

夏季太湖光学介质获取的光合有效辐射能量谱随深度变化规律的研究

赵巧华¹, 秦伯强^{2*}

(1. 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 根据 2006-07-29 ~ 2006-08-01 太湖 41 个站点测定的水体上、下行辐照度、非藻类颗粒物、浮游植物及有色溶解有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 的吸收系数, 计算了单位水体中各介质所吸收光合有效辐射能量谱随深度的变化。结果表明, 单位水体中的浮游植物获取光合有效辐射能量的标准化谱在表层有 2 个主峰, 分别位于 450 nm 左右和 675 nm 左右, 随着深度增加, 位于 450 nm 左右的峰逐渐减弱, 在藻型湖区和湖心区, 衰减尤为明显, 且该峰对应的波长出现红移现象; 浮游植物获取的主要光能来源随深度的增加逐渐由 400 ~ 500 nm 和 600 ~ 700 nm 向 600 ~ 700 nm 过渡, 在草型湖区的过渡速度相对缓慢, 而在梅梁湾 (藻型湖区) 和湖心区却很快; 单位水体中的非藻类颗粒物在表层获取的能量主要来自 400 ~ 500 nm, 但随深度的增加, 其获取的能量主要来自 500 ~ 600 nm; 单位水体中 CDOM 获取光合有效辐射能量随深度的变化特征类似于非藻类颗粒物, 但在草型湖区, 其在 500 ~ 600 nm 获取能量的优势不如非藻类颗粒物明显。

关键词: 辐照度; 光合有效辐射; 标准化谱; 太湖

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1329-08

Variation of Spectrum of Photosynthesis Available Radiation Absorbed by Underwater Optical Medium with Depth in Lake Taihu in Summer

ZHAO Qiao-hua¹, QIN Bo-qiang²

(1. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Normalized spectrum of photosynthesis available radiation (PAR), which was absorbed by all kinds of medium per unit volume of water at different depths, was calculated by the data from downward and upward irradiance and absorption coefficients of phytoplankton, non-algae particles and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in 41 locations in Lake Taihu from July 29 to August 1, 2006. The results showed that there were two peaks at about 450 nm and 675 nm in the normalized spectrum of PAR absorbed by phytoplankton per unit volume of water, respectively. With the increasing of the depth, the peak at about 450 nm gradually weakened, and red-shift appeared from 450 nm. The above phenomena were much more obvious in the algae-type zone and the center of Lake Taihu. The PAR absorbed by phytoplankton per unit volume of water was shift to 600-700 nm which mainly originated from 400-500 nm to 600-700 nm. The transitional speed was slower in the grass-type zone but it was faster in Meiliang Bay (algae-type zone) and the center of Lake Taihu. In the above water, the PAR absorbed by non-algae particles per unit volume of water mainly originated from 400-500 nm, but energy source gradually shifted to 500-600 nm with the increasing of depth. The variable characteristics of normalized spectrum of PAR absorbed by CDOM per unit volume of water were similar to that of non-algae particles. However, the advantage in grass-type zone which CDOM per unit volume of water absorbed PAR between 500 and 600 nm was less significant than that of non-algae particles per unit volume of water.

Key words: irradiance; photosynthesis available radiance (PAR); normalized spectrum; Lake Taihu

近年来, 富营养化水体 (如太湖、巢湖和滇池) 中由蓝藻水华暴发导致水质下降的现象频繁出现, 也引起了广泛的关注, 然而到目前为止蓝藻水华暴发的机制并不十分清楚^[1]. 在影响水生生态系统的诸多环境因子中, 光和营养盐是决定浮游植物种群结构及动力学的 2 个关键性因素^[2]. 浮游植物对营养盐、光场及温度等环境因子的响应主要表现为 2 个方面: ①浮游植物通过种群的演替及改变细胞体内的色素浓度, 影响其对光合有效辐射的获取能力; ②浮游植物通过光量子产率的改变, 影响其将光能转

变为化学能的效率^[3~5]. 可见水下光场及其能谱的时空变化是影响浮游植物生理、生态过程的关键因素之一^[6].

关于浮游植物对光能获取的研究不仅有助于了解藻类初级生产力的动态变化, 而且也是分析蓝藻

收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701168); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2002AA601011)

作者简介: 赵巧华 (1972 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水光学及大气光学, E-mail: zqh3531@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

水华暴发机制,建立水生生态系统模式,模拟水生生态系统演化的关键所在^[7,8],而目前此方面的探索多集中于对水体表层介质吸收系数的监测、反演^[9-11]以及通过介质的吸收系数比例来表征光合有效辐射在 CDOM、非藻类颗粒物和浮游植物之间的分配、流动状况^[12].其实,蓝藻水华的暴发过程并非浮游植物在短时间内爆发性生长所致,而是在暴发之前,种群的演替、生物量的增加存在一个相对缓慢的过程,蓝藻水华的暴发仅仅是浮游植物在合适的气象条件下空间位置的变化,而不是生物量在短时间内的剧增^[13].因而关注光对浮游植物生长影响过程时,不应局限于浅层水体,真光层以上光场分布及光合有效辐射在介质中的流动、分配状况对浮游植物光合作用具有同等重要的地位,然而国内外对此却鲜见报道.

太湖位于长江中下游,面积为2 338.1 km²,平均水深为 1.9 m,最大水深为 2.6 m,是一个典型的大型浅水湖泊^[14].该湖陆源产生的 CDOM 和非藻类颗粒物丰富,并且由于风浪的扰动,造成底泥易再悬浮,使得该水体光学特性尤为复杂,因而研究位于不同深度上各介质获取光合有效辐射能量谱的特征对理解太湖水环境的特征、水生生态系统的结构变化、蓝藻水华的暴发机制以及水生生态的修复就显得尤为重要.

1 材料与方法

1.1 采样站点与时间

2006-07-29~2006-08-01 在太湖测定了水体中的上、下行辐照度,并进行了水样的采集,样点分布见图 1,采样点基本覆盖了太湖不同生态类型的湖区,既有开阔水域——湖心区,又有属于藻型湖区的梅梁湾,还有胥口湾、东太湖等草型湖区,在 2 号线的 17~18 号点、3 号线的 30~33 号点以及 4 号线的 41~50 号点,夏季一般都能发现沉水植物,但只在 1~20、30~50 号点测定了上、下行辐照度,测定的位置相对远离水草,同时也避免水华覆盖.为了便于比较,在采集辐照度的各采样点,测定深度均为 0~70 cm,间隔为 10 cm.采样期间天气晴朗,现场采集的水样经由实验室测定叶绿素、总悬浮颗粒物、有机和无机颗粒物的浓度以及总悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收系数.

1.2 吸收系数的测定及计算

颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术 (quantitative filter technique, QFT) 测定,用直径为 47

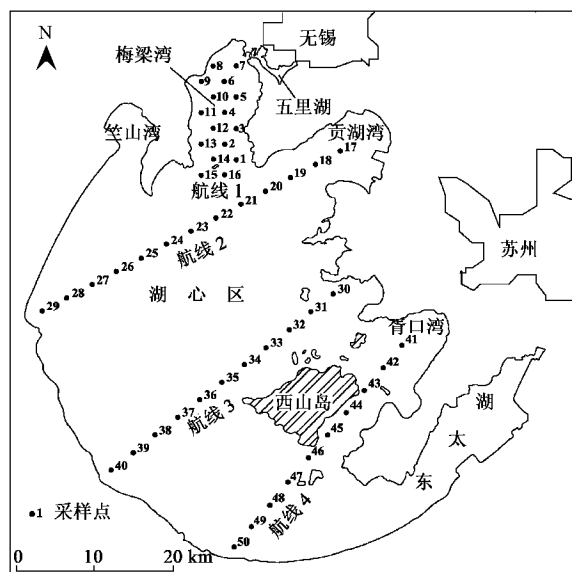


图 1 采样站点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations

mm 的 GF/F 滤膜过滤 50~200 mL 水样,以同样湿润程度的空白滤膜做参比,利用 UV22401PC 型分光光度计,在 350~800 nm 间每隔 1 nm 测定 1 个吸光度,然后将各波段的吸光度减去 750 nm 波长处的吸光度,再采用 Cleveland 等^[11]提出的如下公式进行放大因子校正:

$$D_s = 0.378D_t + 0.523D_t^2, D \leq 0.4 \quad (1)$$

式中, D_s 为校正后滤膜上颗粒物吸光度; D_t 为直接在仪器上测定的滤膜上颗粒物吸光度.滤膜上悬浮颗粒物的光谱吸收系数按式(2)进行计算得到^[11]:

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

式中, V 为被过滤水样的体积, S 为沉积在滤膜上的颗粒物的有效面积.用 NaClO 浸泡滤膜,将滤膜上的色素萃取掉,使得滤膜上只留下不能被 NaClO 漂白的碎屑颗粒物,然后用与总颗粒物吸收系数测定相同的方法得到非藻类颗粒吸收系数 $a_d(\lambda)$.总颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数即得到浮游藻类吸收系数.

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (3)$$

CDOM 的光谱吸收系数测定采用 GF/F 滤膜过滤的水样,再经 Millipore 滤膜过滤,随后利用 UV 2401 分光光度计测定该过滤液的吸光度,再根据式(4)^[15]进行计算得到各波长的吸收系数.

$$a'_g(\lambda) = 2.303 D(\lambda)/r \quad (4)$$

式中, $a'_g(\lambda)$ 为未校正的波长 λ 吸收系数, $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径.由于过滤清液还有可能残留

细小颗粒,会引起散射,为此作如下散射效应订正^[15]:

$$a_g(\lambda) = a'_g(\lambda) - \lambda a'_g(\lambda)/700 \tag{5}$$

式中, $a'_g(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数; $a_g(\lambda)$ 为波长 λ 处的未校正吸收系数.总吸收系数为非藻类颗粒物、浮游植物、CDOM 和纯水 4 项吸收系数的线性和:

$$a(\lambda) = a_d(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_w(\lambda) \tag{6}$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数谱.

1.3 各介质获取光合有效辐射标准化谱的深度廓线

1.3.1 上、下行漫射衰减系数的计算

根据朗伯-比格定律,在光学均匀的水体中,各深度的下行辐照度可表示为:

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0)\exp[-\overline{K_d}(\lambda)z] \tag{7}$$

式中, $\overline{K_d}(\lambda)$ 为整个水柱的平均漫射衰减系数, λ 为波长, z 为水体表面向下的深度. $E_d(\lambda, z)$ 为在深度 z 处波长为 λ 的下行辐照度; $\overline{K_u}(\lambda)$ 用类似的办法求出.通过对 600 nm 各站点实测的上、下行照度,利用指数衰减函数进行拟合,并将拟合所得到的各层上、下行辐照度与实测的各层上、下行辐照度进行线性相关分析,其相关系数见表 1. 其中 $R(\overline{K_d})$ 和 $R(\overline{K_u})$ 分别是关于上、下行辐照度的相关系数,样本数为 8. 风速测定高度位于水表面上方 2.0 m 左右.

由表 1 可以看出,各站点水体中上、下行辐照度与指数衰减拟合的上、下行辐照度间的相关系数均大于 0.92($p < 0.001$),说明水下光场介质的垂直分布可以近似看成均匀的.从风速来看,除了 32 号和 33 号 2 个站点外,其它各站点风速平均值为 3.3 m/s,加上太湖湖面开阔,风的吹程较大,风浪作用明显,也从侧面证明了水体中的光学介质可以看成近似均匀的,而 32 号和 32 号采样点位于水草区,水质较好,风速较小并不会引起光学介质分布的明显不均匀.

1.3.2 单位水体中各层可获得的有效光合辐射能量的计算

根据 Kishino 等^[16]的研究,各层中单位水体可获得的光合有效辐射能谱可以表示为:

$$\begin{aligned} P(\lambda, z) &= \overline{E_o(\lambda, z)}a(\lambda) \\ &= \overline{K_a(\lambda)E_d(\lambda, z)} \times \\ &\quad \left[1 - \overline{R(z, \lambda)} + \frac{1}{\overline{K_d(\lambda)}} \frac{d\overline{R(z, \lambda)}}{dz} \right] \tag{8} \end{aligned}$$

表 1 各站点水下辐照度与指数衰减拟合的辐照度间的线性相关系数

Table 1 Linear relative coefficients between the irradiance measured and the irradiance by exponential decay fitting

站点	$R(\overline{K_d})$	$R(\overline{K_u})$	风速 /m·s ⁻¹
1 号	0.975 8	0.989 3	3.8
2 号	0.986 3	0.962 8	3
3 号	0.902 2	0.977 8	3.6
4 号	0.996 8	0.989 9	4
5 号	0.991 4	0.987 3	3.9
6 号	0.990 1	0.953 7	3.6
7 号	0.990 8	0.988 3	3.2
8 号	0.990 6	0.920 7	3.7
9 号	0.951 4	0.975 6	3.4
10 号	0.928 8	0.987 3	3.0
11 号	0.998 2	0.983 9	3.4
12 号	0.958 9	0.992 2	3.3
13 号	0.986 4	0.999 1	2.4
14 号	0.995 9	0.996 5	2.1
15 号	0.989 8	0.999 7	2.7
16 号	0.996 4	0.991 4	2.4
17 号	0.993 5	0.990 8	4.3
18 号	0.995 3	0.991 7	4.8
19 号	0.980 3	0.993 3	4.3
20 号	0.980 6	0.991 4	4.9
30 号	0.927 5	0.987 8	4.1
31 号	0.987 3	0.973 5	2.7
32 号	0.978 3	0.970 9	0
33 号	0.997 7	0.989 1	0
34 号	0.996 8	0.957 6	2.8
35 号	0.993 9	0.988 5	2.7
36 号	0.997 6	0.998 6	2.6
37 号	0.956 4	0.989 8	3.2
38 号	0.996 2	0.999	2.7
39 号	0.997 8	0.998 6	2.6
40 号	0.997 5	0.995 9	3.7
41 号	0.998 1	0.996 7	2.4
42 号	0.978 7	0.997 6	3.4
43 号	0.993 7	0.989 3	3.6
44 号	0.996 5	0.985 2	2.5
45 号	0.996 0	0.992 5	2.5
46 号	0.981 8	0.973 9	2.9
47 号	0.992 9	0.970 2	3.7
48 号	0.992 2	0.971 4	4.1
49 号	0.985 3	0.975 4	2.7
50 号	0.996 1	0.981 7	4.1

式中, $\overline{R(z, \lambda)}$ 为辐照度反射率 $\left[\overline{R(z, \lambda)} = \frac{\overline{E_d(\lambda, z)}}{\overline{E_u(\lambda, z)}} \right]$, $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 、 $\overline{E_u(\lambda, z)}$ 为拟合所得的上、下行辐照度, $\overline{E_o(\lambda, z)}$ 为平均标量照度, $P(\lambda, z)$ 为每个观测时刻各深度上单位水体获得的光合有效辐射

能谱.由于水体波浪造成的水表起伏会引起水下光场扰动,然而在太湖中这种扰动主要体现在 0~30 cm 之间,在更深层次上,拟合的上、下行辐照度与实测值能较好地吻合^[18],因此拟合的上、下行辐照度 ($\overline{E_d(\lambda, z)}$ 、 $\overline{E_u(\lambda, z)}$)反映的是上、下行辐照度的平均状况,避免了水体表面波对上层水体中光场的扰动而产生的较大误差.

$$\alpha_x(\lambda) = \frac{a_x(\lambda)}{a(\lambda)} \tag{9}$$

式中, $\alpha_x(\lambda)$ 为各介质在总吸收系数的比例谱, a_x 为对应各介质的吸收系数 (x 表示非藻类颗粒物、CDOM、浮游植物或纯水).通过计算可分别得出各层的单位水体中非藻类、CDOM 和浮游植物获得的光合有效辐射能量谱 $P_{ad}(\lambda, z)$ 、 $P_g(\lambda, z)$ 和 $P_{ph}(\lambda, z)$.

1.3.3 单位水体中介质获取光合有效辐射能量的标准化谱

单位水体中介质获取光合有效辐射能量谱表现出 2 个基本特征:振幅的变化和谱形的变化.由于光能随深度呈 e 的负指数衰减,造成同一介质在各深度获取的光合有效辐射谱存在量级上的差别,因而难以体现其深度廓线的变化特征.为此引入标准化谱的概念.

$$\overline{P_x(z)} = \frac{\int_{400}^{700} P_x(\lambda, z) d\lambda}{700 - 400} \tag{10}$$

式中, $\overline{P_x(z)}$ 为单位水体中介质 x (x 可分别指非藻类颗粒物、CDOM 或浮游植物)在深度 z 处的平均吸收系数; $P_x(\lambda, z)$ 为单位水体中介质 x 在深度为 z 处获取的波长为 λ 的光合有效辐射.

$$P_x^n(\lambda, z) = \frac{P(\lambda, z)}{\overline{P_x(z)}} \tag{11}$$

式(11)表示单位水体中介质 x 在深度 z 处获得的光合有效辐射能量的标准化谱,该谱去除了 $P_x(\lambda, z)$ 的振幅变化,仅体现了 $P_x(\lambda, z)$ 谱形的变化,反映的是在同一深度、各波长上介质获得光合有效辐射的相对大小,这有助于进一步研究单位水体中介质在不同深度获得不同波长辐射的能力及特征.然后通过某个区域各点的 $P_x^n(\lambda, z)$ 求取区域平均的单位水体中各介质获取光合有效辐射标准化谱 $\overline{P_x^n}(\lambda, z)$.

2 结果与分析

根据采样点覆盖太湖不同生态类型湖区特点,

将采样点划分为 4 类:①梅梁湾系典型藻型湖区(涵盖采样点 1~16);②贡湖湾系草、藻型过渡湖区(涵盖采样点 17~20);③湖心区系开阔水域(涵盖采样点 34~40);④草型湖区(涵盖采样点 30~33 和 41~50).然后针对这 4 类不同的湖区,给出单位水体中浮游植物、非藻类颗粒物和 CDOM 获取光合有效辐射标准化谱的平均值,以探讨不同湖区在相同深度上单位水体中各介质所获取光合有效辐射的谱变化.

2.1 单位水体中藻类获取光合有效辐射标准化谱随深度的变化

在 4 个不同生态系统的湖区中(图 2),单位水体中浮游植物获取光合有效辐射标准化谱呈现出 2 个共同点:①在表层水体(0~10 cm,下同)中,标准化谱存在 2 个主峰区,峰区对应的波长分别为 450 nm 左右和 675 nm 左右.随着深度增加,前者逐步变弱,而且该峰所对应的波长也逐渐向长波方向迁移.②单位水体中表层浮游植物获取的 400~500 nm 的能量相对比 600~700 nm 大,但随深度的增加,该优势逐渐丧失,而获取 600~700 nm 的比例逐步增大.不同湖区中的标准化谱也有着显著的差异:就水体表层标准化谱的 450 nm 与 675 nm 峰值比较而言,在草型湖区[图 2(d)],前者优势明显,且随深度衰减缓慢,即使到 70 cm 深度上,在 500 nm 处仍然存在一明显的峰;湖心区[图 2(c)],表层 450 nm 较 675 nm 的优势次之,但随深度的增加,该优势的减弱速度快于草型湖区,到 70 cm 的深度上,450 nm 处的峰基本消失,退化成一拐点;在贡湖湾[图 2(b)],表层 450 nm 较 675 nm 的优势稍弱于湖心区,随深度增加,其衰减的程度强于湖心区,到 70 cm 的深度上,在 500 nm 处演变成一非常弱的凸起;在梅梁湾[图 2(a)],450 nm 处水体表层的标准化谱无明显的峰,与 500 nm 的肩峰基本持平,较 675 nm 而言,峰值弱低于后者,且随深度的增加衰减明显,到 70 cm 仅表现出随波长呈线性增加的趋势.

在不同生态系统湖区,单位水体中浮游植物吸收光合有效辐射标准化谱及其随深度的变化的变化原因如下:①在水体表层,由于光合有效辐射刚进入水体,水体的选择性衰减作用对它的影响较小,因而单位水体中藻类获取光合有效辐射的标准化谱仍能体现出大部分的藻类吸收系数谱形;同时又由于在短波处非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收作用强烈,造成非藻类颗粒物和 CDOM 对短波辐射的获取能力相对较大;对长波辐射能量获取的能力相对较弱,短波

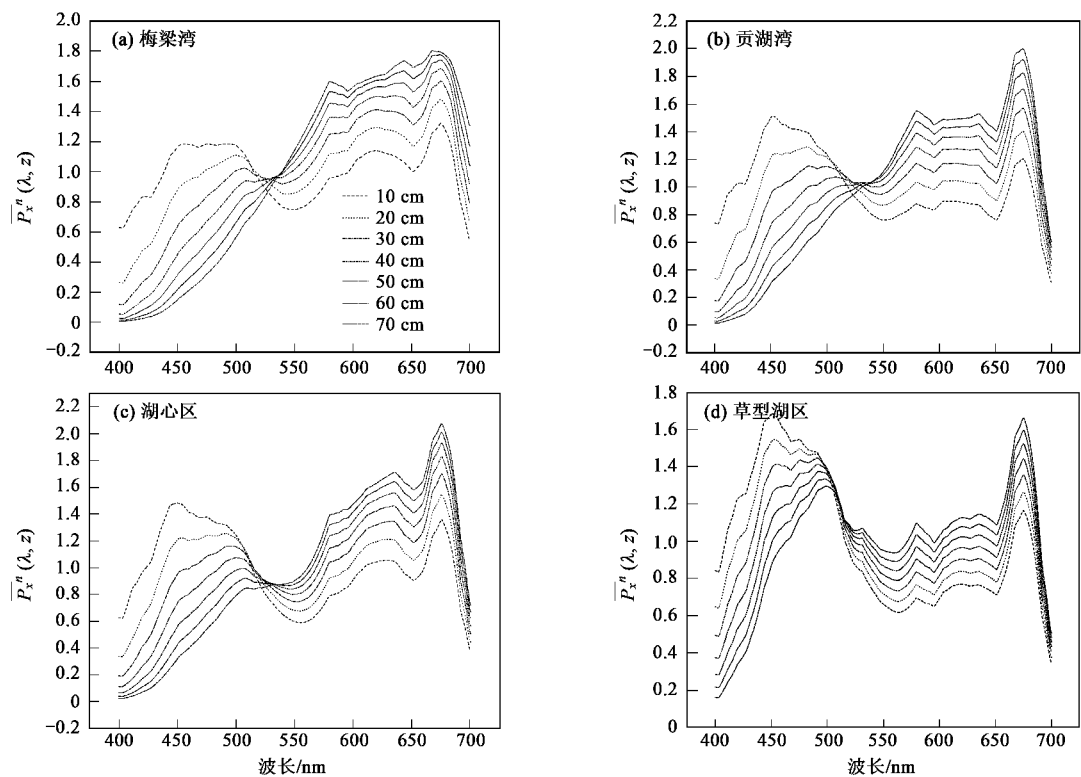


图2 藻类获取光合有效辐射的标准化谱

Fig.2 Normalized spectrum of PAR absorbed by algae

辐射衰减较长波辐射快,所以尽管在表层单位水体浮游植物获取表层光合有效辐射标准化谱仍呈现两峰(450 nm 和 675 nm),但与浮游植物的吸收系数谱形略有不同(叶绿素 a 有 2 个典型的吸收峰,分别为 436 nm 和 675 nm,且前者强于后者^[17]).从二者差别可以看出,即使在水体表层,浮游植物获取 436 nm 的辐射能量也被非藻类和 CDOM 所弱化,使得短波处的峰所对应的波长从 436 nm 迁移到 450 nm 左右,而 675 nm 的峰对应的波长并未发生改变.②随着辐射向下的进一步传输,水体中介质对其光能选择性作用进一步加强,即短波处的能量随深度衰减得相对较快,因此即使在浮游植物的吸收系数不变的情况下,它获取的 400~500 nm 能量随深度衰减得也较快;由于非藻类颗粒物和 CDOM 对长波的吸收作用较短波弱,它获取的 600~700 nm 的能量随深度衰减得慢,因而随着深度的增加,浮游植物所获取的短波处光合有效辐射所占的比例越来越小,而长波(600~700 nm)的能量所占比重越来越大,即出现标准化谱在短波处的峰值减弱且逐渐向长波方向迁移.

同时,由于草型湖区的非藻类颗粒物及 CDOM 含量较低,吸收作用较其他湖区弱(见表 2),因而单

位水体中藻类获取的短波处光合有效辐射随深度衰减得慢,而在典型的藻型湖区——梅梁湾,衰减得快,所以呈现出藻类获取短波能量随深度变得越来越小,而长波的能量所占的比重也就越来越大.

2.2 非藻类颗粒物获取光合有效辐射标准化谱随深度的变化

在水体表层,单位水体中非藻类颗粒物获取光合有效辐射的标准化谱随波长基本呈 e 的负指数衰减,类似于非藻类颗粒物的吸收系数谱.但随深度的增加,在短波处(主要是在 400~500 nm),该谱急剧下降,而 500~600 nm 波段,该谱上升形成明显的峰,且该峰对应的波长也有红移现象(见图 2),说明在表层单位水体中非藻类颗粒物所吸收的光合有效辐射主要是 400~500 nm 占优势,随着深度的增加,水体中短波辐射衰减得很快,因而它所获取到的该波段能量也就随之减少.尽管长波(600~700 nm)在水体中衰减相对较慢,然而由于非藻类颗粒物对该波段辐射的吸收系数较小,所以所吸收该波段的能量相对也较小.而在 500~600 nm,非藻类颗粒物的吸收系数和能量的衰减特点正好使得其随深度的增加,该波段的能量在各深度上的优势逐渐得以体现.

不同的生态类型湖区,单位水体中非藻类获取

的光合有效辐射标准化谱之间也存在不同的特征：藻型湖区在 500 ~ 600 nm 的优势最明显，但其半波宽相对也最窄[图 3(a)]，湖心区次之，随后是贡湖湾，但后两湖区的特征差异不是特别明显[图 3(b)、3(c)]，而在草型湖区，500 ~ 600 nm 呈现的是平台状，半波宽也最宽，且该介质获取 400 ~ 450 nm 的能量随深度衰减得也最慢，说明在该湖区的深层次上，单位水体中非藻类颗粒物获取该波段的能量相对其他波段存在优势，但不如其他湖区明显，主要是由于别的介质对该波段光合有效辐射获取较其它湖区少

造成的。

2.3 CDOM 获取光合有效辐射标准化谱随深度的变化

单位水体中 CDOM 获取的光合有效辐射标准化谱随深度的变化等特点类同于非藻类颗粒物(见 2.2)，此处不再赘述。但在贡湖湾[图 4(b)]和草型湖区[图 4(d)]，CDOM 获取 500 ~ 600 nm 的能量与短波相比优势并不明显，且二者的标准化谱在短波处随深度减小衰减的程度也较弱，在草型湖区显得尤为突出。

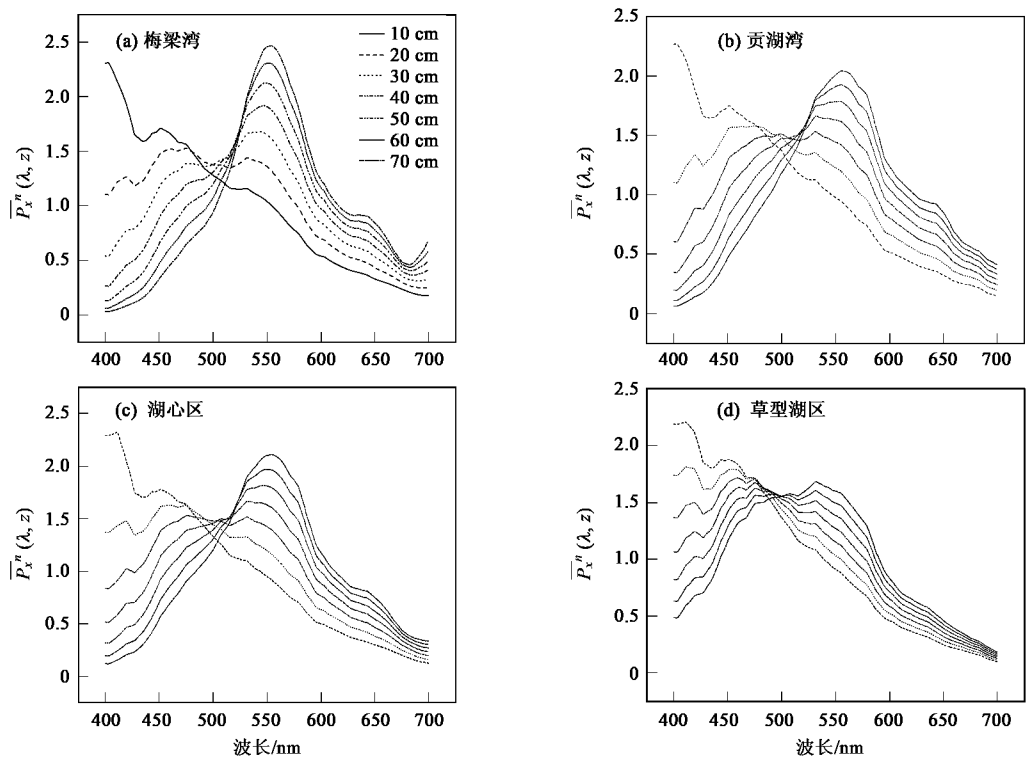


图 3 非藻类获取光合有效辐射的标准化谱

Fig.3 Normalized spectrum of PAR absorbed by non-algae particles

3 讨论

水生生态系统中，主要初级生产者必须通过光合作用才能维持其生存、生长。尽管营养盐、温度等环境因子均对浮游植物的光合作用和蓝藻水华暴发产生重要影响，但均需通过影响浮游植物对光合有效辐射的获取和将获取的光能转化为化学能的效率表现出来，且蓝藻水华的形成只是水体中浮游植物在适宜的条件下空间位置的改变。因而整个水柱中光合有效辐射在水体介质中的分配和流动是影响水生生态系统结构和功能的关键。

各介质获取的能量大小取决于 2 个因素：①水

柱中光合有效辐射谱随深度的分布；②某介质的吸收系数占总介质吸收系数的比例。辐射在水体中的传输过程体现的是与介质的相互作用过程，其中散射仅是改变辐射的传输方向，并不改变光能的大小，所以体现水体中辐射能量大小的物理量是标量照度[$E_o(\lambda, z)$]^[19]，而不是下行辐照度。然而，水体中各介质的吸收具有明显的选择性，因此，随着深度增加，光合有效辐射受到介质的选择性作用也就越明显。

非藻类颗粒物及 CDOM 的吸收系数谱随波长均呈 e 的负指数衰减，浮游植物在 436 nm 和 490 nm 左右各存在一个明显的吸收峰和肩峰，可见水体中 3 种介质对水体中的短波段均有强烈的吸收能力，也

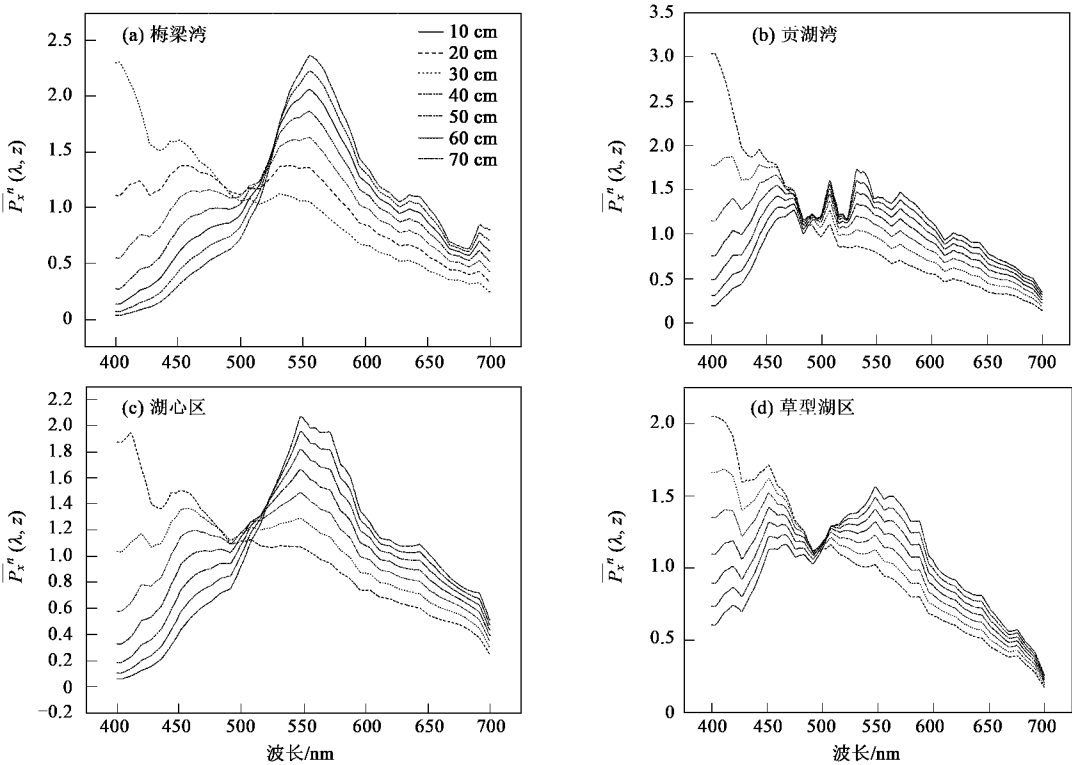


图 4 CDOM 获取光合有效辐射的标准化谱

Fig.4 Normalized spectrum of PAR absorbed by CDOM

就是说,短波(400~500 nm)的光能在水体中衰减得最快.这从图 2~4 中可以看出,随着深度增加,单位水体中各介质获取的光能中,短波光能的比重逐渐减少,各层标准化谱中,位于短波处的峰均出现红移现象,但在 500~700 nm,标准化谱出现了分化:①在单位水体中 CDOM 和非藻类颗粒物获取光合有效辐射的标准化谱中,在 550 nm 左右出现了 1 个峰,且随深度的增加,该峰越来越明显,说明在深层次,500~600 nm 的光合有效辐射是其获取光能的主要来源.原因是由于非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收能力随波长增加而减弱;浮游植物在 675 nm 左右仍有明显的吸收峰;纯水的吸收在短波处非常小,但 550

nm 以后,其吸收能力得到明显的增强,这造成 CDOM 和非藻类颗粒物在深层次上获取到 400~500 nm 和 600~700 nm 的能量相对较少,即使得 CDOM 和非藻类颗粒物获取的能量主要来源于 500~600 nm.②随着深度的增加,单位水体中的浮游植物用以进行光合作用的主要能量来源逐渐由 400~500 nm、600~700 nm 过渡到 600~700 nm,原因是由于其他介质对光能的竞争,水体中蓝光波段光能的减少迅速造成的.对于草型湖区,由于非藻类颗粒物的浓度较低,CDOM 的吸收系数较小(见表 2),水体中 400~500 nm 的光能衰减相对较慢,随深度的增加,该波段的光能仍为藻类进行光合作用的主要来源.

表 2 各湖区水色组分及其他参数的平均值

Table 2 Mean value of water color parameters and other index in different zones of Lake Taihu					
采样点	Chl-a / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TSS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	无机物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	有机物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$a_g(400\text{ nm})$ / m^{-1}
1~16	101.67	67.24	42.70	24.54	5.83
17~20	18.06	53.78	42.43	11.35	3.247 5
34~40	27.92	36.28	26.98	9.4	3.575 7
30~33; 41~50	11.73	22.16	16.18	6.01	1.997 9

从表 2 来看,草型湖区这几种光学参数的值均低于其他湖区,即各介质对光的竞争不如其他湖区激烈,光合有效辐射(尤其是 400~500 nm)在这类水体中衰减得较慢.在太湖三大浮游植物种群中,绿藻

在 490 ~ 500 nm 的吸收肩峰有利于其生长,因而尽管蓝藻在 620 nm 左右存在吸收优势,但在该区域也难以成为优势种;在梅梁湾(藻型湖区)和湖心区(尤其是梅梁湾), 400 ~ 500 nm 的辐射衰减很快,绿藻对光的获取优势丧失殆尽,反而是蓝藻在 620 nm 吸收的优势得以体现,从而形成了蓝藻生长有利的条件,有利于蓝藻成为优势种^[20];而对硅藻而言,由于夏季的水温并不适合其生长,因而也难以成为优势种.这与陈宇炜等^[21]报道夏季不同藻群体的空间分布是一致的.可见水体中光合有效辐射谱分布随深度的变化也是影响水生生态的关键因素.

4 结论

(1)单位水体中藻类获取光合有效辐射能量的标准化谱在表层有 2 个主峰,分别位于 450 nm 左右和 675 nm.位于 450 nm 左右的峰随深度增加逐渐减弱,并且在藻型湖区和湖心区,衰减尤为突出,而该峰对应的波长随深度增加出现红移现象.

(2)浮游植物获取的主要光能来源随深度增加逐渐由 400 ~ 500 nm 向 600 ~ 700 nm 过渡,在草型湖区过渡的速度相对缓慢,而在梅梁湾——藻型湖区和湖心区则很快.

(3)非藻类颗粒物在表层获取的能量主要来自短波(400 ~ 500 nm),但随深度增加,其获取的能量主要来自 500 ~ 600 nm.CDOM 获取光合有效辐射能量的特征随深度的变化类同于非藻类颗粒物,但在草型湖区,其在 500 ~ 600 nm 获取能量的优势不如非藻类颗粒物明显.

致谢:野外采样及实验室测定得到张运林博士、王鑫硕士的帮助,谨表谢意.

参考文献:

- [1] Quiblier C, Leboulanger C, Sané S, *et al.* Phytoplankton growth control and risk of cyanobacterial blooms in the lower Senegal river delta region [J]. *Water Research*, 2008, **42**: 1023-1034.
- [2] Huisman J, Weissing F J. Competition for nutrients and light among phytoplankton species in a mixed water column: theoretical studies [J]. *Water Science Research*, 1995, **32**(4): 143-147.
- [3] Mur L R, Schreurs H. Light as selective factor in the distribution of phytoplankton species [J]. *Water Science Technology*, 1995, **32**(4): 25-34.
- [4] Stoń J, Kosalowska A, Lotocka M. Pigment composition in relation to

- phytoplankton community structure and nutrient content in the Belatic Sea[J]. *Oceanologia*, 2002, **44**(4): 419-437.
- [5] Stramski D, Sciandra A, Claustre H. Effects of temperature, nitrogen and light limitation on the optical properties of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* [J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, **47**(2): 392-403.
- [6] Bagni M, D'alcala M R. Light as an information carrier underwater [J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**(4): 433-443.
- [7] Morel A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implication[J]. *Prog Oceanogr*, 1991, **26**: 263-306.
- [8] Los F J, Villars M T, Van der Tol M W M. A 3-dimensional primary production model(Bloom/Gem) and its application to the (southern) North Sea(Coupled physical-chemical-ecological model[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, **74**(1-2): 259-294.
- [9] 曹文熙,杨耀忠,许晓强,等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. *科学通报*, 2003, **48**(17): 1876-1882.
- [10] 张运林,秦伯强,杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒和 CDOM 的吸收特性[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [11] Cleveland J S, Weidemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: a multiple scattering correction for glass-fiber filter[J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, **38**: 1324-1327.
- [12] Vahatalo A V, Wetzel R G, Paerl H W. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the drainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina(U.S.A.)[J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**: 477-493.
- [13] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [14] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京:科学出版社, 2004. 1-7.
- [15] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain [J]. *Limnol Oceanogr*, 1981, **26**: 43-53.
- [16] Kishino M, Booth C R, Okami N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter and pure water[J]. *Limnol Oceanogr*, 1984, **29**(2): 340-349.
- [17] Woźniak B, Dera J, Majchrowski R, *et al.* Modelling light and photosynthesis in the marine environment[J]. *Oceanologia*, 2003, **45**(1): 171-245.
- [18] 赵巧华,秦伯强,张运林. 太湖梅梁湾水下光场扰动的特征分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 760-765.
- [19] Bannister T T. Model of the mean cosine of underwater radiance and estimation of underwater scalar irradiance[J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **37**(4): 773-780.
- [20] 赵巧华,秦伯强. 藻类的光谱吸收特征及其混合藻吸收系数的分离[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 313-318.
- [21] 陈宇炜,高锡云. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究[J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(4): 35-40.