# 基于 VGPM 的中国近海净初级生产力的时空变化研究

### 丁庆霞,陈文忠

(中国海洋大学信息科学与工程学院/海洋遥感研究所 青岛 266100)

摘要:海洋初级生产力对影响全球碳循环有显著作用,在一定程度上控制着海一气界面 CO2 的交换,是全球气候变化中的重要课题。随着科学技术的发展,卫星遥感资料已经被广泛地应用于海洋初级生产力研究,文章利用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星遥感传感器资料(2003—2014年)分析我国近海海域海洋净初级生产力在近十几年的月度、季度、年度变化趋势,以期对相关研究提供参考。

**关键词:**净初级生产力;卫星遥感;海洋环境;气候变化;中国近海 中图分类号:P7 文献标志码:A 文章编号:1005-9857(2016)08-0031-05

## Spatial-Temporal Variation of China's Offshore Net Primary Production Based on Vertically Generalized Production Model

#### DING Qingxia, CHEN Wenzhong

(Ocean University of China Institute of Information Science and Engineering/Institute of Marine remote sensing,Qingdao 266100,China)

Abstract: Ocean primary production is an important study in the global change. It has a significant effect on the global carbon cycle, and to a certain extent, controls the air-sea interface  $CO_2$  exchange. With the development of science and technology, satellite remote sensing data has been widely applied to the study of ocean primary production. The paper analyzed monthly, quarterly, annual change trend of China's offshore net primary production in more than ten years, by using the MODIS (2003—2014) satellite remote sensor data, to provide reference to relative researches. Key words: Net primary production, Satellite remote sensing, Marine environment, Climate change, China's Offshore

1 引言

随着我国资源与环境问题的日益严重,对海洋 初级生产力(Ocean Primary Production, OPP)的研

究越来越受到重视,尤其是自 1981 年"西太平洋海 洋生物学方法论研讨会"之后,我国海洋初级生产 力研究迅速开展<sup>[1]</sup>,逐渐积累大量的现场观测资料, 对不同海域浮游植物的分布特征以及理化因子都

收稿日期:2016-02-16;修订日期:2016-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41375142).

作者简介:丁庆霞,硕士研究生,研究方向为海洋探测技术,电子信箱:dingqingxia0114@126.com

有一定的认识,取得了许多研究成果。

海洋初级生产力一般是指在单位面积上水柱内海 洋浮游植物光合作用的能力,一般以每天或者每年单 位面积上产生的碳量即 mg/(m<sup>2</sup> · d)或 g/(m<sup>2</sup> · a)来 表示,是描述海洋生态系统和环境特征的重要参数,对 海洋生态系统、环境特征、海洋生物地球化学循环 和全球气候变化等都具有非常重要的研究意义<sup>[2]</sup>。 除此之外,海洋初级生产力研究也可以为海洋生态 系统的结构与功能状况,渔业资源的生产潜力、合 理开发与可持续利用,海洋健康状况的分析评价以 及赤潮的监测与预报等提供有力的科学依据。净 初级生产力(Net Primary Production,NPP)是由光 合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的 剩余部分。

船测海洋初级生产力具有时间短、不连续、范 围小以及资金耗费大的特点,随着诸多海洋水色卫 星的相继发射,出现多种监测海洋水色的水色辐射 计,如美国宇航局于 1997 年发射的"海星"(SeaStar)上装载的 8 个波段的宽视场海洋观测传感器 (SeaWiFS),1999 年发射的"地球观测系统"(EOS-AM/TERRA)和 2002 年发射的"地球观测系统"(EOS-AM/TERRA)和 2002 年发射的"地球观测系统" (EOS-PM/AQUA)卫星上装载的 36 个波段的中等 分辨率成像光谱仪(MODIS),利用卫星遥感监测海 洋水色参数具有观测范围大、时效性强等优势,进 而有利于利用这些参数根据初级生产力模式估算 出海洋初级生产力。

国内不少学者已经对海洋初级生产力进行调查 研究,如,李国胜等<sup>[2]</sup>发现 1998 年整个东海海域初级 生产力的逐月变化具有明显的双峰特征,并且海洋初 级生产力日平均值为 560.03 mgC/(m<sup>2</sup> · d);费尊乐 等<sup>[3]</sup>发现渤海海域海洋初级生产力呈现春季最高、 秋季次之、夏季较低、冬季最低的趋势,并且发现其 值与海洋浮游植物数量、海水消光系数和透明度、 海表面辐射照度、日射量等因子有关;官文江等<sup>[4]</sup>发 现东海、黄海和渤海初级生产力季节变化明显,东 海出现最大初级生产力为 5 月、最小为 2 月,黄海和 渤海出现最大初级生产力为 8 月、最小为 2 月,而 在大洋区初级生产力的季节变化相对较小;邹亚荣 等<sup>[5]</sup>综述近年来海洋初级生产力研究进展,并且总 结在各种尺度上海洋初级生产力的算法; 宁修仁 等<sup>[6]</sup>概括描述我国渤海、黄海、东海海域初级生产力 的变化以及对渔业生产量的潜在评估; 檀赛春等<sup>[7]</sup> 从海洋光学特性入手, 讨论大气校正过程, 阐述一 些现有的海洋初级生产力模式, 研究中国近海 (2003—2005年) 海洋初级生产力分布, 发现北黄 海、南黄海和东海南部的初级生产力分和, 发现北黄 海、南黄海和东海南部的初级生产力分别在春季和 秋季出现两次峰值且春季高于秋季, 南海分别在冬 季和夏季出现两次峰值且冬季高于夏季, 渤海和东 海北部在6月呈现单峰分布; 赵辉等<sup>[8]</sup> 综述近十几 年有关中国近海浮游植物叶绿素浓度、初级生产力 时空变化和影响机制的研究进展。

国际方面, Eppley 等<sup>[9]</sup>于 1985 年利用经验算 法建立叶绿素浓度、温度及日照周期之间的经验关 系式来估算海洋初级生产力,建立基于叶绿素浓度 的 Eppley-VGPM 模式;Behrenfeld 等<sup>[10]</sup>于 1997 年 归一化叶绿素浓度、光照周期和光学深度后,发现 实测初级生产力的垂直分布呈相同形式,因此建立 VGPM(Vertically Generalized Production Model) 估算海洋初级生产力;Dugdale 等<sup>[11]</sup>利用遥感海表 温度(SST)数据来推求表层的分布,进而估算新生 产力; Morel 等<sup>[12]</sup> 建立估算海洋初级生产力的光-生 物模型;Zhao 等<sup>[13]</sup>利用实测数据和卫星遥感数据 分析厄尔尼诺效应对越南东部外海海域夏季上升 流叶绿素浓度高值分布的影响,并目结合 1998 年 南海夏季风极弱的特点,总结该年该海域叶绿素浓 度异常低值的主要原因;Chen 等<sup>[14]</sup>分析南海北部 海域基于氮的新生产力和初级生产力的调查,得出 南海初级生产力的高值主要集中在冬季并广泛分 布在大陆架海域和主要上升流区的结论。

2 数据与方法

#### 2.1 数据

MODIS 是搭载在 EOS 上的最重要的星载仪器,TERRA 和 AQUA 两颗卫星每天接收到最少两次白天、两次黑夜的监测数据。MODIS 具有从可见光到热红外的 36 个波段的光学通道,可以同时获取地球陆地、大气、海洋、冰川等环境的信息,带宽范围为 0.405~14.385 µm,其中 27 个波段用于大气遥感、其余 9 个波段用于水色遥感<sup>[15]</sup>。MODIS

的1~2 波段的空间分辨率可达 250 m;3~7 波段的 空间分辨率为 500 m;8~36 波段的空间分辨率为 1 000 m,扫描刈幅达 2 330 km,每两天可以覆盖全 球。随着近年来水色辐射计发展迅速,MODIS 具 有分辨率高、重复访问周期短和获取快速等优点, 被广泛地应用于海洋环境监测中。

#### 2.2 方法

本文采用的 NPP 数据产品模型为 VGPM,其 表达式如下:

$$NPP = 0.661 \ 25 \times P^{B}_{opt} \times \frac{P_{ar}}{P_{ar} + 4.1} \times Z_{eu} \times C_{bl} \times d_{\ell}$$
(1)

式中:NPP 为净初级生产力[mgC/(m<sup>2</sup> • d)],  $P_{ar}$ 为海表面光合有效辐照度[Ein/(m<sup>2</sup> • d)],  $C_{hl}$ 为叶绿 素-a浓度(mg/m<sup>3</sup>),  $p_{opt}^{B}$ 为最大光合作用速率,  $Z_{eu}$ 为真光层深度(m),  $d_{l}$ 为光照时长(h)。

通常利用纬度和时间计算光照时长。Zeu采用 Morel等<sup>[16]</sup>的参数化方案来计算,其中C<sub>TOT</sub>代表真 光层叶绿素浓度,表达式如下:

$$Z_{\rm eu} = \begin{cases} 200.\ 0 \times (C_{\rm TOT})^{-0.\ 293}, Z_{\rm eu} > 102\\ 568.\ 2 \times (C_{\rm TOT})^{-0.\ 746}, Z_{\rm eu} \leqslant 102 \end{cases}$$
(2)

$$C_{\text{TOT}} = \begin{cases} 40.2 \times (C_{\text{hl}}^{0.507}), C_{\text{hl}} \ge 1.0\\ 38.0 \times (C_{\text{hl}}^{0.425}), C_{\text{hl}} < 1.0 \end{cases}$$
(3)

 $p_{opt}^{B}$  是 海表温度(*sst*)的 7 次方的高阶函数,其表达 式如下:

$$\begin{split} P^{\rm B}_{\rm opt} &= 1.\,295\,\,6 + 2.\,749 \times 10^{-1} \times 6.\,17 \times 10^{-2} \times {t_{\rm ss}}^2 - \\ &2.\,05 \times 10^{-2} \times {t_{\rm ss}}^3 + 2.\,462 \times 10^{-3} \times \\ &t_{\rm ss}{}^4 - 1.\,348 \times 10^{-4} \times {t_{\rm ss}}^5 + 3.\,413\,\,2 \,\times \end{split}$$

$$10^{-6} \times t_{\rm ss}{}^{6} - 3.27 \times 10^{-8} \times t_{\rm ss}{}^{7}$$
 (4)

因此,由式(1)可以看出 NPP 的不确定性取决 于 5 个相关参数,即叶绿素浓度( $C_{hl}$ )、光合有效辐 照度( $p_{ar}$ )、光照时长( $d_l$ )、真光层深度( $Z_{eu}$ )和最大 光合作用速率( $p_{opt}^{B}$ )。本文涉及的海洋净初级生产 力(NPP)、叶绿素浓度( $C_{hl}$ )、海表温度( $t_{ss}$ )、光合有 效辐射照度( $p_{ar}$ )均来自美国俄勒冈州立大学的 AQUA/MODIS 传感器的三级月平均 HDF 数据产 品,其空间分辨率均为 9 km×9 km、时间分辨率均 为逐月,且空间范围为 3°N—45 °N、105°E—131 °E, 时间范围为 2003 年 1 月至 2014 年 12 月。利用这 些卫星数据对我国近海海域海洋净初级生产力 (NPP)近十几年的变化趋势进行分析,从而进一步 了解我国海域相关状况。

#### 3 数据分析

研究区域为我国近海(3°N-45°N、105°E-131°E),利用 MODIS 的逐月卫星数据(2003-2014 年)来分析研究我国近海海域净初级生产力的变化 趋势,主要统计我国近海海域净初级生产力按照 年、季、月变化的时空分布特征。

#### 3.1 月际变化特征

我国近海各海域相对应的月平均净初级生产 力的随月变化如图1所示。



图 1 2003—2014 年我国近海各海域 月平均净初级生产力变化(MODIS)

从图 1 可以看出在 2003—2014 年间:渤海海洋 净初级生产力的随月变化规律表现为 3—6 月迅速 上升并在 6 月达到全年最大值,6—8 月缓慢下降, 8—9 月略有下降,9 月至翌年 1 月迅速下降并在 1 月达到最小值,1—2 月基本保持不变,全年仅在 6 月出现 1 次峰值,表现出良好的单峰分布,该分布与 檀赛春的结论一致<sup>[7]</sup>。

黄海海洋净初级生产力的随月变化规律表现为3-6月迅速上升并在6月达到最高值,6-8月 呈现下降趋势,8-9月略有上升,9月至翌年1月迅 速下降并在1月达到最小值,1-2月几乎不变,出 现两次峰值分别在6月和9月,且6月峰值高于9 月,具有明显的双峰特征,该特征与杨曦光的结论 基本一致<sup>[17]</sup>。

东海海洋净初级生产力的随月变化规律表现 为 3-5 月逐渐上升并在 5 月达到最大值,5-8 月 逐渐下降,8—10月逐渐上升,而10月至翌年1月 又有下降,1—2月略有上升,也出现两次峰值,分别 在5月和10月,且5月峰值高于10月,分布为冬季 最低、春季迅速上升达到最大值、夏季略有下降、秋 季又略有回升,该分布与李国胜的结论一致<sup>[2]</sup>。

南海海洋净初级生产力的随月变化规律表现 为 3—5 月逐渐下降,5—10 月变化较平稳,10 月至 翌年1月逐渐上升,1—2 月略有下降,两次峰值分 别出现在1月和7月且1月峰值高于7月,与檀赛 春等的结论一致<sup>[7]</sup>。

3.2 季节变化特征

我国近海海域 2003—2014 年 4 个季节相对应 的季平均净初级生产力水平分布和变化如图 2 所示。





从整体来看,我国近海海域的净初级生产力分 布呈现出沿岸明显高于外海且由近岸向外海带状 递减趋势。明显的高值区位于长江口外侧向外海 伸出的三角形状(因该区受长江径流影响非常显 著,而外海开阔海域由于低营养盐其生产力都比较 低),并且渤海、黄海和东海明显高于南海,该变化 特征与檀赛春等的结论一致<sup>[7]</sup>。

而从图 2 来看,我国近海不同海域的净初级生 产力的季节分布状况分别为:冬季呈现东海最大、 渤海最小,夏季呈现渤海最大、南海最小,春、秋两 季都呈现黄海最大、南海最小。具体分析为在 2003—2014年间。

总的来看,渤、黄海海域季节变化规律一致,变 化趋势由大到小依次为夏季、秋季、春季、冬季,即 从冬季到夏季整个海域内季平均净初级生产力值 逐渐上升并达到最大值,从夏季到秋季开始逐渐下 东海海域季节变化趋势由大到小依次为春季、 夏季、秋季、冬季,即整个海域内净初级生产力季平 均值的最大值出现在春季,并且从春季到冬季逐渐 降低且在冬季达到最小值。

南海海域净初级生产力季平均值的最大值出 现在冬季,并且从冬季到夏季逐渐降低,从夏季到 秋季开始缓慢回升。南海与其他三大海域有明显 的季节差异,其原因可能是受东北季风和营养盐浓 度等方面影响,从而使浮游植物在冬季大量繁殖。

除南海海域外,其他海域的净初级生产力在春季、夏季和秋季都比较高而冬季最低,其原因可能与光照、海温、海水透明度、营养盐、季风、长江冲淡水、上升流以及水团特性有很大关系,不同海域控制海洋净初级生产力变化的主要因素也有所不同<sup>[8]</sup>。

#### 3.3 年际变化趋势

我国近海 4 个海域 2003—2014 年间年平均净 初级生产力随年变化分布如图 3 所示。



图 3 我国近海各海域年平均 净初级生产力的年际变化



图 3 我国近海各海域年平均 净初级生产力的年际变化(续)

其中,Y 为趋势函数,R 在 95%的置信区间。 可以看到:黄海和渤海海域的变化趋势相关系数分 别为 0.748 7 和 0.846 5,说明均呈现显著性上升趋 势,并且每年黄海的净初级生产力值都比渤海大; 东海的变化趋势基本保持不变,但由于其相关系数 为 0.045 8,说明该不变趋势呈现微相关,年均值在 800 mgC/m<sup>2</sup>/d 左右,而 2006 年的年平均值异常高 于其他年份,可能是由于在该年东海海域频繁暴发 赤潮;南海的变化趋势为略微下降,但由于其相关 系数为 0.273 2,说明该下降趋势呈现微相关,年均 值约在 350 mgC/m<sup>2</sup>/d 左右。

#### 参考文献

- [1] 宁修仁.西北太平洋区域初级生产力和对我国海洋初级生产力研究的建议[J].东海海洋,1984,2(3):78-83.
- [2] 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[J].地理学报,2003,58(4):483-493.

- [3] 费尊乐,毛兴华. 渤海生产力研究 Ⅱ. 初级生产力及潜在渔获 量的估算[J]. 海洋学报,1988,10(4):481-489.
- [4] 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.
- [5] 邹亚荣,马超飞.遥感海洋初级生产力的研究进展[J].遥感信 息,2005,11(2):58-61.
- [6] 宁修仁,刘子琳. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的 评估[J].东海海洋,1995,17(3):72-84.
- [7] 檀赛春,石广玉.中国近海初级生产力的遥感研究及其时空演 化[J].地理学报,2006,61(11):1189-1199.
- [8] 赵辉,张淑平.中国近海浮游植物叶绿素、初级生产力时空变 化及其影响机制研究进展[J].广东海洋大学学报,2014,34 (1):98-104.
- [9] EPPLEY R W, STEWART E, ABBOTT M R. Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll introduction to regional differences and statistic for the Southern California Bight[J]. J Plankton Res, 1985, 7:57-70.
- [10] BEHRENFELD M J, FALLOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration [J]. Limnol. Oceanogr, 1997, 42(1):1-20.
- [11] DUGDALE R C. Estimating new production in the equatorial Pacific Ocean at 150 °C [J]. J. Geophy. Res., 1992, 97 (CI): 681-686.
- [12] MOREL A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications [J]. Prog Oceanog, 1991, 26:263-306.
- [13] ZHAO H, TANG D L. Effect of 1998 El Nino on the distribution of phytoplankton in the South China Sea[J]. J Geophys. Res, 2007, 10, 112-131.
- [14] CHEN Y L L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea[J]. Deep-Sea Research 1,2005,52:319-340.
- [15] 曲利芹,管磊.SeaWiFS和 MODIS 叶绿素浓度数据及其融合数据的全球可利用率[J].中国海洋大学学报,2006,36(2): 321-326.
- [16] MOREL A, BERTHON J F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer; relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications [J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34(8); 1545-1562.
- [17] 杨曦光.黄海叶绿素及初级生产力的遥感估算[J].中国科学 院海洋研究所,2013,21(3):142-153.