

黄河口区有机碳同位素地球化学研究*

蔡德陵**

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

蔡爱智

(厦门大学海洋系, 厦门 361005)

摘 要

本文对黄河下游河水中的颗粒有机碳(POC)及其同位素组成做了一个年度的测量, 结合溶解态碳的文献资料, 估算出黄河 POC 和总碳的年入海通量。通过对黄河口区三个航次 118 个站位 295 个水样和 115 个沉积物样品的 400 多个有机碳同位素数据的分析, 结合水样中悬浮体含量、POC 浓度和沉积物样的粒度参数、有机碳含量的资料, 综合对比研究后提出了一个黄河细颗粒泥沙入海扩散的新模式。

关键词 有机悬浮质、碳同位素、入海通量、沉积物搬运、黄河口区

黄河是我国第二大河, 其输沙量仅次于印度恒河, 居世界第二位, 平均每年有 10.7×10^8 t 泥沙进入三角洲和滨海区。如此巨量泥沙入海对中国东部, 尤其是渤海和南黄海内陆架、海岸带的演变起着举足轻重的作用, 其中 2.6×10^8 t 细颗粒泥沙的去向问题不仅对沿海国民经济的开发关系密切, 而且也是沉积学上一个重要的理论问题。

自从 Craig^[1] 首次详细调查天然物质中的碳同位素以来, 许多学者研究了天然物质中碳同位素分馏的机理。Degens^[2] 根据所掌握的大量数据汇总了不同种类物质的碳同位素比值范围。Silverman 等^[3]、Sackett^[4]、Parker 等^[5]、Gearing 等^[6] 调查了不同海域沉积物中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布, 证明其同位素组成是受到海洋和陆源两种有机质的相对贡献等因素的影响。Sackett 等^[7]、Hunt^[8]、Meyers 等^[9]、Shultz 等^[10] 致力于研究将有机碳同位素组成作为在海洋或河口环境中有机物质来源的示踪剂。作者在亚马孙河及河口区同位素地球化学研究中, 得出了该河中颗粒有机质主要来自陆源的明确结论, 并定量计算了颗粒有机质在河口不同方向上向大西洋输送的距离^[11], 受到了国际学术界的重视^[12]。然而, 对于像黄河这样水少沙多、邻近海域水深又浅的河口区, 尚未见有稳定同位素研究的报道。

1 样品采集与分析

从 1989 年 9 月至 1990 年 8 月在黄河下游垦利水文站每月采集一次河水样品, 每次采集表、底层样品各一个。

1992-04-14 收稿, 1992-08-24 收修稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

** 参加本工作的还有韩贻兵、蔡月娥、高素兰、徐孝诗等。

在 1989 年 6 月与 8 月, 1990 年 10 月对现行黄河入海口及邻近海域进行了三个航次调查, 共采集 118 个站位的 295 个水样和 115 个沉积物样. 用 GCC1-3 型采水器分别采集表层 (0—0.2m) 和底层 (底质以上 0.5m 以内) 水样. 在采样后 24 h 之内即用经 600°C 预燃烧过的 1 μm 孔径的 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜真空过滤, 滤膜存放在零下 20°C 冰柜中直至分析.

POC 及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定采用高温燃烧法, 方法与文献[11,13,14]所述基本相同. MAT-251 型质谱仪测定样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 以 PDB 国际标准为参考标准. 经用三个实验室内标样品重复制样测量表明, $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 可作为我们测试颗粒或沉积有机碳样品同位素值的精度.

水样中悬浮体浓度是滤膜在真空干燥后用 $\text{g}/10^5$ AE163 型电子分析天平称量测定; 沉积物粒度参数分析按国家海洋局 1975 年制定的《海洋调查规范》进行.

2 黄河 POC 及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性变化

1949—1982 年间黄河年平均径流量为 42.6 km^3 , 平均年输沙量为 $10.7 \times 10^8 \text{ t}$. 黄河的水沙特征主要受气候制约, 不仅在年间有明显差异, 而且也存在极明显的季节性变化. 为了应用同位素示踪剂研究河流物质向海输送的规律, 必须首先弄清河流物质中碳同位素组成的季节性变化规律.

表 1 黄河下游水的季节性变化

采样日期		月平均流量	悬浮体浓度		POC 浓度		POC $\delta^{13}\text{C}$	
			表层	底层	表层	底层	表层	底层
(年)	(月)	(m^3/s)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(mg/L)	(mg/L)	(10^{-3})	(10^{-3})
1989	9	2090	19.3	15.2	50.2	33.4	-26.7	-25.7
	10	1100	7.65	5.92	23.0	22.5	-25.9	-25.5
	11	837	2.45	2.29	13.0	11.0	-27.5	-27.1
	12	642	2.11	2.58	13.1	11.4	-29.5	-28.8
1990	1	480	2.04	1.93	10.8	10.8	-29.7	-28.2
	2	587	1.65	1.36	8.9	8.8	-28.7	-28.7
	3	796	3.79	3.58	22.4	18.6	-29.7	-28.4
	4	521	4.67	1.64	16.8	11.6	-29.1	-29.2
	5	796	4.40	10.56	17.6	16.9	-28.7	-27.1
	6	764	1.10	1.29	8.1	9.3	-27.3	-26.8
	7	1390	13.94	16.78	73.9	73.8	-24.7	-27.7
	8	1550	7.78	10.72	35.0	36.4	-24.9	-25.2

由表 1 数据可见, 在洪水期 POC 浓度随悬浮体浓度峰值的出现而增加, 一般在 $35 \text{ mg}/\text{L}$ 以上, 其同位素组成是一年中最重要的时期, 为 -27.7×10^{-3} 至 -24.7×10^{-3} , 平均值为 -25.8×10^{-3} . 冬季河水流量小, 悬浮体浓度和 POC 浓度均为一年中的低值期, POC 浓度只有 $10 \text{ mg}/\text{L}$ 左右, POC $\delta^{13}\text{C}$ 值明显较洪水期轻, 只有 -29.7×10^{-3} 至 -28.2×10^{-3} , 平均值为 -28.8×10^{-3} . $\delta^{13}\text{C}$ 值的明显变化反映了河水中颗粒有机质的物质来源是有变化的. 春季桃汛时径流量、悬浮体浓度及 POC 浓度均有一小的峰值, 但 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值仍与冬季值极其接近, 说明春季颗粒有机质的主要来源与冬季基本相同.

表2 黄河下游河水参数的相关性矩阵

	月平均流量	月平均含沙量	POC 浓度
月平均含沙量	0.92		
POC 浓度	0.71	0.89	
POC $\delta^{13}\text{C}$	0.80	0.81	0.59

由表2知,黄河下游月平均径流量与月平均悬浮体浓度、POC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间存在着正相关;悬浮体浓度与 POC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值间亦有正相关。

简言之,河流中有机碳的来源主要有三种:(1)天然来源的陆源有机质;(2)人为的有机质,如工业和城市生活废水等;(3)在河流中产生的浮游生物来源的有机质。由于不同来源有机质可能具有不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 典型值,因此,POC $\delta^{13}\text{C}$ 值可用作河流中有机质来源的示踪剂。亚马孙河流域同位素研究^[11]便是一个很好的例证。黄河洪水期 $\delta^{13}\text{C}$ 值与马兰黄土中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -24.9×10^{-3} (Tan, 私人通信, 1989) 十分接近,即由同位素数据证实了洪水期河水中的有机质主要来自黄土。枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 值变轻,可能是河水悬移质物质来源与洪水期有差别的反映,这一点尚需对黄河流域作进一步同位素调查来加以验证。

3 黄河 POC 和总碳入海通量的估算

由于黄河下游径流量和输沙量严重的不均衡性,为了能准确地估算其 POC 入海通量,我们选用波动较小的月平均含沙量和悬浮体中有机碳的百分含量进行统计计算,由此推算出黄河 POC 月平均输送率,数据示于图1。在1989年9月至1990年8月这一统计年度中,黄河年径流量为 30.4 km^3 , POC 年入海通量为 $2.26 \times 10^6 \text{ t}$,其中仅7月至10月丰水季节就占了全年总量的70%。

碳酸钙含量高是黄河沉积物最典型的特征之一^[15],为长江及世界各大河流平均值的一倍以上。在计算黄河总碳入海通量时,颗粒碳酸盐碳是十分重要的组成部分,但迄今黄河悬浮体中碳酸盐含量尚未见有报道。我们所分析的13个黄河河口段河水样品的悬浮体中碳酸盐为8.43—14.77%,平均值为 $12.3 \pm 1.8\%$,与黄河口区表层沉积物中碳酸盐含量范围基本一致。

溶解态碳也是总碳的重要组成部分。Gan 等^[16]对黄河1982年度径流量为 29.7 km^3 (济南水文站)情况下,所测定的溶解有机碳年通量为 $0.54 \times 10^6 \text{ t}$,总溶解无机碳年通量为 $1.24 \times 10^6 \text{ t}$ 。

从50年代以来黄河径流量、输沙量和河水平均含沙量的统计资料看出,70及80年代的径流量和输沙量均较50和60年代为少,而河水平均含沙量的10年平均值都在 $21.7—28.9 \text{ kg/m}^3$ 间波动,变化并不明显。因此,我们以 31.4 km^3 作为年径流量的加权平均基准值,由此

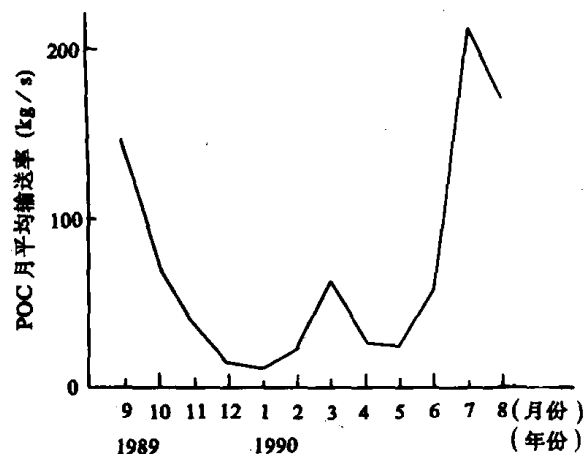


图1 黄河 POC 月平均入海输送率

算出黄河各种形态碳的年入海通量数据如下:

颗粒有机碳	$2.33 \times 10^6 \text{ t}$
颗粒碳酸盐碳	$11.9 \times 10^6 \text{ t}$
溶解有机碳	$0.57 \times 10^6 \text{ t}$
总溶解无机碳	$1.31 \times 10^6 \text{ t}$

所以,黄河平均每年总碳的入海通量为 $16.1 \times 10^6 \text{ t}$. 目前,全世界大河向海洋输送碳的最新估计值为 $742 \times 10^6 \text{ t/a}$,由此可知,黄河约占世界大河总通量的 2.2%.

4 黄河口区 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值分布特征

如前述,颗粒有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是探讨河口中陆源有机质运移过程的一种有价值的示踪剂. 本文将用 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值来研究黄河平均每年入海约 $2.6 \times 10^8 \text{ t}$ 细颗粒泥沙的去向问题.

为了研究黄河口区 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布特征,需先弄清该区 POC 各主要来源 $\delta^{13}\text{C}$ 的典型值. 我们已对河水中 POC 同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_r$) 的季节性变化做了探讨. 另一方面,还应了解

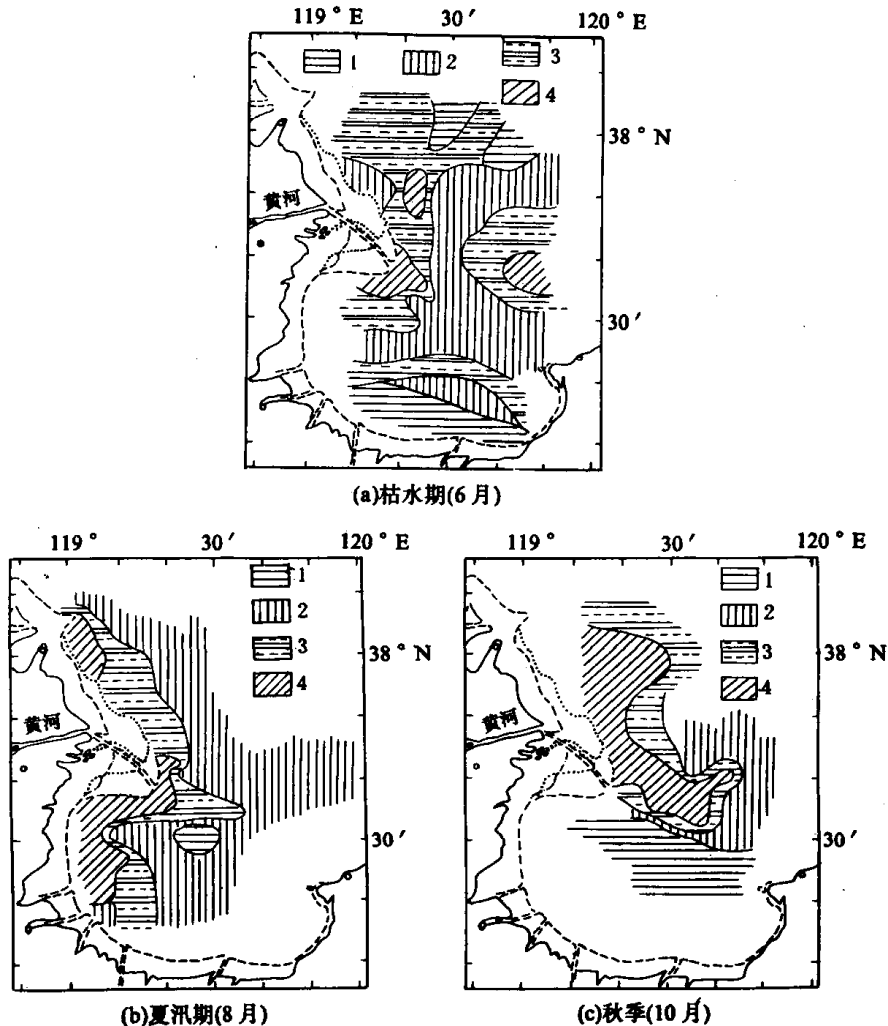


图 2 黄河口区表层 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值分布

(a) 1 为大于 -23×10^{-3} , 2 为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3 为 $-25 \sim -27 \times 10^{-3}$, 4 为小于 -27×10^{-3} ; (b) 1 为大于 23×10^{-3} , 2 为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3 为 $-25 \sim -25.8 \times 10^{-3}$, 4 为小于 -25.8×10^{-3} ; (c) 1 为大于 -23×10^{-3} , 2 为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3 为 $-25 \sim -25.7 \times 10^{-3}$, 4 为小于 25.7×10^{-3}

在海洋中现场生成的生物中的碳同位素组成($\delta^{13}C_m$)。为此,先后测定了5个不同种类的海洋生物样品,包括海蜇、角水蚤、浮游与底栖生物的混合样等,其 $\delta^{13}C$ 值为 -21.6×10^{-3} 至 -20×10^{-3} ,平均值为 $-20.9 \pm 0.5 \times 10^{-3}$,我们将此平均值近似看作为近岸海区浮游植物和低等海洋动物碳同位素的典型值 $\delta^{13}C_m$ 。由简单的物料衡算关系可建立下述方程式:

$$F_l \cdot \delta^{13}C_l + (1 - F_l) \cdot \delta^{13}C_m = \delta^{13}C_s, \quad (1)$$

其中, $\delta^{13}C_l$ 为河水中POC的同位素典型值, $\delta^{13}C_m$ 为海洋生物碳同位素典型值, $\delta^{13}C_s$ 为POC样品的同位素值, F_l 为POC样品中陆源物质所占百分数。由此推导出下式:

$$F_l = \frac{\delta^{13}C_m - \delta^{13}C_s}{\delta^{13}C_m - \delta^{13}C_l} \times 100 (\%). \quad (2)$$

可见,在分别确定了海、陆相POC的同位素典型值后,只要测出该区中某个POC样品的 $\delta^{13}C$ 值,即可估算出该样中陆源物质所占的百分比。

图2和3汇总了3个航次118个站位近300个表层和底层POC样品的 $\delta^{13}C$ 值。在对不

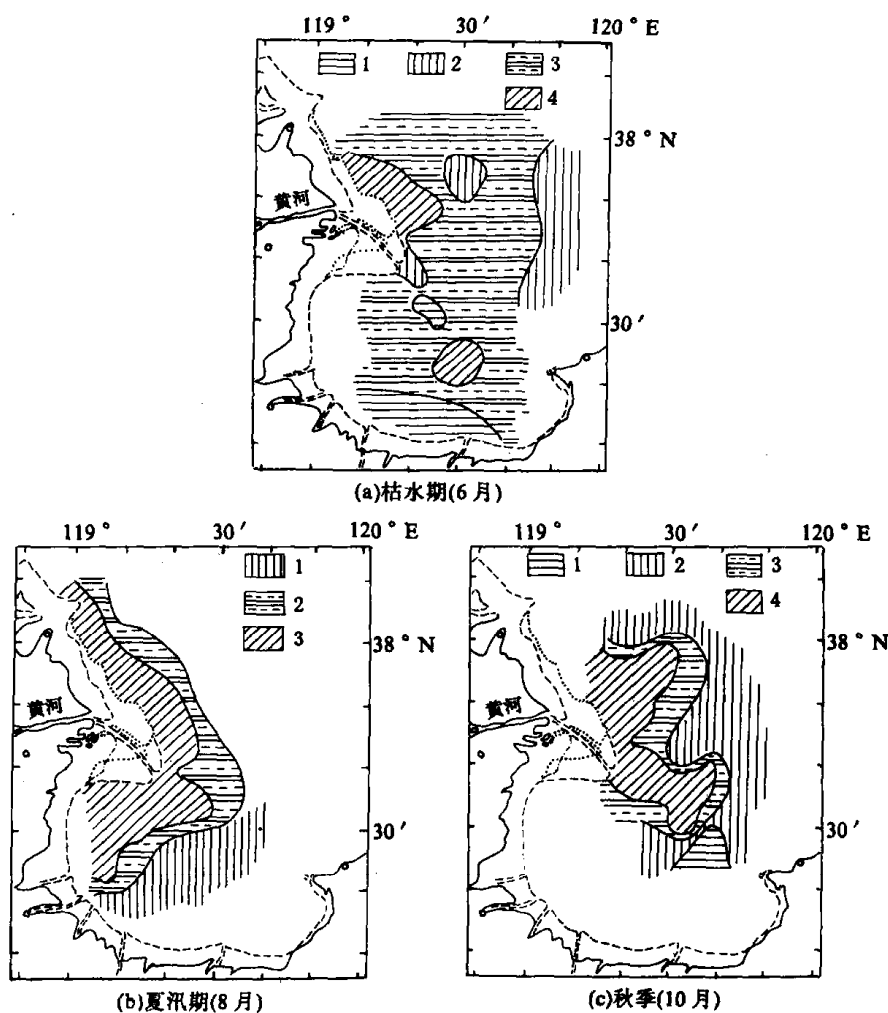


图3 黄河口区底层POC $\delta^{13}C$ 值分布

(a) 1为大于 -23×10^{-3} , 2为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3为 $-25 \sim -27 \times 10^{-3}$, 4为小于 -27×10^{-3} ; (b) 1为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 2为 $-25 \sim -25.8 \times 10^{-3}$, 3为小于 25.8×10^{-3} , (c) 1为大于 -23×10^{-3} , 2为 $-23 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3为 $-25 \sim -25.7 \times 10^{-3}$, 4为小于 25.7×10^{-3}

同季节、不同层次 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布进行比较之后,从中可找出黄河细颗粒泥沙向海扩散的规律.

4.1 平面分布特征

由于河水中 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性变化,相应季节的典型值就有所不同. 夏汛期(8月)和秋季(10月)的值几乎相同,分别为 -25.8×10^{-3} 和 -25.7×10^{-3} ; 但枯水期(6月)的值却要轻一些,为 -27.0×10^{-3} . 三个季节的共同点是表层代表河流相 $\delta^{13}\text{C}$ 典型值等值线都在河口附近相当小的范围内.

由于枯水期黄河径流量很小,观测期间的日平均值仅有 $16-67 \text{ m}^3/\text{s}$, 因而 -27×10^{-3} 等值线分布范围最小,与悬浮体含量大于 30 mg/L 的分布范围大致相当; 而 -27×10^{-3} 至 -25×10^{-3} 的分布区域主要是从河口向北和北东方向扩展,显示出河水携带的陆源有机物的主要扩散方向,与黄河口门前表层余流的顺时针涡旋方向是一致的. 在东北方向 38°N 附近有大于 -23×10^{-3} 的值出现,可能与北方来的高盐水的嵌入有关^[17]. 莱州湾南部沿岸 $\delta^{13}\text{C}$ 值也较重,与该海域春季生物生产力较高相关联. 在河口北方和东方分别存在有小于 -27×10^{-3} 的区域,且与河口小于 -27×10^{-3} 的区域不相连,从同位素信息证明了这些区域的表层陆源物质并非完全直接由河水扩散而来,而是由表层沉积物的再悬浮和水体的垂直混合所造成; 同时也说明黄河细颗粒泥沙在邻近海域的沉积并非“一劳永逸”,而是经历了悬浮—沉降—再悬浮—再沉降的反复过程.

夏汛调查时黄河日平均径流量达 $1940-3250 \text{ m}^3/\text{s}$. 表层 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值分布格局与枯水期有较大差异. 河水 $\delta^{13}\text{C}$ 典型值等值线在河口的扩散范围较枯水期明显增大,主要扩散方向向南,向北次之,显示出陆源有机物的扩散方向主要是顺着黄河口区与河流入海方向相垂直的潮流方向,由于向南的涨潮流速大于向北的落潮流速,因而表层悬沙以向南扩散为主. -25×10^{-3} 等值线走向基本与岸线平行,表示在悬浮体中陆源物质的百分比基本上与离岸距离成反比. 黄河 POC 的扩散方向与潮流方向基本一致,而与河水入海流向相垂直,这一点与亚马孙河口的情况相似^[11].

在河-海界面处,POC $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势是随河水进入与海水混合区, $\delta^{13}\text{C}$ 值由河流相的 -25.8×10^{-3} 变轻到 -27×10^{-3} 左右,继续向外扩散时,又逐渐回升至 -24×10^{-3} 以上,最高可达 -21.5×10^{-3} . 形成这一分布格局的因素复杂,主要有: 河流 POC 向海扩散; 河水中溶解有机碳(浓度约为 20mg/L)的絮凝和聚集; 表、底层水之间的涡动扩散; 河口区中等盐度处较

高的生物生产力; 潮汐和海流将外海生物物质带入河口区和造成底质再悬浮; 细菌对有机质的氧化作用等. 由这些因素的交互作用,构成上述 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布格局. 出口门时变轻,似乎主要是由再悬浮和涡动作用所造成; 向外海扩散时又变重,反映了河-海混合作用和海洋生物百分比的增加.

根据(2)式计算了河口区悬浮体中陆源物质的百分数 F_t , 图 4 表示了 F_t 与离河口距离 S 的关系,显示出负相关性 ($r = -0.72$,

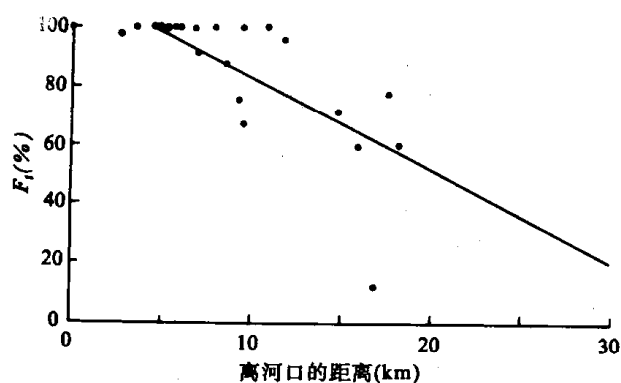


图 4 F_t 与离河口距离的关系

$n=22$), 其线性回归式为

$$F_t = 114.1 - 3.13 S. \quad (3)$$

如外推至 $F_t=0$ 处, 可得 $S_0=36.5$ km. 此值表示依据线性混合模式陆源物质向海输送的理论距离, 这一数值远小于亚马孙河的值^[11].

从黄河口表层悬浮体浓度分布看, 除在南部有一浓度为 20—30 mg/L 的舌状伸出外, 在距河口约 20 km 处浓度已降至 20 mg/L 以下, 与外海的表层浓度已十分接近, 这一范围与上述理论距离也较接近. 实际上, 黄河口区水深很浅, 由于底质的再悬浮和水体的垂直混合, 陆源有机质向海输送的实际距离远大于理论值, 这说明黄河入海泥沙的扩散不是简单的水平扩散过程.

从秋季表层 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值分布可明显看出 POC 的主要扩散方向是向北和向东 (图 2(c)), 与 POC 浓度的分布特征也很一致, 由此可认为向北方向是秋季黄河细颗粒泥沙运移的优势方向.

概言之, 由 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值水平分布特征可见, 在不同季节黄河细颗粒泥沙主要运移方向明显不同: 6 月枯水期以北和北东方向为主; 夏汛期以南向为主, 北向次之; 秋季则以北向为主, 东向次之.

4.2 垂直分布特征

与表层相比, 6 月份底层 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 -25×10^{-3} 的分布范围明显扩大 (图 3(a)), 只是在靠莱州湾南岸的小块区域 $\delta^{13}\text{C}$ 值较重. 就多数站位而言, 表、底层同位素值的差 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值尚不算大, 一般为 $1-2 \times 10^{-3}$, 这是因为莱州湾水深较浅, 一般不超过 15 m, 由于波浪的作用, 海湾底质中的粘粒组分被掀起, 造成水柱中 $\delta^{13}\text{C}$ 垂直梯度减小.

夏汛期底层 POC $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍轻于表层, -25.8×10^{-3} 和 -25×10^{-3} 两条等值线均向海方向推进 (图 3(b)). 显而易见, 这是由于汛期河流输沙量猛增所致.

秋季表、底层 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值似乎要比 6 和 8 月份的小, 其原因是入秋之后降水减少, 河流入海径流也减少, 导致该区温盐跃层处于消衰期; 另外, 风向转为西风 and 偏北风, 风力加大, 由于风浪的作用, 水柱的垂直混合加剧.

5 沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布的季节差异特征和黄河入海泥沙扩散新模式

在入海泥沙量最大的夏汛期, 河流入海段 H8 至 H3 站沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值均小于 -28.1×10^{-3} , 这些颗粒较粗的细粉砂中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均比同一站位的颗粒较细的悬浮有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值轻. 在口门外, 沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的总趋势是随着离河口距离的增加, $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐变大, 最高可达 -23.0×10^{-3} (图 5(b)), 这是陆源物质随离河口距离增加而呈减少趋势在同位素值上的反映; 相反, 海洋生物碳在沉积有机碳中比例则有所增加. 由等值线走向看, 陆源有机质主要在向南和向东方向上沉积, 北向次之.

秋季近河口处沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍在 -27.1×10^{-3} 以下, 向外海也呈增加趋势, 但最高值仅达 -24.2×10^{-3} (图 5(c)). 同位素水平梯度仅为 3×10^{-3} , 较夏汛期的 5×10^{-3} 为小, 其原因可能是秋季海洋生产力较夏季弱, 沉积物中陆源有机物比例相对提高; 或是由于沉积物再悬浮作用较强, 细颗粒物损失较多, 海洋生物及残片的颗粒多半较细, 在沉积物粗化以后陆源

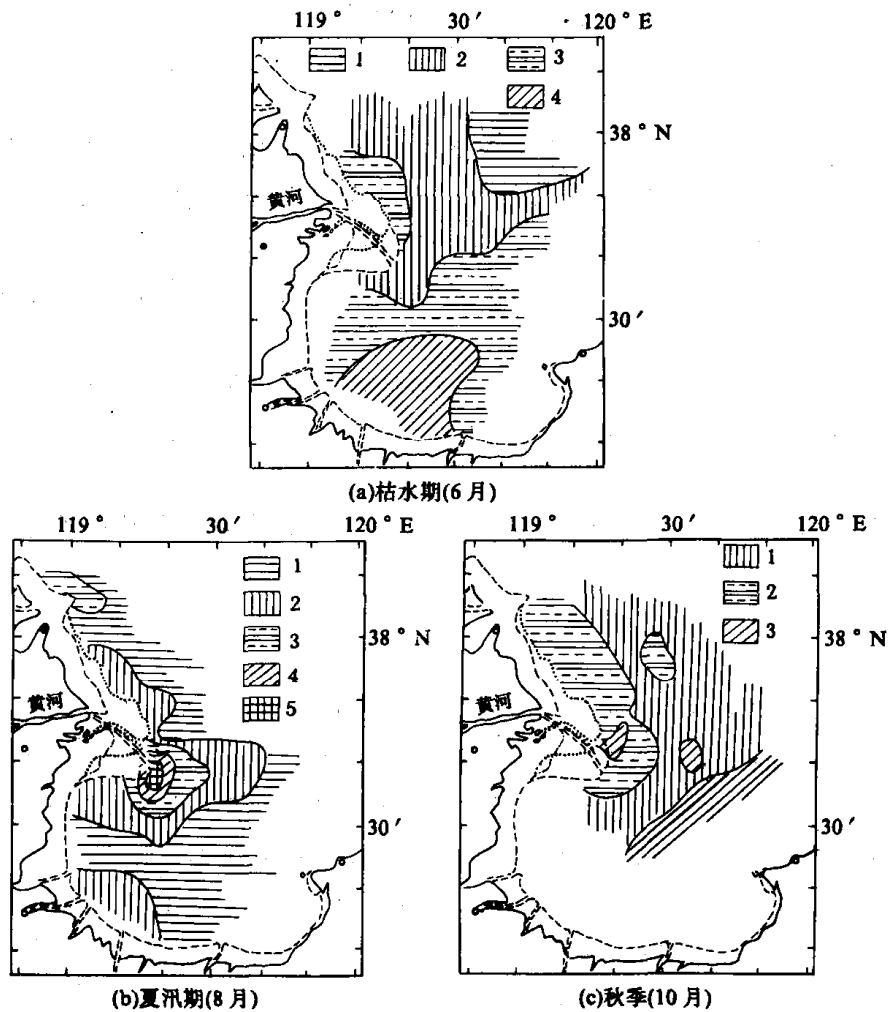


图 5 黄河口区沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布

(a) 1 为大于 -24×10^{-3} , 2 为 $-24 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3 为 $-25 \sim -27 \times 10^{-3}$, 4 为小于 -27×10^{-3} ;

(b) 1 为大于 -24×10^{-3} , 2 为 $-24 \sim -25 \times 10^{-3}$, 3 为 $-25 \sim -25.8 \times 10^{-3}$, 4 为 $-25.8 \sim -27 \times 10^{-3}$, 5 为小于 -27×10^{-3} ;

(c) 1 为 $-24 \sim -26 \times 10^{-3}$, 2 为 $-26 \sim -27 \times 10^{-3}$, 3 为小于 -27×10^{-3}

比重也就相应提高。经过秋、冬季直至翌年春季整个枯水季节强劲偏北风浪的改造,初夏枯水期时该区沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布格局有了明显的变化(图 5(a))。在河口及向北和东北方向 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较重 ($> -25 \times 10^{-3}$), 这与悬浮体的主要运移方向一致。然而,莱州湾南部沉积有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值相当轻, $< -25 \times 10^{-3}$, 有的甚至 $< -27 \times 10^{-3}$, 与夏汛期的值 ($> -24 \times 10^{-3}$) 有明显差别, 这是水浅的莱州湾沉积物经风浪的再改造作用在同位素信息上的反映。

沉积物粒度参数的季节变化显示夏汛期在黄河口和莱州湾粘粒分布范围很广, 含量也高, 到秋季已有所减少, 经整个枯水期的改造, 至翌年初夏, 莱州湾中原有的粘土沉积物大部已被风浪移走, 剩下的是粉砂沉积物。比较同位素和粒度参数的季节变化趋势, 发现两者是完全一致的, 都反映出莱州湾中、南部水深小于 15 m 的海底沉积物的沉积一再悬浮季节性变化特征。

综上所述, 我们提出如下黄河细颗粒泥沙入海扩散的基本模式: 黄河泥沙入海通量的季节性变化很大。入海后的扩散方向存在着明显的季节性差异: 枯水期以北向为主; 夏汛期以南

向为主,北向次之。由于汛期入海泥沙量占全年总量的 75% 以上,因此,南向是黄河悬浮泥沙入海的主要运移方向。由线性混合模式从同位素数据估算出汛期黄河细颗粒泥沙向海扩散的理论距离为 36.5 km。但是,由悬浮体各项特性所说明的扩散方向和范围只是黄河细颗粒泥沙的“暂时”去向,并非最终归宿;海岸和海底沉积物的变化才是泥沙扩散的“最终”结果。海底沉积物变化的信息证实,汛期细颗粒泥沙“暂时性”地在莱州湾中、南部沉淀下来,但在枯水季节在优势强风东北风浪和西北风浪作用下,水深小于 15 m 的莱州湾中、南部海底粘粒沉积物难以停留,不断被风浪搅起而随水体向北方向搬运并进入渤海湾。这对于解决黄河约 2.6×10^8 t 细颗粒泥沙的去向问题提供了答案,是海洋沉积学上一个有价值的新发现。

6 结 语

(1) 黄河下游河水中 POC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的洪枯季节性变化可能是其物质主要来源季节变化的反映。

(2) 由一个年度的实测资料并结合水沙历史资料估算出黄河 POC 和总碳年均入海通量,数据表明黄河约占全世界大河总碳通量的 2.2%,为全球碳通量计算提供了一项基础数据。

(3) 综合悬浮体和沉积物中碳同位素及其它有关资料提出了一个新的黄河细颗粒泥沙入海扩散模式。

致谢 作者对加拿大贝德福海洋研究所 Tan 博士赠送标准石墨样品和玻璃纤维滤膜,吴世迎副研究员、白黎明、贾秀芳、金冶先、王慧艳、任红协助样品分析,王揆洋协助软件设计,黄河委员会垦利水文站、黄河 86 轮和黄海 102 轮全体船员协助采样,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Craig, H., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1953, 3: 53—92.
- [2] Degens, E. T., *Organic Geochemistry*, Springer-Verlag, New York, 1969, 304—328.
- [3] Silverman, S. R. et al., *Bull. Am. Ass. Petro. Geol.*, 1958, 42: 998—1012.
- [4] Sackett, W. M., *Mar. Geol.*, 1964, 2: 173—185.
- [5] Parker, P. L. et al., *Mar. Sci.*, 1972, 16: 139—147.
- [6] Gearing, P. et al., *Mar. Chem.*, 1977, 5: 251—266.
- [7] Sackett, W. M. et al., *Advances in Organic Chemistry*, Rueil Malmaison, 1973, 661—671.
- [8] Hunt, J. M., *Advances in Organic Chemistry*, Pergamon, Oxford, 1970, 27—35.
- [9] Meyers, P. A. et al., *Proceedings of the 26th Conference on Great Lakes Research*, Oswego, 1983, 2.
- [10] Shultz, D. J. et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, 40: 381—385.
- [11] Cai, D. L. et al., *Est. Coast. Shelf Sci.*, 1988, 26: 1—14.
- [12] Sharp, J. H., *U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1987—1990*, Vienna, 1991, 648—657.
- [13] Tan, F. C. et al., *J. Fish. Res. Board Can.*, 1979, 36: 678—682.
- [14] Tan, F. C. et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1983, 47: 125—132.
- [15] 杨作升等, *山东海洋学院学报*, 1985, 15(2): 121—128.
- [16] Gan, W. B. et al., *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers*, SCOPE/UNEP Sonderband, Hamburg, 1983, 459—470.
- [17] 侍茂崇等, *山东海洋学院学报*, 1985, 15(2): 81—95.