

# 赤潮灾害监测预报研究综述<sup>\*</sup>

丛丕福, 张丰收, 曲丽梅

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 近海赤潮灾害的频繁暴发严重破坏海洋生态平衡和海洋环境。概述了国内外赤潮监测和预报状况, 着重介绍了利用卫星遥感进行赤潮预报的方法; 总结了赤潮遥感预报目前仍存在的问题, 指出基于机理和生态过程的赤潮预报模型将是重点研究方向。

**关键词:** 赤潮灾害; 监测预报; 遥感; 模型

**中图分类号:** X55    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2008)02-0127-04

近10年来, 近海赤潮灾害的暴发十分频繁, 已引起了各国政府及科学界的高度关注<sup>[1,2]</sup>。1998年10月联合国政府间海委会IOC和国际海洋研究委员会SCOR共同发起组织了“全球有害赤潮的生态学和海洋学研究计划”<sup>[3]</sup>。许多国家及国际团体都在积极发展包括赤潮监测预报在内的全球海洋观测计划(GOOS)。美国利用CZCS、AVHRR和SeaWiFS资料探测和监测近岸海区的赤潮, 并把赤潮卫星遥感监测纳入Coast Watch计划。2000年美国在北墨西哥湾建立赤潮探测和预报系统, 该系统为其他地区的进一步拓展打下了基础。英国和西班牙利用AVHRR和SeaWiFS探测英吉利海峡和西班牙西南海域的颗石藻赤潮和腰鞭毛虫赤潮。在欧盟和欧空局资助下, 英国的Plymouth海洋实验室目前正从事北海及Dovon近岸的赤潮监测和预报项目。

我国学者对赤潮也进行了大量研究<sup>[4,5]</sup>。现有的这些方法对赤潮的监测发挥了重大作用, 但要解决赤潮机制和预报, 有效减灾防灾, 还有大量工作要做。其中, 研究赤潮发生机理, 发展有效算法, 特别是利用先进的卫星遥感技术, 做好赤潮的预测和预报, 为养殖户、渔民和海洋管理部门及时提供灾害信息, 做好防灾和减灾准备, 意义十分重大。

## 1 赤潮预报常规方法研究

赤潮预报的常规方法主要包括数值预测法和

经验预测法。数值预测法主要根据赤潮发生机理, 通过各种物理-化学-生物耦合生态动力学数值模型模拟赤潮发生、发展、高潮、维持和消亡的整个过程而对赤潮进行预测。例如王寿松等<sup>[6]</sup>依据生物种群生态学和营养动力学的原理, 建立了大鹏湾夜光藻-硅藻-营养物质三者相关的营养动力学模型。

而经验预测法一般是对大量赤潮生消过程监测资料进行分析处理, 基于多元统计方法, 如判别分析、主成分分析等, 在选择不同的预报因子的同时, 利用一定的判别模式对赤潮进行预测。

赤潮预报所选择的因子主要有:

(1) 叶绿素 叶绿素a含量可反映海区现有浮游植物浓度的高低, 它是海域富营养化的重要指标。根据实测资料分析, 当叶绿素a含量从正常值上升至 $10\text{ mg/m}^3$ 以上, 并有迅速增加的趋势, 就可预警赤潮即将发生。矫晓阳<sup>[7]</sup>提出了采用单一参数叶绿素进行赤潮短期预报的原理和技术, 主要以叶绿素大于某一基准值时是否连续2d呈指数增长来判定是否会发生赤潮。

(2) 溶解氧 赤潮生物白天进行光合作用, 产生大量氧, 夜间停止光合作用, 因呼吸作用吸收溶解氧, 因此海水中溶解氧明显升高或昼夜有明显的变化, 可用溶解氧作为赤潮预报的化学参量<sup>[8]</sup>。

(3) 透明度 由于赤潮发生时大量藻类聚集导致海水透明度变化很大, 因此把透明度值作为赤潮预警的标准值也是一种方法。矫晓阳<sup>[9]</sup>提出尝

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-08-26

基金项目: 国家科技部863计划(2001AA636020); 国家十五科技攻关计划(2001BA603B-06-01-1)资助项目

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

试用透明度作为赤潮预警监测的参数,但也提出在发布赤潮预警之前,应该审核浮游生物的优势种和生物量。

(4) COD COD 是衡量水体耗氧有机物污染的综合性指标,是赤潮的重要特征参数。黄西能<sup>[10]</sup>发现 COD 随着赤潮的发生而明显增加,这是由于水体中的有机物在适当高温下加速分解,为赤潮生物爆发提供了养分。

(5) 水文气象因子 张俊峰等<sup>[11]</sup>通过对南海区近 10 年的赤潮发生个例进行统计分析,统计其生成前期的大气环流形势和水文气象要素,分析出赤潮生成前期的环流模式和筛选出诱发赤潮爆发的重要因子,以此来预报赤潮发生。

(6) 铁和锰 Yamachi<sup>[12]</sup>进行藻类限制性营养盐试验发现在富营养水体中螯合态 Fe、Mn 是一些赤潮发生的关键因子。所以,对于铁、锰等微量元素限制的海区,可以根据这些微量元素的含量变化预测、预报赤潮。

其他如温度、透明度、溶解氧、上升流、细胞密度、多样性指数<sup>[13]</sup>等也可作为生态环境因子进行赤潮预报。这些因子从不同角度反映赤潮情况,但如果仅仅依据这些因子的海上调查数据进行预报,费时费力而且无法大范围动态地进行预报,而卫星遥感方法弥补了这些方法的不足,已成为研究大范围海洋现象的有力工具。

## 2 赤潮遥感监测和预报方法

利用遥感手段可以监测大面积的赤潮,与常规海上调查观测方法相比,遥感具有迅速的多时相数据更新能力和多尺度的空间概括能力,可以快速及时地获取区域和全球尺度的海洋参量信息<sup>[14]</sup>,这为研究赤潮的动态及生长和繁殖机理提供了新的思路。

赤潮卫星遥感探测建立在赤潮生态学及其相应水体光学性质基础上,目前已探索开发了很多方法如利用叶绿素 a 浓度、海表温度和多光谱变化等方法。

### 2.1 叶绿素 a 算法

引发赤潮的浮游植物体内都含有叶绿素 a 等色素。叶绿素 a 的浓度随海区和季节不同<sup>[15]</sup>,反映了赤潮藻类的生长状况<sup>[16]</sup>。研究发现,在赤潮形成过程中,表层海水叶绿素 a 浓度持续上升,表层海水的叶绿素 a 含量通常达到 10 mg/m<sup>3</sup> 以上,甚至可以达到几百 mg/m<sup>3</sup>,而且总的趋势都是较快地

上升到赤潮峰值。而临近的普通海水叶绿素 a 浓度虽然也会增加,但增加速度缓慢,而且只增加到一个相对较低水平<sup>[17]</sup>。因此可利用遥感反演叶绿素 a 浓度变化来研判,这方面卫星有独到优势<sup>[18,19]</sup>。

### 2.2 海表温度算法

海水温度是赤潮暴发的决定条件之一。海水只有达到一定温度而且其它条件也很适合时赤潮才能暴发。赤潮形成时,海水表面聚集着生物细胞,这些细胞和其分泌的黏液,既易于吸收太阳辐射,又可阻隔水面下辐射能的发散,因此赤潮水体的表面温度一般要比周围水体高,差值一般可达到 2~4℃<sup>[20]</sup>。当表层海水温度日变化率达到一定数值时即可判断赤潮形成,即:

$$\Delta SST \geq T, \quad (1)$$

式中:  $\Delta SST$  为通过卫星反演得到的表层海水温度日变化率;  $T$  为海表面温度日温差阈值。

### 2.3 多光谱赤潮算法

赤潮发生时大量繁殖的浮游生物聚集在海表面,使水体光学性质发生变化,不同波段的水体反射发生不同程度的增强或减弱。在赤潮遥感中很多算法都是根据海水光谱性质来建立的<sup>[21]</sup>,这些算法已经成功地用于 AVHRR、SeaWiFS、HY-1 等卫星数据。

研究发现赤潮海水光谱曲线主要表现为蓝光(440~460 nm)的吸收和绿光(560~570 nm)及红光(695 nm)处的反射。以微囊藻赤潮光谱为例,在 400~560 nm 的蓝绿光范围内,赤潮水体的光谱反射率比正常水体低,或者说吸收率较高,而且变化较快。另外赤潮发生时海洋水体往往在 695 nm 处表现出强烈的反射,形成叶绿素荧光峰。根据这些波段特征可以建立多波段离水辐射率差值模型的赤潮遥感算法:

$$(\ln w_3 + \ln w_5 - 2 \times \ln w_4) > C, \quad (2)$$

式中:  $\ln w_3$ 、 $\ln w_4$ 、 $\ln w_5$  分别为 SeaWiFS 和 HY-1 在 3、4、5 波段的归一化离水辐射率;  $C$  为一个常数,其具体值随不同海区和不同类型的赤潮而变化,需要根据具体情况加以判断。

Craig 等<sup>[22]</sup>采用实测高光谱数据在 Tempa 湾进行了赤潮藻种 *Karenia brevis* 的探测和评价。毛显谋和黄韦良<sup>[23]</sup>通过对东海海区裸甲藻赤潮水体、叶绿素和悬浮泥沙光谱特征的分析,提出了  $r = (R_1 - R_3)/(R_5 - R_3)$  的 SeaWiFS 多波段差值比值法模型。由于建模数据集等因素限制,这些模型的适用性和实用性都有待于进一步验证。

我们在卫星遥感探测赤潮方面也进行了大量

工作, 如综合利用海表温度、生物量分析和图象合成方法等<sup>[24]</sup>。利用 AVHRR 的波段 1 和波段 2 之间的比值水色因子  $C_{21} = (R_2 - R_{a2}) / (R_1 - R_{a1})$  建立了  $C_{21}$  和辽东湾海域现场测定叶绿素之间的相关关系, 探讨了利用 NOAA/AVHRR 的短波波段探测近岸海域叶绿素和赤潮的方法<sup>[25]</sup>。

我们研究中发现利用荧光高度来进行赤潮探测预测也是一种可行有效方法。如赵冬至等<sup>[26]</sup>采用现场实测和室内培养两种方式测定了甲藻、赤潮异弯藻、叉角藻、海洋蓝绿藻等赤潮和新月菱形藻、叉鞭金藻、塔胞藻、扁藻和小球藻等非赤潮藻类光谱曲线。采用度量太阳激发的叶绿素荧光峰高度的归一化荧光高度法, 建立了不同赤潮藻类归一化荧光高度与叶绿素浓度的关系。

在赤潮卫星遥感监测的原理上, 深入研究确定相应参数阈值范围, 便可进行预报研究。如陆斗定等<sup>[27]</sup>根据赤潮生物细胞密度法及其增长速率和其它理化的环境要素, 并结合卫星遥感实时监测, 对浙北海域的夜光藻等引发的赤潮进行了试验性预警和实时预测, 为赤潮灾害预报和减少赤潮灾害进行了有益的探索。Sacau - Cuadrado 等<sup>[28]</sup>研究发现上升流、叶绿素海表温度和赤潮之间存在密切关系, 因此采用这些参数在西班牙的 Galician 海岸建成了一个可靠的有害赤潮预报系统。

### 3 存在问题和发展趋势

总体来看, 现有常规的赤潮监测预报方法有着明确的物理意义, 但实际操作起来比较困难, 成本也较高。而现有的赤潮遥感方法大都是利用叶绿素或温度或光谱的一两个特征变量的经验统计模型, 没有把赤潮的生理生态发育过程考虑在内, 缺乏物理过程基础, 有着很大的局限性。

其次, 现有赤潮遥感算法很多都是单因子模式, 单一指标的适应性比较差。由于赤潮爆发机理复杂, 而且赤潮藻种多样, 受环境影响较大, 因此依靠卫星提取的单一特征信息指标不能完全满足对赤潮识别的要求。如对叶绿素 a 算法来说, 有研究表明单细胞藻类体内含有 18 种色素, 有的藻类体内色素并不是以叶绿素 a 为主, 而且高叶绿素 a 浓度不一定是赤潮, 这给遥感叶绿素 a 预报赤潮带来困难。还有非浮游植物赤潮, 如夜光虫赤潮, 所引发的叶绿素浓度变化不大, 所以可能无法正确识别。再如温度是赤潮生消的控制因子之一, 但并不是唯一条件, 不能单单根据温度变化

就能判断赤潮发生, 如上升流也可能带来温度的变化。而海表温度法对那些表面温度变化不大的赤潮也不适用。就多光谱法而言, 有些藻类的光谱性质在赤潮期间可能变化不大。由于浮游植物种类的体形以及生长发育阶段的不同, 实际光谱特征也出现较大的差异。最后, 赤潮生物大多是在整个真光层内大量存在的, 而这些方法探测的都是海洋表面的参数变化情况, 很难准确地反映赤潮。

为了给减灾防灾提供及时迅速和可靠的科学信息, 建立一个我国赤潮监测、预警和实时预报系统已成为十分迫切的任务。而要想实现赤潮的卫星遥感监测预报, 就必须认真研究赤潮发生的机理和各种影响表征因子, 因此只有综合考虑赤潮生态发育过程和环境参量, 选择恰当的表征赤潮的因子, 才有可能对赤潮做出准确预报。

综合生态学和环境学的知识, 对赤潮发生所需的营养物质条件和赤潮发生前后环境参量等的变化进行深入研究, 充分认识其发生发展规律, 从新的角度入手, 开发新的算法。提出新的基于海洋生态过程的多参量模型来预报赤潮势在必行。

### 参考文献:

- [1] 孙冷, 黄朝迎. 赤潮及其影响[J]. 灾害学, 1999, 14(2): 51 - 54.
- [2] Tang D L, Kester D R, Ni I, et al. In situ and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late autumn 1998 [J]. Harmful Algae, 2003, (2): 89 - 99.
- [3] 张正斌, 刘春颖, 刑磊, 等. 利用化学因子预报赤潮的可行性探讨[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(2): 257 - 263.
- [4] 黄韦良, 楼秀琳, 肖清梅. 国内外赤潮卫星遥感技术研究与进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(1): 32 - 36.
- [5] 文世勇, 赵冬至, 陈艳拢, 等. 基于 AHP 法的赤潮灾害风险评估指标权重研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 9 - 14.
- [6] 王寿松, 夏综万. 大鹏湾的赤潮生态仿真模型[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 468 - 473.
- [7] 矫晓阳. 叶绿素 a 预报原理探索[J]. 海洋预报, 2004, 21(2): 56 - 63.
- [8] 王正方, 张庆, 吕海燕, 等. 长江口溶解氧赤潮预报简易模式[J]. 海洋学报, 2000, 22(4): 125 - 129.
- [9] 矫晓阳. 透明度作为赤潮预警监测参数的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(1): 27 - 31.
- [10] 黄西能. 盐田水域赤潮的理化环境和浮游植物生态变化特征 [C]//中国赤潮研究. SCOR - DC 赤潮工作组中国委员会第二次论文选. 青岛: 青岛出版社, 1995.
- [11] 张俊峰, 俞建良, 庞海龙, 等. 利用水文气象因子的变化趋势预测南海区赤潮的发生[J]. 海洋预报, 2006, 23(1): 9 - 19.

- [12] Yamachi S. Nutrient factors involved in controlling the growth of red tide flagellates; *Prorocentrum micans*, *Eurews phella* sp. And *Ghattonella marna* in Osaka Bay [J]. Bull Plankton Soc Jap, 1984, 31(2): 97–106.
- [13] Subramaniam A, Brown C W, Hood R R, et al. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery [J]. Deep-sea Research part 2, 2002, 49: 107–121.
- [14] 潘德炉, 李炎. 海洋光学遥感技术的发展和前沿[J]. 中国工程科学, 2003, 15(13): 39–43.
- [15] 丛丕福, 牛铮, 蒙继华, 等. 1998~2003 年卫星反演的中国陆架海叶绿素 a 浓度变化分析[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(1): 30–33.
- [16] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000, 4(1): 41–45.
- [17] 陈其焕, 曾昭文, 张水浸, 等. 厦门港 1987 年赤潮调查报告[C]//厦门港赤潮调查论文集. 北京: 海洋出版社, 1997, 1–18.
- [18] 唐军武, 丁静, 田纪伟, 等. 黄东海二类水体三要素浓度反演的神经网络模型[J]. 高技术通讯, 2005, 15(3): 83–88.
- [19] 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.
- [20] 顾德宇, 许德伟, 陈海颖. 赤潮遥感进展与算法研究[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(6): 434–440.
- [21] Lee Z P and Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote sensing reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, (89): 361–368.
- [22] Craig S. E., Lohrenz S. E., Lee Z. Use of hyperspectral remote sensing reflectance for detection and assessment of the harmful alga, *Karenia brevis* [J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5414–5425.
- [23] 毛显谋, 黄韦良. 赤潮遥感监测[R]. 海洋水产养殖区赤潮监测及其短期预报试验性研究项目赤潮遥感研究报告, 1998.
- [24] 丛丕福, 赵冬至, 曲丽梅. 利用卫星遥感技术监测赤潮的研究[J]. 海洋技术, 2001, 20(4): 69–72.
- [25] 赵冬至, 张丰收, 赵玲, 等. 近岸海域叶绿素和赤潮的 AVHRR 波段比值探测方法研究[J]. 海洋环境科学, 2003, 23(4): 9–12.
- [26] 赵冬至, 杜飞, 张丰收, 等. 基于高光谱反射率的藻类水体基线荧光峰高度和叶绿素 a 浓度关系的研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(5): 68–72.
- [27] 陆斗定, J. Gobel, 王春生, 等. 浙江海区赤潮生物监测与赤潮实时预测[J]. 东海海洋, 2000, 18(2): 34–44.
- [28] Sacau-Cuadrado M, Conde-Pardo P, Otero-Tranchero P. Forecast of red tides off the Galician coast [J]. Acta Astronautica, 2003, (53): 439–443.

## Overview on Monitoring and Forecast of Red Tide Hazard

Cong Pifu, Zhao Dongzhi, Qu Limei and Zhang Fengshou

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The frequent occurrence of offshore red tide hazard severely damaged oceanic ecological balance and marine environment. The status quo of red tide monitoring and forecasting at home and abroad is described. The methods of red tide forecasting by remote sensing are particularly introduced. The problems affecting red tide forecasting are summarized. It is pointed out that the red tide forecasting model based on mechanism and ecological process is promising.

**Key words:** red tide hazard; monitoring and forecasting; remote sensing; model