

# 西太平洋叶绿素 *a* 浓度对气候变化响应 概念模型初探

李和阳<sup>1,2</sup>, 林莉<sup>1</sup>, 郑滢<sup>1</sup>, 马勇<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:**西太平洋海区浮游植物的分布受气候变化影响,在不同时空尺度上呈现不同的变化。本研究旨在通过对历史文献及数据资料分析,建立气候变化响应概念模型来探讨 Chl-*a*、海水表面温度 (SST) 及营养盐如何响应长期气候变化。分析了西太平洋不同区域 Chl-*a* 与气候变化相关因子 SST 及海水营养盐 (硝酸盐) 的相关性,对模型参数进行选择及验证,来探讨该海区 Chl-*a* 是如何响应长期气候变化。结果表明, K2 站位 Chl-*a* 浓度与 SST、硝酸盐浓度呈显著正相关关系,与该海区存在上升流有关;而 S1、XT 站位均呈现负相关关系,可能与海水水温升高导致层化加剧、营养输入减少有关。本研究为进一步完善和优化西太平洋海区的浮游植物的气候变化响应模型奠定基础。

**关键词:**海洋生物学;叶绿素 *a*;气候变化;生态响应;概念模型;西太平洋

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 02. 001

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2020)02-0153-09

随着全球气候变暖,无论是大洋还是近海区域其生态环境各要素如水温、营养盐及叶绿素等在长期气候变化下出现异常。西太平洋海区在过去几十年相继发生海水冷暖交替,水温持续上升;营养盐浓度及叶绿素分布也因气候变化引发如东亚季风、强 El Nino 事件、台风过程或大气 CO<sub>2</sub> 升高等发生相应变化<sup>[1]</sup>。因而气候长期变化的背景下,海洋生态系统的变化趋势、空间状态、生态各要素是如何响应气候变化,一直是备受关注的研究热点。海水温度响应长期气候转变出现异常,海水叶绿素、营养盐等亦受气候长期变化影响。它们之间究竟产生何种影响,这种影响的响应机制又是什么,能否通过海洋生态模型来研究长期气候变化下,海洋生物及环境要素在时间尺度和空间尺度上的变化过程是值得探讨的科学问题。

本研究通过对历史文献及数据资料分析,对模型参数进行了选择,初步建立了气候变化响应概念模型,并通过分析西太平洋不同区域叶绿素 *a* (Chl-*a*) 与其气候变化相关因素海水表面温度 (SST) 及海水营养盐 (硝酸盐) 的相关性,对模型参

数进行验证,来探讨该海区 Chl-*a* 是如何响应长期气候变化,为进一步完善和优化西太平洋海区的叶绿素与气候变化响应模型奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海区概况

叶绿素 *a* 浓度通常用来表征海区浮游植物的现存量,同时它也是估算海区初级生产力水平及海区渔业水产资源潜在生产能力的重要参数<sup>[2]</sup>,其分布特征可较客观地反映出海域浮游植物的生长状况及其对气候变化的响应。一些研究观测到了全球变暖导致了海区叶绿素浓度的年际变动,如遥感观测显示出全球平均叶绿素浓度自 1997 年 9 月至 1998 年 12 月期间大约增加了 10%<sup>[3]</sup>;然而 Sarmiento 等 (2004) 通过模型模拟发现,全球变暖将使得北太平洋高生产力陆架边缘海冰区生态系范围缩小 42%,而低生产力的副热带环流区将扩大 4%,北太平洋海区总体叶绿素浓度降低<sup>[4]</sup>。可见,浮游植物对气候变化的响应特征十分复杂。

太平洋不同海域叶绿素 *a* 分布反映出初级生产

收稿日期: 2019-04-27

基金项目: 全球海气相互作用国家专项资助项目 (GASI-03-01-03-01, GASI-03-01-03-02); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费资助项目 (海三科 2016022, 海三科 2014003); 国家自然科学基金资助项目 (41006117)

作者简介: 李和阳 (1978—), 男, 博士, 副研究员; E-mail: heyang\_li@tio.org.cn

力的分布。太平洋 26°~30°N, 155°W 区域、赤道暖水区、北太平洋中部及热带西太平洋的叶绿素 *a* 浓度测定表明初级生产力依次降低<sup>[5]</sup>。总叶绿素 *a* 的分布特征在太平洋呈西低、东高, 即太平洋叶绿素 *a* 浓度由西向东呈现逐渐增大的趋势<sup>[6-7]</sup>。北太平洋和南太平洋热带和亚热带的大涡旋区是最贫瘠的海区, 叶绿素 *a* 浓度在 0.1 mg/m<sup>3</sup> 以下, 而赤道上升流区是“沙漠”中的一块“绿洲”<sup>[8]</sup>。黑潮区表层叶绿素 *a* 浓度分布呈现北高南低的区域性特征<sup>[9]</sup>。

另有研究表明, 热带太平洋西部叶绿素 *a* 总量低于赤道暖水区, 且低生物量区主要位于大洋海域。海水涌升是导致高叶绿素、高生物量的一个重要的物理过程。热带太平洋西部水平分布基本上由近岸海区向外洋递减<sup>[5]</sup>。太平洋黑潮区海水为高温高盐特性, 因其水温高叶绿素 *a* 浓度低<sup>[9]</sup>。相关研究表明叶绿素浓度季节变化与海洋环流有密切关系。最新的一项研究用统计方法分析了 14 年来海表温度和 Chl-*a* 的变化, 有大片区域显示出海表温度变暖和 Chl-*a* 浓度上升, 少数区域显示出海表温度变暖而 Chl-*a* 浓度下降, 显示出 Chl-*a* 浓度与海表温度之间存在复杂的因果关系与高度的空间异质性<sup>[10]</sup>。

## 1.2 数据来源

采用分别代表西太平洋北、中、南部海域的 3 个典型站位 K2(47.0°N, 160.0°E)、XT(37.0°N, 146.0°E) 及 S1(29.6°N, 145.1°E) 的 Chl-*a*、SST 及硝酸盐的 2002—2014 年历史调查数据进行分析。Chl-*a* 数据来源于 NOAA (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/>); 海水表面水温数据来源于 (<http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/e>); 营养盐数据来源于 PACIFICA (<https://www.nodc.noaa.gov/ocads/oceans/PACIFICA/>); 时间为 2003—2014 年的每年 5—12 月。

## 1.3 分析方法

应用 SPSS 软件各种相关性方程模块——CORREL、Pearson、Spearman, 包括了 Gamma、Kendall 的 tau-b、tau-c 等统计量。分别以 SST、营养盐(硝酸盐)为自变量、Chl-*a* 为因变量, 建立适合 Chl-*a* 与 SST、Chl-*a* 与营养盐的相关性模型, 并经过相关性检验、显著性检验, 以此来模拟西太平洋 Chl-*a* 浓度变化与 SST、营养盐等环境因子的关系, 探讨其对气候变化的响应机制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气候变化响应模型的提出

在大洋生态系统中, 以海洋浮游植物为主体, 加

入气候变化因子如温度、CO<sub>2</sub> 等变量, 考察气候变化影响主要生物过程(主要包括温度对浮游植物的直接影响, 以及通过层化现象改变营养盐成分的间接影响), 建立气候变化响应模型, 展开模型验证与分析。

随着气候变暖, 大气中的 CO<sub>2</sub> 水平的增加以及海洋表层水温的升高, 一方面由于海水层化现象加剧及 CO<sub>2</sub> 富集改变了海水的化学组成, 从而影响了浮游植物对营养盐的利用; 另一方面, 水温升高及 CO<sub>2</sub> 的增加可直接提高生理代谢速率。气候变化因子通过改变海表层温度、海水层化、营养盐浓度等来改变海洋生物的光合代谢速率, 由此影响其获得能量及物质代谢的能力, 从而改变它们的生长和繁殖<sup>[11]</sup>。由于不同海区、不同浮游植物类群对营养盐浓度及比例有不同的需求, 以及对光照的敏感性不同, 海洋优势类群的丰度、比例及粒径结构亦随之改变<sup>[12]</sup>。并且这种影响可通过食物网(食物的可获得性)影响到更高营养级。由此, 因气候变化因子导致的营养盐结构组成改变, 引起的浮游植物群落结构的改变, 构成一个简单的“CCNP(Climate Change-Nutrient-Phytoplankton)模型”(图 1)。

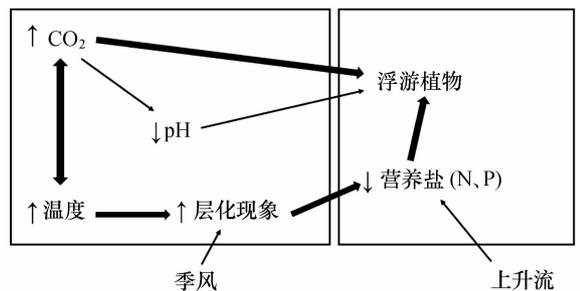


图 1 气候变化-海洋生物响应关系的“CCNP 概念模型”

Fig. 1 CCNP conceptual model coupling climate change and marine biological response

### 2.2 模型参数的选择

影响叶绿素浓度分布的因子包括光照、海表层水温、营养盐及上升流等。

2.2.1 光照 光提供了浮游植物光合作用的能源, 因此光照是影响浮游植物生长的重要环境因子。光照因水体透明度的改变对藻类的光合作用产生直接影响, 从而改变浮游植物的生长繁殖, 因而改变叶绿素浓度。光照的影响表现为, 一方面辐照度沿物理深度的衰减导致浮游植物在垂直方向上的分层分布, 另一方面由于太阳高度角的周年变化带来的太阳辐射强度及日照时数的周年变化, 从而形成了海区浮游植物生物量的季节变化。

2.2.2 海表层水温 海表层水温是影响浮游植物生长的另一重要因子。在最适温度范围内,光合作用速率随温度的升高而增加。海水温度能影响大洋海水叶绿素浓度分布。对于大洋海区而言,海表层水温会引起海洋层化现象的改变,进而通过营养盐影响浮游植物的生长。有研究报道,海洋浮游植物对气候变化事件发生强烈反应,在 El Nino 期间,赤道太平洋中部温度异常升高、当 El Nino 消亡,温度降低,信风强度随之减弱然后再由弱变强,该海区的上升流强度也出现相应的消长,由此带来海区浮游植物及叶绿素浓度相应的剧减、大增<sup>[13]</sup>。气候变化影响下西北太平洋浮游植物 Chl-*a* 呈现显著的下降趋势,平均年下降速率在 1% 以内<sup>[14]</sup>。

2.2.3 营养盐 海洋中氮的主要存在状态为可溶性的无机氮,如  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$ 。在西太平洋不同海区,由于表层海水温度的差异,存在不同深度的跃层(或混合层),这对真光层以下的营养盐的垂直输送带来的不同的影响。在西太平洋大部分海区,尤其是热带西太平洋海区,营养盐浓度很低,硝酸盐成为浮游植物生长的限制因子,往往出现真光层底部的营养盐浓度高于混合层,常出现 Chl-*a* 浓度最大值,而它们的深度与营养盐跃层密切相关,并受控于热带西太平洋上层水体的海洋动力因素<sup>[15]</sup>。在西太平洋海区,营养盐(硝酸盐)浓度由北往南逐渐降低,与此有密切关系。

2.2.4 季风与上升流 太平洋海区的浮游植物的分布既受季风、环流的驱动,也会受局部海域上升流的影响。上升流的强弱能影响改变区域的营养盐供给,进而通过“上行效应”(Bottom-up)对浮游植物类群组成产生影响。研究上升流的形成机制时发现上升流区底层高营养水涌升到表层,浮游植物的可利用的营养盐浓度随之升高,浮游植物生物量也将随之增加。在上升流活跃期间,由底层海水涌升带来了丰富的营养盐,通常使得海域呈现低温、高盐、高营养盐以及由此带来的高生物量的特征<sup>[16]</sup>。

然而,在多数大洋生态系统研究中,由于连续观测资料不足及表征生理状态的参数缺乏,往往很难获得该模型中的所有参数,更常见的方法是通过长期观测数据,建立多个环境变量与叶绿素或生物量之间的经验公式,并做进一步验证。在本研究中,通过查阅文献资料、分析现有的历史数据,对海表层温度、硝酸盐与叶绿素的关系进行探讨,对模型进行验证。结果表明该模型能够反映气候变化引起的西太平洋海区浮游植物的几种响应关系。

## 2.3 模型的建立与检验

2.3.1 SST 与 Chl-*a* 浓度的变化 对西太平洋 3 个站点 K2、XT 及 S1 的 2002—2014 年 Chl-*a* 与 SST 数据进行分析。K2、XT 及 S1 年平均温度由低到高依次为 6.36、18.81、23.84℃,由此可知温度沿纬度由北到南依次升高(图 2)。

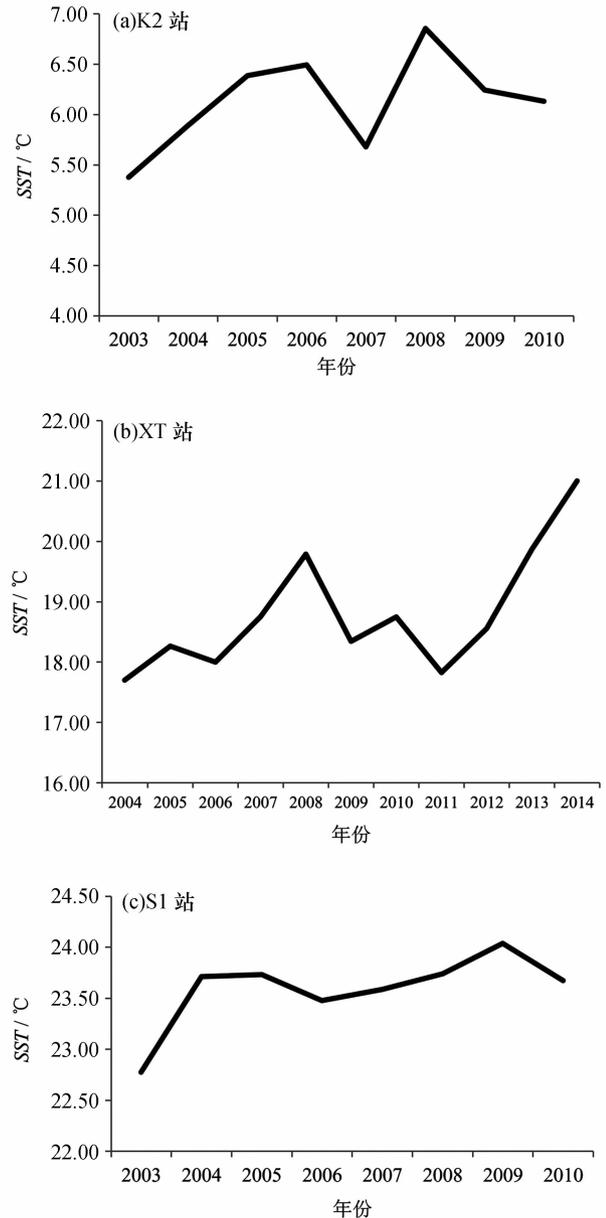


图 2 西太平洋 K2、XT 及 S1 站位年平均 SST 在 2002—2014 年期间的变化

Fig. 2 Change of annual average SST from 2002 to 2014 at sites K2, XT and S1 in the Western Pacific Ocean

由图 2 可知, K2 站位 SST 在 2003—2010 年的年平均变化范围为 5.38 ~ 6.86℃, 总体是上升趋势, 但年平均温度上升在 1℃ 以内, 并不明显; XT 站位在 2004—2008 年 SST 年平均变化范围为 17.70 ~ 21.00℃, 年平均温度差异在 4℃ 以内, 2008—

2011 年变化呈下降趋势,2011—2014 年大幅度上升;S1 站位 SST 在 2003—2010 年年平均总体也是上升趋势,温度范围为 22.78 ~ 24.04℃,年平均温度上升幅度在 2℃ 以内。

比较 3 个站位的年平均叶绿素 *a* 浓度的变化(图 3)可见,K2、XT 及 S1 叶绿素 *a* 浓度年平均值由高到低依次是 0.497、0.388、0.123 mg/m<sup>3</sup>,即随着纬度降低而降低。K2 站位叶绿素 *a* 年际变化趋势并不明显,均在 0.400 mg/m<sup>3</sup> 上下波动,除了 2008 年和 2010 年突然升高,分别为 0.763、0.655 mg/m<sup>3</sup>。XT 站位在 2004 年叶绿素 *a* 浓度最高为 0.570 mg/m<sup>3</sup>,2004—2008 年呈下降趋势,2009—2014 年有上升趋势,但期间也有下降。S1 叶绿素 *a* 浓度总体呈下降趋势,除 2006 年和 2009 年。K2、XT 及 S1 3 个站位的叶绿素 *a* 浓度年平均值分别为

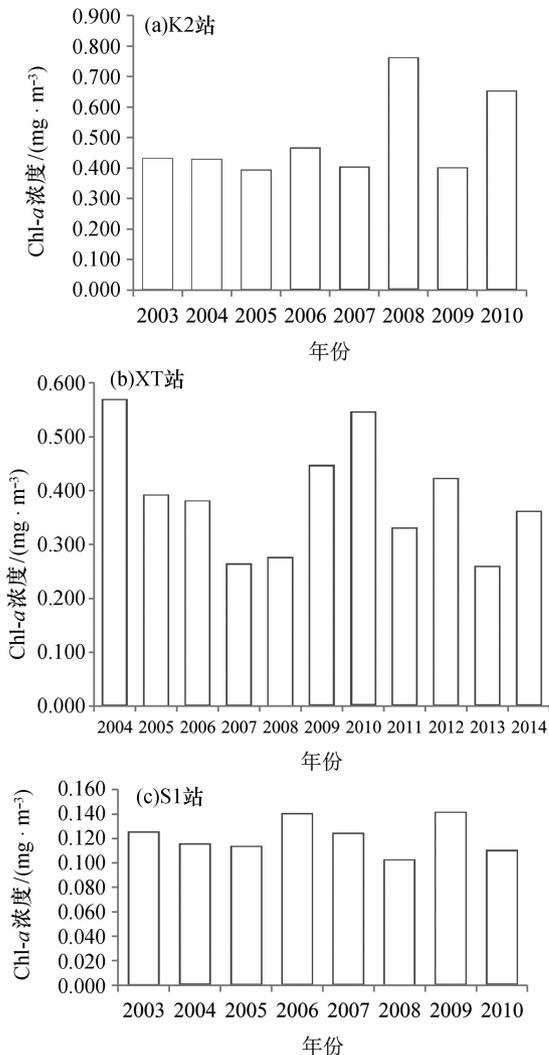


图 3 西太平洋 K2、XT 及 S1 站位年平均 Chl-*a* 浓度在 2003—2014 年期间的变化

Fig. 3 Change of annual average Chl-*a* concentration from 2003 to 2014 at sites K2、XT and S1 in the Western Pacific Ocean

0.441、0.413、0.126 mg/m<sup>3</sup>, K2 > XT > S1。叶绿素 *a* 年变化则表现为 K2 和 S1 总体呈上升趋势,而 XT 总体呈现下降趋势。

分析比较 3 个站位温度升高年份的 Chl-*a* 与 SST 的关系可见,K2 站位叶绿素 *a* 与 SST 呈正相关关系;XT 站位叶绿素 *a* 与 SST 呈负相关关系;S1 叶绿素 *a* 与 SST 呈弱的负相关关系(图 4)。

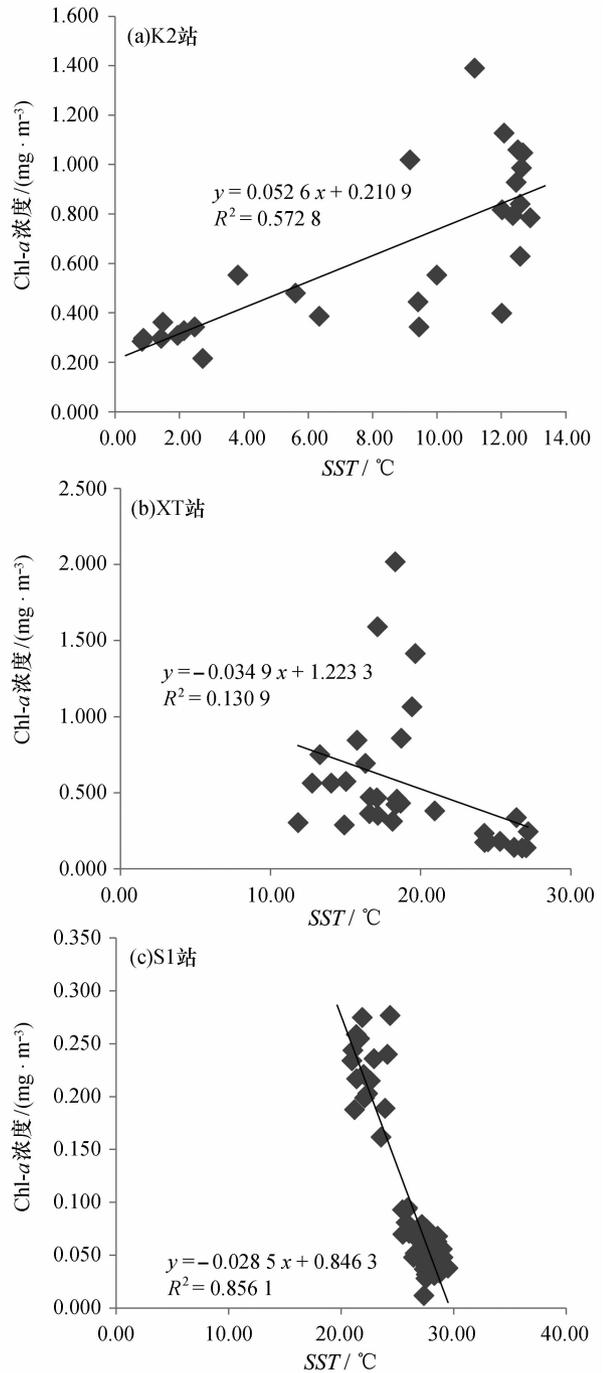


图 4 西太平洋 K2、XT 及 S1 站位年平均 Chl-*a* 浓度和 SST 的线性相关关系曲线

Fig. 4 Linear correlation curve of annual average Chl-*a* concentration and SST at sites K2, XT and S1 in the Western Pacific Ocean

2.3.2 Chl-*a* 浓度与硝酸盐的变化 对西太平洋 3 个站位 K2、XT 及 S1 的硝酸盐浓度的历史数据进行分析,K2 站位的硝酸盐浓度在 2003—2008 年期间,年平均值为 34.811  $\mu\text{mol/L}$ ,总体变化呈上升趋势;XT 站位硝酸盐浓度平均为 33.570  $\mu\text{mol/L}$ ,该站位

仅 2015 年有数据,因此没有该站位的年代变化图;S1 站位的硝酸盐浓度在 2002—2008 年期间年平均 16.020  $\mu\text{mol/L}$ ,变化差异不明显,稍微下降(图 5)。由此可知西太平洋海区硝酸盐浓度的年平均值是从北到南呈下降趋势。

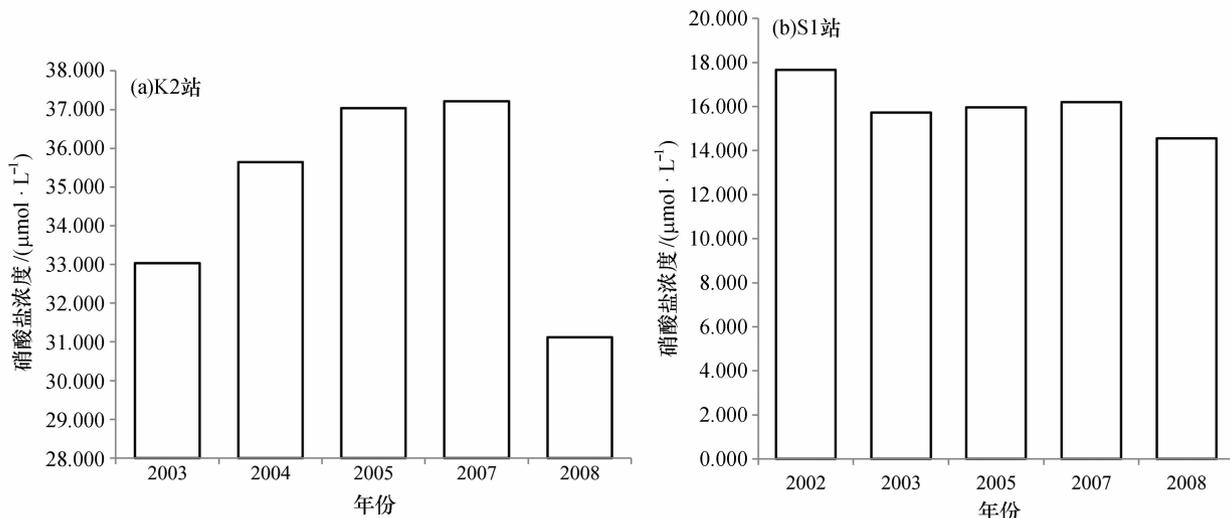


图 5 西太平洋 K2、S1 站位的硝酸盐浓度年平均值在 2002—2008 年期间变化

Fig. 5 Changes of annual average nitrate concentration from 2002 to 2008 at sites K2 and S1 in the Western Pacific Ocean

由 Chl-*a* 与硝酸盐浓度的相关性模型分析可知,K2 站位硝酸盐浓度与叶绿素浓度呈正相关关系,而 S1 站位的硝酸盐浓度与叶绿素浓度呈负相关关系。

2.3.3 相关性模型及验证 通过对 3 个站位 2002—2014 年 Chl-*a* 与 *SST* 相关分析,建立以下相关性模型(表 1)。根据这 3 个站位依赖于温度的 Chl-*a* 的相关性模型分析得出,西太平洋海区叶绿素

*a* 浓度对温度的响应特征包括以下三种情况:①正相关关系。K2 站位 Chl-*a* 浓度与 *SST* 呈正相关关系,即 Chl-*a* 浓度随着温度上升而增加;②负相关关系。S1 站位 Chl-*a* 浓度与 *SST* 呈负相关关系,即 Chl-*a* 浓度随着温度上升而下降;③弱相关或不相关。XT 站位 Chl-*a* 浓度与 *SST* 呈弱的负相关关系,即 Chl-*a* 浓度随着温度的变化不明显。

表 1 叶绿素 *a* 浓度与 *SST* 相关性模型

Tab. 1 Models of correlation between Chl-*a* concentration and *SST*

站位	年份	相关系数	关系模型	$R^2$ 值
K2	2002	0.689 8	$y = 0.072 3x - 0.161 6$	0.475 9
	2003	0.563 6	$y = 0.027 5x + 0.269 0$	0.317 6
	2004	0.468 6	$y = 0.028 4x + 0.280 7$	0.219 5
	2005	0.409 9	$y = 0.018 4x + 0.272 7$	0.168 0
	2006	0.717 1	$y = 0.030 9x + 0.291 8$	0.514 2
	2007	0.486 2	$y = 0.023 6x + 0.253 3$	0.236 4
	2008	0.161 2	$y = 0.014 5x + 0.605 1$	0.026 0
	2009	0.740 7	$y = 0.023 8x + 0.290 1$	0.548 6
	2010	0.756 8	$y = 0.052 6x + 0.210 9$	0.572 8

续表 1

站位	年份	相关系数	关系模型	R <sup>2</sup> 值
S1	2002	-0.925 3	$y = -0.028 5x + 0.846 3$	0.856 1
	2003	-0.855 4	$y = -0.016 8x + 0.524 0$	0.731 8
	2004	-0.829 3	$y = -0.022 8x + 0.675 8$	0.687 8
	2005	-0.860 3	$y = -0.016 4x + 0.524 8$	0.740 1
	2006	-0.871 7	$y = -0.021 5x + 0.663 6$	0.759 8
	2007	-0.858 5	$y = -0.019 4x + 0.605 2$	0.736 9
	2008	-0.752 1	$y = -0.013 4x + 0.444 0$	0.565 7
	2009	-0.892 3	$y = -0.024 5x + 0.745 0$	0.796 2
	2010	-0.820 5	$y = -0.018 7x + 0.577 4$	0.673 3
XT	2004	-0.565 8	$y = -0.059 8x + 1.658 3$	0.320 1
	2005	-0.474 7	$y = -0.029 7x + 0.954 6$	0.225 4
	2006	-0.445 8	$y = -0.019 4x + 0.732 8$	0.198 7
	2007	-0.568 9	$y = -0.014 3x + 0.540 7$	0.323 6
	2008	-0.653 5	$y = -0.019 9x + 0.680 7$	0.427 0
	2009	-0.645 8	$y = -0.044 5x + 1.302 1$	0.417 0
	2010	-0.361 8	$y = -0.034 9x + 1.223 3$	0.130 9
	2011	-0.670 8	$y = -0.023 8x + 0.780 8$	0.450 0
	2012	-0.703 1	$y = -0.055 9x + 1.579 4$	0.494 4

对于呈现弱的负相关关系的 XT 站位的 Chl-*a* 与 SST 及硝酸盐浓度的相关性进行分析,结果显示二者均呈负相关关系,相关系数为 -0.497、-0.656,在 0.05 水平(双侧)、0.01 水平(双侧)上显著相关差异显著。由此可知 XT 站位 Chl-*a* 与 SST 及硝酸盐浓度均呈负相关关系(表 2)。

表 2 SST、硝酸盐浓度对叶绿素 *a* 浓度的线性相关性检验

Tab.2 Linear correlation test for Chl-*a* concentration to SST and nitrate concentration

自变量	对 Chl- <i>a</i> 的相关性检验	
SST	Pearson 相关性	-0.497 <sup>a</sup>
	显著性(双侧)	0.022
硝酸盐浓度	Pearson 相关性	-0.656 <sup>b</sup>
	显著性(双侧)	0.001

注:“a”在 0.05 水平(双侧)上显著相关;“b”在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

进行线性回归分析,得出 *R* 为 0.701,这表示二者可以共同解释 70.1% 的变异量。变量 SST 与硝酸盐浓度对因变量 Chl-*a* 线性回归分析,差异显著,说明整体回归模型显著。硝酸盐浓度和 SST 对 Chl-*a* 标准回归系数分别为 -0.543( $p < 0.05$ , 差异显著)和 -0.272( $p > 0.05$ , 差异不显著),这表明在这种情况下,自变量硝酸盐浓度对叶绿素 *a* 浓度有显著的预测作用,而 SST 没有显著预测作用(表 3)。

## 2.4 讨论

2.4.1 Chl-*a* 浓度变化与 SST 本研究结果表明,西太平洋海区的 3 个不同区域 SST 的变化呈现出随纬度由北到南依次升高,即随着纬度的降低而升高。而 Chl-*a* 浓度则是随着纬度降低而降低。有研究北太平洋 Chl-*a* 与 SST 分布发现 SST 南高北低,而 Chl-*a* 扩散后基本呈现北高南低的趋势,与本研究结果相反<sup>[17]</sup>。有研究全球海域 Chl-*a* 与 SST 变化发现 SST 的变化呈现带状分布并且随纬度增加而增加<sup>[10]</sup>,与本研究结果相反。而 Chl-*a* 的年变化分析则主要表现为中纬度高的变化带。以往研究有发现

将 XT 站位的硝酸盐浓度和 SST 两个变化因子

中北太平洋海域的 Chl-*a* 随温度上升而下降<sup>[18]</sup>,与本研究 XT 站位和 S1 站位相符合,同时也存在着—

些海域 Chl-*a* 随着温度上升而增加,与 K2 站位相一致。

表 3 SST 与硝酸盐浓度对叶绿素 *a* 浓度的线性回归显著性检验结果

Tab. 3 Results of significance test for linear regression of Chl-*a* concentration to SST and nitrate concentration

模型 <sup>a</sup>	平方和	均方	硝酸盐-Chl- <i>a</i> 回归系数	SST-Chl- <i>a</i> 回归系数	Sig.
回归	0.887	0.443	-0.543	-0.272	0.002 <sup>b</sup>

注:“a”预测变量:SST、硝酸盐浓度,因变量:Chl-*a*;“b”Anova 分析。

西太平洋海区 Chl-*a* 浓度随着温度上升存在 3 种情况:正相关、负相关或弱相关。结合西太平洋海区状况,我们认为该海区 Chl-*a* 浓度与温度存在这 3 种不同的响应关系,主要取决于海水温度变化范围及海区的海洋学状况(季风、环流、上升流等):对于高纬度的 K2 站位而言,常年水温通常较低,变暖导致的水温升高通过提高浮游植物的光合作用效率、对营养盐的吸收系数等,导致海区总体 Chl-*a* 上升,Chl-*a* 浓度与 SST 呈正相关关系;而对于相对处于南部海区的 S1、XT 站位而言,由于海区温度较高,温度上升或导致营养盐输入减少或降低营养盐利用率则海区 Chl-*a* 浓度降低,Chl-*a* 浓度与 SST 呈负相关关系。当全球平均温度增加 1℃ 时,不同海域 Chl-*a* 与 SST 会产生不同响应,表层海水的变暖导致更强烈的分层和更深入的温跃层,导致进入透光区的营养输入减少,因而产生 SST 上升和 Chl-*a* 浓度减少的现象<sup>[19]</sup>。

2.4.2 营养盐与 Chl-*a* 浓度变化 西太平洋营养盐年变化是从北到南依次下降。相应的 Chl-*a* 浓度则是由北到南依次降低。Chl-*a* 的分布具有明显的地域差异性,这是由各局部水域不同的营养盐和浮游植物的动力特性所致。与黑潮区表层 Chl-*a* 浓度分布呈现北高南低区域特征相似,西北太平洋热带环流区 Chl-*a* 浓度分布总体也呈现出北部略高于南部<sup>[20]</sup>。研究表明硝酸盐高值区主要集中在西北太平洋和东太平洋附近海域,在西北太平洋硝酸盐浓度范围在 10 ~ 20 μmol/L,在东太平洋硝酸盐浓度范围一般在 8 ~ 16 μmol/L。而本研究 3 个站位主要集中在西太平洋海域,K2 站位营养盐主要是硝酸盐年平均浓度为 34.81 μmol/L;XT 站位硝酸盐年平均浓度为 33.57 μmol/L;S1 站位硝酸盐年平均浓度为 16.02 μmol/L。3 个站位硝酸盐浓度均高于西北太平洋和东太平洋。

除了 SST 对 Chl-*a* 浓度变化产生影响以外,营养盐水平也是其分布的重要影响因素。有研究表明热带西太平洋营养盐(硝酸盐)的分布与 Chl-*a* 明显

呈负相关关系,相关系数为 -0.815 ~ -0.620<sup>[4]</sup>。与本研究 S1 和 XT 两站位硝酸盐与叶绿素 *a* 浓度均呈负相关关系一致(相关系数为 -0.935 ~ -0.207)。这种负相关关系一方面与 SST 与 Chl-*a* 浓度的负相关关系一致,另一方面也与这 2 个站位所处的海区(水温较高)有关。

但 K2 站位硝酸盐浓度与叶绿素 *a* 浓度呈正相关关系。硝酸盐浓度变化主要是受浮游植物对其吸收利用的影响。有研究东海至白令海以南的太平洋海区 Chl-*a* 发现,海区营养盐受黑潮和亲潮的影响,水体的垂直混合将丰富的营养盐带至上层,导致该海区出现了 Chl-*a* 浓度高值<sup>[21]</sup>;本研究中,K2 站位同样也可能由于底层带来丰富的营养盐,使得营养盐成为了该海区浮游植物生长的主导因素,因此 Chl-*a* 的分布与硝酸盐呈现正相关关系。

浮游植物分布通常受到营养盐的限制,西太平洋海区由于跃层的存在限制了底层营养盐的向上补充,浮游植物生长使得真光层的营养盐很快耗尽,这时深层海水营养盐的补充就成为了主要限制因子。在上升流海区,含有丰富营养的深层海水向上补充,浮游植物得到了较快生长,从而以 Chl-*a* 浓度表示的浮游植物生物量在垂直分布上表现为次表层最大值<sup>[22]</sup>。

2.4.3 Chl-*a* 浓度变化与浮游植物群落结构 太平洋不同地理区域的差异使表层 Chl-*a* 分布呈现明显的区域性特征,继而对应的浮游植物群落分布也不同。西太平洋亚热带环流区,其表层浮游植物有甲藻、硅藻、原绿球藻等,而位于中太平洋含有的甲藻、硅藻低、原绿球藻丰度高<sup>[8]</sup>。西北太平洋表层 Chl-*a* 浓度呈现北高南低的区域性特征,而浮游植物群落则是 Pico 级光合浮游植物对总叶绿素的贡献占绝对优势;Nano 级浮游植物次之;Micro 级浮游植物的贡献最小。种类组成上以硅藻为主,甲藻、金藻和蓝藻依次次之<sup>[2]</sup>。

### 3 结论与展望

本研究通过分析历史文献及数据资料,选取了

海表温度、硝酸盐浓度作为自变量参数,对Chl-*a*建立气候变化影响的相关性模型,并利用历史调查数据对模型参数进行验证。结果表明,西太平洋海域不同海区浮游植物 Chl-*a* 的分布在气候变化影响下,对温度呈现为 3 种不同的响应模式。K2 站位 Chl-*a* 浓度与 SST、硝酸盐浓度呈显著正相关关系,可能与该海区的上升流存在有关;而对于相较南边的 S1、XT 站位而言,Chl-*a* 与 SST、硝酸盐浓度呈现负相关关系,这可能与该海区表层海水升温高导致层化加剧、营养输入减少有关。该模型为进一步完善和优化西太平洋海区浮游植物对气候变化的响应模型,进一步开展海洋浮游植物对气候变化响应特征及趋势预测研究奠定了基础。

气候变化的生态响应是个多尺度、多层次交叉的复杂、综合的作用过程。在不同时间尺度上,西太

平洋海区浮游植物对气候变化的响应显示出明显的年际、年代际的波动(异常),在一年周期内也显示出明显的季节动态。西太平洋海区浮游植物的空间尺度变化,显示出了明显的空间异质性,除了通常认为的 Chl-*a* 分布与 SST 变化呈现带状分布并且随纬度增加而增加,即使在相同纬度也呈现出不同地理区域差异,使得浮游植物 Chl-*a* 的分布呈现强烈的区域性特征,继而对应的浮游植物群落分布也不同。因而,在今后的气候变化生态响应尤其是响应模型研究方面,可开展更多时间尺度(如季节变化)和空间尺度(更周详的地理区域比较)的研究。此外,由于西太平洋海区长时间序列生态数据的严重匮乏,严重影响了气候变化响应模型研究开展,建议我国今后建立大洋长期生态观测站,跟踪气候变化的长期影响及其生态效应。

#### 参考文献:

- [1] 刘昕,王静,程旭华,等.南海叶绿素浓度的时空变化特征分析[J].热带海洋学报,2012,32(4):42-48.
- [2] 刘子琳,陈忠元,周蓓锋,等.黑潮源区及其邻近海域叶绿素 *a* 浓度的季节分布[J].海洋湖沼通报,2006(1):58-63.
- [3] BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, MCCLAIN C R, et al. Biospheric primary production during an ENSO transition[J]. Science, 2004, 291(5 513): 2 594-2 597.
- [4] SARMIENTO J L, SLATER R, BARBER R, et al. Response of ocean ecosystems to climate warming[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(3): 1-23.
- [5] 陈兴群,张明,陈其焕.热带太平洋西部及赤道暖水区的初级生产力[J].海洋学报,2002,24(1):86-95.
- [6] 齐雨藻,钱宏林.热带西太平洋叶绿素 *a* 的时空分布[J].暨南大学学报(自然科学与医学版),1992,13(3):103-116.
- [7] 钱宏林,齐雨藻.热带西太平洋叶绿素 *a* 的分布与环境因素之间的关系[J].暨南大学学报(自然科学与医学版),1992,13(3):116-123.
- [8] 徐燕青,陈建芳,高生泉,等.太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制[J].生态学报,2012,32(2):394-401.
- [9] 费尊乐,吕瑞华,管永红.黑潮及其毗邻海域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布[C]//国家海洋局科技司.黑潮调查研究论文选(一).北京:海洋出版社,1999:77-89.
- [10] DUNSTAN P K, FOSTER S D, KING E, et al. Global patterns of change and variation in sea surface temperature and chlorophyll *a*[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 14 624.
- [11] FINKEL Z V, BEARDALL J, FLYNN K J, et al. Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry [J]. Journal of Plankton Research, 2010, 32: 119-137.
- [12] LITCHMAN E, KLAUSMEIER C A, SCHOFIELD O M, et al. The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: scaling from cellular to ecosystem level[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1 170-1 181.
- [13] CHAVEZ F P, STRUTTON P G, FRIEDERICH G E, et al. Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Nino[J]. Science, 1999, 286: 2 126-2 131.
- [14] 陈小燕.基于遥感的长时间序列浮游植物的多尺度变化研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [15] 王桂云,刘峰.热带西太平洋次表层叶绿素 *a* 最大值和亚硝酸盐最大值的分布特征[J].海洋科学进展,1991(4):39-44.
- [16] NING X R, CHAI F, XUE H J, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: C10005.
- [17] 范秀梅,伍玉梅,崔雪森,等.北太平洋叶绿素和海表温度锋面与鲑鱼渔场的关系研究[J].渔业信息与战略,2016(1):44-53.
- [18] 唐森铭,蔡榕硕,郭海峡,等.中国近海区域浮游植物生态对气候变化的响应[J].应用海洋学学报,2017,36(4):4-14.
- [19] CHAVEZ F P, MESSI M, PENNINGTON J T. Marine primary production in relation to climate variability and change[J].

Annual Review of Marine Science, 2010, 3: 227-260.

- [20] 刘子琳, 陈忠元, 周蓓锋, 等. 西北太平洋副热带环流区秋季水体叶绿素 *a* 分布及粒级结构[J]. 海洋学研究, 2004, 22(4): 17-23.
- [21] 李慧蓉, 陆志波, 王娟, 等. 东海至楚科奇海表层海水叶绿素 *a* 分布研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 86-92.
- [22] 倪晓波, 黄大吉. 海洋次表层叶绿素最大值的分布和形成机制研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(5): 58-64.

## Conceptual model on the response of chlorophyll *a* to climate changes in the Western Pacific Ocean

LI He-Yang<sup>1,2</sup>, LIN Li<sup>1</sup>, ZHENG Ying<sup>1</sup>, MA Yong<sup>1,2</sup>

(1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The distribution of phytoplankton in the Western Pacific Ocean showed different responses to the climatic changes under different temporal and spatial scales. This paper is aim to explore how Chl-*a*, *SST* and nutrient respond to long-term climate change by data analyzing and use of literatures. Here we establish a preliminary conceptual model for the responding to climate change. The correlations among Chl-*a* in different regions of the Western Pacific Ocean and the climate change related factors, such as *SST* and seawater nutrient (nitrate), were examined. The results show that at site K2, Chl-*a* is positively correlated with *SST* and nitrate, which may relate to the upwelling in this area, while at sites S1 and XT, they show negative correlations of Chl-*a* with *SST* and nitrate, which may relate to the intensified stratification and the decrease of nutrient input caused by the increase of *SST*. The selection and validation of model parameters laid a foundation for further improvement and optimization of climate change responding model of the phytoplankton changes in the Western Pacific Ocean.

**Key words:** marine biology; chlorophyll *a*; climate change; ecological response; conceptual model; Western Pacific Ocean

DOI: 10.3969/J. ISSN.2095-4972.2020.02.001

(责任编辑:杜俊民)