

文章编号:1000 - 0615(2005)03 - 0367 - 06

渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算

官文江^{1,2,3}, 何贤强³, 潘德炉³, 龚芳³

(1. 华东师范大学地理系, 上海 200062;

2. 上海水产大学大洋渔业遥感及信息中心, 上海 200090;

3. 国家海洋局第二海洋研究所海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: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。利用从 2000 年 1 月 - 12 月的 SeaWiFS 数据反演得到的叶绿素 a 浓度、透明度、辐照度数据,以及同期的 NOAA 数据反演得到的海水水温数据,通过该模型,提取出我国海区的海洋初级生产力的时空分布信息。结果表明,在东海、黄海和渤海初级生产力季节变化明显,在东海,最大初级生产力的月份为 5 月,最小月份为 2 月。而在黄海和渤海,最大初级生产力的月份为 8 月,最小月份为 2 月。在大洋区,初级生产力的季节变化相对较小。与相关的文献资料比较该模型能较好地反映渤、黄、东海的海洋初级生产力的时空分布信息及其变化情况。由于我国海区大部分是二类水体,水光学、水文特性比较复杂,叶绿素浓度等遥感产品的精度有待进一步的提高,叶绿素浓度及其剖面分布估算不准,对整个模式的精度影响很大。同时由于所用的实测数据及其分布区域、时间的限制,以及没有同步数据,对该模型的结果还要经过进一步的检验。

关键词:海洋水色遥感;海洋初级生产力;模型

中图分类号:S932; TP79 **文献标识码:**A

Estimation of ocean primary production by remote sensing in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea

GUAN Wen-jiang^{1,2,3}, HE Xian-qiang³, PAN De-lu³, GONG Fang³

(1. Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Information Center and Remote Sensing for Oceanic Fisheries, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;

3. Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography,

Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Based on historic *in situ* ocean primary production data and other environment data from the southern Yellow Sea and East China Sea and consideration of the processes of phytoplankton photosynthesis, a ocean primary production model was developed through the nonlinear least square method. The fitted model was a function of the sea surface chlorophyll, sea surface irradiance, sea surface temperature and transparency. Since the mean chlorophyll concentration was closely related to surface chlorophyll concentration ($R=0.91$ with data from 242 stations) within the euphotic layer, but neither the total chlorophyll concentration, nor the depth of the euphotic layer did, we introduced another parameter, the transparency which could be derived from SeaWiFS's data to obtain the euphotic depth. The ocean primary production data could be derived from satellite-based data by our developed model without requiring other data as input. Comparing the model derived daily depth-integrated primary production to the measured one showed a very good result. The monthly distribution of ocean primary production in China Sea was computed using the developed model with chlorophyll, transparency and irradiance data derived from SeaWiFS from January to December in 2000 and the corresponding temperature data from NOAA-14. The results showed that there were clear seasonal changes for the primary production in Bohai Sea,

收稿日期:2004-04-28

资助项目:国家 863 计划海洋监测主题资助项目(41322050301);国家自然科学基金资助项目(40006011)

作者简介:官文江(1974-),男,江西余干人,博士研究生,主要从事卫星渔业遥感和地理信息系统方面的研究。E-mail:wjguan@

shfu.edu.cn

Yellow Sea and East China Sea. The primary production reached its highest in May and lowest in February in East China Sea, while it was high in August and low in February in Bohai Sea and Yellow Sea. Since we did not have the synchronous data to evaluate the accuracy of the derivation, this model needs to be examined and modified in the future with more available data.

Key words: ocean color remote sensing; ocean primary production; model

海洋初级生产力对全球碳循环、海洋生态、海洋渔业资源评估等有重要意义^[1,2]。卫星遥感能快速、大尺度地获取叶绿素浓度、海表温度、光合作用有效辐照度、透明度等海洋生态环境数据,并且有一定的精确度^[3,4],是对海洋观测、获取海洋信息不可缺少的手段。

国外海洋初级生产力遥感估算算法较多,主要有经验算法和解析算法。如 Eppley 等^[5]利用经验算法建立叶绿素浓度、温度及日长之间的经验关系式来计算海洋初级生产力,解析算法如 Platt 等^[6]、Morel^[7]的光-生物模型。国内对海洋初级生产力的研究主要集中在船测调查方面^[1,2,8],利用遥感数据反演我国海洋初级生产力的研究较少,主要是外国算法的介绍^[9,10]和对相关算法通过修改部分参数估计方法后的应用^[11,12]。由于我国近海岸海洋生态环境的特点,直接采用国外模型很难较为准确地反映我国海区初级生产力的时空变化,为此,本文将尝试建立适合我国海区特点的初级生产力的遥感模式,并对我国海区的初级生产力进行了遥感估算。

1 材料和方法

1.1 研究海区与数据来源

研究海区为黄海南部和东海海区。收集的数据为 1984 年 8 月、11 月和 1985 年 2 月、5 月黄海南部和东海北部海域的初级生产力及环境要素的实际调查数据^[1],1986 年到 1991 年秋季部分东海的调查数据,1986 年中法两国长江口合作调查、1990 年浙江海岛调查的部分数据,这些数据将用于模式的计算,1984 和 1985 年的数据同时用于结果的分析。对没有温度记录、辐照度记录的站点采用相应的气象数据。遥感数据来自国家海洋局海洋二所卫星地面站接收的 2000 年 1 - 12 月的 SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor,海视宽视场传感器)数据和 NOAA-14 (national oceanic and atmospheric administration satellite 14,美国国家海洋大气管理局)的 AVHRR (advanced very high resolution radiometer,先进甚高分辨率辐射计)数据。

1.2 数据处理方法

卫星遥感得到的是海表层叶绿素浓度,采用调查数据时,表层叶绿素浓度的计算采用下式^[13]:

$$\overline{chla}_{pd} = \frac{\int_0^{zpd} chla(z) dz}{zpd} \quad (1)$$

$$zpd = \frac{zeu}{4.6} \quad (2)$$

式中: \overline{chla}_{pd} 表层叶绿素浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$);真光层深度(m);表层深度(m); $chla(z)$ 为 z 深度下的叶绿素 a 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

叶绿素浓度^[4]、透明度^[4]、太阳辐照度^[14]分别从 SeaWiFS 数据提取,海表水温数据^[15]从 NOAA-14 提取。单位换算采用 $\text{w} \cdot \text{m}^{-2} = 2.77 \times 10^{18}$ 光子 $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{Ein} = 6.022 \times 10^{23}$ 光子。模式参数的求取采用非线性最小二乘拟合^[16]的计算方法进行确定。通过计算每个像素面积^[17]来确定海区的平均值。

1.3 模式获取

按初级生产力的相关概念^[7]有如下关系式:

$$\text{Opp}(z, t) = \text{PAR}(z, t) \times a^*(z, t) \times \overline{chla}(z, t) \times \phi(z, t) \times 12\,000 \quad (3)$$

式中,在 z 深度下 t 时刻对应变量为 PAR (photosynthetic available radiation):光合作用有效辐射,单位为 $\text{Ein} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;由于浮游植物对光的吸收无方向性,PAR 应指标量辐射; a^* 为平均单位吸收系数,单位为 $\text{m}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$; ϕ 为光子利用效率即每摩尔光子所合成的摩尔碳量 ($\text{mol C} \cdot \text{Ein}^{-1}$),12 000 是用于将 mol C 换算成 mg C ; Opp (ocean primary production):海洋初级生产力,单位为 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

按式(3),日平均量子产量 $\overline{\phi}$ ($\text{mol C} \cdot \text{Ein}^{-1}$) 的计算如下:

$$\overline{\phi} = \frac{\iint P(z, t) dz dt}{\iint a^*(z, t) \overline{chla}(z, t) \text{PAR}(z, t) dz dt} \quad (4)$$

量子产量是生物内在生理和外环境综合作用的结果,在量化时通常采用光照度、温度和营养盐作为主要因子。由于营养盐通过遥感较难得

到,为此加入了叶绿素 a 浓度作为一个影响因子。按式(4),求得量子产量,经过对研究区域的数据分析^[16]得出如下关系:

$$\phi = (0.11 - 0.0371g(PAR)) \times F_x \times \frac{chla_{sat}}{chla_{sat} + X} \quad (5)$$

式中:函数采用下列结果^[18]:

$$F_x = \begin{cases} 1.13 & \text{当 SST} < -1.0 \\ \prod_{i=1}^8 A_i SST^{i-1} & \text{当 } -1.0 < SST < 29 \\ 4.0 & \text{当 SST} > 29 \end{cases} \quad (6)$$

A_i 为常数^[18],SST为海表温度,PAR为日平均光合作用有效辐射由遥感模式计算出, $chla_{sat}$ 为卫星遥感叶绿素 a 的浓度($mg \cdot m^{-3}$), X 采用下式计算:

当 $chla_{sat} < 1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时 $X = 0.3$;

当 $chla_{sat} > 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时 $X = 2.5$;

当 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} < chla_{sat} < 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时

$$X = 0.3 + (chla_{sat} - 1.5) \times 2.2 / 8.5$$

按式(4),由于不能得到剖面数据,所以采用平均值, a^* 取 $0.016 \text{ m}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ^[7]。分析表明,表层叶绿素浓度与真光层深度的关系并不存在,

这与 Morel 等^[13]结果不同。因此,采用透明度与真光层深度的关系^[4]:

$$Z_{eu} = 2.53 \times sd \quad (7)$$

式中:sd 是遥感所得的透明度^[4],则:

$$Opp = Coe \times (0.11 - 0.0371g(PAR)) \times F_x \times chla_{eu} \times sd \times PAR \times L \times \frac{chla_{sat}}{(chla_{sat} + X)} \quad (8)$$

其中, Coe 等于 11.8722, L 为日长, $chla_{eu}$ 利用下式计算:

$$chla_{eu} = 0.9899 \cdot chla_{sat}^{0.734} \quad (R = 0.91, n = 242) \quad (9)$$

2 模式拟合结果

利用 1984 年 8 月、11 月和 1985 年 2 月、5 月黄海南部和东海北部海域的环境要素调查数据代入式(8),计算结果与实测数据进行比较图 1 - a,结果较好 ($R = 0.95$, $n = 242$,在 $\alpha = 0.001$ 下显著)。经式(1)所得的结果与卫星遥感的结果相当,用式(1)、式(9)估算真光层内的平均叶绿素 a 浓度后,其它数据同上代入式(8)计算得到图 1 - b,图 1 - b 结果也较好 ($R = 0.92$, $n = 242$,在 $\alpha = 0.001$ 下显著),分析表明模式(8)是可信的。

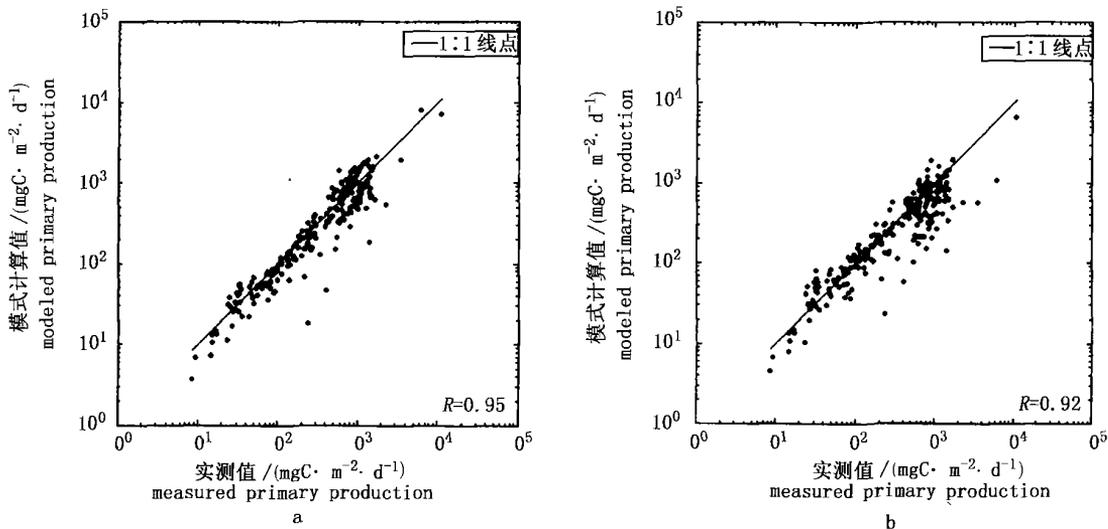


图 1 模型计算与实测结果的比较

Fig. 1 Comparison of measured and model daily depth-integrated primary production

3 模式的应用

利用 2000 年 1 - 12 月 SeaWiFS 资料提取的叶绿素浓度、辐照度、透明度数据和同期 NOAA-14 水温数据,应用模式(8)估算得到 12 个月的初级生产力分布图,图 2 是其中四幅,分别用于代表冬、春、夏和秋。图 3 分别对渤海(以渤海海峡为

界)、北黄海(34°N 以北的黄海)、南黄海(34°N 以南,长江口区到济洲岛连线以北)、东海北部(长江口区到济洲岛连线以南、30°N 以北、126°52' E 以西)、台湾岛以东区[为点(122°E, 24°N)、(122°E, 18°10' N)、(128°42' E, 18°10' N)、(128°26' E, 24°N)所构成的海域,陆地除外]海区计算的 2000 年月平均初级生产力。

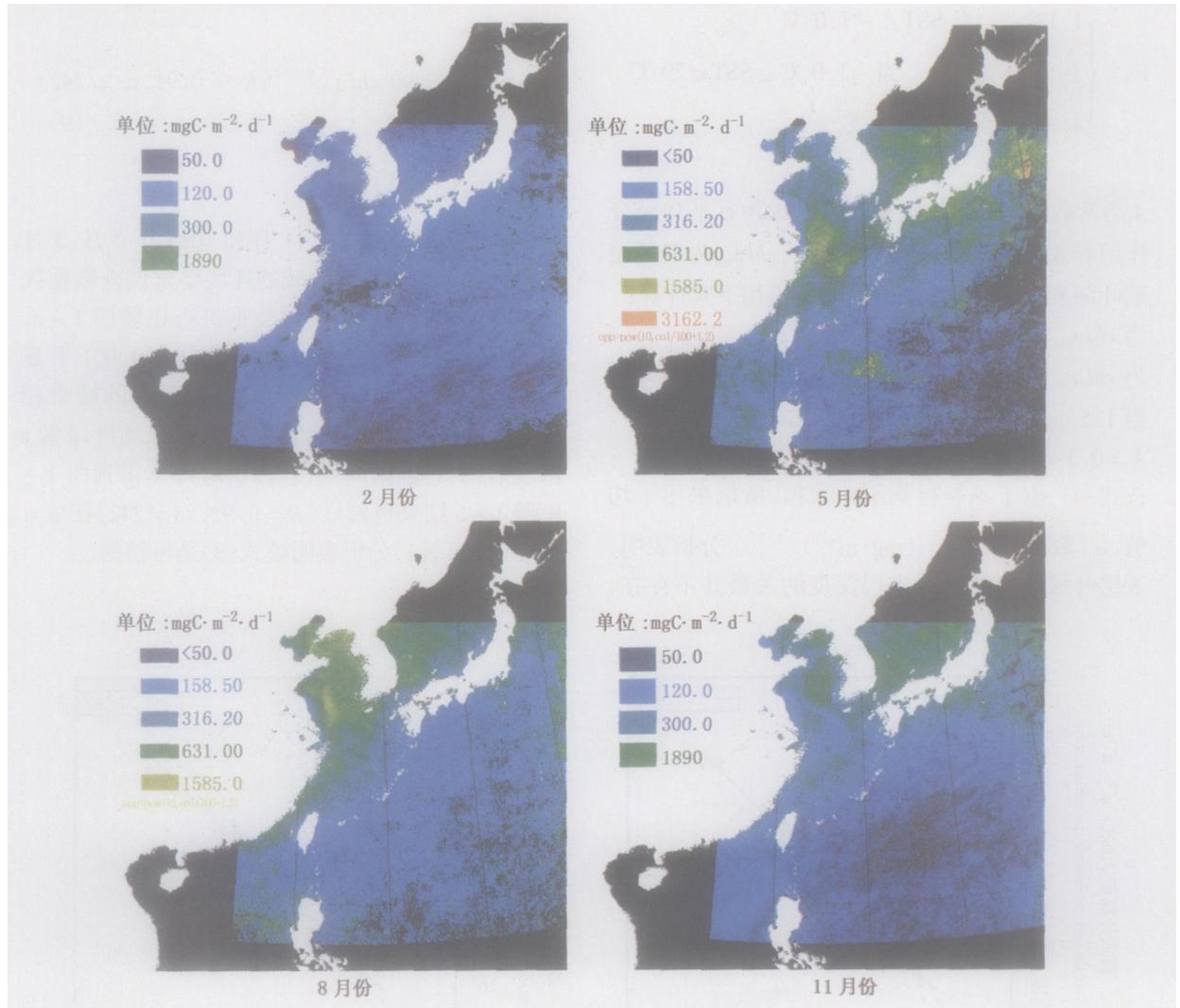


图 2 2000 年中国海区初级生产力分布图

Fig. 2 The distribution of oceanic primary production in the China Sea in 2000

从图 2 来看,大洋区的初级生产力年变化相对较少,主要在 $50 \sim 250 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。从 2、5、8、11 月的大体分布上来看初级生产力以 5 月份较高、其次为 8 月份,11 月份为最低,但变化幅度小。与在图 3 中的台湾岛以东海区的变化相似。对于渤海海区,初级生产力最低月份为 2 月,3、4 月份开始升高,5 月份为全年的第一个次高

值,随后 6 月份有所下降,7、8 月份又开始升高并达到全年最高值,9、10 月份开始回落,但 11 月份略有回升,这种分布变化和有关文献描述相近^[2]。黄、东海北部海域初级生产力分布从图 2、图 3 来看:冬季(2 月份)值普遍较低,且基本上不出现高值区,主要影响因子为温度和海水的透明度,这时期水温低,透明度也较小。春季(5 月份)初级生

产力高值分布区仅见于黄海南部和东海北部部分海区,而黄海北部不出现,这与北方春季水温仍较低有关,在春季东海北部初级生产力达到全年最高值。夏季黄海初级生产力整体提高,并达到全年最高值,东海北部相对 5 月份有所下降,为全年次高值,从图 3 看,8、9、10 月份,黄海和东海北部海区初级产力依次有所下降。秋季(11 月)总体上比夏季降低,但是相对于 10 月有所回升,局部区域出现次高值,高值分布区明显向东南移和分布趋势大体上随水深度的增加而增加,这可能和近岸的沿岸流水温较低及透明度的变化有关。

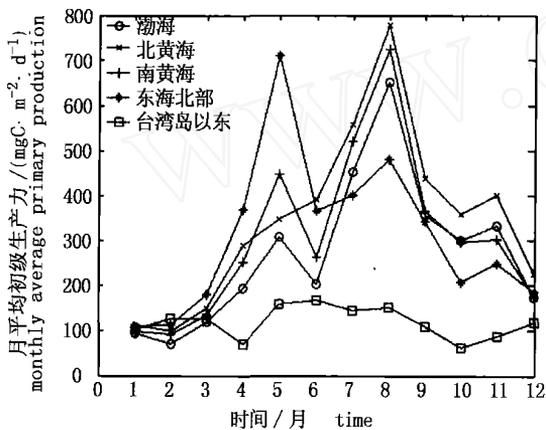


图 3 2000 年各海区月平均初级生产力的变化

Fig. 3 The changes of monthly average primary production for different sea areas in 2000

在渤海、黄海、东海近岸河口区初级产量值全年普遍较低,这与水体悬浮泥沙含量高,水体的透明度低有关,也受水温较低等因素的影响。通过与渤、黄、东海北部初级生产力的分布等值线图^[1,8]的对比分析发现:采用以上模式计算获得的相应海区、月份的初级生产力的分布能在一定程度上反映初级生产力的时空分布与变化。但是春夏季在东海北部海区与南黄海海区低估可能性较大,主要原因和下层高叶绿素浓度区卫星不能探测到有关,尽管这样,变化的基本趋势还是能反映出来。

4 讨论

模式(8)存在的问题主要表现在由于卫星所测量的叶绿素 a 的浓度限于表层,而实际上,叶绿素 a 浓度的空间分布是非均匀的,从表层叶绿素 a 的值很难获得其剖面信息,采用叶绿素 a 浓度

均匀分布的方式进行计算会引起估算错误,如测站:4044(8 月)^[11]表层浓度为 0.48(单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,以下同),20m 层浓度为 11.07。相应采用表层叶绿素浓度计算的初级生产力也严重低于实测数据如 4044 站:遥感模式估算的初级产量为 1183.08(单位为 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,以下同),实测数据为 6132.57。上述情况在 5 月、8 月占多数,造成低估的原因一方面是该时期水层稳定会使生物量的剖面分布不均匀,而且表层叶绿素浓度值常常很低,生物量的剖面分布峰值得不到反映,造成对生物量的低估,另一方面同该时期光照强、真光层深下层浮游植物的初级生产量贡献加大,从而使得这一低估得到加强。

采用式(9)计算,会使得用小于 0.95 的表层叶绿素浓度估算真光层平均浓度时,真光层平均浓度会大于表层浓度,大于 0.95 的会小于表层叶绿素浓度值。在秋冬季,由于叶绿素浓度分布比较均匀,所以在秋冬季不宜采用式(9)计算,可直接采用表层叶绿素浓度作为真光层平均叶绿素浓度进行计算。

通常认为温度的作用可能与暗反应密切相关,温度也和营养物(如 NO_3^-)水平相关联,以及会影响呼吸作用,物种的更替等,因此温度的作用是复杂的。由于数据的限制(温度范围在 5 ~ 29 之间),对温度的影响作用本文采用了 Behrenfeld 等^[18]的结果。

由于所用实测数据及其分布区域、时间的限制,以及没有同步数据,对本模式不能给出更深入的讨论,对其结果还要经过进一步的检验。同时我国海区大部分是二类水体,水光学特性比较复杂,叶绿素浓度等遥感产品的精度有待进一步的提高,叶绿素浓度及其剖面分布估算不准,对整个模式的精度影响很大如 11 月(图 2)在长江口区由于叶绿素估算偏高,有一相对较高值区,平均初级生产力为 $305 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 不太合理。水文相当复杂的特点也增加了反演初级生产力的难度,造成模式的发散。浮游植物对环境因子的响应存在相当的差异性,如温度季节变化较小的区域,低温或高温所得出的效率可能会比模式所计算的要高,因而参数具有区域性。建议加强同生物、生态、物理海洋等学科的结合,因为要利用遥感数据反演海洋初级生产力,除遥感等技术过程外,还必须理解海洋中的生物过程、海洋中的物理化学过

程:进行利用遥感数据提取海洋区域性结构、特点方面的研究,为参数的区域化提供依据;建立基础数据库及其动态更新机制,通过提供区域性、结构性参数和数据控制^[15]来提高估算的精度。

海洋二所档案室同志提供有关调查数据资料,黄海清、毛志华帮助数据处理和上海水产大学陈新军教授对文章作若干修改,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 宁修仁,刘子琳,史君贤. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估[J]. 海洋学报,1995,17(3):72-84.
- [2] 费尊乐,毛兴华. 渤海生产力研究[J]. 海洋水产研究,1991,12:55-69.
- [3] 潘德炉,李炎. 海洋光学遥感技术的发展前沿[J]. 中国工程科学,2003,5(3):39-43.
- [4] 何贤强. 利用海洋水色遥感反演海水透明度的研究[D]. 国家海洋局第二海洋研究所硕士论文,2002.
- [5] 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.
- [6] Platt T, Caverhill C, Sathyendranath S. Basin-wide estimates of oceanic primary production by remote sensing: the north Atlantic [J]. J Geophys Res, 1991, 96:15147-15159.
- [7] Morel A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications [J]. Prog Oceanog, 1991, 26:263-306.
- [8] 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):38-50.
- [9] 吴培中. 海洋初级生产力的卫星探测[J]. 国土资源遥感,2000,45(3):7-15.
- [10] 商少凌,洪华生. 海洋初级生产力模式与遥感应用研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2001,40(3):647-652.
- [11] 刘宝银. 应用航天遥感信息对黄、渤海冬季初级生产力的估算[J]. 水产学报,1984,8(3):227-234.
- [12] 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.
- [13] 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]. Limnol Oceanogr, 1989, 34:1545-1562.
- [14] Frouin R. <http://orca.gsfc.gov/seawifs/par/doc/seawifs-par-wfigs.pdf>.
- [15] 毛志华,朱乾坤,潘德炉. 卫星遥感业务系统海表温度误差控制方法[J]. 海洋学报,2003,25(5):49-57.
- [16] 邢书珍,邢天奇. 非线性最小二乘拟合的计算方法[J]. 中国铁道科学,1995,16(3):64-71.
- [17] 梁强. 基于遥感的东海中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.
- [18] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration [J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42(1):1-20.