

An aerial photograph of a coastline. The top half shows a clear blue sea meeting a sandy beach and a town. The bottom half shows a large, irregular area of the sea turned a deep red color, indicating a red tide. The coastline is rugged with mountains in the background.

海洋赤潮的监测、建模及预警方案

2016 年 4 月, 美国佛罗里达州皮内拉斯县, 赤潮侵袭海岸, 环境问题刻不容缓。
根据国家海洋局统计, 2015 年中国沿岸海域共发现赤潮 35 次, 累计面积 2809 平方千米...

作者：徐泓¹, 罗阳², Brigitte Vinçon-Leite³

¹ 德国慕尼黑工业大学

² 中国水利部海河水利委员会

³ 法国巴黎高科国立路桥大学

2016 年 6 月 9 日 (第一稿)

目 录

一、 海洋赤潮简介.....	3
1. 赤潮的起因与发展.....	3
2. 赤潮的现状与危害.....	4
3. 赤潮的治理与研究.....	6
二、 海洋赤潮的监测方案.....	7
1. 海洋的实时监测.....	7
2. 赤潮的数据采集.....	8
三、 海洋赤潮的建模及预警方案.....	9
1. 海洋模型与赤潮模型.....	9
2. 赤潮预警与数据验证.....	14
四、 海洋赤潮的综合治理.....	17

1

海洋赤潮简介

赤潮，又叫红潮，是一种水华现象。它是海洋灾害的一种，是指海洋水体中某些微小的浮游植物、原生动物或细菌，在一定的环境条件下突发性增殖和聚集，引发一定范围和一段时间内水体变色现象。赤潮是一个历史沿用名词，并不一定都是红色，而是许多类似现象的统称；发生赤潮时，通常根据引发赤潮的生物的数量、种类而使得海洋水体呈红、黄、绿和褐色等^[1]。

1.1

赤潮的起因与发展

赤潮是一种自然现象，也有人为因素引起的，可能但不一定是一种有害生态现象。引起赤潮的原因主要有^[1]：

- ⇒ 海域水体富营养化；有特殊物质作为诱发因素，已知的有维生素 B1、B12、铁、锰和脱氧核糖核酸（DNA）；
- ⇒ 大量工农业废水和生活污水排入海，特别是未经处理直接排入而导致近海、港湾富营养化程度日趋严重；
- ⇒ 海洋开发、水产业带来了海洋生态环境和养殖业自身污染问题；
- ⇒ 全球海运业发展导致外来有害赤潮种类的引入；
- ⇒ 气候变暖导致赤潮发生。

随着全球海洋污染日益严重以及气候变化的日益加剧，赤潮也随之遍布全球发展迅速。赤潮是一种世界性的公害，美国、日本、中国、加拿大、法国、瑞典、挪威、菲律宾、印度、印度尼西亚、马来西亚、韩国等 30 多个国家和地区赤潮发生都很频繁。据载，中国早在 2000 多年前就发现赤潮现象，一些古书文献或文艺作品里已有一些有关赤潮方面的记载。如清代的蒲松龄在《聊斋志异》中就形象地记载了与赤潮有关的发光现象^[2]。而自 20 世纪 70 年代起，我国有记录的赤潮有几百次，发生次数以每 10 年增加 3 倍的速度上升，2000 年

以来赤潮事件每年都达到了几十次；赤潮发生规模也呈急剧扩大的趋势，1998 年至今，每年都发生了面积超过 1000 平方公里的特大赤潮，其中有几年赤潮面积甚至达到上万平方公里，前后持续时间将近一个月，世界罕见[3]。

1.2 赤潮的现状与危害

我国国家海洋局自 1989 年起每年发布中国海洋灾害公报，据《2015 年中国海洋灾害公报》统计，2015 年我国管辖海域共发现赤潮 35 次，累计面积 2 809 平方千米；我国沿岸海域赤潮高发期为 5 月。与此同时，有毒、有害的赤潮原因种也在不断增加，甲藻等有害种类已成为我国赤潮的主要原因种。这些趋势充分表明了我国赤潮问题的严重性和复杂性[3]。

年份	发现赤潮次数	累计面积（平方千米）
2011	55	6 076
2012	73	7 971
2013	46	4 070
2014	56	7 290
2015	35	2 809

表 1-1: 2011-2015 年我国沿岸海域发现赤潮次数和累计面积
数据来源: 国家海洋局《中国海洋灾害公报》

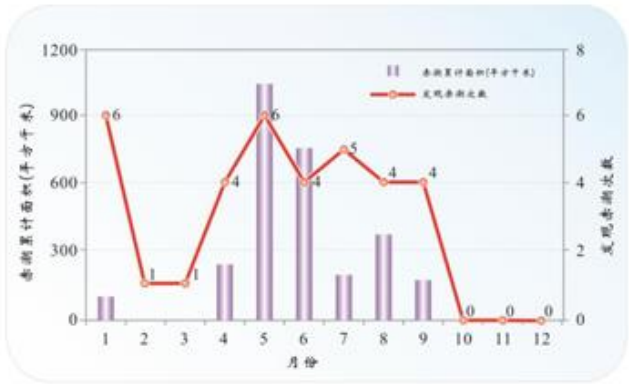


图 1-1: 2015 年我国沿海发现赤潮次数和累计面积月度分布情况
数据来源: 国家海洋局《2015 年中国海洋灾害公报》

有害赤潮发生后，导致海洋食物链的局部中断；有些赤潮生物分泌毒素被海洋食物链中的某些生物摄入，会导致中毒甚至死亡^[1]。

- ⇒ 这些赤潮破坏海洋生态结构；
- ⇒ 这些赤潮生物的分泌物妨碍海洋鱼类、虾类、贝类的正常呼吸而导致窒息死亡；
- ⇒ 含有毒素的赤潮生物被海洋生物摄食后能引起中毒死亡；人类食用含有毒素的海产品也会导致食物中毒；
- ⇒ 这些赤潮生物死亡后尸骸的分解过程中要大量消耗海水中的溶解氧，造成缺氧环境，引起虾、贝类的大量死亡。

赤潮产生危害的主要方式是^[1]：

- ⇒ 赤潮发生时，海水中高密度的赤潮生物覆盖或粘附在海洋动物的呼吸器官上，造成海洋动物呼吸困难和窒息死亡；
- ⇒ 大量赤潮生物的呼吸代谢（尤其在夜间，无光合作用产生氧气）和死亡细胞分解过程中消耗海水中大量溶解氧，使水体严重缺氧，导致海洋生物死亡；
- ⇒ 赤潮衰败过程中还会释放出大量有害气体（如硫化氢）和毒素，严重污染海洋环境，甚至导致海洋动物死亡；
- ⇒ 有的赤潮种类，如杀鱼费氏藻（学名：Pfiesteria piscicida），不但会释放毒素毒害鱼类，而且会直接接触鱼体噬食鱼肉；
- ⇒ 有些赤潮生物体内含有鱼毒或贝毒，虽然对摄食它们的鱼类或贝类无害，但会在摄食者体内累积，使取食这些鱼类或贝类的海洋捕食者和人类发生中毒。目前已知的赤潮生物毒素有麻痹性贝毒（PSP）、神经性贝毒（NSP）、泻痢性贝毒（DSP）、失忆症贝毒（ASP）和雪茄鱼毒（CFP）等。

1.3 赤潮的治理与研究

我国的科技工作者自 20 世纪 70 年代起就开展了对赤潮和“水华”的研究，并认为主要是污染水体富营养化引起的灾害。近期，重点研究赤潮的有效预警、预测方法，有害赤潮的管理、减灾和防治技术。对有害赤潮的治理，物理方法有隔离法、超声波破碎法、电磁波处理技术等，化学方法有用除莠剂直接杀灭法、絮凝剂沉淀法、天然矿物絮凝法，生物方法有营养物质竞争法、生物捕食法、生物排斥技术等。其中天然矿物絮凝法已被实际应用并取得良好效果。对淡水蓝藻“水华”的治理有与传统的“控制藻类的经典生物操纵法”相对应的“利用鲢鳙控制‘水华’的生物操纵法”，揭开了东湖蓝藻“水华”消失 16 年之谜。这一新的生物操纵理论已经在长春南湖蓝藻“水华”治理中取得显著效果，在巢湖的围隔试验中也得到了验证。在滇池蓝藻“水华”污染控制技术研究中还开展底栖动物除藻技术、移动式富集湖面蓝藻“水华”技术、气浮捕集蓝藻“水华”技术、蓝藻“水华”机械收获技术、藻水重力振动分离技术、分离和筛选溶藻菌株和噬藻体的灭藻技术、克藻植物---浮叶植物的培育技术等^[4]。

早期受科研能力的制约，对赤潮现象的研究手段主要是现场观测和定性描述，不足以阐明不同海域、不同藻类赤潮的发生机制。随着对赤潮研究的不断伸入，人们开始探索定量分析的研究方法，并提出各种数学模型来模拟赤潮生消变化过程。早期赤潮模型常用作对某些猜想进行解释的工具。例如，一些学者通过建立模型来验证发生在近岸的带状腰鞭毛藻（*dinoflag-ellate*）赤潮是否就是由于该浮游植物的游泳特性和海流作用的结果。如今模型已经日益成为定量研究赤潮发生发展过程的主要工具。随着人们对赤潮暴发机理的进一步认识和对各种影响因素的专项研究，对赤潮模型的研究也越来越细化，引入的变量参数也越来越多^[5]。

2 海洋赤潮的监测方案

为了更好地对海洋赤潮爆发的规律及机理进行研究，对于赤潮的监测是必不可少的研究步骤。赤潮常规监测手段主要是，建立赤潮监控区，对赤潮发生、发展和消亡过程的水体生化参数、赤潮物种等进行采样测量与分析，实现对赤潮事件的监测；除此之外，对沿海赤潮的观测记录主要来自于海监飞机、渔民、志愿者等及时发现与上报。这些监测手段容易受到赤潮爆发不确定性以及时间空间等的诸多限制，近年来使用比较广泛的是卫星遥感监测技术，需要联系相关单位或公司购买卫星遥感图。本方案提出一种较为简易的实时监测、建模及预警的方法，结合卫星遥感图像，实现较为准确的短期赤潮预警。

2.1 海洋的实时监测

对于赤潮的建模研究，需要采集大量的海洋物理数据，包括地理位置信息、浅水层温度、深度、导电率、盐度、浊度、叶绿素 a 浓度、溶解氧及 PH 等等，这些参数决定了赤潮中优势藻类的爆发条件。

基于对赤潮的无人实时监测及成本考虑，本方案采用法国 NKE Instrumentation 公司的 SAMBAT 型号多参数海水分析仪进行赤潮的实时监测及各项海洋指标的数据采集。通过卫星遥感数据分析近年来在有可能爆发赤潮的海域，在设置赤潮观测区之后，根据赤潮观测面积需求，在海面上安装若干此型号多参数海水分析仪并利用浮标固定。并且安装滑轮组装置使其测量深度在海平面以下 0-8 米范围之内，这对应一般赤潮优势藻类大量爆发的深度区间。实时的监测数据可以通过内置 GPS 及网络通讯模块发送至指定邮件信箱，从而进行快速并且方便的数据采集，无需专人值守。其维护周期约为八个月至一年，根据当地条件的不同而有所区别。



2.2 赤潮的数据采集

通过在海面安装海水多参数分析仪，我们可以实时定点监测叶绿素 a 含量。然而，在更广阔的海域，我们需要借助卫星遥感进一步确定赤潮发生的具体位置以及爆发面积。通过对海水水色、光谱等进行分析，结合当地藻类种群特征可以得出大概爆发浮游藻类（如甲藻类、硅藻类、鞭毛藻类、夜光藻类等）的类别以及相应浓度。这些藻类其细胞壁含叶绿素和类胡萝卜素等，因而赤潮的反射光谱与背景（海水）是不一样的，这是从遥感图像上判断是否赤潮的根据。这些数据将被用于进行赤潮模型的修正与预警结果验证。

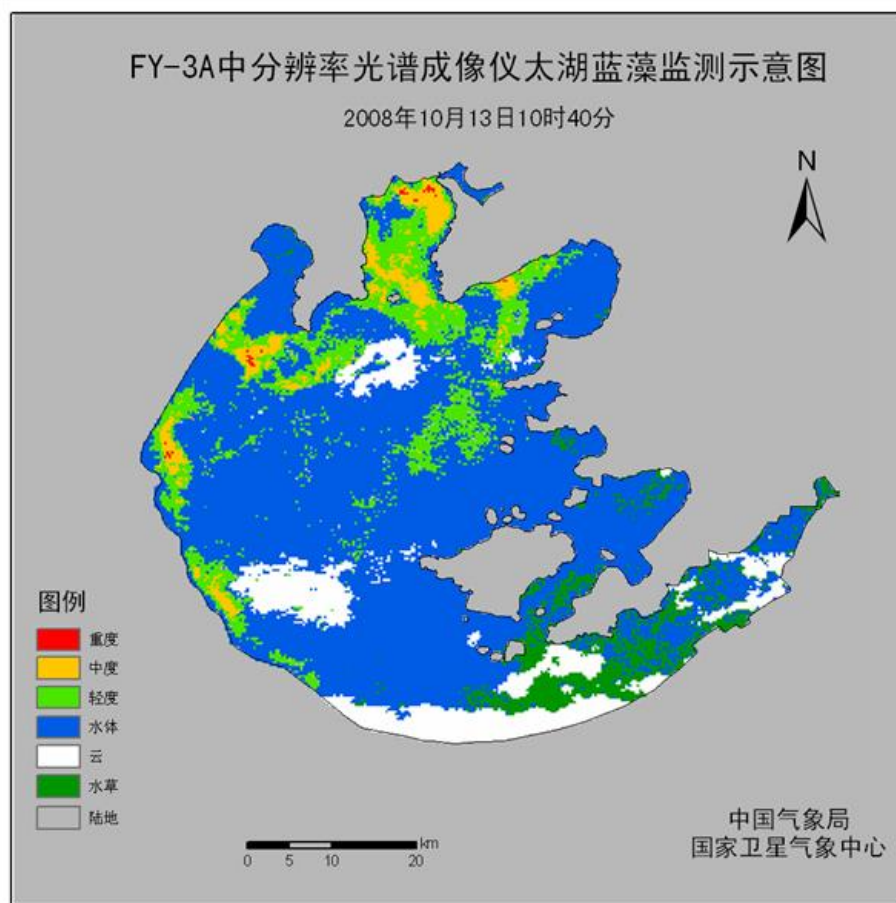


图 2-2: FY-3A 中分辨率光谱成像仪太湖蓝藻监视示意图

数据来源：中国气象局国家卫星气象中心

3 海洋赤潮的建模及预警方案

一般来说，赤潮藻都是以营养盐为生存基础，光合作用为必要条件来维持其生存，如果营养盐过多，达到富营养化，浮游生物就有可能爆发性增殖，引发赤潮。赤潮因其种类、地域特征、海况、气象气候及人为影响的不同而呈现多样性和复杂性，这使赤潮研究变得非常困难，赤潮研究的特点在于其复杂性，它不是单纯的生物问题，而是一个多学科的问题。因此，对赤潮暴发机理的认识是否全面是建立赤潮预报模型的关键所在。

赤潮生物模型的研究始于 20 世纪中叶，经过几十年的不断发展，模型经历了从简单到复杂、从一维到多维、从单因子到多因子等一系列变化。受监测能力和科研水平的限制，早期模型大多仅从生物角度描述种群的变化。随着监测能力和认知水平的提高，人们逐渐发现赤潮不仅是生物学问题，同时也是环境学的问题；对于赤潮预报模型的研究，既要从生物种群的角度出发，也要考虑环境要素的影响，并在已有的理论研究基础上针对不同海域以及不同赤潮生物的自身特点建立了一系列模型。

3.1 海洋模型与赤潮模型

3.1.1 海洋模型

在我们之前建立的观测点的基础上，首先建立一维竖直方向的海水平衡和竖直方向混合的模型，计算竖直方向的温度、盐度与密度，考虑此区域海水流入和流出、海水混合与海水表面加热与冷却等等。

1. 能量概算

1) 显热计算

在 Δt 时间内从海面定点区域损失的显热为:

$$\Phi_H = -\rho_a c_p C_H U_x (T_a - T_s) \quad (1)$$

C_H 是显热传递系数($= 1.3 \times 10^{-3}$);

ρ_a 空气密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

C_p 恒压下空气的比热($= 1003 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);

U_x 风速 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

T_a 和 T_s 空气和海水表层的摄氏温度

2) 潜热计算

$$\Phi_E = -\rho_a C_E U_x (e_a[T_a] - e_s[T_s]) \quad (2)$$

C_E 传递潜热的固体空气动力系数;

e_a 大气蒸汽压计算如下:

$$e_a[T_a] = \frac{RH}{100} e_s[T_a] \quad (3)$$

e_s 在表面层温度下的饱和蒸汽压 (hPa).

$$e_s[T_s] = \exp \left[2.303 \left(7.5 * \frac{T_s}{T_s + 273.15} \right) + 0.7858 \right] \quad (4)$$

或者
$$e_s[T_s] = 10^{\left(9.28603523 * \frac{2322.37885 * T_s}{T_s + 273.15} \right)} \quad (5)$$

3) 短波辐射计算

短波辐射能够根据朗伯 - 比尔定律计算，公式为：

$$\Phi_{SW}(z) = (1 - \alpha_{SW})\hat{\Phi}_{SW}\exp[-K_W z] \quad (6)$$

$$\alpha_{SW} = \begin{cases} 0.08 + 0.02\sin\left[\frac{2\pi}{365}d - \frac{\pi}{2}\right] & \text{北半球} \\ 0.08 & \text{赤道} \\ 0.08 - 0.02\sin\left[\frac{2\pi}{365}d - \frac{\pi}{2}\right] & \text{南半球} \end{cases} \quad (7)$$

其中：

$\Phi_{SW}(z)$ 是在深度 $z(m)$ 处的短波辐射;

α_{SW} 用来考虑反照对 Φ_{SW} 的影响;

d 一年中的日期天数;

K_W 为消光系数，通常设置为常数或通过耦合水质模型得到。

4) 长波辐射

计算如下:

$$\Phi_{LW_{in}} = \sigma[T_a + 273.15]^4 \times (1 + c_1 C) \times (1 - c_2 \exp[-c_3 T_a^2]) \quad (8)$$

$$\Phi_{LW_{out}} = \varepsilon_W \sigma[T_s + 273.15]^4 \quad (9)$$

$$\Phi_{LW_{net}} = \Phi_{LW_{in}} - \Phi_{LW_{out}} \quad (10)$$

其中:

σ 是史蒂芬 - 玻尔兹曼常数;

C 是云覆盖度 (范围从 0 到 1) ;

E_w 是水面发射率 , 常数。c₁=0.275; c₂=0.261; c₃=0.000777×10⁻⁴.

2. 垂直混合

垂直混合是基于动能和势能的简单的能量概算近似.

动能计算:

动能由三部分组成 , 式如下所示 :

- 1) 对流翻转 , 水层降低导致势能的减少所释放的能量;
- 2) 风搅拌 , 从表层风施加的切向应力增加的能量;
- 3) 切应力 , 动能在上部分和下部分水层之间的转换。

$$E_{TKE} = \underbrace{0.5C_K(w_*^2)\Delta t}_{\text{对流搅拌}} + \underbrace{0.5C_w(\psi^3 u_*^3)\Delta t}_{\text{风搅拌}} + \underbrace{0.5C_s \left[u_b^2 + \frac{u_b^2}{6} \frac{d\xi}{dh} \right] h_{s-1}}_{\substack{\text{切应力} \\ K-H \text{ 乘积}}} \quad (11)$$

其中:

CK 是混合对流翻转效率系数;

CW 是在混合搅拌风效率系数;

CS 处于剪切混合效率系数。

势能计算:

$$E_{PE} = \left[\underbrace{0.5C_T(w_*^3 + \psi^3 u_*^3)^{\frac{2}{3}}}_{\text{acceleration}} + \underbrace{\frac{\Delta \rho g h_{mix}}{\rho_0}}_{\text{lifting}} + \frac{g \xi^2}{24 \rho_0} \frac{d(\Delta \rho)}{dh} + \frac{g \xi \Delta \rho}{12 \rho_0} \frac{d\xi}{dh} \right] h_{s-1} \quad (12)$$

u^* 和 w^* 指的是水平和竖直方向的速度；

上下层混合发生的条件要求提升 $i-1$ 层水层（厚度 h_{i-1} ）的能量，足以加速其到达 SML 速度。；要计算以上提到的动能和势能，我们需要长度 K-H billows 总结为:

$$\xi = KH \frac{\rho_0 u_b^2}{g \Delta \rho} \quad (13)$$

底层水的速度近似为:

$$u_b = \frac{u_*^2 t}{h_{mix}} + u_0 \quad (14)$$

此模型首先计算这些能量项，然后从顶层水层到底层水层循环计算，直到剩余的能量不足以进行混合。表面混合层（SML）以下的混合模型使用特征扩散模型, $K=K_\epsilon+K_m$ ，基于以下公式:

$$K_\epsilon = \frac{\alpha_{TKE} \epsilon_{TKE}}{N^2 + 0.6 k_{TKE}^2 u_*^2} \quad (15)$$

其中 K_m 固定分子扩散标量. $\alpha_{TKE}=0.5$ 并且 k_{TKE} 被定义为波数.

对于 ϵ_{TKE} ：

$$\epsilon_{TKE} \begin{cases} \epsilon & z_i > (H_t - h_{mix}) \\ \epsilon \exp \left[-\frac{H - h_{mix} - z}{h_{sig}} \right] & z_i < (H_t - h_{mix}) \end{cases} \quad (16)$$

其中 h_{sig} 是 N^2 分布第一时刻的距离 h_{s-1} ， N^2 是浮力频率:

$$N^2 = \frac{g \Delta \rho}{\rho \Delta z} \quad (17)$$

3.1.2

赤潮模型

赤潮模型使用的是藻类水生生态动力学模型，模拟总共的藻类生物质（单位以碳含量 mmol C/m^3 ），包括各种水生植物的种群。并且假设各种水生植物的种群有一个固定的 C:N:P:Si 碳氮磷硅的含量比值，或者在水层混合时对氮和磷源有动态吸收。对于每一种水生植物在 20 摄氏度时有一个最大潜在生长速率，它被光照、磷、氮、硅含量等等最小值所限制。因此光合作用产生碳的过程被参数化，包括温度、光照和营养物质等等参数。

$$f_{uptake}^{PHYC_a} = \underbrace{R_{growth}^{PHYa}}_{\substack{20 \text{ 摄氏度最大} \\ \text{生长速率}}} \underbrace{(1 - k_{pr}^{PHYa})}_{\text{光呼吸损失}} \underbrace{\Phi_{tem}^{PHYa}(T)}_{\text{温度范围}} \underbrace{\Phi_{str}^{PHYa}(T)}_{\text{代谢应激}} \dots$$

$$\dots \min \left\{ \underbrace{\Phi_{light}^{PHYa}(I)}_{\text{光照条件限制}}, \underbrace{\Phi_N^{PHYa}(NO_3, NH_4, PHY_{Na})}_{\text{氮含量限制}}, \underbrace{\Phi_P^{PHYa}(PO_4, PHY_{Pa})}_{\text{磷含量限制}}, \underbrace{\Phi_{Si}^{PHYa}(RSi)}_{\text{硅含量限制}} \right\} [PHY_{C_a}]$$

3.2

赤潮预警与数据验证

对于赤潮预警，此方案可以结合以上模型计算结果并用 MATLAB 绘制藻类和温度的分布图，如下图（例）所示。

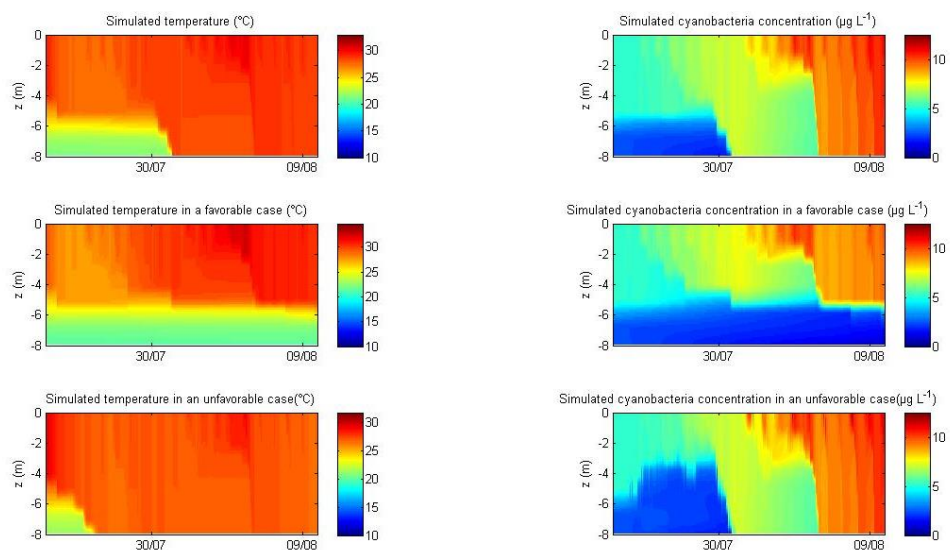


图 3-1: 赤潮预警模式 a) 预测的温度, b) 不利温度和 c) 有利温度 (例) .

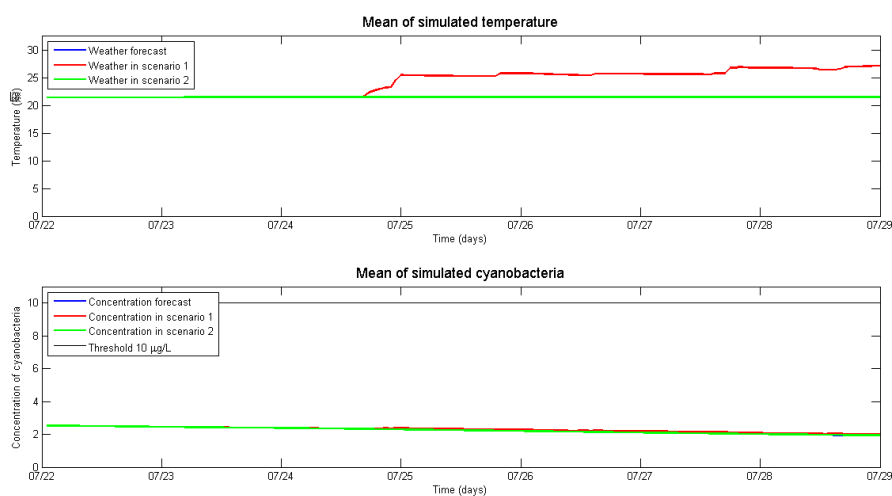


图 3-2: 在深度 0.1-0.5 m 处预测温度以及藻类生物质的含量 (例) .

以上为赤潮模型预警的结果（例），接下来我们进行数据验证处理。通过数据验证可以分析模型偏差值，并使用当地实际数据进行模型的校准。

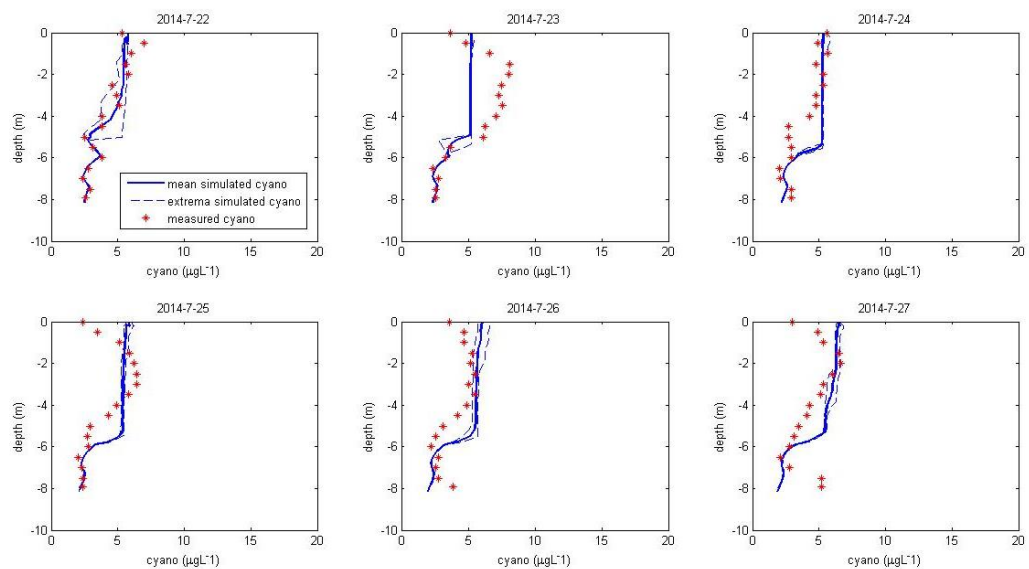


图 3-3: 在水下 0-8 米区间对于竖直方向藻类含量的绘制图（例）。

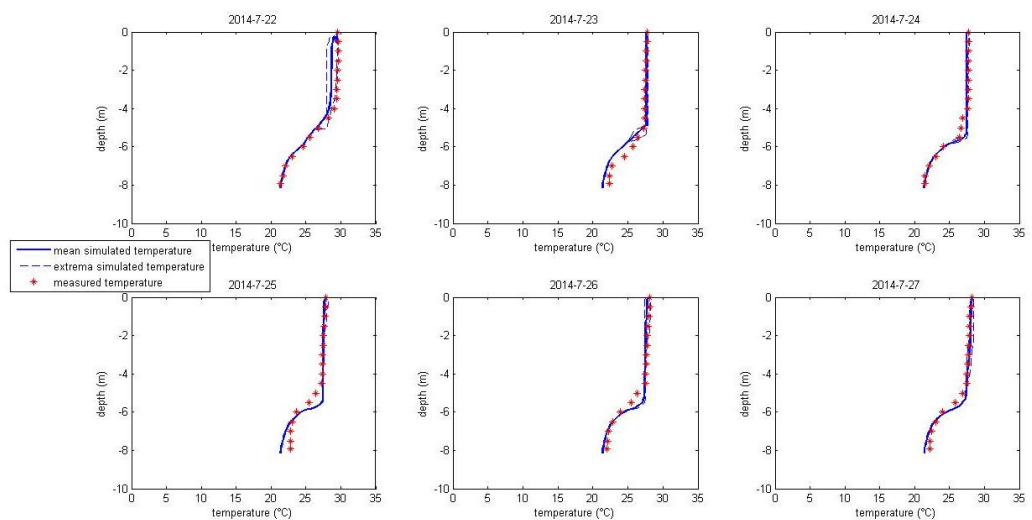


图 3-4: 在水下 0-8 米区间对于竖直方向温度的绘制图（例）。

注：此模型仅适用于 7 天以内的短期赤潮预警，对于长期预报偏差值较大，可信度比较低。

1. 物理法

物理法就是在赤潮治理中，利用某些设备、器材在水体中设置特定的安全隔离区，分离赤潮水体中的赤潮生物或者利用机械装置灭杀、驱散赤潮生物的方法。主要包括：过滤法、隔离法、光照射法、超声波法、电解法等，许多物理方法成本较高，不易操作，只适合较小面积的赤潮治理。

2. 化学法

所谓的化学法是指在赤潮治理时利用化学产品或者矿物质抑制、杀死或去除赤潮生物的方法。这类方法是最早被采用、目前使用最多、发展最快的一类。根据应用时作用机理的不同，可分为灭杀法、沉降法和天然矿物絮凝法，其中利用化学杀藻剂控制赤潮是常用赤潮治理方法之一。化学灭杀法是较常用的方法，具有操作简单、用量较少等优点，但往往灭杀效果不彻底，对生态环境、非赤潮生物的影响以及成本等方面存在诸多问题。

3. 生物方法

所谓的生物方法就是利用物种之间的生存竞争，通过有目的的培养一些有益的生物种来抑制、去除赤潮生物的恶性增殖；或者利用一些对赤潮藻具有特殊去除效果的生物排泄物及生物制品，来抑制、去除赤潮生物的方法。虽然这类方法在实际赤潮治理中的应用还未见报道，但是各国赤潮科学家在室内及淡水湖泊中进行了大量研究，并且对生物方法治理有害赤潮的可行性进行了论证。概括起来，有害赤潮生物治理的主要理论基础包括以下几种：海洋微生物与赤潮藻间的相互作用、海洋动物的捕食作用、大型藻类与赤潮生物间的作用等，生物方法目前基本还局限于室内试验阶段。

4. 改性粘土治理赤潮

通过粘土矿物絮凝赤潮生物、控制赤潮的发生是 80 年代日本提出的一种方法，符合上述要求，但该方法由于粘土絮凝效率低，存在应用时用量大、残渣多的缺点，限制了该方法的推广使用。针对该不足，国内外赤潮科学家对粘土进行了大量改性研究。中国科学院海洋研究所的俞志明等将胶体化学理论应用于粘土颗粒与赤潮生物细胞的相互作用，提出了粘土的表面改性理论，建立了以范德华作用和静电作用为主的粘土颗粒絮凝赤潮生物的理论模型，并制备出多种高效的改性粘土，推动了国际上粘土法治理赤潮的研究和应用。该方法被收录于联合国教科文组织和 APEC 联合出版的“Monitoring and Management Strategies for Harmful Algal Blooms in Coastal Waters”一书中，成为目前国际上藻华治理的主要推荐方法之一，被美国、韩国、香港等国家和地区所采用。

改性粘土方法 2005 年成功应用于第十届全国运动会水上项目比赛场地南京玄武湖藻华治理，2006 年和 2007 年成功应用于“青岛国际帆船赛”赛场海域赤潮防治，充分证明了改性黏土技术对淡水藻华控制的可行性和有效性。2006 年该成果通过由山东省科技厅组织的专家鉴定，被誉为我国藻华治理技术的重大突破，达到国际领先水平，为国内外有害藻华治理提供了一个行之有效的途径，被指定为 2008 年奥运会青岛帆船比赛水域赤潮应急处置方法。

总之，通过表面改性可以大大改善粘土去除赤潮生物的性能。改性粘土絮凝法具有成本低、原料来源广、对环境无副作用等优点，同时可以改善水体的质量，是当前实际有害赤潮治理中应用比较广泛的方法。

A 参考文献

- [1] <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E6%BD%AE>
- [2] <http://baike.baidu.com/subview/773/11095707.htm>
- [3] 海洋通报, 2015.06.22
- [4] 论赤潮和“水华”之灾形成的根源及对策, 沈韞芬. 2002.
- [5] 赤潮预警预报模型研究进展, 陈艳拢, 杨建洪, 赵冬至等. 2011.
- [6] 国家海洋局《2015 年中国海洋灾害公报》
- [7] Modelling of Cyanobacteria Dynamics for YuQiao Reservoir in Tianjin, China. 2016. Report from LEESU, École des Ponts ParisTech.

¹ <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E6%BD%AE>

² <http://baike.baidu.com/subview/773/11095707.htm>

³ 海洋公报

⁴ 论赤潮和“水华”之灾形成的根源及对策

⁵ 赤潮预警预报模型研究进展 陈艳拢, 杨建洪, 赵冬至, 王林