

南黄海海水中悬浮体垂向分布类型及跃层*

李 凡 丁宗信
(中国科学院海洋研究所)

海水中悬浮体的垂向分布并非上下均匀,而是具有明显的层化现象,这种情况与海水中的温度、盐度、密度等物理性质的层化现象一样,不是偶然的,而是常年存在的,同时,悬浮体含量的层化分布对于海水的某些物理性质有较大影响。

1958 年中国科学院海洋研究所在南黄海南部海水中悬浮体的调查中已发现了悬浮体含量分布的层化现象。1981 年, Kanau Matsuike 等 (1983) 在东海区悬浮体的调查中发

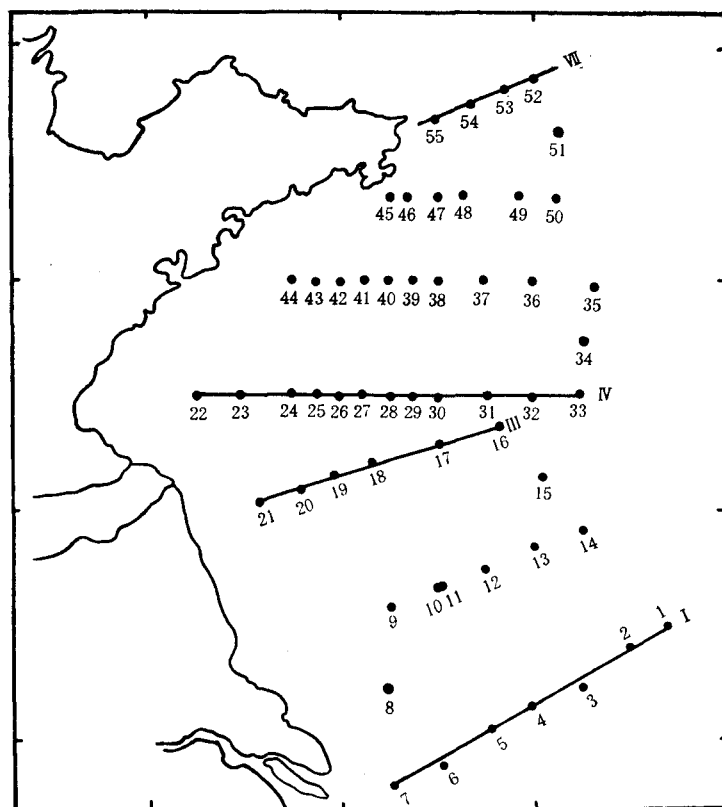


图 1 观测站位
(图中罗马数字为断面号,只标出使用数据断面号)

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2527 号。
本课题为国家自然科学基金资助项目, 4860237 号。
收稿日期: 1995 年 1 月 10 日。

现了长江口外浅滩区海水中光束衰减的层化现象。Gorsline 和 Swift(1977)在关于大陆架沉积动力学的论述中指出,海水密度的层化现象总是伴随着悬浮体浓度的层化现象。1983—1984 年中美南黄海沉积动力学联合调查中,作者(秦蕴珊等,1986)也发现了该区内海水中悬浮体含量的层化分布现象,并且提出了“悬浮体跃层”的概念。同期,赵保仁等(1986)在研究秋末南黄海海水透光度及其与环流的关系时指出,水体中透光度存在着一个“跃变层”。实际上,影响海水透光度衰减的主要因素是悬浮体浓度,因而,上述透光度之“跃变层”乃是悬浮体跃层在光学方面的表现。上述报道结果说明,悬浮体垂向分布的层化现象及悬浮体跃层的存在已经引起了有关学者的注意。但是,其性质、季节变化及成因等问题却很少有人研究,它们对海水许多重要物理性质的影响也鲜为人知,因而这些问题的解决在理论和实践方面均具有重要意义。

在总结了历年调查资料基础上,作者于 1988 年 4 月又在南黄海进行了补充调查,共设 55 个站位(图 1),对本区悬浮体分布中的层化现象、跃层问题及季节变化等进行了系统分析,并且对其成因及其物理意义进行了初步探讨。关于悬浮体的平面分布问题作者已有专文讨论,兹不赘述。

一、海水中悬浮体的垂直分布类型及季节变化

自长江口向北至成山头外,取其中 4 条纬向剖面,按不同季节,绘出悬浮体含量剖面分布图(图 2)。

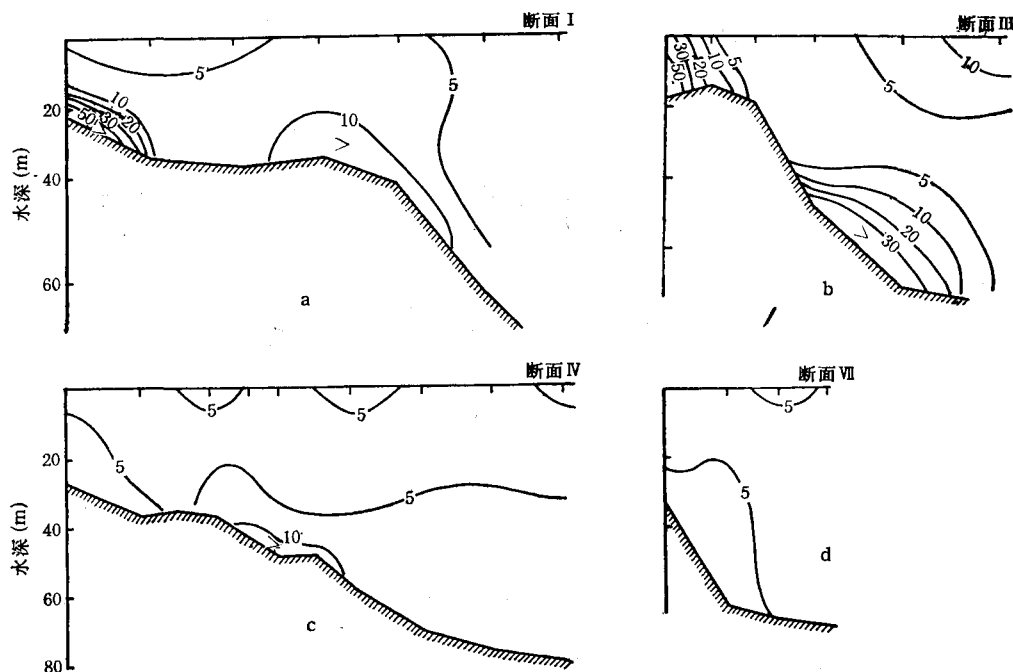


图 2 1988 年 4 月悬浮体含量(mg/L)断面分布

a. 断面 I; b. 断面 III; c. 断面 IV; d. 断面 VII (下同)

1. 春季 1988年4月测量期间风力3—4级,海况2—3级,断面I从长江口外向东北济州岛方向延伸(图2a)。从图上可以看出,靠近长江口的近海区,下层有一悬浮体含量较高的浑水舌,向东北方向可延伸至水深40m左右的6号站附近。这里的15m以下水层中悬浮体含量迅速增加到20mg/L以上,向下海水较为浑浊,15m以上的海水中悬浮体含量小于10mg/L。垂直方向为悬浮体含量分布自下而上由高而低呈正梯度层状分布。这种高浓度浑水舌向外延伸的现象,为河口区,特别是多沙性河口前浅海悬浮体分布的普遍规律。4号站位于东海区二级水下阶地的前缘,那里可能是古海岸的遗迹(董礼先等,1989)。其地势增高,呈浅滩状,底层水中悬浮体含量为10—20mg/L,高于两侧水体。推测,可能受外海传入的潮波对海底表层沉积物搅动的影响。

断面III位于老黄河口外,横穿苏北浅滩的北部(图2b)。如图所示,水深小于20m的浅水区水体中悬浮体含量分布上下层比较均匀。水深大于40m的海水底层悬浮体含量大于20mg/L,上部水层含量锐减,小于5mg/L,且分布均匀。该区底部水层中悬浮体含量的增加是因为这里位于南黄海冷水团西部锋面附近,悬浮体含量的增加可能与水团边缘水体的局部涡动,及斜坡附近外海潮波受阻、水体抬升,从而促使海底沉积物再悬浮有关。在南黄海中南部深水区表层海水中悬浮体含量增至10mg/L以上,出现了反梯度增加,这种异常现象是由于春季海水温度上升,大风引起了海水的垂直涡动,从而增加了底层水营养盐向上层水输送的通量,促使上层浮游生物大量增加的结果。观测表明,4月份表层海水中可燃组份的含量高达80—90%以上,其中不但有很多的浮游生物个体,而且还有其排出的粪便及因生物作用而产生的有机薄膜,后者常粘住部分细小的粘土微粒和碎屑矿物颗粒,成片状飘浮,膜的大小不等,形状也不规则,有的长径可达0.5—1.0cm。

断面IV横穿海州湾(图2c),整个断面水体中悬浮体含量较低,比较而言,底层高于上层,特别在第26—28号站附近的海底。这里地处苏北浅滩北部斜坡,又靠近南黄海冷水团西部锋面,悬浮体略高于两侧的海底。此外,上层海水中因浮游生物的大量富集,也有悬浮体局部高含量斑块,垂直分布上呈现出反梯度现象。

断面VII位于成山角以东海域(图2d),近岸斜坡区海底悬浮体含量相对较高,其他水体中含量均低。同样,表层海水中可偶见悬浮体含量稍高的斑块。

2. 夏季 1984年7月(图3),关于1984年7月和1983年11月悬浮体含量的垂向分布已在另文中详述(Qin Yunshan *et al.*, 1988),本文只作以下补充。

从图3中可以看出:(1)悬浮体在水体中的垂向分布形式与春季基本相同,但其含量普遍偏低,测量期间风力2—3级,海面平静,海水垂直涡动尺度很小,即使在苏北浅滩区,悬浮体含量一般也不大于10mg/L(图3b);(2)河口区由于汛期未到,而且风力较弱,水体中悬浮体含量不高,然而,在4号站附近(即上述之海底阶地的前缘隆起部分)仍有一高值区;(3)中部深水区表层水中悬浮体含量仍出现局部的高值斑点,这主要也是由浮游生物的富集引起的。

3. 冬季 1983年11月下旬,测量期间冷空气骤然南下,风速大于20m/s的大风延续刮了约36h,气温降至0℃左右,整个调查区悬浮体含量明显增加(图4)。从图4a中可以看出,长江口外浅海区底层海水中悬浮体含量已增至50mg/L以上,而且浑水层较厚,这种浑水层的形成显然是受风暴天气的影响。苏北浅滩上由于海水强烈的涡动混合,

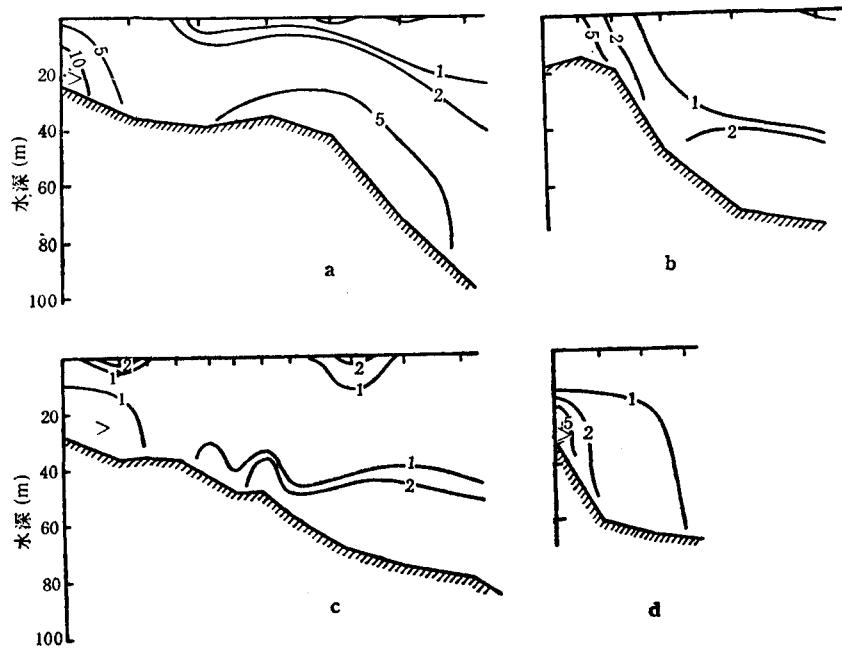


图3 1984年7月悬浮体含量(mg/L)断面分布

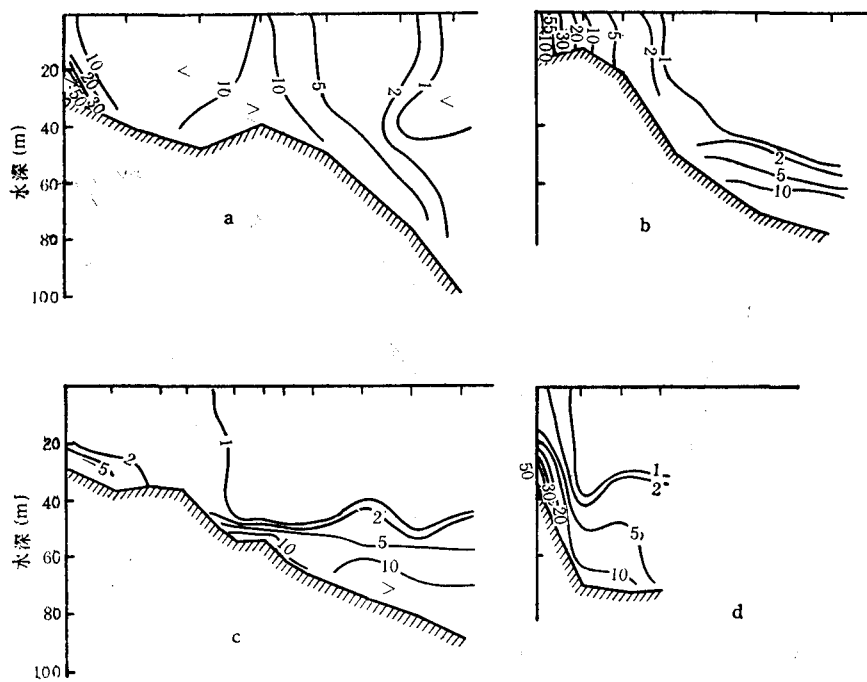


图4 1983年11月悬浮体含量(mg/L)断面分布

悬浮体含量不但剧烈增加,而且上、下层分布比较均匀(图4b)。海州湾中部及山东成山头外海区底层海水中悬浮体含量也明显增高,这个季节内,整个水体中悬浮体的垂向分布呈现出自下而上和由高向低的正梯度衰减现象,基本没有反梯度出现(图4c)。

综上所述可以看出,水体中悬浮体的垂向分布虽然因其地貌部位、季节变化、水动力条件等因素的影响而有所差异,但是,共同的特点是具有层状分布的特征。依其在海水中高低含量的分布形式,可以分为以下三种基本模式(图 5):

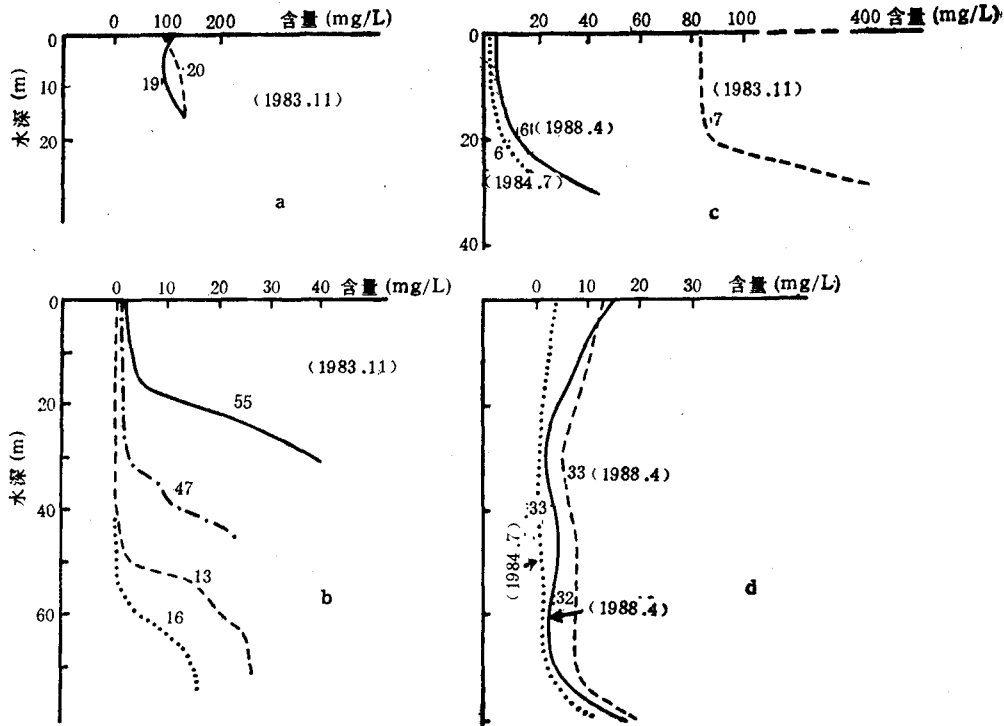


图 5 海水中悬浮体含量(mg/L)分布类型

(各含量曲线旁数字为测量站号,括号内为测量时间)

(1) 高浓度均匀分布型 主要出现在苏北浅滩浅水区的大风浪季节,是由于秋末和冬季冷空气频频南下,海水强烈混合而形成的。这种分布模式常在冬季浅滩区风暴期出现,因此亦可称为“浅滩风暴型”(图 5a)。

(2) 表层低底层高的正梯度分布型 其中又可以分成两类: a. 整个水体中悬浮体含量皆高,其中底层更高,这种类型主要出现在长江口外近海区,此外,在渤海的黄河口、滦河口(秦蕴珊等,1982),南美洲的亚马孙河等河口前浅海区皆有出现,因此亦可称为“河口前浅海型”(图 5b); b. 整个水体中悬浮体含量低,其中底层含量明显高于上层。这种分布模式主要出现在水深大于 40m 的远岸深水区,其中又以冬季风暴季节最为典型,故亦可称为“风暴深水型”(图 5c)。

(3) 表层和底层含量高,中层含量低的“双梯度型” 如上所述,此类主要出现在调查区中部深水区,特别是春(4—5 月)、秋(8—9 月)季,浮游生物大量增加,故亦可称为“春(秋)季深水型”(图 5d)。8—9 月份没进行调查,仅根据浮游生物含量推测。

二、悬浮体含量分布的跃层及底部浑水层

从上述悬浮体含量垂直分布图中可以看到一个奇特的现象,即底部出现悬浮体含量

较高的浑水层,上部为悬浮体含量较低的清水层,两层之间等值线较为密集,悬浮体含量变化梯度较大,作者曾将其称为“悬浮体跃层”(秦蕴珊等,1986)。跃层以上海水清澈,其下部较为浑浊。观测表明,悬浮体跃层以较深水区冬季大风后出现较为明显,其位置与密度跃层大致相当,或者位于密度跃层之下(图6)。春、夏季节,无风或弱风天气条件下,除少数海区(如长江口外浅滩区及苏北浅滩前缘斜坡区)以外,其他水域则不明显。赵保仁等(1986)在观测秋末海水中透光度的分布时的结论,即在密度跃层以下5—10m处存在透光度值跃变区即是佐证。

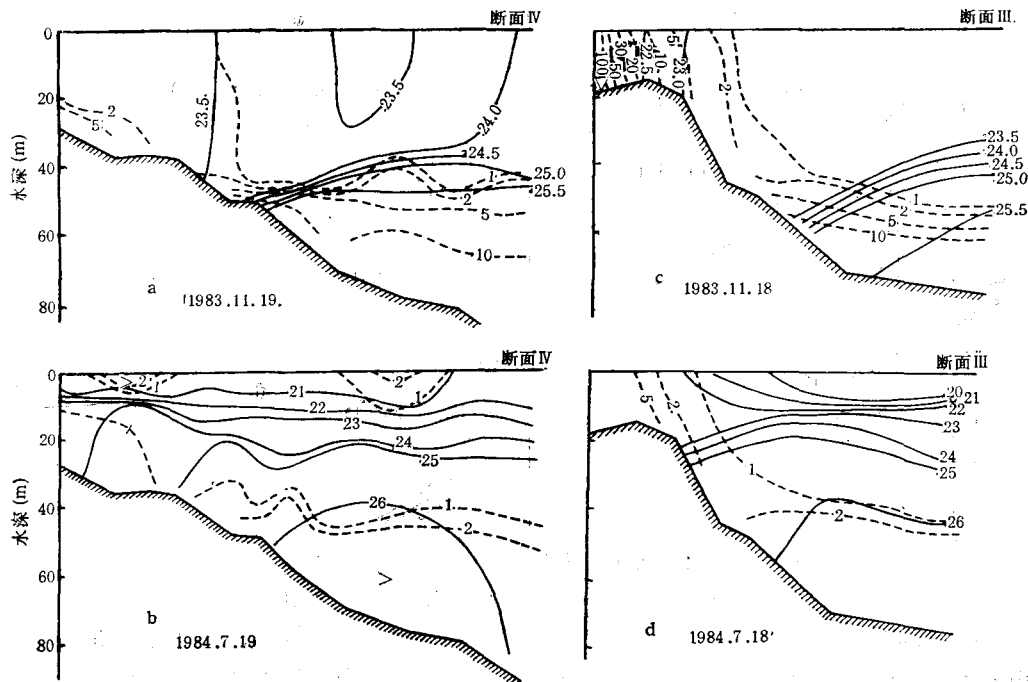


图6 悬浮体含量及海水密度的垂直分布
——海水密度; ----悬浮体含量 (mg/L)

Kannan Matsuike 等(1983)在报道长江口前近海区海水中光束衰减系数分布的层化现象时指出,位于温跃层之下的浑水层中的光衰减系数急增。Bothner (1981) 等人对大西洋西岸乔治浅滩区海水中悬浮体含量季节变化的研究中,也有关于层化现象及跃层的实例,特别是风暴之后更为明显。

上述资料表明,海水中悬浮体的垂向分布不像陆地河流水体中那样,自下而上含量由高而低按指数减小,而是在某一层悬浮体含量呈跃变式迅速减小。这种垂向分布中的层化现象和跃层现象的出现并非偶然,而是像温、盐、密跃层等现象一样,是在大陆架水体中经常可以见到的一种物理现象。Bothner (1981) 对乔治浅滩的调查表明,这种与悬浮体跃层有关的底层浑水现象,在开阔的大陆架区,大风浪过后可以维持7—10天。本次南海调查表明,上述现象可以维持5—6天,可以推测,一次寒潮南下引起的大风浪过后,底部浑水层及跃层现象可以维持5—6天,如果冬季冷空气不断南下,大风天气经常发生,

海水涡动强烈,在一定的时段内,某些海区的底部水层中可以经常出现这种浑水层及跃层现象。夏季,特别是5—7月份,调查区内大风天气少,浑水层及悬浮体跃层除了在河口及某些浅滩等少数地区外,一般不存在。在多沙性河口前浅海区,浑水及悬浮体跃层的出现常常是异重流或浊流存在的反映,例如,渤海内黄河口前浅海区便可能有异重流存在(秦蕴珊等,1982)。

三、悬浮体跃层成因初探

1. 底部浑水层的物质来源 为了探明悬浮体跃层的成因,首先需要查明底部浑水悬浮体的物质来源。河口区底部浑水层无疑是河流之固体径流入海后形成的。为了查明陆架区水体底层悬浮体的来源,作者分别采集了底层水中悬浮体及海底表层沉积物进行对比,结果表明,两者成分基本相同(Qin Yunshan *et al.*, 1988),说明底层海水中的悬浮体是来自海底表层沉积物的再悬浮。董礼先等(1989)曾经用潮流的数值模拟方法,计算了黄海海底冲刷区沉积物再悬浮的范围,结果在海底冲刷区。内底层海水中悬浮体含量高,可以作为底层沉积物再悬浮的证明。

2. 风暴对悬浮体跃层的影响 Bothner (1981) 曾经指出,夏季风暴增加了底部海水中营养盐向上层水传递的通量,刺激了浮游生物的增殖;冬季风暴则促使底部沉积物的再悬浮。Wells 等(1983)强调了冬季时大风浪促使底部沉积物的再悬浮,并且计算了某些海浪要素条件下的作用水深,进而估计了海底沉积物再悬浮的范围。沙玉清(1965)指出,对于粒径小于0.04mm的细颗粒泥沙来说,其起动流速大于扬动流速,即它们一经起动,随即扬动、再悬浮。据统计,1960—1982年的23年中,南黄海千里岩附近平均最大有效波高为5.2m,相应的周期为11.0s;最大波高7.7m,相应周期11.0s。在上述海浪情况下,其作用水深分别为79m和95m。在水深60m处的海底,水分子最大轨道速度分别为0.41m/s和0.61m/s,水体发生强烈涡动时,其水平分速大大超过那里表层沉积物的起动流速(0.2m/s)。在这种风暴影响下,海底沉积物再次悬浮,并随涡体上升而向上扩散,形成底部浑水层。据紊流扩散理论,在水平单位截面上,单位时间内向上扩散的悬浮体数量与悬浮体的含量梯度成正比,即底部悬浮体含量越高,向上层水中扩散的悬浮体数量越多;流速梯度越大,向上扩散的距离越大。另一方面,上层海水中的悬浮体颗粒在重力作用下不断下降。单位面积悬浮颗粒的沉积通量应当是悬浮颗粒沉速和悬浮体含量的函数。目前我们尚不能计算出一定动力条件下浑水层的顶部水深,进而预报悬浮体跃层的位置,但是,从理论上分析,当底层悬浮体向上扩散与上层悬浮体向下沉降达到平衡时,这个平衡面应是浑水层的顶面,在那里将会出现悬浮体跃层。

3. 潮流作用 当底层水潮流流速大于表层沉积物的起动流速时,沉积物可以被掀动、再悬浮,然后借水体的垂直涡动向上扩散。对照调查区平均最大潮流分布图(丁文兰, 1985)和 M_2 分潮作用下的0.063mm粒径之泥沙悬移输运量的散度图(董礼先等, 1989)就会发现,悬浮体跃层出现的地区并不都是在潮流流速最大的海区(如苏北浅滩等),而是主要分布在潮流流速中等的中部深水区,或董礼先等(1989)计算的冲刷区,其位置大致相当于黄海中部冷水团及其边缘锋面的海区。苏北浅滩水深较小,潮流流速大,加上海浪作用,

水体垂直滑动强烈,极易产生悬浮体含量上下均匀分布的类型。潮流掀起的泥沙经过水平扩散,搬运到深水区,汇同那里再悬浮的泥沙才有利于构成底部浑水层及悬浮体跃层。

4. 黄海冷水团的影响 从上述海浪和潮流因素的分析中可以看出,底部浑水层及悬浮体跃层形成的关键在于沉积物再悬浮和向上扩散的水动力条件,特别是海浪作用下垂直涡动的强度。浅滩区海水垂直涡动强烈,悬浮体含量上下分布比较均匀。在中部深水区,大风浪能使海底沉积物再悬浮,同时还有黄海冷水团限制底部沉积物的向上扩散,故有利于底部浑水层及悬浮体跃层的发育。黄海冷水团盘踞的海区,海水密度发生明显层化现象。赵保仁等(1986)指出,密度层化对来自海底的悬浮体有明显的抑制作用,并推测这种密度的层化现象与本区海水之逆温层结构有关。丁宗信等(1986)指出,南黄海中冷水团区,海水温度之垂向分布存在着逆温层结构。覆盖在南黄海底部暖水层之上的冷水层温度较低,粘滞系数较大,限制了下层水体中再悬浮的泥沙透过冷水层向上层扩散,因而有利于浑水层的发育及悬浮体跃层的形成。

四、讨 论

(1) 悬浮体对海水密度有明显的影响,经典海洋学的观点是把海水当作一种溶液,因此海水的密度(ρ)定义为单位体积内所含海水的质量,它是海水的温度、盐度和压力的函数。实际上,海水并非单一的溶液,其中总是含有数量不等的悬浮物质。特别是在大陆架水体中,海水中悬浮体可达相当的数量。因此,从海洋地质学的观点看,海水又是一种悬浊液,尽管这种悬浊液内有液相和固相之别,但是,悬浮体的含量对于海水的密度是有影响的。这种影响在大洋水体中因悬浮体含量太少而不明显,但是在大陆架区,特别是在风暴以后的浅海区,悬浮体对于海水密度的影响不容忽视。含有大量悬浮体的海水密度,应当比只考虑温度、盐度、压力的海水密度大。为了与经典海洋学中密度的概念相区别,暂引入土质学中容重的概念,称含有悬浮体的海水密度为海水的“现场容重”,即单位体积内含有悬浮体的海水重量,并以 $\gamma_{s,D}$ 表示,它是海水温度、盐度、压力和悬浮体含量等4个因素的函数。为了便于同不考虑悬浮体含量的海水条件密度进行比较,在此也引用“条件容重”一词,并以 $\gamma'_{s,D}$ 表示。 $\gamma'_{s,D}$ 和 $\gamma_{s,D}$ 之间的关系是 $\gamma'_{s,D} = (\gamma_{s,D} - 1) \times 10^3$ 。

海水中的悬浮体由非可燃组分和可燃组分两部分组成,前者主要为碎屑矿物和粘土矿物颗粒及部分硅质生物骨骼,后者主要是生物有机体及一部分钙质骨骼。海水条件容重的计算方法是:将海水的现场密度加上海水中悬浮体非可燃组分的浮容重 TSM' ,可燃组分的浮容重基本上为零,可忽略不计,因此

$$\gamma_{s,D} = (\rho + TSM' - 1) \times 10^3 \quad (1)$$

$$TSM' = TSM \times P(1 - \rho/\gamma_s) \quad (2)$$

$\gamma'_{s,D}$ 为海水的条件容重(g/cm^3), TSM 为海水中悬浮体含量(mg/L), P 为悬浮体中非可燃组分的含量,一般为70%, γ_s 为悬浮体的干容重,一般为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$,假定 $\rho = 1.03000$,则当

$$TSM = 50\text{mg}/\text{L} \text{ 时, } TSM' = 0.2140 \times 10^{-4}\text{g}/\text{cm}^3, \gamma'_{s,D} = 30.0214$$

$$TSM = 100\text{mg}/\text{L} \text{ 时, } TSM' = 0.4280 \times 10^{-4}\text{g}/\text{cm}^3, \gamma'_{s,D} = 30.0428$$

$$TSM = 200\text{mg/L 时}, TSM' = 0.8560 \times 10^{-4}\text{g/cm}^3, \gamma'_{\text{tD}} = 30.0856$$

$$TSM = 500\text{mg/L 时}, TSM' = 2.1400 \times 10^{-4}\text{g/cm}^3, \gamma'_{\text{tD}} = 30.2140$$

$$TSM = 1000\text{mg/L 时}, TSM' = 4.2790 \times 10^{-4}\text{g/cm}^3, \gamma'_{\text{tD}} = 30.4279$$

海水中悬浮体的存在使海水密度增加;而悬浮体跃层的存在,有可能使海水的条件容重出现跃层,其位置比海洋学中的密度跃层的位置偏低。

(2) 海洋学家早已认识到海水中的悬浮物能够使辐射线(声、光等)发生散射和反射,因而,能够使海水中的消光系数增大,悬浮体跃层的存在显然能够使底层海水消光系数呈指数函数关系迅速增加(Qin Yunshan *et al.*, 1988),上述 Matsuike、赵保仁等的观测也证明了这一点。

(3) 从地质学的观点看,海水中含有大量的悬浮体,引起了海水粘滞性系数的增加,因而也引起海水对海底切应力的明显增加,即底部浑水对于海底的冲刷力比清水明显增大。作者推测苏北浅滩上潮流冲沟的发育可能与底部浑水层的侵蚀作用有关,这也是黄河口、长江口等大河口区及大陆斜坡上冲沟形成的基本因素。

底部浑水层及海水中悬浮体跃层的形成及其对海水物理性质的影响的研究是初步的,今后需要物理海洋学家和海洋地质学家的共同努力对这一重要问题进行深入研究。

参 考 文 献

- 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。
- 丁宗信、胡敦欣、熊庆成,1986,南黄海秋末温、盐度垂直结构及其与流系关系的分析,海洋科学集刊,27: 87—95。
- 沙玉清,1965,泥沙运动引论,水利出版社,179。
- 林美华,1981,东海海底地形特征,海洋科学,1: 24—27。
- 赵保仁、胡敦欣、熊庆成,1986,秋末南黄海的透光度及其与环流的关系,海洋科学集刊,27: 97—105。
- 秦蕴珊、李 凡,1982,渤海海水中悬浮体的研究,海洋学报,4(12):191—200。
- 秦蕴珊、李 凡、郑铁民等,1986,南黄海冬季海水中悬浮体的研究,海洋科学,10(6): 1—7。
- 董礼先、苏纪兰、王康培,1989,黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系,海洋学报,11(1): 102—114。
- H.V. 斯费德鲁普、M.W. 约翰逊、R.H. 佛莱明(毛汉礼译),1958,海洋,科学出版社,42—81。
- Bothner, M.H., 1981, Temporal and spatial variation in suspended matter in continenal shelf and slope waters off the Northeastern United States. *Estuarine, coastal and shelf science*, 13: 213—234.
- Gibbs, R. J., 1976, Amazon River sediment tnsport in the atlantic Ocean, *geology*, 45—78.
- Gorsline D. S. and D. V. P. swift, 1977, Shelf sedimentary dynamics, a National overview, 63.
- Kannan Matsuike *et al.*, 1983, Turbidity distribution near ocean front in the coastal zone of the East China sea. *Lar mer*, 21:133—144.
- Qin Yunshan, Li Fan and Xu Shanmin, 1988, Study on suspended matter in sea water in the South Yellow Sea. *Chin. J. Oceanl. Limnol*, 201—215.
- Wells, J. T. *et al.*, 1983, Dispersal of selts and clays by winter manson surges in the Southeastern Huanghai Sea, proceedings of SSCS, China Ocean Press, 462—472.

VERTICAL DISTRIBUTION PATTERNS OF SUSPENDED MATTER AND NEAR BOTTOM TURBID WATER LAYER IN THE SOUTH YELLOW SEA*

Li Fan and Ding Zongxin

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

ABSTRACT

There are three basical vertical distribution patterns of suspended matter in seawater in the South Yellow Sea: even distribution with high concentration, positive gradient distribution and double gradient distribution. An important phenomenon in the seawater is the spring layer of suspended matter below the density layer where the concentration of suspended matter rapidly increases and forms the turbid water layer affecting greatly seawater physical parameters especially density. The density of seawater with suspended matter, called unit weight *in situ* of seawater, is a function of temerature, salinity, water depth and concentration of suspended matter, and can be calculated as density of seawater plus unit weight of noncombustibles in suspended matter.

* Contribution No. 2527 from Institution of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.