

南黄海海水中悬浮体的研究*

秦蕴珊 李凡 徐善民

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

J. Milliman R. Limeburner

(伍兹霍尔海洋研究所, 美国)

提要 本文通过对海水中悬浮体样品的过滤、分析及结合海水透光度测量, 得出了1983年11月和1984年7月海水中悬浮体的平面分布和垂直分布模式, 即: 水平分布有三个高含量区和两个低含量区, 黄河及长江的现代输入物质对中部深水区基本上没有影响; 垂直分布出现明显的层化现象, 11月份, 在密度跃层下缘出现悬浮体跃层。本区悬浮体含量和成分, 具有陆间海的过渡性特征。悬浮体的主要来源是海底沉积物的再悬浮, 其次是河流输入物和浮游生物。海浪是影响悬浮体分布的主要因素。潮流加强了海浪的作用, 并与海流一起, 将掀起的物质搬运他处。海底地形在一定条件下, 控制了海浪作用的临界深度。黄海中部冷水团影响了悬浮体的水平扩散和垂直扩散。

黄海是一个典型的陆间海, 沉积作用受周围陆源物质的强烈影响。黄河和长江年平均输沙量约为15.6亿吨, 占世界大河输沙量的 $1/5^{[1]}$ 。虽然现代黄河、长江的泥沙主要输入渤海和东海, 但是, 历史上, 它们都曾流入过本区。苏北浅滩——古黄河、古长江复合三角洲的存在, 以及调查区大量埋藏古河道的发现证明, 它们对本区沉积作用都曾发生过巨大影响。近20多年来, 不少学者从不同角度对其沉积作用进行了研究, 作为沉积作用重要环节的海水中悬浮体的研究, 虽然引起了重视^[2], 但报道不多。1983, 1984年, 中国科学院海洋研究所和美国伍兹霍尔海洋研究所合作, 使用“科学一号”调查船对南黄海沉积过程及晚第四纪地质历史进行了两个航次的调查, 其中包括对悬浮体的空间变化和季节分布的观测, 以便查明现代陆源物质对本区的影响过程。调查中分别在55个站位采集了上、中、下三层水样, 同时进行了海水透光度观测(图1), 悬浮体垂向连续分布的资料是利用悬浮体含量与

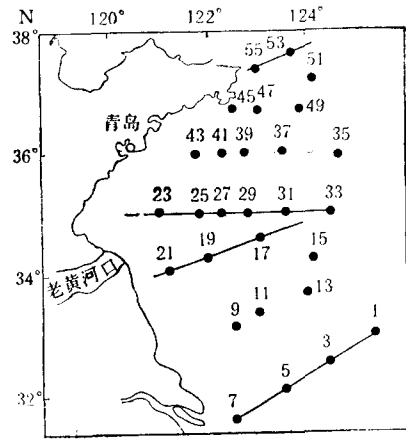


图1 悬浮体测量站位

Fig. 1 Suspended matter survey stations

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1462号。

郭玉洁研究员鉴定硅藻, 郑铁民、姜秀衍、李本兆、黄裘获、张捷阳、段伟民等同志参加了海上调查, 蒋孟荣、高淑贤、张弘等同志清绘图件, 谨此致谢。

收稿日期: 1987年9月19日。

透光度¹⁾相关分析求得的。

一、悬浮体含量与海水透光度

光束在海水中传播，因受海水中悬浮颗粒的影响而衰减。取海水中悬浮体含量及同步观测的透光度资料¹⁾进行回归分析，令 y 为透光度， x 为悬浮体含量，则：

$$y = 82.321e^{-0.079x^2}$$

相关系数 $r = 0.9126$ ，相对于 1% 的检验值为 0.372，相关良好(图 2)，如果直接对透光度取对数值，则两者之间呈线性关系，即

$$y = 0.655 + 0.332x^2$$

因此，用透光度的连续资料，据上述两式，都可算得测点悬浮体的垂向连续分布值。

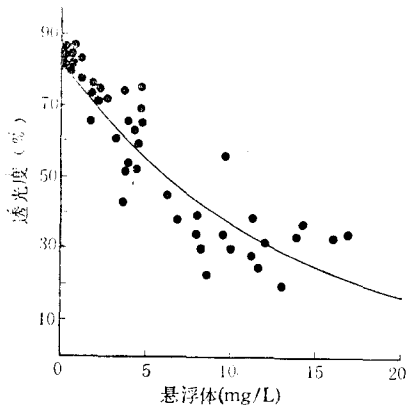


图 2 海水透光度与悬浮体含量相关曲线
Fig. 2 Relation between transmission and suspended matter

二、1983 年 11 月悬浮体的含量分布

已有专文论述²⁾。为了便于对比，本文仅列举其 4 个基本特征(图 3)：(1) 平面分布可分为三个高含量区和两个低含量区，即苏北浅滩、长江口外和成山角外高含量区，南黄海中部和海州湾外低含量区。(2) 成山角外悬浮体含量较高的浑水，沿山东半岛南岸向西延伸，反映了黄河的泥沙对本区西北部的影响。(3) 长江口外悬浮体高含量区中有一低含量舌由南向北延伸，反映了台湾暖流的影响。(4) 受中部冷水团的影响，现代输入的陆源物质对中部深水影响很弱。

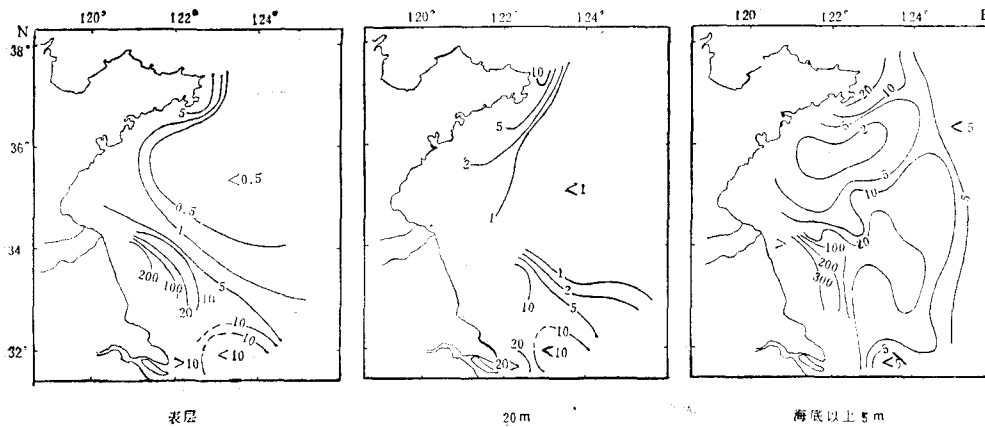


图 3 1983 年 11 月悬浮体含量 (mg/L) 分布
Fig. 3 Horizontal distribution of total suspended matter (mg/L) Nov. 1983

1) 透光度资料是由赵保仁同志提供的。
2) 式中各系数是根据 47 组资料求得的，随着资料的积累它们将进一步得到修正。

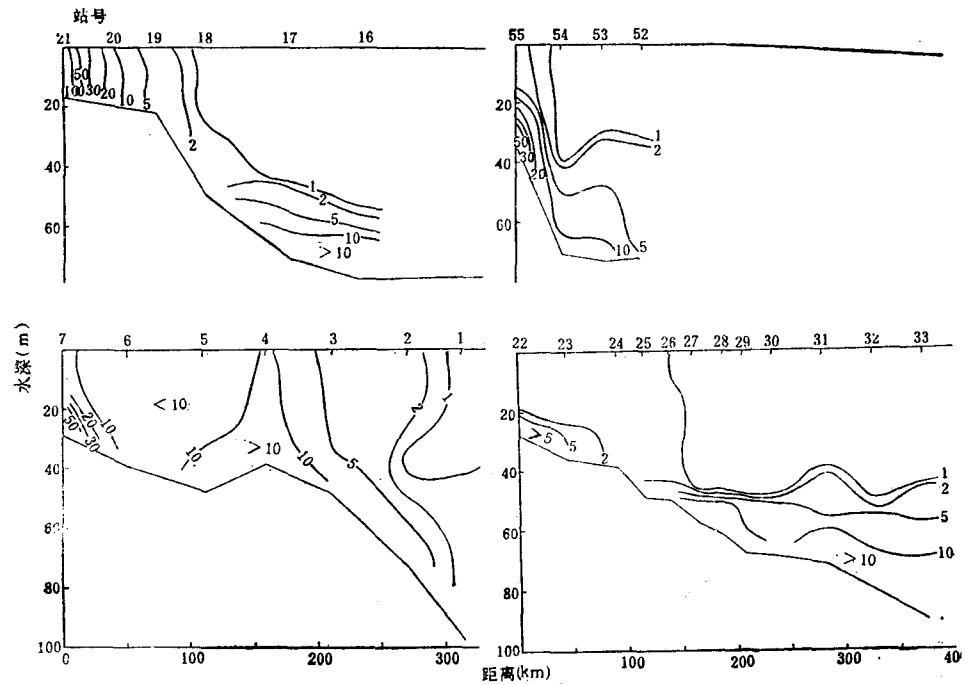


图 4 1983 年 11 月悬浮体含量 (mg/L) 断面分布

Fig. 4 Sectional vertical distribution of total suspended matter (mg/L) Nov. 1983

悬浮体垂向分布的特征是(图 4): (1) 长江口外的浑水向外海扩散的范围, 一般不大于 60km, 再往外, 含量迅速下降。从输沙的角度上看, 应以底层为主。(2) 海水中有明显的层化现象。在中部 40—50m 水层附近, 出现一个悬浮体含量梯度较大的水层, 其形式和特点类似于跃层, 故暂称之为悬浮体跃层。跃层以下, 悬浮体含量高, 海水浑浊; 以上, 海水较为清澈。

三、1984 年 7 月悬浮体的含量分布

悬浮体含量平面分布的模式和 1983 年 11 月相似(图 5)。但其含量普遍减少, 特别在浅水区, 更为明显。悬浮体垂直分布的模式也与上述相似(图 6), 即表现出由近岸向远海, 由底层向表层减少的趋势; 同时, 悬浮体的垂向分布也有明显的层化现象, 但跃层现象不如 1983 年 11 月份明显。

若将调查区的悬浮体含量与邻近海区进行对比, 可以看出, 该区明显地低于渤海而高于东海外陆架及近洋区^[6,9]。因此, 就悬浮体含量而论, 介于渤海和东海外陆架及近洋区之间, 具有明显的过渡性质。

关于悬浮体跃层的季节变化及形成机制等问题, 目前尚不清楚。从 1983 年 11 月的实测资料看, 跃层季节变化的位置大体接近于密度跃层的下部。

1983 年 11 月测量期间为小潮汛, 但有 8—10 级大风。当时, 波高 3m, 波周期为 9 秒。若按文献 [13] 推荐的公式计算, 其起动临界水深为 45m。如果考虑到冬季常有寒潮

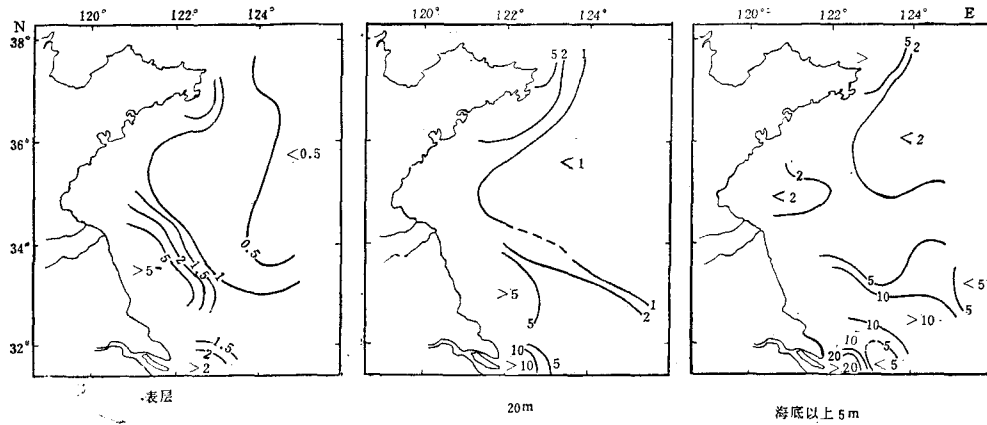


图 5 1984 年 7 月悬浮体含量 (mg/L) 分布

Fig. 5 Horizontal distribution of total suspended matter (mg/L) Nov. 1983

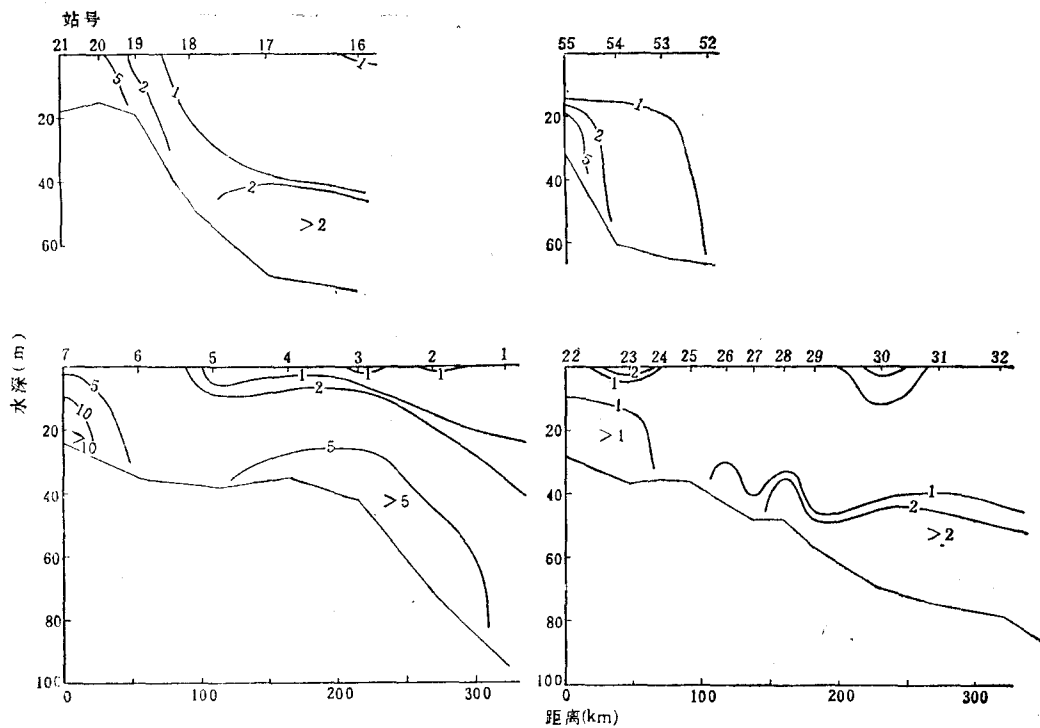


图 6 1984 年 7 月悬浮体含量 (mg/L) 断面分布

Fig. 6 Sectional vertical distribution of total suspended matter (mg/L) Jul. 1984

南下, 加大了水体垂直涡动的强度, 同时, 观测表明, 海底最表层的沉积物常处于半流动状态, 易于悬浮, 加之潮流影响, 有可能使更深处海底沉积物再悬浮起来。由此看来, 悬浮体跃层的出现, 可能与冬季暴风浪的搅动有关。跃层大致代表了沉积物垂直扩散的上界。它受海水密度层化的明显抑制^[3], 反过来, 跃层的存在也对海水的比重、浮力等重要物理

性质有所影响。应予说明,这里所指的比重不是海洋物理学中的定义,而是把海水作为一种含有悬浮体的浑浊液对待。

海水中悬浮体含量的大量增加,明显改变了其物理性质和力学性质。其中,特别是海水密度和滞性系数的增大,使海底沉积物切应力增加,增强了对海底的侵蚀作用。苏北浅滩潮流沙脊间的侵蚀沟的形成,可能与这种高浓度的悬浮物流的侵蚀作用有关。此外,具有高浓度悬浮体的海水,在一定的水流重力特征和泥沙粒径条件下,有可能形成浑浊流。

1984年7月测量期间风力小于4级,但正值大潮汛。这里虽是弱潮区,然而底层水中M₂分潮的流速却最大可达15cm/s^[1]。如果考虑到海底最表层的沉积物处于半流动状态,则潮流也可能使它们再悬浮起来,提高下部悬浮体的含量,也有可能形成跃层,但是,不如风浪形成的明显。

另一值得注意的现象是,在长江口外第3,4两个测站之间,两次测量中,海水中都出现悬浮体高含量值。其位置大体相当于水深40m的水下阶地的前缘^[2],从这里向东,海底坡度迅速增加。本区是沙质沉积物分布区,而悬浮体含量却相对较高,其原因尚需进一步调查。

四、悬浮体中的非可燃组分

将悬浮体放在500℃的高温下燃烧,其残渣的重量为非可燃组分的含量,失去的重量则为可燃组分。前者主要为碎屑矿物、粘土矿物及一部分硅质生物的骨骼[如轴环藻(*Adrinocylus*)、等刺硅鞭藻(*Dictyochoa*) (图7)、根管藻(*Rhizosolenia*)]。可燃组分中主要为生物的有机体及水中的褐色有机薄膜。此外,还见有数量不等的生物排泄的粪球(*Ceacal pallet*)等。

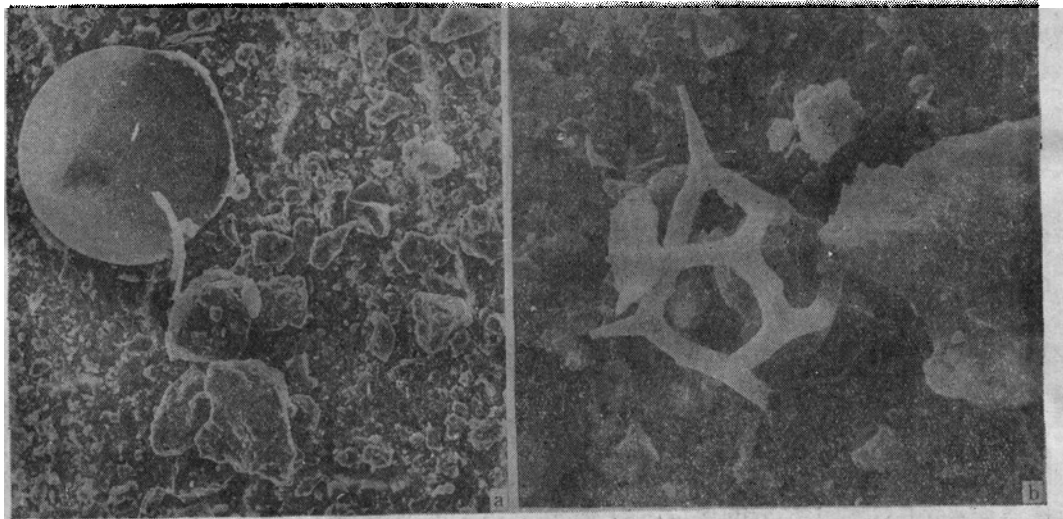


图7 第45测站表层海水悬浮体中的硅藻

Fig. 7 Diatom in surface water suspended matter at Station 45

由图8可以看出,表层悬浮体内非可燃组分的含量随水深和离岸距离的增加而减少。在苏北浅滩及长江口外,非可燃组分的含量>90%,说明那里的海水中主要是陆源碎屑

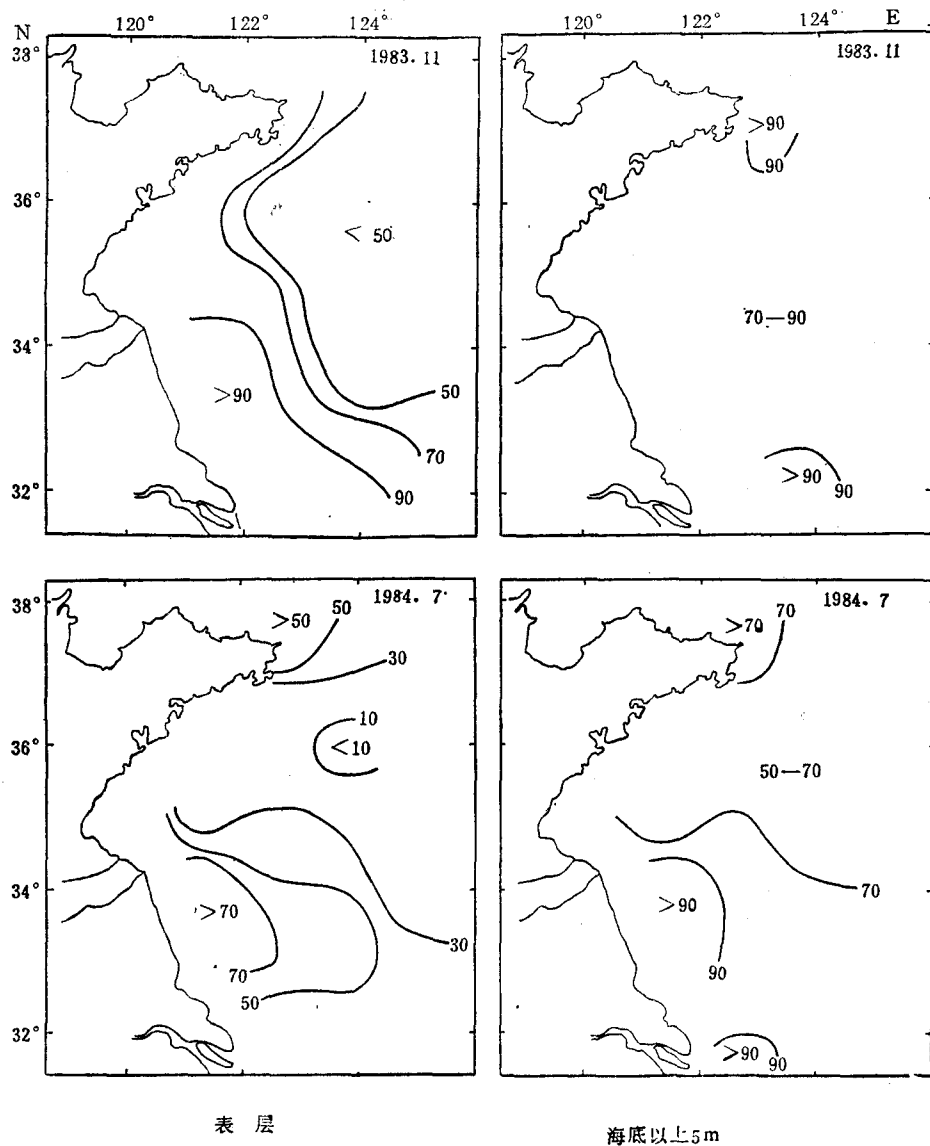


图 8 悬浮体中非可燃组分含量 (%) 分布
 Fig. 8 Concentration (%) distribution of non-combustible component
 in suspended matter

物; 大于 50m 的深水区, 非可燃组分的含量减少到 50% 以下, 而由浮游生物为主体组成的可燃组分的含量却明显增加。这可能是由于南黄海中部上升流影响的结果^[10]。同时, 底层海水中的非可燃组分的含量, 明显高于上层, 即使在中部深水区也达 70—90%。1984 年 7 月, 由于海水中浮游生物大量繁殖, 非可燃组分含量相对减少。然而, 在苏北浅滩等浅水区, 其含量仍然超过 70%。

和东海外陆架及邻近大洋比较, 调查区中非可燃组分的含量, 约高于前者 2—8 倍^[9]。这说明, 虽然目前由河流输入到东海区中的泥沙量不多, 但是, 本区受陆源物质成分的影

响仍然较为强烈,这也反映了南黄海具有陆间海的过渡性特征。

五、悬浮体的粒度分布

粒度分布是用库尔特计数器在现场测定的¹⁾。悬浮体颗粒包括了从粗粉砂到粘土等各种粗细不同的颗粒,分选性较差。标准离差 σ_ϕ 值一般为 1.0—1.4。其中以粒径 4—8 μm 的极细粉砂和 < 4 μm 的粘土粒级的含量较多。特别在长江口外浅海区,以上两种粒级的含量可达 60—80%。粒径大于 63 μm 的颗粒含量,除个别站位以外,一般不足 10%。表层海水中,悬浮体的平均粒径值的分布,在长江口和海州湾大于 7ϕ ; 深水区,除了个别海区以外,一般都小于 7ϕ 。也就是说,悬浮体的平均粒径有近岸浅水区细,远岸深水区粗的分布趋势(图 9)。但是,这种趋势与成山角附近海区不同,那里近岸的悬浮体颗粒较粗,而且,粗粒物质绕过成山角沿山东半岛南岸向西南延伸。

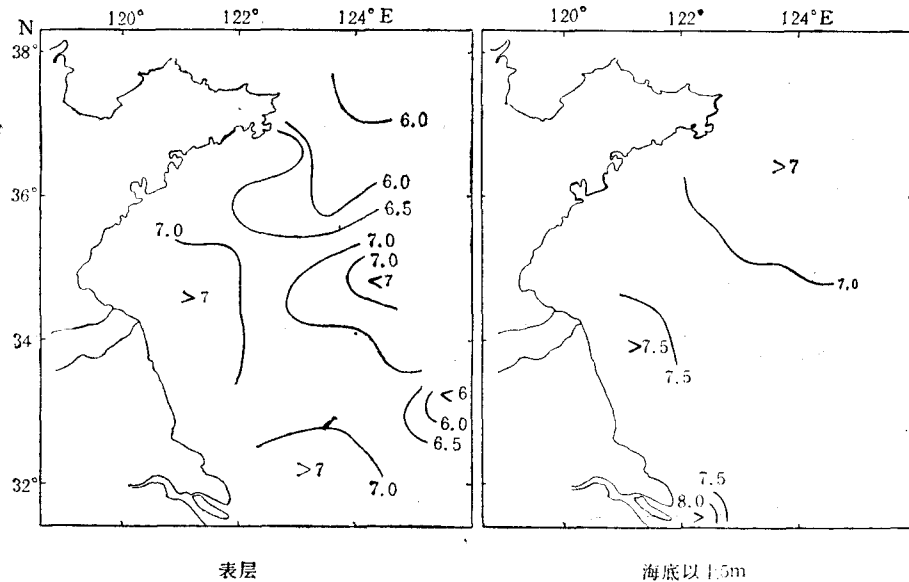


图 9 悬浮体平均粒径 (ϕ) 分布

Fig. 9 Mean diameter (ϕ) distribution of suspended matter

底层悬浮体虽然有从近岸向远岸变粗的趋势,但不如表层明显。与表层比较,底层的颗粒偏细。

粗颗粒的悬浮体中,主要是石英、长石、碳酸盐及云母类片状矿物,其次为大型浮游生物、生物粪球、有机膜及粘土颗粒的絮凝体等;细粒物质为粘土矿物。

发生絮凝作用的临界粒径为 32 μm ²⁾,最大不超过 64 μm 。盐度在 10‰ 时为发生絮凝作用的最佳值。长江向海中输入的悬移质砂中,粒径小于 32 μm 颗粒的含量占 80 (洪水期)—90% (枯水期) 以上³⁾。这些泥沙输入海中后,随介质条件的变化不断发生絮凝作

1) 粒度分析资料是钱正绪、陈开耀、李岩同志提供的。

2) 张志忠, 1981。长江口细粒泥沙的絮凝实验研究。杭州大学地理系,河口与港湾研究室。

3) 资料由南京河床实验站资料室提供。

用,粒度粗化,从而使大量细颗粒物沉积在河口及河口前近海区;相反,较粗的片状颗粒及部分矿物颗粒,却能飘浮到较远的海区。此外,细颗粒物易被生物吞食,变成粪球等,这都是形成近岸细、远岸粗的重要因素。

调查区中部深水区,表层水中悬浮体平均粒径较粗,主要是大型浮游生物含量相对增加的结果;低层粒度较粗则与海底沉积物的再悬浮有关。

六、讨论

1. 海浪对悬浮体含量分布的影响

和其他海区一样,明显大于对河流输沙量的影响^[8]。长江、黄河等河流,夏季输沙量一般比冬季大一倍左右,而近海冬季悬浮体含量却比夏季大5倍以上(除河口外)。中部深水区悬浮体含量的季节变化小于浅水区,这显然是受风暴的影响。1983年11月16—17日两天大风,苏北浅滩外缘,波高3m,周期9秒,测点10和11位置相同,分别于风暴前后采样,悬浮体含量差1(表层)—6倍(底层)。其中,粗粒含量也有增加(图10)。悬浮

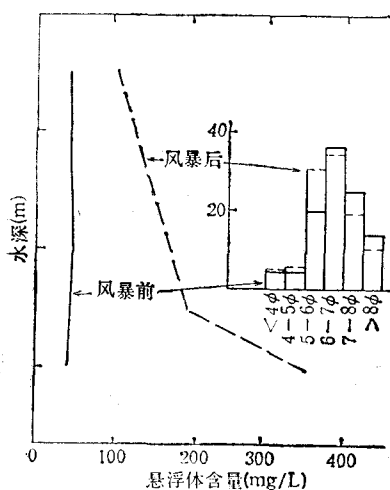


图10 风暴前后悬浮体含量及粒度变化
Fig. 10 Variation of concentration, grain size of suspended matter before and after storm

体含量的大量增加说明,大浪对其作用的海底有明显的侵蚀作用。此外,从不同周期的海浪对比看出,长周期涌浪对悬浮体含量影响明显的大于风浪。

2. 悬浮体与海底沉积物之间的关系

将同一站位底层悬浮体和表层沉积物样品进行分析比较证明,悬浮体主要来自沉积物中的细粒部分(表1)。如果将表层沉积物细粒级($<0.063\text{ mm}$)中的矿物成分进行比较,可以看出两者基本是一致的(图11)。

从悬浮体中可燃组分含量得知,有机组分在中部深水区达50—70%以上;近岸浅水区达5—30%。然而,沉积物中的有机质含量,在中部深水区一般为2%左右;近岸浅水区为0.8—1.5%。如果将悬浮体中的有机组分和沉积物中的有机质比较,可以看出,后者明显偏小。这意味着,悬浮体中的有机物质在沉积过程中或沉积以后,损耗达95%以上,因此,从某种程度上可以说,悬浮体来自沉积物而不同于沉积物。由于悬浮体的易动性和易损性,其性质与同地沉积物的性质不一定有直接联系。

对悬浮体来源之一的沉积物来说,如果水深相同,在同样水动力条件下,细粒沉积物将会给海水提供更多的悬浮体^[6]。但是,如果将海底沉积类型图和悬浮体含量分布图进行比较可以发现,两者并无明显联系。例如,在苏北浅滩悬浮体含量很高,但却沉积着细砂;海州湾外粗粒残留沉积物区,悬浮体含量很低。由此可见,海底沉积类型对悬浮体含量并不起决定作用,两者的关系,常因海底地形及水动力因素的综合作用而复杂化。

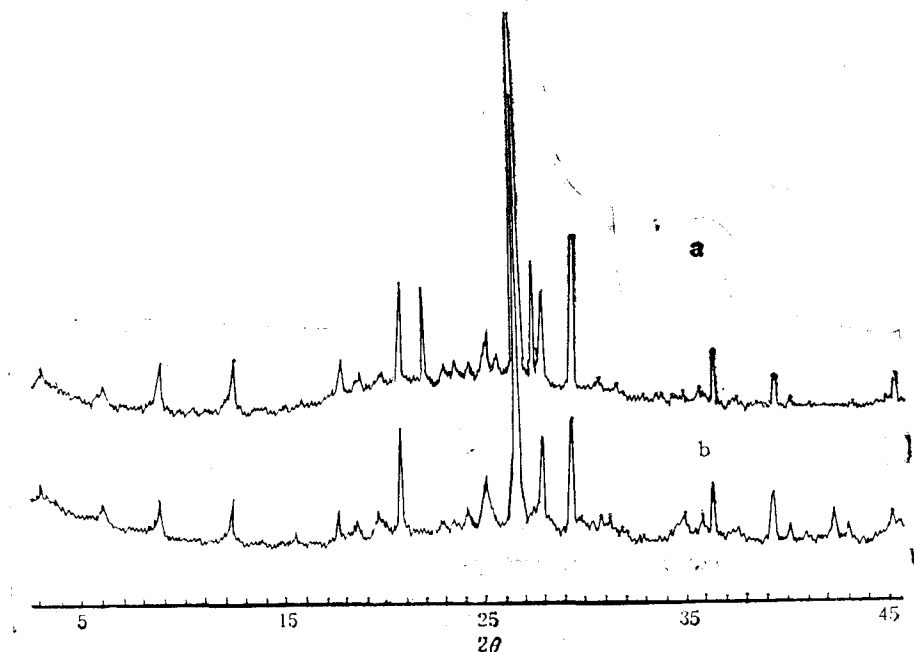


图 11 第 11 测站底层悬浮体 (a) 和表层沉积物细粒级 (b) X 衍射谱
 Fig. 11 X-ray diffractograms of suspended matter near bottom water layer (a) and fine grain in surface sediments (b) at Station 11

表 1 沉积物与悬浮体粒度成分对比 (%)

Tab. 1 Comparison of grain size between surface sediment and suspended matter in near bottom water layer (%)

站位 粒径 (mm)	11		13		21		28		55	
	沉积物	悬浮体	沉积物	悬浮体	沉积物	悬浮体	沉积物	悬浮体	沉积物	悬浮体
>0.063	17.2	3.6	15.7	0.4	18.4	0.8	1.2	0.5	1.5	0.5
0.063—0.032	6.7	4.5	6.1	0.8	16.0	5.1	10.8	4.5	31.0	6.5
0.032—0.016	13.3	30.9	7.8	6.2	13.5	11.1	11.5	16.5	20.0	25.8
0.016—0.008	13.3	32.7	4.4	30.1	11.5	19.4	10.4	37.2	11.0	29.6
0.008—0.004	7.8	18.9	11.0	38.2	7.8	31.6	9.7	27.1	4.6	22.2
<0.004	37.0	9.4	55.0	24.2	32.8	25.0	56.2	14.2	31.0	15.4

3. 悬浮体的来源及沉积过程

(1) 大风浪导致悬浮体含量显著增加,特别是浅水区;(2) 长江口外、成山角近海区, 分别有悬浮体高含量舌伸向调查区;(3) 近岸浅水区和底层海水中悬浮体内的非可燃组分高,中部深水区,特别是表层海水中则可燃组分低。以上三点分别代表悬浮体的三个来源,即:海底沉积物的再悬浮;现代长江和黄河等河流的输出物;海水中的浮游生物。

从悬浮体中非可燃组分和可燃组分的对比中可以看出, 整个调查区内非可燃组分占绝大多数, 它们包括海底沉积物的再悬浮和现代河流输沙两个部分。然而, 这两种来源中以哪一种为主呢? 据估计, 现代黄海周围, 包括从朝鲜河流入海的约为 1500 万吨^[7]和黄河通过渤海海峡输入的泥沙^[42], 总量一般不超过 2000—2500 万吨。长江年平均输沙量为 4.8 亿吨, 但其中绝大部分向东南和南部扩散^[4], 仅对调查区的南部有较小影响, 目前尚难以定量估算。若暂不考虑长江的影响, 黄海海水体积约为 17 000 km³, 假定入海泥沙全部悬浮于海水中, 它们所能形成的悬浮体平均含量约为 1.2—1.5 mg/L, 远小于调查区内实测含量。由此可见, 悬浮体的主要来源应当是海底沉积物的再悬浮。冬季风暴不但使苏北浅滩等浅水区的泥沙大量悬浮, 而且加强了苏北沿岸流的作用, 将再悬浮的泥沙向济州岛方向搬运。

综上所述, 调查区内悬浮体的扩散基本轮廓为 (图 12): 黄河入海泥沙的一小部分,

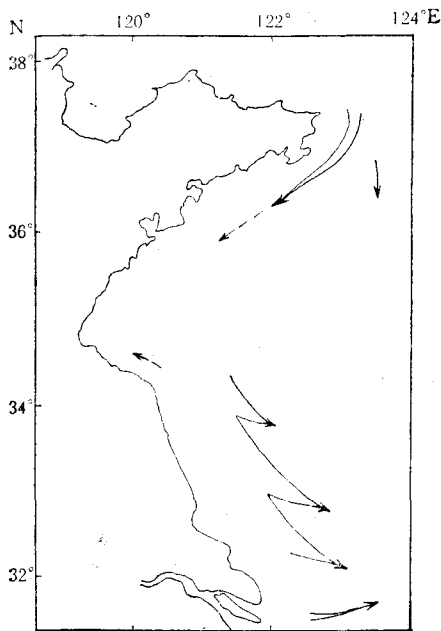


图 12 南黄海陆源悬浮体扩散方向示意
Fig. 12 Schematic diagram showing spread direction of terrigenous sediment in South Yellow Sea

通过渤海海峡, 绕过成山角, 沿山东半岛南岸向西搬运, 范围一般不超过崂山湾; 长江入海泥沙绝大部分向东和东南方向扩散, 而一小部分仍可以被冲淡水携带向东北, 影响调查区的南部; 苏北浅滩受潮流和海浪的侵蚀, 泥沙常处于搬运和再悬浮状态, 再悬浮的泥沙以悬浮体的形式向济州岛方向搬运; 海州湾外及中部深水区, 悬浮体含量很少, 在那里, 现代陆源物质影响很少, 沉积作用缓慢; 海州湾外残留沉积物分布区, 沉积速率几乎为零, 中部深水区, 全新世以来平均沉积速率一般不超过 5—10 cm/千年^[10]。若按现代悬浮体含量资料估计, 近代沉积率远小于此数。

七、结 论

1. 调查区海水中悬浮体的主要来源是海底沉积物的再悬浮(除河口外), 其次是现代河流输沙和浮游生物。由于悬浮体的易动性和易损性, 其性质和相同地区海底沉积物不尽相同, 因此, 从某种程度上说, 悬浮体来自沉积物而异于沉积物。

2. 黄河现代入海的泥沙主要影响调查区的西北和北部, 长江仅影响其南部边缘。它们对于中部深水区的直接影响很弱。

3. 影响悬浮体含量分布的主要因素是海浪。河流输沙的影响仅在近河口浅海区较为明显。巨大的海浪能够明显提高悬浮体的含量; 潮流加强了海浪的作用, 并与海流一起, 将掀起的物质搬运他处。海底地形在一定的条件下控制了海浪作用的临界深度。黄海中的冷水团, 影响了本区悬浮体的水平扩散和垂直扩散。

4. 调查区悬浮体的含量和成分,既不同于渤海那样的半封闭型的内海,又不同于开阔的东海外陆架及近洋区。它们具有陆间海那种过渡型的特征。

参 考 文 献

- [1] 丁文兰, 1985. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征。海洋科学集刊 25: 27—40。
- [2] 林美华, 1981. 东海海底地形特征。海洋科学 1: 24—27。
- [3] 赵保仁、胡敦欣、熊庆成, 1986. 秋末南海的透光度及其与环流的关系。海洋科学集刊 27: 97—105。
- [4] 秦蕴珊、郑铁民, 1982. 东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨。黄东海地质。科学出版社, 39—51 页。
- [5] 秦蕴珊、李凡、郑铁民, 1986. 南黄海冬季海水中悬浮体的研究。海洋科学 10(6): 1—7。
- [6] 秦蕴珊、李凡, 1982. 渤海海水中悬浮体的研究。海洋学报 4(2): 191—200。
- [7] 程天文, 1984. 我国主要河流入海径流量、输沙量对沿岸的影响。海洋学报 7(4): 460—471。
- [8] Bothmer, M. H., C. M. Parmenter and J. D. Milliman, 1981. Temporal and spatial variation in continental shelf and slope water off the north-eastern U. S. *Estuarine and Shelf Science* 13: 213—234.
- [9] Honjo, S., K. O. Emery and Satoshi Yamamoto, 1974. Non-combustible suspended matter in surface water off eastern Asia. *Sedimentology* 21: 555—575.
- [10] Hu Dunxin, 1986. Upwelling and sedimentation dynamic. *Chin. J. Oceanol. Limnol.* 2(1): 12—19.
- [11] Milliman, J. D. and R. H. Meade, 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology* 9(1): 1—21.
- [12] Qin Yunshan and Li Fan, 1983. Study of Influence of Sedimentation in the East China Sea. *Proceedings of SSCS*, 91—101.
- [13] U. S. Army CERC, 1975. *Shore Protection Manual*. 1: 4—61.

SUSPENDED MATTER IN THE SOUTH YELLOW SEA

Qin Yunshan, Li Fan, Xu Shanmin

(Institute of Oceanography, Academia Sinica, Qingdao)

J. Milliman and R. Limeburner

(Woods Hole Oceanographical Institution, U. S. A.)

ABSTRACT

Suspended matter in sea water has been investigated in the South Yellow Sea during 1983—1984. The result shows that horizontal distribution of suspended matter might be divided into five regions: The region off Northern Jiangsu coast, characterized by highest concentration of more than 200 mg/L in surface water; the region off the estuary of the Changjiang River and off the Chengshanjiao Cap with high concentration of suspended matter; the region of central part of the South Yellow Sea and off the Haizhou Bay with low concentration; the region around the Chengshanjiao Cap with turbid water carrying sediment from the Huanghe River stretching westward and exerting influence on the northwest part of this area; the tongue shaped region with higher concentration of 20 mg/L extending to the northeast and exerting influence on the south part of the investigated area. The central region of the South Yellow Sea are not immediately affected by present sediments discharged from the Huanghe and Changjiang Rivers.

The vertical distribution of the suspended matter is clearly stratified. It is interesting to note that there is a layer around which concentration variation gradient of suspended matter is larger. It looks similar to pycnocline or thermocline, so it might be called "suspended-cline". Its depth is located under the pycnocline and perhaps having effect on some important properties of sea water by mixing liquid with various suspended matter.

Most of the suspended matter is those resuspended from sea floor and the sediments from rivers and biogenic matter. The concentration and component of suspended matter are different from those in the semi-closed Bohai Sea and over the outer continental shelf in the East China Sea.

Main factor influencing the concentration distribution of suspended matter is wave. Sediment loads from the rivers only affect the estuary and nearshore areas. Tidal current strengthens the action of wave on sediment on sea floor. Cold water mass in the central region of the South Yellow Sea also exert influence on horizontal and vertical dispersion of suspended matter.