

# 一个可用于实时计算的太阳辐射模型\*

刘浩 尹宝树<sup>1)</sup>

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 厦门大学 厦门 361005)

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**提要** 拓展了 Smith 等 (1984) 关于海面辐照度的数值算法, 给出了一个可实时计算海面和海水中太阳辐射强度的模型, 通过计算 1998 年 9 月 24 日—10 月 7 日以及 1999 年 4 月 28 日—5 月 11 日渤海表面太阳辐射量 (两个时间段内的辐照总量误差分别为 0.27% 和 6.67%), 显示出该模型与实测结果良好的适应性。另外, 模型还揭示: 在不考虑其它限制因素的前提下, 当浮游植物生物量处于较小的状态时, 海水中的太阳辐射能促进浮游植物的快速生长, 但是当浮游植物的生物量增大到一定程度时, 由于对太阳辐射的遮蔽作用增强, 浮游植物的生长明显受到抑制。

**关键词** 辐射模型, 太阳辐照度, 云量, 叶绿素 *a*

**中图分类号** P593

赤潮等有害藻华的频繁暴发严重破坏了海洋环境, 降低了海水资源的使用价值, 因此对近岸海域生态系统的调查研究日益受到海洋管理者和研究者的重视 (陈善文等, 2004; 王修林等, 2004; 崔廷伟等, 2005)。而其中基于生态模型的研究, 由于能够展现生态系统长期连续的变化过程, 往往成为重大课题研究中不可缺少的组成部分。在生态系统诸要素中, 浮游植物起到联系无机营养盐和其它有机生命形式的作用, 这就决定了在模型研究中特别重视关于太阳辐射的计算, 它直接关系到浮游植物光和生产过程的模拟质量。关于海面太阳辐射的定量研究, 前人已取得了许多显著的成果 (Smith *et al.* 1984; Baker *et al.* 1987; 张一夫, 1990; 翟盘茂, 1991; 王举等, 2005), 所不同的是, 本文的研究目的是建立一个可以镶嵌到复杂生态模型中可靠而简单的辐射模型。之所以要强调模型的简单性是因为复杂的模型往往会涉及到复杂的物理化学过程和较多的参数, 在没有充足的实测数据为依托的前提下必然会带来更多的不确定性。此外, 太阳辐射

的计算毕竟只是宏大生态模型中的一个小环节, 虽然它是非常重要的一个小环节。基于如上考虑, 本文中作者在比较前人研究成果的基础上, 以 Smith 等 (1984) 关于大气层内太阳辐射强度的算法为基本框架, 根据太阳辐射在大气层以外和海水中的传播规律补充了相应成熟的经验公式, 给出了一个可以实时模拟海面辐照度和海水中太阳辐射强度的模型。

## 1 模型描述

地球是在以太阳为焦点的椭圆形轨道上运动, 绕行一周大约需要 365.25 天, 而日地距离的大小直接决定了到达地球的太阳辐射强度。当地球和太阳之间处于平均距离  $\bar{d}$  时, 大气层上界的太阳辐照度 (在单位时间内垂直投射到单位面积上的太阳辐射能) 约为  $1367 \text{ W m}^{-2}$ , 称之为太阳常数  $Q_{\infty}$ 。假定  $d$  为一年中任意时刻的日地距离, 那么到达地球的太阳辐照度  $Q_0$  可用以下关系式计算

$$Q_0 = Q_{\infty} \frac{\bar{d}^2}{d^2} \quad (1)$$

\* 国家重点基金项目, 50339040 号和国家重点基础研究发展计划 973 项目, 2005CB422301 号。刘浩, 博士后, lhao-ij@163.com

1) 通讯作者: 尹宝树, 博士, 研究员, 博导, bsyiu@ms.qd.cn

收稿日期: 2005-08-16 收修改稿日期: 2006-06-04

上式中的  $\frac{\bar{d}^2}{d^2}$  被称作地球轨道偏心率修正因子,

Spencer用傅立叶级数将其展开, 得到

$$\frac{\bar{d}^2}{d^2} = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (2)$$

式中,  $\Gamma$  为日角, 即一年中的任一天在  $2\pi$  的圆周上所对应的角度, 可表示为

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365.25} \quad (3)$$

式中,  $d_n$  是一年中从 1月 1日开始到任意一天的累积天数, 称为 Julian 天数。

通过式 (1) — (3) 就可以求到太阳辐射到达地球大气层上界时的辐照度。当太阳辐射穿越大气层时, 由于空气分子、空气中的水汽和灰尘都可能对其进行吸收、散射和反射, 因此实际到达地球表面的太阳辐射强度要减小很多。云层的存在使辐射状况更为复杂, 它不但吸收几乎所有波长的辐射, 同时它又是重要的辐射体。云层的吸收以及它和地面之间形成的多次反射作用, 对地面和底层大气系统的辐射平衡有着重要意义。

Smith等 (1984) 通过整理 Bravo 海洋气象站积累的从 1964年到 1973年长达 19年的海洋气象资料, 归纳总结出海面辐照度与云层之间联系的经验关系式, 如下

$$Q_s = Q_o [B_i + S_h e^{-A_i S_h} (C e^{-A_i S_h} + 1 - C)] \quad i = 0 \dots, 5 \quad (4a)$$

$$Q_s = Q_o S_h (A_i + B_i S_h) \quad i = 6 \dots, 8 \quad (4b)$$

式中,  $Q_s$  是海面辐照度;  $i$  是八分制的云量数,  $A$ 、 $B$  为云量参数,  $C$  是以 8 为除数的云量比例, 具体数值见表 1。

表 1 太阳辐射模型云层参数

Tab 1 Cloud parameters used in the irradiation model

云 量	A	B	C
0 <sup>1)</sup>	0.0240	0.0520	0
1	0.070	0.0525	0.125
2	-0.010	0.0430	0.25
3	0.055	0.0395	0.375
4	0.070	0.0375	0.5
5	0.090	0.0345	0.625
6	0.310	0.439	
7	0.235	0.388	
8	0.103	0.296	
9 <sup>2)</sup>	0.131	0.313	

注: 1) 晴天无云, 2) 乌云蔽日

式 (4) 中的  $S_h$  是太阳高度角的正弦值, 根据球面三角形原理, 可以得到

$$S_h = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \tilde{\omega} \quad (5)$$

式中,  $\Phi$  是地理纬度;  $\delta$  是太阳赤纬, 在模型计算时采用下式

$$\delta = \frac{23.45\pi}{180} \cos \frac{2\pi(172 - d_n)}{365.25} \quad (6)$$

式 (6) 中的 23.45 为黄道和赤道交角, 172 为夏至对应的 Julian 天数。式 (5) 中的  $\tilde{\omega}$  的是太阳时角, 若选择渤海为观测点, 其计算公式可写为

$$\tilde{\omega} = \frac{(h_n - 4)\pi}{12} - \lambda \quad (7)$$

式中,  $h_n$  是从零时开始计算的小时数;  $\lambda$  为地理经度。

对式 (5) 取反正弦函数值, 并将式 (6)、(7) 代入, 另外再将渤海中心位置的经纬度  $119^\circ 50' E$ ,  $39^\circ 00' N$  代入, 于是计算得到渤海中心位置上太阳高度角一年的时间序列。图 1 显示: 夏至前后的太阳高度角是一年中的最大值, 约为  $74.5^\circ$ ; 之后太阳高度角逐渐降低, 到冬至时分降为最小, 约为  $28^\circ$ ; 然后又开始逐渐攀升。太阳高度角的大小决定了海面辐照度的强弱, 对海水表层温度及浮游植物的光合作用都产生直接的影响。

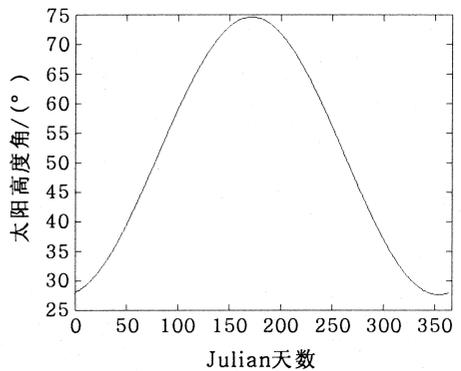


图 1 渤海中心位置 ( $119^\circ 50' E$ ,  $39^\circ 00' N$ ) 正午时分太阳高度角变化的时间序列。0 天对应的是当年的 1 月 1 日, 其它天数对应的日期由此递推

Fig 1 The time series of solar height at the noon in the center of Bohai Sea The 0<sup>th</sup> day corresponds to January 1<sup>st</sup>, from which other dates followed

太阳辐射的主要能量集中在  $0.2 - 4\mu m$  的波长范围内 (Baker et al 1987; 陈长胜, 2003), 其中约 43% 为波长在  $0.4 - 0.67\mu m$  范围内的可见

光,这部分太阳辐射被浮游植物直接用来进行光合作用,转化为化学能。另外 49% 为波长大于 0.67 $\mu\text{m}$  的红外光,其辐射能进入海水后很快会被表层海水吸收,转化为热能从而使海水温度增加;最后剩下的 8% 为波长小于 0.4 $\mu\text{m}$  的紫外光。海水中的可见光是浮游植物进行光作用的主要能源,它的模拟质量直接关系到生态系统中其它要素的计算结果,因此成为本文研究的重点。可见光进入海水后一方面会被海水所吸收,另一方面在传播过程中还要受到各种色素(其中主要是叶绿素 *a*,而叶绿素 *a* 又通常被用来作为浮游植物生物量的量度)的散射和反射而进一步衰减。当然,在河口等近岸海域由于受陆源冲积物的影响,海水浊度很高,这时叶绿素 *a* 对太阳辐射的遮蔽作用与海水中的悬浮泥沙比起来就显得微不足道,现场观测显示这样的海水环境不适合浮游植物生长 (Chen *et al*, 1999),因此本文的模型研究更关心有利于浮游植物进行光作用的“洁净海水”。基于如上考虑,海水中的可见光强度 *I* 可表示为

$$I = 0.43Q_s \cdot \exp\left[-k_w z - k_{chl} \int_0^z P dz\right] \quad (8)$$

式中,  $k_w$ ,  $k_{chl}$  分别为海水自身的光衰减系数和叶绿素 *a* 对太阳辐射的遮蔽系数;  $P$  是叶绿素 *a* 浓度;  $z$  是海水中某一点到海面的垂直距离。式 (8) 显示辐射光在海水中随着水深和浮游植物浓度的增加呈指数衰减。

### 2 模型验证

公式 (4) 可以用来计算海面辐照度,为了检验该模式的实际计算效果,本文中作者采用张新玲等 (2001) 在 1998 年 9 月 24 日—10 月 7 日以及 1999 年 4 月 28 日—5 月 11 日两个时间段内测得的渤海海面辐射总量作为对比对象,结合当时观测的云量 (图 2), 计算了同一时期渤海海面的太阳辐射度。

图 3 显示: 两个时间段内渤海海面辐照量的计算值与实测值基本吻合,只是在个别多云天气条件下,计算值与实测辐射相比偏小较多,日计算相对误差的平均值分别为 0.94% (秋季) 和 5.53% (春季)。另外从两个时间段的辐照总量来看,1998 年秋季的计算和实测总量分别为 195.22 和 194.70  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , 相对误差只有 0.27%; 春季的计算和实测值分别为 322.69 和 302.5  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , 误差相对较大,但也只有 6.67%。而且从计算结

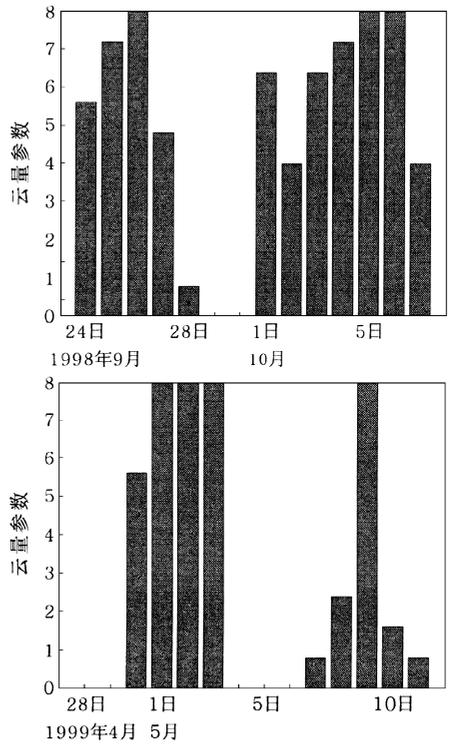


图 2 渤海海面实测的日平均云量 (8 分制)  
Fig 2 The measured daily mean cloud amount over the Bohai Sea (octadic)

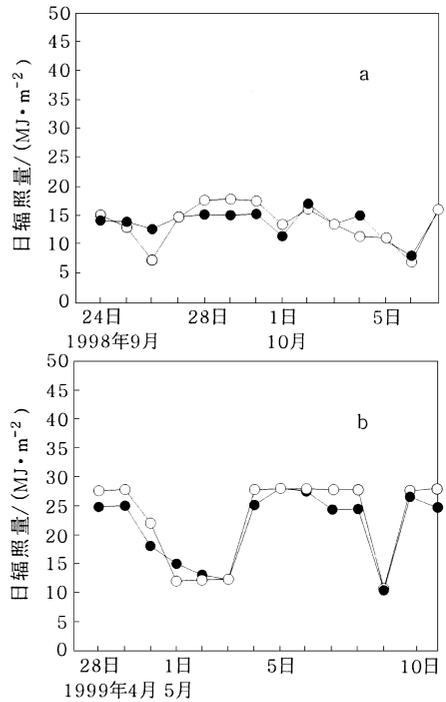


图 3 渤海海面太阳辐射的日总量的实测值与计算值的比较  
Fig 3 The comparison of observed and calculated daily amount of irradiation on the surface of Bohai Sea

果来看,误差有正有负,不存在系统误差。鉴于该模型具有运行简单、计算可靠等优点,因此非常适于模拟海面辐照度的长期变化。

### 3 讨论

公式(8)可以用来计算洁净海水中的可见光强度,虽然作者没有实测数据来对该方法进行定量检验,但是可以从另一个角度来验证它的合理性。在实际生态调查中通常采用下式来估算海域的初级生产力(费尊乐等,1991)

$$TP = \frac{b\gamma tP}{K} \quad (9)$$

式中,  $TP$  为初级生产力 [ $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ],  $\gamma$  为相对光合作用率,  $t$  为每日的日照时间 ( $\text{h}/\text{d}$ ),  $K$  为海水中的光衰减系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $P$  为叶绿素  $a$  浓度 ( $\text{mgChl}a/\text{m}^3$ , 反映了浮游植物的生物量),  $b$  为平均同化系数 [ $\text{mgC}/(\text{mg} \cdot \text{Chl}a \cdot \text{h})^{-1}$ ].

另外,根据公式(8)可以知道,由于散射反射等作用,可见光在海水中的衰减性  $K$  会随着叶绿素  $a$  含量呈指数增加,这意味着海水中叶绿素  $a$  含量的增加会对初级生产力水平产生抑制作用。下面比较考虑叶绿素  $a$  对太阳辐射的衰减和考虑叶绿素  $a$  对太阳辐射衰减两种情况下初级生产力随浮游植物生物量的变化特征,两种情况下海水中的光衰减系数可分别表示为

$$K = \frac{k_w z + \int_0^z k_{chl} P dz}{z} \quad (10a)$$

$$K = k_w \quad (10b)$$

式中,  $k_w$ ,  $k_{chl}$  分别表示海水自身对光的衰减特性和叶绿素  $a$  对光的散射反射作用。

现假定光透层内的叶绿素  $a$  均匀分布(考虑到海面风应力对上层海水的搅动作用,这种假设是合理的),于是式(10a)可以简化为

$$K = k_w + k_{chl}P \quad (11)$$

将式(10b)和(11)分别代入式(9),就可以得到浮游植物生产量(用以表示初级生产力水平)随叶绿素  $a$  含量的变化曲线(图4)。图4显示:当不考虑叶绿素  $a$  对可见光的衰减时,初级生产力会随着其自身含量的增加而无限的增长;如果考虑叶绿素  $a$  对可见光的散射反射作用时,当叶绿素  $a$  的浓度增大到一定程度时,由于对光的遮蔽作用增强,浮游植物的生长则受到显著的抑制。渤海近20年的生态演变过程显示,赤潮的有害藻华的暴发造成海域内叶绿素  $a$  含量的增加,但同时初级生产力却呈现显著下降的

趋势。据估计渤海上世纪90年代的初级生产力较80年代下降了30%(Wei et al. 2004)。图4的结果定性地反映了海域初级生产力与浮游植物生物量的这种关系,进而证明式(8)是适于模拟海水中太阳辐射强度的。

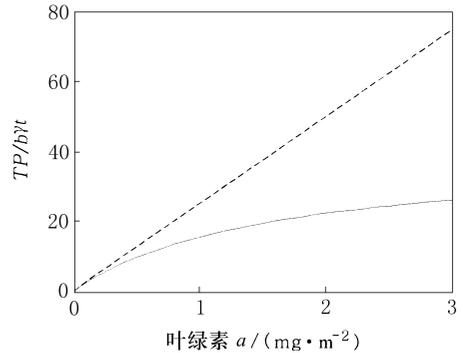


图4 浮游植物的生产量与叶绿素  $a$  浓度的关系。实线(考虑叶绿素  $a$  所对应的光衰减系数由式(11)计算得到;虚线(不考虑叶绿素  $a$  所对应的光衰减系数由式(10b)计算得到,其中  $k_w$ 、 $k_{chl}$  分别取值  $0.04\text{m}^{-1}$  和  $0.025(\text{mg} \cdot \text{Chl}a/\text{m}^2)^{-1}$ )

Fig 4 The relations between phytoplankton production and chlorophyll  $a$  content. Light attenuation coefficient indicated by solid line is calculated from equation(11), and that indicated by dashed line is from equation(10b), in which  $k_w$ ,  $k_{chl}$  is set as  $0.04\text{m}^{-1}$  and  $0.025(\text{mg} \cdot \text{Chl}a/\text{m}^2)^{-1}$ , respectively

### 4 结论

本文中作者在 Smith等(1984)数值方法的基础上,给出了一个可以实时计算海面辐照度以及海水中可见光强度的辐射模型。该模型结构简单,仅仅依赖4个变量:即太阳高度角、云量、水深和叶绿素  $a$  的浓度。除云量外,其它3个变量可由模型随时计算得到,因此该模型实时计算的时间分辨率仅取决于云量目测的时间间隔。通过与实测数据进行比较,证明该模型无论是在计算结果还是在构造依据上都是可靠的,又由于该模型本身具有运行简单占用计算资源少的优点,因此可以镶嵌到复杂的生态模型中作为计算浮游植物光和作用的有效手段。

### 参 考 文 献

- 王 举,姚华栋,蒋国荣等,2005. 南海北部海区太阳辐射观测分析与计算方法研究. 海洋与湖沼, 36(5): 385—393
- 王修林,孙 霞,韩秀荣等,2004. 2002年春、夏季东海赤

- 潮高发区营养盐结构及分布特征的比较. 海洋与湖沼, 35(4): 323—331
- 张一夫, 1990. 关于海面反照率的初步探讨. 海洋学报, 12(1): 24—29
- 张新玲, 郭心顺, 吴增茂等, 2001. 渤海海面太阳辐射强度的观测分析与计算方法研究. 海洋学报, 23(2): 46—51
- 陈长胜, 2003. 海洋生态系统动力学与模型. 北京: 高教出版社, 404
- 陈善文, 高亚辉, 杜虹等, 2004. 双环海链藻 (*Thalassiosira diporocyclus* Hasle) 赤潮. 海洋与湖沼, 35(2): 130—137
- 费尊乐, 毛兴华, 朱明远等, 1991. 渤海生产力研究: 叶绿素  $a$  初级生产力与渔业资源开发潜力. 海洋水产研究, 12: 55—69
- 崔廷伟, 张杰, 马毅等, 2005. 基于地物光谱的赤潮优势种识别研究. 海洋与湖沼, 36(3): 277—283
- 翟盘茂, 1991. 海洋表面辐射计算方法. 海洋通报, 10(6): 79—90
- Baker K S, Fouin R, 1987. Relation between photo-synthetically available radiation and total insolation at the ocean surface under clear skies. Limnology and Oceanography, 32(6): 1370—1377
- Chen C S, Ji R B, Zheng L Y, 1999. Influence of physical process on the ecosystem in Jiaozhou Bay: a coupled physical and biological model experiment. Journal of Geophysical Research, 104(C12): 29925—29949
- Smith S D, Dobson F W, 1984. The heat budget at Ocean Weather Station Bravo Atmosphere-Ocean, 22: 1—22
- Wei H, Sun J Moll A *et al*, 2004. Plankton dynamics in the Bohai Sea—observations and modeling. Journal of Marine System, 44: 233—251

## A REAL-TIME IRRADIATION MODEL

LU Hao Y N Bao-Shu

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071;

Xiamen University, Xiamen, 361005)

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

**Abstract** The authors modified the numerical method of Smith *et al* (1984) to calculate the irradiation on the sea surface and in the interior of seawaters and presented a real-time irradiation model. Application of this model in the Bohai Sea surface from September 24 to October 7, 1998 and from April 28 to May 11 1999 showed a good agreement to the observation data; the bias between calculated and measured irradiation energies are 0.27% and 6.67% for the two periods respectively. When the phytoplankton biomass is small, light irradiation could promote algae growth quickly if other influencing factor are ignored; however, the increase in the phytoplankton biomass would shield the light from entering deep water, resulting in light attenuation and algae growth holdback.

**Key words** Irradiation model; Irradiation intensity; Cloud amount; Chlorophylla