

文章编号: 1004-7271(2000)02-0152-05

·综述·

## 东海物质输送及其影响因素分析

### Analysis on material transport in East China Sea and its influenced factors

章守宇, 杨红, 刘洪生

ZHANG Shou-yu, YANG Hong, LIU Hong-sheng

(上海水产大学海洋学院, 200090)

(Ocean College, SFU, 200090)

关键词: 物质输送; 东海; 长江口; 三峡工程

Key words: material transport; East China Sea; Changjiang river mouth; Three Gorges Project

中图分类号: S932.2 文献标识码: A

东海是一个兼有浅海和深海特征的边缘海,其辽阔的程度在全球陆架海域中为数不多,渔业产量及其生产潜力在世界海洋生产中十分突出。东海地形复杂,西部大陆架约占东海总面积的2/3,东南面大陆坡及深海槽最大深度2700m以上。除外侧势力强大的黑潮暖流外,对马暖流、台湾暖流、东海沿岸流等也在不同季节不同程度地影响着东海的流况。另外,以长江为代表的大陆径流以年平均总值约11000亿 $m^3$ 的巨大流量,夹带着营养盐等丰富的陆源物质不断流入这个边缘海。那些流入的陆源物质在地形及流况如此复杂的东海如何移动及扩散,在它们相互发生化学及生物反应的同时,又以怎样的方式、多大的程度流出东海进入太平洋及日本海加入大洋循环?弄清这些问题不但对于把握该海域明天的渔业生产至关重要,而且对于研究东、黄海大海洋生态系统演变的趋势以及陆海物质交换在全球环境变动中的作用也具有重要意义。本文就东海特别是长江口至黑潮区域的物质输送途径及其影响因素进行探讨,并在此基础上就今后这方面研究的方向提出见解。

#### 1 东海物质输送的物理过程及物理变数

东海沿岸的物质输送从其物理过程来说主要受大陆径流和东海环流系统这两者盛衰消长的综合影响。在河口域,作为对物质输送影响巨大的径流,长江乃首当其冲。由于长江口区的潮流和径流都比较强,所以就总体而言河口类型属部分混合型,存在着上层水流畅向外海,下层水流畅向河口的河口型环流<sup>[1]</sup>。由于淡水下泄流强于海水入侵流,因此,上层流在向外海扩展的过程中总是把下层盐水夹卷到上层,从而使物质浓度很高的径流被不断稀释,形成长江冲淡水。长江径流入海后,一般按两条途径输送,即冬季的向南和夏季的向北。每年11月后,强大的北风作用使得长江冲淡水沿岸向南输送,此时长江的径流量相对较小,约10000 $m^3/s$ ,河口锋通常不会超过122°E。最近研究发现,长江冲淡水的这种沿岸向南输送即使在夏季也存在<sup>[2]</sup>,这是因为稀释强度不大的所谓最大浑浊带水在科氏力作用下右转进入杭州湾,其舌锋盐度通常为10~20。另一种输送途径是,夏季长江冲淡水主体在经过短暂的东南方向运动后,随即转向东北济州岛方向。长江巨量径流和它携带着的物质对黄、东海的环流结构、水团组成、泥沙

收稿日期:1999-11-16

作者简介:章守宇(1961-),男,博士学位,主要从事海洋环境工学、生态系统动力学方面研究。

沉积、海洋生产力乃至长江口(Changjiang river mouth)工程建设都会产生巨大影响,曾吸引了许多学者来研究夏季长江冲淡水的转向机制。迄今为止的观点所涉及到的主要因子有长江径流量、台湾暖流、风应力、海底地形等<sup>[3-6]</sup>。最近,有些学者运用 $\sigma$ 坐标系下的三维非线性斜压陆架模式研究得出了不少新的认识<sup>[7]</sup>,他们以 $122^{\circ}\text{E}$ 为界把夏季长江冲淡水的扩展分为近段和远段,认为近段的冲淡水扩展主要受地形、斜压及其相互作用的影响,而远段的扩展则主要受黄海冷涡、沿岸流等的影响。

影响东海中部及以东乃至陆架边缘区域的物质输送的最强盛流动当属潮流。根据潮流的数值计算,长江口沿岸的最大流速可超过 $100\text{ cm/s}$ <sup>[8]</sup>,而 $31^{\circ}00'\text{N}$ 、 $122^{\circ}10'\text{E}$ 附近海域实测得到的最大流速甚至达到了 $200\text{ cm/s}$ ,但因为东海的潮流基本属于往复流,由潮流所输送的物质在一个周期后又几乎回复至原位,所以对于东海的中、长期物质输送来说,起最大作用的因子并非潮流,而应是由余潮、密度流及风海流所合成的余流。应用诊断模式研究发现,东海中国大陆沿岸海域夏季存在着 $20\text{ m}$ 水深以内呈南下流、 $20\sim 60\text{ m}$ 水深呈北上流的垂直余流环流,而冬季则存在着逆时针方向的水平余流环流,春秋季节的余流情况与冬季相类似<sup>[9,10]</sup>。这些余流的季节变动特征是影响该区域中、长期物质输送发生变化的主要原因之一。

东海外海的物质输送与长江口外海东海高密度水的移动显著相关,其输送的途径主要是扩散。东海高密度水形成与长江冲淡水的低温及台湾暖流的高盐性质密切相关,因此,它的发展与台湾暖流的向北推进而引起的冷却密度增值效应显著相关。通常,该高密度水的半径范围可达 $130\text{ km}$ ,5月的中心位置在 $30^{\circ}00'\text{N}$ 、 $125^{\circ}30'\text{E}$ 附近,而6月份,随着台湾暖流的北进其中心位置也转移到了 $126^{\circ}00'\text{E}$ ,其结果是东海高密度水的发展导致长江冲淡水的羽状流乃至羽状锋部分的混合水沿着它与台湾暖流之间的密度锋向外海扩散,该高密度水的势力越强盛则长江冲淡水向外海扩展得越远<sup>[11]</sup>。

东海沿岸海域的物质输送还受到黑潮季节性摆动及海水状态季节性变动的影响。冬季,由于海面冷却及强烈季风而引起的对流使得东海沿海岸水的垂直混合强盛,物质浓度分布上下一致,同时由于偏北风而引起的科氏力作用,黑潮流系的表层海水向岸输送,所以近岸的物质难以向外海扩散。秋季由于黑潮锋面离岸移动,促使营养盐等物质的输送范围更大。同时由于表层水的离岸,海水向上涌升补充到陆架底层,从而把底层物质特别是含量丰富的营养盐携带进来,成为陆架底层营养盐的丰富来源。除上述爬坡涌升外,由黑潮锋面扰动而造成的冷涡,还可以使深层的低氧富营养水上升至 $50\text{ m}$ 水层,无疑这也是一条由深层向上层输送物质的重要渠道。另一方面,夏季由于气温上升而引起的海面加热和丰水期径流入海而引起的上层水低盐化,使得海水成层发达,营养盐随着较轻的大陆沿岸水沿着等密度面向黑潮区输送,而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度较高的( $0.6\sim 0.8\mu\text{mol/L}$ )黑潮次表层水则涌升到陆架边缘内侧。这种情况秋季更明显,通常 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度 $1.0$ 等值线由夏季的 $300\text{ m}$ 层可以抬升到秋季的 $150\text{ m}$ 层上下,而 $0.6$ 等值线则向陆架内侧侵入,夏、秋季的这种循环过程是东海营养盐物质输送的重要途径<sup>[12]</sup>。

## 2 东海物质输送的生化因素及其过程

对1995年长江口沿岸海域营养盐物质浓度和盐度进行相关统计的结果见表1<sup>[13]</sup>,从表中可以看出, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 以及总氮与盐度的相关性较好,且冬季优于夏季,因为海水盐度属于保守性物质,所以这表明 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 以及总氮等营养盐在从河口域向外海输送的过程中物理混合起着支配作用。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 则由于受诸多因素的影响,它们与盐度的关系较复杂,相关性较差,表明这些营养盐在该海域的输送过程中除海水稀释的作用外还有明显的生物转移,即东海沿岸特别是长江口一带,浮游植物量很高,上层浮游植物大量摄取营养盐,一部分营养盐因此而转移,在下层则发生有机体分解而使营养盐再生。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 与盐度的相关性也较差,有时甚至不相关,同样表明 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在河口域除了物理混合过程外,还存在着其他的转移过程。实验及现场观测都证明,河口悬浮体和沉积物与水中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 之间存在着交换,悬浮体能够从高磷的淡水中吸附 $\text{PO}_4\text{-P}$ ,又能在低磷的咸淡水交汇区将其释放到水中<sup>[14]</sup>。由长江入海的悬浮泥沙因为风力、潮汐和海流等水动力的影响,经常处于运动状态,沉积——再悬浮——

再沉积的过程随季节而变化,加速了  $PO_4\text{-P}$  在水、悬浮体和沉积物之间的交换,有助于  $PO_4\text{-P}$  在水中的含量保持一定水平,使得  $PO_4\text{-P}$  与由于稀释作用而引起浓度渐低的海水盐度的相关性较差。

表 1 长江口沿岸海域营养盐物质浓度与盐度的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between nutrients and salinity in the Changjiang River estuary

月份	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$PO_4\text{-P}$	-0.145	0.063	-0.834	-0.183	-0.888	-0.905	-0.177	-0.086	-0.625	-0.249	-0.630
$SiO_2\text{-Si}$	-0.925	-0.898	-0.936	-0.535	-0.110	-0.898	-0.815	-0.819	-0.871	-0.918	-0.914
$NO_3\text{-N}$	-0.964	-0.920	-0.864	-0.871	-0.860	-0.889	-0.816	-0.921	-0.933	-0.910	
$NO_2\text{-N}$	-0.596	-0.768	-0.778	-0.681	0.040	-0.856	-0.206	-0.309	-0.602	-0.778	-0.235
$NH_4\text{-N}$	-0.913	-0.904	-0.915	-0.645	-0.761	-0.796	-0.696	-0.298	-0.610	-0.410	-0.732
$\Sigma N$	-0.942	-0.927	-0.943	-0.672	0.313	-0.789	-0.901	-0.788	-0.881	-0.916	-0.904

注:表内缺 2 月份数据。

总体来说,悬浮类物质在东海的输送,夏季由陆架边缘向东输向河口域,而秋季则从陆架向陆架边缘输送,这种输送的季节变动原因是夏季盛行的西南季风促进了在北半球右偏的表层水 Ekman 输送,而秋冬季强盛的西北风则促进了逆向的流动<sup>[15]</sup>。在垂直方向上,则与各季节的海洋成层构造及长江冲淡水前锋的强弱密切相关,冬季发达的对流使得再悬浮颗粒在东海沿岸覆盖全体水层,夏季由于密度成层,再悬浮颗粒不能输送到上层水域而只能在底层形成高浓度,另外夏季的径流量大使得陆源颗粒物被输送到沿岸区域,也促进了海底高浊度层的形成<sup>[16]</sup>。

悬浮类物质在东海由河口域向陆架边缘输送的过程中沉降的作用与效果也引人注目。运用三维数值模式对悬浮类物质迁移和扩散的计算表明,如果以再悬浮过程最为活跃的冬季作为基准,则 79% 左右的悬浮颗粒在经历了连续 5 个冬季的悬浮——沉降——再悬浮——沉降过程后,将不均匀地堆积于除长江口南部区域之外的整个东、黄海,而其余的 21% 左右或继续悬浮,或迁移穿过对马海峡及日本海,最后进入黑潮流域并参与大洋循环。这个结果与东、黄海的泥/黏土堆积几乎一致,因此反过来也可以认为,长江口南部的泥/黏土堆积主要是在径流量和悬浮类物质输送量均为最大值的夏季发生,而冬季则由于再悬浮作用并非对全部的物质有效,而使得一部分物质得以在那里残留、堆积<sup>[17]</sup>。

有机碳物质在东海沿岸的输送以溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)为主。沿岸海域的 DOC 分布趋势一般是由河口域逐渐向外海递减的,其平均值约从 4.0mg/L 下降至 2.0mg/L,且夏季高于冬季<sup>[18]</sup>。与大洋的以光合作用合成为主不同,沿岸海域的高 DOC 以陆源输送为主。由长江等径流注入东海的 DOC 在河口及其临近海域扩散输送,其影响可以一直延伸到 124°E,海水中的 DOC 含量为 1.7mg/L,高出大洋平均值 0.8mg/L 一倍多。但沿岸海域的 DOC 分布同时也受到各类生物活动的影响,某些相对位于沿岸外侧海域的 DOC 值高于内侧,是因为那里的较高水温更有利于浮游植物的生长和浮游动物及一些大型生物的活动,这些生物的繁殖、分泌、排泄、解体促使了 DOC 含量的增加。长江口沿岸海域的 POC 也主要由长江径流输送,但其输送方式是悬浮物携带,通常长江口悬浮物中含有 1.7% ~ 4.1% 的 POC,另外,温度对 POC 变化的影响也不象对 DOC 那么明显,POC 的变化主要取决于陆源输送的变化。

长江口沿岸海域的颗粒悬浮物及沉降颗粒中的 C:N 值约为 5~7,可以说陆源物质在有机物质中所占的比例非常小,另外碳磷元素的稳定同位体比也显示出海洋起源物质在悬浮态及沉降颗粒中占有有机物的主体<sup>[19]</sup>,因此由长江流入东海的陆源有机物,大部分在河口域堆积/分解,或被输送到沿岸海域以外,换句话说,东海海域中由光合作用产生的有机物颗粒的量要多于陆源输送的有机物颗粒。

东海陆架域的基础生产力比黑潮域大约高出 3 倍,营养盐丰富的长江水羽状分布使得基础生产力的增加显著化,并且从硝化速度与同化速度的相关性可知,有光层硝酸态氮元素的同化过程与中下层的二次生物过程(由有机物分解产生)是紧密相连的<sup>[20]</sup>,由径流提供的营养盐在表层迅速得到同化,之后便作为颗粒有机物沉降并搬运至海底,然后又被快速分解。这说明生物源颗粒是不断反复着生产——

沉降——再悬浮——分解(部分再生产)的过程中由沿岸向外洋输送的。

### 3 三峡工程对长江口海域物质输送的影响

长江三峡枢纽工程是综合开发和利用长江水资源的一项举世瞩目的巨大工程,它通过建立在上游的大坝来调控长江的入海径流量,因此,由此将要引起的长江口沿岸海域物质输送的变化也十分引人注目。首先是长江口外流场的变动,研究表明,按 150m 和 180m 这两种蓄水方案调控时,对长江口涨落潮流速的最大影响分别为 16 cm/s 和 35 cm/s、最大流向影响为 2°和 6°,对余流的最大影响为 18 cm/s 和 30 cm/s。计算结果还表明,150m 方案时,人工调节流量与自然流量之差可以达到 1000~4000 m<sup>3</sup>/s 的量级,与季节平均流量间的差异量较小,而 180m 方案时,上述差异可达 9000m<sup>3</sup>/s<sup>[21]</sup>,这是一个比较大的值,将使长江冲淡水的流型由秋季型转变成冬季型,可能会对长江口的生态系统平衡带来重大影响。

三峡水库建成后,10月-12月长江下泄量将减少,根据 150m 和 180m 的调节方案,10月份变化最大,下泄流量分别减少 2880m<sup>3</sup>/s 和 7000m<sup>3</sup>/s。假定水库以下来水条件保持不变,利用营养盐物质输出量和长江流量关系方程式,可粗略计算得到营养盐物质输出量可能发生的变化如表 2 所示<sup>[13]</sup>。按照 1995 年 10 月 PO<sub>4</sub>-P、SiO<sub>3</sub>-Si、ΣN 的输出量为

表 2 三峡工程建成后 10 月份营养盐输出量的可能变化  
Tab.2 Possible variation of nutrients in October after completing the Three Gorges project

营养盐	1995 年 10 月输出量		150m 方案输出量		180m 方案输出量	
	kg/s	t/mon	kg/s	t/mon	kg/s	t/mon
PO <sub>4</sub> -P	0.50	1342	0.44	1167	0.35	947
SiO <sub>3</sub> -Si	70.4	188680	63.0	170302	54.5	146036
ΣN	30.7	82183	28.9	77533	26.5	71047

基准计算,则这些营养物质在 150m 调控方案下的减少量分别为 12.2%、10.6% 和 6.3%;而 180m 调控方案下的减少量将分别达到 30.1%、23.3% 和 15.7%。可以看出,与 150m 方案相比,180m 方案的影响要大得多,后者比前者分别大 59.8%、55.2%、57.4% 左右。但是,根据水库调节方案,1月-4月下泄流量增加,前述两种方案时的增加量分别为 1000 m<sup>3</sup>/s 和 2250m<sup>3</sup>/s,相应地,营养盐物质的输出量也随之增加。

据估算,三峡工程(Three Gorges Project)完成后的前 10 年,将有 60%~70% 的泥沙淤积在库内,下泄泥沙量减少,长江口沿岸海域的海水透明度将得到提高,这会促进浮游植物的光合作用,浮游植物密集区有可能向河口域移动。由于河口附近为营养盐物质的高浓度区,因此也有可能引起浮游植物的异常繁殖,容易造成赤潮那样的严重危害,应给予充分重视。

### 4 结语

有关东海物质输送及其变动的研究已积累了近 40 年,这些研究对于把握东海物质输送的规律及输送量大小提供了极为有用的基础史料。近年来,随着海洋监测手段的不断完善及电子计算机的高速发展,使得人们在错综复杂的海洋现象中从整体上定量研究物质输送成为可能。因此,今后应加强东海物质输送与生态系统的长期变动趋势、物质输送与海洋生产力转换效率等方面的研究工作。由于海洋中的物质输送过程牵涉到物理的、化学的和生物的各种动态因素,也由于东海的边缘海域连接着中国、日本和韩国,毫无疑问,东海的物质输送直接影响到它们沿岸海域的海洋生态状况,因此需要多学科专家们的共同研究与国际协作。

#### 参考文献:

- [1] 王康善,苏纪兰.长江口南港环流及悬移运输的计算分析[J].海洋学报,1987,9(5):627-637.
- [2] 潘玉球,王康善,黄树生.长江冲淡水输运和扩散途径的分析[J].东海海洋,1997,15(2):25-34.
- [3] Beardsley R C, Limeburner R. Discharge of the Changjiang River into the East China Sea[J]. Con Shelf Res. 1985, (4):57-76.
- [4] 顾玉荷.长江冲淡水转向原因的探讨[J].海洋与湖沼,1985,16(5):354-363

- [5] 于克俊. 长江口余流和盐度的二维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(1): 92 - 96.
- [6] 袁耀初, 苏纪兰, 赵金三. 东中国海陆架环流的单层模式[J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 1 - 11.
- [7] 朱建荣, 肖成猷, 沈焕庭. 夏季长江冲淡水扩展的数据模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20(5): 13 - 22.
- [8] Choi B. A three-dimensional model of the East China Sea[A]. T. Ichie. Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas[C]. Amsterdam: Elsevier, 1984, 209 - 224.
- [9] Yanagi T, Takahashi S. Seasonal variation of circulation in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. J Oceanography, 1993, 49: 503 - 520.
- [10] Choi B H, Iie H J. Physical oceanography programs of the East China Sea and the Japan Sea dynamics in Korea[J]. Proceeding of PORSE - 92, 1992, 1 - 28.
- [11] 赵保仁, 乐肯堂, 朱兰部. 长江口海域温、盐度分布的基本特征和上升流现象[J]. 海洋科学集刊, 1992, (33): 15 - 26.
- [12] 陆赛英, 姚乔尔, 陈真. 从东海陆架至黑潮流域微量营养元素的运移规律[J]. 黑潮调查研究论文选, 1991, (3): 123 - 131.
- [13] 沈志良, 陆家平, 刘兴俊等. 长江口区营养盐的分布特征及三峡工程对其影响[J]. 海洋科学集刊, 1992, 33: 109 - 129.
- [14] Butler E I, Tibbitts S. Chemical survey of the Tamra Mouth I. Properties of the Waters[J]. J Mar Bid Ass U K, 1972, 52: 681 - 699.
- [15] Yanagi T. Hydrodynamic material transport, budget and ecological models in the East China Sea[J]. Bull Coastal Oceano, 1998, 36(1): 59 - 68.
- [16] Iseki K. Particle distributions and transport processes in the East China Sea[J]. Bull Coastal Oceano, 1998, 36(1): 29 - 37.
- [17] Yanagi T, Inoue K. A numerical experiment on the sedimentation processes in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. J Oceano, 1995, 51: 537 - 552.
- [18] 谢肖勃, 戴敏英, 苗辉等. 长江口区海水溶解有机碳和颗粒有机碳的分布及变化的研究[J]. 海洋科学集刊, 1992, (33): 131 - 137.
- [19] Minagawa M, Kadota Y. Biogeochemistry of carbon and nitrogen in the East China Sea studied by natural  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  analyses of particulate matter and sediments[A]. S. Tsunogai. Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal Sea. Ocean-Atmosphere System[C]. Tokyo: M & J Int, 1995, 108 - 206.
- [20] Hama T, Shin K H, Handa N. Spatial variability of the primary productivity in the East China Sea and its adjacent area[J]. J Oceano, 1997, 53: 41 - 51.
- [21] 乐肯堂. 长江三峡工程对长江口外流场的影响[J]. 海洋科学集刊, 1992, (33): 37 - 49.