

水下光场及其影响机制的水槽模拟实验研究*

张运林^{1,2} 秦伯强^{1**} 陈伟民¹

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

摘要 测定了水下光合有效辐射(PAR)、光谱成分及悬浮物、叶绿素 a 等参数, 分析了水下 PAR 变化及光谱分布、光衰减系数的光谱分布、辐照度比的变化、水下光场的数值拟合。结果表明, PAR 的垂直分布主要取决于水体中的物质组成, 从静止到小水流、大水流状态, PAR 的衰减显著增大, 分别由 1 增大到 2 m^{-1} , 再到 4 m^{-1} ; 表面辐照度最大值一般在 560 nm 左右, 随着深度增加最大值出现波段向红光波段移动, 水下光谱在蓝光波段衰减最强烈, 其次是绿光、红光; 光衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋势, 向下辐照度衰减系数在静止、小水流、大水流 3 种状态的值分别在 0.75~2.56, 2.30~4.66, 3.51~10.34 m^{-1} 间变化; 辐照度比最小值出现在蓝紫光波段, 但在 580 和 700 nm 附近出现两个峰值; 在通过对光学参数与主要影响因子进行数值拟合以及计算叶绿素 a 对衰减系数的贡献率发现, 水流变化引起的悬浮物浓度增加是造成水下光衰减的主要因素。

关键词 模拟实验 水流 水下辐照度 光衰减系数 辐照度比

湖泊水体光学性质直接影响湖泊水生生物群落的结构和功能, 光合有效辐射(PAR)量在某种程度上决定了湖泊水体初级生产力水平, 而真光层厚度则基本上决定了生产者和分解者的分布格局。太阳辐射在水下的传输和分布受制于水及水中各组成物质对光的吸收和散射, 其中, 水分子对红外光谱有强烈吸收, 悬浮颗粒物和溶解性有机质对可见光的蓝、绿光有较强吸收, 浮游植物叶绿素在 440 和 670 nm 波段附近具有光特征吸收^[1]。

太湖是一个大型浅水湖泊, 风浪对底泥的搅动常常使湖水混浊, 再加之近 20 年来大量污染物排入湖中, 溶解性物质增加, 致使湖底光强往往很弱, 常常无法满足水生植物生长, 致使部分湖区水生植物逐渐衰退, 演化成现今的藻型湖泊。增加水体透明度、改善湖底光照条件从而恢复湖泊水生植物是当前太湖整治的重要方向。然而要提高水体透明度、改善水下光照条件, 必须首先了解太湖水体

的生物光学特性。尽管通过计算和野外原位观测获得了部分水体光学参量数据, 对太湖水体的光学特性也进行了一些探讨^[2~4], 但要在野外精确测量有风浪情况下的水下光照有一定的难度, 一方面波浪的起伏使得水下光照探头无法精确固定在某一深度层, 另一方面风浪起来时在船上操作极不方便, 不可控因素太多, 测量得到的水下光照有时不能真正反映光在湖里的衰减情况, 国外一些研究者曾专门研究了波浪作用对水下光照短时变化的影响^[5~7]。为了消除波浪对水下光照测量误差的影响, 在太湖湖泊生态系统试验站(简称太湖站)大型生态模拟槽进行模拟水动力实验研究, 通过测量水下辐照度和其他一些相关参量, 探讨风浪作用造成底泥的再悬浮对太湖水体光学特性的影响。

1 材料与方法

实验在太湖站的模拟生态槽内进行, 生态槽长

2003-10-29 收稿, 2004-01-08 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程(KZCX1-SW-12)、国家自然科学基金(批准号: 40071019)和国家“八六三”计划(2002AA0601011)资助项目

** 通讯作者, E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

6.3 m、宽 1.2 m、高 1.6 m(图 1), 槽中央为一水泥隔墙, 槽底均匀铺设太湖淤泥, 淤泥厚 10 cm, 淤泥上覆太湖水, 高度为 1.2 m, 隔天将湖水用 33 μm 浮游生物网过滤, 加入槽内, 以补充被蒸发的水量. 实验期间利用空调将气温控制在 25℃ 左右. 实验分 3 个阶段连续进行: 第 1 阶段为静止阶段, 自铺好淤泥注入湖水静置 10 d 后开始, 连续采样 5 d; 第 2 阶段为小水流阶段, 平均流速控制为 0.124 m/s, 运作 10 d, 使其由静止状态进入稳定的小水流状态, 连续采样 5 d; 第 3 阶段为大水流阶段, 控制平均流速 0.319 m/s, 运作 10 d, 使其由小水流状态进入稳定的大水流状态, 同样连续采样 5 d^[8]. 从一种状态到另一种状态运行 10 d 且平均流速控制恒定, 因此可以认为在采样过程中悬浮物浓度比较稳定, 另外从测得的悬浮物浓度来看同一种状态下其值也相差不大.

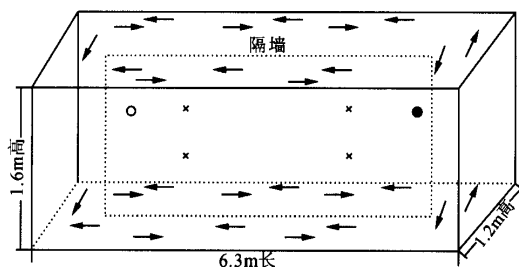


图 1 模拟生态槽示意图

→ 水流, ○ 潜水泵, ● 流速仪, × 采样点

光源为自然太阳光, 光合有效辐射(PAR: 400 ~ 700 nm)的测定选用美国 LI-COR 公司生产的水下光量子仪, 其能精确测定水下 PAR 强度, 绝对精度为 $10^{-4} \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 分 0、水下 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m 6 层测定. 陈宇炜^[9]在室内培养得到的结果显示, 太湖微囊藻的最适光强为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 为此将水表面光强大于 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 称之为强光, 小于 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 称之为弱光. 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[4, 7, 10]. 透明度使用 30 cm 的赛氏圆盘测定.

叶绿素 a 的测定采用分光光度法测量, 用 GF/C 滤纸(Whatman 公司)过滤, 95% 热乙醇提取, 然后放到 7230 分光光度计上进行检测. 悬浮物用

GF/C 滤纸过滤, 采用电子天平称重法测定.

实验期间流速用 LS78 型低速流速仪测定, 小水流用 QDX10-10-0.55 潜水泵控制, 大水流用 QY 油浸式潜水泵控制.

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^[1]

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

式中 K_d 为光衰减系数, 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.

一般将辐照度为水表面辐照度 1% 处的深度视为真光层深度, 其与光衰减系数存在一定量关系, 可以表示为:

$$D_{eu} = 4.6/K_d,$$

式中 D_{eu} 为真光层深度, K_d 为光衰减系数.

各参数间的线性、指数回归统计采用 Spss 软件, 由于光强观测频率要高于采样频率, 在探讨衰减系数跟悬浮物、叶绿素 a 浓度的关系时采用跟采样同步的光衰减系数进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 水下 PAR 变化

图 2 给出了 3 种不同水流状态下强光和弱光 2 种情况下 PAR 随深度的变化, 其相关参数列入表 1. 由图 2 和表 1 可知, 尽管同一水流状态下不同光强作用下水下光衰减存在一些差异, 但变化不大, 因为即便在相同的水流状态下水体中各组成物质浓度也不完全一样, 但不同水流状况下水下光衰减却差异显著, 反映了水下 PAR 衰减主要受制于水体中的组成物质, 而与当时所处的光场关系不大. 从静止状态到小水流状态, 再到大水流状态, 随着流速的增加, 流场产生的切应力对槽底的淤泥进行侵蚀使之发生再悬浮, 水体中悬浮物浓度显著增加, 其平均浓度分别由 2.5 增加到 11.4 mg/L, 再到

42.6 mg/L, 相应的平均 PAR 衰减系数也由 1.04 增大到 2.31 m^{-1} , 再到 4.38 m^{-1} . 1 m 深度处的光强在静止状态下, 尚有表面光强的 26%~48%, 到小水流状态时, 就只有表面光强的 8.4%~17.8%, 再到大水流状态时, 仅表面光强的 0.75%~1.53%, 在此深度以下浮游植物初级生产力将出现负值. 在太湖长期定点野外观测的结果显示, 湖心区悬浮物浓度多年平均在 60 mg/L 以上, 梅梁湾悬浮物浓度多年平均也常在 35 mg/L 以上¹⁾, 由此可以推断其真光层深度常常低于 1~1.5 m, 另据 2001 年 9 月在梅梁湾野外测量的数据显示 1 m 深度处的光强也往往只有表面光强的 1%~5%.

表 1 不同水流状态下强光和弱光情况下 PAR 随深度的指数回归

状态	指数回归式	$E(0)/(\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	$K_d(\text{PAR})/\text{m}^{-1}$	R^2	N	P
静止	强光 $E(z) = 880.7e^{-0.89z}$	880.7	0.89	0.991	6	<0.0001
	弱光 $E(z) = 168.3e^{-1.31z}$	168.3	1.31	0.998	6	<0.0001
小水流	强光 $E(z) = 727.6e^{-1.86z}$	727.6	1.86	0.997	6	<0.0001
	弱光 $E(z) = 316.4e^{-2.07z}$	316.4	2.07	0.994	6	<0.0001
大水流	强光 $E(z) = 807.4e^{-4.29z}$	807.4	4.29	0.997	6	<0.0001
	弱光 $E(z) = 206.5e^{-4.77z}$	206.5	4.77	0.996	6	<0.0001

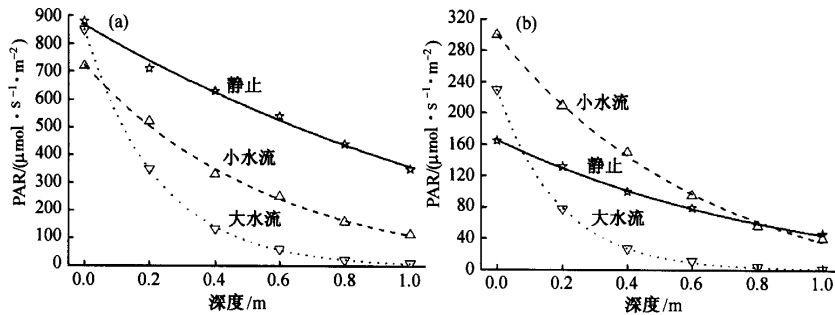


图 2 3 种不同水流状态下光强随深度的分布

(a): 强光作用; (b): 弱光作用(点: 实测值, 曲线: 指数拟合值)

2.2 水下辐照度、光衰减系数及辐照度比 $R(\lambda)$ 的光谱分布

由图 3, 4 可知, 无论是向下辐照度还是向上辐照度, 同一深度不同光谱的辐照度是不同的, 表面其最大值一般在 560 nm 左右, 随着深度增加, 最大值波段开始出现红移. 就整个光合有效辐射波段而言, 水下光谱在蓝光波段衰减最强烈, 其次是绿光、红光, 随着水深度的加深, 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. 由图 3 还可发现水下光谱在红光波段的 670 nm 左右有一相对低值, 向上辐照度表现的更为明显, 这主要是由于叶绿素 a 的特征吸收所致. 上述结论与 Kirk 等^[1]报道的在海洋中由于水分子对红外光的强烈吸收, 蓝光和

绿光的穿透深度往往要比红光大, 而在内陆淡水水体里, 由于可溶性有机质的吸收往往是绿光和红光穿透深度最深的结论一致, 与世界上其他地区许多内陆湖泊研究结果也较为一致^[11, 12].

不同水流状态下向上、向下辐照度的光衰减系数的光谱分布如图 5 所示. 无论是向上还是向下辐照度衰减系数随着波长的增加其值显著降低, 并且向下辐照度衰减系数一般要大于向上辐照度衰减系数, 在小水流和大水流下尤为突出. 由于向下辐照度在整个水下辐照度中占主导地位, 在这里重点讨论向下辐照度衰减系数. 在静止和小水流状态下, 向下辐照度衰减系数光谱曲线相似, 从 400~550 nm 显著下降, 至 550 nm 绿光波段最小值后到红光波段有所增加, 到

1) 张运林, 等. 太湖水体中悬浮物研究. (待发表)

大水流状态,随着悬浮物浓度的增加,向下辐照度衰减系数则呈持续下降趋势,红光部分衰减系数最小(除670 nm附近叶绿素a的特征吸收外).分析原因,认为在静止和小水流作用下,水较为清洁,流速产生的切应力首先造成溶解性物质、胶体颗粒物及小颗粒物悬浮起来,此时对光的衰减主要来自与溶解性物质和纯水本身,而溶解性物质对光的衰减主要集中在550 nm以下的短波部分^[1],纯水对光的吸收则主要集中在600 nm以上的红光波段^[1],致使最低衰减系

数出现在550 nm左右的绿光波段.相比于静止状态,小水流状态下在670 nm出现峰值是由于水流作用带来底泥间隙水中营养盐释放,浮游植物生长,叶绿素a浓度增加所致.随着流速的继续增加,大颗粒物逐渐被悬浮起来,悬浮颗粒物对光的吸收和散射主要集中在600 nm波段以下^[1, 13],其浓度的大幅度上升显著增加了对绿光波段的吸收和散射,此时纯水对光的衰减已显得很微弱,光衰减物质主要为溶解性有机质、悬浮颗粒物及浮游藻类.

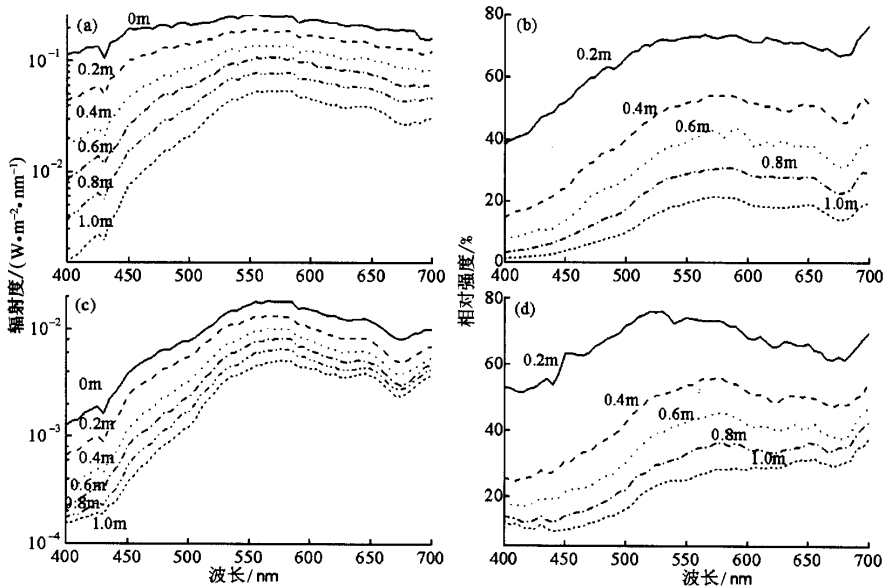


图3 水下光谱分布

(a) 向下辐照度光谱随深度变化; (b) 向下辐照度占表面辐照度百分比的光谱分布;
(c) 向上辐照度光谱随深度变化; (d) 向上辐照度占表面辐照度百分比的光谱分布

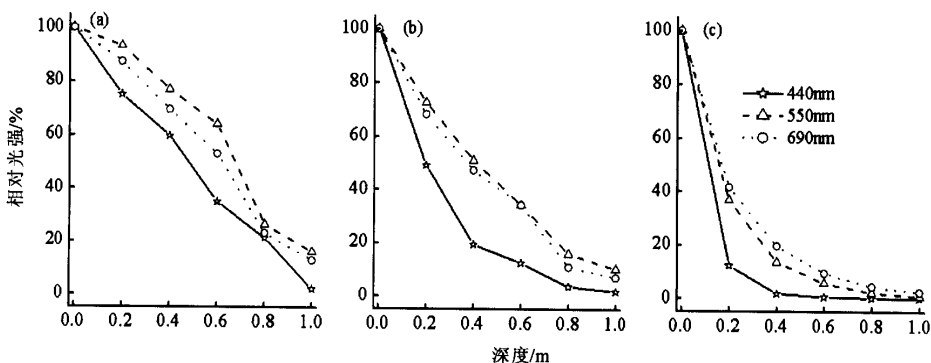


图4 不同水流状态下向下辐照度中蓝光(☆)、绿光(△)、红光(○)随深度的衰减
(a) 静止状态; (b) 小水流状态; (c) 大水流状态

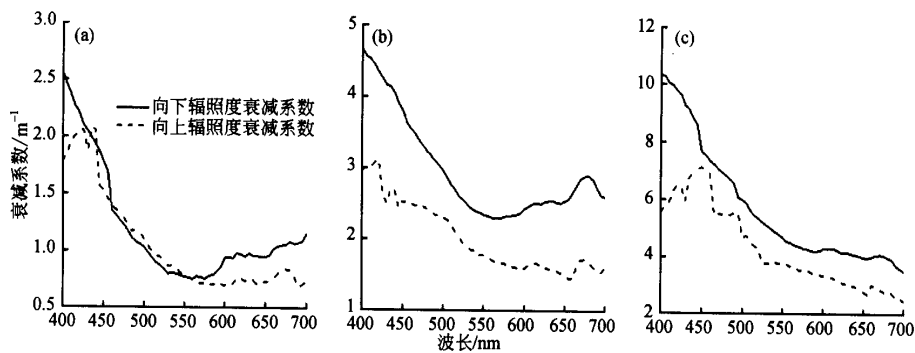


图 5 不同水流状态下衰减系数的光谱分布
(a) 静止状态; (b) 小水流状态; (c) 大水流状态

表 2 为 PAR 衰减系数与一些特征波段衰减系数的线性关系式, 结果显示他们间均存在显著性相关, 但相比于蓝光波段(400~500 nm)和绿光波段(500~600 nm), 红光波段(600~700 nm)的衰减系数与 PAR 衰减系数的相关性明显要小的多, 这些结果与在美国五大湖区研究的结果较为一致^[14], 其认为红光波段相关性要明显下降主要是由于纯水在红光波段对光的强烈吸收所致.

湖泊中任一深度处的向上和向下辐照度的比值, 称为辐照度比, 在海洋等一类水体中常用此参量来反演和估算叶绿素浓度, 但在内陆湖泊等二类水体中由于黄质及高浓度悬浮颗粒物的影响, 其用于探测叶绿素有一定难度, 实验期间辐照度比的光谱分布大致如图 6 所示. 3 种水流状态下辐照度比的变化趋势较为一致, 最低值出现在短波蓝光波段, 其在 550~600 nm 间有个峰值, 然后在 670 nm

后出现第二峰值, 对比国外一些内陆湖泊的研究结果^[1, 15, 16], 其数值大小以及峰谷值出现的位置都较

表 2 PAR 衰减系数与光谱衰减系数的关系

波段	关系式	R ²	N	P
K _d (410)与 K _d (PAR)	K _d (410) = 1.474 K _d (PAR) + 1.061	0.936	12	<0.0001
	K _d (440) = 1.268 K _d (PAR) + 0.371	0.936	21	<0.0001
K _d (490)与 K _d (PAR)	K _d (490) = 1.291 K _d (PAR) + 0.012	0.945	21	<0.0001
	K _d (550) = 1.066 K _d (PAR) - 0.489	0.902	19	<0.0001
K _d (560)与 K _d (PAR)	K _d (560) = 1.022 K _d (PAR) - 0.446	0.902	19	<0.0001
	K _d (670) = 0.693 K _d (PAR) + 0.703	0.805	18	<0.0001
K _d (680)与 K _d (PAR)	K _d (680) = 0.651 K _d (PAR) + 0.830	0.799	18	<0.0001

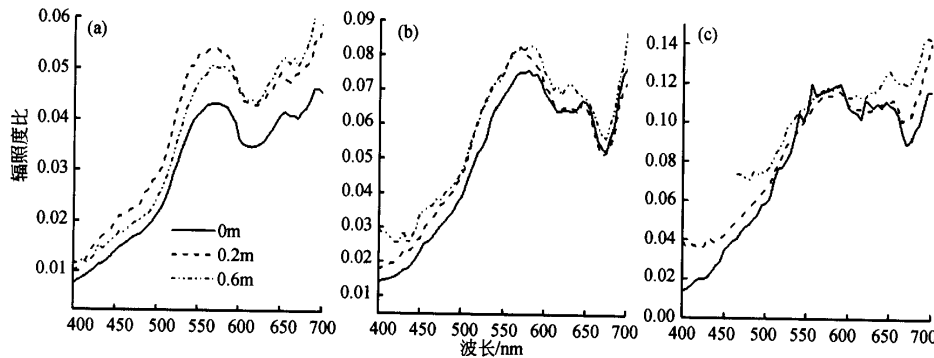


图 6 不同水流状态下辐照度比的光谱分布
(a) 静止状态; (b) 小水流状态; (c) 大水流状态

为一致. Gons^[16]曾报道荷兰的浅水湖泊 Vecht、Overijssel 的 $R(0, \lambda)$ 最低值出现在蓝紫光波段, 在 584 和 704 nm 具有两个明显的峰值. Kirk^[17]曾利用 Monte Carlo 法理论计算得到 $R(\lambda)$ 值随深度的增加而上升, 实验的结果验证了这一结论, 0.2, 0.6 m 处 $R(\lambda)$ 值的一般比 0 m 处的值要高.

2.3 光学参数的数值计算

根据各参数间的内在关系并参照相关文献[18~20], 对模拟实验期间光衰减系数、真光层深度、透明度等光学参数与悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度进行一些数值拟合, 结果如下:

$$\begin{aligned} K_d(\text{PAR}) &= 0.062(\pm 0.007)[SS] \\ &\quad + 1.437(\pm 0.277), \\ (R^2 &= 0.87, N = 12, P < 0.0001), \\ K_d(\text{PAR}) &= 5.429(\pm 0.201) - \\ &\quad 3.985(\pm 0.297)SD, \\ (R^2 &= 0.92, N = 18, P < 0.0001), \\ [SS]^{1/4} &= 1.437(\pm 0.031) - \\ &\quad 0.865(\pm 0.029)\ln SD, \\ (R^2 &= 0.99, N = 12, P < 0.0001), \\ D_{eu}(\text{PAR}) &= 6.651[SS]^{-0.484} - \\ (R^2 &= 0.98, N = 12, P < 0.0001), \\ K_d(\text{PAR}) &= 0.115(\pm 0.064)[Chla] \\ &\quad + 1.938(\pm 0.869), \\ (R^2 &= 0.25, N = 12, P = 0.101), \\ [Chla] &= 17.412(\pm 2.702) \\ &\quad - 10.06(\pm 4.365)SD, \\ (R^2 &= 0.35, N = 12, P = 0.044), \\ D_{eu} &= 6.414[Chl - a]^{0.606}, \\ (R^2 &= 0.51, N = 12, P < 0.01), \\ K_d(\text{PAR}) &= 0.967(\pm 0.327) + \\ &\quad 0.057(\pm 0.007)[SS] + \\ &\quad 0.050(\pm 0.024)[Chla], \\ (R^2 &= 0.92, N = 12, P < 0.0001), \end{aligned}$$

式中 K_d 为光衰减系数、 D_{eu} 为真光层深度, SD 为透明度、 $[SS]$ 为悬浮物浓度、 $[Chla]$ 为叶绿素 a 浓

度, R 为相关系数, N 为样本容量, P 为显著性水平.

对上述各式进行分析可以发现, 作为湖泊光学状况的 3 个主要参量: 光衰减系数、真光层深度、透明度, 他们与悬浮物浓度拟合的结果显然要好于与叶绿素 a 的拟合结果, 说明由于模拟水动力造成的悬浮物浓度的增加是改变水下光场的主要因素, 这与在太湖野外原位观测到结果较为一致^[4], 进一步说明了在太湖这样一个大型浅水湖泊, 风浪扰动引起的悬浮物浓度变化是造成水下光衰减的首要因子, 这与海洋及清洁的深水湖泊等一类水体对光的衰减是不一样的, 反映了内陆浅水湖泊水体的光学特性.

另外 Bannister 认为单位叶绿素 a 含量的平均光衰减系数相对为一个常数, 平均值接近 $0.016 \text{ m}^2/\text{mg}$ ^[21], 对实验期间叶绿素 a 对衰减系数的贡献率进行计算, 结果见表 3. 由表 3 可知, 叶绿素 a 的高值在 $20 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右, 对光的衰减最大只占到总衰减系数的 13.23%. 在太湖长期野外的监测结果显示, 梅梁湾叶绿素 a 在 $20 \sim 30 \mu\text{g}/\text{L}$ 间, 大太湖叶绿素 a 在 $6 \sim 12 \mu\text{g}/\text{L}$ 间^[22], 其相应的光衰减系数分别在 $0.32 \sim 0.48$, $0.096 \sim 0.19 \text{ m}^{-1}$ 间, 而据全年对太湖梅梁湾和大太湖水下光衰减系数的测定, 其值常在 $2 \sim 6 \text{ m}^{-1}$ 间^[1], 叶绿素 a 的光衰减对总光

表 3 叶绿素 a 浓度、PAR 衰减系数、叶绿素 a 光衰减系数及其对总衰减系数的贡献率

水流状态	$Chla/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	K_d/m^{-1}	D_{eu}/m	$K_d(Chla)/\text{m}^{-1}$	贡献率/%
静止	3.55	1.02	4.52	0.057	5.57
静止	2.52	1.05	4.38	0.040	3.84
小水流	17.86	2.16	2.13	0.286	13.23
小水流	14.32	2.20	2.10	0.229	10.41
小水流	9.71	2.56	1.80	0.155	6.07
小水流-大水流	9.10	4.48	1.03	0.146	3.25
小水流-大水流	8.20	4.80	0.96	0.131	2.73
大水流	8.80	4.27	1.08	0.141	3.30
大水流	17.32	4.54	1.01	0.277	6.10
大水流	21.62	4.21	1.09	0.346	8.22
大水流	19.90	4.71	0.98	0.318	6.76
大水流	14.16	4.17	1.10	0.227	5.43

1) 张运林. 太湖地区太阳辐射及湖泊光学研究. 中国科学院南京地理与湖泊研究所硕士论文, 2002

衰减的贡献率最多不超过20%，室内实验和野外观测数据都验证了在太湖这种大型浅水湖泊浮游植物对光的衰减不占主导地位。

3 结论

(1) PAR的垂直分布主要取决于水体中的物质组成，从静止到小水流、大水流状态，PAR的衰减显著增大；分别由1.04增大到2.31 m^{-1} ，再到4.38 m^{-1} ，1m深度处的光强则由表面光强的26%~48%降低到8.4%~17.8%再降低到0.75%~1.53%。

(2) 表层辐照度最大值一般在560nm左右，随着深度增加最大值出现红移现象，水下光谱在蓝光波段衰减最强烈，其次是绿光、红光。

(3) 光衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋势，但由于不同水流状态下主导光衰减的因素不一样，相应的光衰减系数的光谱分布也不完全一样。向下辐照度衰减系数在静止、小水流、大水流3种状态的值分别在0.75~2.56, 2.30~4.66, 3.51~10.34 m^{-1} 间变化。

(4) 辐照度比最小值出现在蓝紫光波段，在580和700nm附近出现两个峰值。

(5) 通过对光参数与主要影响因子进行数值拟合以及计算叶绿素a对衰减系数的贡献率发现，水流变化引起的悬浮物浓度增加是造成水下光衰减的主导因素。

致谢 高光，陈宇炜等参加了实验和分析工作，在此一并表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 47~144
- 蔡启铭, 等. 太湖悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响. 海洋与湖沼, 1991, 22(5): 458
- 蔡启铭, 等. 大气-水体系统中PAR传输模式及湖泊初级生产力. 水科学进展, 1993, 4(3): 171
- 张运林, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及变化特征. 水科学进展, 2003, 14(4): 447
- Stramski D, et al. Laboratory simulation of light focusing by water-surface waves. Mar Biol, 1992, 114: 341
- Wing S R, et al. A dynamic model for wave-induced light fluctuations in a kelp forest. Limnol Oceanogr, 1993, 38: 396
- Schubert H, et al. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary. Helgol Mar Res, 2001, 55: 12
- 陈伟民, 等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. 湖泊科学, 2000, 12(4): 343
- 陈宇炜, 等. 西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998. 142
- De Lange H K, et al. Negative effects of UVB-irradiated phytoplankton on life history traits and fitness of *Daphnia magna*. Freshwater Biology, 2003, 48: 678
- 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. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2001, 6: 75
- Arst H, et al. Optical investigations of Estonian and Finnish lakes. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 1996, 2: 187
- 俞宏, 等. 太湖水体的光学特性及其参数化方案. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998. 63
- Bukata R P, et al. Optical Properties Remote Sensing Inland and Coastal Waters. Boca Raton: CRC Press, 1995. 210
- Gons H J, et al. Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid inland waters. Aquatic Ecology, 1998, 31: 299
- Gons H J, et al. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. Environ Sci Technol, 1999, 33: 1127
- Kirk J T O. A Monte-Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationship between optical properties of, turbid yellow waters. Aust J Mar Freshwater Res, 1981, 32: 517
- 苏健, 等. 渤海中南部悬浮物海洋调查资料分析. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 647
- Van Duin E H S, et al. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth. Hydrobiologia, 2001, 444: 25
- Blom G, et al. Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes. Wat Sci Technol, 1994, 30: 243
- Bannister T T. Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield and upper limit to production. Limnol Oceanogr, 1974, 19(1): 1
- 张运林, 等. 东部平原地区湖泊富营养化的演变及区域分析. 上海环境科学, 2002, 21(9): 549

作者: 张运林, 秦伯强, 陈伟民
作者单位: 张运林(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), 秦伯强, 陈伟民(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京, 210008)
刊名: 自然科学进展 
英文刊名: PROGRESS IN NATURAL SCIENCE
年, 卷(期): 2004, 14(7)
被引用次数: 10次

参考文献(22条)

1. Schubert H Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary[外文期刊] 2001

2. 蔡启铭 大气-水体系统中PAR传输模式及湖泊初级生产力[期刊论文]-水科学进展 1993(03)

3. 蔡启铭 太湖悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响 1991(05)

4. Kirk J T O Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystem 1994

5. 陈宇炜 西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究 1998

6. 陈伟民 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验[期刊论文]-湖泊科学 2000(04)

7. 张运林 东部平原地区湖泊富营养化的演变及区域分析[期刊论文]-上海环境科学 2002(09)

8. Bannister T T Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield and upper limit to production 1974(01)

9. BLOM G Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes 1994

10. Van Duin E H S Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[外文期刊] 2001

11. 苏健 渤海中南部悬浮物海洋调查资料分析[期刊论文]-青岛海洋大学学报 2001(05)

12. Kirk J T O A Monte-Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationship between optical properties of, turbid yellow waters 1981

13. Gons H J Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters[外文期刊] 1999

14. Gons H J Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid inland waters 1998

15. Bukata R P Optical Properties Remote Sensing Inland and Coastal Waters 1995

16. 俞宏 太湖水体的光学特性及其参数化方案 1998

17. Arst H Optical investigations of Estonian and Finnish lakes 1996

18. Reinart A Optical and biological properties of Lake iilemistee, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake iilemistee 2001

19. De Lange H K Negative effects of UVB-irradiated phytoplankton on life history traits and fitness of Daphnia magna[外文期刊] 2003

20. Wing S R A dynamic model for wave-induced light fluctuations in a kelp forest 1993

21. Strarnski D Laboratory simulation of light focusing by watersurface waves 1992

22. 张运林 太湖水体光学衰减系数的分布及变化特征[期刊论文]-水科学进展 2003(04)

引证文献(10条)

1. 朱伟, 姜谋余, 赵联芳, 田涛. 悬浮泥沙对藻类生长影响的实测与分析[期刊论文]-[水科学进展](#) 2010(2)
2. 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 张战平. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[期刊论文]-[环境科学](#) 2007(3)
3. 刘爱, 滕惠忠, 熊显名. 浅海遥感图片海底研究[期刊论文]-[光学技术](#) 2006(z1)
4. 张运林, 秦伯强, 胡维平, 王苏民, 陈宇炜, 陈伟民. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义[期刊论文]-[中国科学D辑](#) 2006(3)
5. 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 高光, 罗激葱, 陈伟民. 长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究--以龙感湖和太湖为例[期刊论文]-[中国科学D辑](#) 2005(z2)
6. 孙小静, 朱广伟, 罗激葱, 秦伯强. 浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究[期刊论文]-[中国科学D辑](#) 2005(z2)
7. 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 胡维平, 高光, 朱广伟, 罗激葱. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2005(6)
8. 张运林, 黄群芳, 马荣华, 陈伟民. 基于反射率的太湖典型湖区溶解性有机碳的反演[期刊论文]-[地球科学进展](#) 2005(7)
9. 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 高光, 朱广伟, 吴生才, 罗激葱, 杨顶田. 龙感湖水体光学特性的观测[期刊论文]-[湖泊科学](#) 2005(2)
10. 张运林. 太湖水体生物—光学特性及其生态学意义[学位论文]博士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zrkJz200407012.aspx