

罗辰奕, 聂红涛, 张海彦. 渤、黄海生态环境模拟的参数敏感度空间差异分析[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 85–96. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.008

Luo Chenyi, Nie Hongtao, Zhang Haiyan. Spatial variability of parameter sensitivity in the ecosystem simulation of the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 85–96. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.008

渤、黄海生态环境模拟的参数敏感度空间差异分析

罗辰奕¹, 聂红涛¹, 张海彦^{1*}

(1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 随着海洋生态系统模型的发展, 生态变量增多, 众多生物过程参数量值的确定成为制约生态环境模拟的瓶颈问题, 生态系统结构区域性要求模型中的生态参数具有区域差异。为探究不同海区的关键参数及参数敏感度的空间差异, 本研究在渤、黄海建立了 ROMS-CoSiNE 物理-生物耦合的高分辨率生态系统模型, 并对 13 种生态参数的敏感度空间分布进行分析。结果表明: 南黄海中部与渤海及近岸海域的敏感度差异较大。渤海敏感度最大的参数为决定光合速率的浮游植物 P-I 曲线初始斜率, 其次为浮游动物捕食半饱和常数和浮游动物最大捕食率。而南黄海中部敏感度最大的参数为浮游动物最大捕食率, 其次为浮游植物死亡率和浮游植物 P-I 曲线初始斜率。结合敏感度分布及浮游植物生物量收支得出, 渤海水体透明度较南黄海偏低、浮游植物生长光限制较强, 是引起浮游植物 P-I 曲线初始斜率敏感度在渤海高于黄海的主要原因。浮游动物最大捕食率及浮游植物死亡率的敏感度空间差异, 受渤、黄海浮游植物生物量差异的影响, 与生态系统中的高度非线性特征有关。

关键词: 生态系统模型; 参数敏感度; 空间差异; 渤海; 黄海

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)08-0085-12

1 引言

近年来, 海洋生态系统模型逐渐成为研究复杂海洋生态环境的重要手段。然而, 随着生态系统模型发展的逐渐复杂化, 模型中生态参数增多且量值难以确定, 逐渐成为限制其模拟能力的瓶颈^[1-2]。因此, 确定影响模型结果的关键生态参数, 可为模型调试及参数优化提供方向。在过去的几十年里, 以浮游植物生物量变化对参数变化的响应进行的敏感性分析被广泛应用, 是一种确定模型关键参数的有效手段^[3]。Kishi 等^[4] 通过在日本美川湾建立的生态模型得出模型中光合作用速率和浮游动植物的自然死亡率十分重要。高会旺等^[5] 在渤海建立了 NPZD 模型并提出浮游植物最大生长率、海水消光系数、浮游动物对浮游

植物最大捕食率、捕食效率和碎屑的再矿化率是影响渤海水层生态系统年循环的主要因子。赵亮^[6] 在渤海建立浮游植物生态动力学模型, 基于敏感性分析实验提出浮游植物最大生长率、浮游植物基础呼吸率、浮游植物死亡率、浮游动物捕食率、水底碎屑矿化率等参数比较敏感。Kuroda 和 Kishi^[7] 基于蒙特卡洛算法和主成分分析在北太平洋生态模型约 80 个模型参数中选出了 8 个影响最大的参数, 包括 0℃ 时的浮游植物光合作用速率、浮游动物死亡率、浮游植物死亡率和浮游动物捕食速率以及浮游植物吸收硝酸盐半饱和和常数等几种。Ji 等^[8] 在中国近海及邻近北太平洋建立一个研究碳循环的模型并指出浮游动物吸收速率、浮游动物最大生长率(20℃ 时)以及浮游动物基础代谢率是模型中的敏感参数。以上研究表

收稿日期: 2018-08-14; 修订日期: 2018-11-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1404403, 2016YFC1401602); 国家自然科学基金(41806018)。

作者简介: 罗辰奕(1995—), 女, 湖北省武汉市人, 研究方向为海洋生态动力学。E-mail: luocy@tju.edu.cn

* 通信作者: 张海彦(1987—), 女, 讲师, 研究方向为海洋生态动力学。E-mail: haiyan_zhang@tju.edu.cn

明,不同海域生态模型的关键生态参数存在差异,即不同海域需要关注的关键生态参数有所不同。这是由于不同海域的生态系统结构不同,生态参数具有空间变化^[2,9]。而目前的生态系统模型,参数值大多来自文献或实验室实验结果且一般在整个海区取一个常数,关于生态参数区域性的研究较少^[10-11]。因此,了解关键参数的空间分布及区域特征,可为日后实现生态参数取值的空间变化奠定基础。

渤海和黄海是我国重要的半封闭陆架海,沿海地区人口和工业生产高度集中,具有陆源输入量大、海水交换差、初级生产力高等特点,是历年来的研究热点,海洋生态系统模型逐步发展并走向环境管理应用^[5,6,12-21]。但以往研究中,并未考虑关键生态参数的空间差异。因此,本课题组在渤海、黄海建立并校验高分辨生态动力学模型,本文应用该模型对生态参数进行敏感性分析,探究影响浮游植物生物量的关键生态参数的空间分布,并通过收支计算定量地分析这些关键生态参数的敏感度出现空间差异的原因,为后续生态模型参数优化提供参考。

2 数据和方法

2.1 观测数据

本文使用温度、盐度、叶绿素等现场观测数据对模型进行校验。校验数据包括 2011 年 3 月和 2013 年 6 月航次观测的温度和盐度,2012 年 6 月、8 月及 2013 年 6 月、7 月、8 月和 9 月航次观测的叶绿素数据。

2.2 模型介绍

本次研究使用的水动力模型为三维斜压原始方程模式 ROMS^[22](Regional Ocean Modelling System)。模型研究的区域为 29.85°~41.18°N, 117.27°~127.36°E,覆盖全部渤海、黄海及邻近东海区域(图 1)。模型水平分辨率为(1/24)°×(1/24)°,垂向分为 30 层,采用 Mello-Yamada 2.5 阶湍流闭合方案。耦合的生态模式是 CoSiNE^[23](The Carbon, Silicate and Nitrogen Ecosystem),包含两种浮游植物(小型浮游植物 S1、硅藻 S2)、两种浮游植物对应的叶绿素(小型浮游植物对应的叶绿素 Ch11、大型浮游植物对应的叶绿素 Ch12)、两种大小的浮游动物(小型浮游动物 Z1、中型浮游动物 Z2)、含氮碎屑、含硅碎屑、硝酸盐、铵盐、硅酸盐、磷酸盐、溶解无机碳、海水总碱度和溶解氧,模型示意图如图 2 所示。这些变量都受对流、扩散等物理过程影响。

模型中温度、盐度、无机氮、无机磷、无机硅和

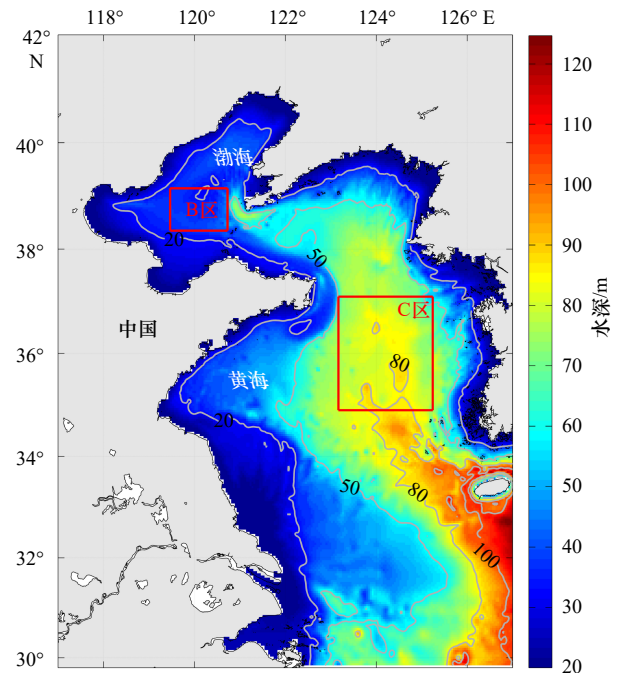


图 1 模型区域及水深分布

Fig. 1 Bathymetry of model domain

溶解氧的初始场数据为来自 WOA13 V2 (World Ocean Atlas 2013 V2)。叶绿素初始条件来自 NEMO-PISCES 全球模型结果 (<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/>)。大气强迫数据来自 ERA-Interim 再分析资料^[24],包括风应力、热通量、太阳辐射以及淡水通量等。开边界温盐、流速和水位数据来自 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model, <https://hycom.org/>) 全球再分析结果。开边界处的潮汐数据由 OTPS 的 INDIAN Ocean (中国海&印度尼西亚 2016) 模型计算所得,包括 M₂、S₂、K₂、N₂、K₁、O₁、Q₁ 及 P₁ 等 8 个分潮的潮位和潮流数据。营养盐、叶绿素和溶解氧的开边界条件来自 NEMO-PISCES 全球模型月均结果。模型涵盖长江、钱塘江、淮河、黄河、海河、辽河、滦河、鸭绿江和汉江,其中长江的径流量数据来自大通站的观测结果,营养盐数据来自 Global-News Model 每月的数据^[25]。其他河流的径流量和营养盐数据来自文献^[26-28]。生态模式参数取值如表 1 所示,后续敏感性分析实验均以该取值为调整基础。模型从 2006 年 1 月 1 日开始运行至 2013 年 12 月 31 日,一共运行 8 年,考虑到模型的稳定时间,本文将分析 2009 年以后模型的结果。

2.3 敏感性分析方法

本文对模型进行初步校验之后,选取浮游植物 P-I 曲线初始斜率、浮游动物最大捕食率、浮游动物捕食半饱和常数、浮游动物捕食效率、浮游动物死亡率、

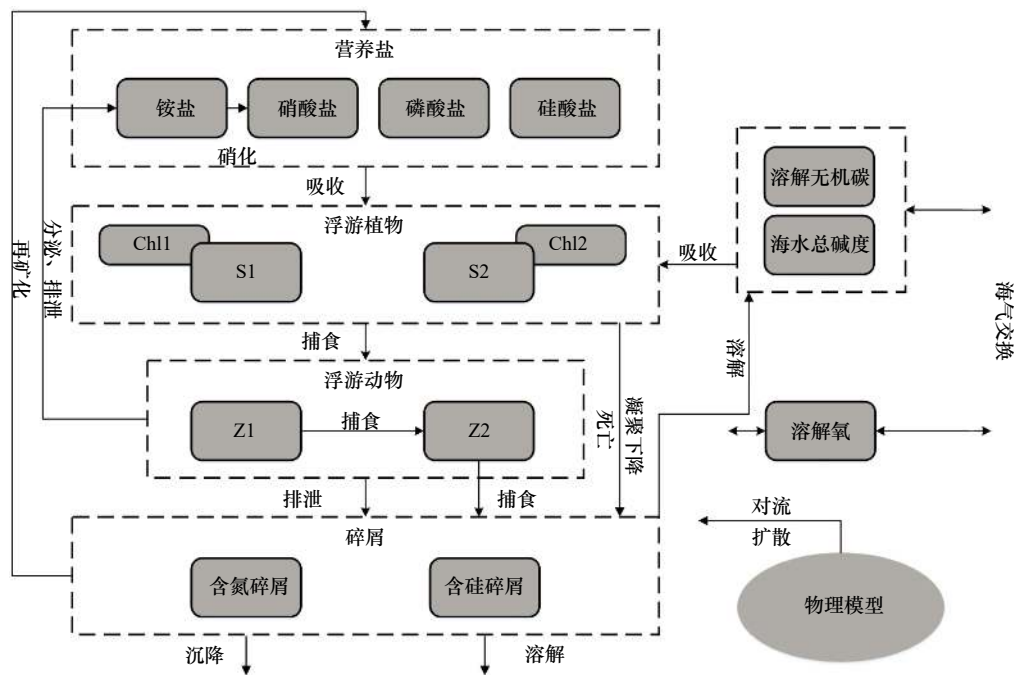


图2 CoSiNE生态模型示意图

Fig. 2 Schematic of CoSiNE biological model

S1. 小型浮游植物; S2. 硅藻; Z1. 小型浮游动物; Z2. 中型浮游动物; Chl1. 小型浮游植物对应的叶绿素; Chl2. 大型浮游植物对应的叶绿素

S1. microphytoplankton; S2. diatom; Z1. microzooplankton; Z2. mesozooplankton; Chl1. chlorophyll corresponding to microphytoplankton; Chl2. chlorophyll corresponding to macroplankton

浮游植物最大生长率、浮游植物死亡率、沉降速率、浮游植物生长所需氮磷比、浮游植物生长磷酸盐半饱和常数、浮游植物凝结速率、浮游植物生长硝酸盐半饱和常数以及硝化速率等涉及浮游植物生长和死亡、浮游动物捕食和死亡、硝化过程等主要生物过程的13种参数,并将各参数值增大50%进行敏感性实验。其中由于浮游动物捕食效率的最大值为1,所以在调整时将该参数调整至上限,即增大33%进行试验。本文将总浮游植物量(包括小型浮游植物和硅藻)作为评价模型生态参数敏感度的指标。评价生态参数敏感度的公式如下^[8]

$$S_{c,x} = \frac{C_x - C_{x+5\%}}{C_x} \bigg/ \frac{X - X_{+5\%}}{X}, \quad (1)$$

式中, $S_{c,x}$ 为敏感度,下标 x 代表各个参数, X 为基础实验中参数值, $X_{+5\%}$ 为参数增加50%(33%)以后的值; C_x 为基础实验全年积分浮游植物生物量, $C_{x+5\%}$ 为参数调整之后的全年积分浮游植物生物量。

3 结果与讨论

3.1 物理模型校验

图3给出了温度及盐度的模拟结果和现场观测的对比。在2011年春季(3月),模型模拟的底底温度

及盐度分布一致,垂向混合较为均匀,济州岛东北侧的底底层均呈现表征黄海暖流的高温、高盐水,均与观测相符。在2013年夏季(6月),海表温度显著高于春季,底层黄海冷水团形成。与春季相比,渤海、黄海夏季盐度有所降低。此外,长江冲淡水在向东扩展。总体上,模型可以较好地捕捉到温度和盐度的时空分布,且分别与观测存在较高的相关性(相关系数分别为0.93和0.80)。

3.2 生态模型校验

本研究将表层叶绿素作为模型生态场校验的变量。模型结果及现场观测(图4)均显示,河口及近岸海域叶绿素浓度较高。在时间分布上,7月和8月叶绿素浓度较高。模型得到的叶绿素浓度略低于观测结果,但分布趋势与观测一致,特别体现了黄海潮汐锋区及长江冲淡水影响范围内的高叶绿素分布,这与中国生态系统研究多年来基于观测对黄海和东海叶绿素分布的理解是完全一致的,将在另文中仔细分析其动力过程。总体上,基础实验中建立的生态动力学模型基本可以模拟出表层叶绿素的时空分布特征。

3.3 参数敏感性实验结果

3.3.1 不同参数敏感性实验结果

表2给出了水体积分的浮游植物现存量关于不

表 1 生态模型参数取值
Tab. 1 Biological parameters

描述	参数	取值	单位	文献来源
S1最大生长率	gmaxs1	2	d ⁻¹	[23]
S2最大生长率	gmaxs2	2.5	d ⁻¹	[23]
Z1最大捕食率	beta1	1.6	d ⁻¹	[29]
Z2最大捕食率	beta2	0.65	d ⁻¹	[30]
Z1捕食半饱和和常数(以氮计)	akz1	0.5	mmol/m ³	[23]
Z2捕食半饱和和常数(以氮计)	akz2	0.25	mmol/m ³	[23]
光合作用有效短波辐射	PARfrac	0.46		[29]
S1 P-I曲线初始斜率	amaxs1	0.025	d ⁻¹ ·(W·m ⁻²) ⁻¹	[23]
S2 P-I曲线初始斜率	amaxs2	0.025	d ⁻¹ ·(W·m ⁻²) ⁻¹	[23]
S1铵盐抑制系数(以氮计)	pis1	5.59	mmol/m ³	[23]
S2铵盐抑制系数(以氮计)	pis2	4	mmol/m ³	[31]
S1硝酸盐吸收半饱和和常数(以氮计)	akno3s1	1	mmol/m ³	[32]
S2硝酸盐吸收半饱和和常数(以氮计)	akno3s2	2	mmol/m ³	[6]
S1铵盐吸收半饱和和常数(以氮计)	aknh4s1	0.1	mmol/m ³	[33]
S2铵盐吸收半饱和和常数(以氮计)	aknh4s2	0.3	mmol/m ³	[34]
S1磷酸盐吸收半饱和和常数(以氮计)	akpo4s1	0.065	mmol/m ³	[6]
S2磷酸盐吸收半饱和和常数(以氮计)	akpo4s2	0.125	mmol/m ³	[6]
S2硅酸盐吸收半饱和和常数(以氮计)	aksio4s2	4.5	mmol/m ³	[31]
海水光吸收系数	ak1	0.036	m ⁻¹	[29]
浮游植物光吸收系数	ak2	0.11	m ⁻¹ ·(mmol·m ⁻³) ⁻¹	[30]
Z2死亡率	bgamma0	0.1	d ⁻¹	[34]
Z1捕食效率	bgamma1	0.75	d ⁻¹	[35]
Z2捕食效率	bgamma2	0.75	d ⁻¹	[35]
S1死亡率	bgamma3	0.2	d ⁻¹	[31]
S2死亡率	bgamma4	0.1	d ⁻¹	[36]
碎屑分解速率	bgamma5	0.03	d ⁻¹	
浮游植物凝聚速率	bgamma6	0.005	d ⁻¹	
硝化速率	bgamma7	0.25	d ⁻¹	[37]
小型碎屑沉降速率	wsd	15	m·d ⁻¹	[31]
含硅碎屑沉降速率	wdsi	25	m·d ⁻¹	[38]
S2沉降速率	wsp	1	m·d ⁻¹	[23]
浮游植物氮磷吸收比	n2p	16	mol(以N计)/mol(以P计)	

同参数在整个模型区域的平均敏感度。根据敏感度绝对值大小,可将参数划分为+++/---(特别敏感,|敏感度|≥100%),+ +/---(较为敏感,20%≤|敏感度|<

100%)和+/--(一般敏感,|敏感度|<20%)3类。在实验的13种参数中,浮游植物量对浮游植物P-I曲线初始斜率敏感度最高。浮游植物P-I曲线初始斜率增大

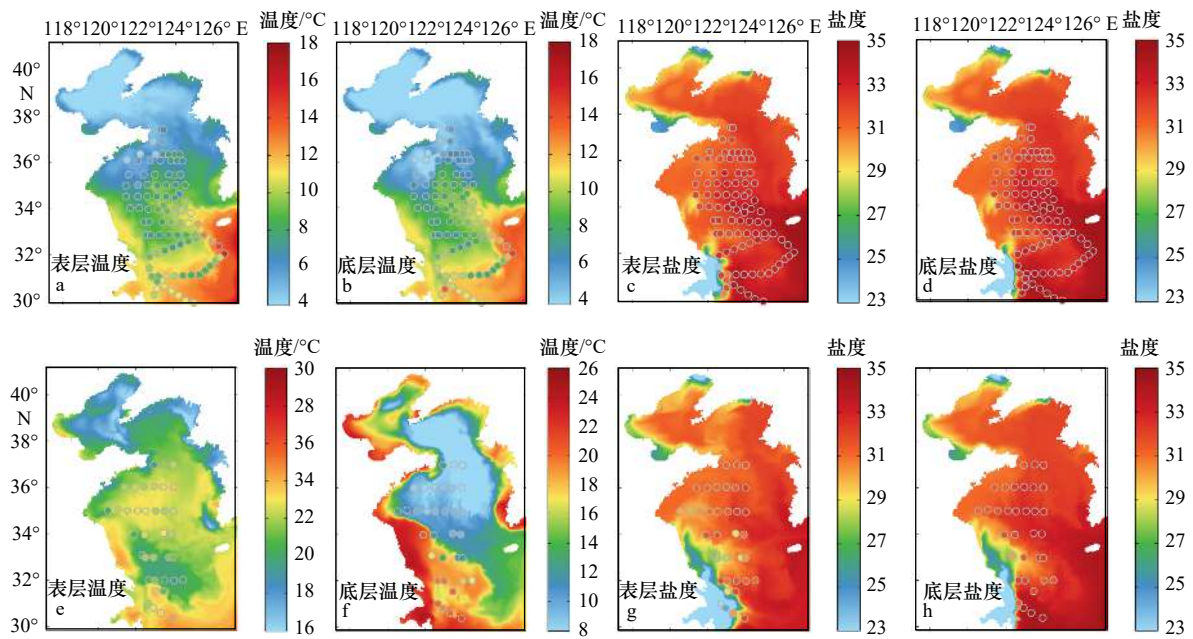


图3 模型模拟的2011年3月表层温度(a)、底层温度(b)、表层盐度(c)、底层盐度(d)及2013年6月表层温度(e)、底层温度(f)、表层盐度(g)、底层盐度(h)与现场观测的对比。颜色大面分布为模型结果,散点表示现场观测结果
 Fig. 3 Comparison of surface and bottom temperature and salinity between model results (colored map) and observations (dots) in March 2011 (a, b, c, d) and June 2013 (e, f, g, h)

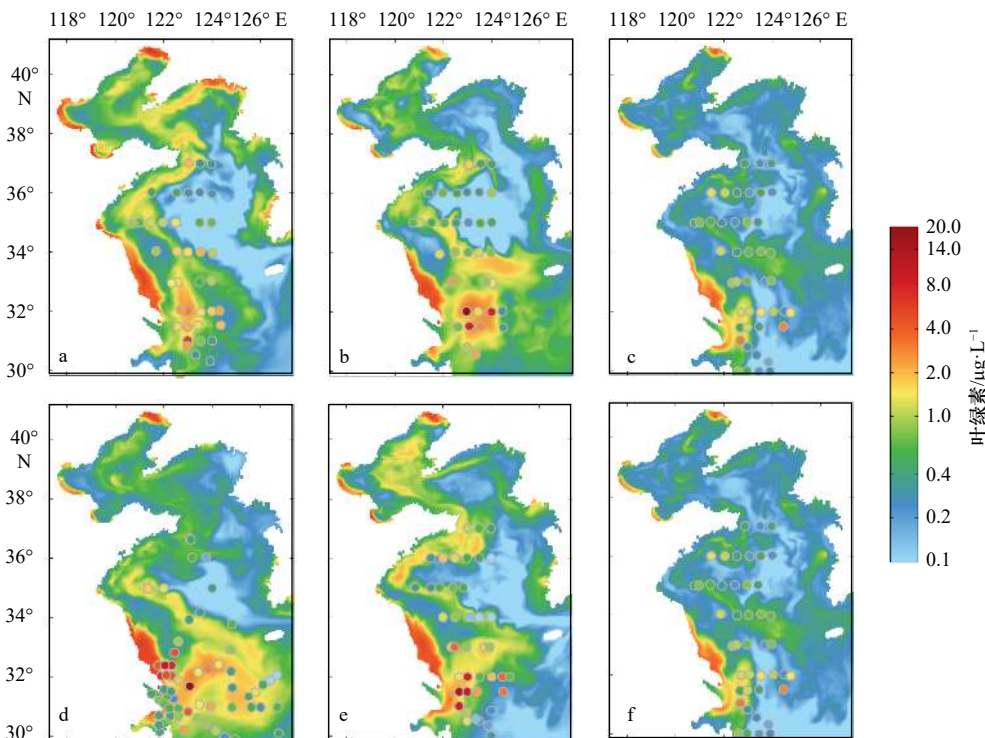


图4 模型模拟的2012年6月(a)、8月(b),2013年6月(c)、7月(d)、8月(e)、9月(f)表层叶绿素与现场观测结果对比。颜色大面分布为模型结果,散点表示现场观测结果
 Fig. 4 Comparison of simulated (colored map) surface chlorophyll and observations (dots) in June 2012 (a), August 2012 (b), June 2013 (c), July 2013 (d), August 2013 (e), September 2013 (f)

50%后,浮游植物量增加了约75%,敏感度可达150%左右。其次,与浮游动物捕食相关的参数及浮

游动物死亡率对浮游植物量也有显著影响。其中,浮游动物最大捕食率及浮游动物捕食半饱和常数增大

表 2 浮游植物量对模型参数的敏感性

Tab. 2 Sensitivity of model parameter to phytoplankton.

实验名称	描述	浮游植物量变化率	敏感度	敏感程度
H-isp1	浮游植物P-I曲线初始斜率	74.95%	149.9%±0.88	+++
H-beta	浮游动物的最大捕食率	-52.91%	-105.81%±0.06	---
H-akz	浮游动物捕食半饱和常数	46.42%	92.84%±0.21	++
H-mort	浮游动物死亡率	40.07%	80.14%±0.44	++
H-grzf	浮游动物捕食效率	-36.41%	-72.81%±0.07	--
H-gmax	浮游植物最大生长率	24.93%	49.85%±0.25	++
H-death	浮游植物死亡率	-24.39%	-48.77%±0.09	--
H-wsd	沉降速率	-5.85%	-11.7%±0.04	-
H-n2p	浮游植物生长所需氮磷比	-2.77%	5.54%±0.05	+
H-kpo4	浮游植物生长磷酸盐半饱和常数	-2.34%	-4.68%±0.03	-
H-agg	浮游植物凝结速率	-2.11%	-4.21%±0.02	-
H-kon3	浮游植物生长硝酸盐半饱和常数	-0.56%	-1.11%±0.03	-
H-nitr	硝化速率	0.46%	0.92%±0.03	+

50%，浮游植物量减少了约 50%，对应的敏感度分别为 -105.81% 和 92.84%。浮游植物量对浮游动物的死亡率及其捕食效率的变化也较为敏感，敏感度均大于 70%。与浮游动物相关参数相比，浮游植物最大生长率及死亡率升高引起的浮游植物量变化则相对较小，分别为 24.93% 和 -24.39%，对应敏感度为 49.85% 和 -48.77%，也较为敏感。此外，浮游植物生长对碎屑及浮游植物沉降速率、硝化速率等以及与营养盐相关的浮游植物对硝酸盐、磷酸盐等吸收的半饱和浓度的敏感度偏低 (敏感度 < 12%)。

总体上，敏感度较大的参数包括与浮游植物生长光限制相关的浮游植物 P-I 曲线初始斜率、与浮游动物量相关的浮游动物捕食率、死亡率等以及与浮游植物自身有关的生长率、死亡率三类。与前人研究相比，高会旺等^[5]在渤海建立模型并得出浮游植物最大生长率、海水消光系数、浮游动物对浮游植物最大捕食率、捕食效率和碎屑的再矿化率较为敏感，随后赵亮^[6]也在渤海建立了一个浮游植物生态动力学模型，提出浮游植物最大生长率、浮游植物基础呼吸率、浮游植物死亡率、浮游动物捕食率、水底碎屑矿化率等参数比较敏感，Ji 等^[8]在中国近海及邻近太平洋的研究中认为模型敏感参数为浮游动物吸收速率、浮游动物基础代谢速率及浮游动物最大生长率 (20℃ 时) 等。虽然由于模型配置以及研究海区区别，敏感参数存在一定差异，但是模型的主要关键参

数均为与浮游植物及浮游动物生长和死亡直接相关的生态参数。

3.3.2 敏感度空间分布

在空间分布上，生态参数敏感度存在显著差异 (图 5)。13 种参数的敏感性试验中，浮游植物 P-I 曲线初始斜率引起的敏感度的空间差异最大 (标准偏差 0.88)。该参数在渤海及黄海 30 m 以浅的区域水体积分浮游植物量的敏感度可达 100%，而在黄海中部敏感度则相对较小，小于 50%，其中甚至在海州湾外侧敏感度出现负值 (约 -30%)。类似的，浮游植物量对浮游动物死亡率、最大捕食率、捕食半饱和常数和捕食效率的敏感度均在黄海中部较小，且该区与其他区域敏感度情况存在较大差异。其中浮游动物的死亡率升高，摄取的浮游植物减少，但黄海中部的浮游植物没有增加反而减少，这一现象也体现了生态系统的非线性性和复杂性，浮游植物量受多种因素调控。此外，对比调整浮游植物最大生长率与调整浮游植物 P-I 曲线初始斜率之后的敏感度空间分布图可以看到两者空间分布特点较为相似，前者同样在渤海及黄海近岸区域存在较大值，其中长江口、苏北浅滩、渤海沿岸及中部浅滩的敏感度达到 90% 以上，而在黄海中部敏感度较低，甚至出现负值，只是整体上前者敏感度不如后者大。这一结果也体现了光在渤海、黄海海区对于浮游植物生长的重要性。对于浮游植物死亡率增大实验，大部分区域的敏感度为负值，而在渤海辽东浅滩周围注

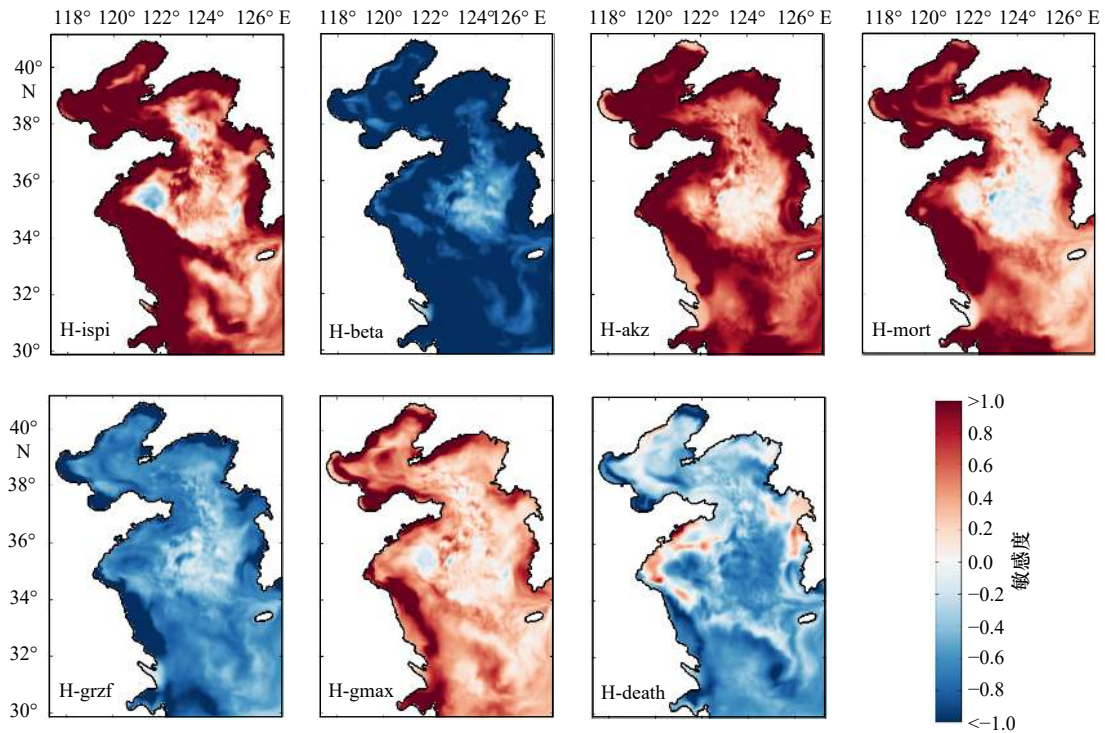


图5 关于浮游植物P-I曲线初始斜率(H-ispi)、浮游动物最大捕食率(H-beta)、浮游动物捕食半饱和常数(H-akz)、浮游动物捕食效率(H-grzf)、浮游动物死亡率(H-mort)、浮游植物最大生长率(H-gmax)和浮游植物死亡率(H-death)的敏感度分布

Fig. 5 Parameter sensitivity distribution of slope of P-I curve of phytoplankton (H-ispi), maximum grazing rate of zooplankton (H-beta), half saturation constant for zooplankton grazing (H-akz), grazing efficiency (H-grzf), specific mortality rate of zooplankton (H-mort), maximum specific growth rate (H-gmax), and death rate (H-death) of phytoplankton

地、南黄海沿岸区域的敏感度为正值,且达到50%以上,表明浮游植物量显著增加,浮游植物生长增多。对于不是十分敏感的参数如碎屑及浮游植物沉降速率、硝化速率等以及与营养盐相关的浮游植物对磷酸盐等吸收的半饱和浓度等参数,也呈现出空间差异特征,这些参数敏感度均较低,这里不再进行详细描述。

为量化敏感度的区域差异,及定量诊断物理及生物过程对敏感度区域差异的影响,本文选取了两个代表性区域,渤海(B区)及黄海中部区域(C区)(图1),并给出了两个区的参数敏感度(表3)。B区和C区敏感度较大的参数存在差异,B区最敏感的3个参数为浮游植物P-I曲线初始斜率、浮游动物捕食半饱和常数和浮游动物最大捕食率。而C区则为浮游动物捕食率、浮游植物死亡率和浮游植物P-I曲线初始斜率。此外,B区中大部分参数的敏感度要显著高于C区,如B区中浮游植物P-I曲线初始斜率敏感度为150%,而C区敏感度只有46%,不到B区敏感度值的1/3。C区中仅3个参数的敏感度略大于B区,如对于浮游植物死亡率,C区敏感度为-55.78%,大于B区的-40.80%。

表3 B区和C区的敏感度

Tab. 3 Parameter sensitivity in District B and C

实验名称	B区		C区	
	敏感度	敏感度排序	敏感度	敏感度排序
H-ispi	150.74%	1	46.36%	3
H-beta	-98.50%	3	-64.57%	1
H-akz	123.57%	2	36.59%	5
H-grzf	-66.17%	5	-37.16%	4
H-mort	92.24%	4	5.24%	7
H-gmax	55.01%	6	22.15%	6
H-death	-40.80%	7	-55.78%	2
H-wsd	-18.06%	8	1.66%	10
H-n2p	0.24%	13	2.28%	8
H-kpo4	0.65%	11	0.36%	13
H-agg	-1.79%	10	-1.63%	11
H-kno3	-3.06%	9	0.44%	12
H-nitr	0.45%	12	1.7%	9

3.4 敏感度空间差异分析

为探究浮游植物现存对生态参数敏感度出现空间差异的原因,本文选取敏感度较大且区域差异也较大的3个参数——浮游植物P-I曲线初始斜率、浮游动物最大捕食速率及浮游植物死亡率,计算这些参数实验中B区和C区浮游植物生物量收支情况。模型中描述浮游植物变化的公式如下^[23]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = ADV + DIFF + PP - GRZ - MORT - AGG, \quad (2)$$

式中, S 表示浮游植物, ADV 为对流项影响, $DIFF$ 为扩散项影响, PP 为初级生产项, GRZ 代表浮游动物捕食项, $MORT$ 是浮游植物死亡项, AGG 为浮游植物聚集成碎屑项。

从浮游植物量的年收支(图6)可以看出,净初级生产项、死亡项和浮游动物捕食项为浮游植物量最主要的源汇项。总体上C区的浮游植物初级生产高于B区,即南黄海水体积分的初级生产力高于渤海,这与官文江等^[39]通过卫星遥感数据反演得到的初级生产力分布趋势一致。此外,由于浮游植物生长、死亡以及被捕食等存在显著的季节循环过程,生物过程导致的净浮游植物变化量远远小于各个生物源汇项大小。此外,可以看到物理输运过程在B区表现为浮

游植物的汇,在C区为源项,但其量值远远小于各生物源汇项。

在H-ispi实验中,增大浮游植物P-I曲线初始斜率意味着提高了光合作用过程对光的转化效率,也即减弱了光对浮游植物生长的限制。相对于基础试验,调整参数以后B区PP项增大了84.15%,C区增大了27.22%(表4)。两个区域的初级生产均出现明显增加,且B区较C区相对增加更多,与B区敏感度较大相对应。这一结果表明虽然近海普遍存在光限制,但是B区的浮游植物光限制程度要高于C区。这与渤海透明度低于南黄海透明度,且渤海水体光衰减较强以及渤海海水透明度在很大程度上决定了初级生产力的变化趋势的认识相符^[40-41]。同时,也与模型得到的渤海营养盐浓度总体高于南黄海相对应,即C区的营养盐限制要高于B区,与文献^[42]结果一致。因此当整个海域光限制程度降低时,B区浮游植物增长更加显著。受初级生产力的影响,B区GRZ项、MORT项及AGG项的变化也均大于C区。总的来说,浮游植物生长光限制的强弱程度是浮游植物量对浮游植物P-I曲线初始斜率的敏感度存在空间差异的重要原因。这也说明模型中不同水体类型(不同海水透明度)的参数化过程将是影响初级生产力模拟的重要原

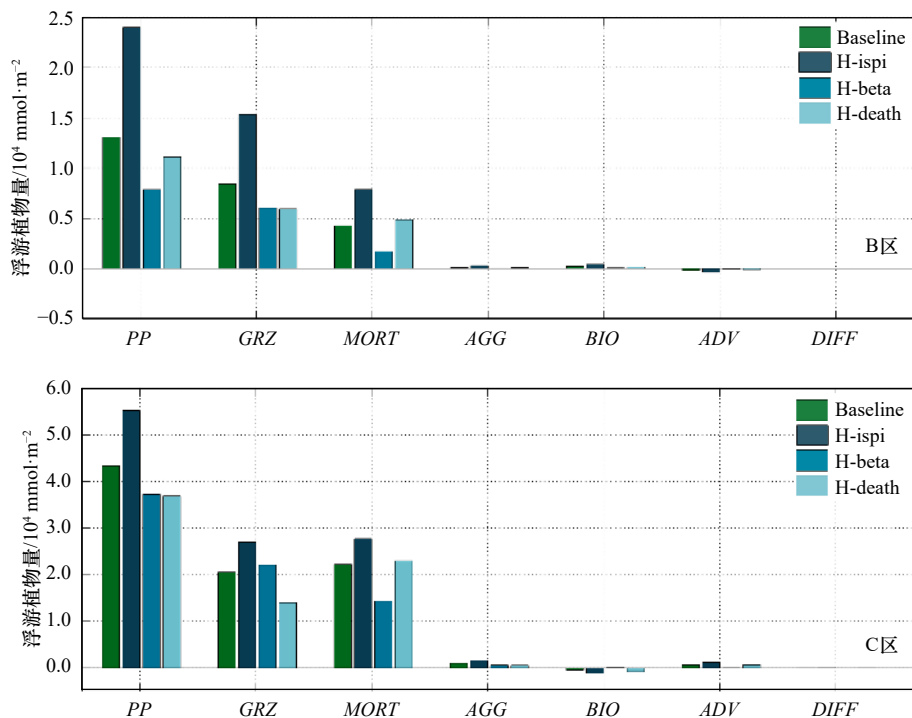


图6 关于浮游植物P-I曲线初始斜率(H-ispi)、浮游动物最大捕食率(H-beta)、浮游植物死亡率(H-death)以及基础实验中B区和C区浮游植物生物量收支。BIO表示净的生物作用($PP-GRZ-MORT-AGG$)

Fig. 6 Phytoplankton budget in B and C districts in baseline, initial slope of P-I curve of phytoplankton (H-ispi), maximum grazing rate of zooplankton (H-beta), death rate of phytoplankton (H-death) simulations. BIO represents net biological influence ($PP-GRZ-MORT-AGG$)

表4 关于浮游植物 P-I 曲线初始斜率 (H-ispi)、浮游动物最大捕食率 (H-beta)、浮游植物死亡率 (H-death) 实验中 B 区和 C 区浮游植物源汇项相对于基础实验的变化率

Tab. 4 Change rates of phytoplankton source/sink terms in cases initial slope of P-I curve of phytoplankton (H-ispi), maximum grazing rate of zooplankton (H-beta), death rate of phytoplankton (H-death) relative to baseline in B and C districts

实验	H-ispi		H-beta		H-death	
	B区	C区	B区	C区	B区	C区
PP	84.15%	27.22%	-39.73%	-14.07%	-15.01%	-15.09%
GRZ	82.58%	31.09%	-28.19%	7.83%	-29.20%	-31.76%
MORT	84.45%	24.50%	-59.39%	-35.26%	14.14%	3.33%
AGG	219.87%	60.86%	-73.95%	-38.22%	-23.02%	-39.90%
BIO	939.95%	140.44%	-116.27%	-76.00%	-30.67%	74.04%
ADV	103.11%	71.48%	-78.85%	-95.56%	-35.68%	-1.32%
DIFF	8.85%	92.53%	-0.54%	-110.61%	7.13%	11.79%

因,合理按区域给出与光相关影响浮游植物生长的参数十分重要。

在 H-beta 实验中,浮游动物最大捕食率的增大将直接引起系统浮游植物量的减少,进而对其他过程造成影响。由于 B 区和 C 区的浮游植物生物量不同,及生态过程中存在高度非线性, B 区和 C 区初级生产项的降低幅度并不相同(表 4), B 区降低 39.73%(由 $1.30 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $0.79 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$), C 区降低 14.07%(由 $4.34 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $3.72 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$)。这一变化差异也直接影响了两个区域 GRZ 项的变化,对于 B 区,由于 H-beta 实验的 PP 项已减少至比原基础实验 GRZ 项($0.84 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$)还少,而从生态系统结构上讲, GRZ 项的量须小于 PP 项,因此 B 区的 GRZ 项在 H-beta 实验中势必减小;对于 C 区,尽管该区域 PP 项也出现了下降,但由于下降幅度较小且浮游动物捕食率增大了 50%,最终 C 区的 GRZ 项略有增大(7.83%)。总的来说, B 区和 C 区 GRZ 项的变化受两个区域初级生产项的变化影响,主要是由高度非线性的生态过程决定的。此外,对应浮游植物初级生产的减少, B 区和 C 区的浮游植物死亡量以及聚集成碎屑的量均出现了明显的降低,且 B 区降低幅度更低。相应地, B 区的敏感度大于 C 区。综上所述,增大捕食率对初级生产较低的渤海影响较大,这与生态系统的高度非线性有关。

在 H-death 实验中,浮游植物死亡率增大 50% 之后, B 区与 C 区的生态过程源项(PP 项)降低幅度基

本相同(分别为 15.01% 和 15.09%,表 4), B 区 PP 项由 $1.30 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $1.11 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$, C 区 PP 项由 $4.34 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $3.69 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$,与前两个实验中两个区域 PP 项的变化趋势有所差异。而对于生物过程的汇项(GRZ 项, MORT 项, AGG 项), C 区的 GRZ 项和 AGG 项两项(-31.76%, -39.90%)比 B 区(29.20%, -23.02%)均相对于基础实验减少得更多,而且虽然两个区域的 MORT 项相对于基础实验都有增加,但是 C 区(3.33%)的增加的幅度小于 B 区(14.14%),整体看来 B 区生物汇项(由 $1.28 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $1.09 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$, -14.68%)的变化幅度大于 C 区(由 $4.39 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$ 降低至 $3.77 \times 10^4 \text{ mmol/m}^2$, -14.10%)。对于整个生物过程,也即 BIO 项,基于表 4 可以看到两个海区的变化率相反。经计算两个区域生态过程源汇项的改变对 BIO 项的影响, B 区源项改变 $\left(\frac{\Delta PP}{BIO_{\text{Baseline}}}\right)$ 对 BIO 变化的影响为 -737.03%, 汇项改变 $\left(\frac{\Delta(GRZ + MORT + AGG)}{BIO_{\text{Baseline}}}\right)$ 对 BIO 变化的影响约为 706.37%; C 区源项改变对 BIO 变化的影响为 1398%, 汇项改变对 BIO 变化的影响约为 1323.95%。可以看出 B 区、C 区均是由源项主导了 BIO 的变化,也即 BIO 应该呈现下降的趋势。然而,由于 B 区 BIO 项在数值上为正值而 C 区是负值,所以在计算变化率时 C 区由于负负得正得出与 B 区符号相反的变化率。不仅如此,基于图 6 也可以看到 H-death 实验中 C 区的 BIO 项相对于基础实验出现了下降,且变化幅度大于 B 区,从而引起两个区域的敏感度出现差异。总的来说,这一结果的出现主要受两个区域的生态源项也即初级生产项的影响,体现了生态过程的非线性特征。

4 结论

本文在渤海、黄海建立 ROMS-CoSiNE 高分辨率生态系统模型,并利用观测数据对物理和生态要素模拟进行校验。在此基础上,对 13 种生态参数敏感度进行计算。整体上,影响渤海、黄海区域关键生态参数为浮游植物 P-I 曲线初始斜率、浮游动物最大捕食率、浮游动物捕食半饱和常数和浮游动物捕食效率、浮游动物死亡率和浮游植物最大生长率。生态参数敏感度存在显著空间差异,主要表现为南黄海中部与渤海及近岸海域的敏感度差异较大。渤海敏感度最大的参数为浮游植物 P-I 曲线初始斜率,其次为浮游动物捕食半饱和常数和浮游动物最大捕食率。而南黄海中部敏感度最大的参数为浮游动物最大捕食率,

其次为浮游植物死亡率和浮游植物 P-I 曲线初始斜率。

通过对浮游植物 P-I 曲线初始斜率、浮游动物最大捕食率以及浮游植物死亡率实验中浮游植物量收支的估算及分析得出,渤海水体透明度较南黄海偏低、浮游植物生长光限制较强是引起浮游植物 P-I 曲线初始斜率敏感度在渤海高于黄海的主要原因。浮游动物最大捕食率及浮游植物死亡率的敏感度空间

差异受到渤海、黄海浮游植物生物量的影响,与生态系统的高度非线性特征有关。

文中对关键生态参数及参数敏感度空间差异的认识,将为下一步选择优化参数提供方向。同时,可为近海生态模型参数分海区取值提供参考,如根据水体类型给出与浮游植物生长相关的水体光限制因子等。

参考文献:

- [1] Denman K L. Modelling planktonic ecosystems: parameterizing complexity[J]. *Progress in Oceanography*, 2003, 57(3/4): 429–452.
- [2] Losa S N, Kivman G A, Ryabchenko V A. Weak constraint parameter estimation for a simple ocean ecosystem model: what can we learn about the model and data?[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 45(1/2): 1–20.
- [3] Mateus M D, Franz G. Sensitivity analysis in a complex marine ecological model[J]. *Water*, 2015, 7(5): 2060–2081.
- [4] Kishi M J, Nakata K, Ishikawa K. Sensitivity analysis of a coastal marine ecosystem[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1981, 37(3): 120–134.
- [5] 高会旺, 孙文心, 翟雪梅. 水层生态系统动力学模式参数的敏感性分析[J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(3): 398–404.
Gao Huiwang, Sun Wenxin, Zhai Xuemei. Sensitive analysis of the parameters of a pelagic ecosystem dynamic model[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 29(3): 398–404.
- [6] 赵亮. 渤海浮游植物生态动力学模型研究[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
Zhao Liang. A modeling study of the phytoplankton dynamic in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2002.
- [7] Kuroda H, Kishi M J. A data assimilation technique applied to estimate parameters for the NEMURO marine ecosystem model[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 172(1): 69–85.
- [8] Ji X L, Liu G M, Gao S, et al. Parameter sensitivity study of the biogeochemical model in the China coastal seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(12): 51–60.
- [9] Losa S N, Vézina A, Wright D, et al. 3D ecosystem modelling in the North Atlantic: relative impacts of physical and biological parameterizations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 61(3/4): 230–245.
- [10] Fennel K, Losch M, Schröter J, et al. Testing a marine ecosystem model: sensitivity analysis and parameter optimization[J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 28(1/2): 45–63.
- [11] 王春晖. 海洋生态系统动力学模型伴随同化研究及应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Wang Chunhui. Numerical study and application of a marine ecosystem dynamical model with adjoint assimilation method[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] 俞光耀, 吴增茂, 张志南, 等. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟 I. 胶州湾北部水层生态动力学模型[J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(3): 421–428.
Yu Guangyao, Wu Zengmao, Zhang Zhinan, et al. A pelagic ecosystem model and simulation of the northern part of Jiaozhou Bay I. Introduction to pelagic ecosystem model[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 29(3): 421–428.
- [13] 吴增茂, 俞光耀, 张志南, 等. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟 II. 胶州湾北部水层生态动力学的模拟研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(3): 429–435.
Wu Zengmao, Yu Guangyao, Zhang Zhinan, et al. A pelagic ecosystem model and simulation of the northern part of Jiaozhou Bay II. A simulation study on the pelagic ecosystem Seasonal variations[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 29(3): 429–435.
- [14] Zhu Hai, Cui Maochang. Coupled physical-ecological modelling of the central part of Jiaozhou Bay I. Physical modelling[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2000, 18(4): 309–314.
- [15] Cui Maochang, Zhu Hai. Coupled physical-ecological modelling in the central part of Jiaozhou Bay II. Coupled with an ecological model[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19(1): 21–28.
- [16] 魏皓, 赵亮, 于志刚, 等. 渤海浮游植物生物量时空变化初析[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(2): 173–179.
Wei Hao, Zhao Liang, Yu Zhigang, et al. Variation of the phytoplankton biomass in the Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(2): 173–179.
- [17] Wei Hao, Sun Jun, Moll A, et al. Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea—observations and modelling[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3/4): 233–251.
- [18] Zhao Liang, Wei Hao. The influence of physical factors on the variation of phytoplankton and nutrients in the Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2005, 61(2): 335–342.
- [19] 夏洁, 高会旺. 南黄海东部海域浮游生态系统要素季节变化的模拟研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(4): 59–65.
Xia Jie, Gao Huiwang. Simulation on seasonal cycle vertical structure of plankton ecosystem in eastern area of South Yellow Sea[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(4): 59–65.

- [20] 刘浩,尹宝树. 渤海生态动力过程的模型研究 I. 模型描述[J]. *海洋学报*, 2006, 28(6): 21–31.
Liu Hao, Yin Baoshu. Model study on Bohai ecosystem I. Model description and primary productivity[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(6): 21–31.
- [21] 刘浩,潘伟然. 营养盐负荷对浮游植物水华影响的模型研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 345–351.
Liu Hao, Pan Weiran. Model for study on Impact of external nutrient sources on the Algalbloom[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 345–351.
- [22] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347–404.
- [23] Chai F, Dugdale R C, Peng T H, et al. One-dimensional ecosystem model of the equatorial Pacific upwelling system. Part I: model development and silicon and nitrogen cycle[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(13/14): 2713–2745.
- [24] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553–597.
- [25] Wang Jianing, Yan Weijin, Chen Nengwang, et al. Modeled long-term changes of DIN:DIP ratio in the Changjiang River in relation to Chl- α and DO concentrations in adjacent estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166: 153–160.
- [26] Zhang Jing. Nutrient elements in large Chinese estuaries[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(8): 1023–1045.
- [27] Liu S M, Hong G H, Zhang J, et al. Nutrient budgets for large Chinese estuaries[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(10): 2245–2263.
- [28] Tong Yindong, Zhao Yue, Zhen Gengchong, et al. Nutrient loads flowing into coastal waters from the main rivers of China (2006–2012)[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16678.
- [29] Zielinski O, Llinás O, Oschlies A, et al. Underwater light field and its effect on a one-dimensional ecosystem model at station ESTOC, north of the Canary Islands[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(17): 3529–3542.
- [30] Evans G T, Parslow J S. A model of annual plankton cycles[J]. *Biological Oceanography*, 1985, 3(3): 327–347.
- [31] Zhou Feng, Chai Fei, Huang Daji, et al. Investigation of hypoxia off the Changjiang Estuary using a coupled model of ROMS-CoSiNE[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 159: 237–254.
- [32] Fujii M, Chai Fei. Modeling carbon and silicon cycling in the equatorial Pacific[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(5/7): 496–520.
- [33] Fujii M, Boss E, Chai F. The value of adding optics to ecosystem models: a case study[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, 4(3): 1585–1631.
- [34] Kishi M J, Kashiwai M, Ware D M, et al. NEMURO—a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 202(1/2): 12–25.
- [35] Popova E E, Lozano C J, Srokosz M A, et al. Coupled 3D physical and biological modelling of the mesoscale variability observed in North-East Atlantic in spring 1997: biological processes[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2002, 49(10): 1741–1768.
- [36] Ji Rubao, Davis C, Chen Changsheng, et al. Influence of local and external processes on the annual nitrogen cycle and primary productivity on Georges Bank: a 3-D biological–physical modeling study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 73(1/2): 31–47.
- [37] Kawamiya M, Kishi M J, Suginothara N. An ecosystem model for the North Pacific embedded in a general circulation model: Part I: Model description and characteristics of spatial distributions of biological variables[J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 25(2): 129–157.
- [38] Lima I D, Doney S C. A three-dimensional, multi-nutrient, and size-structured ecosystem model for the North Atlantic[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): GB3019.
- [39] 官文江,何贤强,潘德炉,等. 渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算[J]. *水产学报*, 2005, 29(3): 367–372.
Guan Wenjiang, He Xianqiang, Pan Delu, et al. Estimation of ocean primary production by remote sensing in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(3): 367–372.
- [40] 朱兰部,赵保仁. 渤、黄、东海透明度的分布与变化[J]. *海洋湖沼通报*, 1991(3): 1–11.
Zhu Lanbu, Zhao Baoren. Distributions and variations of the transparency in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1991(3): 1–11.
- [41] 高会旺,杨华,张英娟,等. 渤海初级生产力的若干理化影响因子初步分析[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(4): 487–494.
Gao Huiwang, Yang Hua, Zhang Yingjuan, et al. A preliminary study on factors affecting the primary production in the Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(4): 487–494.
- [42] 洪华生. 中国区域海洋学: 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Hong Huasheng. *Regional Oceanography of China Seas: Chemical Oceanography*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.

Spatial variability of parameter sensitivity in the ecosystem simulation of the Bohai Sea and Yellow Sea

Luo Chenyi¹, Nie Hongtao¹, Zhang Haiyan¹

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As the development of marine ecosystem models, the number of biological parameters increases, which consequently causes determination of these parameters to become a bottleneck in ecosystem modeling. Intrinsic regional characteristics of the ecosystem require spatial variability of biological parameters. To explore spatial difference of key parameters and their sensitivity, a highly resolved physical-biological ecosystem model ROMS-CoSiNE of the Bohai Sea and Yellow Sea is established. Sensitivity analysis of thirteen biological parameters indicates that strong difference in sensitivity exist between the south center Yellow Sea, the Bohai Sea and its coastal areas as well. The most sensitive parameter in the Bohai Sea is the initial slope of P-I curve. The second and third are the half saturation constant for zooplankton grazing and the maximum specific growth rate of zooplankton. For the south Yellow Sea, the most sensitive parameters are the maximum specific growth rate of zooplankton, the death rate of phytoplankton and the initial slope of P-I curve. Based on sensitivity distribution and phytoplankton budget, it is concluded that the low transparency in the Bohai Sea and high transparency in the Yellow Sea are mainly responsible for spatial difference of sensitivity relative to the initial slope of P-I curve. Spatial difference of sensitivity relative to the maximum specific growth rate of zooplankton and the death rate of phytoplankton, is affected by phytoplankton amount difference between the Bohai Sea and the Yellow Sea, and related to high nonlinearity in the ecosystem.

Key words: ecosystem model; parameter sensitivity; spatial variability; Bohai Sea; Yellow Sea