维普资讯 http://www.cqvip.com

第4卷第3期
1992年9月

湖 泊 科 学
JOURNAL OF LAKE SCIENCES

Vol. 4, No. 3
Sept., 1992

太湖水面太阳辐射中的光合有效成份①

杨 平 徐勇积 蔡启铭

（中国科学院南京地理与湖泊研究所，南京，210008）

提要 本文利用晴空大气辐射传输分光参数化模式，讨论了到达太湖水面太阳总辐射中光合有效成分所占比例的日变化状况。辐射传输计算所涉及的气象参数采用无锡地区气象站资料；水体反射仅考虑有风浪状况下的水平 Fresnel 反射。两次湖面实测太阳总辐射日变化曲线与计算值对比分析表明，计算结果基本上能反映晴空条件下太湖水面辐射状况。本文结果对利用总辐射值估算水体生态研究中感兴趣的光合有效成份有一定参考价值。

关键词 太阳辐射 光合有效成份 太湖

一、引 言

位于波长间隔 0.4—0.7μm 的太阳辐射是植物光合作用的有效辐射（Photosynthetically Available Radiation，简称 PAR）。对湖泊而言，PAR 是水体初级生产力的主要限制因子，它直接影响到水体生态系统的结构、功能和演变[1]。由于目前许多常规观测中使用的总日射表只给出到达湖面的宽带辐射通量，未能提供辐射分光光谱资料，因此，研究总辐射通量中 PAR 成份，在考虑光对水体生态系统影响时具有一定的理论研究价值和实际应用意义。

本文根据无锡地区长期月平均气象资料②，利用晴空辐射模式分别讨论了对夏季和冬季具有代表意义的太湖水面辐射状况。由于云的辐射效应仍为大气辐射的前沿问题，为简单起见，计算仅限于晴空。晴空状态下的 PAR 值大小将直接影响水体的最大初级生产潜力。

二、模式简介

1. 晴空辐射传输参数化模式

本文考虑的影响大气中辐射传输的因素主要有：①高层大气中的臭氧吸收，②大气分子的 Rayleigh 散射，③大气中的水汽吸收，④气溶胶的散射和吸收，⑤二氧化碳等混合气体的吸收。近年来，不少学者提出了晴空大气辐射参数化方案并不断地完善和发展[2-4]。这些参数化方案结果已能和实测情况以及精确辐射传输模式的结果符合得较好。本文主要采用 Bird 等人的模式[4]，简介如下。

(1)大气层的直射透射率 T_A：

---

① 国家自然科学基金资助项目(4880207)。

② 部分大气参数(如臭氧含量)采用北半球季节平均值。

维普资讯 http://www.cqvip.com

大气层的直射透射率可根据 Lambert-Beer 定律写出，即

$$T_{A\lambda} = T_{r\lambda}T_{o\lambda}T_{w\lambda}T_{p\lambda}T_{pa\lambda}T_{m\lambda} \tag{1}$$

其中下标 λ 表示辐射波长。$T_{r\lambda}$、$T_{o\lambda}$、$T_{w\lambda}$、$T_{p\lambda}$、$T_{pa\lambda}$和 $T_{m\lambda}$分别表示 Rayleigh 散射、臭氧吸收、水汽吸收、气溶胶散射、气溶胶吸收以及混合气体吸收等所形成的透射率。

(2)大气层的漫射透射率 $t_{A\lambda}$

大气的漫射透射率实际上受大气中散射的影响。漫射透射率 $t_{A\lambda}$的参数化结果为：

$$t_{A\lambda} = T_{o\lambda}T_{w\lambda}T_{m\lambda}T_{pa\lambda}[0.5(1 - T_{r\lambda}^{0.95}) + f_\lambda T_{r\lambda}^{1.5}(1 - T_{p\lambda})] \tag{2}$$

其中 f_λ 是气溶胶向铅直下半空间的散射百分比。

(3)大气层对准直辐射和漫射的逆向反射率 $R_{A\lambda}$和 $r_{A\lambda}$

由于大气中散射成份的作用，经水面反射后的向上传输辐射将受到大气的逆向反射。由于直接辐射经水面一次反射后形成的向上辐射，即使在有波浪情况下，其平均反射角也接近平静水平的 *Snell* 反射角。这一部分反射辐射在统计意义下可做为准直辐射处理；此时的大气逆向反射率为

$$R_{A\lambda} = T_{o\lambda}T_{w\lambda}T_{pa\lambda}[0.5(1 - T_{r\lambda}) + (1 - f_\lambda)T_{r\lambda}(1 - T_{p\lambda})] \tag{3}$$

漫射辐射经水面反射后仍为漫射状态。对这一部分辐射，大气的逆向反射率为

$$r_{A\lambda} = T'_{o\lambda}T'_{w\lambda}T'_{pa\lambda}[0.5(1 - T'_{r\lambda}) + (1 - f'_\lambda)T'_{r\lambda}(1 - T'_{p\lambda})] \tag{4}$$

其中带撇号的量是(3)式中的相应量在取漫射平均大气质量下的值。

2. 水面反射

在无风浪情况下，水面反射率可用 Fresnel 公式很容易地求出。然而对实际水体，由于风的作用，水面通常呈起伏不定的“粗糙面”。有风浪的水面与平静水面的反射不同，尤其在太阳高度角较小的早晨和傍晚，其差异更为明显。本文用如下随机方法处理风浪水面的反射。

考虑风浪水面的一小面元，该面元的曲率可忽略。在该面元所有可能出现的取向各态历经统计意义下，此面元反射率的概率统计期望值即为风浪水面的反射率。根据 Cox 和 Munk 的风浪取向概率分布函数[5]以及随机变量的抽样原理[6]，可以证明：从波面元法矢所有可能出现的取向中进行随机抽样的方程为：

$$\begin{cases} \vec{n}(\mu,\varphi) = [-(1-\mu^2)^{1/2}\cos\varphi, -(1-\mu^2)^{1/2}\sin\varphi, \mu] \\ \mu = 1/(1-\sigma^2\ln\eta_1)^{1/2} \\ \varphi = 2\pi\eta_2 \end{cases} \tag{5}$$

其中 σ 是与水面风速有关的参量[5]，$\vec{n}$是面元的单位法向矢量，μ 为面元倾角的余弦，φ 为面元法矢指向的方位角，η_1 和 η_2 以及下文中的 η_3 均为(0,1)内均匀分布的随机数。

由于在风浪面元取向中已考虑方位角变化，这里可不再考虑入射辐射的方位角。因此，入射于水面的入射辐射方向单位矢量可取为：

$$\vec{e} = (0, \sin\theta, -\cos\theta) \tag{6}$$

并且

$$\cos\theta = \begin{cases} \cos Z, \text{对直接辐射}(Z\text{ 为太阳天顶角}) \\ 1 - \eta_3, \text{对漫射辐射} \end{cases} \tag{7}$$

给定 $\vec{e}$和 $\vec{n}$后，则可得出面元在该状态下的 Fresnel 反射率，即

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\begin{cases} r(\mu,\varphi,\theta) = \dfrac{1}{2}\left[\dfrac{\sin^2(\xi_i - \xi_t)}{\sin^2(\xi_i + \xi_t)} + \dfrac{\mathrm{tg}^2(\xi_i - \xi_t)}{\mathrm{tg}^2(\xi_i + \xi_t)}\right] \\ \cos\xi_i = -(\bar{e}\cdot\bar{n}) \\ \sin\xi_t = \sin\xi_i/m(m\text{ 为水的折射指数}) \end{cases} \tag{8}$$

此外，由于波面接收入射辐射的多少取决于波面按入射方向投影的几何面积，因此引入权重 $\cos\xi_i/\mu$，对波面元的反射率求统计平均，则得风浪水面的反射率，即

$$\langle r\rangle = \left[\sum_{k=1}^{N}\cos\xi_i^{(k)} r(\mu^{(k)},\varphi^{(k)},\theta^{(k)})/\mu^{(k)}\right]/\left(\sum_{k=1}^{N}\cos\xi_i^{(k)}/\mu^{(k)}\right] \tag{9}$$

在直射和漫射两种入射状况下分别求解上式，则得风浪水面的直射反射率 R_f 和漫射反射率 r_f。

3. 湖面上的向下传输辐射

湖面上的向下辐射由透过大气的太阳直接辐射和天空漫射以及大气和水体间的多次反射成份构成。根据辐射传输累加原理的射线示踪法[7]，水面的向下传输辐射

$$F_{D\lambda} = \left[T_{A\lambda} + \frac{T_{A\lambda}R_f R_{A\lambda} + t_{A\lambda}}{1 - r_{A\lambda}r_f}C_\lambda\right]DF_\lambda\cos Z \tag{10}$$

其中 F_λ 是平均日—地距离处的入射于大气上界的太阳辐射通量，D 是考虑日—地距离周年变化的订正，C_λ 是晴空大气辐射传输模式中的参数[4]。

将(10)式对整个太阳辐射谱波段积分可得到达湖面的总太阳辐射值 F_D，对光合有效辐射波段积分，则得到达湖面的 PAR 值 P_D。

三、结果和讨论

本文的数值计算采用表 1 中的大气参数值。

表 1 数值计算中的参量取值

Tab. 1 Value of the parameters used in computation

参 量	2月	6月	9月
气压(hPa)	1023.9	1005.9	1012.7
风速(m/s)	3.6	3.3	2.7
单位截面大气柱中的水汽含量(g/cm²)	0.85	2.93	1.9
臭氧含量(Atm-cm)	0.4	0.32	0.32
0.55μm 波长处的气溶胶光学厚度	0.4	0.05	0.2

图 1 给出了 9 月 27—28 日太湖湖面向下传输的太阳总辐射实测值和数值模式计算结果。在观测中，天空时有云团遮挡，因而所测的湖面辐射通量值随时间有较大的起伏。由于晴空状况的湖面辐射值应是湖面辐射值的上限，因而在间歇有云情况下湖面辐射观测值的包络线就是对应晴空无云状况下的辐射通量。实际上，有些作者，分析辐射观测资料时，对晴空大气地面辐射日变化曲线就是采用这种包络线方法确定的[8]。图 1 的结果表明，计算值几乎是观测数据点的包络线，说明模式结果基本上反映了晴空大气下的湖面辐射状况。

图 2 给出了 2 月 15 日和 6 月 15 日湖面上向下辐射谱的计算结果。图中谱分布曲线辐射极小值由大气中吸收成份的特征吸收决定，其中臭氧吸收主要在紫外和可见光波段、红外

维普资讯 http://www.cqvip.com

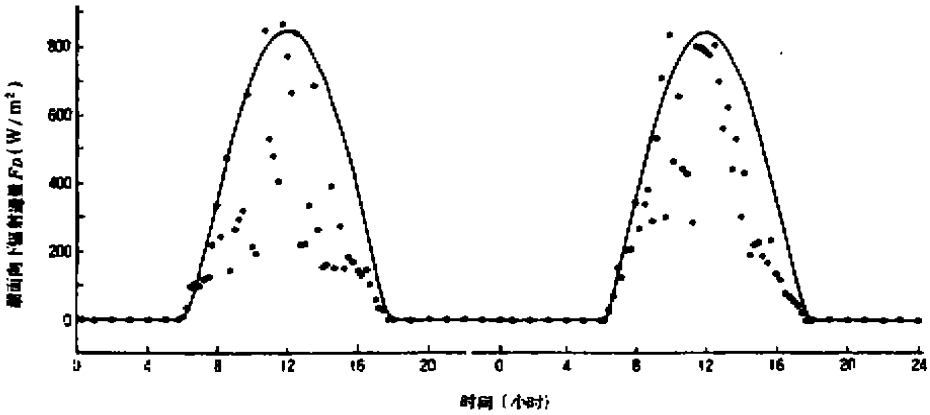

图 1　到达湖面上的太阳总辐射通量的实测值（圆点）和模式计算结果（实线）

Fig. 1　Solar irradiance just above the water-surface of Taihu Lake corresponding to the cases from September 27 to 28, 1990 (Solid lines are computed results and dots are measured data.)

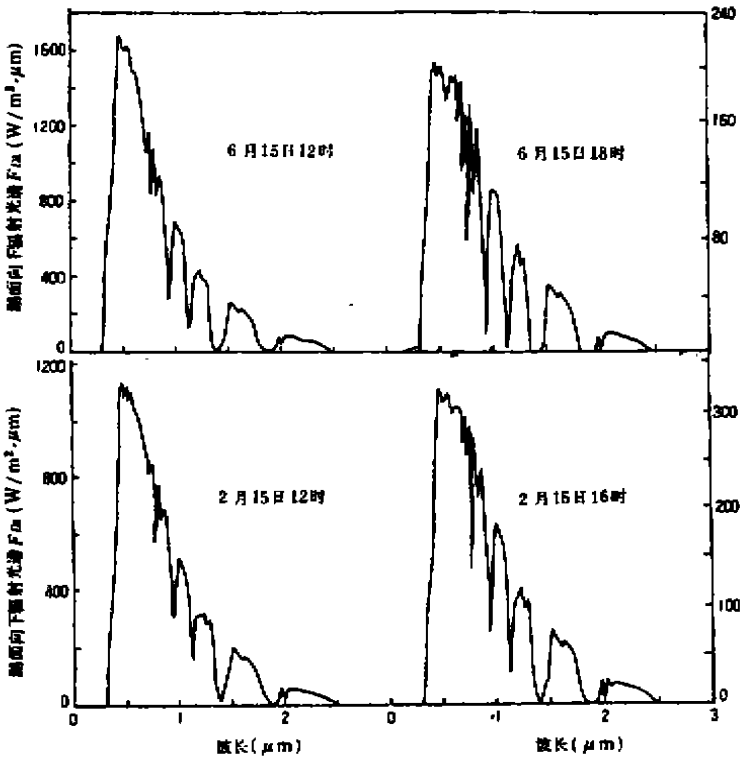

图 2　到达湖面上的向下辐射的计算值

Fig. 2　Computed results of downward solar spectra just above the water-surface

维普资讯 http://www.cqvip.com

区的吸收则主要来自水汽和二氧化碳。由图可见，0.5—0.7μm 波段内的辐射极大峰在整个湖面辐射能中所占比例较大，特别是中午时间的辐射。在下午，当太阳高度角较小时，辐射谱中的短波极大峰区出现较多精细结构，而且此时大气对短波辐射的衰减明显。这主要是由于太阳高度角减小，辐射通路上的大气质量增大，大气中吸收成份的特征吸收更明显；同时，大气质量增加也使大气中的 Rayleigh 散射衰减增强，Rayleigh 散射的后向散射将入射辐射的一部分散射回太空。由于 Rayleigh 散射与入射波长的四次方成反比，因而大气质量增加时，短波辐射的衰减比长波强得多。

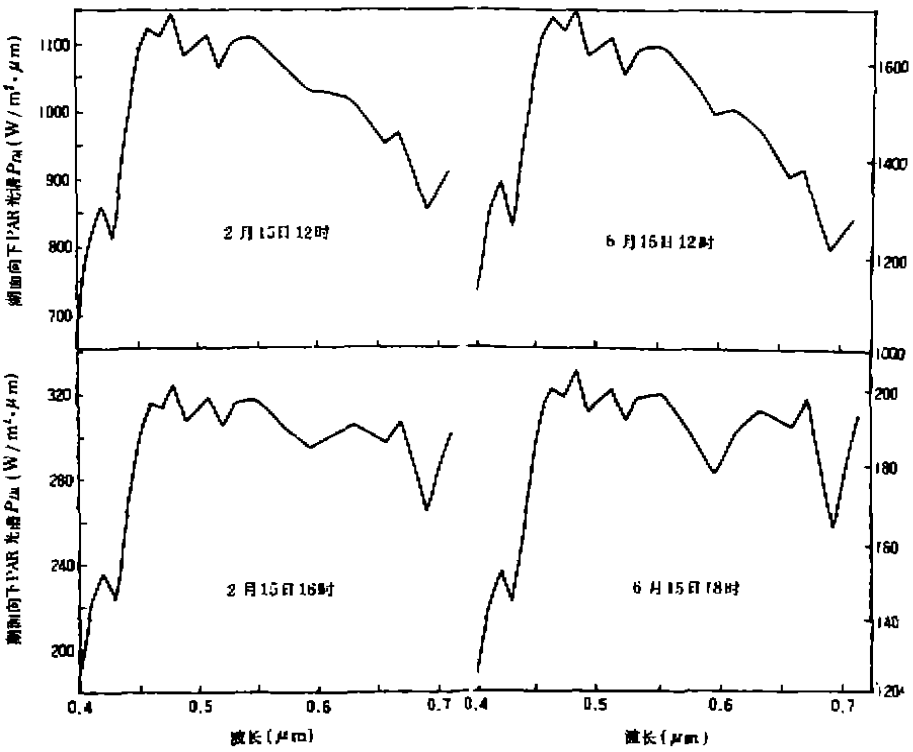

图 3 与图 2 对应的湖面向下 PAR 谱

Fig. 3 PAR spectra corresponding to the case of figure 2

图 3 是与图 2 相应的湖面 PAR 谱状况。由图可见，在正午 12 时 PAR 中大于 0.6μm 的长波部分所占比例较小；但接近日落时，这部分的比例有变大的趋势。由于植物叶绿体进行光合作用是以光量子形式从环境光场中捕获能量，单位能量的辐射中所含的光量子数目是植物光合生产研究中感兴趣的量。由于长波辐射中每个光量子所含的能量比短波辐射的要小，因而从图中结果可知，在正午时，湖面单位 PAR 中所包含的光量子数目，比日出后和日落前不久（即太阳高度角较小时）的单位 PAR 所对应的光量子数目要少。

在水体生态问题研究中，生态学家往往需要把较方便得到的宽带辐射值换算为 PAR 值。这无疑地涉及到转换系数的确定。图 4 给出了利用长期月平均气象资料计算的 2 月 15 日（曲线 1）和 6 月 15 日（曲线 2）太湖水面辐射中 PAR 成份所占比例随时间的变化。由图可见，6 月总辐射中的 PAR 成份所占比例较 2 月为大，如 6 月 15 日在 8—16 时这一较长时段

维普资讯 http://www.cqvip.com

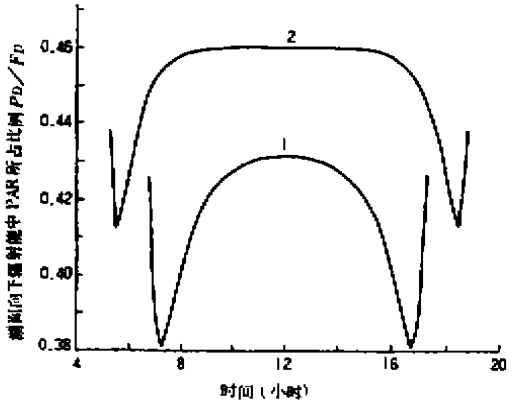

图 4　湖面上向下总太阳辐射中 PAR 成份所占比例的日变化计算曲线

Fig. 4　Ratio of PAR to total solar radiation. (1) and (2) correspond to the cases of Feburary 15 and June 15, respectively

内,湖面辐射中的 PAR 比例大约恒定在 46%。颜京松和周万平[9]在讨论秦淮河生态问题时曾采用 47%作为春、夏季节 PAR 成分占向下辐射能的比例,这与本文结果一致。另外,由图还可见,在日出后和日落前不久,PAR 所占的比例都将出现一次极小值,该极小值在 2 月 15 日甚为显著。这说明此时大气对入射太阳辐射的衰减在 PAR 波段内相对较强。

四、结　　论

本文着重讨论了两次分别对冬季和夏季具有一定代表意义的太湖水面总太阳辐射中 PAR 成份所占比例的日变化状况。结果表明:在 6 月情况下,PAR 比例约在 41%—46%,并且在较长时段内恒定为 46%;对 2 月情况,PAR 的比例变化幅度为 38%—43%。此外,在日落前和日出后不久,湖面总辐射值中的 PAR 比例都将出现一次极小值,这种极小值在 2 月冬季情况甚明显。

维普资讯 http://www.cqvip.com

参 考 文 献

[1] Kirk J. T. O., Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 1983: 171—284.

[2] Brine D. T. and M. Iqbal, Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies. *Solar Energy*, 1983, **30**(5): 447—453.

[3] Justus C. G. and M. V. Paris, A model for solar spectral irradiance and radiation at the bottom and top of a cloudless atmosphere. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1985, **24**(3): 193—205.

[4] Bird R. E. and C. Riordan, Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**(1): 87—97.

[5] Cox C. and W. Munk, Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *J. Opt. Soci. Amer.*, 1956, **44**(11): 835—850.

[6] 裴鹿成等著。计算机随机模拟。长沙，湖南科学技术出版社，1988：1—17，76—105。

[7] Liou K. N. 著，周诗健等译。大气辐射导论。北京，气象出版社，1982：242—254。

[8] D. F. Heermann, G. J. Harrington and K. M. Stahl, Emperical estimation of daily clear sky solar radiation. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1985, **24**(3), 206—214.

[9] 颜京松、周万平。秦淮河污染的生态学评价。水资源保护（秦淮河水环境保护论文专辑），1987：51—67。

PAR IN THE SOLAR RADIATION AT THE WATER SURFACE OF TAIHU LAKE

Yang Ping Xu Yongji Cai Qiming

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008)

Abstract

According to the spectral model for transferring of solar radiation in cloudless atmosphere, the solar irradiance at the surface of Taihu Lake is computed and ratio of photosynthetically available radiation (PAR) to the total radiation investigated. Also, the numerical computations are carried out by comparison with the twice 24-hour field observations; and it is shown that the computed results are the enveloping curves of the measured data. In the numerical computation, the meteorological data, such as surface pressure and wind speed, from the meteorology stations in Wuxi region are adopted; and in the treatment of reflection of water-surface, the effect of wave is taken into consideration.

Key Words solar radiation, PAR, Taihu Lake