

东海陆架北部泥质区悬浮体的 絮凝沉积作用*

雷 坤 杨作升 郭志刚

(青岛海洋大学海洋地球科学学院 青岛 266003)

提要 1997 年 2 月在东海北部取得悬浮体和底质样品,通过粒度分析和扫描电镜及能谱分析,探讨了陆架北部泥质区悬浮体的絮凝沉积作用。结果表明,生物因素是泥质区悬浮体的发生絮凝的机制之一,可影响悬浮体在海水中的行为。生物活动产生的软组织、分泌物和粘膜等有机质可将矿物碎屑和生物骨屑粘结、吸附和捕集在一起形成絮凝体而迅速沉积。在悬浮体含量较低、水化学环境相对稳定的东海陆架,絮凝作用是泥质区得以形成的关键过程之一。

关键词 悬浮体,絮凝,东海陆架,泥质区,沉积作用

中图分类号 P36.21

东海陆架北部泥质区位于 125° — 127° E, 31° — 32° N (研究海域及站位设置图见雷坤等, 2001), 是东海陆架上的现代沉积区, 其沉积作用和机制是东海陆架物质“源”与“汇”研究及陆架边缘物质交换研究的关键和难点之一。对此许多学者已从悬浮物质的物源 (Yang *et al.*, 1983, 1994)、搬运 (Milliman *et al.*, 1985, 1989)、沉积动力条件 (Hu, 1984; Qu *et al.*, 1993)、悬浮体含量分布及输运 (秦蕴珊等, 1989; 郭志刚等, 1997; 孙效功等, 2000)、表层沉积物的粒度参数 (申顺喜等, 1993) 和固碳能力 (郭志刚等, 1999b) 等方面进行了研究。但着眼于悬浮体的絮凝作用的研究到目前为止还较少, 仅杨作升等 (1992) 研究了黄东海悬浮体中的有机包膜 (海水中的一种有机絮凝体) 的特征及沉积作用。本文首次通过实验手段, 探讨了泥质区悬浮体在水体中的絮凝机制, 并对其沉积效应做出初步分析。

1 取样与分析方法

1.1 悬浮体和底质样品的采集

样品来源于 1997 年 2 月中国科学院海洋研究所“科学一号”考察船在东海北部取得的悬浮体和底质样品。本文选取了位于泥质区的 111 站 (126° E, 32° N) 和位于泥质区西侧的砂质区的 106 站 ($124^{\circ}30'$ E, 32° N) (雷坤等, 2001)。于 2 月 15 日 15:00 在 111 站取样, 同日 00:45 在 106 站取样。其中悬浮体采样用 2500ml 的塑料采水器分层采取, 经双层微孔滤膜 (直径 47mm, 孔径 0.45 μ m) 过滤并洗盐, 即得到悬浮体样品。底质样品由蚌式挖泥斗取得。

* 国家自然科学基金重点资助项目 49136140 及 49676289 号。雷 坤, 女, 出生于 1973 年 12 月, 博士生。

E-mail: leikun@mail.ouqd.edu.cn

收稿日期: 2000-03-06, 收修改稿日期: 2000-11-20

1.2 分析方法

1.2.1 悬浮体扫描电镜及能谱分析 将滤膜上的悬浮体样品剪下少许喷金,使样品具导电性。然后在英国产 CAMBRIDGE S250 型扫描电镜及能谱分析仪下观察和分析。仪器的分辨率为 50A,最大放大倍数为 30 万倍。

1.2.2 悬浮体及底质样品的粒度分析 本文对 111 站 75m 水深处和 106 站 30m 水深处的悬浮体样品及两站底质样品进行了粒度分析。采用法国生产的 CILAS 940L 型激光粒度分析仪,实验在中国科学院海洋研究所沉积动力实验室进行。样品经超声波分散后进行测定,粒度间隔为 0.25ϕ ,精度为 2%。对悬浮体样品,首先将滤膜上的样品溶解到水中,搅拌后全部倒入仪器相应的容器中。冲洗盛悬浮体样品的烧杯,将冲洗液一并倒入仪器。对底质样品,取少量加水稀释,搅拌后倒入仪器,然后冲洗烧杯并将冲洗液倒入仪器。

2 分析结果

2.1 悬浮体的粒度分布

首先利用扫描电镜观察悬浮体样品的表面特征,111 站和 106 站的悬浮体组分包括矿物碎屑(石英、长石、云母、碳酸岩等)、粘土矿物、生物骨屑(包括硅藻、甲藻、有孔虫等)、粪团(海洋生物的排泄物)、有机包膜等,此外还有碎屑颗粒聚集而成的絮凝体(图 1a、b)。其中矿物碎屑、生物骨屑和生物排泄物的粒径多在 $10-40\mu\text{m}$ 间,粘土矿物的粒径一般小于 $5\mu\text{m}$ 。有机包膜和絮凝体的形状各异,极不规则,粒径在 $40-400\mu\text{m}$ 之间不等。与 106 站相比,111 站的絮凝体的数量多,粒径大。

将 111 站和 106 站的滤膜剪成相等的两片,把其中一片上的悬浮体样品转移入水中,经超声波充分分散后测定其粒度。发现 111 站的悬浮体的粒径范围较广,为 $3.75-11\phi$ (图 2a),在 $4.25-6.25\phi$ 出现峰值, $6.25-11\phi$ 间的粒径分布较均匀。106 站的悬浮体较 111 站细,粒径范围为 $5.5-11\phi$,在 $6-8\phi$ 出现峰值(图 3a)。将两站另一片滤膜上的悬浮体也转移到水中,加入足够的双氧水(H_2O_2)去除其中的有机质,然后进行粒度分析。可以发现,111 站的样品比未经 H_2O_2 处理时细得多(图 2b),粒径范围为 $5.5-11\phi$,并且在 $6-7.5\phi$ 和 $8.5-10.5\phi$ 出现双峰分布。106 站经 H_2O_2 处理的样品也变细(图 3b),但不如 111 站显著。其粒径分布同 111 站一样,范围为 $5.5-11\phi$,也在 $6-7.5\phi$ 和 $8.5-10.5\phi$ 出现双峰。

2.2 底质的粒度分布

111 站的沉积物为粘土质粉砂(图 4a),粒径范围为 $5-10.5\phi$,在 $6-9\phi$ 间出现峰值,反映出泥质沉积物的特点。106 站的沉积物为粉砂质砂(图 5a),粒径范围为 $-0.5-11\phi$ 。其中砂质沉积物占 60%,粉砂和粘土占 40%,这是在残留的砂质沉积物中混掺着少量现代泥质沉积物的结果。在两站底质样品中加入足够的 H_2O_2 去除其中的有机质,再进行粒度分析,可以发现,111 站底质样品在加 H_2O_2 后变化很大(图 4b),粒径范围为 $5.5-11\phi$,在 $6-7.5\phi$ 和 $9-10.5\phi$ 形成双峰分布。而 106 站的样品在加 H_2O_2 后粒径分布变化甚微(图 5b)。

综上所述,悬浮体和底质的粒径分布有以下特征: 1) 悬浮体的粒径分布在不同条件下

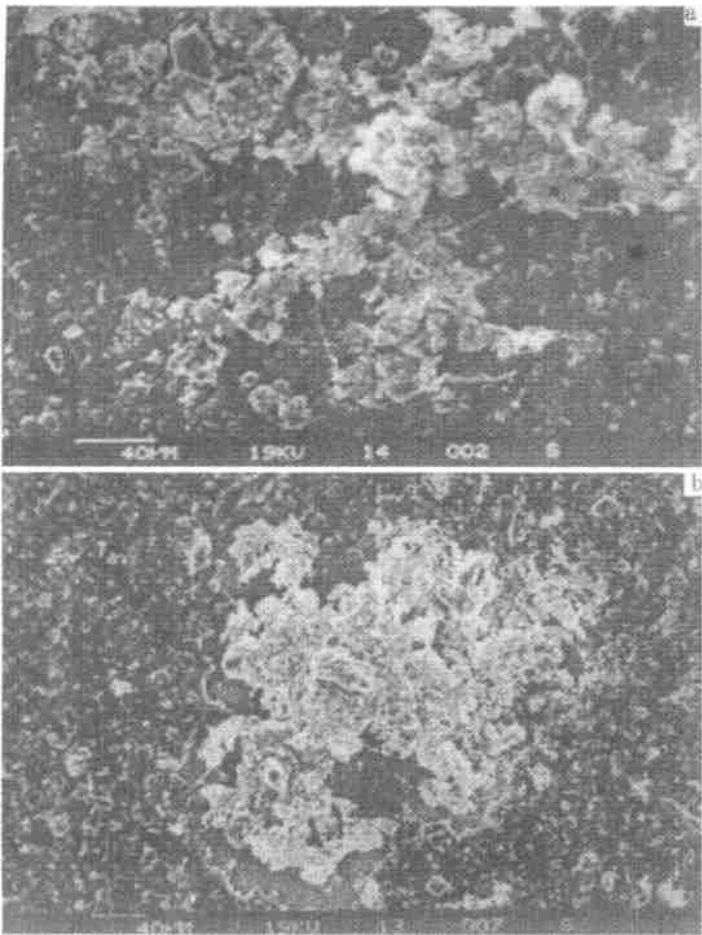


图 1 111 站(a) 和 106 站(b)悬浮体样品中的絮凝体

Fig. 1 Flocs in suspended matter at Station 111(a) and Station 106(b)

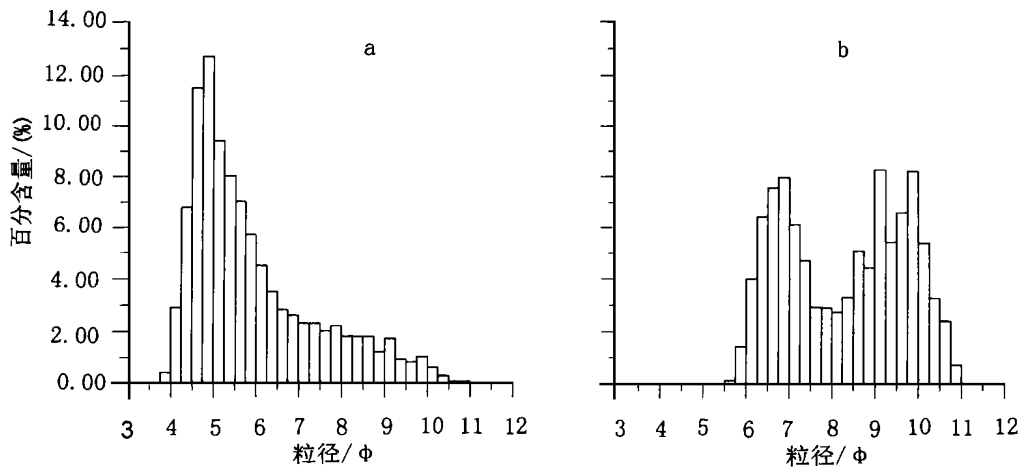


图 2 111 站悬浮体在经 H₂O₂ 处理前(a) 后(b) 的粒径分布

Fig. 2 Grain size distribution of suspended sediment at Station 111 before(a) and after H₂O₂ treatment(b)

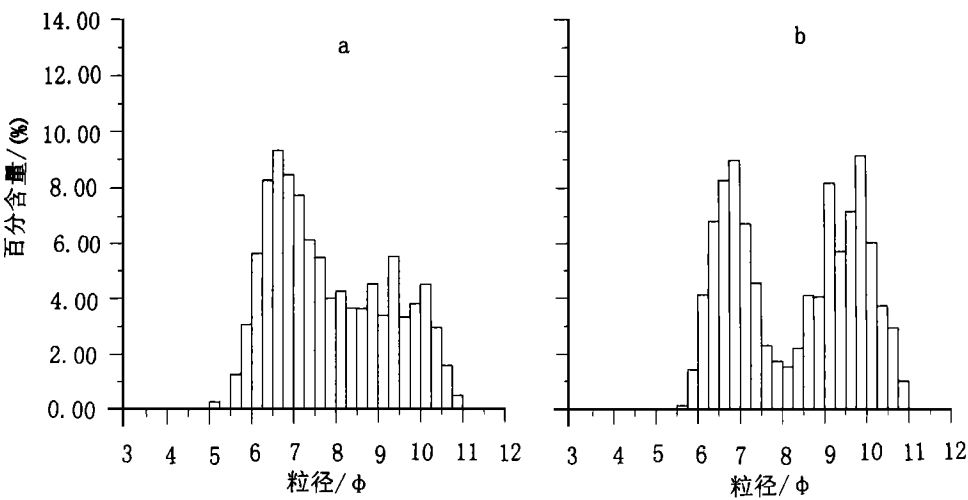


图 3 106 站悬浮体在经 H_2O_2 处理前(a)后(b)的粒径分布

Fig. 3 Grain size distribution of suspended sediment at Station 106 before(a) and after H_2O_2 treatment(b)

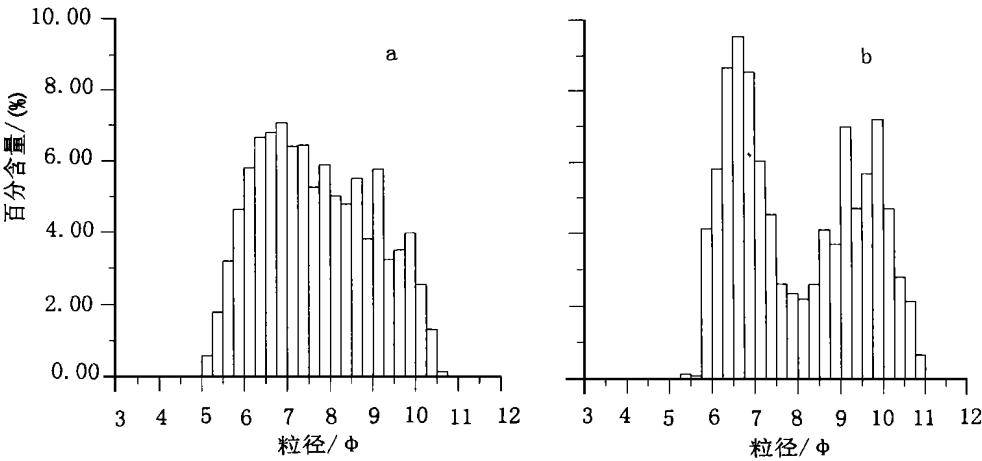


图 4 111 站底质在经 H_2O_2 处理前(a)后(b)的粒径分布

Fig. 4 Grain size distribution of surficial sediment at Station 111 before (a) and after H_2O_2 treatment(b)

差别很大。在扫描电镜下见到的絮凝体最大, 粒径可达 $400\mu\text{m}$; 仅经超声波分散的样品粒径次之; 用 H_2O_2 去有机质后, 样品的粒径最小。这种差别在 111 站尤为明显。2) 在悬浮体中, 矿物碎屑和生物骨屑本身的粒径, 111 站和 106 站差别不大, 但在 111 站可见到大量的絮凝体和粪团, 而 106 站的絮凝体数量少, 粒径小。3) 经 H_2O_2 处理前, 111 站和 106 站悬浮体和底质的粒径分布各不相同; 但经 H_2O_2 处理后, 111 站、106 站悬浮体及 111 站的底质的粒径分布基本一致。

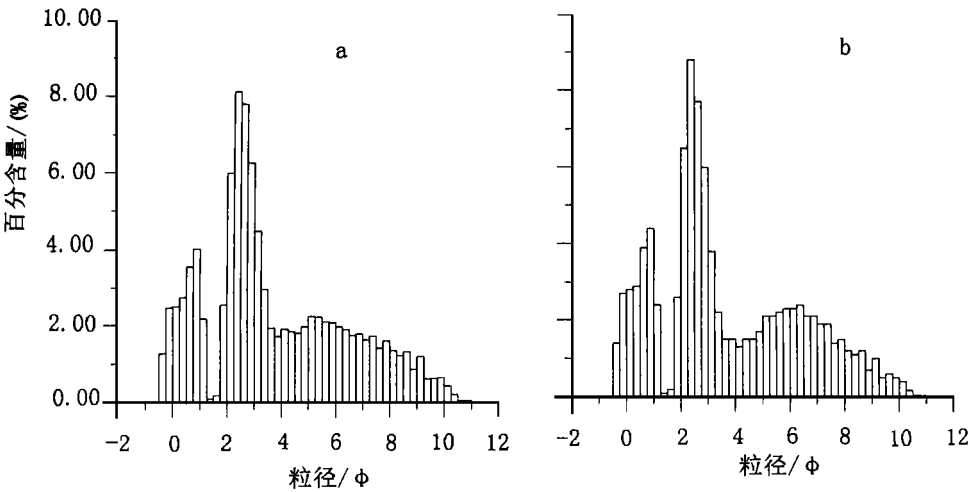


图 5 106 站底质在经 H₂O₂ 处理前(a) 后(b) 的粒径分布

Fig. 5 Grain size distribution of surface sediment at Station 106 before (a) and after H₂O₂ treatment(b)

2.3 生物因素在悬浮体絮凝沉积中所起的作用

海洋中存在许多浮游生物的遗体和海洋生物产生的粘液类的分泌物、粘膜和软组织等。能谱分析表明这些物质主要由 C、N、O、H 等元素组成,为有机质,在电镜下发现它们将与之接触的矿物碎屑、生物骨屑等粘结、吸附在一起,一些大的有机质膜还可将碎屑颗粒“捕集”起来形成大的絮凝体,粪团也可在其表面吸附细小的碎屑物质。在 2.1 的实验中,超声波破坏了悬浮体间的较为“脆弱”的连接,破坏了在野外存在的絮凝体,使悬浮体在粒径上表现为图 2a。加入 H₂O₂ 去掉了样品中的有机质后,原先由有机质粘结在一起的颗粒被充分分散,甚至以单个的形式存在,使悬浮颗粒表现得更细(图 2b)。106 站未经氧化处理的悬浮体的粒度分布(图 3a),比同样情况下 111 站的悬浮体细得多(图 2a)。这显然是由于 106 站处的水体来自沿岸,生物含量少,对碎屑颗粒的粘结没有 111 站那么强。而 106 站的悬浮体加入 H₂O₂ 后粒径分布变化不如 111 站显著,显然也是基于这一原因。可见,海水中有机的存在是絮凝作用得以发生的关键机制之一,它使得单个的碎屑物质聚集起来形成絮凝体。为进一步认识絮凝作用对碎屑颗粒在海水中的行为影响,此处将絮凝体和未絮凝悬浮体的沉降速度作一比较。对于絮凝体的沉降速度,据 Gibbs (1985) 公式:

$$W_s = 1.73D^{0.78}$$

其中 W_s 为絮团的沉降速度, D 为絮团的粒径(cm),在泥质区为 100—400μm。则絮凝体的沉速 W_s 为 0.287—0.874cm/s。不发生絮凝时,根据 Stocks 定律:

$$W_s = \frac{1}{18} \frac{r_s - r}{r} \frac{gD^2}{v}$$

其中 r_s 为泥沙的容重, r 为水的容重, g 为重力加速度, v 为水的运动粘滞系数, D 为悬浮体的中值粒径,此处等于 2.8×10^{-4} cm(图 2b)。取 $r_s = 2650\text{g/cm}^3$, $v = 1.4 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$, 则 $W_s = 5 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 。可见,絮凝作用改变了悬浮体的粒径和密度分布,进而改变了悬浮

体的沉速。发生絮凝作用后, 悬浮体的沉速增大百倍甚至千倍, 十分有利于悬浮体沉降。这表明, 絮凝这一生物地球化学作用在悬浮体的沉积过程中起着关键作用。

3 讨论

3.1 泥质区悬浮体的物源

111 站和 106 站的悬浮体在经 H_2O_2 处理前粒径分布各不相同, 但在处理后却基本一致(图 2, 图 3)。这意味着造成两者之间差异的原因是悬浮体中的有机质的含量的不同, 无机组分(矿物碎屑和生物骨屑等)的粒度分布相似。而 111 站的底质在经氧化处理后粒径分布亦类似于上述两者(图 4b)。这从粒度角度表明在冬季(悬浮体样品取于 2 月)泥质区很可能是由其上覆水体中的悬浮体沉积形成, 而其上覆水体中的悬浮体一定程度上与砂质区的悬浮体有同源性和继承性, 很可能来自泥质区西侧的黄海沿岸水(106 站位于黄海沿岸流向东海入侵的路径上)。这一结果与前人研究得到的结论是一致的(Yang *et al.*, 1983, 1994)。

3.2 泥质区悬浮体的絮凝沉积作用

泥质区的陆源物质主要来自老黄河口的再悬浮物质(Yang *et al.*, 1983, 1994), 它们多为片状矿物(如云母、粘土), 细粒的石英、长石等, 都具有体积小, 沉降速度低, 不易沉积的特点。在泥质区, 水体中的有机质将这些不易沉降的细小颗粒和生物骨屑粘结、吸附或捕集在一起形成絮凝体, 连同有机质一起沉至海底, 沉速达单个颗粒沉速的上千倍。在水化学和动力环境相对稳定的陆架区, 生物絮凝可能是导致悬浮颗粒聚集的主要原因, 对悬浮体的沉积作用无疑是十分重要的。可以说, 对于位于陆架远端的泥质区的沉积作用而言, 絮凝作用是除动力条件和物源之外的又一关键过程。由于有机质主要由 C、N、O、H 等元素组成, 絮凝作用对这些生源要素的垂直转移和全球循环也有重要意义。

由于生物活动的季节性, 泥质区的絮凝沉积作用也会表现出季节性。秋季在 $30^{\circ}00' - 31^{\circ}00' N$, $126^{\circ} - 127^{\circ} E$ 海域为叶绿素-a 的高值区, 是一个良好的中心渔场(李宝华等, 1992)。冬季在 $31^{\circ}00' - 32^{\circ}00' N$, $126^{\circ} 30' - 128^{\circ} 00' E$ 内出现叶绿素-a 的高值区, 同时也是一个良好的渔场(费尊乐等, 1992; Ning, 1998)。而冬季是物源供应和动力条件得到最佳配置的季节(郭志刚等, 1999a), 所以在冬季, 物源供应、动力条件和絮凝作用三者处于最优配置, 可能是悬浮体的絮凝沉积作用最有利季节。秋季虽也有繁盛的生物活动, 但物源供应和动力条件欠佳(郭志刚等, 1999a), 故絮凝作用可能不会很强。

4 结语

本文主要利用粒度分析的手段对东海北部泥质区的絮凝沉积作用进行了探讨。泥质区的生物作用不仅补充了泥质区的生源组分, 而且生物产生的软组织、分泌物等有机质可以促使不易沉降的陆源矿物碎屑和生物骨屑聚集在一起, 而后相对迅速地沉降至海底。因此絮凝沉积作用是泥质区沉积作用的关键过程之一。

由于样品处理技术的限制, 本文仅对泥质区絮凝沉积作用作了初步探讨。随着观测技术(如水下摄像)的改进, 今后将对泥质区悬浮体的絮凝现象作确切的描述, 对絮凝沉积作量化的研究。

致谢 中国科学院海洋所高抒研究员和汪亚平博士为本文提供了分析条件,并在实验思路上予以启发,特此致谢。

参 考 文 献

- 申顺喜,陈丽蓉,高良等,1993. 南黄海冷涡沉积和通道沉积的发现. 海洋与湖沼, 24(6): 563—570
- 孙效功,方明,黄伟,2000. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律. 海洋与湖沼, 30(6): 532—539
- 李宝华,费尊乐,1992. 1989年春、秋季东海北叶绿素-a的分布特征. 黑潮调查研究论文选(四). 北京:海洋出版社, 165—172
- 杨作升,郭志刚,王兆祥等,1991. 黄、东海水体中的有机包膜及其沉积作用. 海洋与湖沼, 23(2): 222—226
- 费尊乐,李宝华,黑田一纪,1993. 东海北部初级生产力. 黑潮调查研究论文选(五). 北京:海洋出版社, 147—157
- 秦蕴珊,李凡,徐善民等,1989. 南黄海水体中的悬浮体的研究. 海洋与湖沼, 20(2): 101—111
- 郭志刚,杨作升,胡敦欣等,1997. 春季东海北部海域悬浮体的分布结构与沉积效应. 海洋与湖沼, 28(增刊): 66—72
- 郭志刚,杨作升,雷坤等,1999. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化. 青岛海洋大学学报, 29(3): 507—513
- 郭志刚,杨作升,曲艳慧等,1999b. 东海中陆架浓度区及其周边表层沉积物碳的分布与固碳能力的研究. 海洋与湖沼, 30(4): 421—426
- 雷坤,杨作升,郭志刚等,2001. 东海不同底质类型海域春季悬浮体能量及影响因素. 海洋与湖沼, 32(1): 50—57
- Gibbs R J, 1985. Estuarine flocs: their size, setting velocity and density. J Geophys Res, 90: 3249—3251
- Hu D X, 1984. Upwelling and sedimentation dynamics I. The role of upwelling in sedimentation in the Huanghai Sea and East China Sea—A description of general features. Chin J Oceanol Limnol, 2(1): 12—19
- Milman J D, Beardsley R C, Yang Z S *et al*, 1985. Modern Huanghe derived mud on the outer shelf of the East China Sea: Identification and Potential Transport Mechanism. Continental Shelf Research, 4: 175—188
- Milman J D, Qin Y S, Park Y A, 1989. Sediment and Sedimentary Processes in the Yellow and East China Seas. In: Taira A, Masuda F ed. Sedimentary Faces in the Active Plate Margin. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 233—249
- Ning X, Liu Z Cai, Fang M *et al*, 1998. Physicobiological oceanographic remote sensing of the East China Sea: Satellite and in situ observations. J Geophys Res, 103, 21623—21635
- Qu T D, Hu D X, 1993. Upwelling and sedimentation dynamics. A simple model. Chin J Oceanol Limnol, 11(4): 289—295
- Saito Y, Yang Z S, 1994. Historical change of the Huanghe (Yellow River) and its impact on the sediment budget of the East China Sea. In: Iseki K, Koike I, Tsunogai S *et al* ed. Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal-Ocean-Atmosphere System. Japan: Hokkaido University (Sapporo), 7—12
- Yang Z S, Milman J D, 1983. Fine grained sediment of Changjiang and Huanghe river and sediment sources of the East China Sea. In: Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, Voll. Beijing: China Ocean Press, 436—446
- Yang Z S, Saito Y, Guo Z G *et al*, 1994. Distal mud area as a material sink in the East China Sea. In: Iseki K, Koike I, Tsunogai S *et al* ed. Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal- Ocean- Atmosphere System. Japan: Hokkaido University, 1—6

SEDIMENTATION WITH AGGREGATION OF SUSPENDED SEDIMENT IN A MUD AREA OF THE NORTHERN EAST CHINA SEA

LEI Kun, YANG Zu-Sheng, GUO Zhi-Gang

(*College of Marine Geoscience, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract Based on grain size analyses and observations with an SEM, sedimentation in response to aggregation of suspended material in a mud area of the northern East China Sea are studied. The results show that suspended sediment in the mud area become much finer after organic matter contained is removed. The organic matter is closely related to biological activities in the mud area. Biological activities supply biogenic matter for the mud area. The organic matter like mucus, secretion or organic films that are produced in biological activities can aggregate suspended particles (terrigenous detritus and biogenic detritus) by means of absorbing, agglutinating and or trapping. With this process, grain sizes of suspended sediment increase and it is much easier for suspended material to settle down to the sea floor. Therefore, aggregation is a key and significant process for the sedimentation of suspended material and the formation of the mud area, which has a small concentration of suspended sediment and is far from the land-source area.

Key words Suspended sediment, Aggregation, The continental shelf of East China Sea, The mud area, Sedimentation