

# 长江口邻近海域春季藻华期间浮游植物生物量与环境要素的拟合分析

周正熙<sup>1,2</sup>, 于仁成<sup>1,3</sup>, 周名江<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266235)

**摘要:** 基于 2005 年长江口邻近海域春季现场调查资料, 本文采用非线性拟合方法, 构建了该海域春季硅藻藻华和甲藻藻华期间浮游植物生物量与无机营养盐、温度和盐度之间的定量关系方程, 进而分析了春季硅、甲藻藻华发生的最适环境条件。结果表明, 硅藻藻华出现的最适环境条件为: 溶解态无机氮浓度 10.1  $\mu\text{mol/L}$ 、磷酸盐浓度 0.21  $\mu\text{mol/L}$ 、硅酸盐浓度 6.39  $\mu\text{mol/L}$ 、温度 11.9°C、盐度 30.5; 甲藻藻华暴发的最适环境条件为: 溶解态无机氮浓度 3.98  $\mu\text{mol/L}$ 、磷酸盐浓度 0.18  $\mu\text{mol/L}$ 、温度 22.0°C、盐度 27.2。上述硅、甲藻藻华发生的最适环境条件可作为硅、甲藻藻华形成的关键环境参数, 为开展长江口邻近海域藻华形成和演替过程的数值模拟和参数优化提供参考。

**关键词:** 东海; 长江口邻近海域; 有害藻华; 关键环境参数

中图分类号: X55 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)11-0074-10

doi: 10.11759/hykkx20160518002

东海是中国近海有害藻华(通常称为赤潮)问题最为严重的海区。据不完全统计, 近 20 年来该海域有记录的藻华事件已达上千起, 造成较大经济损失的有害藻华次数约占全国总次数的 62%<sup>[1-2]</sup>。2012 年, 福建沿海发生的大规模米氏凯伦藻藻华给养殖业造成的直接经济损失超过 20 亿元<sup>[3-4]</sup>。在东海, 受长江冲淡水影响较大的长江口邻近海域是东海有害藻华的高发区之一, 2002 年以来, 每年春季都会发生大规模甲藻藻华<sup>[5-6]</sup>。

大规模甲藻藻华的出现是长江口邻近海域藻华原因种长期演变的反映。研究发现, 该海域每年春、夏季都会出现由硅藻藻华向甲藻藻华演替的现象<sup>[7-8]</sup>。有害藻华的形成和演替过程、机制相当复杂, 与不同类群浮游植物的生理生态特征及营养盐、温度、光照和盐度等环境因素密切相关<sup>[4, 9-11]</sup>。其中, 不同藻华原因种对营养盐的需求差异是决定藻华期间浮游植物演替的重要因素, 这一点可以通过不同藻种生长的最适营养盐浓度反映出来<sup>[12-15]</sup>。此外, 温度、光照和盐度也是影响藻种生长的重要环境因子, 不同藻种对其适应特征的差异性决定了藻种能否在竞争过程占据优势<sup>[16-17]</sup>。因此, 确定不同藻华优势类群生长的最适环境条件及其差异, 对于深入理解该海域藻华的发生过程和演替机理非常重要。

目前, 海洋生态动力学模型已用于研究藻华形成和演替等动态过程<sup>[18-20]</sup>, 成为定量描述和分析海洋生态系统中关键过程的重要工具<sup>[21-22]</sup>。浮游植物生长的相关参数是模拟浮游植物光合作用等关键生态动力学过程的重要参数, 其取值是否合理, 会在很大程度上影响模型对浮游植物生长过程模拟的准确性<sup>[23-25]</sup>。因此, 获得合理的浮游植物生长参数是构建有效数值模式的基础。

浮游植物生长相关参数通常通过室内培养实验获得。但是, 室内实验考虑的环境变量很少, 很难反映出目标海域各种因素综合作用下浮游植物的生长特征。相对于室内培养实验, 围隔实验的条件更接近自然环境, 但与实际的藻华发生过程仍然存在较大

收稿日期: 2016-02-25; 修回日期: 2016-05-26

基金项目: 中国科学院 A 类先导专项(XDA11020304); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428700); 国家自然科学基金项目(U1406403)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11020304; Major State Basic Research Development Program of China (973 Program), No. 2010CB428700; National Natural Science Foundation of China, No. U1406403]

作者简介: 周正熙(1989-), 女(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事海洋生态动力学研究, 电话: 0532-82898649, E-mail: zhouchengxi11@mails.ucas.ac.cn; 于仁成, 通信作者, 博士, 研究员, 博士研究生导师, E-mail: reyu@qdio.ac.cn

差异。本研究基于 2005 年春季藻华期间的现场实测资料, 结合现有生态动力学方程中的基本概念, 采用非线性拟合方法, 对藻华期间浮游植物生物量与各环境因子之间的关系进行了分析, 以获取硅藻藻华和甲藻藻华出现的最适环境条件, 旨在为目标海域春季藻华形成和演替过程的数值模拟和参数分析提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究所用数据来自国家重点基础研究发展计划项目(国家 973 计划项目)“我国近海有害藻华形成的生态学、海洋学机制与预测防治”于 2005 年春季实施的大面调查资料。目标区域为长江口邻近海域,

采样站位如图 1 所示。浮游植物生物量以叶绿素 *a* (Chla) 含量表示, 考虑的环境因子包括溶解态无机氮、活性磷酸盐、硅酸盐、温度和盐度。其中, Chla 含量测定采用荧光法, 使用 Turner-Designs-Model 10 荧光计进行测定<sup>[29]</sup>。3 种无机营养盐(溶解态无机氮、磷酸盐、硅酸盐)依据《中华人民共和国国家标准 GB 17378.4-1998 海洋监测规范》进行分析<sup>[30]</sup>。温度和盐度数据以 SBE37SM-CTD 和 YSI6600 进行观测获得<sup>[31]</sup>。

长江口邻近海域 2005 年春季藻华期的浮游植物优势类群存在由硅藻向甲藻的演替现象, 具有一定的代表性。依据该海域藻华优势类群的变化情况, 将采样时段分为硅藻藻华期(3 月 27 日至 4 月 12 日)和甲藻藻华期(5 月 29 日至 6 月 17 日)两个阶段, 以进一步分析不同类型藻华形成的最适环境条件。

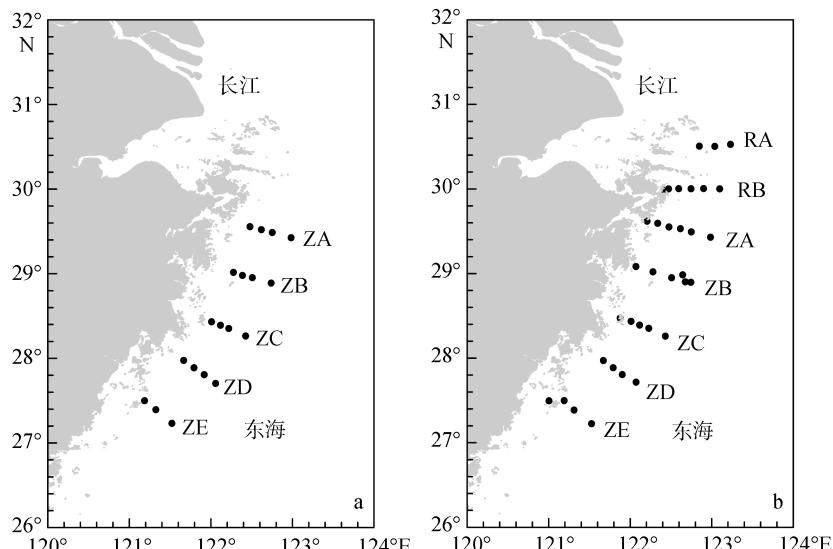


图 1 2005 年硅藻藻华期(a)及甲藻藻华期(b)采样站位分布图

Fig. 1 Sampling sites in the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary during the diatom bloom (a) and the dinoflagellate bloom (b) in 2005

### 1.2 数据分析方法

依据 2005 年春季的实测资料, 绘制出整个春季藻华期间、硅藻藻华期间和甲藻藻华期间 Chla 含量与无机营养盐、温度和盐度等三类环境因子的关系图, 如图 2 所示。应用 Matlab 软件计算上述变量的平均值、取值范围、标准偏差和变异系数, 并采用线性相关方法分析了硅、甲藻藻华期间浮游植物生物量与各环境因子之间的相关性。

在上述统计描述和分析的基础上, 依据生态动力学方程中的基本概念, 采用不同的拟合方程, 对浮游植物生物量与各环境因子之间的关系进行拟合

分析。

#### 1.2.1 浮游植物生物量与无机营养盐浓度的关系

2005 年春季藻华期间, 浮游植物生物量与 3 种无机营养盐浓度的散点关系均呈倒 V 型分布(如图 2a, b, c, d, e, f, g, h, i 所示), 可采用 Steele 方程<sup>[32]</sup>予以描述:

$$\text{Chla}_N^i = A_N^i \frac{N}{N_{opt}^i} e^{(1 - \frac{N}{N_{opt}^i})}$$

式中,  $\text{Chla}_N^i$  为根据营养盐浓度拟合得到的 Chla 含量,  $A_N^i$  为浮游植物生长的状态参数( $i=d$  代表硅藻藻华;  $i=f$  代表甲藻藻华;  $N$  分别代表 DIN、PO<sub>4</sub> 和 SiO<sub>3</sub>),  $N_{opt}^i$  为浮游植物生长的最适营养盐浓度。该方程描述

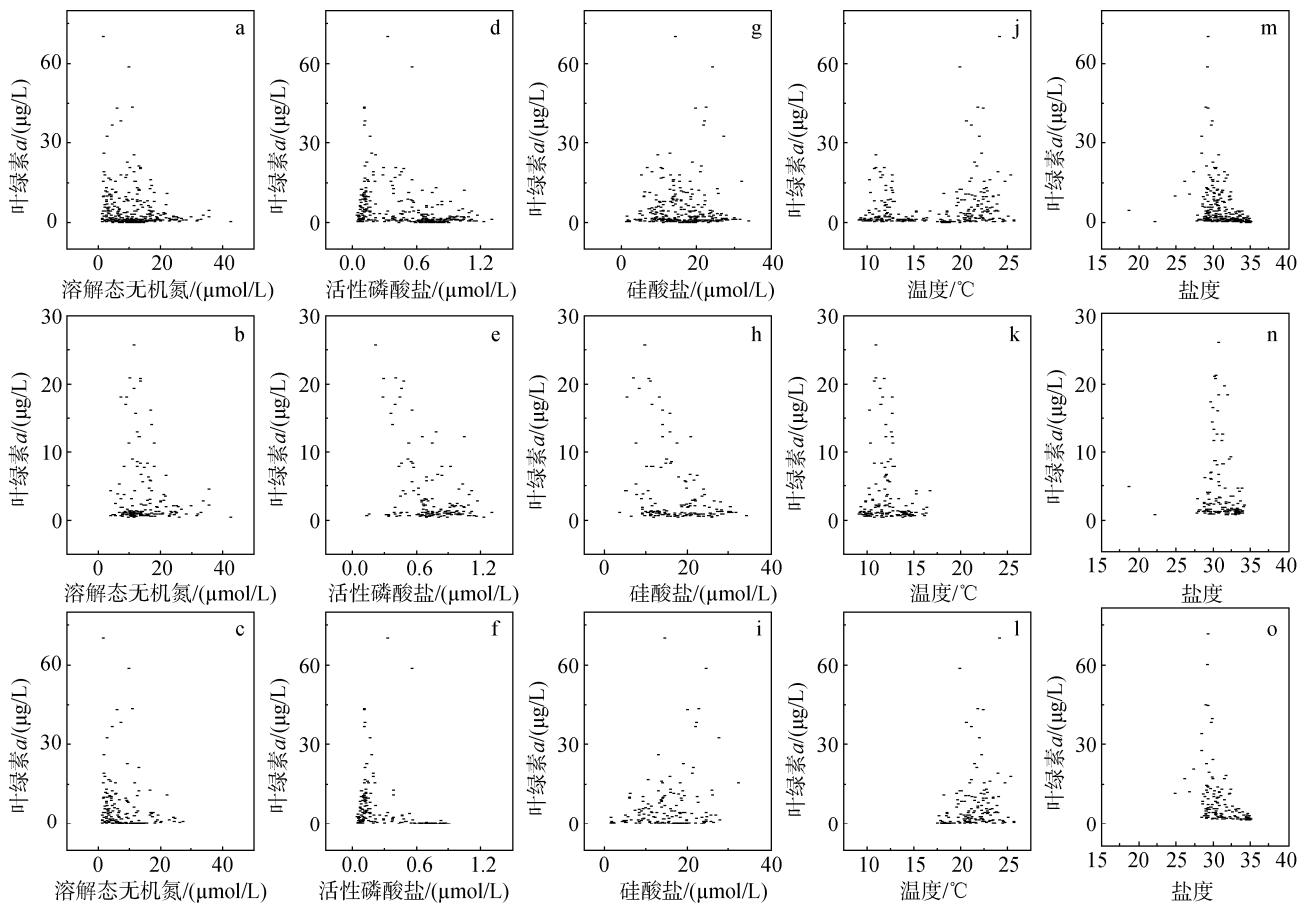


图 2 2005 年春季藻华期(a, d, g, j, m)、硅藻藻华期(b, e, h, k, n)和甲藻藻华期(c, f, i, l, o)浮游植物生物量与各环境因子的关系图

Fig. 2 Scatter diagrams of the phytoplankton biomass corresponding to different environmental factors during the 2005 spring bloom (a, d, g, j, m), diatom bloom (b, e, h, k, n), and dinoflagellate bloom (c, f, i, l, o)

了浮游植物生物量响应营养盐浓度变化的两个阶段：当实际营养盐浓度小于  $N_{opt}^i$  时，生物量随着浓度的增加而增加；当实际营养盐浓度大于  $N_{opt}^i$  时，生物量随着浓度的增加而减小。

### 1.2.2 浮游植物生物量与温度的关系

2005 年春季藻华期间，浮游植物生物量与温度之间呈双峰状非线性关系(图 2j)，在 12℃ 和 23℃ 左右，分别出现了 Chla 含量的两次峰值。其中，第一个 Chla 含量峰值相对较低，两次峰值分别对应早春出现的硅藻藻华(图 2k)和春末夏初出现的甲藻藻华(图 2l)。本研究选用 Gauss 方程<sup>[33]</sup>，分别对硅、甲藻藻华期间的浮游植物生物量与温度之间的关系进行了拟合分析。

$$\text{Chla}_T^i = A_T^i \frac{e^{-\frac{(T-T_{opt}^i)^2}{w_T^{i2}}}}{\sqrt{\pi/2}}$$

式中， $\text{Chla}_T^i$  为根据温度拟合得到的 Chla 含量， $A_T^i$  为浮游植物生长状态参数(曲线峰高参数)， $T_{opt}^i$  为浮游

植物生长的最适温度， $w_T^i$  为适合浮游植物生长的温度范围(最高耐受温度与最低耐受温度之差)。

### 1.2.3 浮游植物生物量与盐度的关系

2005 年盐度与浮游植物生物量之间的关系(图 2m, n, o)可利用简化的 Gauss 方程<sup>[33]</sup>进行拟合：

$$\text{Chla}_S^i = A_S^i e^{-\frac{(S-S_{opt}^i)^2}{w_S^{i2}}}$$

式中， $\text{Chla}_S^i$  为根据盐度拟合得到的 Chla 含量， $A_S^i$  为浮游植物生长状态参数， $S_{opt}^i$  为浮游植物生长最适盐度， $w_S^i$  为浮游植物生长的耐受盐度范围(最大耐受盐度与最小耐受盐度之差)。

至此，本研究采用的 Chla 含量与各个环境变量的定量关系表达式选定如表 1 所示。除与拟合值有简单线性关系的浮游植物生长状态参数外，本研究中需要通过拟合获得 20 个参数，包括分别对应于硅、甲藻藻华的最适溶解态无机氮浓度、最适磷酸盐浓度、最适硅酸盐浓度、最适温度、最适盐度、耐受

温度范围的幅度以及耐受盐度范围的幅度等。通过文献查阅和整理, 设定各拟合方程中的主要参数取值参考范围如表 2 所示。

**表 1 浮游植物生物量与各个环境变量的定量关系表达式**  
**Tab. 1 Functions representing the quantitative relationships between phytoplankton biomass and different environmental factors**

环境变量	表达式
DIN	$\text{Chla\_DIN} = A_N \frac{\text{DIN}}{\text{DIN}_{opt}} e^{(1 - \frac{\text{DIN}}{\text{DIN}_{opt}})}$
PO <sub>4</sub>	$\text{Chla\_PO}_4 = A_P \frac{\text{PO}_4}{\text{PO}_{4opt}} e^{(1 - \frac{\text{PO}_4}{\text{PO}_{4opt}})}$
SiO <sub>3</sub>	$\text{Chla\_SiO}_3 = A_{Si} \frac{\text{SiO}_3}{\text{SiO}_{3opt}} e^{(1 - \frac{\text{SiO}_3}{\text{SiO}_{3opt}})}$
T	$\text{Chla\_T} = \frac{A_T}{w_T \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(T - T_{opt})^2}{w_T^2}}$
S	$\text{Chla\_St} = A_S e^{-\frac{(St - St_{opt})^2}{w_S^2}}$

**表 2 拟合方程中各参数的定义及取值范围**

**Tab. 2 Definitions and ranges of different parameters used in the functions**

标志	取值范围	单位	参考文献
DIN <sup>f</sup> <sub>opt</sub>	1.84~4.45	μmol/L	[34]
PO <sub>4</sub> <sup>f</sup> <sub>opt</sub>	0.11~0.20	μmol/L	[34, 35]
DIN <sup>d</sup> <sub>opt</sub>	3.19~6.11	μmol/L	[34]
PO <sub>4</sub> <sup>d</sup> <sub>opt</sub>	0.25~0.55	μmol/L	[34]
SiO <sub>3</sub> <sup>d</sup> <sub>opt</sub>	1.70~6.27	μmol/L	[34]
T <sup>f</sup> <sub>opt</sub>	22~28	℃	[34, 36]
T <sup>f</sup> <sub>max</sub>	30~33	℃	[34, 36]
T <sup>d</sup> <sub>opt</sub>	20~25	℃	[13, 37]
T <sup>d</sup> <sub>max</sub>	27~40	℃	[13, 38]
St <sup>f</sup> <sub>opt</sub>	28~35		[39, 40]
w <sup>f</sup> <sub>S</sub>	~24		[37]
St <sup>d</sup> <sub>opt</sub>	20~30		[37]
w <sup>d</sup> <sub>S</sub>	~45		[37, 38]

**表 3 浮游植物生物量及各环境因子的平均值、取值范围、标准偏差和变异系数**

**Tab. 3 The mean, range, standard deviation, and coefficients of variation of the phytoplankton biomass and environmental factors**

环境变量	硅藻藻华期						甲藻藻华期					
	平均值	最小值	最大值	标准偏差	方差(%)	样品数	平均值	最小值	最大值	标准偏差	方差(%)	样品数
Chla (μg/L)	3.5	0.4	25.7	5.0	142.6	158	6.1	0.0	70.3	10.3	168.6	165
DIN (μmol/L)	15.0	3.9	42.5	6.7	45.0	158	8.3	1.3	27.1	5.8	70.0	165
PO <sub>4</sub> (μmol/L)	0.7	0.1	1.3	0.2	31.1	158	0.3	0.0	0.9	0.3	86.7	165
SiO <sub>3</sub> (μmol/L)	17.5	3.6	34.0	6.8	38.8	158	14.9	1.3	32.0	6.3	42.5	165
T (℃)	12.1	9.2	16.7	1.8	15.1	158	21.0	17.5	25.7	2.0	9.7	165
S	31.1	22.1	34.0	1.8	5.9	158	31.5	24.9	35.0	2.3	7.4	165

注: Chla. Chlorophyll-a 含量; DIN. 溶解态无机氮; PO<sub>4</sub>. 磷酸盐; SiO<sub>3</sub>. 硅酸盐; T. 温度; S. 盐度

采用上述基本方程并结合各个参数的取值范围, 本研究利用 Matlab 软件的数值分析工具 CFTool (Curve Fitting Tool), 分别对 2005 年春季硅藻藻华和甲藻藻华期间浮游植物生物量与各环境变量之间的关系进行非线性拟合, 以获取与硅、甲藻藻华相关的重要环境参数。

为验证拟合获得的各个环境参数的有效性, 本文采用相关性分析方法, 对比分析了各环境要素拟合所得浮游植物生物量模拟值与现场实测值之间的相关性。采用 Matlab 软件编程实现具体计算过程, 计算获得的相关系数及置信度, 能够定量评估各个拟合方程的拟合优度。如果相关系数的  $P < 0.05$ (置信度达到 95%以上), 则拟合方程的模拟值与实测值之间呈显著相关, 即拟合曲线能够反映出浮游植物生物量随各环境因子的变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数据的统计描述及线性相关分析

通过对各变量的现场调查数据进行统计描述(表 3), 可知调查区硅藻藻华期间浮游植物生物量平均值为 3.5 μg/L, 甲藻藻华期间浮游植物生物量平均值为 6.1 μg/L。甲藻藻华过程中浮游植物生物量峰值(70.3 μg/L)明显大于硅藻藻华期(25.7 μg/L)。藻华期间, 浮游植物生物量高值分布区的溶解态无机氮、磷酸盐和硅酸盐浓度均保持在较低水平, 且硅藻藻华期间 3 种无机营养盐的平均浓度均高于甲藻藻华期。硅藻藻华期间海水温度低于甲藻藻华期间, 反映了藻华期间海水的持续升温。相比水温的升高, 藻华期间海水盐度的变化并不明显。

相关性分析结果(表 4)表明, 长江口邻近海域春季硅、甲藻藻华期间, 浮游植物生物量与 3 种无机营养盐、温度以及盐度之间均表现出相关性, 但相关程

表 4 浮游植物生物量与各环境因子间的相关性分析  
Tab. 4 Correlation analysis between phytoplankton biomass and environmental factors

环境变量	硅藻藻华期	甲藻藻华期
DIN	-0.13	-0.19*
PO <sub>4</sub>	-0.40**	-0.25**
SiO <sub>3</sub>	-0.33**	0.22**
T	-0.08	0.24**
S	-0.13	-0.45**

注: \*\*表示  $P<0.01$ ; \*表示  $P<0.05$

度存在差异。其中, 硅藻藻华期间浮游植物生物量与磷酸盐及硅酸盐呈极显著相关, 与其他环境要素的相关性不显著。而甲藻藻华期间浮游植物生物量与各个环境要素均表现出了显著相关性。

由于许多生态过程间存在相互影响, 各因子之间的关系比较复杂, 势必影响到浮游植物生物量与各环境因子之间的线性关系。因此, 仅利用单调函数来表示各环境因子与浮游植物生物量之间的关系并不准确, 甚至可能影响对各环境因子作用的评价结果。此外, 考虑到目标海域环境复杂, 浮游植物生长同时受到多个环境因子影响, 且个别环境因子对应的 Chla 含量值跨度很大, 单个环境因子的拟合方程无法满足所有实测点的拟合优度要求。因此, 在验证拟合方程的有效性时, 主要考虑模拟值与实测值之间的相关性, 对拟合趋势进行验证。

## 2.2 基本关系方程的构建和验证

### 2.2.1 浮游植物生物量与无机营养盐之间的定量关系拟合

2005 年春季硅、甲藻藻华期间, 长江口邻近海域的 Chla 含量与 3 种无机营养盐之间呈明显的非线性关系。浮游植物在营养盐浓度较低的外海区域主要受营养盐限制作用, 在近岸海域, 随着营养盐浓度的升高浮游植物生物量逐渐增加。但浮游植物生

物量最大值并没有出现在营养盐浓度最高的区域, 而是出现在营养盐浓度处于中等水平的海域。

根据基本关系方程, 应用非线性拟合方法得到的 2005 年春季硅藻藻华期和甲藻藻华期浮游植物生物量与溶解态无机氮、磷酸盐、硅酸盐浓度的定量关系表达式如表 5 所示。拟合曲线(图 3a, b, c, d, e, f)与现场实测结果的变化趋势基本一致, 依据拟合方程所得的浮游植物生物量的置信度均达到了 95% 以上(如表 6 所示), 即拟合值与实测值之间呈显著相关。因此, 该组拟合方程能够模拟出研究海域浮游植物生物量与 3 种无机营养盐浓度之间的非线性关系, 所确定的参数也能够较好地反映出不同藻华优势类群生理生态学特征的差异。

### 2.2.2 浮游植物生物量与温度之间的定量关系拟合

在生态动力学研究中, 温度对浮游植物生长的限制作用通常采用 Blanchard 方程<sup>[41]</sup>进行模拟。但本研究涉及不同藻华类群(硅藻和甲藻)的生长与温度的关系, 且整个春季藻华期间存在浮游植物生物量(Chla 含量)的双峰现象。因此, 本研究选用 Gauss 方程, 对硅、甲藻藻华期间浮游植物生物量变化与温度之间的关系进行了拟合, 得到的非线性方程如表 7 所示。代入现场温度实测值拟合, 得到的浮游植物生物量变化趋势与现场实测结果基本一致(图 3g, h), 且各对应值的相关性检验结果均呈现极显著水平( $P<0.01$ )。该组拟合方程能够较合理地模拟出 2005 年长江口邻近海域春季藻华期间浮游植物生物量与温度之间的定量关系, 方程中选择的温度相关参数也能够反映研究海域藻华优势类群的基本特征。

### 2.2.3 浮游植物生物量与盐度之间的定量关系拟合

本研究通过拟合 2005 年春季藻华期间浮游植物生物量与盐度之间的非线性关系, 获得的定量方程如表 7 所示, 该组拟合方程能够较好的模拟出浮游植物生物量随盐度的变化趋势(图 3i, j)。进一步的检验结果显示(表 8), 由盐度实测值计算得到的浮游

表 5 浮游植物生物量与无机营养盐之间的定量关系

Tab. 5 Equations showing relationships between phytoplankton biomass and different nutrients

环境因子	拟合方程	
	硅藻藻华	甲藻藻华
DIN	$Chla\_DIN=4.13 \frac{DIN}{10.08} e^{(1-\frac{DIN}{10.08})}$	$Chla\_DIN=8.29 \frac{DIN}{3.98} e^{(1-\frac{DIN}{3.98})}$
PO <sub>4</sub>	$Chla\_PO_4=10.03 \frac{PO_4}{0.21} e^{(1-\frac{PO_4}{0.21})}$	$Chla\_PO_4=9.31 \frac{PO_4}{0.18} e^{(1-\frac{PO_4}{0.18})}$
SiO <sub>3</sub>	$Chla\_SiO_3=6.50 \frac{SiO_3}{6.39} e^{(1-\frac{SiO_3}{6.39})}$	$Chla\_SiO_3=7.22 \frac{SiO_3}{22} e^{(1-\frac{SiO_3}{22})}$

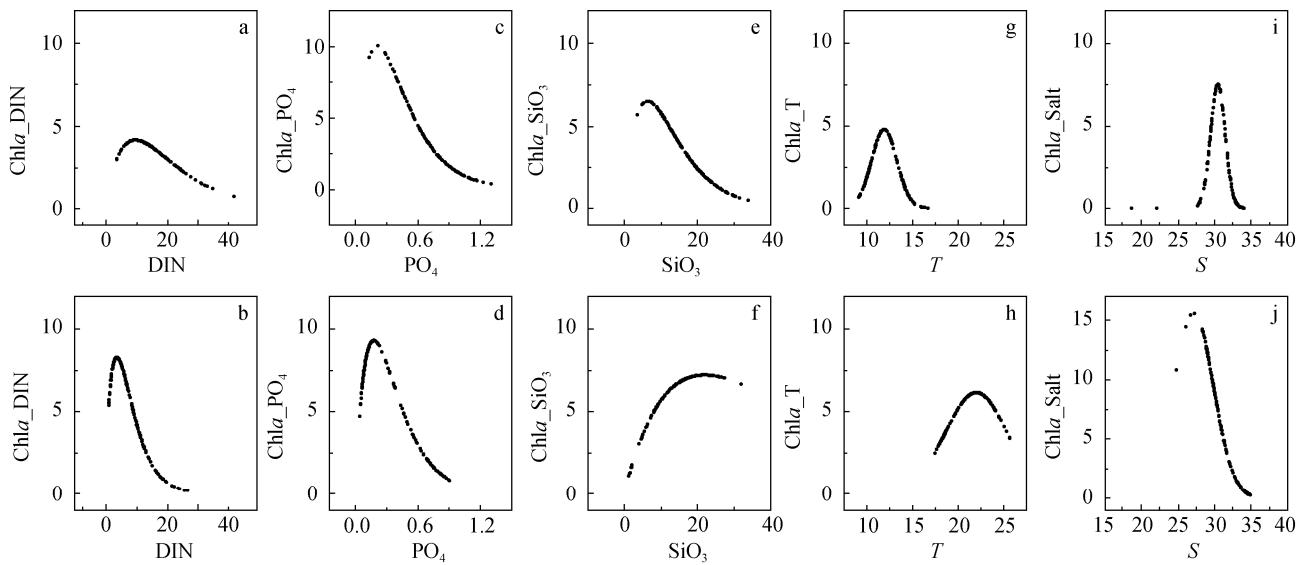


图 3 2005 年硅藻藻华期(a, c, e, g, i)及甲藻藻华期(b, d, f, h, j)浮游植物生物量对应各个环境因子的拟合曲线图

Fig. 3 The fitting curves of the phytoplankton biomass corresponding to different environmental factors during the 2005 diatom bloom (a, c, e, g, i) and dinoflagellate bloom (b, d, f, h, j)

表 6 3 种无机营养盐非线性方程的拟合优度检验

Tab. 6 Goodness-of-fit test for nonlinear equations for different nutrients

拟合 Chla 浓度	实测 Chla 浓度	
	硅藻藻华期	甲藻藻华期
Chla_DIN	0.18*	0.17*
Chla_PO4	0.46**	0.34**
Chla_SiO3	0.34**	0.18*

注: \*\*表示  $P < 0.01$ ; \*表示  $P < 0.05$

植物生物量模拟值与现场实测结果之间的相关性均达到极显著水平( $P < 0.01$ ), 表明上述方程中的盐度相关参数能够反映出目标海域 2005 年春季藻华期间不同微藻优势类群对海水盐度的适应特性。

### 2.3 硅、甲藻藻华发生的最适环境条件

本研究通过非线性拟合, 得到硅藻藻华形成的最适营养盐条件为: 溶解态无机氮浓度  $10.1 \mu\text{mol/L}$ 、磷酸盐浓度  $0.21 \mu\text{mol/L}$ 、硅酸盐浓度  $6.39 \mu\text{mol/L}$ ;

甲藻藻华形成的最适营养盐条件为: 溶解态无机氮浓度  $3.98 \mu\text{mol/L}$ 、磷酸盐浓度  $0.18 \mu\text{mol/L}$ 。对比可知, 甲藻藻华形成时对营养盐的需求较硅藻低, 硅藻比甲藻更容易受到营养盐的限制作用。上述拟合方程中的各营养盐参数均满足设定的取值范围, 且与已有的实验室培养方法测得值基本一致。长江口邻近海域春季硅藻藻华期间的优势种多为中肋骨条藻<sup>[42]</sup>, 实验室获得中肋骨条藻的无机氮半饱和常数为  $3.0 \sim 8.0 \mu\text{mol/L}$ <sup>[43]</sup>, 磷酸盐半饱和常数为  $0.61 \mu\text{mol/L}$ <sup>[43]</sup>。春末夏初的甲藻藻华期间, 优势种包括东海原甲藻、米氏凯伦藻和亚历山大藻<sup>[44]</sup>。李英等<sup>[45]</sup>测得东海原甲藻的磷酸盐半饱和常数为  $0.13 \mu\text{mol/L}$ , 赵晓玮<sup>[46]</sup>得出东海米氏凯伦藻的磷酸盐半饱和常数为  $0.20 \mu\text{mol/L}$ , 与本研究计算得到的  $0.18 \mu\text{mol/L}$  相近。

温度是影响藻类生长的重要环境因子, 浮游植物对营养盐的吸收以及细胞增殖等过程均受到温度影响<sup>[47-48]</sup>。海水温度对浮游植物生物量的调控作用

表 7 浮游植物生物量与温度、盐度之间的定量关系拟合方程

Tab. 7 Fitted equations of the quantitative relationships between the phytoplankton biomass, temperature, and salinity

环境因子	拟合方程	
	硅藻藻华	甲藻藻华
T	$\text{Chla\_T} = \frac{16.94}{2.81\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(T-11.89)^2}{2.81^2}}$	$\text{Chla\_T} = \frac{52.31}{6.78\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(T-22.02)^2}{6.78^2}}$
S	$\text{Chla\_St} = 7.51 e^{-\frac{(St-30.49)^2}{1.42}}$	$\text{Chla\_St} = 15.57 e^{-\frac{(St-27.18)^2}{3.84}}$

表 8 温度与盐度非线性方程的拟合优度检验  
Tab. 8 Goodness-of-fit test for the nonlinear equations of temperature and salinity

拟合 Chla 含量	实测 Chla 含量	
	硅藻藻华期	甲藻藻华期
Chla_T	0.38**	0.29**
Chla_St	0.47**	0.47**

注: \*\*表示  $P < 0.01$

主要通过影响浮游植物新陈代谢的化学反应速率来实现, 浮游植物光合过程、呼吸过程、分泌过程以及自然死亡过程均受到温度条件的影响<sup>[49]</sup>。温度对各个生态学过程的影响表现为: 当温度低于浮游植物生长的最适温度时, 浮游植物的生物量随着温度的升高而增大; 当温度高于浮游植物生长最适温度时, 浮游植物生物量反而随着温度的升高而降低。通过对 2005 年春季硅、甲藻藻华期间浮游植物生物量与温度之间定量关系的拟合, 计算得到硅藻生长的最适温度值为 11.9℃, 而甲藻类群生长的最适温度值为 22.0℃。

盐度对浮游植物生长的影响可分为直接作用和间接作用两个方面。直接作用主要与浮游植物对盐度的耐受范围有关<sup>[50-51]</sup>, 间接作用则反映了水体层化及其它理化因子(如营养盐)对浮游植物生长的影响。在 2005 年春季藻华期间浮游植物生物量与盐度间的非线性拟合方程中, 盐度相关参数均满足设定的取值范围, 硅藻的最适盐度值为 30.5, 甲藻的最适盐度值为 27.2。该拟合结果与目标海域常见藻华优势种的生长适宜条件较吻合, 中肋骨条藻的适盐范围是 20~30, 而东海原甲藻生长的适盐范围是 25~35<sup>[39]</sup>。此外, 结合目标海域硅、甲藻藻华对营养盐的需求差异, 能够解释二者对海水盐度的适应性与其自身生理特性的偏差。

### 3 结论

本研究依据 2005 年春季藻华期间长江口邻近海域的现场调查资料, 采用非线性拟合方法, 对硅藻藻华和甲藻藻华期间浮游植物生物量与溶解态无机氮、磷酸盐、硅酸盐、温度和盐度之间的定量关系进行了模拟, 分别计算了目标海域硅藻藻华和甲藻藻华形成时的最适环境条件(包括硅藻类和甲藻类生长的最适营养盐浓度、最适温度和最适盐度等)。利用拟合方程模拟出的浮游植物生物量与现场实测结果的相关性较好, 多数  $P$  值小于 0.01, 表明构建的拟合方程组能够反映目标海域春季藻华过程中硅藻藻

华和甲藻藻华与各环境因子之间的关系。通过拟合得到了硅、甲藻藻华形成的最适环境条件, 硅藻藻华为: 溶解态无机氮浓度 10.1 μmol/L、磷酸盐浓度 0.21 μmol/L、硅酸盐浓度 6.39 μmol/L、温度 11.9℃、盐度 30.5; 甲藻藻华形成的最适环境条件为: 溶解态无机氮浓度 3.98 μmol/L、磷酸盐浓度 0.18 μmol/L、温度 22.0℃、盐度 27.2。以上相关参数可以为长江口邻近海域春季硅、甲藻藻华形成与演替过程的数值模拟和参数优化提供参考依据。

致谢: 本研究使用的数据资料来自国家 973 计划项目“我国近海有害藻华形成的生态学、海洋学机制与预测防治”, 其中浮游植物生物量(叶绿素 a 含量)数据由中国科学院南海海洋研究所霍文毅研究员提供, 无机营养盐数据由中国海洋大学张传松博士提供, 温度和盐度等 CTD 资料由国家海洋局第二海洋研究所朱德弟研究员提供, 在此表示诚恳的感谢。

### 参考文献:

- [1] Wang J H, Wu J Y. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 4012-4021.
- [2] 郭皓, 丁德文, 林凤翱, 等. 近 20a 我国近海赤潮特点与发生规律[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 547-558.  
Guo Hao, Ding Dewen, Lin Feng'ao, et al. Characteristics and patterns of red tide in China coastal waters during the last 20a[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 547-558.
- [3] 周名江, 朱明远. 我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673-679.  
Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan. Progress of the project “Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms in China”[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(7): 673-679.
- [4] 国家海洋局. 中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2012.  
State Oceanic Administration. China's marine environmental quality bulletin[R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2012.
- [5] 叶属峰, 黄秀清. 东海赤潮及其监视监测[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 10-14.  
Ye Shufeng, Huang Xiuqing. HABs in East China Sea: surveillance and monitoring[J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(2): 10-14.
- [6] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [7] Tang D, Di B, Wei G, et al. Spatial, seasonal and

- species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 568: 245-253.
- [8] 周名江, 于仁成. 有害赤潮的形成机制、危害效应与防治对策[J]. *自然杂志*, 2007, 29(2): 73-77.  
Zhou Mingjiang, Yu Rengcheng. Mechanisms and impacts of harmful algal blooms and the countmeasures[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(2): 73-77.
- [9] Huang W, Zhu X, Chen Q, et al. Seasonal variability of phytoplankton community structure in relation to different nitrogen-phosphorus ratios in the southern coastal waters of Zhejiang, China[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(4): 577-588.
- [10] Li J, Glibert P M, Zhou M J, et al. Relationships between nitrogen and phosphorus forms and ratios and the development of dinoflagellate blooms in the East China Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 383: 11-26.
- [11] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 445-450.  
Luan Qingshan, Sun Jun, Song Shuqun, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangze River estuary, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 445-450.
- [12] 侯继灵, 张传松, 石晓勇, 等. 磷酸盐对两种东海典型赤潮藻影响的围隔实验[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(sup): 136-169.  
Hou Jiling, Zhang Chuansong, Shi Xiaoyong, et al. Effect of phosphate on two typical HAB species in East China Sea by mesocosm experiments[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(sup): 136-169.
- [13] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响[J]. *海洋与湖沼通报*, 2002, (2): 39-44.  
Liu Dongyan, Sun Jun, Chen Zongtao, et al. Effect of N/P ratio on the growth of a red tide diatom *Skeletonema costatum*[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2002, (2): 39-44.
- [14] 吕颂辉, 李英. 我国东海4种赤潮藻的细胞氮磷营养储存能力对比[J]. *过程工程学报*, 2006, 6(3): 439-444.  
Lu Songhui, Li Ying. Nutritional storage ability of four harmful algae from the East China Sea[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6(3): 439-444.
- [15] 王朝晖, 梁瑜, 姜珊, 等. 氮限制对三种赤潮藻生长以及种间竞争效应的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(6): 1257-1264.  
Wang Zhaohui, Liang Yu, Jiang Shan, et al. Effects of nitrogen limitation on growth and interspecies competition of three harmful algal bloom species[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(6): 1257-1264.
- [16] 王爱军, 王修林, 韩秀荣, 等. 光照对东海赤潮高发区春季赤潮藻种生长和演替的影响[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(2): 144-148.  
Wang Aijun, Wang Xiulin, Han Xiurong, et al. Effects of solar radiation on the growth and succession of harmful algae in the East China Sea in spring[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(2): 144-148.
- [17] 于萍, 张前前, 王修林, 等. 温度和光照对两株赤潮硅藻生长的影响[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 38-40.  
Yu Ping, Zhang Qianqian, Wang Xiulin, et al. Effects of temperature and irradiance on growth of two strains of marine diatoms[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(1): 38-40.
- [18] Franks P J S, Chen C S. A 3-D prognostic numerical model study of the Georges bank ecosystem. Part II: biological-physical model[J]. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(1-3): 457-482.
- [19] Chen C S, Beardsley R, Franks P J S. A 3-D prognostic numerical model study of the Georges Bank ecosystem. Part I: physical model[J]. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(1-3): 419-456.
- [20] Ji R B, Chen C S, Franks P J S, et al. Spring phytoplankton bloom and associated lower trophic level food web dynamics on Georges Bank: 1-D and 2-D model studies[J]. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(23-24): 2656-2683.
- [21] Allen J I, Smyth T J, Siddorn J R, et al. How well can we forecast high biomass algal bloom events in a eutrophic coastal sea?[J]. *Harmful Algae*, 2008, 8(1): 70-76.
- [22] Fransz H G, Mommaerts J P, Radach G. Ecological modelling of the North-Sea[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1991, 28(1-2): 67-140.
- [23] Estrada V, Parodi E R, Diaz M. Determination of biogeochemical parameters in eutrophication models with simultaneous dynamic optimization approaches[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(10): 1760-1769.
- [24] 高会旺. 水层生态系统动力学模型参数的敏感性分析[J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(3): 398-404.  
Gao Huiwang. Sensitive analysis of the parameters of pelagic ecosystem dynamic model[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 29(3): 398-404.
- [25] 乔方利, 袁业立, 朱明远. 长江口海域赤潮生态动力学模型及赤潮控制因子研究[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(1): 93-100.  
Qiao Fangli, Yuan Yeli, Zhu Mingyuan. Study on HAB dynamical model and HAB limitation factors for the sea area adjacent to Changjiang River estuary[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2000, 31(1): 93-

- 100.
- [26] Liu H C, Shih C Y, Gong G C, et al. Discrimination between the influences of river discharge and coastal upwelling on summer microphytoplankton phosphorus stress in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2013, 60: 104-112.
- [27] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1031-1038.  
Zhou Mingjiang, Yan Tian, Zou Jingzhong. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River estuary and its adjacent sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1031-1038.
- [28] Liu K K, Tang T Y, Gong G C, et al. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4-5): 493-523.
- [29] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 143-151.  
Zhou Weihua, Yuan Xiangcheng, Huo Wenyi, et al. Distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(3): 143-151.
- [30] 张传松, 王江涛, 朱德弟, 等. 2005 年春夏季东海赤潮过程中营养盐作用初探[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 153-159.  
Zhang Chuan Song, Wang Jiangtao, Zhu Dedi, et al. The preliminary analysis of nutrients in harmful algal blooms in the East China Sea in the spring and summer of 2005[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 153-159.
- [31] 朱德弟, 陆斗定, 王云峰, 等. 2005 年春初浙江近海的低温特征及其对大规模东海原甲藻赤潮发生的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(6): 31-39.  
Zhu Dedi, Lu Douding, Wang Yunfeng, et al. The low temperature characteristics in Zhejiang coastal region in the early spring of 2005 and its influence on harmful algae bloom[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 31-39.
- [32] Steele J H. Environmental Control of Photosynthesis in the Sea[J]. Limnology and Oceanography, 1962, 7(2): 137-150.
- [33] Bard Y. Comparison of Gradient Methods for the Solution of Nonlinear Parameter Estimation Problems[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1970, (No.1): 30.
- [34] 周超凡, 张传松, 韩秀荣, 等. 东海甲藻硅藻现场生长营养盐相关参数的计算[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 21-28.  
Zhou Chaofan, Zhang Chuansong, Han Xiurong, et al. The calculation of nutrient-related parameters of dinoflagellate and diatom in the East Chian Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 21-28.
- [35] 李天深, 于仁成, 周名江. 链状亚历山大藻(东海株)对磷营养物质的需求与吸收策略[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(4): 355-359.  
Li Tianshen, Yu Rencheng, Zhou Mingjiang. Demand and adsorption strategies of phosphorous of *Alexandrium catenella* isolated from East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(4): 355-359.
- [36] 邓光, 耿亚洪, 胡鸿钧, 等. 几种环境因子对高生物量赤潮甲藻——东海原甲藻光合作用的影响[J]. 海洋科学, 2009, 33(12): 34-39.  
Deng Guang, Geng Yahong, Hu Hongjun, et al. Effects of environmental factors on photosynthesis of a high biomass bloom forming species *Prorocentrum donghaiense*[J]. Marine Sciences, 2009, 33(12): 34-39.
- [37] 金德祥, 陈贞奋, 刘师成, 等. 温度和盐度对三种海洋浮游硅藻生长繁殖的影响[J]. 海洋与湖沼, 1965, 7(4): 373-384.  
Jin Dexiang, Chen Zhenfen, Liu Shicheng, et al. Influence of temperature and salinity on the growth of three species of planktonic diatoms[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1965, 7(4): 373-384.
- [38] 陈炳章, 朱明远, 王宗灵, 等. 赤潮藻类的适应与竞争策略[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(1): 70-75.  
Chen Bingzhang, Zhu Mingyuan, Wang Zongling, et al. Adaptive and competitive strategies of red tide algae[J]. Marine Environmental Science, 2005, 24(1): 70-75.
- [39] Xu N, Duan S S, Li A F, et al. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu[J]. Harmful Algae, 2010, 9(1): 13-17.
- [40] 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311-318.  
Huo Wenyi, Yu Zhiming, Zou Jingzhong, et al. Outbreak of *Skeletonema Costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 311-318.
- [41] Blanchard G F, Guarini J M, Richard P, et al. Quantifying the short-term temperature effect on light-saturated photosynthesis of intertidal microphytobenthos[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 134(1-3): 309-313.
- [42] 高亚辉, 虞秋波, 齐雨藻, 等. 长江口附近海域春季浮游硅藻的种类组成和生态分布[J]. 应用生态学报, 2003, 1044-1048.  
Gao Yahui, Yu Qiubo, Qi Yuzao, et al. Species composition and ecological distribution of planktonic diatoms in the Changjiang River estuary during spring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 1044-1048.
- [43] 李铁, 史致丽, 仇赤斌, 等. 中肋骨条藻和新月菱形藻对营养盐的吸收速率及环境因素影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 640-645.  
Li Tie, Shi Zhili, Qiu Chibin, et al. A study on the

- uptake rate of the nutrients by *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium* and the environmental effects[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 640-645.
- [44] Lu D D, Goebel J. Five red tide species in genus *Prorocentrum* including the description of *Prorocentrum donghaiense* Lu sp. nov. from the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanography and Limnology*, 2001, 19 (4): 337-344.
- [45] 李英, 吕颂辉, 徐宁, 等. 东海原甲藻对不同磷源的利用特征[J]. 生态科学, 2005, 24(4): 314-317+321.  
Li Ying, Lu Songhui, Xu Ning, et al. The utilization of *Prorocentrum donghaiense* to four different types of phosphorus[J]. Ecologic Science, 2005, 24(4): 314-317+321.
- [46] 赵晓玮. 环境中不同氮磷营养盐浓度及氮源形态对米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)生长的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Zhao Xiaowei. Environment in different nitrogen and phosphorus concentrations and nitrogen forms on Michaelis Karen (*Karenia mikimotoi*) effects on algae growth[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [47] Bouman H, Platt T, Sathyendranath S, et al. Dependence of light-saturated photosynthesis on temperature and community structure[J]. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(7): 1284-1299.
- [48] Ras M, Steyer J P, Bernard O. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2013, 12(2): 153-164.
- [49] 廖一波, 陈全震, 曾江宁, 等. 海洋浮游植物的热效应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4203-4212.  
Liao Yibo, Chen Quanzhen, Zeng Jiangning, et al. Thermal effect on the marine phytoplankton in Xiangshan Bay, China[J]. *Acta Ecological Sinica* 2008, 28(9): 4203-4212.
- [50] 王金辉. 长江口3个不同生态系的浮游植物群落[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 422-428.  
Wang Jinhu. Phytoplankton communities in three distinct ecotypes of the Changjiang estuary[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(3): 422-428.
- [51] 李绪兴. 赤潮及其对渔业的影响[J]. 水产科学, 2006, 25(1): 45-47.  
Li Xuxing. Influences of red tide on fisheries[J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(1): 45-47.

## Fitting analysis of phytoplankton biomass and environmental factors in the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary

ZHOU Zheng-xi<sup>1, 2</sup>, YU Ren-cheng<sup>1, 3</sup>, ZHOU Ming-jiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China)

**Received:** Feb. 25, 2016

**Key words:** East China Sea; Changjiang River Estuary; Harmful Algal Blooms; Environmental Parameters

**Abstract:** On the basis of the 2005 survey data from the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary, nonlinear fitting methods were used to establish equations representing the quantitative relationships between phytoplankton biomass and inorganic nutrients, temperature and salinity during the diatom and dinoflagellate blooms. The optimum values of dissolved nitrogen, phosphate, silicate, temperature, and salinity for the diatom bloom were calculated to be 10.1  $\mu\text{mol/L}$ , 0.21  $\mu\text{mol/L}$ , 6.39  $\mu\text{mol/L}$ , 11.9°C, and 30.5, respectively, and those for the dinoflagellate bloom were 3.98  $\mu\text{mol/L}$ , 0.18  $\mu\text{mol/L}$ , 22.0°C, and 27.2, respectively. These optimum conditions could be treated as key environmental parameters that provide references for further studies on numerical simulation and parameter optimization of harmful algal blooms.

(本文编辑: 梁德海)