当,但比海洋中的散射系数大得多,这正是太湖水体光学性质的特点之一。

表 1 太湖水体散射系数与国外资料的对比^[1,12,16]

Table 1 Scattering coefficients of Taihu Lake waters in winter and summer

水体名	SS/(mg L^{-1})	波长/nm	散射系数/ m^{-1}
太湖	15.0	550	2.83
	42.3	550	7.04
	120.0	550	19.0
大西洋	0.04~0.15	544	0.06~0.30
太平洋		544	0.18
Lake Burley Griffin, Australia		400~700	2.8~52.6
Burrinjuck Dam, Australia		400~700	2.0~5.5

3 结 论

本文用水体光学特性的参数化模型计算了太湖冬、夏季水体的吸收系数和散射系数,并研究了湖泊水体的光学类型。结果表明:冬季太湖水体的光学类型属 PY 型,而夏季则属 CPY 型。在冬季,太湖水体的吸收特性主要受悬浮质和黄质的共同作用,而夏季则受悬浮质、黄质和浮游藻类三者的共同作用。但是,不论冬季还是夏季,非色素悬浮粒是影响太湖水体散射特性的主要因子。从研究结果看,太湖水体的散射系数受悬浮粒的影响较大,这与太湖水浅,悬浮粒受风浪扰动的影响有很大的关系。但总的来说,太湖水体的散射系数与国内外浅水湖泊或水库的散射系数数值有一定的可比性,但比海洋中的散射系数大得多。此外,本文中悬浮质的吸收系数和散射系数是 Mie 理论数值计算的结果,在模式中应用了实测悬浮质粒径分布,但模式的另一输入参数即

悬浮质的折射指数, 还需在实测资料的基础上作进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 1983. 1 - 168, 219 - 290.
- [2] Bagheri S, Zetlin C, Dios R. Estimation of optical properties of nearshore water[J]. *Int J Remote Sensing*, 1999, 20(17): 3393 - 3397.
- [3] Kondratyev K YA, Pozdnyakov D V, Pettersson L H. Water quality remote sensing in the visible spectrum[J]. *Int J Remote Sensing*, 1998, 19(5): 957 - 979.
- [4] 杨 平, 蔡启铭. 太湖水体光学特性的理论研究[J]. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 1990, 第 7 号: 1 - 9.
- [5] Qin Boqiang. Studies on hydrodynamics in Taihu Lake, China[J]. *AMBIO*, 1999, 28(8): 669 - 673.
- [6] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖风生流和风涌增减水的数值模拟——I 风生流与风涌增减水的三维数值模拟[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(4): 17 - 25.
- [7] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnol Oceanogr*, 1981, 26: 43 - 53.
- [8] Davis-colley R J. Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes[J]. *Limnol Oceanogr*, 1983, 32(2): 416 - 425.
- [9] Bricaud A, Morel A. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells: a theoretical modeling[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(4): 571 - 580.
- [10] Santhyendranath S, Lazzara L, Prieur L. Variation in the spectral values of specific absorption of phytoplankton[J]. *Limnol Oceanogr*, 1987, 32: 403 - 415.
- [11] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficient of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: a comparison between the Pru upwelling area and the Sargasso Sea[J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35(3): 562 - 582.
- [12] Jerlov N G. 海洋光学[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 1 - 80, 105 - 182.
- [13] Liou K N. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 1985. 133 - 245.
- [14] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean colour[J]. *Limnol Oceanogr*, 1977, 22(4): 709 - 722.
- [15] Prieur L, Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials[J]. *Limnol Oceanogr*, 1981, 26(4): 671 - 689.
- [16] Jonasz M, Prandke H. Comparison of measured and computed light scattering in the Baltic[M]. *Tellus*, 1986, 38(B): 144 - 157.

Study on characteristic of the absorption and scattering coefficients of Taihu Lake waters^{*}

YU Hong^{1,2,3}, CAI Qi-ming², WU Jing-lu²

(1. Department of Atmospheric Probing Engineering, Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;
3. Graduate school, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The optical property of water body is the foundation of research on limnological hydrooptics. In this paper, the absorption and scattering coefficients of Taihu Lake waters both in winter and summer are calculated by using the parameterized model of the hydrooptical property. Moreover, the classification of the optical types of the waters is also carried out. The results show that Taihu Lake in winter appears to be of water type PY with suspended particles and yellow substance being the dominant light absorbers, and in summer of water type CPY, with suspended particles, yellow substance and phytoplankton algae being the dominant light absorbers. Upon this, whether in winter or in summer, unpigmented suspension has the main effect on the scattering property of Taihu Lake waters.

Key words: Taihu Lake; absorption coefficient; scattering coefficient

^{*} The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40071019).