

太湖水体漫衰减系数特征及其对水生态环境影响分析

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: 利用2006年10~11月太湖全湖不同区域光学属性的测量数据, 就太湖水体漫衰减系数(K_d)特征、各影响因子对 K_d 的贡献率以及 K_d 对太湖水生态系统的影响进行分析。结果表明, 太湖水体的漫衰减系数 K_d 以571 nm为分界点, 在整个可见光波长范围内(400~700 nm)主要呈现2种变化趋势。第1种, 在<571 nm波长范围内, K_d 随着波长的增加呈现指数形式衰减, 第2种, 在>571 nm波长范围内, K_d 表现为波动形式; 在400~700 nm波长范围内, 色素颗粒物的吸收系数是漫衰减系数第一贡献者, 非色素颗粒物吸收系数和散射系数处于第二贡献者地位, 而黄质吸收系数的贡献率相对最小; 太湖水体漫衰减系数决定了太湖水生态系统中的光生态因子, K_d 形成的“水体窗口”影响了太湖水域不同类型生态系统的形成, 并为太湖“水华”的优势藻类铜绿微囊藻的出现提供了水下光场依据。

关键词: 太湖; 漫衰减系数; 水生态环境

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0348-08

Characteristics of the Diffuse Attenuation Coefficient and Its Impact on Aquatic Ecology Environment

HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, SUN De-yong, LE Cheng-feng, WU Lan, WANG Li-zhen, WANG Xing

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

Abstract: According to the optical property data measured in Taihu Lake at October and November 2006, the characteristics of the diffuse attenuation coefficient(K_d), the contribution of each factor effecting on K_d and the effect of K_d on the aquatic ecology environment were analyzed. The results indicate that, the diffuse attenuation coefficient K_d of Taihu Lake has two main trends in the whole visible wavelength range (400-700 nm). The first type is that, K_d decreases with the wavelengths by exponential style in the range of less than 571 nm wavelengths, and the second type is that, K_d is in the form of fluctuations in the range of larger than 571 nm wavelengths. In the range of 400-700 nm wavelength, the absorption coefficient of pigment particles is the first contributors of diffuse attenuation coefficient. Non-pigment particles absorption and scattering coefficients is the second contributor, and the rate of contribution of yellow substance is the smallest. The K_d of Taihu Lake determines the light factor of the Taihu water ecosystem. The “water window” shaped by the K_d provides the light base for different kinds of ecosystem and the appearance of *Microcystis aeruginosa* which is the preponderant algae in the “algal blooms” phenomenon.

Key words: Taihu Lake; diffuse attenuation coefficient; aquatic ecology environment

水面以下光线的穿透性和可用性是水生态系统赖以存在的基础, 光谱能量的强弱、光谱能量在水体中的不均匀分布及其与水生植物之间的相互作用形成了水生态系统初级生产力的基本约束条件^[1]。漫衰减系数(K_d)直接决定了水体中的光强和光场结构, 从而成为水生态系统的重要影响因素, 当水体中漫射衰减系数较大时, 可能导致沉水植物由于没有足够的光照进行光合作用而死亡和衰退, 导致水体生态系统类型的转化。 K_d 的主要影响因素是水体及其组分的吸收和散射作用, 同时 K_d 还受太阳天顶角、水气界面等表观光学因素的影响。漫衰减系数不仅可以用于水体等级的划分^[2], 精确计算水下光场的分布和光强^[3], 反推正好位于水面以下的辐照度, 同时还可以用于真光层深度的计算, 因此研究湖泊水体漫衰减系数有助于了解太湖水体的光学特性和

光学类型及其对生态系统的影响。国内学者张运林等^[4,5]对太湖水体漫衰减系数进行了深入的研究, 认为太湖不同湖区漫衰减系数存在较大的空间和季节差异; Gallegos等^[6]对Chesapeake湾和Rhode河流进行了研究, 其漫衰减系数在 $1 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ 范围内; Deepak等^[7]对Roatan岛附近水域进行研究, 求出其蓝光、绿光、红光漫衰减系数分别为0.138、0.158和 0.503 m^{-1} , 并估算出其光线穿透深度分别为8、6和2 m。从前人的研究可以看出, 漫衰减系数、光的穿透深度等具有较大的地区差异, 因此对不同地区生态环境的影响也是千差万别。

本研究在实验观测的基础上, 探讨了太湖秋季

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571110)

作者简介: 黄昌春(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染遥感监测, E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

漫衰减系数特征及其影响因素,进而分析其对太湖水生态系统的影响.

1 材料与方法

1.1 采样时间及点位

2006-10-24~2006-11-04 对太湖 37 个样点进行观测和采样,样点分布如图 1 所示,测量的参数包括室内分析的总悬浮物、色素颗粒物、非色素颗粒物和黄质的光谱吸收系数;野外测量的下行辐照度、散射系数和后向散射系数,测量深度设置为 0.60、0.90、1.2 和 1.5 m.

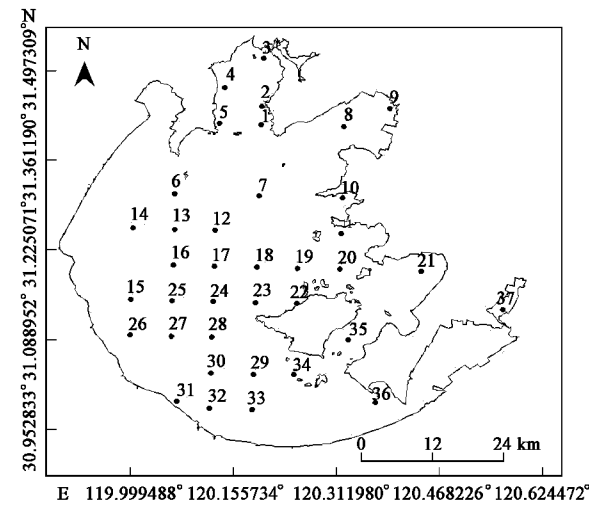


图 1 样点分布
Fig.1 Sample sites

1.2 参数测定

1.2.1 下行辐照度、散射系数和后向散射系数的测量

利用 TRIOS 水下光谱仪的辐照度探头测量水体中下行辐照度,测量波长范围为 320~950 nm,光谱分辨率为 3.3 nm,辐照度探头的测量饱和值为 $10\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{nm})^{-1}$ (400 nm)、 $8\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{nm})^{-1}$ (500 nm)、 $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{nm})^{-1}$ (700 nm);将同一样点同一水层测量的不同时间序列的数据由小到大排列,若其中存在异常值,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^[8].

散射系数和后向散射系数的测量仪器为 Wetlabs 公司的光谱吸收、衰减仪(AC-S)和后向散射计 BB9, AC-S 在可见光波长范围共有 85 个光谱通道,光谱分辨率为 4 nm,测量精度为 0.01 m^{-1} .通过 AC-S 可直接获得吸收和衰减系数,对直接测得的吸

收系数作温度、盐度和散射校正校正后,利用衰减系数减去吸收系数得到散射系数^[9];BB9 测得的 117° 体散射函数,利用经验关系计算得到后向散射系数,具体处理过程参见文献^[9].

1.2.2 总悬浮物、色素颗粒物、非色素颗粒物和黄质的光谱吸收系数的测量^[10]

(1)总悬浮物的光谱吸收系数的测量 吸光度采用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量,总悬浮物吸光度的测定采用如下方法.首先,使用滤膜过滤一定量的水样,其次,用 UV-240IPC 型紫外分光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.计算方法为:

①进行放大因子校正

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

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.

②计算吸收系数

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

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.

(2)非色素颗粒物光谱吸收系数的测量 测量非色素颗粒物的光谱吸收系数,首先需要通过漂白,去除总悬浮物中的色素成分,一般可以使用 0.1% 活性的 NaClO_3 溶液或甲醇溶液.本实验使用 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-240IPC 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 675 nm 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.

(3)色素颗粒物的光谱吸收系数的测量 色素颗粒物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.

(4)黄质的光谱吸收系数的测量 使用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤水样,提取出黄质,然后,将黄质溶液装入 $1\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的比色皿,以超纯水作为参考水样,利用 UV-240IPC 型紫外分光光度计测量黄质的吸光度,光谱吸收系数计算方法为:利用公式 $a(\lambda') = 2.303 \times D(\lambda)/r$ 计算各个波长的吸收系数,再利用公式 $a(\lambda) = a(\lambda') - a(750) \times \lambda/750$ 进行校正,式中, $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1}), $a(\lambda')$ 为波长

λ 未校正的吸收系数(m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径(m), $a(750)$ 为参考波段为 750 nm 处的吸收系数.

1.3 漫衰减系数分析的理论基础

1.3.1 漫衰减系数计算方法

水下辐照度在均一水体中遵循指数衰减规律^[11]:

$$K_d = -\frac{1}{z} \ln \left(\frac{E_d(z)}{E_d(z_c)} \right)$$

式中, K_d 为水体漫衰减系数, Z 为从参考水层到测量处的深度, z_c 为参考水层深度, $E_d(z)$ 为 Z 深度处的向下辐照度, $E_d(z_c)$ 为参考水层深度处的辐照度. K_d 通过对不同深度的下行辐照度进行指数回归得到的, 只有当 $R^2 \geq 0.95$, 深度数 ≥ 3 时, 其 K_d 才被接受, 否则视为无效值^[12].

1.3.2 漫衰减系数分析理论基础

根据 Kirk^[13] 的研究, $\overline{K_d}$ 可以表示为:

$$\overline{K_d} \approx \frac{a}{u_0} \left[1 + \frac{b}{a} (1 - \overline{u_s}) \right]$$

$$\text{即 } \overline{K_d} \overline{u_0} \approx [a + b(1 - \overline{u_s})]$$

式中, $\overline{K_d}$ 为平均漫衰减系数, $\overline{u_0}$ 为水表面以下太阳天顶角余弦, a 为吸收系数, b 为散射系数, $\overline{u_s}$ 为体散射函数的散射平均余弦值(散射相函数不对称因子).

$$\overline{u_0} = \left[1 - \left(\frac{\sin(\theta)}{n} \right)^2 \right]^{1/2}$$

式中, θ 为太阳天顶角, n 为折射指数^[14].

$$B_b = \frac{1 - \overline{u_s}}{2 \overline{u_s}} \left[\frac{1 + \overline{u_s}}{(1 + \overline{u_s}^2)^{1/2}} - 1 \right]$$

式中, $B_b = \frac{b_b}{b}$ 为后向散射率, b_b 为后向散射系数^[15].

对实测的散射系数和后向散射系数比值后向散射率 B_b 进行统计分析, 得到太湖最大后向散射概率为 0.027, 对应的 $\overline{u_s}$ 为 0.884, 最小后向散射概率为 0.002, 对应的 $\overline{u_s}$ 为 0.990 4, 平均后向散射概率为 0.012, 对应的 $\overline{u_s}$ 为 0.944; 在此, 采用 $\overline{u_s}$ 的平均值 0.944, 即:

$$\overline{K_d} \overline{u_s} \approx [a + b(1 - 0.944)] = (a + 0.056b) \quad (1)$$

将 a 进一步表示为: $a = a_y + a_w + a_c + a_{nc}$, 式中, a_y 为黄质吸收系数, a_w 为纯水吸收系数, a_c 色素颗粒物吸收系数, a_{nc} 为非色素颗粒物吸收系数, 得到:

$$\overline{K_d} \overline{u_0} \approx (a_y + a_w + a_c + a_{nc} + 0.056b) \quad (2)$$

本研究基于此公式对 K_d 的类型及其各组分对 K_d 的贡献率进行分析.

2 结果与分析

2.1 太湖漫衰减系数特征

水体的漫衰减系数主要是由纯水、黄质、色素和非色素颗粒物的吸收和散射特性决定的, 其中纯水的吸收和散射是一切水体所共有的, 一般认为是水体漫衰减系数的本底(背景值), 因此水体的漫衰减系数的差异主要由黄质、色素颗粒物和色素颗粒物的吸收和散射的变化引起^[16]. 太湖是大型浅水湖泊, 不同的湖区、不同时间以及不同深度的水层中黄质、色素和非色素颗粒物的吸收和散射特性存在着较大的差异, 决定了太湖水体的漫衰减系数的多样性和时空分布差异.

为了消除表观光学量对 K_d 的影响, 对由 1.3.2 节中得到漫衰减系数进行太阳天顶角归一化处理, 即 $K_d \times \overline{u_0}$ (假设各个样点的水气界面折射指数相同), 得到 37 个样点的归一化漫衰减系数, 如图 2 所示.

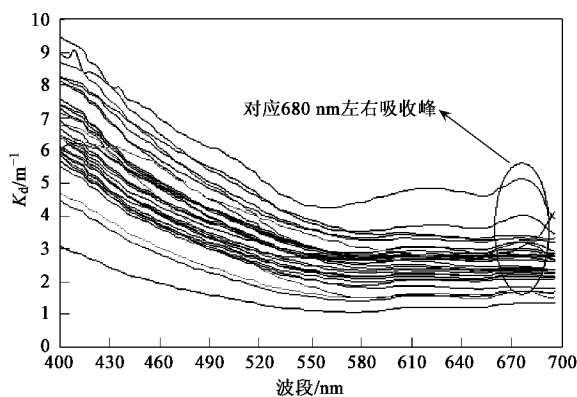


图 2 对太阳天顶角归一化后的 K_d

Fig. 2 K_d normalized by solar zenith angle

图 2 中 K_d 曲线特征极为明显, 整体趋势可以分为 2 个部分, 在 < 571 nm 波长范围内, 漫衰减系数随着波长的增加呈现指数趋势衰减, 最大衰减指数为负 0.004, 最小衰减指数为负 0.009 4, 平均衰减指数为负 0.006 标准差为 0.000 95, 变异指数达到了负 15.89%, 而 > 571 nm 的波长区间内, 漫衰减系数受色素、非色素和总散射系数影响随波长变化十分复杂, 所有样点并没有统一规律; 在色素颗粒物浓度较高的地方, 受色素颗粒物叶绿素 a 的吸收光谱影

响 K_d 在 440 nm 和 680 nm 存在衰减峰值, 由于在 < 571 nm 波段受非色素颗粒物和黄质吸收系数影响较大, 使得 440 nm 处的衰减峰不是特别的明显, 因此 440 nm 的衰减峰值对该波长区域内的指数衰减形式并没有多大的破坏性, 由于部分样点非色素颗粒物吸收系数和散射系数在 > 571 nm 波段较弱, 使得 K_d 在 680 nm 处的衰减峰值凸显出来, 在部分色素颗粒物浓度特别高的样点藻蓝蛋白在 580 ~ 640 nm 的衰减带能够十分明显的显示出来, 如图 2 中第 1 条曲线(由上向下)所示; 而在色素颗粒物较低、非色素颗粒物较高的地方, < 571 nm 波长范围内 K_d 曲线与非色素颗粒物吸收光谱特征较相似, 而 > 571 nm 的波长区间内 K_d 曲线较非色素颗粒物吸收曲线有所抬升; 与色素颗粒物高浓度样点相比, 色素颗粒物低浓度样点的 K_d 相对单一简单, 随波长的增加近似呈现指数形式衰减。

2.2 黄质、色素颗粒物、非色素颗粒物吸收和总散射对 K_d 的影响

分别利用黄质、色素颗粒物和 非色素颗粒物吸收系数以及总散射系数与漫衰减系数 K_d 的比值表示它们对 K_d 的贡献率。图 3 分别显示了各样点黄质、色素颗粒物和 非色素颗粒物吸收系数以及总散射系数在特征波长 440、575、600 和 680 nm 处对 K_d 的贡献率, 表 1 为对图 3 进行统计分析的结果。由图 3 可知, 4 个波段中多数样点的色素颗粒物吸收系数对 K_d 贡献率大于非色素颗粒物以及总散射的贡献率, 黄质的贡献率相对最小; 而总散射对 K_d 贡献率随波长呈现逐渐增加趋势, 逐渐接近并超过非色素颗粒物对 K_d 的贡献率, 在黄光(575 nm)和橙光(600 nm)波段达到最大值。由表 1 可知: 色素颗粒物吸收是 K_d 的最大贡献者; 只有蓝光(440 nm)的最大值和平均值中, 非色素颗粒物吸收系数对 K_d 的贡献率

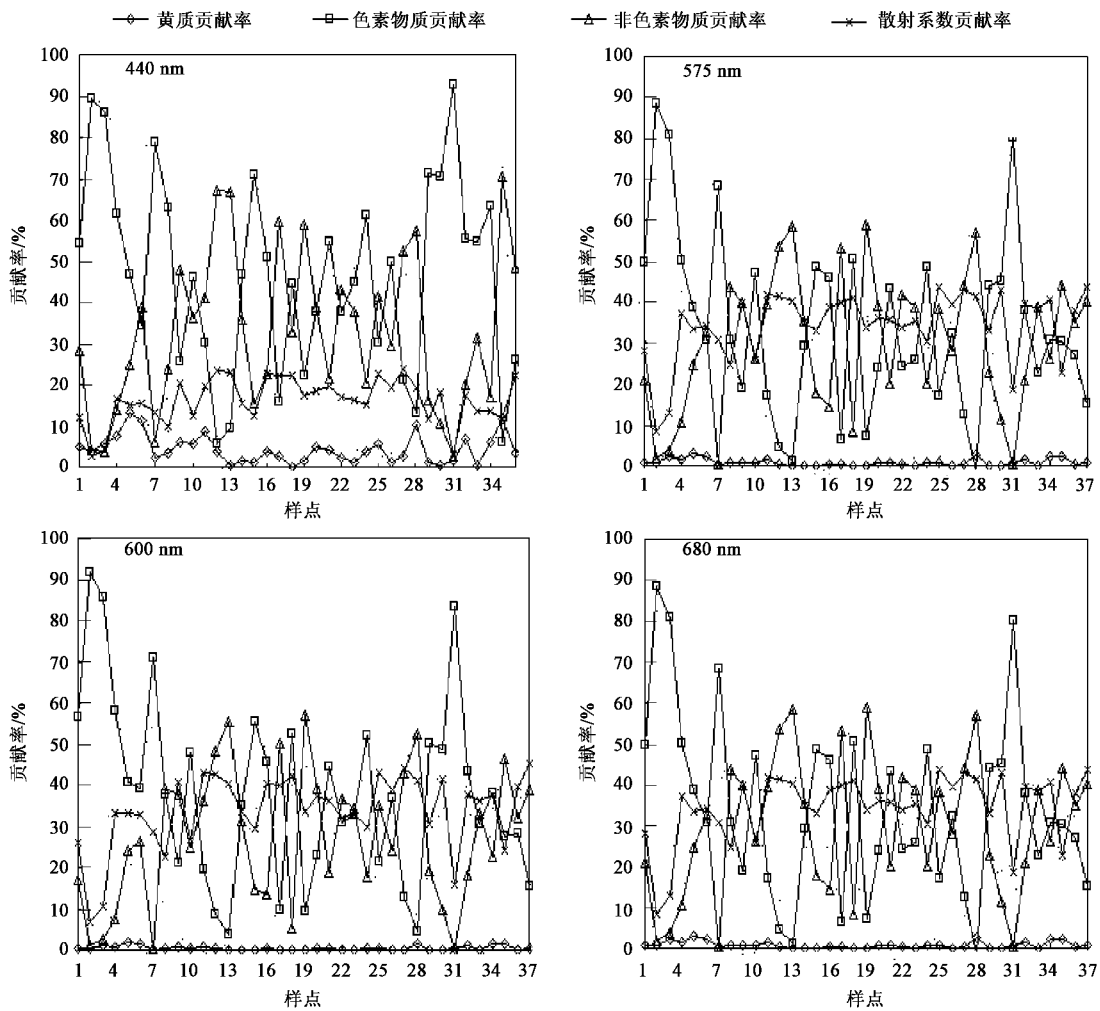


图 3 黄质、色素颗粒物和 非色素颗粒物吸收系数以及总散射系数在 440、575、600 和 680 nm 处对 K_d 的贡献率

Fig.3 Contribution of CDOM, pigment, nonpigment matter's absorption and total scattering coefficient to the K_d at 440, 575, 600 and 680 nm wavelengths

才超过散射作用,而黄光(575 nm)、橙光(600 nm)和红光(680 nm)的最小值、平均值中非色素颗粒物吸收系数对 K_d 的贡献率是小于散射作用;黄质是 4 种物质中对 K_d 的贡献率一直是最小的,4 种因子对 K_d 平均贡献率大小排序为:色素颗粒物吸收 > 非色素颗粒物吸收 > 散射作用 > 黄质吸收(440 nm 时);色素颗粒物吸收 > 散射作用 > 非色素颗粒物吸收 > 黄质吸收(575、600 和 680 nm)。

黄质吸收对 K_d 贡献率随着波长的增加迅速减少,这主要是因为黄质在波长较长的黄光、橙光和红光波段的吸收很小几乎为 0,而在波长较短的蓝紫光波段具有较强的吸收;色素颗粒物吸收系数对 K_d 贡献率在红光波段具有更大贡献,原因在于色素颗粒物在红光波段有特征吸收作用,而非色素颗粒物在红光波段的吸收作用较弱;在蓝紫光波段,虽然色素颗粒物也有特征吸收,但非色素颗粒物在此波长

吸收较大,因此,色素颗粒物和 非色素颗粒物对 K_d 贡献率在波长较短的蓝紫光波段的差异不明显;总散射系数对 K_d 的贡献率平均最大值出现在 575 nm 的黄光波段和 600 nm 的橙光波段,分别达到 34.53% 和 33.79%,最低值出现在蓝紫光波段,即总散射作用对黄光、橙光和红光波段具有较强的贡献率,但在 680 nm 处有一贡献低谷区,而在红光到近红外波长则出现迅速上升趋势,这主要是因为在该波长范围内水体组分中黄质、色素和非色素颗粒物的吸收均较小,而这时的衰减主要是由于总散射作用和纯水的吸收所引起的,而纯水的吸收量相对散射十分的小,因而此时的漫衰减系数中散射的作用占有重要的地位,但仍然是小于黄质、色素和非色素颗粒物的总吸收系数的贡献,由此可见总吸收系数对水下光场结构和光强起着举足轻重的作用,对水生态系统产生了巨大的影响。

表 1 影响因子对 K_d 贡献率的统计分析

Table 1 Statistic analysis table of contribution of each influence factor

波长/nm	因子类型	最大贡献率/%	最小贡献率/%	均值/%	标准差/%	变异系数/%
440	黄质	13.19	0.16%	4.33	3.38	77.99
	色素颗粒物	93.02	5.78	45.80	23.61	51.54
	非色素颗粒物	70.44	2.46	33.41	18.98	56.80
	散射作用	25.76	2.52	16.46	5.68	34.52
575	黄质	3.13	0.01	0.83	0.88	105.91
	色素颗粒物	88.78	0.99	34.55	21.79	63.05
	非色素颗粒物	58.79	0.26	30.09	16.76	55.68
	散射作用	43.92	8.26	34.53	8.39	24.30
600	黄质	1.99	0.00	0.50	0.56	111.29
	色素颗粒物	91.69	3.92	38.24	22.15	57.92
	非色素颗粒物	56.94	0.17	27.47	16.26	59.20
	散射作用	45.10	6.77	33.79	9.08	26.87
680	黄质	0.48	0.00	0.11	0.14	128.16
	色素颗粒物	94.55	5.81	46.40	23.90	51.50
	非色素颗粒物	65.97	0.00	23.64	16.52	69.87
	散射作用	43.57	4.83	29.85	10.47	35.07

2.3 漫衰减系数对生态环境的影响分析

在光合作用的反应中能够吸收光能的色素称为光合色素,主要有 3 种类型:叶绿素、类胡萝卜素和藻胆素.高等植物中含有前 2 类,藻胆素(phycobilin)仅存在于红藻和蓝藻中,主要有藻红蛋白(phycoerythrin)、藻蓝蛋白(phycocyanin)和别藻蓝蛋白(allophycocyanin)3 类.叶绿素最强的吸收区有 2 处:波长 660 ~ 700 nm 的红光部分和 430 ~ 450 nm 的蓝紫光部分,叶绿素对橙光、黄光吸收较少,尤以对绿光的吸收最少;类胡萝卜素的吸收带在 400 ~ 500 nm 的蓝紫光区,它们基本不吸收红、橙、黄光,藻蓝

蛋白的吸收光谱最大值在橙红光部分,而藻红蛋白则在绿光部分^[17,18]。

太湖水体生态系统中能够进行光合作用的主要有高等沉水植物和藻类(铜绿微囊藻、斜生栅藻等),沉水植物体内光合色素主要是叶绿素、类胡萝卜素,藻类体内光合色素主要是叶绿素、类胡萝卜素和藻胆素,沉水植物和藻类体内的光合色素对光波的选择吸收使得水下光场(光强和光的结构)成为影响生态系统的重要生态因子,他不仅决定了浮游植物、沉水植物的生物量,而且还会影响到他们的种群结构^[19~28].不同波长的水体漫衰减系数的大小直接决

定了水下光强和水下光场的组成,如图 4 所示.

正方向为 37 个样点 7 个可见光波长的漫衰减系数,负方向为 7 个可见光波长的真光层深度.图 4 中可以看出漫衰减系数最大的为紫光波长,其次是蓝光波长,最小的为黄光波长和橙光波长,而其真光层深度与漫衰减系数相反,最大真光层深度为黄光波段和橙光波段,最小真光层深度为紫光波段,其次

是蓝光波段.由于各个波段的黄质、色素颗粒物和非色素颗粒物吸收系数以及总散射系数存在较大的差异,从而使得各个波段的漫衰减系数具有较大的变异性,平均变异系数达到 37.45%,使得在水体中传输的光线形成了类似“大气窗口”的“水体窗口”,只有在“水体窗口”之内的光,才能被植物光合色素利用.

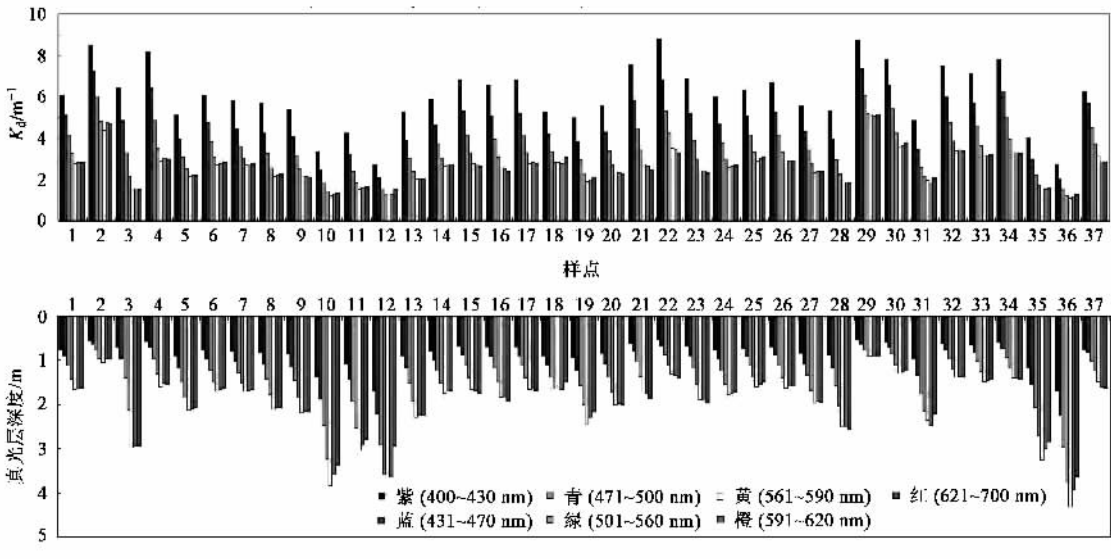


图 4 37 个样点的 7 个可见光波长的漫衰减系数和真光层深度

Fig.4 Diffuse attenuation coefficient and the depth of euphotic zone at seven visible wave bands at 37 sample sites

不同区域的漫衰减系数的差异形成不同的“水体窗口”成就了太湖地区不同的生物种群,如梅梁湾地区的 1、2、3、4、5 号点,漫衰减系数相对较高从而使得该区域水下光强较小,而该地区紫、蓝、青光衰减较强,沉水植物所需要的蓝光波段几乎衰减殆尽,而只能与藻类在红光波长展开竞争,由于藻类的藻蓝和藻红蛋白能够利用黄光、橙光、绿光进行光合作用从而在竞争中处于优势,使得该地区几乎无沉水植物,成为“水华”高发区;而在太湖东部区域,10、11、36 号点漫衰减系数较小,底部的沉水植物能够获取充足的光能成为典型的草型湖泊区.

太湖“水华”的种群结构自 20 世纪 80 年代到现在,以蓝藻、硅藻、绿藻为总体优势群,分别占 20%、

28%和 40%,并逐渐转化为蓝藻门占绝对优势,最高时约占总量的 94%,其中又以单一铜绿微囊藻为主^[29],从水体的漫衰减系数来看这一种群结构具有一定的水下光场基础,以铜绿微囊藻和斜生栅藻为例,从表 2 中可以看到,太湖地区水体平均漫衰减系数较小的地方主要在红、橙、黄、绿波段区,而又以黄、橙光相对最小,由图 5 可知,铜绿微囊藻在 560~640 nm 之间有一较宽的藻蓝蛋白吸收带,斜生栅藻在绿光波长有一狭窄的藻红蛋白吸收带,与斜生栅藻相比铜绿微囊藻的藻蓝蛋白吸收带相对较宽,并且由于黄、橙光波长衰减系数较绿光波段小,因此黄、橙光波段光强比绿光波段要强,这两点优势使得铜绿微囊藻在种群竞争中具有较强的优势,成为“水

表 2 37 个样点 7 个可见光波长漫衰减系数统计分析表/ m^{-1}

Table 2 Statistic analysis table of diffuse attenuation coefficient at seven visible wavelengths at 37 sample sites/ m^{-1}							
项目	紫 (400~430 nm)	蓝 (431~470 nm)	青 (471~500 nm)	绿 (501~560 nm)	黄 (561~590 nm)	橙 (591~620 nm)	红 (621~700 nm)
均值	6.066 35	4.769	3.743 24	2.969 75	2.550 96	2.586 21	2.606
极差	6.049 8	5.320 19	4.493 51	3.976 13	4.068 99	3.893 86	3.869
标准差	1.516 75	1.317 69	1.106 15	0.912 67	0.842 34	0.847 99	0.825

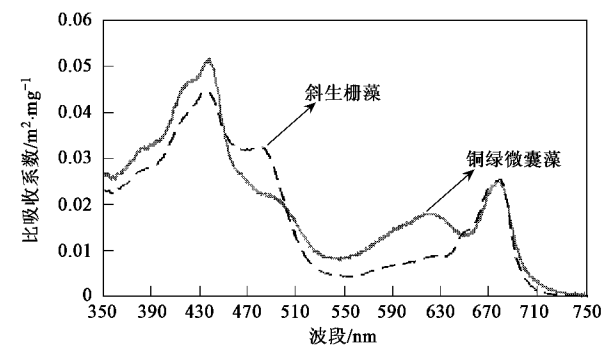


图5 铜绿微囊藻和斜生栅藻的比吸收系数
Fig.5 Specific absorption coefficient of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

华”的绝对优势藻类。

3 讨论

太湖水体漫衰减系数 K_d 在整个波段区间内主要呈现 2 种变化趋势,第 1 种变化趋势为单调指数衰减形式,第 2 种为波动形式,如图 6(a)所示,这是由太湖水体组分的吸收系数和总散射系数共同作用形成的。 K_d 的影响因素黄质、非色素颗粒物的吸收系数和总散射系数是随波长的增加而呈现指数形式

衰减,色素颗粒物在 440 nm、675 nm 的吸收峰和 490 nm、600 nm 左右的吸收带使得色素颗粒物在整个波长范围内不具有统一规律性,但是在 400 nm 吸收峰与 600 nm 左右的吸收带之间存在近似单调指数衰减形式.对 K_d 进行一阶微分处理,选取其第 1 个零点为 584 nm,但是在零点的短波方向上仍有一定范围的 K_d 是受 600 nm 左右藻蓝蛋白吸收带的影响,使得该范围内的 K_d 值偏离了指数衰减形式,因而去除该范围的 K_d 值,确定符合指数衰减形式的波长范围,并确定 571 nm 作为指数衰减形式和波动形式的分界线.在 >571 nm 波长范围内, K_d 变化趋势与黄质、非色素颗粒物的吸收系数相似,在 <571 nm 波长范围内与色素颗粒物吸收系数变化趋势相似,如图 6(b)所示。

但是指数衰减形式和波动形式的分界线不是固定不变的,它随着水体组分的差异而发生变化,当色素颗粒物占主导地位,藻蓝蛋白吸收峰明显时,分界线将向短波方向移动;而当黄质或非色素颗粒物或黄质和非色素颗粒物之和占主导地位时,分界线将向长波方向移动。

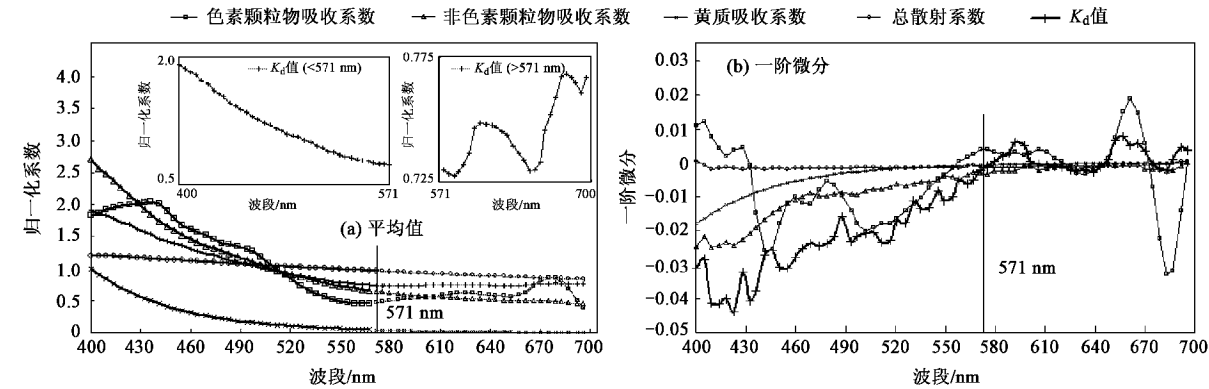


图6 37个样点 K_d 、吸收和散射系数平均值和平均值的一阶微分

Fig.6 Average value and first derivative of K_d , absorption and scattering coefficient for 37 sample sites

4 结论

(1) 与总散射系数相比,总吸收系数(色素颗粒物、非色素颗粒物和黄质吸收系数之和)是 K_d 的主要决定部分,从而使得总吸收系数是太湖水生态系统中光学因子的主要影响者。

(2) 色素颗粒物吸收系数在整个波长范围内(400 ~ 700 nm)都是 K_d 的第一贡献者;在波长较短的蓝紫光波段,非色素颗粒物吸收系数是 K_d 的第二贡献者,散射作用为第三贡献者;在波长较长的黄

光、橙光和红光波段, K_d 的第二贡献者为散射作用,非色素吸收系数为第三贡献者;黄质吸收系数是 4 个组分中贡献率最小的,并且其贡献率随着波长的增加不断减小,在黄光、橙光和红光波段对 K_d 贡献率几乎为 0。

(3)太湖水体总散射系数较强,与总吸收系数相比占有很大的比例,但是总散射对水生态系统的影响较总吸收系数弱,因此太湖水生态系统所需要的光能主要是被吸收了,而不是被散射掉了。

(4)太湖水体漫衰减系数 K_d 特征决定了太湖

水域不同类型生态系统的形成以及太湖“水华”的绝对优势藻类铜绿微囊藻的出现的水下光场条件,对太湖水生态系统的恢复和整治应该从多方面入手,可以根据“水体窗口”引入新的植物来净化水体,减弱水体的富营养化程度,减少“水华”发生的频率。

参考文献:

- [1] Platt T, Lewis M, Geider R. Thermodynamics of the pelagic ecosystem: Elementary closure conditions for biological production in the open ocean[A]. In: Flows of energy and materials in marine ecosystems[C]. NATO Conf, 4 Mar, 1984. 49-84.
- [2] Jerlov N G. Marine Optics[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [3] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110, C02016, doi:10.1029/2004JC002275.
- [4] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[J].应用生态学报,2005, 16(6): 1133-1137.
- [5] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性[J].生态学报,2005, 5(3):454-460.
- [6] Gallegos L C, Correll L D. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary[J]. Limnol Oceanogr, 1990, 35(7): 1486-1502.
- [7] Deepak R, Narumalani S, Goddijn L M, *et al.* Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data[J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2005, 60: 48-64.
- [8] 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[J].海洋学研究,2006, 24(1):91-96.
- [9] Moore C, Barnard A, Hankins D, *et al.* Spectral Absorption and Attenuation Meter (ac-s) User's Guide, Revision A[R]. America: WET Labs Inc, 2004. 5-20.
- [10] Mueller J L, Fargion G S, Zaneveld R V, *et al.* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Revision 4. Volume IV[S]. NASA, 2003.
- [11] Huovinen P S, Penttö H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lake in Central Finland [J]. Chemosphere, 2003, 51(3): 205-214.
- [12] 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[J].水科学进展,2003, 4(14): 447-453.
- [13] Kirk J T O. The vertical attenuation of irradiance as a function of the optical properties of the water[J]. Limnol Oceanogr, 2003, 48(1): 9-17.
- [14] Mobley C D. Light and water[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [15] Mobley C D, Sundman L K, Boss E. Phase function effects on oceanic light fields[J]. Applied Optics, 2002, 41(6): 1035-1050.
- [16] 张运林,秦伯强,陈伟民.太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J].海洋与湖藻, 2004, 35(3):209-213.
- [17] 郝建军,康宗利.植物生理学[M].北京:化学工业出版社, 2005.
- [18] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社,2003.
- [19] Wu N W, Bian W J, Yao H L. Energy conversion efficiency of pond ecosystem cultivated mainly with black carp[J]. Appl Ecol, 1992, 3 (4): 333-338.
- [20] Zhao W, Dong S L, Zhang Z Q, *et al.* Daily change of primary productivity of phytoplankton in saline alkaline ponds[J]. Appl Ecol, 2003, 14 (2): 234-236.
- [21] Zhou W H, Huo W Y, Yuan X C, *et al.* Distribution features of chlorophyll a and primary productivity in high frequency area of red tide in East China Sea during Spring[J]. Appl Ecol, 2003, 14 (7): 1055-1059.
- [22] Li X N, Zhou W H, Liu S M, *et al.* Sediment chlorophyll in HAB (Harmful Algal Bloom) area of East China Sea[J]. Appl Ecol, 2003, 14 (7): 1102-1106.
- [23] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem[M]. Britain: Cambridge university press, 1994. 129-144.
- [24] 汪育文,李建宏,吴敏,等.南京玄武湖微囊藻水华种类组成的研究[J].环境科学,2007, 28(10):2187-2191.
- [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[J].环境科学,2007, 28(12):2688-2694.
- [26] 孙德勇,李云梅,黄家柱,等.太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性及参数化分析[J].生态学报,2008, 28(2):749-760.
- [27] 孙百晔,王修林,李雁宾,等.光照在东海近海东海原甲藻赤潮发生中的作用[J].环境科学,2008, 29(2):362-367.
- [28] 乐成峰,李云梅,孙德勇,等.太湖叶绿素 a 浓度时空分异及其定量反演[J].环境科学,2008, 29(3):619-626.
- [29] 江耀慈,丁建清,张虎军.太湖藻类状况分析[J].江苏环境科技,2001, 14(1):30-31.