

# 基于VGPM模型的广西北部湾近岸海洋初级生产力估算

姚焕玫<sup>1</sup>, 龚祝清<sup>1</sup>, 钟炜萍<sup>2</sup>, 文可<sup>1</sup>, 黄以<sup>1</sup>, 纳泽林<sup>1</sup>, 韦毅明<sup>1</sup>

(1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁530004; 2. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 广西北海536000)

**摘要:** 以北部湾近岸海域为研究对象, 基于海洋水质监测数据与海洋初级生产力实测数据, 对VGPM模型各参数分别进行校正, 评估校正后的模型估算精度。结果表明: 通过参数校正能够有效减小初级生产力计算误差。根据校正模型计算可得, 2018年北部湾近岸海洋初级生产力变化范围为101.27~2 161.75 mg C/(m<sup>2</sup>·d), 北部湾近岸海域浮游植物在夏季和秋季对营养盐需求较为明显, 在春季和冬季则无明显需求。

**关键词:** 海洋初级生产力; VGPM模型校正; 叶绿素荧光基线高度; 营养盐

**中图分类号:** P73 X145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)03-0076-10

## 1 引言

海洋初级生产力(Ocean Primary Productivity, OPP)是海洋浮游植物进行光合作用的速率<sup>[1]</sup>, 能够直观地表现海洋浮游植物的生物量, 是评估海洋环境质量的重要因子。传统的OPP现场调查方法需要耗费大量的人力物力, 成本极高<sup>[2]</sup>。随着遥感技术的发展, OPP的调查方法逐渐由随船实测过渡到遥感估算<sup>[3]</sup>。目前用于估算OPP的遥感模型众多, 第三次OPP模型比较计划结果表明<sup>[4]</sup>: 在24个估算模型中, 垂向归纳模型(Vertically Generalized Productivity Model, VGPM)的估算结果最接近均值模型, 说明此模型对全球海洋具有较高的适用性。由于VGPM模型的参数均可由遥感手段直接获取, 因此该模型在国内外诸多海域中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。如李晓玺等<sup>[6]</sup>使用的是中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)数据, 基于VGPM模型估算了渤海辽东湾、莱州湾、渤海湾和秦皇岛附近海域的OPP, 分析其时空分布并研究了海表温度(Sea Surface Temperature, SST)和光照强度对OPP的影响。施益强等<sup>[7]</sup>使用MODIS的月均数据应用VGPM模型反演得到了2003—2012年福建海

域OPP的时空变化特征, 并进一步分析了变化成因。

VGPM模型虽然已经得到了广泛应用, 但由于模型参数较多, 海洋Ⅱ类水体中不同参数的精度对模型估算结果会产生极大的影响<sup>[8]</sup>。Lobanova等<sup>[9]</sup>根据北大西洋站点的实测OPP, 应用VGPM模型与浮游植物吸收系数对该区域的OPP进行估算, 并分析了模型的参数敏感性, 结果表明对VGPM模型估算误差贡献最大的因子为叶绿素浓度。目前研究中叶绿素a最常见的来源是MODIS的叶绿素a产品, 但该产品应用在近岸Ⅱ类水体中表现出普遍的过高反演<sup>[10]</sup>。Ye等<sup>[11]</sup>利用VGPM模型研究了珠江口的OPP分布, 发现传统真光层深度计算方法与实测近岸Ⅱ类水体的真光层深度有较大差别, 这是因为近岸海水的溶解性物质组成复杂, 海洋Ⅱ类水体真光层深度较远洋Ⅰ类海水更小。Kameda等<sup>[12]</sup>分析了海洋的最大光合作用速率, 发现VGPM模型的最大光合作用速率参数没有考虑海洋的叶绿素a浓度, 而叶绿素a浓度是计算最大光合作用速率的重要参数。国内学者李晓玺等<sup>[6]</sup>和施益强等<sup>[7]</sup>对渤海海湾及福建海域等近岸海域应用VGPM模型计算OPP的研究表明, VGPM模型应用于近岸Ⅱ类水体具有一定的可行性。但由于模型参数遥感产品精

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-06-05。

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA281100)。

作者简介: 姚焕玫(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要从事环境遥感与环境规划研究。E-mail: yaohuanmei@gxu.edu.cn

度的不确定性,为提高VGPM模型的估算精度,需进一步探讨通过校正的遥感产品模型参数来提升VGPM模型估算精度。

近年来有关北部湾海域的研究主要集中在海域浮游植物群落结构变化,如庞碧剑等<sup>[13]</sup>在2017年对北部湾枯水期、丰水期和平水期的浮游植物生物量与丰度进行了实地调查。吴易超<sup>[14]</sup>通过对北部湾海域4个航次的监测调查了OPP的分布状况。利用遥感手段估算北部湾近岸海域的OPP尚无文献报道。为研究北部湾近岸海域的OPP分布,考虑各参数在Ⅱ类水体反演中的误差,提高VGPM模型精度,本文以广西北部湾近岸为研究区域,利用海洋水质监测数据校正VGPM模型输入参数精度,结合实测的OPP验证并提高模型估算精度。根据校正后的模型,研究2018年广西北部湾近岸OPP分布,并分析营养盐对OPP的影响,以期为北部湾近岸OPP的准确计算以及海洋Ⅱ类水体OPP的遥感估算提供参考。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 研究区域

广西北部湾海域是位于中国海大陆架西北部

的一个天然半封闭浅海湾,海岸线总长1 628.6 km,海域面积 $1.283 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。以北部湾海岸线为边界,研究范围为 $21^\circ 20' 53'' \sim 21^\circ 54' 29'' \text{ N}$ ,  $108^\circ 4' 52'' \sim 109^\circ 46' 2'' \text{ E}$ ,现场水质监测点位分布见图1。

### 2.2 数据源与处理

研究使用了现场的OPP实测数据、海洋水质监测数据和MODIS数据。其中OPP实测数据用于遥感估算结果的比较和验证,海洋水质监测数据用于验证和校正遥感产品数据精度,遥感数据用于OPP估算建模。遥感数据为SST、光合有效辐射(Photo-synthetically Available Radiation, PAR)、叶绿素a浓度(Chl-a)和水体在490 nm处的漫衰减系数( $K_d_{490}$ ),以上数据均来自Ocean Color网站(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)下载的MODIS L2级产品,空间分辨率为1 km;与遥感产品时间匹配的海洋水质监测数据包括:SST、盐度、营养盐浓度和Chl-a,其中SST通过热敏电阻法测量,盐度由电导率及温度计算获取,硝酸盐与亚硝酸盐使用UV还原与Griess反应法测定,磷酸盐使用磷钼蓝分光光度法测定,氨氮使用荧光邻苯二甲醛法测定。OPP实测时间、海洋水质监测时间及对应的MODIS数据源如表1所示。

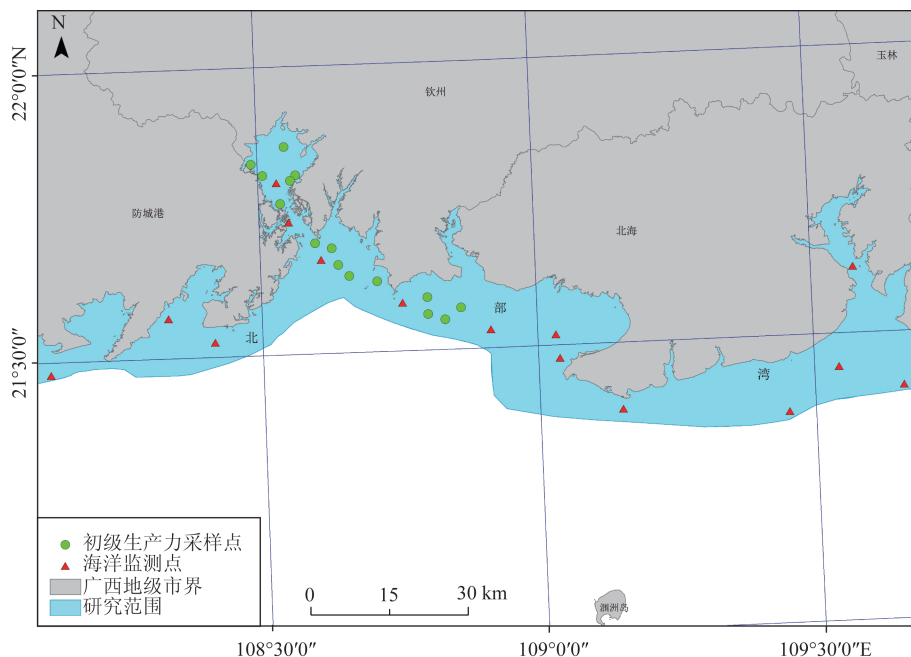


图1 广西北部湾近岸海域研究范围与采样点分布图

表1 现场实测时间及遥感产品数据源

实测数据时间	Ocean Color 遥感产品
2009年1月5日	A2009005060000.L2_LAC_OC.nc AQUA_MODIS.20090105T060008.L2.SST.nc
2009年4月16日	A2009106062000.L2_LAC_OC.nc AQUA_MODIS.20090416T062007.L2.SST.nc
2009年7月14日	A2009195061500.L2_LAC_OC.nc AQUA_MODIS.20090714T061507.L2.SST.nc
2009年11月28日	A2009332060500.L2_LAC_OC.nc AQUA_MODIS.20091128T060500.L2.SST.nc
2018年1月12日	A2018012061000.L2_LAC_OC.nc A2018012061000.L2_LAC_SST.nc
2018年5月2日	A2018122062000.L2_LAC_OC.nc A2018122062000.L2_LAC_SST.nc
2018年9月23日	A2018266062000.L2_LAC_OC.nc A2018266062000.L2_LAC_SST.nc
2018年12月5日	A2018339061500.L2_LAC_OC.nc A2018339061500.L2_LAC_SST.nc

## 2.3 研究方法

VGPM模型是利用1971—1994年1 698个海洋实测站点的大量OPP数据总结得到的。通过输入SST、Chl-a、PAR和真光层深度等参数来估算OPP<sup>[15]</sup>,模型表达式为:

$$PP_{eu} = P_{opt}^B \cdot D_{irr} \cdot \int_{Z=0}^{Z_m} \frac{(1 - \frac{E_z}{E_{max}}) e^{(\beta_z \cdot E_z)}}{(1 - \frac{E_{opt}}{E_{max}}) e^{(\beta_z \cdot E_{opt})}} \cdot C_z \cdot d_z \quad (1)$$

式(1)被Behrenfeld和Falkowski拟合后简化为如下公式:

$$PP_{eu} = 0.66125 \cdot P_{opt}^B \cdot \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \cdot Z_{eu} \cdot C_{opt} \cdot D_{irr} \quad (2)$$

式中: $PP_{eu}$ 为真光层OPP(mg C/m<sup>2</sup>); $P_{opt}$ 为水体最大光合作用速率(mg C·mg/(Chl-a·h)); $E_0$ 为海洋表面日光合有效辐射强度(mol/m<sup>2</sup>); $Z_{eu}$ 表示真光层深度; $C_{opt}$ 为最大光合作用速率所在深度的叶绿素a浓度(mg/m<sup>3</sup>),本文使用表层Chl-a代替; $D_{irr}$ 为光照周期,使用日出日落计算器计算当天的光照时间。 $P_{opt}$ 是一个温度的函数,表达式为:

$$P_{opt}^B = \begin{cases} 1.13 & T \leq -1.0 \\ 4.00 & T \geq 28.5 \\ f(T) & -1.0 \leq T \leq 28.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(T)$ 也是SST的函数,表达式为:

$$f(T) = 1.2956 + 2.749 \times 10^{-1}T + 6.17 \times 10^{-2}T^2 - 2.05 \times 10^{-2}T^3 + 2.462 \times 10^{-3}T^4 - 1.348 \times 10^{-4}T^5 + 3.4132 \times 10^{-5}T^6 - 3.27 \times 10^{-8}T^7 \quad (4)$$

VGPM模型中真光层深度根据式(5)计算得到:

$$Z_{eu} = 4.605/K_{d,490} \quad (5)$$

式中: $K_{d,490}$ 为水体在490 nm处的漫衰减系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型误差分析

根据VGPM模型参数要求,提取MODIS数据中的PAR、Chl-a、 $K_{d,490}$ 和SST数据,经过几何校正、研究区域裁剪和数据转换,根据模型参数计算方法利用SST数据计算海域 $P_{opt}$ ,利用 $K_{d,490}$ 数据计算海域 $Z_{eu}$ ,并构建VGPM模型估算。为评估原VGPM模型估算北部湾近岸Ⅱ类水体的精度,结合2009年钦州湾实测OPP情况<sup>[16]</sup>,使用与钦州湾采样时间匹配的MODIS数据,估算2009年1月5日、4月16日、7月14日以及11月28日OPP,与原位生产力测量和遥感估算数据的对比结果如图2所示。图2表明,应用VGPM模型对钦州湾近岸Ⅱ类水体OPP估算

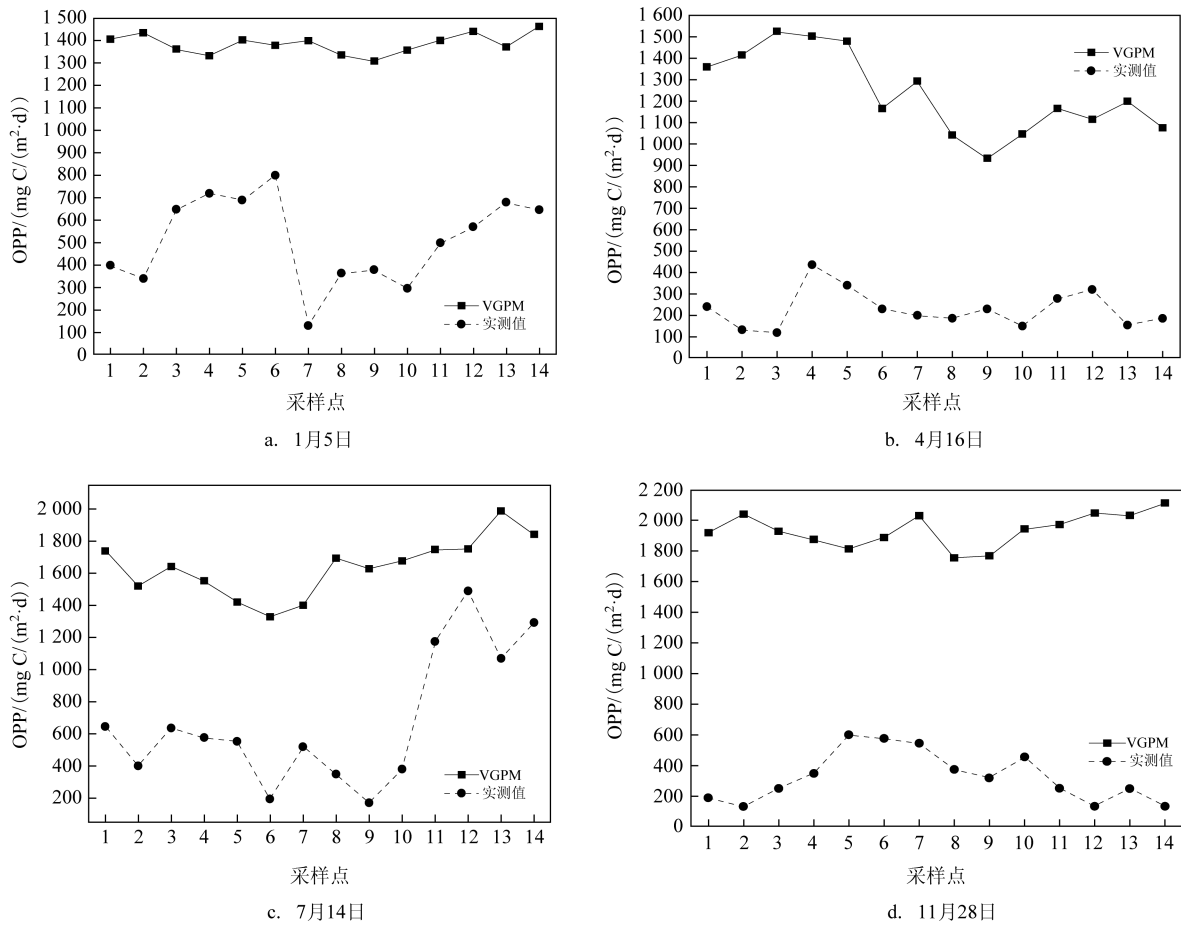


图2 2009年钦州湾OPP对比图

时表现出了明显的过高估算。1月、4月、7月和11月由VGPM模型计算的钦州湾OPP结果分别高出实测平均值 $873.04 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1\,008.09 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1\,089.09 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1\,611.40 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。根据各个采样点OPP对比结果,各月VGPM模型均表现为过高估算。因此,有必要对模型中的各参数进行校正,提高OPP遥感估算的精度。

### 3.2 模型参数敏感性分析

根据模型的计算结果和实测结果分析VGPM模型中各输入参数的敏感性。敏感性分析结果可利用箱线图表示。箱线图中箱体矩形上下边界分别为OPP结果的0.75分位数和0.25分位数,通过保持其余参数不变,改变分析参数的输入值,分析参数变化对模型整体估算结果的影响程度。箱体矩形内的直线为样本的中位数,上、下直线端点分别

为样本的极大值和极小值。上、下外圈符号表示样本的异常值。箱线图中箱体的尺寸和上、下边界的范围越大,表示该参数对模型变化的贡献越大,参数敏感性越高。对VGPM模型在2018年间的模型参数敏感性进行分析,结果如图3所示。2009年间北部湾近岸海域Chl-a浓度均表现出了极高的敏感

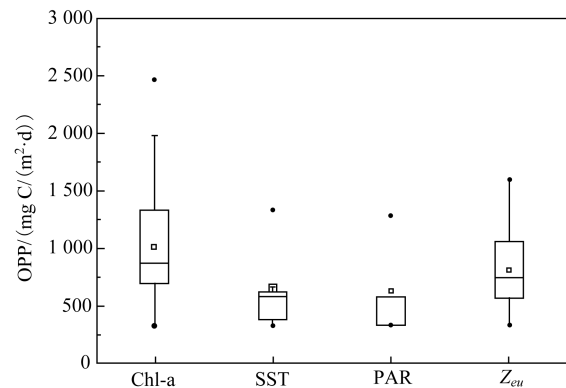


图3 VGPM模型参数敏感性分析结果



性,是模型输入参数中敏感性最强的因子,其次为 $Z_{eu}$ ; SST和PAR也表现出了一定敏感性,但敏感性较低。Chl-a估算范围约为 $350\sim 2\,480\text{ mg C}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,是VGPM模型中参数敏感性最高的因子,因此提高Chl-a的精度对模型估算结果的精度提升最为明显; VGPM是通过计算水柱的初级生产量来计算OPP分布,水柱深度或真光层深度是水柱初级生产量的重要组成部分,在极大程度上也影响着模型计算的结果。因此对Chl-a、SST和 $Z_{eu}$ 精确度进行进一步探讨。

### 3.3 模型参数校正

#### (1) Chl-a

Chl-a是影响VGPM模型精度最重要的模型参数,使用2017年和2018年2a的水质监测数据来评估MODIS Chl-a产品的误差。除去云层遮挡等不可抗因素,部分区域无法获取其遥感数据之外,统计分析2017年和2018年2a间的MODIS Chl-a产品和实测值,比较结果如图4所示。MODIS Chl-a与实测Chl-a整体趋势相似,各监测点Chl-a实测值与遥感产品两者之间存在一定的相关性,但MODIS Chl-a产品浓度普遍偏高,这是由于MODIS Chl-a算法并不能充分用于海洋Ⅱ类水体导致的。统计2017年和2018年两者的偏差发现,MODIS Chl-a产品2017年较实测值平均偏高 $2.01\text{ mg}/\text{m}^3$ ,2018年较实测值平均偏高 $4.43\text{ mg}/\text{m}^3$ 。2017年和2018年叶绿素a年平均浓度为 $4.15\text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $4.47\text{ mg}/\text{m}^3$ ,相对误差分别为49.92%和50.40%。叶绿素荧光是绿色植物吸收光量子从叶绿素基态跃迁至激发态时以光子的形式释放的能量,能够定量地体现海洋浮游植物的生物量<sup>[17]</sup>。Abbott等<sup>[18]</sup>和Zhao等<sup>[19]</sup>均表明海洋叶绿素浓度可依据叶绿素荧光反演获取。为探索广西北部湾海域叶绿素荧光与Chl-a的关系,结合2018年北部湾近岸Chl-a监测结果,研究去除了Chl-a监测数据中过高或过低异常值部分,通过与监测站点原位匹配,使用ENVI 5.5提取MODIS数据中原位归一化叶绿素荧光基线高度(Normalized Fluorescence Line Height, NFLH)数据,分析两者相关性,结果如图5所示。NFLH与实测Chl-a相关性分析结果的 $R^2$ 为0.821,表明两者具有显著的正相关关系,回归方程为:

$$y = 11.359x + 0.747 \quad (6)$$

统计2018年MODIS Chl-a数据与实测数据误差,对比回归计算结果与实测数据误差发现: MODIS Chl-a平均误差为 $5.16\text{ mg}/\text{m}^3$ ,回归计算Chl-a

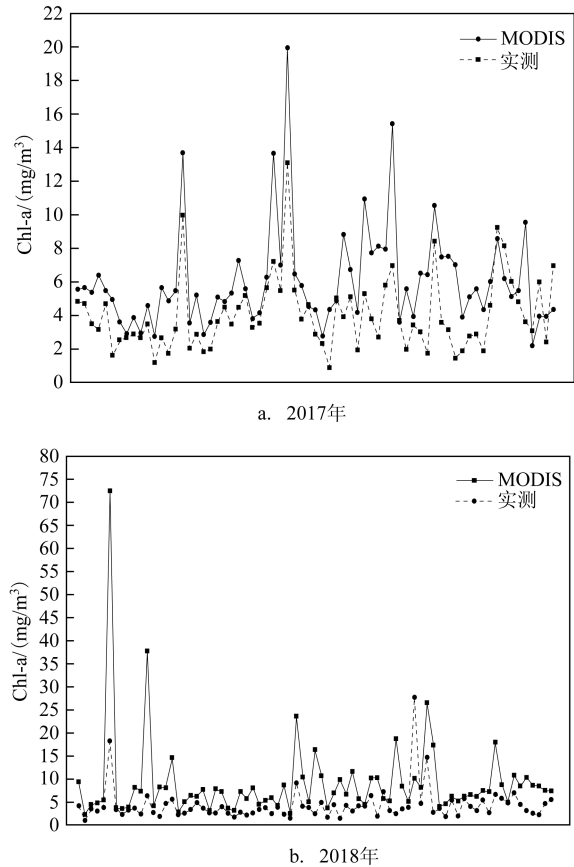


图4 2017年和2018年MODIS Chl-a产品与实测值对比

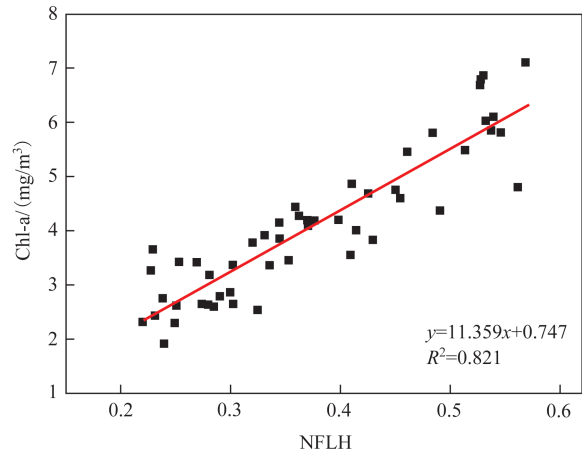


图5 NFLH与原位Chl-a相关性分析结果

平均误差为  $2.48 \text{ mg/m}^3$ , 表明此回归模型能够有效地提高 2018 年 Chl-a 数据精度。为保证回归模型能够应用于其他时间的 Chl-a 校正, 使用此回归模型进行了验证。2017 年 MODIS 产品与实测数据的平均误差为  $4.15 \text{ mg/m}^3$ , 基于 NFLH 使用回归模型计算叶绿素浓度, 统计结果表明 Chl-a 与实测数据平均误差为  $2.53 \text{ mg/m}^3$ , 精度验证结果表明回归模型对北部湾海域具有适用性。

### (2) SST

SST 是估算 OPP 的重要参数, 目前最常用的计算 SST 的方法是通过经验公式进行计算。为提升 SST 遥感产品的精度, 提取了 2017 年和 2018 年北部湾近岸海域 MODIS SST 产品数据和原位实测数据, 对比结果如图 6 所示。由对比结果可知, MODIS SST 产品与实测结果高度吻合, 具有较好的精度, 因此本文对 MODIS 的 SST 产品不做校正。

### (3) $Z_{eu}$

$Z_{eu}$  不仅是生态系统的水质指标, 也是 VGPM 模型中的重要参数。 $Z_{eu}$  是海域水柱内具有足够的光照进行光合作用的深度, 一般认为其边界为光合有效辐射为表层 1% 的深度。因此在海洋学上, 真光层深度应该由海洋表层的光合有效辐射与光合有

效辐射的衰减系数 ( $K_{par}$ ) 获取, 而许多研究表明  $K_{par}$  与  $K_{d_{490}}$  具有显著的相关性, 因此在 VGPM 模型中使用了更加容易测量的  $K_{d_{490}}$  产品。传统的用于计算海洋  $Z_{eu}$  的算法在海洋 II 类水体由于近岸海水的浑浊出现过高的计算现象<sup>[20]</sup>, 因此本研究使用了 Ye 等<sup>[11]</sup>在 2015 年针对珠江口海洋 II 类水体测量真光层深度得出的算法。该算法形式为:

$$Z_{eu} = 4.605 / [1.338 6 K_{d_{490}} + 0.421 5] \quad (7)$$

### 3.4 参数校正前后模型估算结果对比分析

根据参数校正结果使用校正后的参数算法建立 VGPM 模型, 估算 2009 年北部湾近岸海域的 OPP, 提取与监测点位匹配的遥感估算结果, 两者对比如图 7 所示。由图 7 可知, 对参数进行校正后建模计算的 OPP 值与实测值变化趋势相似, 且过高估计的趋势消失, 较未进行参数校正之前的模型估算结果精度出现了明显的提高。进一步统计模型参数校正前后估算 OPP 结果与实测数据之间的平均误差、平均偏差和标准差, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 各个采样点的模型估算结果在参数校正后平均误差、标准差和平均偏差均出现明显降低, 表明参数校正能够使模型估算的精度得到明显提高。

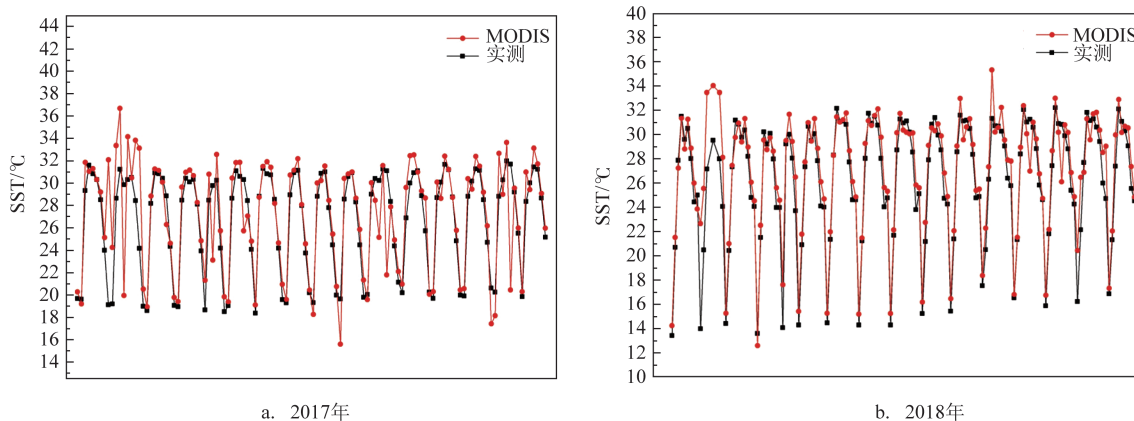


图 6 2017 和 2018 年 MODIS SST 产品与实测值对比

表 2 VGPM 模型参数校正前后估算结果的误差分析 (单位:  $\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )

类别	1月		4月		7月		11月	
	校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后
平均误差	873.04	67.05	1 008.09	138.08	1 089.09	146.61	1 611.40	102.91
标准差	505.33	195.78	172.66	113.10	412.64	104.99	166.15	109.83
平均偏差	135.05	52.33	61.05	39.98	137.55	34.40	44.04	29.35

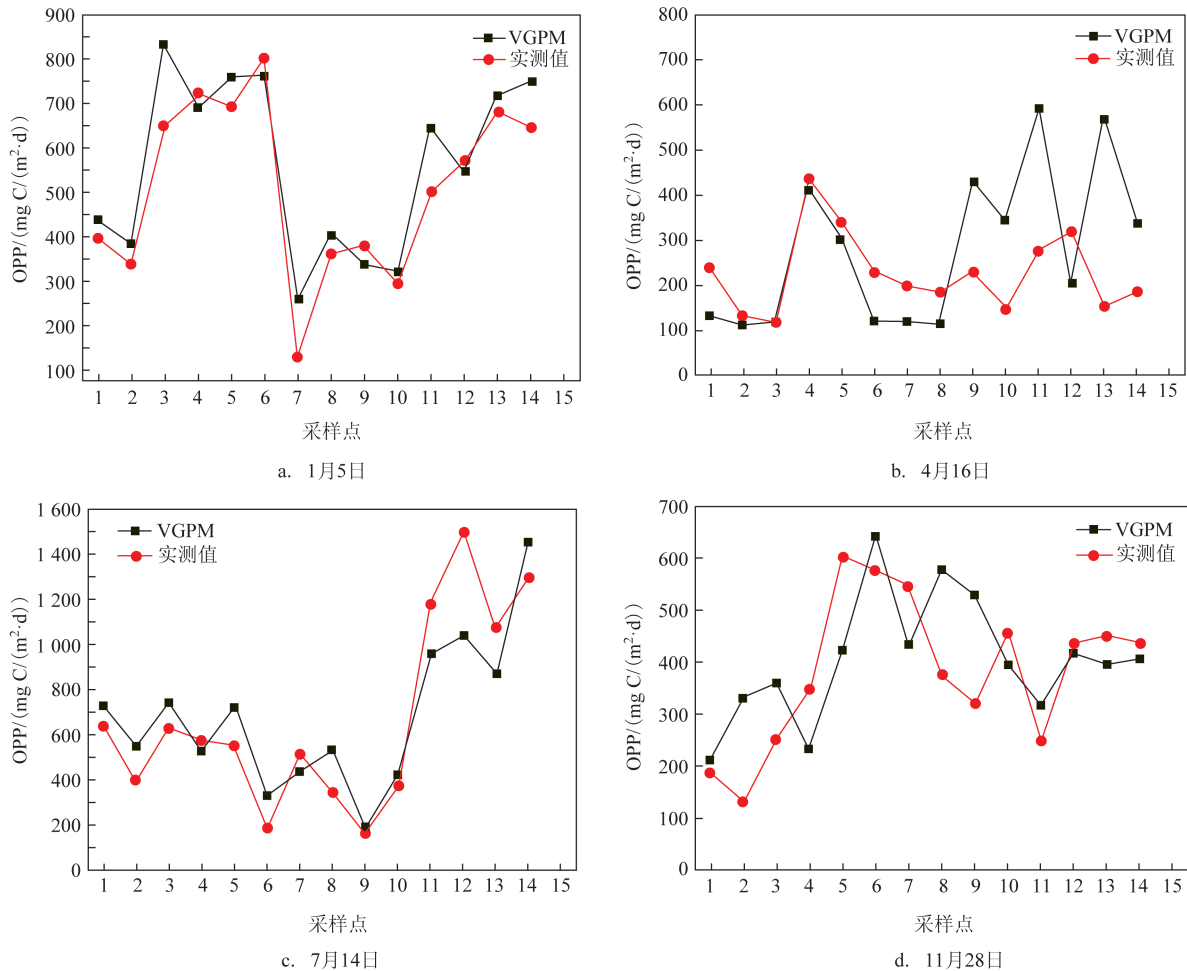


图7 参数校正后2009年钦州湾OPP对比

### 3.5 2018年北部湾近岸OPP季节分布

应用参数校正后的VGPM模型,估算2018年北部湾近岸海域不同季节的OPP分布,结果如图8所示。北部湾近岸海域四季OPP变化范围在101.27~2 161.75 mg C/(m<sup>2</sup>·d)之间,其中春季OPP范围在101.27~991.36 mg C/(m<sup>2</sup>·d)之间,夏季OPP范围在211.62~2 161.75 mg C/(m<sup>2</sup>·d)之间,秋季OPP范围在301.32~1 448.74 mg C/(m<sup>2</sup>·d)之间,冬季OPP范围在312.89~1 177.23 mg C/(m<sup>2</sup>·d)之间。时间分布上呈现夏季OPP最大,秋季和冬季次之,春季最小的季节特征。原因是夏季光照充足,气候温暖,为海洋浮游植物生长提供了充分的环境条件,冬春季受制于有限的光照和较低的海表温度,海洋浮游植物光合作用不充分,因此OPP体现出了

明显的季节性特征。OPP在空间分布上基本呈现近岸高远岸低的分布特征,其中钦州湾和廉州湾区域OPP较大,推测可能与港口的海洋渔业(蚝排养殖)排放的营养盐输入海域有关。

### 3.6 营养盐与OPP相关关系分析

近年来北部湾水产养殖发展迅速,大量含营养盐的废水入海。海洋营养盐是浮游植物生长的必要条件,外界氮磷营养盐输入会造成海域营养盐结构变化,从而影响海洋浮游植物生长。我们研究了2018年该海域在冬春季节和夏秋季节营养盐与OPP的相关关系,结果见表3和表4。夏秋季节OPP与硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮存在较为显著的相关性,冬春季节OPP与海域营养盐浓度未呈现出相关关系。根据监测结果显示,夏秋季时北部湾海域硝

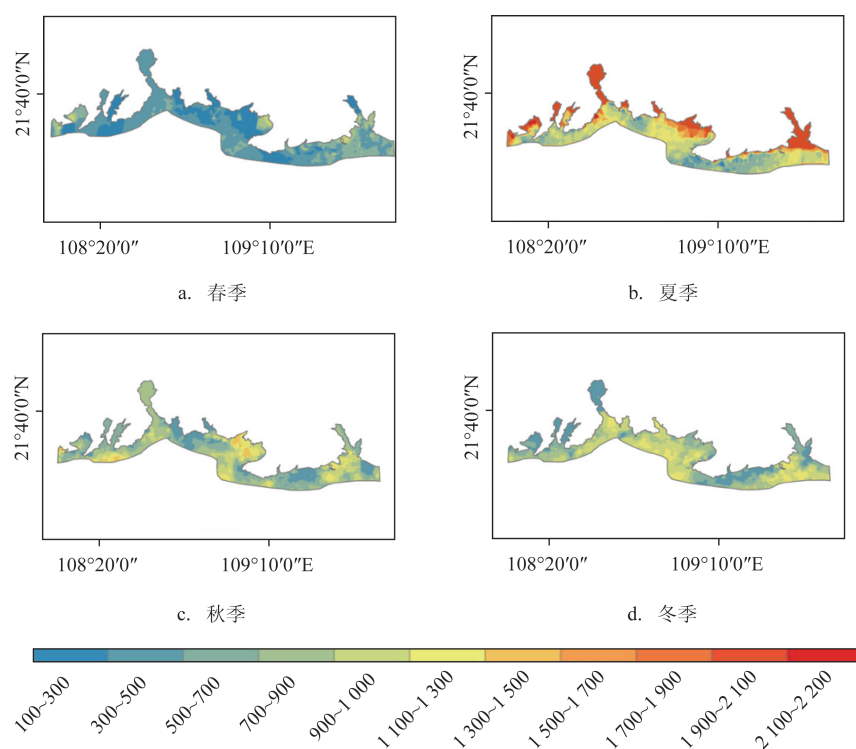
图8 2018年北部湾近岸OPP空间分布(单位:mg C/(m<sup>2</sup>·d))

表3 冬春季初级生产力与海洋营养盐的相关性分析结果

类别	OPP	硝酸盐	亚硝酸盐	氨氮	正磷酸盐
OPP	1	0.073	-0.289	0.378	-0.452
硝酸盐	0.073	1	0.541	-0.031	0.590
亚硝酸盐	-0.289	0.541	1	-0.790	0.801
氨氮	0.378	-0.031	-0.790	1	-0.361
正磷酸盐	-0.452	0.590	0.801	-0.361	1

表4 夏秋季初级生产力与海洋营养盐的相关性分析结果

类别	OPP	硝酸盐	亚硝酸盐	氨氮	正磷酸盐
OPP	1	0.995**	0.842*	0.605	-0.578
硝酸盐	0.995**	1	0.889	0.598	-0.625
亚硝酸盐	0.842*	0.889	1	0.348	-0.620
氨氮	0.605	0.598	0.348	1	-0.850
正磷酸盐	-0.578	-0.625	-0.620	-0.850	1

注:\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关;\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关

酸盐和亚硝酸盐浓度比冬春季节明显偏高,说明浮游植物在夏秋季节阳光充足温度较高时可能对于

氮盐具有较高的需求,表现出了北部湾海域浮游植物生长对营养盐需求的季节性特征。



## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1)使用NFLH和实测值进行回归分析,获取了北部湾近岸海域Chl-a的校正模型,通过此模型能够有效地降低MODIS Chl-a产品在北部湾近岸Ⅱ类水体中的过高估算误差;

(2)使用实测数据校正了Chl-a和 $Z_{eu}$ ,参数校正后的模型计算发现2009年1月、4月、7月和11月OPP的平均误差、标准差和平均偏差均明显降低,表明通过VGPM模型输入参数的校正能够有效提高模型的估算精度。

(3)利用参数校正后的模型计算2018年北部湾近岸OPP分布,结果表明2018年北部湾近岸OPP在夏季最高,秋季次之,冬春季节最低,空间上呈现近岸高于远岸的趋势;近年来北部湾海洋渔业发展迅速,大量营养盐排入该海域,2018年北部湾近岸海域的浮游植物在夏季和秋季对氮盐的需求比春季和冬季更高,对营养盐需求呈现季节性特征。

### 4.2 讨论

估算结果表明校正后的VGPM模型能够有效地应用于广西北部湾海域。VGPM模型的校正过程中,Chl-a参数利用了NFLH数据与实测Chl-a进行校正; $Z_{eu}$ 和 $P_{opt}$ 则采用了在各个海域已经取得一定应用成果的算法,校正后的VGPM模型在国内近岸海域具有一定的适用性。但考虑到各个海域的Chl-a与NFLH的回归响应可能存在差异, $Z_{eu}$ 和 $P_{opt}$ 与海域的自然地理环境关系密切,因此,参数校正的具体算法仍需结合特定海域的实测数据进行验证。针对环境条件对OPP的影响,本文仅仅考虑了营养盐的作用,而盐度、溶解氧和海洋风场等对海洋浮游植物群落迁移具有较大影响的环境条件也需要进一步探讨<sup>[21]</sup>。总体来说,目前OPP的遥感估算已经获得了较大的发展,其估算精度却与研究区域的特异性有较大差异,当针对具体小范围的海域进行海洋资源开发和管理规划时,仍需要精确的OPP分布作为决策参考,因此如何对全球各海域OPP进行精确的遥感估算仍需进一步的研究与探索。

### 参考文献:

- [1] 金松, 韩震, 李雪娜, 等. 叶绿素浓度和海表温度与黄海绿潮海洋初级生产力关系的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2017(2): 131-1388.
- [2] Maritorena S, Siegel D A, Peterson A R. Optimization of a semi-analytical ocean color model for global-scale applications[J]. Applied Optics, 2002, 41(15): 2705-2714.
- [3] 徐红云, 周为峰, 纪世建. 采用遥感手段估算海洋初级生产力研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3042-3050.
- [4] Carr M E, Friedrichs M A M, Schmeltz M, et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 2006, 53(5/7): 741-770.
- [5] Eleveld M A, van der Woerd H J, Beck H. Improving the estimation of north sea primary production: Meris Chl and  $K_d$  in vgpm [C]//Proceedings of the Envisat Symposium, 2007.
- [6] 李晓玺, 袁金国, 刘夏菁, 等. 基于MODIS数据的渤海净初级生产力时空变化[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 785-793.
- [7] 施益强, 温有越, 肖钟湧, 等. 基于MODIS数据的福建海域近10年净初级生产力时空变化研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 61-68.
- [8] Hyde K J W, O'reilly J E, Oviatt C A. Evaluation and application of satellite primary production models in Massachusetts Bay[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(10-11): 1340-1351.
- [9] Lobanova P, Tilstone G H, Bashmachnikov I, et al. Accuracy assessment of primary production models with and without photoinhibition using Ocean-Colour Climate Change Initiative data in the North East Atlantic Ocean[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1116.
- [10] Hu C M, Lee Z, Franz B. Chlorophyll algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117 (C1): C01011.
- [11] Ye H B, Chen C Q, Sun Z H, et al. Estimation of the primary productivity in Pearl River Estuary using MODIS data[J]. Estuaries and Coasts, 2015, 38(2): 506-518.
- [12] Kameda T, Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61 (4): 663-672.
- [13] 庞碧剑, 蓝文陆, 黎明民, 等. 北部湾近岸海域浮游动物群落结构特征及季节变化[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7014-7024.
- [14] 吴易超. 北部湾初级生产力的时空格局与粒级结构[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [15] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(1): 1-20.
- [16] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素a和初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1333-1340.
- [17] 关琳琳. 基于叶绿素荧光的植被总初级生产力估算[D]. 北京:

- 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [18] Abbott M, Letelier R. Algorithm theoretical basis document chlorophyll fluorescence[J]. MODIS Product, 1999(20): 42.
- [19] Zhao J, Cao W X, Yang Y Z, et al. Measuring natural phytoplankton fluorescence and biomass: a case study of algal bloom in the Pearl River estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(10): 1795-801.
- [20] Lee Z P.  $K_{PAR}$ : an optical property associated with ambiguous values[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(2): 159-164.
- [21] Desmit X, Ruddick K, Lacroix G. Salinity predicts the distribution of chlorophyll a spring peak in the southern North Sea continental waters[J]. Journal of Sea Research, 2015, 103: 59-74.

## Estimation of offshore ocean primary productivity in Beibu gulf of Guangxi based on parameters corrected VGPM model

YAO Huan-mei<sup>1</sup>, GONG Zhu-qing<sup>1</sup>, ZHONG Wei-ping<sup>2</sup>, WEN Ke<sup>1</sup>, HUANG Yi<sup>1</sup>, NA Ze-lin<sup>1</sup>, WEI Yi-ming<sup>1</sup>

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004 China; 2. Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000 China)

**Abstract:** Based on Marine environment monitoring data and insite OPP data, the parameters of the VGPM model were calibrated. The OPP in the Beibu gulf of Guangxi, China, was estimated using the VGPM model after parameters calibrated, and the accuracy of corrected model was evaluated respectively. The result indicated that the estimation error of primary productivity can be effectively reduced by parameters correction. According to the calculation results of the corrected model, the range of OPP in the coastal waters of the Beibu gulf in 2018 was calculated to be 101.27~2 161.75 mg C/(m<sup>2</sup> · d). Phytoplankton in Beibu gulf shows an obvious demand for nutrient salt in summer and autumn, but not in spring and winter.

**Key words:** ocean primary productivity; corrected of VGPM model; chlorophyll fluorescence baseline height; nutrient