

秋季太湖水下光场结构及其对水生生态系统的影响*

黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 乐成峰, 伍 蓝, 王利珍, 王 鑫

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘 要: 水生生态系统中光能的分配很大程度上决定了水生生态系统的结构和功能, 利用 2007 年 11-12 月太湖水体光学特性和组分浓度数据, 对秋季太湖水下光场结构特征和水体组分光竞争能力的表征光学量(漫衰减系数、平均余弦)和影响因素(吸收系数比重)进行了分析研究. 结果表明, 秋季太湖水下辐照度呈现单峰分布, 最高值为 583nm 左右; 根据 K_d 可将黄质和非色素物质主导程度的强弱分为弱、较强、强三个等级; $K_d(PAR)$ 平均值为 $4.61 \pm 1.54 m^{-1}$, 水体真光层厚度平均值为 $1.11 \pm 0.35 m$; 太湖水下光场的光能主要分布在青光和黄绿光波长范围内, 约占总能量的 60%, 蓝光和红光波长范围内的能量约占 30%, 这样的光谱结构有利于铜绿微囊藻和斜生栅藻的生长.

关键词: 漫衰减系数; 平均余弦; 光合有效辐射; 水生生态系统

Underwater light field structure and its impact on aquatic ecosystems of Lake Taihu in autumn

HUANG Changchun, LI Yunmei, SUN Deyong, LE Chengfeng, WU Lan, WANG Lizhen & WANG Xin

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, P.R.China)

Abstract: Allocation of light in the aquatic ecosystems determined the ecosystem function and type. Based on the measured data of optical properties and the concentrations of water substances in Lake Taihu during November to December, 2007, the optical parameters (diffuse attenuation coefficient, the average cosine) and impact factors (the proportion of absorption) were studied. The results showed that: the irradiation showed a single peak distribution and the max value was at 583nm wavelength; the dominant degree of CDOM and Non-pigment particles could be divided into weak, strong, stronger according to the K_d ; the average value of K_d (PAR) and depth of the euphotic zone is $4.61 \pm 1.54 m^{-1}$ and $1.11 \pm 0.35 m$, respectively; solar energy was mainly distributed in the cyan, green and yellow wavelength range, which was about 60 percent of the total energy, it just about 30 percent in blue and red wavelength. This spectral structure favored the growth of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*.

Keywords: Diffuse attenuation coefficient; average cosine; photosynthetically active radiation; aquatic ecosystem

水生生态系统中的浮游色素物质光合作用的强弱除受光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)的强度、色素组成和光合作用率的影响外^[1], 还受到其获取 PAR 能力大小的限制, 而水体组分对 PAR 的竞争能力的强弱主要取决于各水体组分吸收系数的大小和光场结构. 在富营养水体中浮游色素物质吸收系数较大, 大约可以获得总能量的 30%–40%, 而在贫营养水体浮游色素物质大约只能获得总能量的 3%–10%^[2-3]. 水下光场结构主要包括光谱结构和角度结构, 而表征这两个光场结构的光学量分别是漫衰减系数(K)和平均余弦(U). K 不仅可以用于水体等级的划分^[4], 反推正好位于水面以下的辐照度, 还直接决定了水生生态系统真光层的深度; 同时由于各个波长 K 不一致性, 如红光极易被纯水吸收, 蓝光极易被色素、非色素和黄质吸收, 因而具有较大的 K 值, 而黄绿光相对吸收较少, K 值相对较小^[5-7](非常

* 国家自然科学基金项目(40571110)、“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC34B05)和江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划(CX08B_015Z)联合资助. 2008-05-27 收稿; 2008-09-17 收修改稿. 黄昌春, 男, 1982 年生, 硕士研究生.
E-mail: huangchangchun_aaa@163.com.

清洁的远海往往蓝光具有较大 K 值), 从而形成了类似“大气窗口”的“水体窗口”光谱结构. U 是以亮度 $L(\theta, \varphi)$ 为权重的 $\cos\theta$ 的平均值, 因此 U 表征辐射场几何分布特征^[8], 同时 U 是计算光合色素可利用光能 E_0 的重要参数^[9]. Whitney^[10]通过平均余弦引入了平均路径长度的概念, 即光量子传播下降 1m 的深度上路径长度的平均值, 平均路径长度可以解释成平均余弦值的变换值. Maffione 等^[11]在研究点光源在均匀介质中余弦分布时给出了此关系式 $l = \int_0^z \frac{dz'}{U(z')}$, 此平均路径长度直接决定了吸收系数的路径放大效应,

增加光量子被水体及其组分吸收的概率. 因此对湖泊水体 K 、 U 以及水体组分吸收系数的比例的研究, 有助于了解太湖水光学环境和水生态系统的光能分配状况.

本研究在实验观测数据基础上, 着重分析和研究了秋季太湖水体 K 、 U 以及水体组分吸收系数的比例, 进而确定太湖水体光学环境特征以及水体组分光竞争能力的大小.

1 材料与方法

1.1 采样时间及点位

2007 年 11 月 12 日对太湖 34 个样点进行观测, 样点分布如图 1 所示.

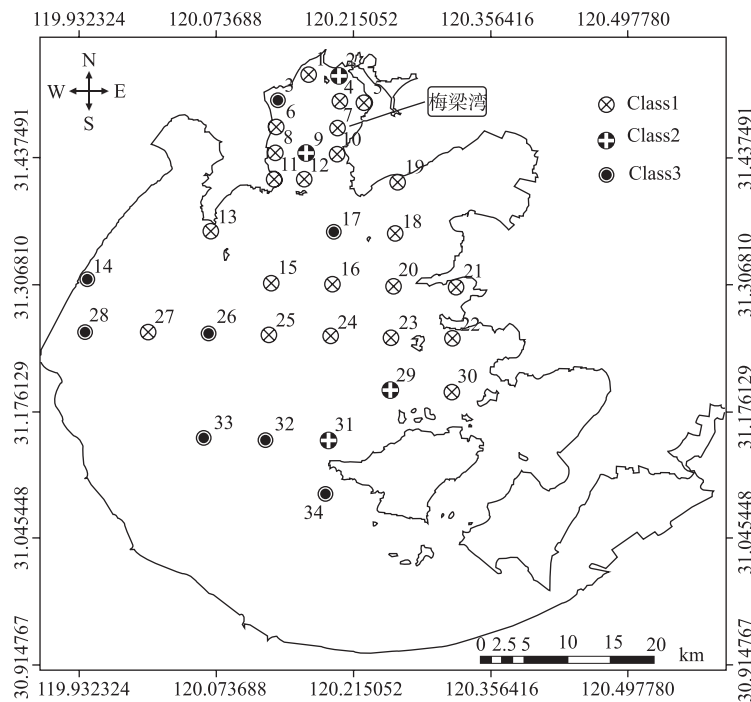


图 1 样点和类型分布

Fig.1 Sampling sites and styles distribution

1.2 参数测定

采集表层水样, 测量参数包括总悬浮物、色素物质、非色素颗粒物和黄质的光谱吸收系数, 总悬浮物、有机物、无机物和叶绿素浓度; 上行(下行)辐照度, 测量深度为水面以上(-0.1m)、0.20、0.40、0.60、0.80 和 1.00m.

1.2.1 下行(上行)辐照度和 PAR 的测量 利用 TRIOS 水下光谱仪的辐照度探头测量水体下行辐照度, 将同一样点同一水层连续测量的多条数据由小到大排列, 若其中有异常值, 它们必位于数据系列的两端, 左端的称为异常小值, 右端的称为异常大值, 剔除两端异常极值^[12], 数据处理参照 NASA 海洋水色遥感海

洋光学协议^[13].

利用Li-1400测量PAR, 深度设置为0.1m到1.1m, 0.1m为间隔, 共11个深度, 测量和数据的处理与辐照度相似.

1.2.2 室内水样分析数据 (1)总悬浮物、浮游藻类色素物质、非色素颗粒物和黄质的光谱吸收系数是采用UV-2401PC型紫外可见分光光度计测量^[13], 方法如下: 首先, 使用滤膜过滤一定量的水样, 其次, 光度计测量过滤所得到的滤膜的吸光度, 最后利用吸光度来计算吸收系数, 计算公式为:

首先进行放大因子校正:

$$D_s(\lambda) = 0.378D_f(\lambda) + 0.523D_f^2(\lambda) \quad (1)$$

式中, $D_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮物颗粒的吸光度, $D_f(\lambda)$ 为直接在仪器上得到的悬浮物颗粒吸光度.

其次计算吸收系数:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} D_s(\lambda) \quad (2)$$

式中, $a_p(\lambda)$ 为光谱吸收系数, V 为被过滤水样的体积, S 为沉积在滤膜上颗粒物的有效面积.

测量非色素颗粒物的光谱吸收系数, 首先使用 0.1%活性的 NaClO_3 溶液进行样品的漂白处理, 其次, 漂白过的水样进行过滤, 同样利用UV-2401PC型紫外分光光度计测量过滤所得到的滤膜, 得到非色素颗粒物的吸光度. 在测量时, 如果在 675nm 处没有出现峰值说明漂白充分, 测量的数据有效, 否则说明漂白不充分, 需要再次漂白. 非色素的吸收系数的计算方法与总悬浮物吸收系数的计算方法相同.

浮游藻类色素物质的吸收系数由总悬浮物的吸收系数减去非色素颗粒物的吸收系数获取.

使用0.22 μm 滤膜过滤水样, 提取出黄质, 然后, 将黄质溶液装入1cm \times 4cm的比色皿, 以超纯水作为参考水样, 利用UV-2401PC型紫外分光光度计测量黄质的吸光度, 利用700-800nm范围内的平均值进行归零, 以校正反射效应以及仪器基线的漂移等因素, 利用公式:

$$a(\lambda) = 2.303 D(\lambda)/r \quad (3)$$

计算各个波长的吸收系数. 其中 $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径(m). 具体处理过程参见文献[13].

(2)总悬浮物、有机物、无机物和叶绿素浓度. 采用称重法测量总悬浮物、有机物和非有机物浓度, 首先进行烧膜处理, 去除膜上有机质, 然后将烧过的膜进行称重, 得到膜的重量 G_1 ; 将过滤后的膜进行烘干并称重, 得到干燥膜和总悬浮物的重量 G_2 , 两次膜重的差即为总悬浮物重量; 将称重后干燥的膜进行450 $^{\circ}\text{C}$ 的4-6h的烧膜处理后称重, 与 G_2 相减可计算出无机悬浮物重量, 并可进一步推算出有机悬浮物重量. 将测得的重量与过滤的水样体积相比计算出各参数的浓度.

利用“热乙醇法”测量叶绿素浓度 C_{ph} ^[14].

1.3 理论与方法

根据辐射传输方程:

$$\frac{dL(z, \theta, \varphi)}{dr} = -cL(z, \theta, \varphi) + L_*(z, \theta, \varphi) \quad (4)$$

设 $z = r \cos \theta$, θ 表示天底角与通量传输方向之间的夹角, c 为衰减系数, $L(z, \theta, \varphi)$ 为 Z 深度上, (θ, φ) 方向上的辐亮度, $L_*(z, \theta, \varphi)$ 为 z 深度上, (θ, φ) 方向上的辐亮度增量, 在球面上半球积分则得到高申(Gershun)方程:

$$\frac{d(E_d - E_u)}{dz} = -cE_0 + bE_0 = -aE_0 \quad (5)$$

式中, E_d 为下行辐照度, E_u 上行辐照度, E_0 为标量辐照度, b 为散射系数, a 为吸收系数, 两边同时除以 $E_d - E_u$, 得到:

$$\frac{d(E_d - E_u)}{(E_d - E_u) dz} = -a \frac{E_0}{E_d - E_u},$$

引入平均余弦:

$$U = \frac{E_d - E_u}{E_0}$$

$$K_{net} = a/U, \text{ 即 } U = a/K_{net} \quad (6)$$

式中, K_{net} 为净下行辐照度漫衰减系数.

水及其水体组分所能够获得的光能可以通过下式进行计算^[2]:

$$A_i Q = a_i E_0 = a_i \frac{E_d - E_u}{U} = \frac{a_i}{a} (E_d - E_u) K_{net} \quad (7)$$

$$g = \frac{A_i Q}{AQ} = \frac{a_i E_0}{a E_0} = \frac{a_i}{a} \quad (8)$$

式中, $A_i Q$ 为水体各个组分吸收能量, AQ 为水体总吸收能量, g 为各组分吸收能量占总能量的比例, a_i 为水体组分吸收系数, 下标 i 分别表示纯水^[15]①、浮游色素物质、非色素物质和黄质.

2 结果与分析

2.1 辐照度分布

辐照度是水体光学属性参数中较容易直接测量的参数, 它不仅是水生态系统中光合作用色素可利用光能的重要参数, 同时在水体辐射传输方程中扮演着重要的角色^[16]. 通过辐照度计算得到的漫衰减系数直接表征了水体中的光强和光谱结构, 因而辐照度对于研究水体光环境具有重要的意义. 辐照度具有较大的时空差异, 离散的短时间单样点的测量数据是难以进行对比和分析的, 因此利用每个波长上辐照度值除以 400–750nm 范围内的平均辐照度值对太湖水体不同深度上的下行(上行)辐照度(E_d, E_u)进行归一化处理, 得到太湖水体典型的 $E_d(E_u)$ 分布曲线(样点 1), 结果如图 2a 和 2b 所示, 与清洁的内陆或海洋一类水体的双峰结构^[17]相比, 太湖水体 E_d 表现出了较为显著的单峰特征, 最大值出现在 583nm 处, 并且随着深度的增加, 单峰特征越显得明显, 这主要是由于在 $\leq 583\text{nm}$ 波长范围内, 受高浓度的非色素和黄质强吸收作用 E_d 随深度的增加呈现指数形式迅速衰减, 同时各个深度上各个波长衰减速度存在一定的差异, $\geq 700\text{nm}$ 波长范围内的衰减, 主要是由纯水的吸收作用引起的; 在 583–700nm 之间, 由于浮游色素物质的藻蓝蛋白和叶绿素较强吸收作用, 使得该范围内的辐照度衰减要高于吸收系数最小的 583nm. 上行辐照度(E_u)与 E_d 具有相似的特征, 但峰值更加陡峭, 400–583nm 之间 E_u 随波长成指数增加的速度要大于 E_d , 583–700nm 之间 E_u 随波长的衰减速度也要明显大于 E_d , 这主要是上行平均余弦小于下行平均余弦, 从而增大了吸收系数的路径放大效应.

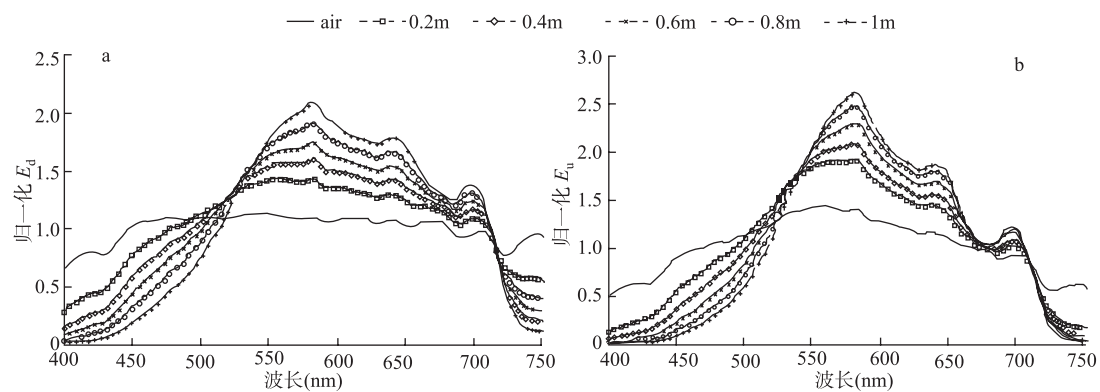


图 2 辐照度分布

Fig.2 Distribution of irradiance

① 引用 Pope 和 Fry^[15]纯水吸收系数, 利用三次样条差值方法进行差值得到 400–750nm 波长范围内间隔为 1nm 的纯水吸收系数.

2.2 漫衰减系数

E_d 在均一水体中遵循指数衰减规律^[18], 通过对不同深度的 E_d 进行指数回归得到平均 K_d , $R^2 \geq 0.95$, 深度数 ≥ 3 ^[19], 结果如图 3a 所示, 利用计算 K_d 的方法计算 $K_d(PAR)$, 利用 $Z = \ln(0.01)/K_d(PAR)$ 计算真光层深度, 结果如图 3b 所示. 图 3a 中 K_d 曲线特征极为明显, 在 $<600\text{nm}$ 波长范围内, 由于非色素和黄质的强吸收作用, 漫衰减系数随着波长的增加逐渐减小, 在 675nm 处, 存在色素颗粒物叶绿素 a 的 K_d 衰减峰值, 在 $700\text{--}750\text{nm}$ 波长范围内, 由于纯水的吸收使得 K_d 随波长的增加呈现增加趋势; $E_d(PAR)$ 随着深度的增加呈现指数形式衰减, 但在 $0\text{--}0.3\text{m}$ 深度范围内, 有部分样点并不符合指数衰减形式, 这主要是由于在该深度范围内, 水体的各向异性较强, 而随着深度的增加水体的各向异性逐渐减弱, $E_d(PAR)$ 随深度呈指数形式衰减, 即水体各向异性越弱, $E_d(PAR)$ 随深度衰减形式越接近指数形式, 水体各向异性越强, $E_d(PAR)$ 随深度衰减会呈现两阶段(近表层深度内为非指数形式衰减, 达到一定深度后呈现指数形式衰减)特征^[16]; 图 3b 中为 $E_d(PAR)$ 随深度的衰减系数 $K_d(PAR)$ 和真光层深度, $K_d(PAR)$ 平均值为 $4.61 \pm 1.54\text{m}^{-1}$, 变异系数为 33.38% , 最大值为 7.93 , 最小值为 2.62 , 分别为 32 号和 20 号样点, 要明显高于 1993 年 10 月 Gons^[20] 的 $1.4\text{--}3.8\text{m}^{-1}$ 和张运林^[19] 2001 年 8 月的 $1.5\text{--}4.8\text{m}^{-1}$, 真光层深度为 $1.11 \pm 0.35\text{m}$, 变异系数为 31.24% , 最大值为 1.76m , 最小值为 0.58m , 分别为 20 号和 32 号样点.

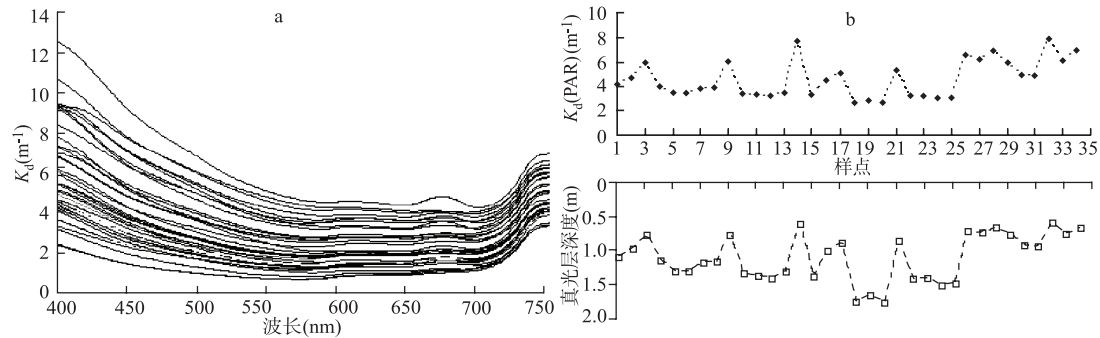


图 3 漫衰减系数、真光层和光有效辐射分布

Fig.3 Distribution of diffuse attenuation coefficient, euphotic zone, PAR

计算 K_d 在红(R: $620\text{--}760\text{nm}$)、绿(G: $500\text{--}560\text{nm}$)、蓝(B: $430\text{--}470\text{nm}$)波段的平均值, 并对 $K_d(R)$ 、 $K_d(G)$ 、 $K_d(B)$ 进行比较, 图 4a 中可以看出几乎所有样点的 $K_d(B)$ 值是最大, $K_d(G)$ 与 $K_d(R)$ 呈交错状分布, 这主要是由于秋季太湖水体中非色素和黄质的总吸收系数占据绝对优势; 将 $K_d(R)$ 、 $K_d(G)$ 、 $K_d(B)$ 进行两两比较如图 4b,c,d 所示, 其中 $K_d(B) > K_d(R) > K_d(G)$ 样点数占 64.7059% , $K_d(B) > K_d(G) \approx K_d(R)$ 样点数占 11.7647% ^①, $K_d(B) > K_d(G) > K_d(R)$ 样点数占 23.5294% , 在 4d 中约有两个样点 $K_d(B) \approx K_d(G)$ (18 号和 20 号样点), 根据 Jerlove^[4] 利用 K_d 对水体进行分类的体系, $K_d(B) \approx K_d(G)$ 和 $K_d(B) > K_d(R)$ 是确定生产性水体和非生产性水体依据, 由于太湖水体属于生产性水体, 故将 $K_d(B) \approx K_d(G)$ 划入 $K_d(B) > K_d(R)$, 黄质和非色素物质是秋季太湖水体主要物质, 同时依据 Jerlove 和 Kirk^[16] 对黄质和非色素物质主导程度的强弱研究, 利用 $K_d(B) > K_d(R) > K_d(G)$ (Class1: 弱)、 $K_d(B) > K_d(G) \approx K_d(R)$ (Class2: 较强)、 $K_d(B) > K_d(G) > K_d(R)$ (Class3: 强) 将黄质和非色素物质主导程度的强弱程度分为三级, 样点分布如图 1 所示.

2.3 平均余弦谱特征

利用表层水样的总吸收系数 a 和 K_{net} 通过公式(6)计算得到表层的 U (图 5) 看出, 由于观测受到不同时间的太阳天顶角、水-气界面的影响, U 变异性较大, 但去除 U 大小差异外, 平均余弦谱曲线形状总体遵循与吸收系数成正比, 与散射系数成反比的规律, 这是由于散射系数越大水体越接近各向同性, 水体平

① 将对比图中的点在横坐标和纵坐标做 5% 的延伸, 若该点或该点的 5% 延伸区域落在 $y=x$ 上认为两对比值近似相等.

均余弦就越小, 但是由于其他方向上散射的光量子与天底角方向上的光量子相比平均路径加大更加容易被吸收, 从而减小了其他方向上 $L(\theta, \varphi)$ 的权重, 增加了平均余弦值. 图 5 体现了浮游色素物质与非色素物质和黄质主导地位共存的结果, 不同的样点表现出了不同的光谱特征, 在色素浓度较高的样点, 440nm 叶绿素的吸收峰由于受到非色素和黄质的掩盖作用而消失, 而在非色素和黄质相对较弱的 520nm 左右的藻蓝蛋白吸收峰值仍能够显示出来, 随着非色素和黄质随波长的增加作用进一步减弱, 675nm 处的叶绿素吸收峰值较为明显(色素浓度较低的样点不存在 520 和 675nm 处的吸收峰值), 700nm 以后的 U 谱较相似, 因为此时颗粒物吸收系数几乎为零, 主要是受背景光学量纯水的吸收系数的影响.

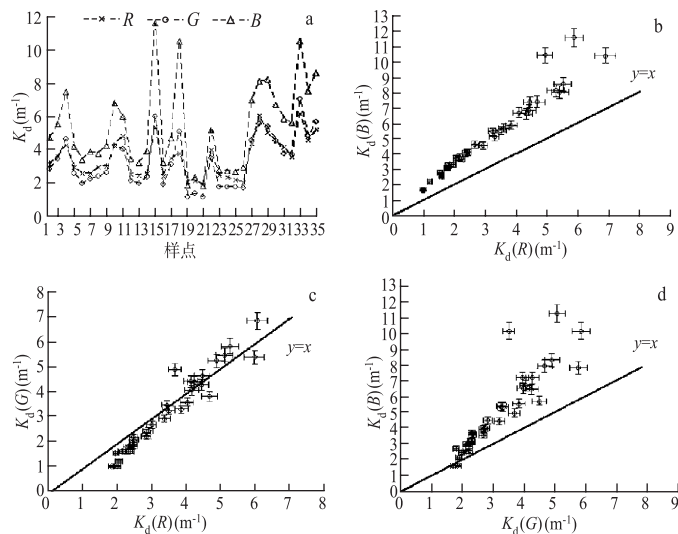


图 4 不同样点和红、绿、蓝波长范围内的 K_d 对比

Fig.4 Compare of K_d in different sample sites and red, blue, green wavelengths

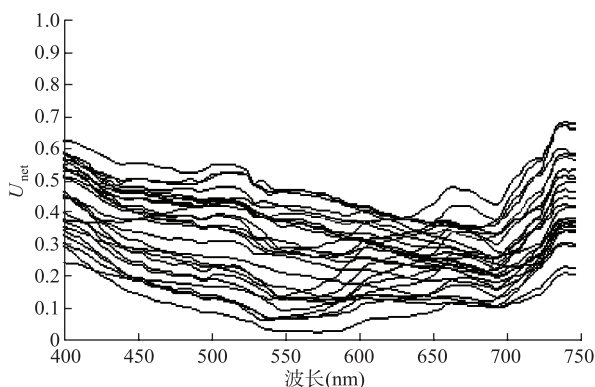


图 5 平均余弦谱分布

Fig.5 Distribution of average cosine

2.4 水体组分浓度与水下光场关系

水体组分浓度与水体光学特性之间存在着一定的共变性, 无机物一般控制着水体的散射特性^[24-25], 后向散射特性一般由小粒径颗粒物决定^[26], 而浮游色素物质、非色素物质、黄质决定了水体的吸收特性,

因此水体组分浓度和组成的差异决定了水体的固有光学特性, 从而影响到水生光环境. 总悬浮物(TSM)、有机物(OSM)、无机物(ISM)和叶绿素(CHL)浓度与 K_d 的相关关系谱如图 6 所示, 看出 TSM、ISM、OSM、CHL 对 K_d 的影响全部为正, 其中 ISM 与 K_d 相关性最大, 其次是 TSM, 再次是 CHL, OSM 相关性最小, 如图 6a 中所示; TSM、ISM、OSM、CHL 与 K_d 之间的共变关系如图 6b, TSM、ISM 与 K_d 成线性关系, 相关性分别为 0.8765 和 0.9022, OSM、CHL 与 K_d 之间的共变性较弱, 线性相关性分别为 0.1156 和 0.2944.

$K_d(PAR)$ 与 K_d 具有强相关性如图 6a 中实线所示, 因而水体组分对 $K_d(PAR)$ 的影响与对 K_d 的影响相似.

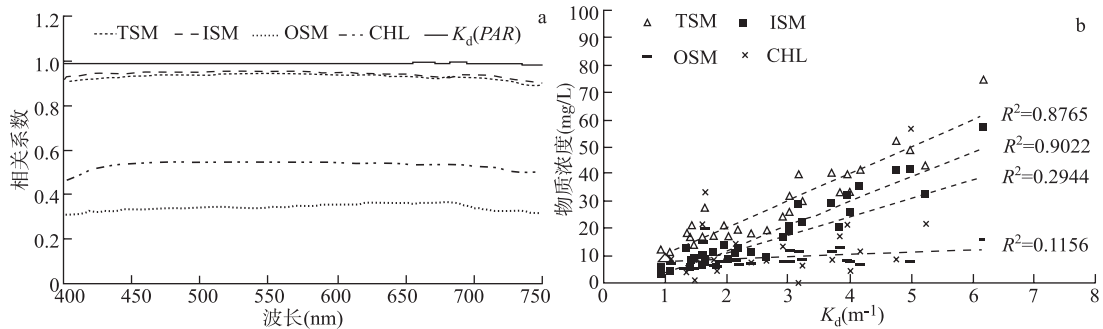


图 6 K_d 与 TSM、ISM、OSM、CHL 浓度和 $K_d(PAR)$ 相关关系谱(a);
 $K_d(550)$ 与 TSM、ISM、OSM、CHL 浓度之间的关系(b)

Fig.6 Plot a is the correlativity of K_d to concentration of TSM, ISM, OSM, CHL and $K_d(PAR)$; plot b is the connection of $K_d(550)$ to concentration of TSM, ISM, OSM, CHL

2.5 水体组分光能竞争

水体及其组分吸收系数的强弱决定了其在水生态光学竞争优劣地位, 利用公式(8), 计算表层中水体及其组分在红(R: 620–760nm)、绿(G: 500–560nm)、蓝(B: 430–470nm)波段占总吸收系数的比例, 结果如图 7 所示, 各物质吸收系数比例在不同样点存在较大的变异性, 如表 1 中变异系数是所示, 在不同波长范围内也具有较大的差异, 如表 1 中均值所示. 纯水在红光波段强吸收特性, 表层水样中纯水在红外波段的吸收系数占到总吸收系数的比例范围为 51.74%–93.59%, 红外波段的光能大部分是被水吸收转化为热能和其他化学能; 颗粒物在红外波段的吸收系数占的比重较小, 浮游色素物质吸收系数占的比重相对更少, 平均值约为 10.46%左右. 绿光波段纯水的吸收系数比例较小, 平均值约为 5.81%左右, 颗粒物吸收系数比例较大, 颗粒物总吸收系数比例平均值约为 94.19%, 其中非色素吸收系数比例约为 54.29%, 黄质吸收系数比例约为 13.96%, 浮游色素物质吸收系数比例约为 25.94%. 纯水在蓝光波段的吸收系数比例十分小, 平均值约为 0.50%左右, 几乎为零, 蓝光波长范围内的吸收系数几乎全部是颗粒物吸收系数, 颗粒物总吸收系数比例平均值约为 99.50%, 其中非色素约占 59.89%, 黄质约占 13.96%, 浮游色素物质约占 22.64%.

浮游色素物质中叶绿素的吸收波段分别在蓝光和红光波段, 然而红光和蓝光波段浮游色素物质吸收的光能分别只有 10.46%和 22.64%, 而这些能量分别又要消耗于荧光淬灭、细胞内的热传输(热钝化、非辐射散射、叶黄素循环、光子跃迁等)^[21], 能够应用到叶绿素光合作用中的能量微乎其微; 而太湖水体浮游色素物质中铜绿微囊藻和斜生栅藻的藻蓝蛋白和藻红蛋白分别在青光和黄绿光波段^[22–23], 从而可以利用青光和黄绿光进行光合作用, 而浮游色素物质吸收系数在青光和黄绿光波长范围内占总吸收系数的比例平均值分别约为 37.22%和 28.99%, 这两个波长范围内的光能总和几乎为蓝红光波长范围内能量总和的 2 倍, 因此既含有叶绿素又含有藻蓝蛋白和藻红蛋白的铜绿微囊藻和斜生栅藻在与浮游色素物质中具有较强的光竞争优势.

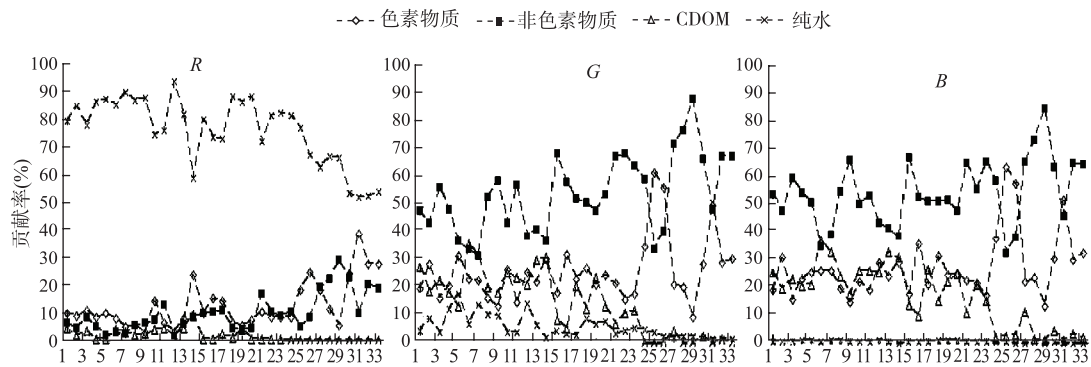


图 7 表层水体组分吸收系数比例

Fig.7 Proportion of composition absorption coefficient in the surface

表 1 表层水体组分吸收系数比例分析表

Tab.1 Statistic analysis of proportion of composition absorption coefficient in the surface

	R				G				B			
	色素	非色素	黄质	纯水	色素	非色素	黄质	纯水	色素	非色素	黄质	纯水
均值(%)	10.46	9.81	1.74	77.99	25.94	54.29	13.96	5.81	22.64	59.89	16.97	0.50
标准差(%)	8.37	6.77	2.07	12.00	11.45	14.00	11.22	4.19	11.61	11.83	11.08	0.27
变异系数(%)	80.02	69.01	118.97	15.39	44.14	25.79	80.37	72.12	51.28	19.75	65.29	54.00

3 结论

(1)由于黄质和非色素物质的强吸收作用,使得上行和下行辐照度随波长成单峰分布,峰值出现吸收系数最小的波段 583nm 处,并且随着深度的增加,单峰特征越显得明显。

(2)秋季的太湖水体中非色素物质和黄质占据绝对的主导地位,根据 K_d 可以将黄质和非色素物质主导程度的强弱程度分为 $K_d(B) > K_d(R) > K_d(G)$ (Class1: 弱)、 $K_d(B) > K_d(G) \approx K_d(R)$ (Class2: 较强)、 $K_d(B) > K_d(G) > K_d(R)$ (Class3: 强)三个级别。

(3)太湖秋季水体 $K_d(PAR)$ 平均值为 $4.61 \pm 1.54 m^{-1}$,变异系数为 33.38%,最大值为 7.93,最小值为 $2.62 m^{-1}$,真光层深度为 $1.11 \pm 0.35 m$,变异系数为 31.24%,最大值为 1.76m,最小值为 0.58m。

(4)秋季太湖水体中,浮游色素物质吸收的光能主要分布在青光和黄绿光波长范围内,约占总能量的 60%,蓝光和红光波长范围内的能量约占 30%,这样的光谱结构有利于铜绿微囊藻和斜生栅藻的生长。

致谢: 杨煜, 夏睿, 施坤同志在实验数据的采集和处理过程中给予了协助,在此表示感谢。

4 参考文献

[1] Anderson TR. A spectrally averaged model of light penetration and photosynthesis. *Limnol&Oceanogr*, 1993, **38**(7): 1403-1419.

[2] Kishino M, Booth CR, Okami N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter and pure water. *Limnol&Oceanogr*, 1984, **29**(2): 340-349.

[3] Dubinsky Z, Berman T. Light utilization efficiencies of phytoplankton in Lake Kinneret (Sea of Galilee). *Limnol & Oceanogr*, 1976, **21**: 226-230.

[4] Jerlov NG. *Optical oceanography*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

- [5] Nelson NB, Prkzelin BB, Bidigare RR. Phytoplankton light absorption and the package effect in California coastal waters. *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, **94**: 217-227.
- [6] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol & Oceanogr*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [7] Chami M, Shybanov EB, Churilova TY *et al.* Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters(Black Sea). *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**: 1020-1029.
- [8] 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [9] Bannister TT. Model of the mean cosine of underwater radiance and estimation of underwater scalar irradiance. *Limnol & Oceanogr*, 1992, **37**(4): 773-780.
- [10] Whitney LV. Transmission of solar energy and the scattering produced by suspension in lake water. *Trans Wisc Acad Sci Arts Lett*, 1938, **31**: 201-221.
- [11] Maffione RA, Jaffe JS. The average cosine due to an isotropic light source in the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(7): 13179-13192.
- [12] 黄二辉, 潘德炉, 李淑菁等. 水下剖面光谱原始数据异常值的判断方法. 海洋学研究, 2006, **24**(1): 91-96.
- [13] Mueller JL, Fargion GS, Zaneveld RV *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation. Revision 4. Volume IV. NASA, 2003.
- [14] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- [15] Pope RM, Fry ES. Absorption spectrum (380–700nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optical*, 1997, **36**: 8710-8723.
- [16] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [17] Heinemann PH, Johnson L, Alii MA. The underwater photic environment of a small arctic lake. *ARCTIC*, 1990, **43**(2): 129-136.
- [18] Huovinen PS, Penttö H, Soimasuo MR. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lake in Central Finland. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 205-214.
- [19] 张运林, 秦伯强. 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.
- [20] Gons HJ, Ebert J, Kromkamp J. Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid inland water. *Aquatic Ecology*, 1998, **31**: 299-311.
- [21] Westberry TK, Siegel DA. Phytoplankton natural fluorescence variability in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research*, 2003, **50**: 417-434.
- [22] 郝建军, 康宗利. 植物生理学(第1版). 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [23] 武维华. 植物生理学(第1版). 北京: 科学出版社, 2003.
- [24] Bowers DG, Mitchelson-jacob EG. Inherent optical properties of the Irish sea determined from underwater irradiance measurement. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1996, **43**: 433-447.
- [25] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型. 环境科学, 2007, **28**(12): 2688-2694.
- [26] Ulloa O, Sathyendranath S, Platt T. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater. *Applied Optical*, 1994, **33**(30): 7070-7077.