

# 伊姆斯—道拉德河口悬浮体絮凝 过程及其控制因素\*

李安春 陈丽蓉

D. Eisma<sup>†</sup>

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

<sup>†</sup>(荷兰国家海洋研究所, 1790 AB, TEXEL)

**提要** 利用 1991 年 1 月用水下照相系统和自动图象分析仪等方法获得的悬浮体絮凝现场粒径资料, 并结合温度、盐度及悬浮体总量等对伊姆斯—道拉德河口的悬浮体絮凝过程及其控制因素进行了研究。结果表明, 絮凝物中值粒径为 74—131 $\mu\text{m}$ ; 最大粒径为 163—809 $\mu\text{m}$ , 随时间、地点不同而不同。在时间上, 絮凝颗粒大小的变化与潮汐变化相一致, 以潮相为周期呈周期性变化。在涨落潮初期稍后絮凝颗粒迅速增大, 后期逐渐变小; 在空间上(沿河), 一般向海颗粒较大。虽然, 当悬浮体浓度达到峰值时絮凝物粒径往往出现延迟, 但无论锚系站还是沿河漂流站絮凝颗粒大小与悬浮体含量之间都呈现正相关, 而与盐度、温度和有机组分的相关很差。由于受余流等的影响, 水体不能完全稳定下来, 在下一个潮周期来临时, 絮凝颗粒并非完全沉降, 部分颗粒仍停留在水体中参与下一周期的循环。这些颗粒的大小涨落潮有别, 中值粒径变化在 74—101 $\mu\text{m}$  之间, 最大粒径变化在 163—382 $\mu\text{m}$  之间。这反映了悬浮体絮凝和絮凝过程主要受潮流及其导致的水动力作用的控制。

**关键词** 絮凝 悬浮体 控制因素 伊姆斯河口

在河口地区以粘土矿物为主要成分的细颗粒物占据了沉积物的绝大部分, 由于其具有强的吸附性因而是非常重要的污染物载体。这些细颗粒物通常是以絮凝物的形式出现的, 它们的絮凝作用不仅能够影响水体的光学散射效应, 增加水体的透光度 (Baker, 1987; Gibbs, 1992), 而且可导致悬浮体沉降速率的大大增加, 从而加快港口航道的淤积。另外, 絮凝作用还可增强海底的稳定性, 增加抗侵蚀能力。这些都能影响细颗粒物质的行为和最终归宿。因此, 对细颗粒物质的絮凝过程及控制因素的研究具有重要理论和实际意义。水下照相的方法建立以来, 已有的报道仅限于沿河(或空间)的调查与研究 (Eisma, 1986, 1991; Gibbs, 1989)。本研究不仅报告了沿河调查结果, 而且充分考虑了潮流的动力作用。

## 1 研究区概况

伊姆斯—道拉德河口位于荷兰与德国之间(图 1), 入口处(A 站附近)平均水深 6m, 向上游变浅, B 站为 4.5m, C 站为 2.8m。该地区为半日潮, 潮周期平均 12.42h, 涨潮时为 5.75h, 落潮时平均为 6.67h, 潮差 3m 左右。A, B 测站附近潮流流速可达 70—90cm/s, C 站流速约为 60—70cm/s<sup>1)</sup>。最大流速出现在中潮位左右, 平潮时流速接近

\* 中国科学院留学回国人员择优基金项目。李安春, 男, 出生于 1954 年 11 月, 副研究员。

收稿日期: 1994 年 7 月 27 日, 接受日期: 1995 年 4 月 8 日。

1) 据荷兰国家水文站 1990 和荷兰国家海洋研究所 1987—1988 年未发表的资料。

零。落潮流速较涨潮流速大约 10—30cm/s。取样时为多云微风天气, 所以波浪作用可忽略。

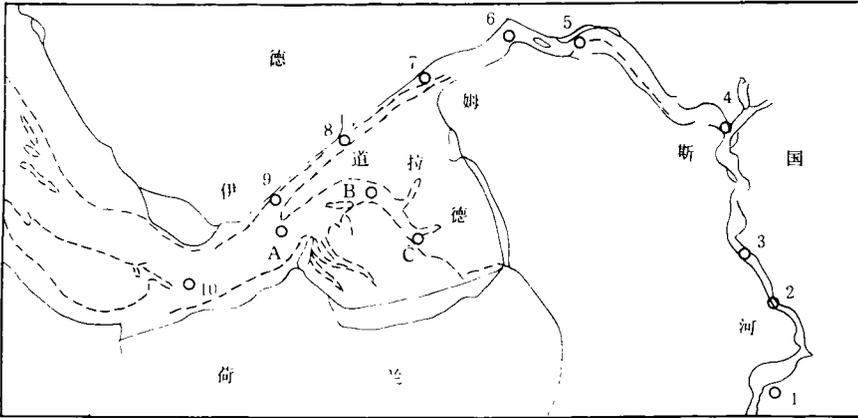


图 1 取样站位分布图

Fig. 1 Location of sampling stations in the Ems-Dollard Estuary

1—10 为漂流站; A, B, C 为锚系站。

## 2 研究方法

将水下照相系统现场拍摄到的胶片放在自动图像分析仪 (Eisma et al., 1990) 上测量絮凝物粒径。然后, 用 Dyer (1986) 修正的粒度统计公式求得中值粒径。为了对比, 人工测量了絮凝物最大粒径 (长、短轴的平均值)。最后, 对中值粒径和最大粒径分别与盐度、悬浮体总量、有机组分及温度进行了相关分析。共调查了 13 个站, 其中 3 个锚系站 (A, B, C) 位于道拉德河口内 (图 1)。测量时间为一个潮周期 (13h), 测量间隔 1h, 平潮和憩流时测量间隔缩短到 0.5h。取样深度均为中层。高潮时相机距海底约 2.7—3.7m, 低潮时约为 1.5—2.3m 左右; 10 个漂流站, 每站取样一次。同时还测定了悬浮体总量、有机组分、盐度和温度。悬浮体用  $0.4\mu\text{m}$  的微孔滤膜过滤, 有机组分是用烧失法在  $500\text{ }^\circ\text{C}$  下烧 8h 后求得。盐度是采用盐度计和滴定法测定。

## 3 研究结果

**3.1 絮凝物的形状** 在 1:10 的胶片上被放大的现场絮凝颗粒, 形如棉絮或白云, 边缘参差不齐, 其上多有空隙。较大的颗粒是由较小的颗粒聚集而成, 呈不同的几何形状, 有的象链状、有的象蜂窝状、还有的象圆形、椭圆形以及月牙形, 个别的呈带状 (图版 I: 2, 3)。有时可见到石英、长石和方解石等碎屑矿物, 生物壳碎屑和植物纤维等。当絮凝物浓度增大时这些无机碎屑增加, 相应地有机组分降低。

**3.2 大小变化** 拍摄到的絮凝颗粒最小为  $3\mu\text{m}$ , 最大为  $809\mu\text{m}$ , 在锚系站上絮凝物大小随时间变化, 与潮汐的变化相一致, 以潮相为周期呈周期性变化。不同站位间差别不大。A 站中值粒径为  $74—126\mu\text{m}$ , 最大粒径为  $196—613\mu\text{m}$ 。B 站中值粒径和最大粒径分别为  $75—120\mu\text{m}$  和  $222—808\mu\text{m}$ ; C 站为  $74—131\mu\text{m}$  和  $163—717\mu\text{m}$  (图 2a—f)。这 3 个站的中值粒径和最大粒径的平均值分别为  $99\mu\text{m}$  和  $397\mu\text{m}$ ,  $99\mu\text{m}$  和  $415\mu\text{m}$ , 以及  $102\mu\text{m}$  和  $436\mu\text{m}$ 。絮凝颗粒在涨落潮初期稍后迅速增大, 随着平潮和

憩流的到来而变小(图版 I:1—4)。涨落潮之间粒径的大小有别,共同特点是落潮时粒径大于涨潮时。在漂流站上,絮凝物颗粒大小从上游到下游呈增大的趋势,不同站位之间变化较大(图 3a, b),但是就这 10 个站的总体粒径范围而言与上述锚系站的相似:中值粒径平均为  $107\mu\text{m}$ ,最大粒径平均为  $420\mu\text{m}$ 。

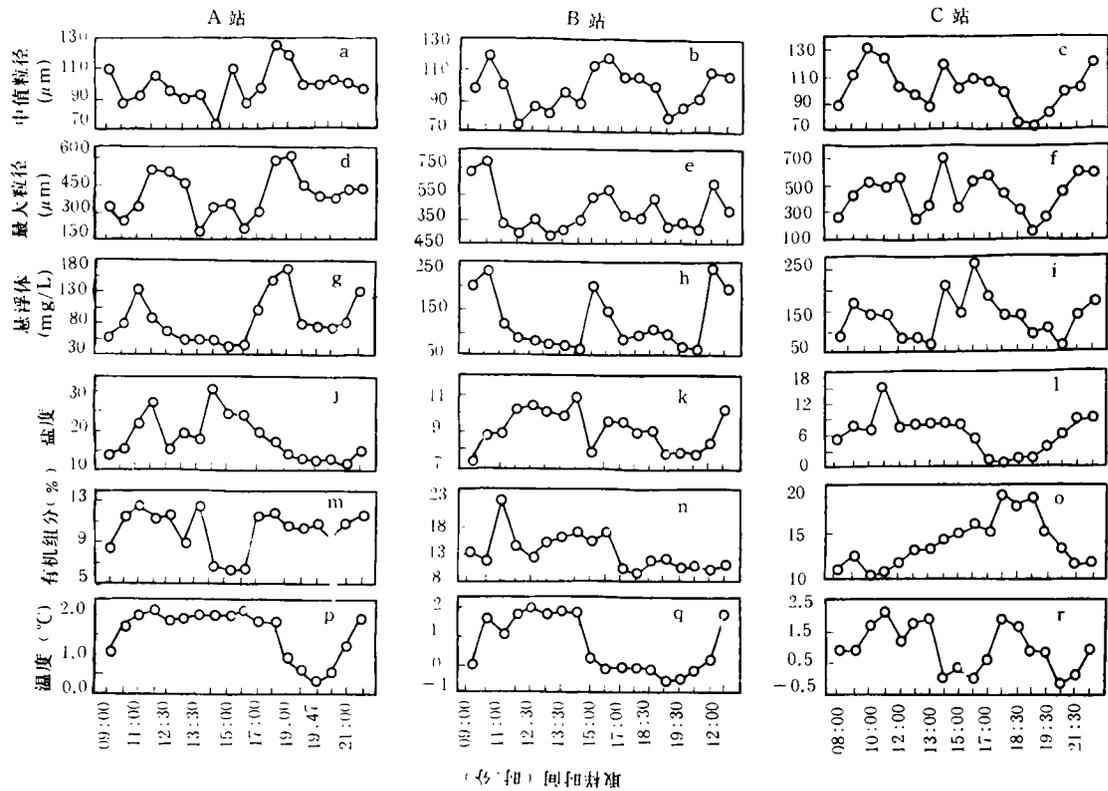


图2 锚系站絮凝物粒径、悬浮体总量、盐度、有机组分和温度的分布

Fig.2 Distribution of flocculation particle sizes, total suspended matter, salinity, organic content and temperature at the anchored stations

**3.3 絮凝颗粒大小与悬浮体总量的关系** 在锚系站上,像絮凝物粒径那样,悬浮体含量也随潮汐的周期变化而变化,高含量出现在涨落潮的初期,低含量出现在平潮和停潮时(图2g—i)。中值粒径和最大粒径都与悬浮体浓度呈正相关。然而,它们之间的相关性有站位与潮相间的差别,B,C站相关性较好,A站相关性较差;落潮时相关性较好,涨潮时较差。最大粒径往往在最高含量之后出现,粒径高峰比浓度高峰晚出现1h左右,这种延迟现象主要发生在涨潮初期。以A站最甚,絮凝物粒径和悬浮体含量的相关性很差。落潮时不存在延迟现象,相关性较好;B站和C站,虽然也有延迟发生但时间较短,和A站不同的是发生延迟时粒径仍有增加,总体相关性提高(图4)。从图4还可看出,在涨落潮的最初阶段各测站上絮凝物粒径和悬浮体间都有程度不同的负相关出现,以B站最明显,C站次之,A站最差。假如不发生延迟,不存在涨落潮的差别等,絮凝物粒径与悬浮体含量间的相关性会大大提高。沿河悬浮体总量自上游至下游总体上呈增

加趋势, 但各站之间变化很大, 在 4 号站大幅度降低, 而 9 号站大幅度增加。其含量在 1 号站为最低 (40.50 mg/L), 9 号站为最高 (353mg/L) (图 3c), 絮凝颗粒大小与悬浮体浓度间同样存在较好的正相关。

### 3.4 絮凝物粒径与盐度、温度和有机组分的关系

无论漂流站还是定点站盐度与絮凝的关系都不明显。上游盐度为 0.1 的 1 号站絮凝已经开始, 中值粒径是  $80\mu\text{m}$ , 最大粒径为  $306\mu\text{m}$ 。在上游河段的 1 号到 7 号站盐度相同 (图 3d), 但是, 絮凝物粒径的变化却是非常大的, 中值粒径为  $80-151\mu\text{m}$ , 最大粒径变化在  $267-639\mu\text{m}$  之间。值得一提的是, 中值粒径的最大值和最大粒径的次最大值都出现在该河段 (图 3a, b)。在锚系站上, 盐度主要随时间变化, 即随涨落潮变化 (图 2j-1)。站位之间亦有差别, 各站之间的变化范围: A 站为  $11.2-30.8$ , B 站为  $7.4-10.9$ , C 站为  $0.8-15.3$ 。在涨落潮期间, 当絮凝物粒径出现最大值时各站的盐度: A 站为  $26.8-17.2$ , B 站为  $8.8-9.6$ , C 站为  $7.3-8.1$ 。

总之, 从盐度变化较大的测站上絮凝物平均粒径的相似性、盐度相同测站上絮凝物粒径大的波动以及盐度与粒径间弱的相关性, 可以认为盐度对絮凝物粒径的影响不大。

温度在下游与盐度分布一致, 在上游受附近工厂排污影响。在 A, B 两站上, 涨潮初期温度迅速升高, 温度与盐度相一致。然而, 在 C 站则相反 (图 2p-r)。沿伊姆斯河温度的分布特征是上游明显高于下游 (图 3f), 温度与絮凝的相关性极差。

有机组分也是上游高下游低 (图 3e), 与絮凝物粒径和悬浮体总量之间呈负相关。在锚系站上, 有机组分不仅上游高于下游, 而且随潮汐变化而变化。其平均含量在 A, B, C 3 个测站上分别为 10.01, 13.6 和 13.9 (图 2m-o)。在 A, B 测站上, 涨潮时有机组分较高, 当悬浮体较高时有机组分与其呈微弱的正相关, 但是, 当悬浮体含量继续增加时正相关消失并变为弱的负相关。经扫描电镜观察证实, 这是由于当浓度升高时, 悬浮体含有较多无机碎屑矿物和生物壳屑等造成的。C 站与之相反, 落潮时的有机组分含量较高, 有机组分与絮凝间的总体相关性同温度的情况相似。

## 4 讨论与结论

自然水体中的悬浮体絮凝作用虽是一个复杂的物理、化学和生物过程, 但是, 归结起来它不过取决于两方面的因素: 一方面是能够将悬浮颗粒带到一起的颗粒碰撞频率;

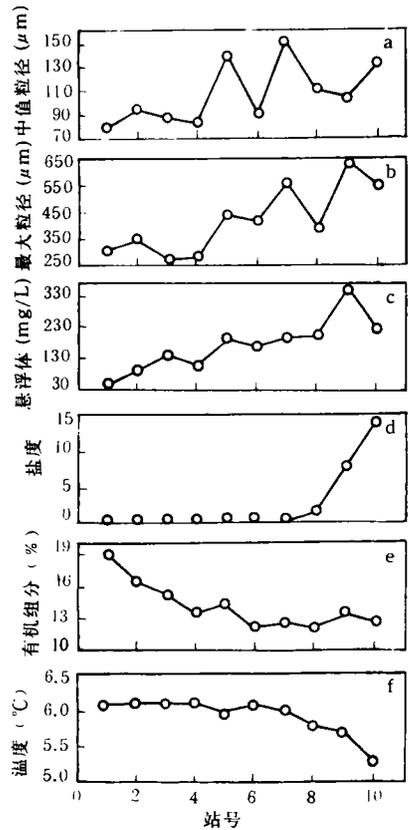


图 3 沿河漂流站絮凝物粒径、悬浮体总量、盐度、有机组分和温度的分布  
Fig.3 Distribution of floc particle sizes, total suspended matter, salinity, organic content and temperature at the floating stations

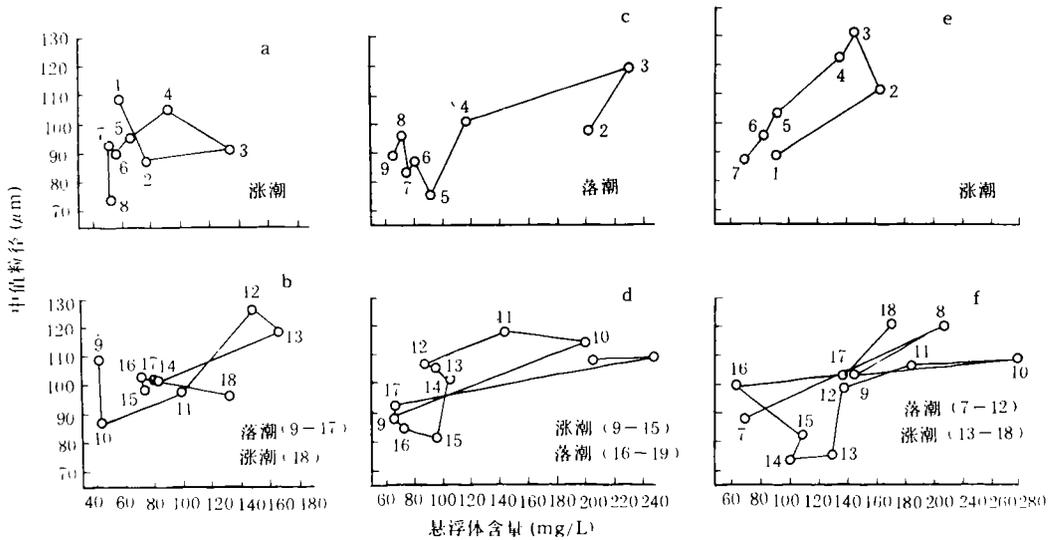


图4 潮相间絮凝物中值粒径与悬浮体总量的关系

Fig.4 Relationship between floc mean size and total suspended matter in tidal facies

a, b为A站; c, d为B站; e, f为C站。图内数字为取样次序。

另一方面是一旦颗粒接触能够将它们粘结在一起的颗粒的粘性。颗粒的粘性来自于颗粒本身(如粘土)、生物作用、有机质和盐度等。而颗粒的碰撞频率则取决于颗粒的浓度和水动力作用下颗粒的运动及其速度,与后者相比前者的作用较弱,所以在自然环境下容易被掩盖。在河口地区颗粒的运动主要由潮流及其导致的水动力作用引起。颗粒的碰撞则主要由水体的紊动和颗粒的运动梯度造成,在平潮时沉降梯度也起一定作用。碰撞次数是由颗粒的浓度,大小和运动决定的,颗粒越多、越小运动越快,颗粒接触的机会就越多,因此有利于絮凝。涨落潮初期不仅悬浮体浓度高而且颗粒比较小,在活跃的水动力推动下颗粒处于运动状态。这些运动着的颗粒不断相互碰撞接触,使颗粒逐渐增大。因此,絮凝物粒径随着悬浮体浓度的快速升高而迅速增大。这就是为什么絮凝物粒径分布与悬浮体总量分布相一致和为什么在悬浮体总量增加初期稍后絮凝物粒径迅速增大的原因。只有当颗粒小于 $2\mu\text{m}$ ,浓度大于 $10\text{g/L}$ 时,布朗运动的作用才是重要的(Krone, 1978),而该地区的悬浮体含量低于 $360\text{mg/L}$ ;而且本研究所涉的颗粒大于 $3\mu\text{m}$ ,所以布朗运动的作用可以忽略。上游悬浮体含量低及其含量变化与潮汐变化一致的分布特征,说明悬浮体主要来自海底沉积物的再悬浮。这与Postma (1961)和De Haas等(1993)的研究结果相一致。该河口为部分混合型河口,底层盐水舌侵入产生的强劲剪切应力,足以使海底沉积物絮散并被搅起。被搅起的细粒物质,被表层顺流和底层逆流的反向流动产生的上升流带向上层,在运动过程中颗粒不断相互碰撞。由于开始强劲的剪切应力和紊流,限制了絮凝物增长,只有当剪切应力和紊流强度减弱时,絮凝才能迅速增长。悬浮体总量达到高峰时絮凝颗粒变小这一事实是由于紊流超过了某一临界强度使得絮凝颗粒破碎所引起的。而后,当特别有利于絮凝形成的紊流强度出现时,絮凝物粒径也随之达到峰值,结果导致了絮凝物粒径高峰相对悬浮体

总量分布高峰的延迟。当紊流强度不能保持某些较大颗粒的悬浮状态时, 这些颗粒就开始沉降, 在沉降过程中, 在紊流及速度梯度和沉降分异的作用下颗粒继续絮凝变大。但由于该研究区水较浅, 分异沉降作用并不重要。因此, 作者认为速度梯度对颗粒的接触和絮凝物的形成起了十分重要的作用。在涨落潮的过渡阶段或最初阶段, 由于水体开始缓慢运动悬浮体浓度虽然降低但粒径却有所增大(图 4)。就总体而言, 絮凝形成和发展的主要阶段是涨落潮的前半段, 平潮和憩流时水体趋于稳定, 颗粒沉降加快, 是絮凝物的主要沉降阶段。由于各测站的水深不等, 地形不一, 潮流强度有别, 所以造成了测站间絮凝物粒径及其与悬浮体含量间的关系的差别。该地区余流分布广泛, 流速在  $0.01-0.33\text{m/s}$  之间, 平均为  $0.06\text{m/s}$  (De Jonge, 1992)。在平潮时, 由于余流等的作用, 水体不能完全稳定, 减缓了絮凝物的沉降, 结果在下一个潮相来临之前部分絮凝颗粒仍然停留在水体中。这些絮凝颗粒的大小在测站和潮相之间也是不同的。A, B 两站涨潮期间颗粒较小, 落潮期间颗粒较大。A 站, 涨落潮时最大粒径和中值粒径分别为  $74-101\mu\text{m}$  和  $196-382\mu\text{m}$ ; B 站, 分别为  $75-85\mu\text{m}$  和  $222-274\mu\text{m}$ ; C 站与 A, B 两站不同, 即涨潮时絮凝物粒径较大, 落潮时粒径较小, 中值粒径为  $76-71\mu\text{m}$ , 最大粒径为  $254-163\mu\text{m}$ 。A 站涨潮后期, 盐度突然下降达 10 以上并持续 1h, 絮凝物粒径也随之波动, 可能也与余流有关(图 2a, j)。余流的作用使得絮凝与其它因素的关系更加复杂化。不难想象, 在大风浪或非常条件下, 情况可能还要复杂。但是, 这些条件和潮汐相比要少得多, 因此我们认为, 在河口地区控制絮凝及其过程的主要因素是潮流及其导致的水动力作用。

### 参 考 文 献

- Baker, E. T. and Lavelle, J. W., 1987, *J. Geophys. Res.*, **89**: 8 197 — 8 203.
- De Jonge, V. N., 1992, *Estuarine, Coast. and Shelf Sci.*, **34**: 1 — 22.
- Dyer, K. R., 1986, *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*, Chichester, John Wiley & Sons (New York), pp. 26 — 28.
- Eisma, D., 1986, *Neth. J. Sea Res.*, **20**: 183 — 199.
- Eisma, D., Schunhacher, T. and Boekel, H. van et al., 1990, *Neth. J. Sea Res.*, **27**: 43 — 56.
- Eisma, D., Bernard, P. and Cadée, G. C. et al., 1991, *Neth. J. Sea Res.*, **28** (3): 193 — 214.
- Gibbs, R. J. et al., 1989, *Sedimentology*, **36**: 987 — 999.
- Gibbs, R. J. and Wolanski, E., 1992, *Marine Geology*, **107**: 289 — 291.
- de Haas, H. and Eisma, D. 1993, *Neth. J. Sea Res.*, **31**: 37 — 42.
- Krone, R. B., 1978, *Estuaries transport processes*, Univ. of South Carolina Press (Columbia), pp. 77 — 90.
- Postma, H., 1961, *Neth. J. Sea Res.*, 148 — 190.

## IN-SITU FLOCCULATION PROCESSES OF SUSPENDED MATTER AND FACTORS DOMINATING THESE PROCESSES IN THE EMS-DOLLARD ESTUARY

Li Anchun, Chen Lirong, D. Eisma<sup>†</sup>

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

<sup>†</sup>(*Netherlands Institute for Sea Research, 1790 AB, TEXEL*)

**Abstract** Flocculation processes of suspended matter and their controlled factors in the Ems-Dollard Estuary were studied according to floc size data which taken with an *in situ* suspension camera system in January of 1991 and were measured with an image analysis system, and to other data such as salinity and total suspended matter. The results indicated that at anchored stations, mean floc sizes ranged from 74 to 131 $\mu\text{m}$  and maximum floc sizes from 163 to 809 $\mu\text{m}$ , which varied with time and localities. Temporally, floc sizes varied with tidal cycles. They grew considerably with increase of total suspended matter shortly after the beginning of flood and ebb tides, and then decreased with reduction of the concentration. Spatially (at floating stations), floc sizes increased seaward in general and the concentration also had significant influence on the floc sizes. Floc sizes positively correlated to total suspended matter at both anchored and floating stations. However, a lag of the particle sizes often occurred when suspended matter concentrations reached their peaks. The correlation of floc sizes to temperature and organic contents were very pore. Influence of salinity on floc sizes was minor. Due to the influence of residual current and other factors, some flocs, which had the average sizes from 71 to 101 $\mu\text{m}$ , for mean, and 163 to 382 $\mu\text{m}$  for maxima between floods and ebbs, had kept suspending till the next tide came. The results suggest that tides or hydrodynamic condition plays an important role in flocculation or aggregation in the estuary.

**Key words** Flocculation    Suspended matter    Dominating factors    Ems-Dollard estuary