

浮游植物分布对强台风尼格的响应

杨超宇

国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510301

摘要 研究调查了Ekman流对浮游植物生态动力过程的驱动机制。采用新的光学遥感算法提取浮游植物光学有效信息。该算法结合了近红外波段的浮游植物荧光信号以及可见光部分的弹性散射的辐射传输模型,通过两次迭代优化算法,提取浮游植物光学信号。采用辐射传输软件HydroLight对海水水下光场进行了数值模拟,并结合新算法对模拟数据进行了对比分析。结果表明,新算法较好地表征了浮游植物叶绿素光学参数。利用MERIS光学遥感数据并结合了动力学参数,利用该算法分析了强台风尼格对我国海域浮游植物分布的影响。研究结果表明,Ekman流是我国海域浮游植物分布异常的原因之一。

关键词 遥感; 光学遥感; 荧光算法; 全球移动通信系统; 尼格

中图分类号 P733.3+1 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.100101

Effect of Typhoon NALGAE on the Distribution of Phytoplankton

Yang Chaoyu

South China Sea Marine Prediction Center, State Oceanic Administration,
Guangzhou, Guangdong 510301, China

Abstract Optical property of phytoplankton is studied based on the physical and biological properties in China Sea. A new algorithm, combined with global system for mobile communication model and fluorescence model, is applied to retrieve the phytoplankton information. In the algorithm, twice optimization procedure is performed to get the best results. This combined algorithm is applied to simulate the underwater light field by using HydroLight. The comparison of the simulation results and synthetic data shows that the algorithm is effective to retrieve the optical information of phytoplankton. In addition, by using optical satellite data (MERIS) and the dynamic parameters, the impact of NALGAE on phytoplankton distribution is analyzed. The result shows Ekman pumping is one of reasons for the ocean color anomalies.

Key words remote sensing; optical remote sensing; fluorescence; global system for mobile communication; NALGAE

OCIS codes 010.4550; 100.3005; 100.3008; 100.3010

1 引言

近年来,大范围的赤潮连续发生在我国海域^[1]。赤潮藻类在特定的环境下(合适的温度、充足的营养盐、合适的光照条件及动力学条件等)容易出现爆发性增殖,因而引起水色变化,进一步对海洋环境造成污染并破坏了原有的海洋生态环境平衡。浮游植物处于海洋环境中食物链的最底层,也是物质循环和传递的基础^[2]。浮游植物的分布可以通过能量传递影响到整个海洋生态环境结构。浮游植物的空间分布特征与营养物质等的分布高度相关,而其海域的营养物质的分布特征又需结合其海洋动力学进行分析。多名研究学者已经开始研究Ekman流对浮游植物生长繁殖的影响^[3-4]。Ekman流通过对海洋中热量和营养盐等的运输和有效传递,从而进一步改变了浮游植物分布^[5]。研究学者陈楚群在2001年对南海的浮游植物的光学特性进行了探讨^[6]并且应用卫星遥感SeaWiFS对南海的叶绿素分布进行了分析。叶绿素在可见光波段呈现出自己独特的光学特征,比如在550nm附近会出现叶绿素相应的反射特征峰以及红光波段的荧光特征峰。但是仅仅应用可见光部分的光学信息对叶绿素分布信息进行提取仍然存在一定的问题。首先,黄色物质的吸收以及荧

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-03-04; 网络出版日期: 2014-09-09

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(1338)

作者简介: 杨超宇(1985—),女,博士,工程师,主要从事浮游植物遥感信息提取和赤潮预报等方面的研究。

E-mail: ycy@scsio.ac.cn

光特性会严重干扰浮游植物的光学信息提取^[7],尤其是在蓝色短波波段。因为黄色物质在蓝光波段吸收占相当大的比例,并在400~600 nm波段释放出不同程度的荧光信号。由于黄色物质的吸收与荧光特性与黄色物质的具体组成等相关,所以难以建立一个统一的模型对其影响进行剔除。此外,拉曼散射也会对可见光部分有着不同程度的影响,越清澈的海水(衰减系数较小),其拉曼散射的强度也就越大。针对这一问题,本文将探讨近红外波段对浮游植物信息提取的作用。应用光学遥感信息经济有效地获取大范围的浮游植物分布数据,并结合动力学分析影响浮游植物分布的原因,进而为赤潮有效预报提供一定的参考。

2 方法与数据

2.1 海水特性分析

Hydrolight采用辐射传输模型对水下的光场进行有效的数值模拟^[8]。研究中采用了Hydrolight软件模拟了不同叶绿素浓度的遥感反射率值。在模拟过程中,选择了二类水体模型,该模型包括了纯水,有机颗粒物,有色可溶性有机物(CDOM)和矿物质。其中输入参数除了叶绿素浓度以外的其他输入参数(包括有色可溶性有机物在440 nm处的吸收系数,太阳高度角,云量,水深,颗粒物的后向散射系数等)均保持不变。颗粒物的散射相函数选用Petzold的模型^[9]。模拟过程分为两次,一次包含非弹性散射,一次不包含非弹性散射。该模拟输出波段为400~800 nm。

2.2 叶绿素提取算法

该研究结合了(全球移动通信系统)(GSM)模型^[10]和Devred^[11]的荧光模型对浮游植物进行光学信息提取。图1所示为该叶绿素提取算法的流程图,描述了两次优化迭代过程。

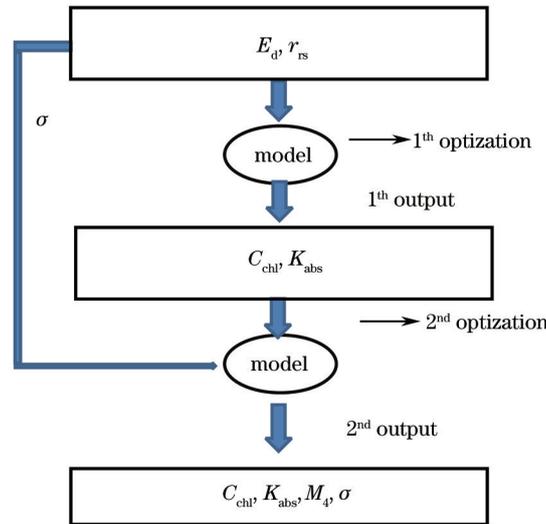


图1 叶绿素浓度反演模型流程图

Fig.1 Flowchart of the algorithm retrieving the chlorophyll concentration

在 GSM 模型如图 1 所在位置遥感反射率 r_{rs} 可表示为

$$r_{rs} = g_1 \frac{b_b}{a + b_b} + g_2 \left(\frac{b_b}{a + b_b} \right)^2, \quad (1)$$

式中 g_1, g_2 分别为 0.0949, 0.0797, a 为海水总吸收系数, b_b 为海水总后向散射系数。

Devred 的荧光模型中, 荧光部分

$$r_{fluo} = \frac{M_i \tilde{f}(\lambda) E_d(443, z=0^+) \tilde{a}^* C_{chl}}{4\pi \{K_{abs} + [a_w(\lambda) + a_{ph}^*(\lambda) C_{chl}]/\cos\theta'\} E_d(\lambda)}, \quad (2)$$

式中 M_i 为一个校正参数, 与打包效应、荧光效率相关; K_{abs} 为水体衰减系数, 可由李忠平的经验模型计算得到; a_{ph}^* 为单位叶绿素浮游植物吸收系数; a_w 为纯水吸收系数; E_d 为入射光的辐照度; \tilde{a}^* 为单位叶绿素浮游植物平均吸收系数; $\tilde{f}(\lambda)$ 为比例系数, 可由 *Thalassiosira pseudonana* spp 的荧光光谱计算获得^[12]; θ' 为观测角; C_{chl} 是叶绿素浓度; λ 为波长; z 为水深。并且

$$\tilde{f}(\lambda) = 67.5\sigma \exp\left[-\frac{(\lambda - 683.1)^2}{2\sigma^2}\right] + 98.55\exp\left[-\frac{(\lambda - 721.5)^2}{233.3^2}\right]. \quad (3)$$

式中 σ (-8.6976) 为调整参数, 在第二次优化过程中被优化。表 1 为模型参数。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters in the model

Wavelength /nm	412	443	490	510	555	620	665	681	709
a_w / m^{-1}	0.00456	0.00707	0.015	0.0325	0.0596	0.27358	0.429	0.4796	0.7255
$\alpha_{\text{ph}}^* / (\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1})$	0.00665	0.05582	0.02055	0.0191	0.01015	0.00975	0.01424	0.02215	0.00161

2.3 Ekman 抽吸

利用风场的近地层 10 m 高度风场数据资料计算 Ekman 抽吸速度空间分布,

$$w_e = \nabla \times \frac{\tau}{\rho_w f}, \quad (4)$$

式中 τ 是风应力, w_e 为 Ekman 抽吸速度, ρ_w 为海水密度, f 为科氏参数。

2.4 遥感数据

采用荧光及 GSM 算法对 2011-10-15 的 MERIS 一级数据进行了运算分析, 其中 413、443、490、510、560、620、665、681、709 nm 波段的光谱信息被应用于算法, 并提取浮游植物分布信息。MER_RR_1PTA-CR20111015_034017_000004143107_00320_50334_0000 风场数据则采用了 ASCAT 全球实时数据, 空间分辨率为 0.25°。数据格式为 netCDF, 使用的是 2011-10-12 的 3 级数据产品。

3 结果与讨论

3.1 Hydrolight 数据

将多次辐射传输模拟的遥感反射率进行对比分析。结果表明, 对于不同叶绿素浓度的海水, 其反射率光谱值具有较大的差异性。图 2 所示为 Hydrolight 软件模拟的不同叶绿素浓度的海水遥感反射率。可知, 叶绿素从 0.1 mg/m³ 增加到 10 mg/m³ 时, 在 550 nm 处的反射特征峰的峰值呈现出较大的差异。图 3 所示为总的颗粒物的吸收系数以及衰减系数光谱。如图 3(a) 所示的海水颗粒物总吸收光谱, 海水总颗粒物吸收在 670~680 nm 附近会呈现较为明显的吸收峰, 该吸收峰峰值大小与浮游植物的叶绿素荧光特性相关。浮游植物会在红光波段呈现较为明显的荧光峰, 而该荧光峰的大小与当时物理环境光强、水体衰减系数、浮游植物种类、浮游植物颗粒物大小、浮游植物的生理状态等相关。如图 3(b) 所示的定标系数校正海水衰减系数, 衰减系数在 600 nm 后急剧增加, 所以出现在红光波段的荧光峰将会在水体向上传输过程中严重衰减。

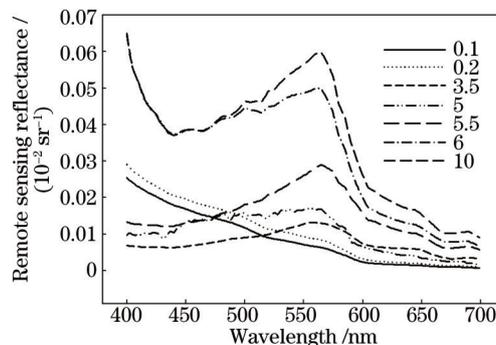


图 2 Hydrolight 软件模拟不同叶绿素浓度下水体遥感反射率曲线

Fig.2 Reflectance for different chlorophyll levels simulated by Hydrolight software

将利用 Hydrolight 软件模拟的遥感反射率光谱数据应用于荧光及 GSM 算法选用其中对应于 MERIS 的光谱波段。荧光及 GSM 算法输出结果如图 4 所示。图 4 给出了优化算法两次迭代过程后的优化结果, 其中 N 表示总的样本个数。由于叶绿素浓度变化幅度为 0.1~50 mg/m³, 因此选用对数坐标。结果表明算法较好地模拟了叶绿素浓度, 荧光及 GSM 算法与 Hydrolight 的输入参数具有较好的相关性(相关系数 $r^2=0.98$)。均方根误差 (RMSE) 为 0.095。图 5 所示为优化算法中两次迭代的误差。可知, 第二次优化可以有效地减小误

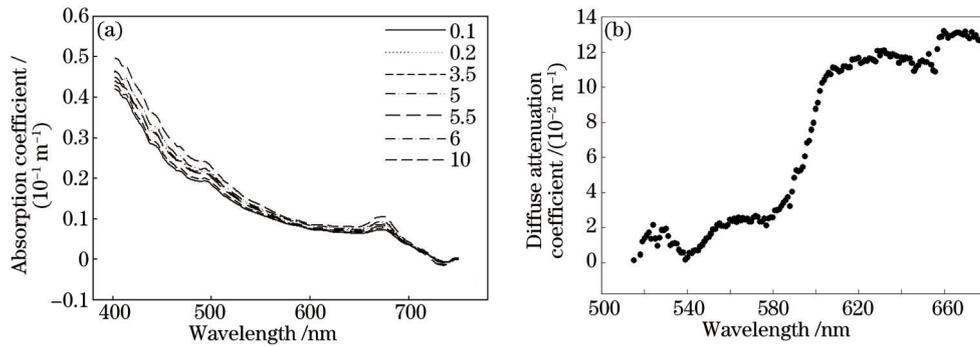


图3 (a) 海水颗粒物总吸收光谱,包括藻类颗粒和非藻类颗粒; (b) 定标系数校正后的海水衰减系数

Fig.3 (a) Total particulate absorption coefficient, including algal and non-algal particles; (b) calibration diffuse attenuation coefficient

差,进一步提高算法精度。由于黄色物质在短波波段的信号可一定程度上对浮游植物信息进行干扰。而新算法将红外波段加入,可减少蓝光波段对总信号的贡献,从而进一步削弱了黄色物质对浮游植物光学信息提取的影响。图6所示为优化算法两次迭代中每个波段的相对误差 rel 分布,可知在波段 709 nm 的相对误差相对高于其他波段,这一结果可以结合浮游植物在此波段的荧光特性分析。浮游植物的荧光特性在不同光照强度,不同的生长状态有着不同的荧光特性,这也使得该波段的荧光效率变化难以预测。

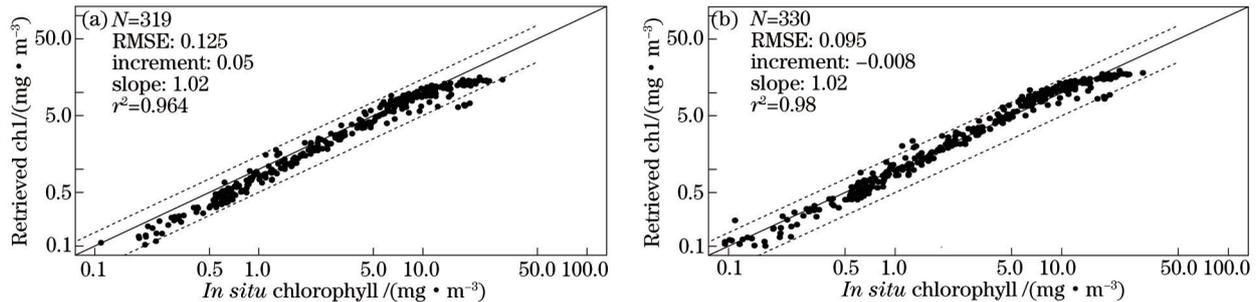


图4 荧光及 GSM 算法模拟结果与 Hydrolight 输入参数叶绿素浓度真值相关性分析。(a) 第一次迭代; (b) 第二次迭代

Fig.4 Relationship between the retrievals of Fluorescence & GSM and Hydrolight. (a) 1st-optimization; (b) 2nd-optimization

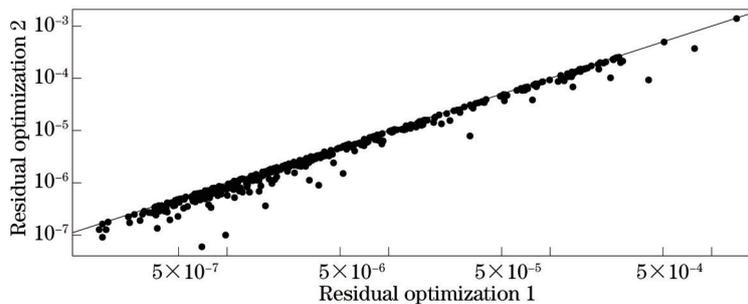


图5 算法两次迭代中的误差

Fig.5 Absolute error during the twice optimization

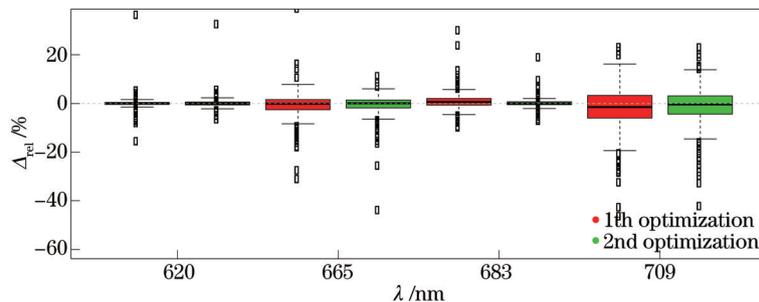


图6 优化算法两次迭代每个波段的相对误差分布

Fig.6 Relative error on each wavelength during the twice optimization

3.2 遥感数据

图7所示为荧光及GSM算法对MERIS一级数据(2011-10-06的MER_RR__1PTACR20111006_005337_000002483107_00189_50203_0000.N1)处理结果。可知,海水在强台风尼格经过后,部分海域出现叶绿素异常。通过对比分析2011-10-02的风场数据和Ekman抽吸速度分布图(图8),可知Ekman抽吸可以引起海水混合,将底层海水带到浅表层,为浮游植物提供充足营养物质,促进浮游植物生长。并且,在台风经过后数天,待水体再次稳定后,底层的营养物质被带到真光层,为浅表层的浮游植物提供充足的营养物质,在足够的光照条件,浮游植物可以短期增殖。因而可在台风过境后数天,表现出台风经过的海域叶绿素分布异常。

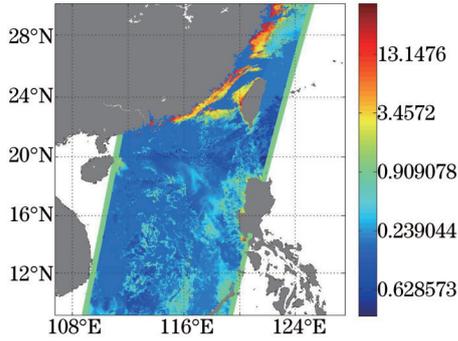


图7 荧光及GSM算法提取叶绿素分布信息
Fig.7 Chlorophyll distribution retrieved by Fluorescence&GSM algorithm

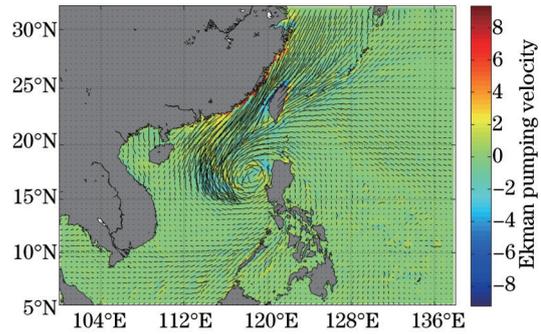


图8 Ekman抽吸速度分布
Fig.8. Ekman pumping velocity

4 结 论

在菲律宾近海,于2011-9-28T02:00生成2011年第19号台风“尼格”。台风作用于海面时,海洋环境因外力的作用而引起海水混合,从而改变浮游生物的分布,一般在台风经过后,需等水体相对稳定后,浮游植物才再次呈现大量繁殖状态。而这一现象可以通过遥感途径侦察,因为其外在表现为海水表面的叶绿素a浓度异常。一般这种叶绿素浓度分布异常会滞后于台风发生时间数天。台风通过其风应力作用于海水,从而改变海水中营养物质的分布。海水底部的营养物质(例如硅酸盐等)被扰动,翻带到了上层水体,在具有合适的温度、盐度和光照条件时,海水浮游植物会出现异常,表现为海水叶绿素浓度a分布异常。对于生长力低的海水环境,台风可以为其补充相应的营养物质,在台风经过后几天,叶绿素会相应增加,对其海洋生态环境有着重要的意义。浮游植物的改变会影响到它的食物链上层,例如,浮游动物的摄食,从而进一步影响到整个食物网的结果,乃至整个生态环境。

参 考 文 献

- 1 Yang Dingtian, Chen Weimin, Jiang Jing, *et al.* Effects of algal bloom on N, P and K contents in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 969-972.
杨顶田, 陈伟民, 江 晶, 等. 藻类爆发对太湖梅梁湾水体中NPK含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 969-972.
- 2 M Babin, D Stramski, G M Ferrari, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (c7): 1978- 1989.
- 3 A Morel. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters)[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(9): 10749-10768.
- 4 A P Martin, A K J Richards. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(4): 757-773.
- 5 C R McClain, S R Signorini, J R Christianc. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(1): 281-301.
- 6 Chen Chuqun, Pan Zhilin, Shi Ping, *et al.* Simulation of sea water reflectance and its application in retrieval of yellow

- substance by remote sensing data[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(5): 33-39.
- 陈楚群, 潘志林, 施平, 等. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(5): 33-39.
- 7 Chen Chuqun, Shi Ping, Mao Qingwen, *et al.*. Satellite remotely-sensed analysis of distribution characters of chlorophyll concentration in south china sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(2): 66-70.
- 陈楚群, 施平, 毛庆文, 等. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(2): 66-70.
- 8 Andrews, J. Ring Structure in the pleward boundary current off western Australia in summer. *Marine and Freshwater Research*[J]. 1983, 34: 547-561.
- 9 C D. Mobley, L K Sundman, E Boss. Phase function effects on oceanic light fields[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(6): 1035-1050.
- 10 D A Siegel, S Maritorena, N B Nelson. Colored dissolved organic matter and its influence on the satellite-based characterization of the ocean biosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 32(20): 15-20.
- 11 E Devred, S Sathyendranath, S Stuart, *et al.*. Absorption-derived phytoplankton cell size: application to satellite ocean-colour data in the Northwest Atlantic[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 2255-2266.
- 12 Y Huot, C A Brown, J J Cullen. New algorithms for MODIS sun-induced chlorophyll fluorescence and a comparison with present data products[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, 3:108-130.