

黑潮营养盐输入对东海陆架浮游生态系统影响的模型研究*

王玉衡^{1,2} 赵亮¹ 沈家葳¹

(1. 天津科技大学海洋与环境学院 天津 300457; 2. 天津市海洋资源与化学重点实验室 天津 300457)

摘要 黑潮是东海陆架主要的外源营养盐来源之一。本文建立了一个物理-生化耦合的三维生态动力学模型,通过敏感性实验分析了黑潮营养盐输入对东海浮游生态系统的影响,分区域、水层和季节对黑潮输入营养盐的贡献进行了统计分析。主要得到如下结论:(1)黑潮对东海陆架营养盐的影响主要集中在整个外陆架和中陆架的中北部,从垂向分布来看,对外陆架影响主要在 50m 以深的中下层,而对中陆架的影响在次表层(20—50m)和中下层都较为显著,黑潮对东海陆架营养盐输入的总量,冬季略高于夏季。(2)黑潮对东海浮游植物的贡献冬夏两季存在较大差异,冬季叶绿素的增量主要集中在外陆架的中北部和中陆架的中部,分布在表层(0—20m)和次表层;而夏季则主要在外陆架的中部、中陆架的中北部和内陆架的北部,除了内陆架北部以外都以次表层为主。

关键词 营养盐;浮游植物;生态动力学模型;黑潮;东海

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20170500124

东海是西北太平洋典型的边缘海,也是我国重要的渔业产地(宁修仁等, 1995)。黑潮作为东海重要的外源营养盐来源一直受到研究者的关注。对黑潮输入东海陆架营养盐总量的估算,现有的研究大部分是基于水量平衡的箱式模型,Chen 等(1999)最早给出黑潮上陆架营养盐通量的估算,并指出黑潮和台湾暖流是东海陆架主要的外源营养盐来源。这一结论得到了后续研究的支持(Fang, 2004; Zhang *et al.*, 2007)。此外也有部分研究采用实测营养盐与文献中的流量数据进行估算,如董书航等(2016)给出了春季黑潮上陆架的营养盐通量;或者采用数值模式的模拟结果进行计算,如 Zhao 等(2011)基于耦合生态模型对黑潮沿 200m 等深线跨陆架通量的模拟。虽然不同研究的计算结果有差异,但现有研究普遍显示黑潮至少贡献了东海陆架一半的外源营养盐输入。

除了对总量的估算,富含营养盐的黑潮次表层水入侵陆架的路径是另一个研究的焦点,Kondo(1985)

认为台湾东北上陆架的黑潮分支可以越过 100m 等深线抵达 30°N 左右的长江浅滩外缘,这一结论得到了 Yang 等(2011)数值模拟结果的支持。Su 等(1987, 1994)通过对水文数据和锚系站流速数据的分析,认为黑潮次表层水入侵后,可以北上至 28°—29°N,但主要沿 100—200m 等深线移动,基本不会进入中陆架和内陆架。Qiu 等(1990)利用数值模型对东海黑潮进行了模拟,结果显示台湾东北入侵的黑潮次表层水北上至 27°N 附近就返回了黑潮主干,同样基本不会越过 100m 等深线。Ichikawa 等(2002)认为黑潮进入东海陆架的分支可以越过 100m 等深线,但会在 28°N 附近回到黑潮主干或者汇入九州以西的对马暖流源地。黑潮次表层水入侵陆架的路径目前仍然存在一定争议。

箱式模型解决了黑潮对东海陆架营养盐输入总量的问题,但是无法给出输入的营养盐在陆架上是如何分布的,黑潮次表层水入侵路径的研究在一定程度上有助于了解黑潮输入营养盐的分布范围,但

* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类), XDA11020305 号; 国家重点研发计划, 2016YFC1401602, 2016YFA0601301 号; 天津市海洋资源与化学重点实验室(天津科技大学)开放基金, 201505 号。王玉衡, 讲师, E-mail: yuheng.w@tust.edu.cn

通讯作者: 赵亮, 教授, E-mail: zhaoliang@tust.edu.cn

收稿日期: 2017-05-13, 收修改稿时间: 2017-09-11

无法很好定量黑潮输入营养盐在各海区的分配。本文通过数值模式的敏感性实验, 对黑潮在不同季节输入到不同海区和水层的营养盐进行了量化的对比。浮游植物的情况则更为复杂, 除营养盐以外, 温度、光照以及海水稳定性等都会对浮游植物的生长产生影响(Sverdrup, 1953; Eppley, 1972; Mitchell *et al*, 1991)。不同季节, 输入到不同海区和水层的营养盐对浮游植物生长的贡献是不一样的, 输入限制性营养盐和非限制性营养盐的效果也有差别。黑潮对东海陆架不同海区浮游植物或者初级生产力的贡献是现有研究较为缺乏的, 也是我们试图回答的另一个问题。

1 模型配置与验证

本文采用 Zhao 等(2011)建立的生态动力学耦合模型进行敏感性实验, 包括水动力和生态动力学两个模块, 以在线耦合的方式运行。水动力部分模块——普林斯顿大学海洋模型 (Princeton Ocean Model, POM, Blumberg *et al*, 1987), 包含 3 层嵌套, 内层水平分辨率 $1/18^\circ \times 1/18^\circ$, 垂向采用 σ 坐标, 分为 21 层。生态动力学模块(Aksnes *et al*, 1995; Skogen *et al*, 1995; Zhao *et al*, 2011)包括氮(DIN)、磷(DIP)、硅(DSi)三种营养盐, 硅藻和甲藻两种浮游植物类群, 以及有机碎屑和生源硅两种有机颗粒物。模型运行 3 年以达到稳定状态, 取第 4 年的结果进行分析, 分析区域如

图 1 所示。

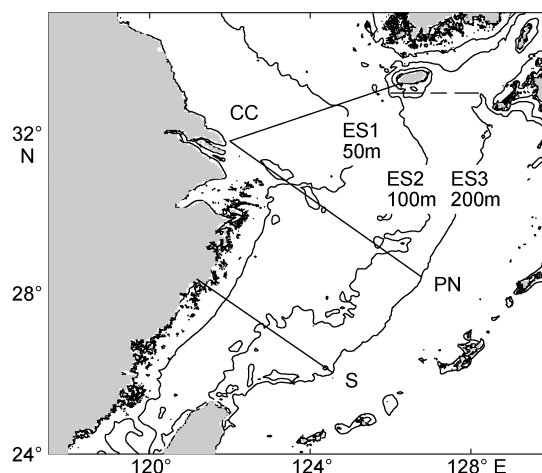


图 1 研究区域与地形

Fig.1 Study area and the topography

注: CC、PN、S 为 3 个横跨等深线的断面, ES1、ES2、ES3 分别为东海陆架沿 50、100 和 200m 等深线的断面

Zhao 等(2011)就模式 PN 断面的模拟结果与日本气象厅的调查数据进行了对比验证, 发现模式模拟的叶绿素和 DIN 断面分布都很好的抓住了观测中的主要特征。为了分析黑潮对东海陆架的影响, 本文选取 Gong 等(2003)在东海陆架的表层叶绿素观测数据对模型进行进一步的验证(图 2)。观测数据显示了冬季到初春东海陆架表层叶绿素浓度普遍较低, 夏季

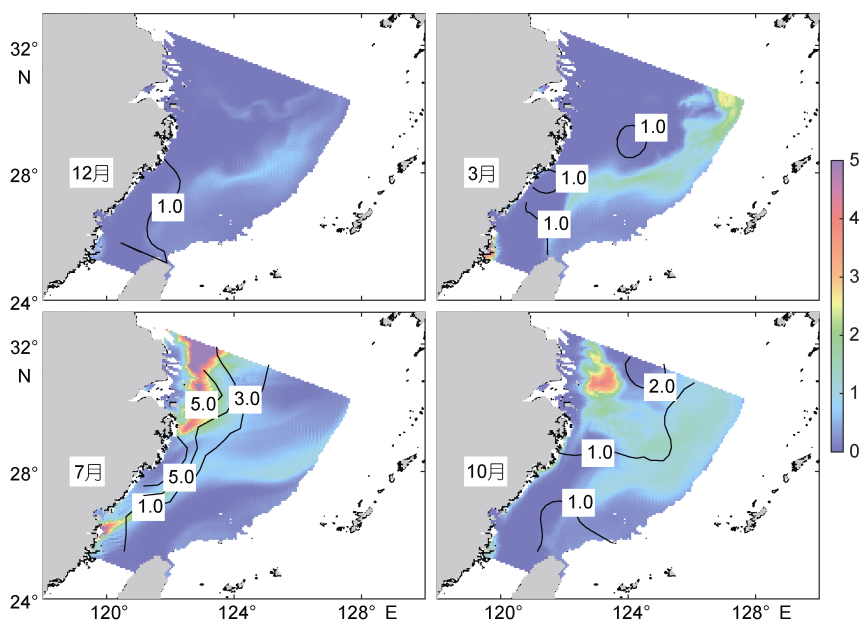


图 2 表层叶绿素分布的观测与模拟结果

Fig.2 Simulation and observation on distribution of the chlorophyll in surface layer

注: 填色代表模式模拟结果, 等值线根据 Gong 等(2003)观测结果重绘

在长江口和杭州湾以东出现高值区, 秋季整体回落的规律, 在模式结果中都得到了较好的模拟。虽然个别高值中心位置的模拟略有偏差, 但考虑到 Gong 等(2003)的观测结果是 1997—1998 年间 4 个航次的数据, 而模型强迫是多年平均的结果, 这一差异是可以理解的。这充分说明了模型在对黑潮模拟方面的可靠性。

为了研究黑潮对东海陆架生态系统的影响, 设定一组敏感性实验改变开边界黑潮输入营养盐浓度, 并通过与受控实验的结果进行对比, 来量化分析黑潮营养盐输入对东海陆架不同区域不同层次浮游生态系统的贡献。考虑到浮游生态系统是个复杂的非线性系统, 为了保证敏感性实验的合理性, 敏感性实验的条件设置参考了 Guo 等(2012)黑潮营养盐通量年际变化的研究结果。Guo 等(2012)通过分析 1987—2009 年间的现场观测数据计算了 PN 断面黑潮硝氮通量的年际变化, 得到的多年平均硝氮通量为 170.8 kmol/s , 年际变化的趋势是每年增加 0.88 kmol/s 。据此估算,

过去 20 年黑潮的硝氮通量大约增加了 10%。该研究同时指出硝氮和 DIP 浓度具有良好的线性关系 ($R=0.99$), 可以认为 DIP 的通量变化规律与硝氮类似。DSi 通量的年际变化缺乏足够的观测数据。但 Kodama 等(2014)利用黑潮 134°E 断面 2002—2013 年现场观测数据的分析显示, 在中上层 DSi 与硝氮和亚硝氮浓度之和也存在较好的线性关系。考虑到除表层水外, 黑潮 DIN 主要以硝氮的形式存在(在次表层约占 88%, 中层约占 98%, Zhang *et al*, 2007), 在敏感性实验的配置中, DIP 和 DSi 通量都采用了与 DIN 相同的设定, 即对黑潮区开边界的 DIN、DIP 和 DSi 浓度改变 10%, 来模拟黑潮输入营养盐年际变化对东中国海浮游生态系统的影响。

2 结果

图 3 显示了黑潮营养盐增加 10% 后给东海表层叶绿素及营养盐带来的增量, 黑潮的营养盐输入以

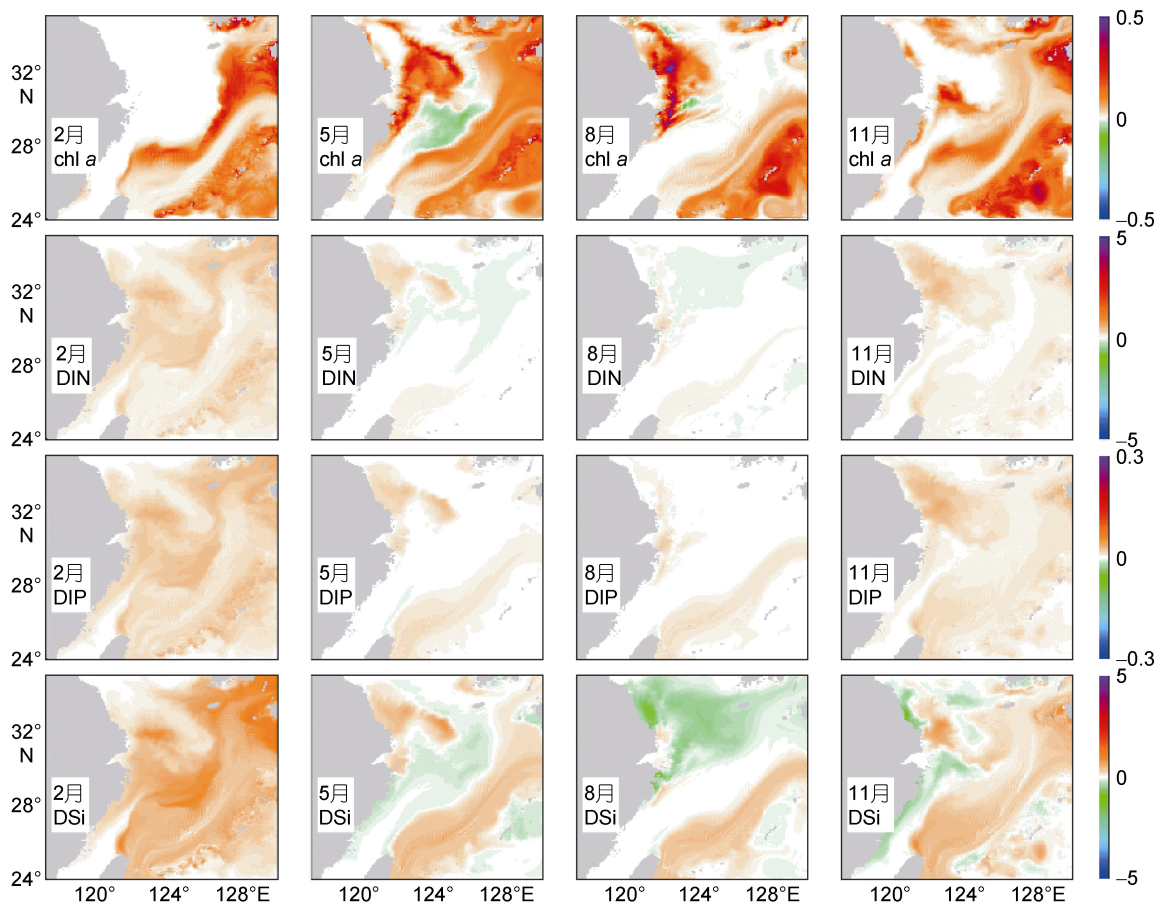


图 3 黑潮营养盐增加对东海表层叶绿素及营养盐贡献的分布

Fig.3 Contribution of nutrient increase in Kuroshio to the surface chlorophyll and nutrients in the East China Sea
填色代表敏感性实验与受控实验结果之差, 从上至下依次为叶绿素(chl a, mg/m^3)、溶解态无机氮(DIN, $\mu\text{mol/L}$)、溶解态无机磷(DIP, $\mu\text{mol/L}$)和溶解态硅酸盐(DSi, $\mu\text{mol/L}$)

高磷著称(Zhang *et al.*, 2007), 反映在实验结果中, DIP 各个季节都表现为增加, 但秋冬季增加的区域连成一片, 春夏季则分割为黑潮区和长江口-苏北两个孤立的区域。

DIN 和 DSi 分布有一定的相似性。冬季都是普遍增加; 春季黑潮区和苏北浅滩增加, 东海内陆架和中陆架减少; 夏季黑潮区增加, 长江冲淡水范围内减少; 秋季 DIN 是整体增加的, 但 DSi 在浙闽沿岸、苏北和苏岩礁附近是减少的。

叶绿素相对复杂。冬季是黑潮主轴两侧增加明显; 春季黑潮区和长江口以东增加, 东海陆架减少; 夏季跟春季类似, 但没有了陆架上减少的区域; 秋季则与冬季

类似, 但在杭州湾以东多出一个孤立的增加区域。

从大面分布中可以明显的看到, 黑潮对东海表层营养盐和叶绿素的影响非常广泛, 几乎遍布整个陆架, 但是在不同区域体现出不同的特征。单纯从表层浮游植物的增量来看, 呈现出内陆架和外陆架增量较高, 中陆架则基本不受影响的特点, 尤以春夏两季最为明显。从营养盐的分布, 也可以看到高营养盐的黑潮水对陆架的入侵, 从南到北并不均匀。为详细了解黑潮对东海陆架不同区域生态系统的影响, 本文选择了横跨陆架的 PN 断面(图 4)以及沿 50m 等深线的 ES1 断面(图 5)进行分析, 断面位置见图 1。

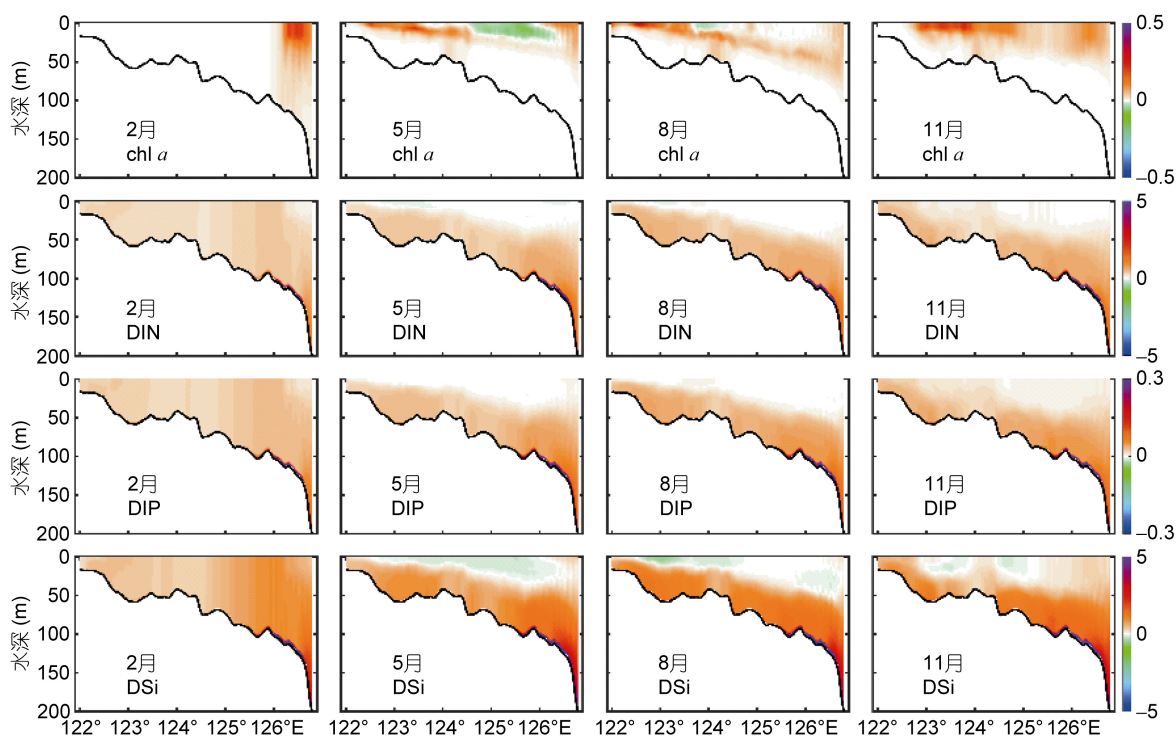


图 4 黑潮营养盐增加对 PN 断面叶绿素及营养盐贡献的分布

Fig. 4 Contribution of nutrient increase in Kuroshio to the chlorophyll and nutrients in the PN section

PN 断面 3 种营养盐变化量的分布规律较为相似, 冬季垂向混合均匀, 从外陆架到内陆架浓度逐渐降低, 底层增量大于表层; 春夏两季虽然表层只能在内陆架看到营养盐增加的海区, 但是中层和底层的黑潮水入侵仍然清晰可见; 秋季随着垂向混合的增强, 黑潮水的影响逐渐从中底层向表层扩展。

叶绿素的变化, 冬季主要在外陆架, 表层最为明显, 但在 50—100m 的水深上, 也仍然可以看到叶绿素浓度的增加; 春季主要在表层, 内陆架和外陆架升高, 中陆架则有所降低, 这可能与早春水华对表层营

养盐的消耗有关; 夏季内陆架表现在表层, 中陆架和外陆架主要体现在次表层, 这与夏季真光层加深有关; 秋季则在整个表层海区普遍出现上升的态势, 随着跃层的减弱, 中底层营养盐向上补充有利于表层叶绿素的增加。值得注意的是除了冬季以外, 其他季节叶绿素的高值区往往对应着营养盐的低值, 这种反向分布在一定程度上反映了东海陆架浮游生态系统在夏半年有下行控制的特点。冬季的叶绿素局限于外陆架体现了光限制, 夏秋季中陆架表层的降低则主要是营养盐限制的结果。

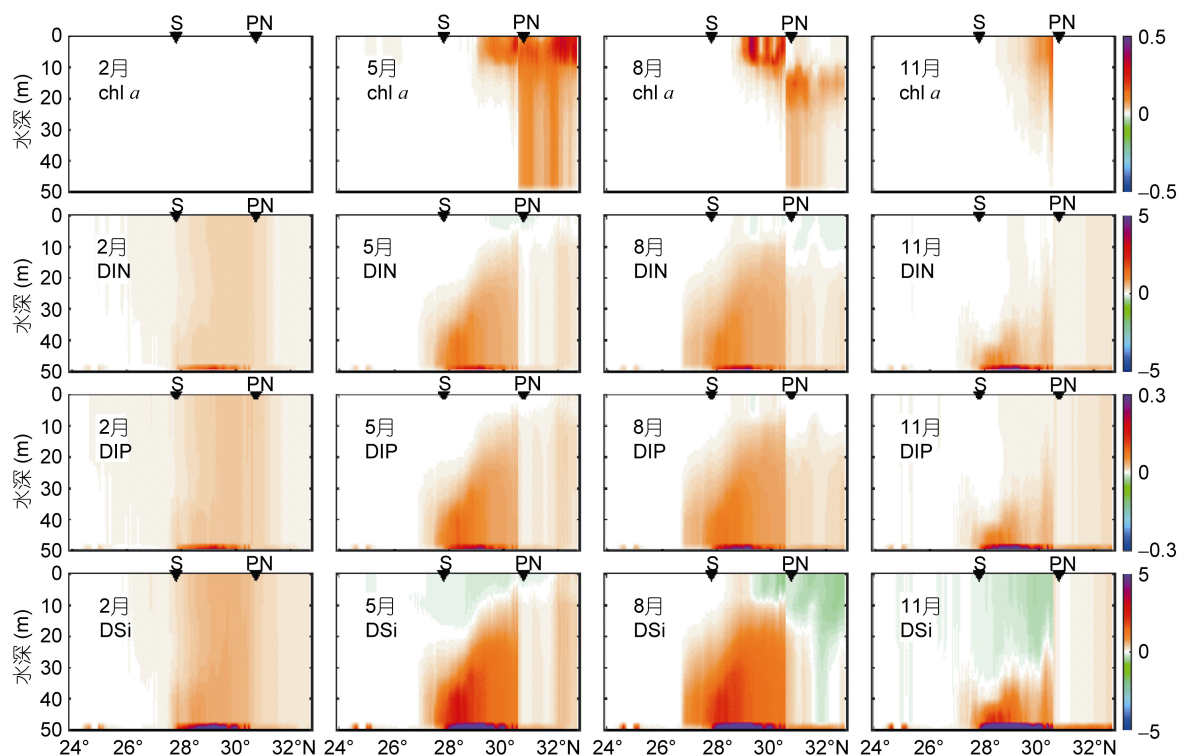


图5 黑潮营养盐增加对 ES1 断面叶绿素及营养盐贡献的分布

Fig.5 Contribution of nutrient increase in Kuroshio to the chlorophyll and nutrients in the ES1 section

注: 图中以倒三角标注与 S 断面和 PN 断面的交点

对 ES1 断面, 根据其与 PN、S 两断面的交点, 分成南中北 3 段。黑潮水对 ES1 断面的营养盐输入明显集中于中段, 而且自南向北影响从底层逐渐向表层扩展; 南段接收的营养盐较少, 叶绿素也几乎没有变化; 北段从营养盐浓度来看, 变化不如中段明显, 甚至夏季还出现了 DIN 和 DSi 的降低, 叶绿素的增加却是最为显著的。考虑到 ES1 断面的北段位于长江浅滩的外缘, 属于初级生产非常旺盛的海区, 比较合理的解释是北段浮游植物的生长消耗了大量营养盐, 从而呈现出叶绿素增加而营养盐几乎不变的分布特征, 同时长江口外区域以磷限制为主(林军等, 2011; 王奎等, 2013), 黑潮大量补充 DIP, 在刺激叶绿素增加的同时, 也造成了该区域 DIN 和 DSi 的减少。

两个断面的叶绿素和营养盐分布除了反映黑潮贡献在沿等深线和垂直等深线两个方向的差异, 也反映了不同水层受黑潮影响的不同。比如 PN 断面中段夏秋季的次表层叶绿素峰值和 ES1 断面中段营养盐自南向北逐渐向表层入侵等特征, 都需要通过对叶绿素和营养盐的变化进行分层统计来加以体现。因此, 本文分别统计了敏感性实验中不同海区不同水层中叶绿素和营养盐变化的积分值, 以便量化分

析黑潮对东海陆架浮游生态系统的贡献。

3 讨论

从图 4 和图 5 的断面分布可以看出, 黑潮对东海陆架生态系统的贡献既有沿黑潮主轴方向的变化, 又有从外陆架到内陆架的差异。因此, 以 PN 和 S 两个断面将东海陆架分为南、中、北三部分, 以 ES1(50m 等深线)和 ES2(100m 等深线)两个断面划分内陆架、中陆架和外陆架。这样, 整个东海陆架被分成 9 个海区, 具体海区划分如表 1 所示。

对不同区域的叶绿素和营养盐变化进行积分, 年平均以后的统计结果见表 1。三种营养盐的分布较为相似, 都呈现出自外陆架向内陆架递减, 从南向北递增的趋势。具体到 9 个区域, 内陆架南部几乎没有黑潮营养盐的输入, 内陆架的中北部和中陆架的南部得到的营养盐输入也较少, 营养盐的输入主要还是集中在中陆架的中北部和外陆架。这一分布趋势与 Ichikawa 等(2002)根据盐度调查给出的台湾以北黑潮分支的路径较为相似, Yang 等(2011)利用 ROMS 模型进行的质点追踪实验也得到了类似的结果, 即台湾东北部黑潮次表层水上陆架后, 大致沿 122°E 向北扩

表 1 年平均的区域积分叶绿素及营养盐变化
Tab.1 The annual mean of region-integrated increment of chlorophyll and nutrients

要素		内陆架	中陆架	外陆架	小计
叶绿素(10^6g)	东海北部	17.43	28.38	52.90	98.71
	东海中部	5.64	41.14	63.68	110.46
	东海南部	0.84	8.80	16.75	26.39
	小计	23.91	78.32	133.33	235.56
DIN(10^{12}mol)	东海北部	0.14	0.45	0.95	1.53
	东海中部	0.07	0.68	0.62	1.37
	东海南部	0.01	0.25	0.42	0.67
	小计	0.21	1.38	1.98	3.58
DIP(10^9mol)	东海北部	10.58	34.33	70.49	115.39
	东海中部	4.88	51.15	49.11	105.14
	东海南部	0.87	18.27	33.02	52.17
	小计	16.33	103.75	152.62	272.70
DSi(10^{12}mol)	东海北部	0.17	0.88	2.18	3.22
	东海中部	0.11	1.53	1.54	3.18
	东海南部	0.00	0.57	1.04	1.61
	小计	0.28	2.98	4.76	8.01

散, 在 26°N 附近越过 100m 等深线, 在 29°N 附近达到 60m 等深线, 之后沿 60m 等深线抵达长江口和杭州湾以东海区, 其流经海区与上述敏感性实验中营养盐增加较为明显的海区基本是一致的。

叶绿素的分布则与营养盐存在一定差异, 表现在内陆架北部和大陆架中部两个海区的叶绿素增量在整个东海陆架中的占比明显高于营养盐的比例(两个海区的叶绿素增量分别占整个陆架的 7.4%和 27.0%, 营养盐以 DIP 为例则只占 3.8%和 18%); 与之对应的, 外陆架南部则是营养盐输入较多但叶绿素增量偏低的典型(叶绿素和 DIP 占比分别为 7.1%和 12.1%)。为了分析这一差距的来源, 本文对敏感性实验的结果分冬季(图 6)和夏季(图 7)进行了分层积分。

3 种营养盐的垂向分布和季节变化表现有一致特征。就垂向分布而言, 整体上以 50m 以深的中下层占据优势, 夏季尤为明显, 以 DIP 为例, 2 月和 8 月中下层的增量分别占到整个海区的 48%和 68%; 分海区来看, 外陆架的 3 个海区中下层的优势都非常显著, 而中陆架 20—50m 的次表层和中下层所占的比例较为接近, 内陆架营养盐增量比较小, 由于水深的原因, 没有 50m 以深的水层, 营养盐集中在表层和次表层, 冬季表层占优, 夏季二者相当。就季节变化而言, 营养盐输入的总量和区域分布格局, 2 月和 8 月的统计结果都没有明显差异, 仍以 DIP 为例, 2 月整个东海陆架的增量为 $294\times 10^9\text{mol}$, 8 月份略低为 $261\times 10^9\text{mol}$,

但在层次分配上, 有一定的区别, 8 月营养盐输入更加集中于底层。

叶绿素的分布则与营养盐体现出截然不同的特征。在垂向上, 绝大部分海区的叶绿素增量集中在表层和次表层。在季节变化上, 虽然叶绿素增加的总量变化不大(2 月为 $282\times 10^6\text{g}$, 8 月为 $239\times 10^6\text{g}$), 但是在

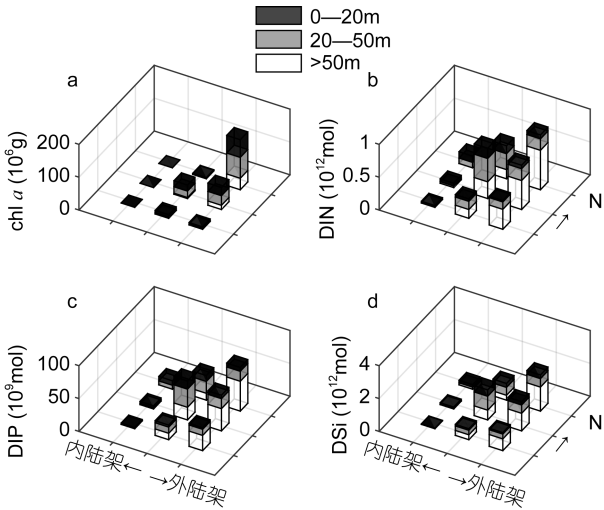


图 6 2 月份各海区分层叶绿素(a)及营养盐(b: DIN; c: DIP; d: DSi)变化

Fig.6 Integrated increment of chlorophyll (a) and nutrients(b: DIN; c: DIP; d: DSi) in February
注: 黑、灰、白三种颜色分别代表表层(0—20m)、次表层(20—50m)和中下层(>50m), 每张图的 9 根柱子大体按地理位置排布, x 轴为自内陆架到外陆架方向, y 轴为沿黑潮主干向北的方向

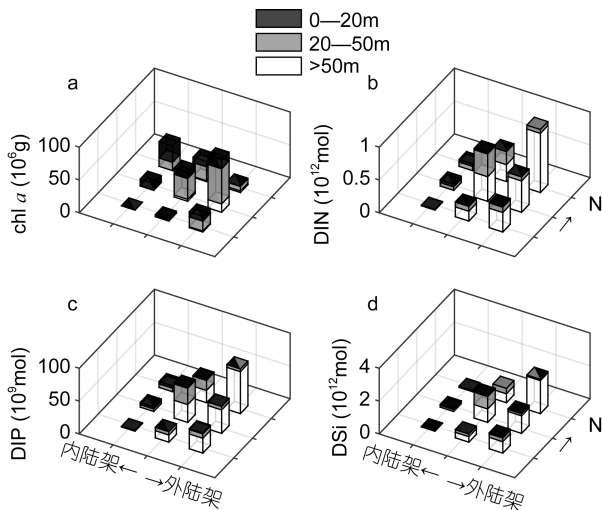


图7 8月份各海区分层叶绿素(a)及营养盐(b: DIN; c: DIP; d: DSi)变化

Fig.7 Integrated increment of chlorophyll (a) and nutrients (b: DIN; c: DIP; d: DSi) in August.

区域和层次上存在明显的差异。2月的叶绿素增量主要集中在外陆架的中北部和中陆架的中部,表层和次表层几乎各半。而8月份则主要在外陆架的中部、中陆架的中北部和内陆架的北部,除了内陆架北部以外都以次表层为主。从前面的大面和断面分布可以看到夏季的叶绿素和营养盐高值是反向分布的,所以如果一个海区的叶绿素增量集中在夏季,对应的营养盐增量会显得较低。从图6和图7可以看出内陆架北部和外陆架中部夏季叶绿素增量明显高于冬季,这在一定程度上解释了为什么这两个海区的叶绿素增量占比明显高于营养盐。

目前利用观测对陆架区营养盐收支的估算主要有Chen等(1999)和Zhang等(2007)对三种营养盐在陆架区整体收支分季节的估算,以及Fang(2004)对磷酸盐的估算,其中Chen等(1999)的结果还提供了黑潮分层的收支。此外Zhao等(2011)采用与本文相同的三维水动力模型,估算了黑潮对东海陆架的营养盐输入。

整体来讲,对黑潮输入的营养盐,多数文献的估算结果差别不大,仍以DIP为例,Chen等(1999),Zhang等(2007),Zhao等(2011)和Fang(2004)四组研究估算的年均通量分别为0.34、0.652、0.7和0.82 kmol/s,只有Chen的结果较其他研究偏低。对比Chen等(1999)和Zhang等(2007)冬夏两季的收支,可以看到冬季Chen等(1999)的估算值(0.37 kmol/s)明显低于Zhang等(2007)的结果(0.92 kmol/s),而夏季则差别不大(二

者分别为0.32和0.384 kmol/s)。这主要是由于Chen等(1999)对黑潮的输入采用分层估算,而Zhang等(2007)采用整层估算,二者选用的黑潮入侵陆架的水量数据冬季都高于夏季,但Chen等(1999)的数据中冬夏季黑潮差别主要在表层水入侵,次表层和中层变化不大,而表层水营养盐浓度相对较低,所以冬季黑潮入侵流量虽大,营养盐输入通量的变化却没有那么明显。

对黑潮的估算,Chen等(1999)的方法显然更加合理,本文敏感性实验中的模拟结果显示黑潮入侵带来的营养盐并不存在明显的季节变化,以DIP为例,黑潮输入营养盐浓度增加10%的情况下,陆架区增加的DIP在8月份为 261×10^9 mol,2月份为 294×10^9 mol,这一结果与Chen等(1999)的估算中黑潮输入营养盐的季节变化规律是一致的。但是根据Zhao等(2011)的估算,模式中黑潮输入陆架的营养盐总量却与Zhang等(2007)的结果更接近。这一差别显示了目前对黑潮营养盐贡献的估算仍然有待改进,黑潮对陆架的入侵并不是单向的从黑潮主干进入东海陆架,而是在不同的区域,既有黑潮水入侵陆架,又有入侵后的黑潮水返回黑潮主干,根据Zhao等(2011)对模型结果的计算,黑潮在台湾东北大约有5.8 Sv入侵陆架,在九州西南有0.5 Sv入侵,而其他海区则有约4.7 Sv的入侵水返回了黑潮主干。在以往箱式模型的估算中(如Chen *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2007),黑潮的营养盐通量是用黑潮水入侵陆架的净通量乘以黑潮营养盐浓度来进行估算的,这其中隐含的假设是黑潮水入侵陆架时和从陆架返回黑潮主干时,营养盐浓度是相等的,这一假设显然有待商榷。Zhao等(2011)的计算方法则是用黑潮入侵陆架的水量乘以黑潮营养盐浓度再减去返回黑潮主干的水量乘以陆架水的营养盐浓度,考虑到黑潮水整体营养盐浓度是高于陆架水的,这一算法得到的黑潮营养盐通量要高于箱式模型。

4 结论

本文利用三维物理-生化耦合模型,通过设计敏感性实验,分析了黑潮营养盐输入增加后,东海营养盐和叶绿素的响应。并分区域、季节和水层进行定量统计,得到的主要结论如下:

黑潮输入营养盐增加10%的情况下,东海陆架区年平均的营养盐增量呈现出自外陆架向内陆架递减,从南向北递增的趋势。其对区域积分叶绿素的贡

献, 以外陆架中部($63.68 \times 10^6 \text{g}$)、外陆架北部($52.90 \times 10^6 \text{g}$)和中陆架中部($41.14 \times 10^6 \text{g}$)最为显著。

冬季, 营养盐的输入主要集中在中陆架和外陆架, 外陆架整体上以 50m 以深的中下层占据优势, 而中陆架 20—50m 的次表层和中下层所占的比例较为接近。叶绿素增量主要分布在外陆架的中北部和中陆架的中部, 表层(0—20m)和次表层几乎各半。

夏季, 营养盐增量的分布整体与冬季相似, 但在垂向上, 中下层的优势更明显。叶绿素则主要在外陆架的中部、中陆架的中北部和内陆架的北部, 除了内陆架北部以外都以次表层为主。

参 考 文 献

- 王 奎, 陈建芳, 金海燕等, 2013. 长江口及邻近海区营养盐结构与限制. 海洋学报, 35(3): 128—136
- 宁修仁, 刘子琳, 史君贤, 1995. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估. 海洋学报, 17(3): 72—84
- 林 军, 朱建荣, 张 经等, 2011. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系. 水产学报, 35(1): 74—87
- 董书航, 刘素美, 任景玲等, 2016. 春季东海营养盐跨陆架输运通量的初步估算. 海洋环境科学, 35(3): 385—391
- Aksnes D L, Ulvestad K B, Baliño B M *et al*, 1995. Ecological modelling in coastal waters: Towards predictive physical-chemical-biological simulation models. *Ophelia*, 41(1): 5—36
- Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N S ed. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 1—16
- Chen C T A, Wang S L, 1999. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9): 20675—20686
- Eppey R W, 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, 70(4): 1063—1085
- Fang T H, 2004. Phosphorus speciation and budget of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 24(12): 1285—1299
- Gong G C, Wen Y H, Wang B W *et al*, 2003. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6—7): 1219—1236
- Guo X Y, Zhu X H, Wu Q S *et al*, 2012. The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1): C01026
- Ichikawa H, Beardsley R C, 2002. The current system in the Yellow and East China Seas. *Journal of Oceanography*, 58(1): 77—92
- Kodama T, Shimizu Y, Ichikawa T *et al*, 2014. Seasonal and spatial contrast in the surface layer nutrient content around the Kuroshio along 138E, observed between 2002 and 2013. *Journal of Oceanography*, 70(6): 489—503
- Kondo M, 1985. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea, I: characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near the bottom. *Bulletin of the Seikai Regional Fisheries Research Laboratory*, 62: 19—66
- Mitchell B G, Brody E A, Holm-Hansen O *et al*, 1991. Light limitation of phytoplankton biomass and macronutrient utilization in the Southern Ocean. *Limnology and Oceanography*, 36(8): 1662—1677
- Qiu B, Imasato N, 1990. A numerical study on the formation of the Kuroshio counter current and the kuroshio branch current in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 10(2): 165—184
- Skogen M D, Svendsen E, Berntsen J *et al*, 1995. Modelling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional physical-chemical-biological ocean model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41(5): 545—565
- Su J L, Pan Y Q, 1987. On the shelf circulation north of taiwan. *Acta Oceanologica Sinica*, 6(S1): 1—20
- Su J L, Pan Y Q, Liang X S, 1994. Kuroshio intrusion and Taiwan Warm Current. In: Zhou D, Liang Y B, Zeng C K eds. *Oceanology of China Seas*. Dordrecht, Holland: Kluwer Academic Publishers, 59—70
- Sverdrup H U, 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *ICES Journal Marine Science*, 18(3): 287—295
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2011. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5): C05015
- Zhang J, Liu S M, Ren J L *et al*, 2007. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea shelf. *Progress in Oceanography*, 74(4): 449—478
- Zhao L, Guo X, 2011. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: A model study. *Ocean Science*, 7(1): 27—43

INFLUENCE OF KUROSHIO NUTRIENTS INPUT TO THE EAST CHINA SEA SHELF ECOSYSTEM—A MODEL STUDY

WANG Yu-Heng^{1,2}, ZHAO Liang¹, SHEN Jia-Wei¹

(1. *College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;*

2. *Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China*)

Abstract Kuroshio is an important extrinsic nutrient source of the East China Sea Shelf (ECSS). We employed a three-dimensional coupled biophysical model to study the impact of Kuroshio-sourced nutrients to the ECSS ecosystem, and conducted a sensitivity experiment in which the contributions of nutrients from Kuroshio were studied statistically to different regions, layers, and seasons. The results show that the impact of the Kuroshio on nutrient distribution occurred mainly in the outer and central-to-northern parts of the middle ECSS. In the outer part, most nutrients from the Kuroshio affected deep layers (>50m), while in the middle part, both deep and subsurface layers (20—50m) were affected. The nutrient input from Kuroshio to the ECSS in winter was about 10% greater than that in summer. The influence of Kuroshio on chlorophyll showed an obvious difference in winter and summer. In winter, most chlorophyll increase was observed in the central-to-northern parts of the middle ECSS, and vertically in surface (0—20m) and subsurface layers. In summer, chlorophyll showed an obvious change in different parts of the ECSS. Therefore, in ECSS region, subsurface is the key region under the influence of Kuroshio.

Key words nutrient; phytoplankton; biophysical model; Kuroshio; East China Sea