

太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性

张运林^{1,2}, 秦伯强^{1*}, 陈伟民¹, 陈宇炜¹, 吴生才^{1,2}

(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: 基于 1998~1999 年周年 4 季原位水下光场观测资料及中国科学院太湖湖泊生态系统研究站 1992~2001 年悬浮物、叶绿素 *a*、透明度长期历史观测资料分析了太湖梅梁湾沿岸带第 2 号站点水体的生物学与光学特性, 探讨了水下光合有效辐射 (*PAR*) 总量的日变化、垂直分布; 光衰减系数的季节变化及光谱分布; 影响光衰减系数的主要水色因子。结果表明, 无论是 *PAR* 还是光谱衰减系数其值都很高, 其中 *PAR* 衰减系数在 1.40~5.30 /m 间变化, 均值为 2.43 ± 0.55 /m, 秋季最大、夏季最小, 真光层深度在 0.87~3.29 m 间变化, 均值为 1.98 ± 0.41 m; 水下光谱在蓝光波段衰减最强烈, 其次是红光、绿光, 随着深度增加光谱成分出现绿移和红移现象, 绿红光占得比例越来越大; 光谱衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋势, 但在 670 nm 附近有个峰值; 基于线性相关分析发现在混浊的沿岸带水体中影响光衰减主要因子为水体中的悬浮物 and 有色可溶性有机物, 叶绿素 *a* 对 *PAR* 衰减系数的贡献率只占到 1.59%~14.21%。

关键词: 梅梁湾; 光学特性; 衰减系数; 悬浮物; 叶绿素 *a*

Biological and optical properties of Meiliang Bay in Lake Taihu

ZHANG Yun-Lin^{1,2}, QIN Bo-Qiang¹, CHEN Wei-Min¹, CHEN Yu-Wei¹, WU Sheng-Cai^{1,2} (1. *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 454~460.

Abstract: The underwater light field, both light intensity and quality, has a significant influence on phytoplankton abundance and photosynthetic activity in shallow lakes. Light conditions in the lake depended on the inherent optical properties of the water and the incident irradiance. In this study, underwater light climate, biological and optical properties in the highly turbid and eutrophic littoral region of Meiliang Bay in Lake Taihu were studied by applying *in situ* measurement data from 1998 to 1999 and total suspended solid, chlorophyll *a* and Secchi disc transparency of No. 2 sampling station from 1992 to 2001. The seasonal dynamics and vertical profile of light attenuation, the spectral attenuation coefficients, and the relative roles of total suspended solid, chlorophyll *a* as light attenuators were assessed for the period 1998 to 1999.

Incident photosynthetically available irradiance (*PAR*, 400~700 nm) at the water surface and at different depths was measured using a 192SA light sensor. Underwater spectral irradiance was measured with a high-resolution spectroradiometer (SR-9910; Macam Photometrics, Livingston, Scotland) equipped via a 4 m light guide with a spherical light collector of 0.7 cm diameter. Phytoplankton chlorophyll *a* concentration was calculated according to Lorenzen from spectrophotometric measurements after extraction in 90% hot ethanol. Other parameters including Secchi disc transparency, suspended solid (SS), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), dissolved oxygen (DO), total phosphorus (TP), total dissolved phosphorus (TDP), total nitrogen (TN) and total dissolved nitrogen (TDN) were measured according to the Chinese CERN standard methods of "Observation and analysis of lake ecological survey". SPSS 11.0 software was applied to all data analysis.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-12); 国家 863 资助项目(2002AA0601011)

收稿日期: 2004-01-16; **修订日期:** 2004-07-25

作者简介: 张运林 (1976~), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事湖泊光学和湖泊生态学研究。E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

致谢: 感谢中国科学院太湖湖泊生态系统研究站提供 1992~2001 年悬浮物、叶绿素 *a* 及透明度资料

Foundation item: The Key Knowledge-Initiated Project from Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-12) and National 863 Project (No. 2002AA0601011)

Received date: 2004-01-16; **Accepted date:** 2004-07-25

Biography: ZHANG Yun-Lin, Ph. D. candidate, mainly engaged in lake optics and lake ecology. E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

The attenuation of light in the waters of Meiliang Bay was rather high, with a downward attenuation coefficient of photosynthetically available radiation (*PAR*) ranging fro 1.40 to 5.30 /m (mean value being 2.43 ± 0.55 /m). The corresponding euphotic depths were 0.87~3.29 m with a mean value of 1.98 ± 0.41 m, which indicated that phytoplankton and hydrophyte basically could not acquire enough solar radiation for photosynthesis below 2 m depth especially during winter. From the subsurface irradiance, on average only a mean of 3.00% reached a depth of 1.5 m. The highest attenuation coefficient and the lowest euphotic depth of *PAR* were found in autumn during the period of 1998~1999. The blue waveband was the most strongly attenuated because of the higher levels of colored dissolved organic matter. Red light basically penetrated as deep as green although green was the most penetrating waveband. An obvious absorption peak near 670 nm was recorded in spring due to high chlorophyll a concentration. The contribution of chlorophyll a to *PAR* attenuation coefficient was 1.59%~14.21% from 1998 to 1999 at No. 2 sampling station using the value of 0.016 m²/mgChla as average specific attenuation coefficient of chlorophyll a. The higher correlation coefficient was obtained between attenuation coefficient and total suspended solid than chlorophyll a based on linear regressions between attenuation coefficient and total suspended solid, chlorophyll a concentration. The main light attenuators were total suspended solid and colored dissolved organic matter in the littoral region of Meiliang Bay in Lake Taihu.

Key words:Meiliang Bay;optical properties;attenuation coefficient;total suspended solid;Chlorophyll a

文章编号:1000-0933(2005)03-0454-07 中图分类号:P343.3 文献标识码:A

太湖是我国五大淡水湖之一,水域面积为 2338 km²,平均水深 1.9 m,最大水深不超过 3 m,是一个典型的大型浅水湖泊^[1]。太湖面积很大,大范围高频度的水质监测有一定困难和误差,利用遥感手段来监测湖泊富营养化、蓝藻水华暴发、湖泊初级生产力是一个比较可行的办法。然后要进行精确的水色遥感研究必须要知道各水色因子(悬浮物、叶绿素 a 和有色可溶性有机物等)的浓度、生物光学特性以及主导光衰减因子。关于浅水湖泊等内陆水体光学特性国内外学者均进行了大量研究^[2~5],还提出了许多理论、半理论-半经验、经验的内陆水体水质遥感反演模型^[2, 6~9]。

本文主要探讨了太湖梅梁湾沿岸带水体水下光合有效辐射(*PAR*)的日变化,*PAR* 的垂直分布、衰减系数的季节变化、光谱分布以及 *PAR* 衰减系数与悬浮物、叶绿素 a 浓度的关系,寻找沿岸带水体的主要光衰减因子,并与世界上类似的湖泊进行比较,为太湖大范围水色遥感提供基础资料和信息。

1 材料与方法

1.1 采样时间与站位

1998 年 5 月 17~20 日、10 月 23~26 日、12 月 10~13 日以及 1999 年 8 月 4~7 日在太湖梅梁湾沿岸带第 2 号站点(31°25.42',120°12.57')(图 1)分别进行了春、秋、冬、夏 4 季每季连续 4d 水下辐照度及其他相关因子的测定。

1.2 采样与测量方法

PAR 的测定选用国际上通用的美国 LI-COR 公司生产的水下光量子仪(Li-cor 192SA),每小时观测 1 次,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^[10, 11],测量主要集中在 9:00~15:00,每小时测量 1 次。四季观测均选择在晴朗无云的天气进行。叶绿素 a 的测定采用分光光度法测量,选用的仪器为 7230 分光光度计。其他营养盐指标(SS、COD_{Mn}、DO、TP、TDP、TN、TDN)的测定参见“湖泊生态调查观测与分析”^[12]。

1.3 衰减系数及真光层深度的计算

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^[13]:

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

(1)

式中, K_d 为光衰减系数(m⁻¹), z 为从湖面到测量处的深度(m), $E(z)$ 为深度处的辐照度(W/m²), $E(0)$ 为水表面下(0⁻)辐照度(W/m²)。 K_d 值通过对不同深度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,否则视为无用值^[14]。

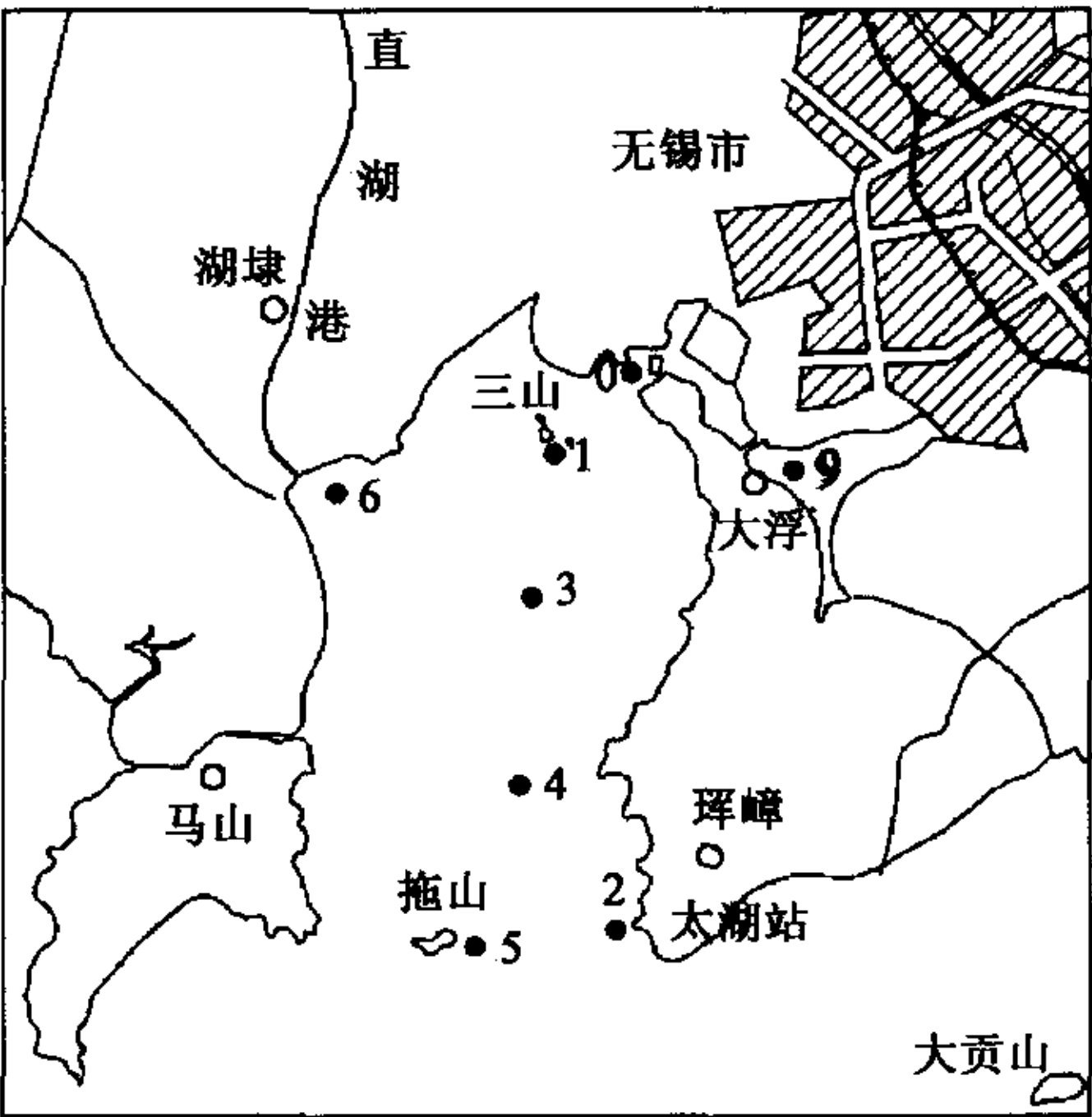


图 1 站点位置图

Fig. 1 Location of No. 2 sampling station

真光层深度是指水柱净初级生产力刚好为零的深度,代表浮游植物光合层的厚度,在生物学上有时也作为光补偿深度,一般将水体表面辐照度 1% 处的深度视为真光层深度,其与光衰减系数存在如下定量关系:

$$D_{eu} = 4.605/K_d$$

(2)

式中, D_{eu} 为真光层深度(m), K_d 为光衰减系数(m^{-1})。
各参数的均值、标准差以及线性、指数回归统计均采用 Spss11.0 软件。

2 结果与分析

2.1 主要环境参数

从表 1 可知,观测点属于典型的富营养化区,氮、磷营养盐浓度很高,适合藻类的大量繁殖,从叶绿素 a 浓度来看,春季最高、冬季最低,这是由于近年来梅梁湾蓝藻水华经常在春季暴发。对各营养盐指标与叶绿素 a 浓度进行线性相关分析发现只有 COD_{Mn} 、TDN 与叶绿素 a 浓度分别存在如下显著性正相关:

$$Chla = 9.036COD_{Mn} - 28.276 \quad (R^2 = 0.56, N = 12, p \leq 0.005)$$

(3)

$$Chla = 4.977TDN + 1.122 \quad (R^2 = 0.54, N = 16, p \leq 0.001)$$

(4)

式中, $Chla$ 为叶绿素 a 浓度($\mu g/L$), COD_{Mn} 为高锰酸盐指数(mg/L),TDN 为总溶解氮(mg/L)。

表 1 1998~1999 年春、夏、秋、冬 4 季第 2 号站点主要理化参数(mg/L)
Table 1 Main environmental parameters of No. 2 sampling station from 1998 to 1999

季节 Season	日期 Date	COD_{Mn}	DO	TP	TDP	TN	TDN	$Chla(\mu g/L)$
春 Spring	5.17	4.46 ± 0.39	9.58 ± 0.55	0.067	0.026 ± 0.010		2.969 ± 0.288	11.86 ± 4.55
	5.18	4.21 ± 0.17	9.41 ± 0.47	0.059	0.028 ± 0.006		2.567 ± 0.145	13.00 ± 1.70
	5.19	4.73 ± 0.22	9.75 ± 1.06	0.040	0.027 ± 0.008		2.601 ± 0.131	21.94 ± 1.78
	5.20	4.54 ± 0.41	9.07 ± 0.74	0.032	0.029 ± 0.033		2.800 ± 0.304	16.96 ± 2.73
夏 Summer	8.4		7.79 ± 0.21	0.045	0.008 ± 0.005	1.600	1.380 ± 0.079	6.98 ± 1.44
	8.5		7.92 ± 0.14	0.049	0.009 ± 0.003	1.648	1.487 ± 0.106	7.48 ± 0.99
	8.6		8.10 ± 0.15	0.039	0.013 ± 0.006	1.643	1.321 ± 0.056	11.19 ± 0.82
	8.7		7.58 ± 0.09	0.038	0.009 ± 0.003	0.682	0.619 ± 0.013	6.22 ± 1.06
秋 Autumn	10.23	4.82 ± 0.52	8.76 ± 0.32	0.069	0.006 ± 0.005	1.180	0.771 ± 0.050	7.96 ± 1.33
	10.24	4.05 ± 0.25	8.48 ± 0.36	0.080	0.007 ± 0.007	1.206	0.796 ± 0.108	7.81 ± 1.10
	10.25	4.01 ± 0.12	8.47 ± 0.21	0.058	0.028 ± 0.010	0.978	0.854 ± 0.216	6.67 ± 0.54
	10.26	4.31 ± 0.13	8.69 ± 0.28	0.086	0.027 ± 0.008	1.119	0.759 ± 0.049	6.66 ± 1.24
冬 Winter	12.10	3.76 ± 0.16	11.68 ± 0.08	0.073	0.017 ± 0.004	1.279	0.980 ± 0.124	2.55 ± 1.12
	12.11	3.73 ± 0.35	11.24 ± 0.14	0.080	0.025 ± 0.003	1.816	1.387 ± 0.137	3.90 ± 0.80
	12.12	3.32 ± 0.13	11.53 ± 0.65	0.035	0.016 ± 0.008	1.568	1.345 ± 0.135	3.45 ± 0.98
	12.13	3.22 ± 0.08	11.14 ± 0.10	0.034	0.008 ± 0.007	1.403	1.242 ± 0.066	2.16 ± 1.18

2.2 水下 PAR 的日变化

由图 2 PAR 的日变化过程可以看出水下 PAR 自水面向下表现出很好的规律性和一致性,其变化趋势与大气中太阳辐射日变化一致。早、晚大气中太阳辐射很低,水下辐照度也很低,随着太阳高度角的升高,近地面总辐射增大,水下辐照度亦迅速增大,在中午时刻达最大值。比较不同深度处的 PAR 发现水下 1 m 处的值大约为表层值的 10% 左右。

2.3 水下辐照度垂直分布

从图 3 给出的代表性时段 PAR 的垂直分布来看指数规律能很好地反映水下光强随深度的衰减,这也证实了利用指数回归来求解衰减系数可行性。比较 4 条曲线可以发现,秋季曲线的斜率最大,说明光衰减最迅速,对应的衰减系数也最大。全年平均 PAR 只有表面光强的 29.52%、8.76%、3.00% 能到达 0.5、1、1.5 m 深度。从不同波谱随深度的衰减来看(图 4),蓝光衰减最快,其次是红光、绿光,其中红光和绿光差异不大,此外在红光的 650~700nm 会出现由于色素的吸收峰使其穿透深度下降。Kirk 认为一般的内陆水体绿光的穿透深度最深,但如果在可溶性有机质非常高的内陆水体中红光的穿透力跟绿光差不多甚至更强^[13]。这与海洋和清洁深水湖泊不一样,在海洋和清洁的深水湖泊里,水中组成物质很少,纯水对光的衰减占有很大比重,因而其在红光衰减最快,蓝光衰减最慢,呈现出纯蓝色。

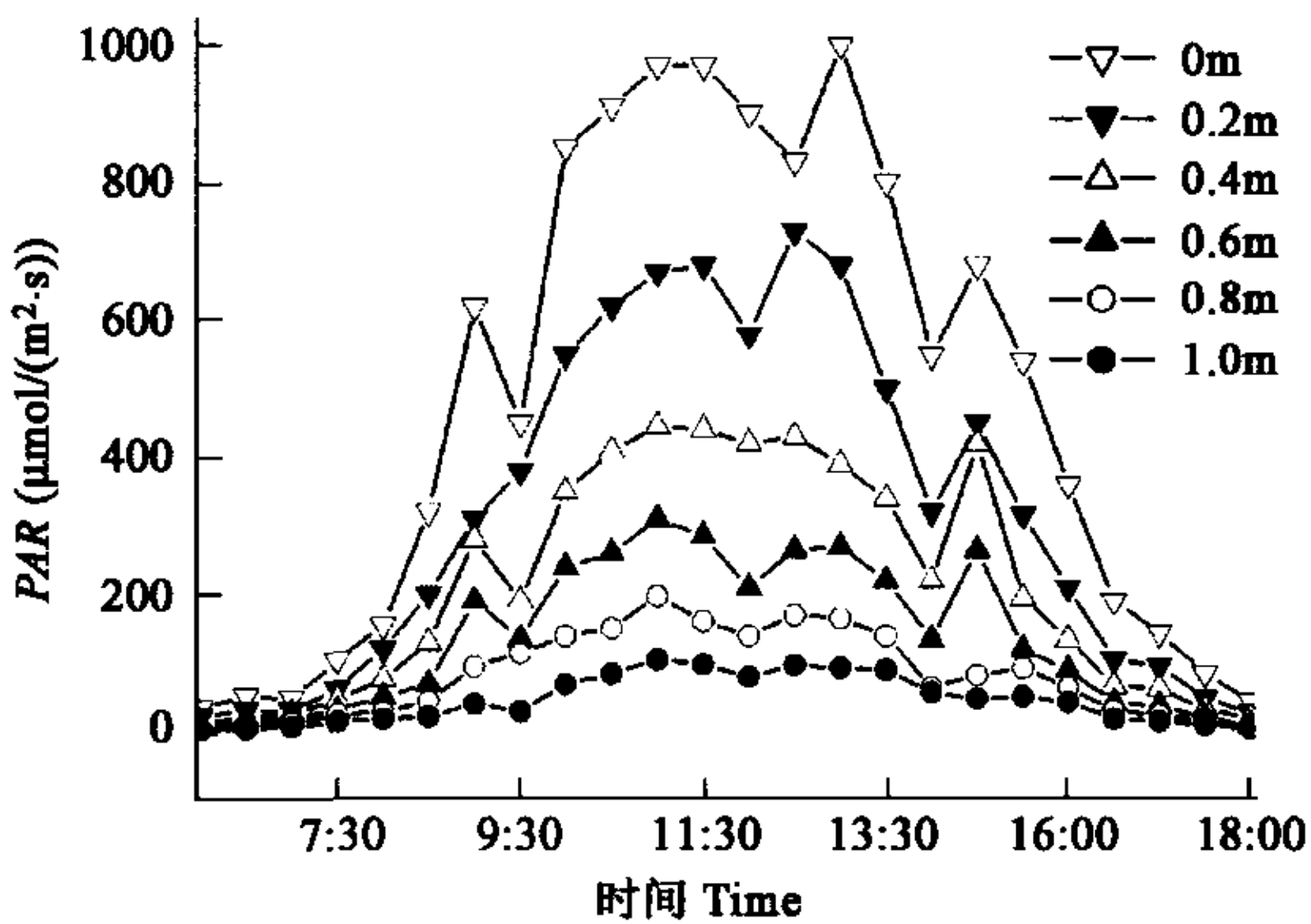


图 2 不同水深处光合有效辐射的日变化
Fig. 2 Daily variation of underwater PAR

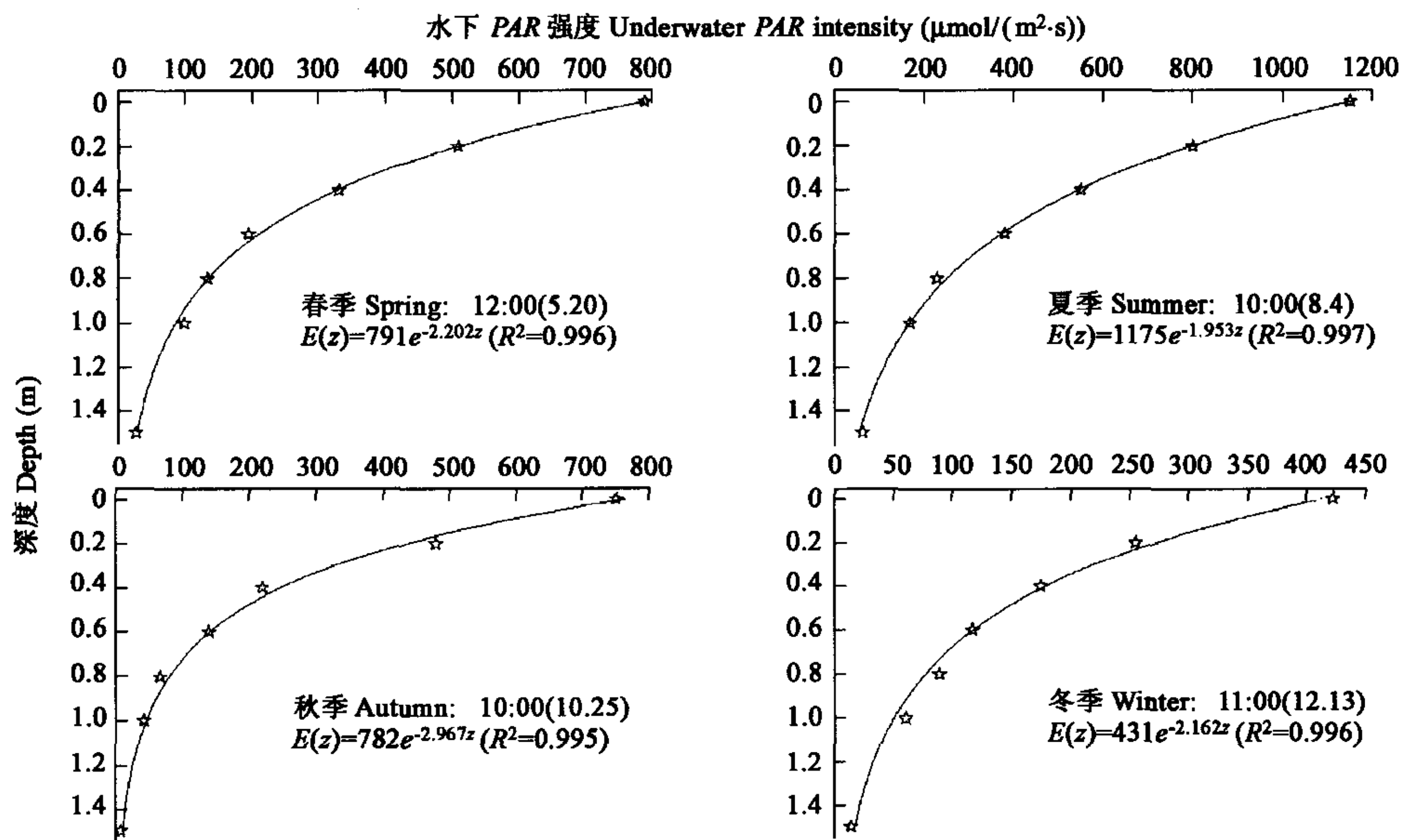


图 3 代表性时段 PAR 的垂直分布

Fig. 3 Vertical profiles of underwater PAR at the representative time

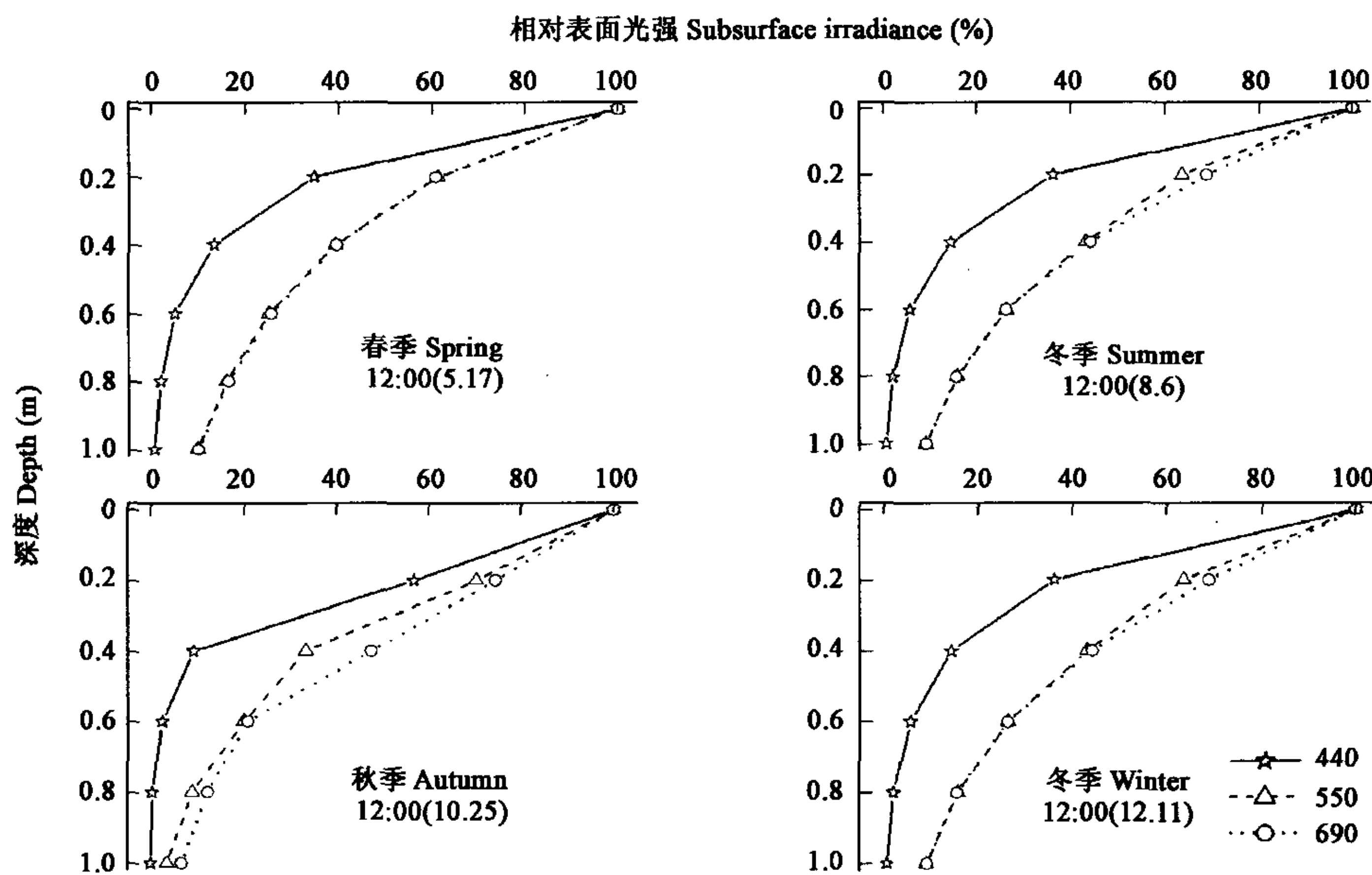


图 4 春、夏、秋、冬 4 季代表性时段蓝光(☆)、绿光(△)、红光(○)随深度的衰减

Fig. 4 Depth profiles of underwater irradiance of blue(☆), green(△) and red light(○)

2.4 衰减系数的季节变化

1998 年 5 月至 1999 年 8 月实验观测期间 PAR 衰减系数均值为 $2.43 \pm 0.55 \text{ m}^{-1}$, 真光层深度均值为 $1.98 \pm 0.41 \text{ m}$ 。由表 2 可知, PAR 衰减系数高值出现在秋季, 平均值为 $3.01 \pm 0.62 \text{ m}^{-1}$, 低值出现在夏季, 平均值为 $1.89 \pm 0.40 \text{ m}^{-1}$, 两季节均值相差 1 m^{-1} 左右, 但从两季观测的叶绿素 a 浓度来看差异不大(表 1), 造成衰减系数的差异可能主要来自于悬浮物及溶解性有机物, 遗憾的是当时未进行悬浮物和溶解性有机物的测定。从叶绿素 a 的数值、光衰减系数、真光层深度、透明度的对应情况来看, 其结果与国外一些研究相似^[11, 15, 16]。

图 5 给出每季各 1d 连续 4~5 次水下光谱观测计算得到的衰减系数均值的光谱分布, 发现从 400 nm 到 580 nm 其呈显著下降趋势, 至 580 nm 绿光波段达最小值后到红光波段又有所增加(图 5), 这与图 4 的结果一致。分析其原因, 太湖沿岸带属于有色可溶性物很高的水域, 太阳辐射在蓝光的强烈衰减主要来自于有色可溶性物在短波部分强烈的吸收所致, 而红光波段衰减系数有所增加则主要是由于纯水的自身吸收以及色素的选择性吸收, 其中纯水对 600 nm 波段后的红光吸收显著增加。随着水深度的增加, 浮游植物生长所需的蓝光在整个光谱中所占的份量越来越小, 而绿光、红光所占的比例则越来越大, 整个波谱成分

出现绿移和红移现象。梅梁湾沿岸带水体衰减系数的光谱分布及数值与国外许多浅水湖泊和浅水海湾、湖湾的研究结果相似^[3, 11, 17, 18],属典型富含悬浮物和可溶性有机质水体的光衰减类型。

表 2 1998~1999 年四季 PAR 衰减系数、真光层深度及透明度
Table 2 Seasonal variations of PAR attenuation coefficient, euphotic depth and Secchi disc transparency

项目 Item	日期 Date	春季 Spring(1998 年 5 月 17 日~20 日 From May. 17 to May. 20 in 1998)				夏季 Summer(1999 年 8 月 4 日~7 日 From Aug. 4 to Aug. 7 in 1999)			
		5.17	5.18	5.19	5.20	8.4	8.5	8.6	8.7
PAR 衰减系数	范围 Range	2.00~2.32	2.00~2.36	2.07~2.97	1.78~2.25	1.95~3.18	1.40~1.70	1.56~2.16	1.55~1.97
PAR attenuation coefficient(m ⁻¹)	均值 Mean	2.21±0.15	2.20±0.11	2.47±0.25	2.11±0.15	2.31±0.48	1.54±0.13	1.80±0.23	1.83±0.18
真光层深度 Euphotic depth(m)	范围 Range	1.98~2.30	1.95~2.30	1.55~2.22	2.04~2.59	1.45~2.36	2.71~3.29	2.13~2.94	2.33~2.97
	均值 Mean	2.09±0.15	2.09±0.11	1.88±0.19	2.19±0.18	2.05±0.36	3.01±0.26	2.58±0.31	2.54±0.27
透明度 Secchi disc transparency (m)		0.60	0.62	0.62	0.60	0.68	1.00	0.90	0.90

项目 Item	日期 Date	秋季 Autumn(1998 年 10 月 23 日~26 日 From Oct. 23 to Oct. 26 in 1998)				冬季 Winter(1999 年 12 月 10 日~13 日 From Dec. 10 to Dec. 13 in 1998)			
		10.23	10.24	10.25	10.26	12.10	12.11	12.12	12.13
PAR 衰减系数	范围 Range	2.21~3.15	2.52~4.84	2.85~3.19	2.38~5.30	2.25~2.82	2.26~2.42	2.08~2.61	2.08~2.34
PAR attenuation coefficient(m ⁻¹)	均值 Mean	2.73±0.30	3.26±0.96	3.04±0.11	3.09±0.85	2.47±0.24	2.34±0.06	2.31±0.20	2.18±0.11
真光层深度 Euphotic depth(m)	范围 Range	1.50~2.08	0.95~1.83	1.44~1.61	0.88~1.93	1.63~2.05	1.90~2.03	1.77~2.21	1.97~2.21
	均值 Mean	1.70±0.20	1.50±0.37	1.52±0.06	1.56±0.29	1.87±0.17	1.97±0.05	2.00±0.17	2.11±0.10
透明度 Secchi disc transparency (m)		0.50	0.45	0.48	0.45	0.55	0.58	0.55	0.60

光谱衰减系数的季节变化跟 PAR 衰减系数的季节变化相似,最高值出现在秋季,最低值出现在夏季,但对比春、夏、秋、冬四季光谱衰减系数曲线可以发现,春季 650~700 nm 波段衰减系数的相对高值要显著得多,这主要是由于 1998 年 5 月正值太湖蓝藻水华暴发期,叶绿素 a 浓度明显要高于其它季节(表 1),而各种色素对 PAR 在蓝光和红光波段会强烈吸收(其吸收峰分别为 430 nm 和 665 nm),其中 430 nm 处吸收峰由于与溶解性有机物质的吸收重叠而无法在曲线中体现出来。

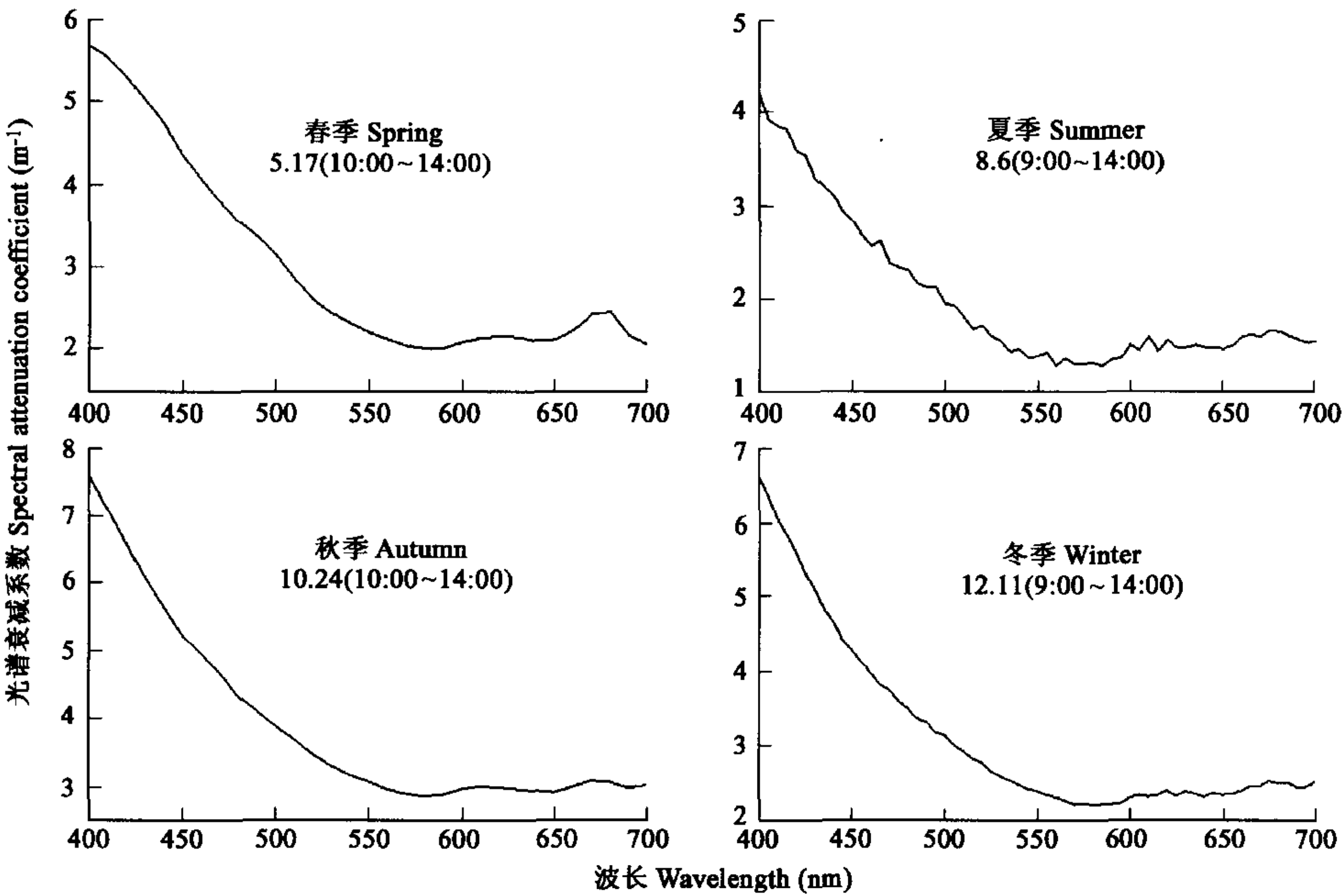


图 5 光谱衰减系数的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of spectral attenuation coefficient

3 讨论
太湖梅梁湾属富营养化湖区,从 1998~1999 年在第 2 号站点的营养盐及生物指标观测结果来看均表现为富到重富营养状态(表 1),相应的光学特性也表现了富营养化特征,既透明度很低,衰减系数很大,真光层深度很小,年均值为 1.98±0.41 m,因而可以认为 2 m 以下深度日净初级生产力基本上为零或负值,在此深度以下的浮游植物、沉水植物因无法获取足够的光能进行光合作用而面临死亡。因此在太湖梅梁湾光衰减系数增加、真光层深度的降低是可能是导致沉水植物的消失、由草型湖泊向藻

型湖泊转化的一个重要原因。

美国佛罗里达州的一个大型浅水湖泊 Okeechobee 湖与太湖的情况比较类似,其 PAR 衰减系数在 $1.5 \sim 7.5 \text{ m}^{-1}$ 之间变化,并且也存在明显的季节差异^[15]。Phiph 等人^[15]的研究还发现在多泥的软底湖区一年四季光衰减系数与悬浮物浓度均存在显著性正相关,而与叶绿素 a 浓度的相关性不显著;在硬底湖区光衰减系数跟悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度的相关性随季节变化而变化,在多风季节光衰减系数与悬浮物浓度存在显著性正相关,相反则与叶绿素 a 存在显著性相关。同样 Blom^[19]对荷兰 20 个浅水湖泊进行研究发现, PAR 衰减系数在 $1 \sim 5 \text{ m}^{-1}$ 之间变化,在开阔的多泥水域悬浮物对光衰减的贡献年均占到 40%,在大的风浪事件中可以高达 80%。此外,Pierson^[20]对瑞典大型浅水湖泊 Mälaren 湖研究发现其总悬浮物浓度大约在 25 mg/L 以下,其中无机颗粒物可以解释真光层深度变化的 60%,即便在高浓度溶解性物质出现的情况下,悬浮物也常常影响 PAR 衰减的长期与短期变化。

而美国佛罗里达州的另一个大型富营养化浅水湖泊 Apopka 湖的情况则有所不同,由于该湖叶绿素 a 浓度非常高(年平均 $89 \mu\text{g/L}$),在 Apopka 湖叶绿素 a 对光衰减的贡献率占到 50% 甚至更多^①。Bachmann 等^[21]基于 1988 到 1999 年在 Apopka 湖每月观测的透明度和叶绿素 a 的对数值进行线性回归,发现两者存在显著的负相关关系,从而得出叶绿素 a 是影响透明度的主要因子,进一步验证了在 Apopka 湖叶绿素 a 对光衰减的主导位置。

通过对 1998~1999 年观测期间透明度、 PAR 衰减系数、真光层深度与叶绿素 a 浓度进行线性相关分析发现它们之间并不存在显著性相关,说明了叶绿素 a 不是沿岸带第 2 号站点的主导光衰减因素。而尽管 1998~1999 年水下光场观测期间缺测悬浮物,但可以借助太湖站的历史资料进行一些分析。1992~2001 年太湖站长期月观测资料显示,其悬浮物浓度多年年平均值为 33.10 mg/L ,属高悬浮物浓度区,这从一个方面验证了悬浮物对光衰减的主导地位。另外如果按叶绿素的平均光衰减比系数 $0.016 \text{ m}^2/\text{mgChla}$ 的值^[22]来估算叶绿素 a 对光衰减的贡献率,1998~1999 年观测期间叶绿素 a 对 PAR 衰减系数的贡献率只占到 1.59%~14.21%,高值出现春季、低值出现冬季。春季太湖光、温、热条件均比较适中,蓝藻大量繁殖暴发,处于活跃生长期,叶绿素 a 浓度明显上升,致使其对光衰减的比例达一年的最高值,到冬季,太湖藻类处于代谢活动低弱时期,无论是藻密度还是活性都是全年最低,其对光的吸收自然就小,在光衰减系数中所占的比例也就低。

透明度为反映湖泊光学特性的重要表观参数,1998~1999 年实验观测期间透明度与 PAR 衰减系数、真光层深度存在如下显著线性相关:

$$SD = -0.305K_d(PAR) + 1.351 \quad (R^2 = 0.77, N = 16, p \leq 0.0001) \quad (5)$$

$$SD = 0.386D_{eu} - 0.158 \quad (R^2 = 0.91, N = 16, p \leq 0.0001) \quad (6)$$

式中, SD 为透明度(m), $K_d(PAR)$ 为 PAR 衰减系数(m^{-1}), D_{eu} 为真光层深度(m)。

另外 Lorenzen 认为透明度深度的光强近似等于水面光强的 20×10^{-2} ,得到透明度与光学衰减系数的理论关系^[23]:

$$SD = \ln(0.2)/K_d \quad (7)$$

式中, SD 为透明度(m), K_d 为光衰减系数(m^{-1})。

如果将太湖站 1992~2001 年第 2 号站点每月常规观测得到的透明度按(7)式计算可以得到光衰减系数值,分别与同期测得的悬浮物、叶绿素 a 浓度进行相关分析,结果如下:

$$K_d = 0.055SS + 1.883 \quad (R^2 = 0.64, N = 114, p \leq 0.0001) \quad (8)$$

$$K_d = 0.023\text{Chla} + 3.263 \quad (R^2 = 0.09, N = 114, p \leq 0.005) \quad (9)$$

式中, K_d 为光衰减系数(m^{-1}), SS 为悬浮物浓度(mg/L), Chla 为叶绿素 a 浓度($\mu\text{g/L}$)。

由(4)式和(5)式可知,光衰减系数与悬浮物浓度的相关性明显要高于与叶绿素 a ,由此可知在梅梁湾沿岸带第 2 号站点光衰减的主导因子为悬浮物而不是浮游植物,尽管溶解性物质对光的衰减也可能占到一定比例,但由于其主要集中在短波的紫外光和蓝光波段,因而对 PAR 衰减起关键作用的还是悬浮物浓度。由于浮游植物在浅水湖泊光衰减中不占主导地位,悬浮物、溶解性物质的干扰给湖泊水色遥感监测大面积的蓝藻水华暴发带来一定难度。

4 结论

(1)在混浊的沿岸带水体中,平均只有表面光强的 29.52%、8.76%、3.00%能到达 0.5、1、1.5 m 深度,平均 PAR 衰减系数在 $1.40 \sim 5.30 \text{ m}^{-1}$ 间变化,均值为 $2.43 \pm 0.55 \text{ m}^{-1}$,光衰减主要归因于水体中的悬浮物 and 有色可溶性有机物,叶绿素 a 对 PAR 衰减系数的贡献率只占到 1.59%~14.21%。

① Schelske C L, Aldridge F J & Carrick H J. Phytoplankton-nutrient interactions in Lake Apopka. St. Johns River Water Manage. District, Spec. Publ. SJ92-SP9. 1992

(2)无论是 PAR 衰减系数还是光谱衰减系数均存在明显的季节变化,最高值出现在夏季、最低值出现在秋季。

(3)水下光谱在蓝光波段衰减最强烈,其次是红光、绿光,由于 400~500 nm、650~700 nm 的选择性吸收,PAR 光谱成分随深度出现绿移和红移现象,1.5 m 以下深度主要以绿红光为主。

(4)真光层深度在 1998~1999 年春、夏、秋、冬 4 季的均值分别为 2.00 ± 0.21 、 2.52 ± 0.45 、 1.58 ± 0.24 、 2.00 ± 0.15 m,意味着 2 m 以下深度浮游植物、沉水植物基本上无法获取足够太阳光能进行光合作用。

References:

- [1] Qin B Q, Hu W P, Chen W M. *Process and mechanism of environment changes of the Lake Taihu*. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Cao W X, Yang Y Z, Xu X Q, et al. Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(21): 2344~2351.
- [3] Frenette J J, Arts M T & Morin J. Spectral gradients of downwelling light in a fluvial lake (Lake Saint-Pierre, St-Lawrence River). *Aquatic Ecology*, 2003, **37**: 77~85.
- [4] D'Sa E J, Miller R L. Bio-optical properties in waters influenced by the Mississippi River during low flow conditions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**: 538~549.
- [5] Van Duin E H S, Blom G, Los F J, et al. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth. *Hydrobiologia*, 2001, **444**: 25~42.
- [6] Darecki M, Weeks A, Sagan S, et al. Optical characteristics of two contrasting case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*, 2003, **23**: 237~250.
- [7] Li G S, Wang F, Liang Q, et al. Estimation of ocean primary productivity by remote sensing and introduction to spatio-temporal variation mechanism. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(4): 483~493.
- [8] Gons H J, Ebert J & Kromkamp J. Optical teledetection of the vertical attenuation coefficient for downward quantum irradiance of photosynthetically available radiation in turbid inland waters. *Aquatic Ecology*, 1998, **31**: 299~311.
- [9] Ren J P, Zhao J P. Progress and prospect of ocean color remote sensing in case 2 waters. *Advance in Earth Sciences*, 2002, **17**(3): 363~371.
- [10] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, et al. Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(4): 447~453.
- [11] Schubert H, Sagert S & Forster R M. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary. *Helgol. Mar. Res.*, 2001, **55**: 12~22.
- [12] Huang X F. *Observation and analysis of lake ecological investigation*. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [13] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994. 47~84, 129~144.
- [14] Huovinen P S, Penttö H & Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 205~214.
- [15] Philips E J, Aldridge F J, Schelske C L, et al. Relationships between light availability, chlorophyll a, and tripton in a large, shallow subtropical lake. *Limnol. & Oceanogr.*, 1995, **40**(2): 416~421.
- [16] Philips E J, Aldridge F J & Hansen P. Patterns of water chemistry, physical and biological parameters in a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, USA). *Arch. Hydrobiol.*, 1995, **128**: 437~458.
- [17] Arst H, Mõekivi S, Kutser T, et al. Optical Investigations of Estonian and Finnish lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1996, **2**: 187~98.
- [18] Reinart A, Arst H, Erm 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**: 75~84.
- [19] Blom G, Vanduin E H S & Lijklema L. Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes. *Water Sci. Technol.*, 1994, **30**: 243~252.
- [20] Pierson D C, Markensten H, Strömbeck N. Long and short term variations in suspended particulate material: the influence on light available to the phytoplankton community. *Hydrobiologia*, 2003, **494**: 299~304.
- [21] Bachmann R W, Hoyer M V & Canfield Jr. D E. Evaluation of recent limnological changes at Lake Apopka. *Hydrobiologia*, 2001, **448**: 19~26.
- [22] Bannister T T. Production equations in terms of chlorophyll concentration quantum yield and upper limit to production. *Limnol. & Oceanogr.*, 1974, **19**(1): 1~12.
- [23] Lorenzen M W. Use of chlorophyll-secchi disc relationship. *Limnol. & Oceanogr.*, 1980, **25**(2): 371~372.

参考文献:

- [1] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民编著. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式. 科学通报, 2004, **48**(17): 1876~1882.
- [7] 李国胜, 王芳, 梁强, 等. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制. 地理学报, 2003, **58**(4): 483~493.
- [9] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景. 地球科学进展, 2002, **17**(3): 363~371.
- [10] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 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): 447~453.
- [12] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999.