

黑潮与邻近东海生源要素的交换及其生态环境效应*

宋金明^{1, 2, 3} 袁华茂^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 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 青岛 266237)

摘要 黑潮与东海生源要素的交换对东海的生态环境有重大影响, 交换主要是经台湾东北部海域输送至东海陆架和通过日本九州西南海域由东海陆架向外海的黑潮输出两个通道。中国科学院海洋先导专项对黑潮与邻近东海生源要素的交换特征进行了系统的调查和研究, 获得了一些新的认识: (1) 在台湾东北部区域, 碳主要以表层水-次表层水为载体输入, 秋季的输入量高于夏季; 黑潮溶解态营养盐的输入占据绝对主导地位, 且以黑潮次表层热带水-中层水的输入为主, 输入通量春季高于夏、秋季, 可为东海春季水华提供一定的物质基础, 但输入到东海的黑潮水其氮磷比与 Redfield 比值 (16:1) 接近, 这些“正常水”——黑潮的输入显然对调和东海异常高的氮磷比有重要的作用, 从而对东海的生态环境起到“稳定和缓冲”作用。所以, 黑潮水对东海的输入不仅维持补充了东海生态系统运转所需的生源要素, 更为重要的是缓冲了受人为影响强烈的东海海水的高氮磷比, 使东海本已失常的营养盐结构向合适的氮磷比方向转变。因此, 黑潮与东海生源要素的输入在一定程度上起着稳定和缓和东海生态环境的作用。(2) 通过构建的海水 Ba-盐度新指标体系, 定量细致刻画了黑潮对东海生源物质在台湾东北部区域的输入范围和程度, 黑潮次表层水从台湾东北陆架坡折处沿底部向北偏西方向入侵东海, 其近岸分支可以入侵到浙江近岸, 其黑潮次表层水占比仍可达到 65% 左右。垂直方向上, 陆架外侧站位受黑潮次表层水的影响范围更大, 黑潮水占 50% 比例位置可延伸至外侧 TW0-1 站位 (122.59°E, 25.49°N) 表层, 而内侧靠近大陆的站位则只限于陆架中部位底层。

关键词 生源要素; 交换通量; 稳定和缓冲作用; 黑潮水; 东海陆架

中图分类号 P731.27; P734 **doi:** 10.11693/hyhz20170900234

海水中的碳、氮、磷、硅等生源要素是维持海洋生态系统和环境健康的核心组分, 其收支状况、水平特征及循环过程在海洋生态系统运转中起着十分关键的作用 (Song, 2010)。适量的生源要素可维持海洋生态系统的平衡, 海洋生态系统与环境健康有序, 生物群落发育正常。而生源要素的匮乏与过剩, 导致水体营养缺乏或富营养化, 使海洋生态系统失衡, 生物群落异常发展, 发生海洋生态灾害, 经济物种退化衰竭 (宋金明, 2004; Qu *et al.*, 2015)。所以海水生源要素的供给及循环过程研究具有重要的意义。

长江等河流输入以及黑潮的输送是东海生源要素最重要的收支项, 以往的研究对长江等河流的输送居多 (宋金明等, 2008), 对黑潮对东海生源要素的输送及交换研究较少且不系统, 对输入的生源要素形态、通量变化很少涉及。很显然, 探明黑潮与东海生源要素的交换特征, 从而在深层次上揭示东海生态系统与环境变化规律就显得异常关键。2013 年启动的中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) “热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”聚焦这一重大科学问题进行了系统的外海调查和研究, 为探明

* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类), XDA11020102 号; 青岛国家海洋实验室深海预研专项, 2016ASKJ14 号; “鳌山人才”计划项目, 2015ASTP-OS13 号。宋金明, 博士生导师, 研究员, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-09-12, 收修改稿日期: 2017-09-28

黑潮与东海生源要素的交换特征提供了重大机遇。本文在总结归纳黑潮的基本特征以及与东海水体和生源要素交换的途径与通道的基础上,重点针对黑潮与东海生源要素的交换的途径与通道有哪些、交换的通量有多大、交换对东海生态环境的影响程度如何等科学问题,阐述了先导专项在黑潮与东海生源要素交换研究上的新发现和新结果。

1 黑潮水的特性及其与东海的水交换

黑潮是北太平洋的西边界流,犹如一条大体上自南向北的海中“巨河”,进入东海后分出若干支流。黑潮起源于菲律宾以东海域北赤道流的北向分支,主流越吕宋海峡北上,经台湾岛东部海域后,最大的一个分支沿东海陆架边缘流向东北,至九州岛西南约 128°E, 29°N 附近折向东,经吐噶喇海峡离开东海进入日本东南海域,并于 141°E, 35°N 附近离开日本海岸,成为黑潮延伸体汇入北太平洋暖流。黑潮水具有高温高盐特征,其流速/流量大、流径窄,延伸的水体深度大。

黑潮水可分为表层水、次表层热带水、中层水、深层水四层(表 1)。在约 28°N 以南,台湾东北角附近,因受陆架阻隔,部分黑潮水流携带生源要素进入东海陆架海域,使东海陆架水与西北太平洋海水得以

相互交换,并对东海陆架区的碳格局产生影响。1) 黑潮表层水主要来源为北赤道流,是太平洋西部表层水的一部分,在 4 层水体中有着最高的温度(23—29°C)和 pH,以及仅次于次表层热带水的盐度(约 34.5)。其温度和盐度随纬度增加而下降,比碱度低,缺乏营养盐。2) 黑潮次表层热带水核心多位于 100—300m 之间,来源于 20°—25°N、106°—165°W 间与 18°—20°S、120°—150°W 间的热带水域,以盐度最高为特征(约 34.9),水温较高(约 20°C)。因受陆架水混合影响,其温度、盐度向西侧、北侧均有所降低。3) 黑潮中层水约以 400—800m 为核心,北部略深于南部,夏季最浅,水体温度较低(7—8°C),盐度最小(约 34.3),有较高的营养盐含量和碱度,但有较低的 pH 和溶解氧。在 122°E 附近流经南海后,黑潮中层水西侧主要来自南海中层水,东侧来自于西菲律宾海中层水;一部分北太平洋中层水通过台湾—与那国岛以及冲绳岛—宫古岛两条通道加入黑潮,构成黑潮中层水的一个来源;另有一部分南太平洋西部中层水越过赤道,成为黑潮中层水又一来源。主温跃层多出现于热带水与中层水之间。4) 黑潮深层水位于 1000m 以下,均匀度高,温度最低(约 3.7°C),盐度略高于中层水(约 34.44),黑潮深层水在苏澳海脊以南盐度略高,可达 34.53,而在苏澳海脊以北温度略高,可达 4.2°C。

表 1 东海陆架表层水与黑潮不同水层的水文特征比较

Tab.1 Comparison in hydrographic characteristics between the shelf surface waters in the East China Sea and in different layer of Kuroshio

参数	东海陆架 表层水	黑潮水			
		表层水(0—75m)	次表层热带水(100—300m)	中层水(400—800m)	深层水(1000—2000m)
温度(°C)	8.60—25.30	23.00—29.00	16.10—23.40	6.60—8.00	3.70
盐度	30.50—33.50	34.00—35.00	34.52—34.90	34.25—34.30	34.44
流量(Sv)	-3.46 — -0.22	0.22—1.05	0.35—1.28	0.12—0.13	—

注: 流量部分以“-”表示由东海陆架向外输出; 表中数据系根据卢汐等汇总结果整理的(卢汐等, 2015)

东海黑潮一般是指中国台湾东北端起至吐噶喇海峡的一段黑潮。东海黑潮的主轴沿大陆架外缘流动,位置基本稳定,流动范围大体在 100—2000m 等深线之内,流幅约为 100km,年平均流量约为 25Sv。东海范围内的黑潮主体存在明显的季节变化,夏季的流幅和流速最大,秋季最小。分段来看,中国台湾东北海域段黑潮的流幅最小(约 74km),往北流幅又逐渐增大(约 77km);中国台湾东北侧表层流速相对较小(102cm/s),至 PN 断面(从东海西北角长江口至东南角琉球群岛的西北东南走向断面,与纬线大致成 40°夹角)附近,流速增加(110cm/s)。吐噶喇海峡处的北段黑

潮,最大流速的多年平均值达 129cm/s,为整个东海黑潮流速最大处。

东海黑潮在不同季节入侵东海陆架抵达的范围不同,在冬季黑潮前沿扩展到大陆架,而在夏季和秋季则退回到陆架边缘。黑潮水和陆架水相互作用在不同季节的空间变化很大,二者之间界面出现不同程度地凸向陆架或凹向黑潮的现象,春、秋季黑潮水和陆架水相互作用比冬、夏季空间变化剧烈;100m 以浅的黑潮水在中国台湾东北海域和日本九州西南海域侵入陆架较远,而 100—200m 之间的黑潮水在东海黑潮中部(125°—126.5°E)入陆架较远。

黑潮水对东海陆架的海水输入量是巨大的, 并且存在季节上的变化。夏季黑潮、台湾海峡水、河流、降雨等向东海陆架的水输入通量共为 3.35Sv, 其中黑潮水入侵占到了 26% 的比例, 为 0.89Sv; 而到冬季, 黑潮的入侵水量则增加到了 1.81Sv, 所占比例提高至 59%。Isobe(2008)指出在整个东海陆架东边缘, 黑潮向陆架入侵的流量约为 1.4Sv。IS 断面分界面(陆架坡折处纵剖面)和 PN 断面分界面(200m 等深线处纵剖面)的海水交换总量的年平均夏季最大, 春、秋季次之, 冬季最小, 黑潮水经上述两分界面向陆架区输运量年平均值为 0.58Sv。

2 黑潮与东海生源要素的交换

2.1 黑潮与东海水交换的途径与通道有哪些?

经水体的带入与移出是黑潮与东海颗粒态、溶解态生源要素交换的主要途径。黑潮对中国近海的输入主要通过三个关键区域——吕宋海峡、中国台湾东北部海域及日本九州西南海域, 季风、水量等因素导致的黑潮季节性流轴摆动、表层水向东海陆架的扩展、次表层水 and 中层水的涌升是黑潮与东海物质交换的关键因素。黑潮水会从吕宋海峡终年进入南海。冬季黑潮水通过吕宋海峡的上层流入南海, 通过下层流出南海, 而在夏季则相反。流入、流出南海的纬向流位于海峡的中南部位置, 黑潮经 120°E 向西进入南海的体积输送量为 11×10^6 — 12×10^6 Sv, 对黑潮水经吕宋海峡与南海水交换不在本文讨论之列, 以下仅阐述黑潮水与东海的交换。

中国台湾东北部海域与日本九州西南海域是黑潮与东海生源要素交换的主要两个通道。1) 中国台湾东北部陆架边缘海域的冷涡(上升流)是黑潮和东海陆架溶解态和颗粒态物质交换的一个重要通道, 这些冷涡具有低温、高盐、高密度、低氧、高磷、高硅、高氮等特性。在此处, 黑潮次表层水常年入侵东海陆架, 这不仅改变了东海陆架海域的温盐场和流场分布, 而且向东海输送了大量的磷酸盐等营养物质, 支撑该海域的初级生产。季节变化上, 在中国台湾东北部海域, 黑潮次表层水入侵在春末夏初开始加强, 夏季最强, 秋季开始减弱, 冬季最弱。该海域海水的涌升可显著影响海洋化学要素的分布, 各化学要素等值线从 200m 深度起向上隆起可达 30m 深度, 中国台湾东北部海域在一年四季中均存在营养盐的高值中心。2) 在日本九州西南海域, 黑潮呈反气旋状流动, 一部分海水入侵陆架, 另一部分呈反气旋状回到黑潮

主轴。在此处, 黑潮水入侵陆架, 并成为对马暖流的一部分北上影响黄海(卢汐等, 2015)。与中国台湾东北部海域类似, 受黑潮水入侵的影响, 九州西南海域一年四季中均存在营养盐的高值中心。

2.2 黑潮与东海生源要素的交换通量有多大?

2.2.1 黑潮对东海溶解无机营养盐的输入 东海黑潮主体各层生源要素氮、磷、硅含量差异较大, 且存在季节上的变化。夏季时, 在 126.5°E 以东黑潮主流干区域, 氮、磷、硅浓度深层水>中层水>次表层水>表层水, 深层水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 37.70 $\mu\text{mol/L}$ 以上, 中层水为 15.30—37.70 $\mu\text{mol/L}$, 次表层水为 0.08—15.30 $\mu\text{mol/L}$, 而表层水则至 0.14 $\mu\text{mol/L}$ 以下(Chen *et al.*, 1995a)。到冬季, 黑潮主流干区域的表层水和次表层水因受强东北季风影响而混为一体, 营养盐含量依然很低; 300m 以深黑潮水营养盐分布与夏季的分布基本一致。东海黑潮区全年 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的平均浓度最大值自表层至深层逐步增高, 其中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度增大较快, 500m 层处的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度是表层的 17.2 倍, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的增大相对较慢, 500m 层处浓度分别为表层的 7.45 倍和 6.9 倍。

黑潮对东海生源要素氮、磷、硅分布的影响随季节而不同, 并且由于东海同时受到长江冲淡水、台湾暖流及季风等多方面的影响, 其氮、磷、硅含量在平面分布、垂直分布及季节分布上均存在显著差异。夏季时, 黑潮主轴远离陆架, 黑潮表层水主要分布在冲绳海槽海域, 尚未入侵东海陆架区(Song, 2010)。但富含营养盐的黑潮次表层水 and 中层水却大举入侵东海陆架, 最远处甚至能到达 50m 等深线, 这直接造成了东海陆架区底层水的高营养盐浓度。东海陆架表层水受到势力强劲、富含营养盐的长江冲淡水的影响, 表层海水生源要素氮、磷、硅向外海浓度降低趋势明显。秋季和冬季, 受势力强劲的东北季风的影响, 黑潮主轴向西偏, 低营养盐含量的黑潮表层水($\text{NO}_3\text{-N} < 2\mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} < 0.2\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si} < 5\mu\text{mol/L}$)向西入侵的程度加大, 可入侵至 100m 等深线甚至以西的位置(Chen, 2009)。同时, 伴随着长江径流量的减小和东北季风的增强, 东海陆架垂向混合加强, 表层海水氮、磷、硅的含量要高于夏季, DIN 含量为 2—6 $\mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量为 0.2—0.4 $\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量为 5—10 $\mu\text{mol/L}$ (Wong *et al.*, 2000)。春季时, 黑潮对东海陆架生源要素的影响介于夏季和秋冬之间, 表层水入侵减弱, 而次表层水 and 中层水的入侵开始加强。东海海水营养盐的分布与秋季时相似, 但陆架区

(<200m)表层的营养盐含量低于秋季,如表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均含量仅为春季的 1/3 左右;外陆架区(>200m)表层营养盐含量与秋季时接近。

黑潮主流径向北携带了大量的氮、磷、硅等生源要素,黑潮主体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 北向输送通量分别达 170.8、12.5 kmol/s,是向东海陆架 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 输送量的 18 倍(Guo *et al.*, 2012)。然而对东海陆架来说,黑潮输入东海的量比河流、大气及海底沉积物等的输入量均高,如对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 而言是长江输入的近 20 倍, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的输入量是河流输入的 2—3 倍(Zhang *et al.*, 2007)。从某一断面或某一区域的研究结果来看,黑潮向东海 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的输入通量分别在 10、1 和 20 kmol/s 的数量级上(表 2)。

表 2 黑潮对东海生源要素氮磷硅的输入通量(kmol/s)
Tab.2 Nutrient influxes from the Kuroshio to the ECS

研究区域	黑潮输入东海通量			参考文献
	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	
东海陆架	12.6	0.46	23.7	Zhang <i>et al.</i> , 2007
PN 断面	9.4	0.7	18.2	Zhao <i>et al.</i> , 2011
台湾东北部海域	7.1	0.46	10.1	Liu <i>et al.</i> , 2000
东海陆架	10.2	0.97	18.3	本研究

注:表中数据系根据刘伟等汇总结果整理的(刘伟等, 2016)

从季节变化上来看,黑潮对东海陆架生源要素氮磷硅的输入通量具有季节差异,但不同研究得出的季节差异结果不同,其差异主要来自于不同季节黑潮输入水量的不同。Zhang 等(2007)的研究结果显示,黑潮冬季的输入通量要高于夏季,其中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的冬季输入量是夏季的 3.82 倍, $\text{PO}_4\text{-P}$ 是 2.42 倍, $\text{NO}_3\text{-N}$ 是 2.32 倍, $\text{NH}_4\text{-N}$ 是 2.06 倍。Chen(1996)的估算结果表明,黑潮夏季的输入通量显著高于冬季(10 倍以上),但 Chen(1999)的结果显示,黑潮冬季的输入通量略高于夏季。

从黑潮各水层对东海陆架生源要素氮、磷、硅的输入通量来看,表层水最少,次表层水次之,中层水生源要素输入通量最大(图 1a)。现有的研究表明,黑潮中层水对东海陆架磷的输入可占到总输入量的 43%,是东海陆架区磷的最主要来源项(Fang, 2004),黑潮中层水向东海陆架 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 输入通量占总输入量的 51.3%(巩瑶等, 2012)。而本次研究同样发现黑潮中层水对东海陆架营养盐输入通量的重要贡献(图 1b),这些都说明黑潮各水层中,中层水对东海生源要素氮、磷、硅的输入通量所占比例最大,中层水是黑潮输入东海生源要素氮、磷、硅的主要载体(宋金明等, 2017)。

2.2.2 黑潮与东海碳的交换 黑潮台湾东北海域内各水层溶解有机碳(DOC)含量为:黑潮表层水 118—136 $\mu\text{mol/L}$,次表层热带水 80—110 $\mu\text{mol/L}$,中层水 74—80 $\mu\text{mol/L}$,深层水 65—74 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮与东海近岸水在东海陆架的混合区域 DOC 浓度为 72—85 $\mu\text{mol/L}$,在东海陆架上升流区由于受黑潮次表层、中层贫 DOC 水流输入影响,DOC 浓度为 60—70 $\mu\text{mol/L}$ 。台湾东北黑潮区各水层颗粒有机碳(POC)含量为:黑潮表层水 2—4 $\mu\text{mol/L}$,次表层热带水 1.2—2 $\mu\text{mol/L}$,中层水 0.8—1.2 $\mu\text{mol/L}$,深层水 0.5—0.8 $\mu\text{mol/L}$ 。台湾以东黑潮流域,不同水层溶解无机碳(DIC)含量为:黑潮表层水 1880—2040 $\mu\text{mol/kg}$,次表层热带水 2000—2120 $\mu\text{mol/kg}$,中层水 2100—2280 $\mu\text{mol/kg}$,深层水 2280—2360 $\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮水流特性接近于大洋水,颗粒无机碳(PIC)含量低,黑潮不同水层 PIC 浓度约在 1 $\mu\text{mol/kg}$ 左右(卢汐等, 2015)。表 3 总结对比了已有东海陆架水与黑潮不同水层碳浓度的观测结果。

DOC由东海陆架向黑潮输出,虽然黑潮提供了进入东海陆架的大部分DOC,但入侵东海陆架的黑潮水体,尤其是上升进入东海陆架的黑潮次表层热带水与中层水DOC浓度较低,而向黑潮输送的东海陆架水则有着较高的新生产力和DOC浓度,因此东海陆架水向黑潮水体有DOC净输出。Chen等(1999)根据实测DOC浓度与盐平衡箱式模型所得黑潮及毗邻海区水团流量,计算得东海陆架区跨陆架向黑潮海域净输出DOC量值约为 $2431 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 。然而该文中计算所采用的黑潮各水层进入东海陆架流量比值与其他研究差别较大。例如,该研究认为雨季(5—10月)时进入东海的黑潮流量 $Q_{\text{表层水}} = Q_{\text{热带水}} = 3Q_{\text{中层水}}$;干季(11—4月)时 $Q_{\text{表层水}} = 8Q_{\text{中层水}}$, $Q_{\text{热带水}} = 3Q_{\text{中层水}}$,即黑潮中层水贡献了黑潮上升流的 10%(冬季)—30%(夏季),然而计算中干季水团比值不符于其先前研究之描述(Chen等的研究表明,陆架海区黑潮表层水占 63%,黑潮中层水占 7%,比值为 9:1,Chen *et al.*, 1995a, 1995b),同时研究中也提到,其他调查中认为黑潮中层水的贡献应更小。

与 DOC 相似,POC 同样由东海陆架区向黑潮水体输出。估算结果表明,东海陆架向黑潮海域 POC 净输出通量约为 $1051 \times 10^9 \text{ mol C/a}$,虽然黑潮水携 POC 进入东海陆架区,但因其 POC 浓度相对较低,其携带 POC 通量总计 $150 \times 10^9 \text{ mol C/a}$,尚不及河流输入总量(750×10^9 — $875 \times 10^9 \text{ mol C/a}$)。有关 DIC、PIC

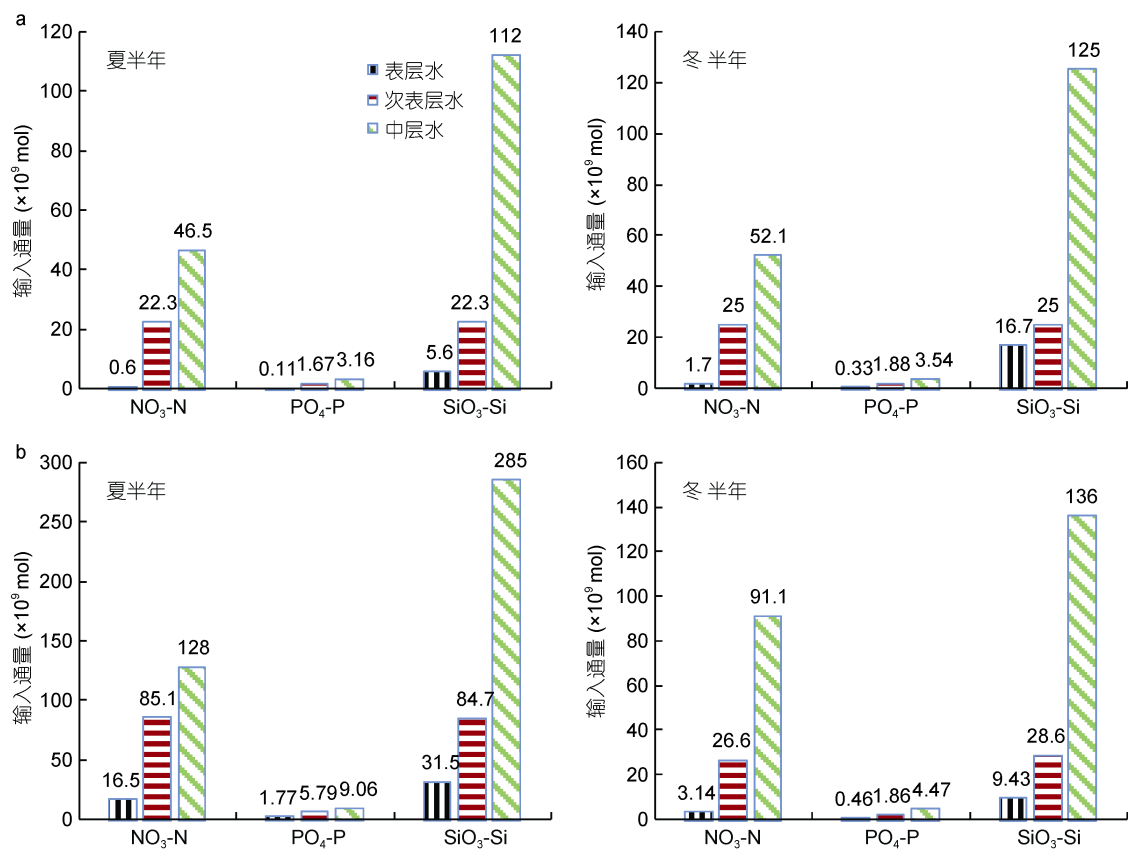


图 1 黑潮不同水层对东海生源要素氮、磷、硅的输入通量(a. Chen *et al*, 1999; b. 本研究)
Fig.1 Nutrient influxes from different layers of the Kuroshio to the ECS (a. Chen *et al*, 1999; b. this work)

表 3 东海陆架水与黑潮不同水层碳的浓度
Tab.3 Carbon concentrations in waters of the East China Sea and Kuroshio

东海陆架水			黑潮不同水层水											
			表层水			次表层热带水			中层水			深层水		
DOC	POC	DIC	DOC	POC	DIC	DOC	POC	DIC	DOC	POC	DIC	DOC	POC	DIC
55—175	2—63	2000—2144	53—136	2—10	1800—2040	45—110	1—5	2000—2140	47—80	1—5	2100—2320	45—74	0.5—12	2280—2400

注：溶解有机碳(DOC)与颗粒有机碳(POC)单位 $\mu\text{mol/L}$ ，溶解无机碳(DIC)单位为 $\mu\text{mol/kg}$ ；表中数据系根据卢汐等汇总结果整理的(卢汐等, 2015)

通量的计算较少见诸报道。根据观测数据与箱式模型计算得东海陆架水体跨陆架向黑潮水体净输出 DIC，其通量为 $21733 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ (Chen *et al*, 1999)。到目前为止，未有确切数据计算黑潮与东海陆架海区水体交换中的 PIC 通量，已有的报道是根据悬浮颗粒物 IC/OC 比值估算得出，东海陆架悬浮沉积物离岸输送携带 PIC 量约为 $1852 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ (Chen *et al*, 1999)。表 4 总结了多个研究者对台湾东北部海域跨陆架碳收支的结果。

2.3 海洋专项研究对黑潮与东海生源要素输入的新结果和新认识？

2.3.1 黑潮对东海生源物质在台湾东北部区域的输入在一定程度上“稳定和缓和”了受人为活动影响明

显的东海的生态环境 对溶解无机营养盐来说，黑潮对东海氮、磷在台湾东北部区域的输入，主要来自黑潮次表层热带水-中层水的输入，对颗粒无机生源要素和溶解无机碳而言，则来自表层-次表层热带水。2014 年春季的调查结果显示，黑潮颗粒态氮磷的输入并不多，颗粒态输入通量仅是溶解态氮的 4.2%、溶解态磷的 5.6%、溶解态碳的 0.1%(Zuo *et al*, 2016)。

黑潮溶解态营养盐在台湾东北部区域的输入占据绝对主导地位，且以中层水的输入为主。黑潮中层水输入东海陆架营养盐占黑潮总输入的比例分别为：硝酸盐 55.8%、磷酸盐 54.5%、硅酸盐 70.9%。由此

可以看出,中层水在黑潮输入东海陆架营养盐中的作用巨大。

台湾东北部区域,黑潮输入东海的营养盐在春季高于夏、秋季,这为东海春季水华提供了一定的物质基础,但输入到东海的黑潮水其氮磷比在春夏秋冬分别为 15.6、14.1 和 17.2,均与 Redfield 比值 16 接近,远低于受人为影响严重的东海近岸海域特别是长江口海域。黑潮水体中相对富含磷酸盐,可缓和东海陆架区营养盐结构严重不平衡的状况,黑潮这

些“正常水”的输入显然对调和东海的营养盐结构趋向合适的氮磷比起到重要的作用,从而对东海的生态环境起到“稳定和缓冲”作用。

所以,黑潮水与东海的输入不仅维持补充了东海生态系统运转所需的营养物质,更为重要的是缓冲了受人为强烈影响的东海海水的高氮磷比,使东海本已失常的营养盐结构向合适的氮磷比方向转变。因此,黑潮与东海营养物质的输入在一定程度上起着稳定和缓和东海生态环境的作用。

表 4 台湾东北部海域跨陆架碳收支(单位: 10^9 mol C/a)
Tab.4 Cross-shelf carbon fluxes off the northeastern Taiwan (unit: 10^9 mol C/a)

参数	东海陆架水	黑潮不同层水			悬浮颗粒物	跨陆架净收支
		表层水	次表层热带水	中层水		
DOC	-5563	2225	710	197	—	-2431
	-1820	—	1405	—	—	-414
	-2975±100	458±33	950±41.7	—	—	-1567
	-7674	478	1434	—	—	-5762
POC	-506	111	35	4	-695	-1051
	-148	—	43	—	—	-106
DIC	-96790	42701	23586	8770	—	-21733
PIC	—	—	—	—	-1852	—

注: 负值表示跨陆架向黑潮有碳的净输出; 表中数据系根据卢汐等汇总结果整理的(卢汐等, 2015)

表 5 黑潮输入东海的生源要素通量(kmol/s)
Tab.5 The influxes of biogenic elements from the Kuroshio to the ECS

季节	黑潮不同 水层输入	颗粒态生源要素通量							溶解态无机生源要素通量			
		POC	PIN	PON	PN	PIP	POP	PP	DIC	NO_3^-	PO_4^{3-}	SiO_3^{2-}
春季	表层水(KSW)	2.43	0.033	0.386	0.418	0.017	0.015	0.032	1527.1	1.044	0.112	1.99
	次表层水(KTW)	1.29	0.032	0.122	0.154	0.010	0.010	0.020	1583.7	5.382	0.366	5.36
	中层水(KIW)	0.25	0.014	0.028	0.042	0.004	0.003	0.007	587.9	8.124	0.573	18.00
	总计	3.96	0.078	0.536	0.614	0.031	0.028	0.059	3698.6	14.55	1.051	25.40
秋季	表层水(KSW)	3.36	0.061	0.527	0.589	0.023	0.023	0.046	2023.0	0.20	0.029	0.60
	次表层水(KTW)	0.58	0.019	0.097	0.116	0.008	0.006	0.013	796.70	1.69	0.118	1.82
	中层水(KIW)	0.21	0.006	0.019	0.025	0.002	0.001	0.004	301.30	3.903	0.284	8.66
	总计	4.15	0.086	0.643	0.729	0.033	0.030	0.063	3121.0	5.793	0.431	11.10
年均		4.06	0.082	0.590	0.672	0.032	0.029	0.061	3409.8	10.17	0.971	18.25

黑潮通过台湾东北部向东海主要是经表层水-次表层热带水作为载体输送颗粒态营养盐,且秋季的输送量高于春季,这些特征都与溶解态营养盐的输送有巨大差异。春、秋季表层水-次表层热带水输送的溶解无机碳分别占其总输送量的 84.1%和 82.7%。仅就表层水输送 DIC 的年平均值而言,表层水的输入占 52.1%, POC 占 71.3%(卢汐等, 2016; 宋金明等, 2016)。

2.3.2 构建海水 Ba-盐度新指标体系, 定量刻画了黑潮对东海生源物质在台湾东北部区域的输入范围和程度。黑潮次表层水从台湾东北陆架坡折处沿底部向北偏西方向入侵东海,其近岸分支可以入侵到浙江近岸,其中黑潮次表层水占比仍可达到 65%左右。黑潮次表层水自台湾东北陆架坡折处沿底部向北偏西方向入侵东海,至东经 122° 左右(DH9-5 站位)底部,黑潮水能够占到 95%的比例(Liu *et al.*, 2017)。随

后, 在约 27°N, 122°E 附近该水体分为近岸分支和离岸分支, 继续向东海入侵, 其中近岸分支可以一直入侵到浙江近岸(29.5°N), 而离岸分支则沿 100m 等深线转向东北方向(图 2)。

垂直方向上, 陆架外侧站位受黑潮次表层水的影响范围更大, 黑潮水占 50% 比例位置可延伸至外侧 TW0-1 站位(122.59°E, 25.49°N)表层, 而内侧靠近大陆的站位则只限于陆架中部位置底层(图 3)。

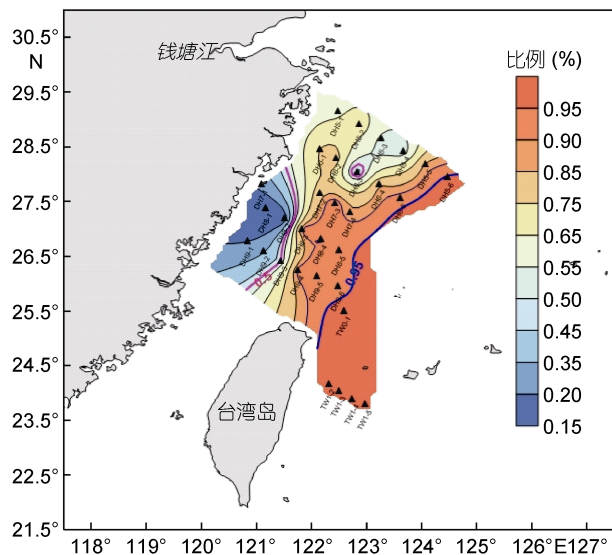


图 2 黑潮入侵东海的 Ba-盐度指标指示底层黑潮水所占比例

Fig.2 The proportion of Kuroshio water in the bottom layer of the ECS shelf indicated by Ba and salinity indices

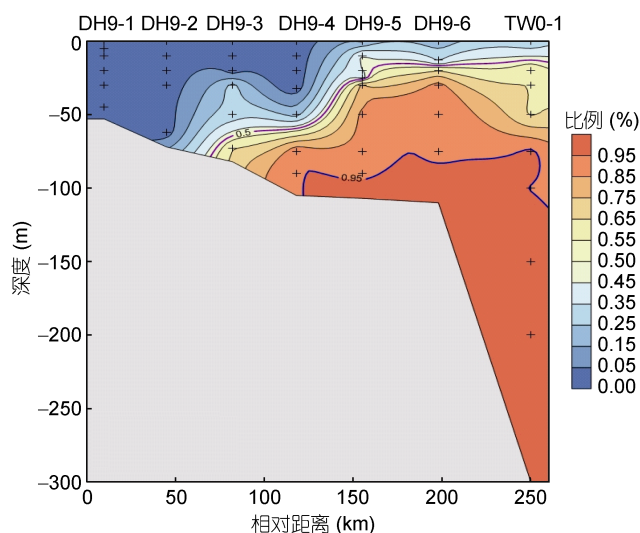


图 3 黑潮入侵东海的 Ba-盐度指标垂直指示 DH9 断面黑潮水所占比例

Fig.3 Proportion of Kuroshio water in section DH9 indicated by Ba and salinity indices

3 结语

黑潮与邻近东海的相互作用异常复杂, 既受到黑潮本身的变化影响, 也受到受人为影响剧烈的东海河流冲淡水输入、污染物输入等的影响, 前后者相对强度决定了黑潮与东海生源要素交换量及其生态环境效应。尽管这方面的研究已进行多年, 海洋先导专项也获得了一些新的认识, 但细致的过程和控制机制还不十分清晰, 需要更深入系统的监测和调查, 研究任重而道远。

以往的研究表明, 黑潮与东海生源要素的交换主要通过两个区域, 即从台湾东北部黑潮向东海陆架的输入和东海陆架通过日本九州西南海域与黑潮进行物质交换。总体而言是黑潮向东海输送营养盐, 东海向黑潮外海输送碳。

海洋先导专项对黑潮与东海生源要素的交换研究主要集中在黑潮通过台湾东北部向东海的输送, 获得了一些新的认识。1) 在台湾东北部区域, 碳主要以表层水-次表层热带水为载体输入, 秋季的输入量高于夏季; 黑潮溶解态营养盐在台湾东北部区域的输入占据绝对主导地位, 且以黑潮次表层热带水-中层水的输入为主, 输入通量春季高于夏、秋季, 这为东海春季水华提供了一定的物质基础; 但输入到东海的黑潮水其氮磷比与 Redfield 比值 16 接近, 说明黑潮这些“正常水”的输入显然对调和东海的营养盐结构起到重要的作用, 从而对东海的生态环境起到“稳定和缓冲”作用。所以, 黑潮水对东海的输入不仅维持补充了东海生态系统运转所需的生源要素, 更为重要的是缓冲了受人为强烈影响的东海海水的高氮磷比, 使东海本已失常的营养盐结构向合适的氮磷比方向转变, 因此, 黑潮与东海生源要素的输入在一定程度上起着稳定和缓和东海生态环境的作用。2) 通过构建的海水 Ba-盐度新指标体系, 定量细致刻画了黑潮对东海生源物质在台湾东北部区域的输入范围和程度, 黑潮次表层水从台湾东北陆架坡折处沿底部向北偏西方向入侵东海, 其近岸分支可以入侵到浙江近岸, 其黑潮次表层水占比仍可达到 65% 左右。垂直方向上, 陆架外侧站位受黑潮次表层水的影响范围更大, 黑潮水占 50% 比例位置可延伸至外侧 TW0-1(122.59°E, 25.49°N) 站位表层, 而内侧靠近大陆的站位则只限于陆架中部位置底层。

参 考 文 献

卢 汐, 宋金明, 袁华茂等, 2015. 黑潮与毗邻陆架海域的碳

- 交换. 地球科学进展, 30(2): 214—225
- 卢 汐, 宋金明, 袁华茂等, 2016. 黑潮主流径海域海水中的无机碳及其对东海陆架区的影响. 海洋与湖沼, 47(1): 16—28
- 刘 伟, 宋金明, 袁华茂等, 2015. 黑潮化学物质输入东海的途径与通量. 地球科学进展, 30(8): 904—914
- 巩 瑶, 陈洪涛, 姚庆祯等, 2012. 中国东部边缘海冬季硅酸盐的分布特征及主要来源. 中国海洋大学学报, 42(10): 75—80
- 宋金明, 2004. 中国近海生物地球化学. 济南: 山东科学技术出版社, 1—591
- 宋金明, 段丽琴, 2017. 渤黄东海微/痕量元素的环境生物地球化学. 北京: 科学出版社, 1—465
- 宋金明, 段丽琴, 卢 汐, 2016. 台湾东部黑潮主流径区 2014 年春秋季节水体碳的垂直变化特征与影响因素. 海洋科学集刊, 207—232
- 宋金明, 徐永福, 胡维平等, 2008. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学. 北京: 科学出版社, 1—533
- Chen C T A, Liu C T, Paid S C, 1995a. Variations in oxygen, nutrient and carbonate fluxes of the Kuroshio Current. *La Mer*, 33: 161—176
- Chen C T A, Ruo R, Paid S C *et al*, 1995b. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan. *Continental Shelf Research*, 15(1): 19—39.
- Chen C T A, 1996. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf. *Oceanologica Acta*, 19(5): 523—527
- 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
- Chen C T A, 2009. Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas. *Journal of Marine Systems*, 78(3): 394—410
- Fang T H, 2004. Phosphorus speciation and budget of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 24(12): 1285—1299
- Guo X, 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: C01026
- Isobe A, 2008. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, 64:569—584
- Liu K K, Tang T Y, Gong G C *et al*, 2000. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan. *Continental Shelf Research*, 20(4-5): 493—523
- Liu W, Song J M, Yuan H M *et al*, 2017. Dissolved barium as a tracer of Kuroshio incursion in the Kuroshio region east of Taiwan Island and the adjacent East China Sea. *Science China (Earth Sciences)*, 60(7): 1356—1367
- Qu C F, Song J M, Li N *et al*, 2015. Jellyfish (*Cyanea nozakii*) decomposition and its potential influence on marine environments studied via simulation experiments. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1-2): 199—208
- Song J M, 2010. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1—610
- Wong G T F, Chao S Y, Li Y H *et al*, 2000. The Kuroshio edge exchange processes (KEEP) study—an introduction to hypotheses and highlights. *Continental Shelf Research*, 20(4-5): 335—347
- 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*, 7:27—43
- Zuo J L, Song J M, Yuan H M *et al*, 2016. Particulate nitrogen and phosphorus in the East China Sea and its adjacent Kuroshio waters and evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. *Continental Shelf Research*, 131: 1—11

EXCHANGE AND ECOLOGICAL EFFECTS OF BIOGENIC ELEMENTS BETWEEN KUROSHIO AND ADJACENT EAST CHINA SEA

SONG Jin-Ming^{1, 2, 3}, YUAN Hua-Mao^{1, 2, 3}

(1. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*)

Abstract The exchange of biogenic elements between Kuroshio and the East China Sea has a significant impact on the ecological environment of the East China Sea. The exchange takes place as water goes into the East China Sea shelf from the northeastern coast of Taiwan and goes out of the East China Sea through Kyushu southwestern waters. Some new insights have been achieved by the observations of chemical properties in both the Kuroshio and the adjacent East China Sea. In the northeastern region off Taiwan, the input of carbon is mainly from the surface water and subsurface water with the flux higher in autumn than that in summer, while the nutrient fluxes which almost in dissolved forms are mainly originated from subsurface water and intermediate water and with the higher flux in spring than that in summer and in autumn, which would favor spring bloom in the East China Sea. The Kuroshio intrusion features by its N/P ratio that nearly the same to the Redfield ratio and can alleviate the extremely high N/P ratio in nearshore the East China Sea. Based on the geochemical characteristics of dissolved barium (Ba) and salinity in both Kuroshio and East China Sea waters, the Kuroshio subsurface water intrusion can be traced with the current northwest along the bottom of the middle shelf from the break shelf northeast of Taiwan to the Qiantang River estuary, where the proportion of Kuroshio subsurface water was nearly 65%. In vertical, the influence of Kuroshio subsurface water was more significant in the outer shelf water and its proportion in TW0-1 surface water could reach 50%, but the influence was relatively smaller in bottom water and within the middle of the shelf.

Key words biogenic elements; exchange flux; buffering effect; Kuroshio water; East China Sea shelf