

海洋初级生产力的卫星遥感估算模型

丛丕福¹, 王臣立², 曲丽梅¹, 刘长安¹

1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 中国文物研究所, 北京 100029

摘要: 海洋初级生产力估算在渔业资源管理、碳循环和全球变化研究中具有重要意义, 准确的海洋初级生产力估算模型可直接为渔业生产和海洋管理提供决策支持, 卫星遥感技术能够及时提供地表大尺度、动态的生态环境参数, 因而在海洋初级生产力估算方面得到了广泛的应用。首先介绍了遥感估算海洋初级生产力的原理, 对不同遥感模型包括经验模型和基于生物机理的BPM模型、LPCM模型和VGPM模型等生理过程模型进行了比较分析。以渤海海域为研究区, 利用MODIS/AQUA卫星数据产品中的海表温度SST、离水辐射率Lw、海水漫射衰减系数Kd490和海洋光合有效辐射PAR, 计算出水柱的最大碳固定速率、真光层深度、遥感叶绿素浓度, 选择全遥感数据驱动的生理过程模型VGPM, 对渤黄海的初级生产力进行了估算和分析。结果表明: 通过MODIS卫星数据基于VGPM模型估算的渤海海域的海洋初级生产力很好地揭示了海洋初级生产力在不同海区的分布和变化。整个渤海海区初级生产力的总体分布为从近海向外逐渐降低, 其中渤海要较高一些, 和前人调查比较一致。

关键词: 卫星遥感; 海洋初级生产力; 模型; MODIS; VGPM

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 03-1016-04

近 10 年来, 随空间探测技术的进步, 卫星技术的发展十分迅速。高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率的卫星不断涌现。卫星遥感具有及时、准确、动态和大面积覆盖的特点, 因而已逐渐成为研究大时空尺度海洋现象的有效手段。自从 Clarke 等^[1]开创利用遥感技术测定海面浮游植物叶绿素浓度以来, 海洋初级生产力遥感已成为生物海洋学研究的一个重要课题^[2]。大气中 CO₂ 含量升高^[3]使得人们对碳循环的研究更加重视。人们在利用卫星遥感技术估算海洋初级生产力模型^[4]方面进行了大量研究, 国内如梁强^[5]基于 SeaWiFS 的海洋叶绿素浓度反演结果, 反演了中国东海海域 1998 年逐月初级生产力时空分布以及全年累积初级生产力分布状况。官文江等^[6]通过对多年的东海、黄海南部实测海洋初级生产力与环境数据的分析, 采用非线性最小二乘法, 得到海洋初级生产力的遥感估算模型。采用先进的 MODIS 数据, 针对具体海区选择适宜模型估算海洋初级生产力, 有助于研究海洋碳循环、藻类变化及日趋严重的水体富营养化^[7], 提升环境监测能力。

1 基本原理

根据海洋遥感叶绿素浓度资料计算初级生产力, 最重要的是建立由海洋水色遥感资料反演得出的浮游植物叶绿素浓度计算初级生产力的合适算法模式:

$$P_t = F \times C_{\text{chl}a} \quad (1)$$

式中 P_t 为海洋初级生产力; F 为常数或是根据环境参数控制的可变量; $C_{\text{chl}a}$ 为由海洋水色遥感资料反演得出的海洋近表层叶绿素浓度。

2 遥感模型分析

遥感估算海洋初级生产力的模型基本可分为两类: 经验模型和生理过程模型。

2.1 经验模型

遥感估算海洋初级生产力最简单的模型就是经验统计模型。在海洋初级生产力遥感研究初期, 人们针对不同海域建立了许多线性经验公式, 并广泛应用, 如 Lorenzen^[8]在 1970 年提出了利用表层叶绿素浓度和初级生产力相关的经验模型:

$$\ln P_L = 0.427 + 0.475 \ln C_L \quad (2)$$

其中: P_L 为海洋初级生产力, 以每天每平方米海洋面积所产生的碳的克数计, 即单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; C_L 为表层叶绿素浓度, 单位是 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由于海洋初级生产力除了和叶绿素浓度密切相关外, 还和温度、光照、营养盐等多种因素有关, 因此在后来的研究中, 也有不少学者考虑在经验模型中增加其他相关参数。Eppley 等^[9]添加了海表温度和昼长因子建立了初级生产力的经验模型, 结果为:

$$\ln P = 3.06 + 0.5 \ln C - 0.24T + 0.25D_L \quad (3)$$

其中: P 为初级生产力; C 为卫星反演的海表

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-01-02); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金项目 (SOED0707); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室基金项目 (200806)

作者简介: 丛丕福 (1972 年生), 男, 副研究员, 博士, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: transco@sohu.com

收稿日期: 2009-03-30

层的叶绿素浓度； T 为海表温度； D_L 为昼长。

在不同海域内，由于地理环境、气候水文条件等不同使得海洋初级生产力与叶绿素浓度之间的关系存在差异，因此经验公式的参数差别较大。在叶绿素浓度低且分布均匀的低生产力海域，由于表层叶绿素通常无法反映次表层叶绿素最大值，两者没有显著相关，因此这些经验模型的精度是相当有限的，近年来已经很少使用。

2.2 生理过程模型

除经验模型外，把生态学数理模型中的某些参数以遥感手段来获取，进行相应处理后用来估算海洋初级生产力，这是海洋初级生产力模型的主要形式，也是目前研究的热点。

这类模型结合了浮游植物光合作用的生理学过程与经验关系，比较有代表性的模型有BPM (Bedford Productivity Model) 模型^[10]、LPCM (Laboratoire de Physique et Chimie Marines) 模型^[11]、VGPM (Vertically Generalized Production Model) 模型^[12]等。

(1) BPM模型。BPM模型属于波长整合模型 (Wavelength Integrated Model)。它是在假设叶绿素垂直均匀分布，光强 1 d 呈正弦函数变化分布的条件下建立的。具体公式为：

$$P = BP_m^B \int_0^D \int_0^{Z_{eu}} \left[1 - \exp\left[\frac{-\alpha^B I_0^m \sin\left(\frac{\pi t}{D}\right) e^{-kz}}{P_m^B} \right] \right] dz dt \quad (4)$$

这里 I_0^m 是晴空正午时分的太阳辐射强度，单位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2) LPCM模型。LPCM模型用的是整个水柱的叶绿素浓度 $C_{TOT}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2})$ 来代替表层叶绿素浓度。另外计算初级生产力是基于光合作用的基本过程：光和器官对光的吸收，每摩尔吸收量固定的碳数量，而不是基于光合过程中的最佳速率。具体公式为：

$$P = \frac{1}{J_c} \times C_{TOT} \times E_0 \times \Psi^* \quad (5)$$

(3) VGPM模型。VGPM模型经过不同海域、长时期、大范围的上万个实测数据的验证，计算精确简单可靠。简化的VGPM模型如下：

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^B \times \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \times Z_{eu} \times C_{opt} \times D_{irr} \quad (6)$$

式中： PP_{eu} 为表层到真光层的初级生产力，以每天每平方米面积所产生的碳的毫克数计，即单位是 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ； P_{opt}^B 为水柱的最大碳固定速率，以

每小时每毫克叶绿素所产生的碳的毫克数计，单位是 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ； E_0 为海表面光合有效辐射度，单位是 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。 Z_{eu} 为真光层深度，单位是 m ； C_{opt} 为 P_{opt}^B 所在处的叶绿素浓度，可以用 C_0 或者遥感叶绿素浓度 C_{sat} 代替，单位是 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； D_{irr} 为光照周期，单位 h 。

3 渤海海初级生产力估算

VGPM 模型中各参数都可以通过遥感方法获得，而且较好地考虑到垂直性问题，因而选择该模型，以渤海海域为研究区对海洋初级生产力进行估算。数据全部采用 2003 年的 MODIS/AQUA 的可见光和近红外通道数据。其中包括海表温度 SST，采用 MODIS 三级产品的月平均数据，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ；MODIS Level 2 级离水辐射率数据 L_w ；海水漫射衰减系数采用 MODIS Level 3 K_{d490} 月平均数据，单位是 m^{-1} ；海洋光合有效辐射 PAR 采用 MODIS Level 3 月平均数据，单位是 $\text{Ein}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。以上获得的图像首先经过 mask 处理，提取出海洋部分，然后再加上地理坐标，最后再裁取出研究区域进行研究。在此基础上分别计算水柱的最大碳固定速率、真光层深度、遥感叶绿素浓度。最大碳固定速率采用文献^[12]中公式计算。遥感叶绿素浓度把离水辐射率数据计算出月平均值后，再进行重采样等处理使它和 level 三级产品具有相同的分辨率，最后采用 MODIS 9 (443 nm) 和 12 波段 (551 nm) 按文献^[13]计算相应指数后再计算叶绿素浓度值，单位是 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。真光层深度采用下式计算：

$$Z_{eu} = 2\ln 10 / K_d = 4.605 / K_{d490} \quad (7)$$

图1是我们应用VGPM模型利用MODIS数据计算的2003年8月海洋初级生产力结果。可以看出，整个渤海海区初级生产力的总体分布为从近海

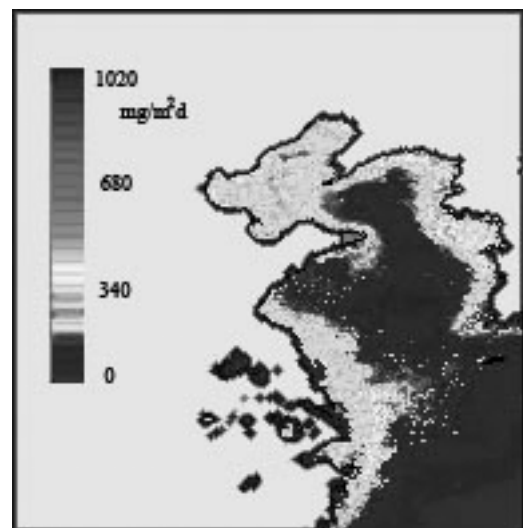


图1 2003年8月渤海海海洋初级生产力分布
Fig. 1 OPP estimated in August 2003 in Bohai Sea and Yellow sea

向外逐渐降低,其中渤海要较高一些,整体分布变化和有关文献^[14]分别描述的各局部海洋初级生产力的结果比较接近。8月,渤海海域初级生产力平均在 $380 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上。黄海中部初级生产力在 $260 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,鸭绿江口外沿岸至大连附近值较高。初级生产力在长江口附近明显向外海扩展,显著反映了长江冲淡水的影响。

4 结论和建议

卫星遥感技术在估算海洋初级生产力方面发挥了重要作用,它可以及时获取整个海面的分布及其随时间变化情况。海洋初级生产力遥感估算模型已从经验模型逐步发展到将遥感技术和生理过程相结合的、更具物理意义和普适性的生理过程模型。以 VGPM 模型为例估算的渤黄海海洋初级生产力很好地展现了海洋初级生产力在海区的分布,揭示了该海区的一些特点。但现有的问题是现场数据还非常有限,这对模型的完善和验证是一个限制,因此充分发挥多角度、高光谱和多极化等遥感新技术优势,深化对海洋初级生产力各参数的研究,进一步提高模型精度,将是未来海洋初级生产力遥感估算模型的重点。

参考文献:

- [1] CLARKE G L, EWING G C, LORENZEN C J. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration[J]. *Science*, 1979, 187: 1119-1121.
- [2] BEHENFELD M J, WORTHINGTON K. Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics[J]. *Nature*, 2006, 442(31): 1025-1028.
- [3] 张莉, 郭嘉, 朱建国, 等. 大气 CO_2 含量升高对稻田水体微量元素流失的潜在影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 17-22.
ZHANG Li, GUO Jia, ZHU Jianguo, et al. Potential effects of atmospheric carbon dioxide enrichment on the loss of microelements of paddy field water[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 17-22.
- [4] CARR M E, FRIEDRICH M A, SCHMELTZ M, et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color[J]. *Deep Sea Research*, 2006, 53: 741-770.
- [5] 梁强. 基于遥感的东海上层鱼类资源评估的研究[D]. 中国科学院研究生院硕士论文, 2002.
- LIANG Qiang. Estimate the pelagic fishery resources of the east china sea basing on remote sensing data[D]. Master Dissertation of Chinese Academy Science, 2002.
- [6] 官文江, 何贤强, 潘德炉, 等. 渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算[J]. *水产学报*, 2005, 29(3): 367-372.
GUAN Wenjiang, HE Xianqiang, PAN Delu, et al. Estimation of ocean primary production by remote sensing in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Fishery of China*, 2005, 29(3): 367-372.
- [7] 张丽彬, 王启山, 丁丽丽, 等. 富营养化水体中浮游动物对藻类的控制作用[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 64-67.
ZHANG Libin, WANG Qishan, DING Lili, et al. Controlling of phytoplankton by zooplankton in eutrophic waters[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 64-67.
- [8] LORENZEN C J. Surface chlorophyll as an index of the depth, chlorophyll content and primary productivity of the euphotic layer[J]. *Limnology and Oceanography*, 1970, 15: 479-480.
- [9] EPPLEY R W, STEWART E, ABBOTT M R. Estimation ocean primary production in the ocean from satellite chlorophyll, introduction to regional differences and statistics from the southern California bight[J]. *Journal of plankton Research*, 1985, 7(1): 57-70.
- [10] LONGHURST A, SATHYENDRANATLL S, PLATT T, et al. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data[J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(6): 1245-1271.
- [11] ANTOINE D, ANDRE J M, MOREL A. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite(Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 57-69.
- [12] BEHENFELD M J, FALKOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1-20.
- [13] 丛丕福, 牛铮, 曲丽梅, 等. 利用海洋卫星HY-1数据反演叶绿素a的浓度[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(11): 106-110.
CONG Pifu, NIU Zheng, QU Limei, et al. Retrieval of Chlorophyll a Concentration From Ocean Satellite HY-1[J]. *High Technology Letters*, 2005, 15(11): 106-110.
- [14] 朱明远, 毛兴华, 吕瑞华. 黄海海区的叶绿素a和初级生产力[J]. *黄渤海海洋*, 1993, 11(3): 38-51.
ZHU Mingyuan, MAO Xinghua, LV Ruihua. Chla and primary production in Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 1993, 11(3): 38-51.

Remotely sensed estimation models of ocean primary production

CONG Pifu¹, WANG Chenli², QU Limei¹, LIU Changan¹

1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. China national institute of cultural property, Beijing 100101, China

Abstract: Estimation of ocean primary production(OPP) is an important issue in fishery resource management, carbon cycle and global environment change research, accurately estimate model of OPP can be directly used for decision make in fishery and ocean management, satellite remote sensing technology have capability of providing dynamic eco-environmental parameters of land surface at large scale in time, therefore it has been widely used in estimation of OPP, This paper introduced the concept of estimation of OPP using satellite remote sensing firstly, a literature review was conducted on empirical model and physiological process models include BPM (Bedford Productivity Model), LPCM(Laboratoire de Physique et Chimie Marines)and VGPM(Vertically Generalized Production Model). And then a experiment was implemented in Bohai Sea and Yellow sea, ocean product of MODIS(AQUA) such as SST(sea surface temperature), water-leaving radiance Lw, ocean water diffuse attenuation parameter Kd490 and PAR (Photosynthetically Active Radiation) were employed for computation of model parameters such as maximum Carbon fixation rate within a water column, physical depth receiving 1% of sea surface daily PAR as well as chlorophyll concentration, and VGPM, an ecological process model driven by remote sensing was adopted for estimation of OPP in Bohai Sea and Yellow sea;the result indicate that OPP in Bohai Sea and Yellow sea estimated from VGPM model can reflect the distribution and variation of OPP in different areas, and OPP in the study area gradually decreases from offshore to the open sea. OPP in Bohai Sea is a little higher which meet the former survey.

Key words: satellite remote sensing; ocean primary productivity; model; MODIS; VGPM