

# 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析

蒋国俊<sup>1</sup>, 姚炎明<sup>1</sup>, 唐子文<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 港口海岸及近海工程研究所, 浙江 杭州 310028)

**摘要:** 根据静水和动水条件下的细颗粒泥沙沉降试验结果, 应用灰色模型分析中的关联度分析理论, 分析了影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素. 根据关联度的大小指出, 影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素依次为水温、沉降历时、盐度、粒度、含沙量和流速, 其中盐度和粒度是阈值型影响因素, 沉降历时、含沙量和流速是连续型影响因素, 水温是具有阈值型和连续型双重特性的影响因素. 只要阈值型影响因素达到或超过了阈值, 细颗粒泥沙就发生絮凝作用, 因素值的变化对沉降强度影响不大. 连续型影响因素对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响是连续的, 它们不仅影响絮凝作用发生, 而且影响絮凝沉降强度.

**关键词:** 絮凝沉降; 影响因素; 阈值型; 连续型; 关联度分析

中图分类号: P736 21; TV 148; TV 143.3

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193

(2002)04- 0051- 07

## 1 引言

河口海岸环境中细颗粒泥沙的絮凝沉降是引起河口、海岸泥沙沉积的主要原因之一. 细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素十分复杂, 许多学者对不同的影响因素开展了大量研究, 如张志忠等<sup>[1]</sup>对盐度影响的研究, Manning 和 Dyer<sup>[2]</sup>对水流紊动影响的研究, Elmaleh<sup>[3]</sup>对絮凝能量需求的研究, Li<sup>[4]</sup>对高浑浊水体中絮凝作用的研究, Partheniades<sup>[5]</sup>对细颗粒泥沙动力学问题以及细颗粒泥沙冲刷和沉积的研究<sup>[6-8]</sup>, 阮文杰<sup>[9]</sup>对流速影响的研究, Mantz<sup>[10]</sup>对细颗粒泥沙沉积输移的研究, 张志忠<sup>[11]</sup>对长江口细颗粒泥沙基本特性的研究, Van Leussen<sup>[12]</sup>对河口环境中细颗粒泥沙颗粒絮凝和絮凝体沉速的研究, 时钟<sup>[13]</sup>对长江口细颗粒泥沙过程进行了比较全面的总结, 张志忠等<sup>[14]</sup>将各种影响因素归纳为物质成分(矿物成分、粒度成分、含沙浓度、泥沙颗粒表面电荷)、介质条件(盐度、温度、黏度、pH 值)和动力条件(流速、紊动强度)等三大因素 10 个变量, 但是对于这些因素是如何影响细颗粒泥沙絮凝沉降的, 对各大因素的影响程

收稿日期: 2001- 08- 29; 修订日期: 2001- 12- 03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49976023); 浙江省自然科学基金资助项目(N29985).

作者简介: 蒋国俊(1962-)男, 江苏省溧阳市人, 教授, 博士, 从事河口海岸研究.

度和影响性质尚缺乏深入的研究. 本文拟在灰色模型关联度分析的基础上, 探讨影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素, 确定主要影响因素对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响程度.

## 2 关联度分析

### 2.1 基本方法

对影响因素分析的基本方法, 过去一直采用的主要是统计的方法, 如回归分析就是一种较通用的方法, 但这种方法大都只用于少因素的线性分析, 且存在着(1)要求大量的数据, 一旦数据量少就难以找到统计规律; (2)要求分布满足线性、指数或对数等特定的变化规律; (3)计算工作量大; (4)计算误差导致计算结果出现极性差错, 甚至产生正相关变成负相关的结果; (5)由于各影响因素的复杂性, 难以区分各个影响因素的影响程度等不足.

灰色系统理论<sup>[14]</sup>考虑到上述种种弊病和不足, 采用关联度分析的方法来作系统分析. 作为一个发展变化的系统, 关联度分析事实上是动态过程发展态势的量化比较分析, 本质上是几种曲线间几何形状变化的分析比较, 即认为几何形状越接近, 则发展变化态势越接近, 关联程度越大, 因此以此作因素分析时, 至少出现异常时不会将正相关当作负相关, 它对数据量也没有太高的要求. 根据这一观点, 可以确定进行关联系数和关联度分析的量化方法.

设某一事件随时间的变化可记为  $Y = \{y(k)\}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $y(k)$  为  $k$  时刻事件的值; 影响该事件的因素为  $X_i = x_i(k)$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ,  $X_i$  为第  $i$  个影响因素数据列,  $x_i(k)$  为第  $i$  个因素在  $k$  时刻的值, 于是则事件与影响因素在各时刻的差可表示为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |y(k) - x_i(k)| + 0.618 \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + 0.618 \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}, \quad (1)$$

式中,  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $\xi_i(k)$  是事件  $y$  与第  $i$  个影响因素  $X_i$  在第  $k$  个时刻的相对差值, 这种形式的相对差值称为  $X_i$  对  $Y$  在  $k$  时刻的关联系数.

关联系数是每一时刻事件与影响因素之间的相对差值, 其个数很多, 信息过于分散, 不利于比较, 为此将各个时刻的关联系数集中于一个值, 这个值便是关联度, 可用平均值表示, 其表达式为

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k), \quad (2)$$

式中,  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $\gamma_i$  是影响因素  $X_i$  对事件  $Y$  的关联度. 由此根据关联度的大小, 可确认影响因素对事件的影响大小.

### 2.2 分析结果

单位体积内悬沙在单位时间发生絮凝沉降的泥沙重量为絮凝沉降强度. 根据笔者近年来在环形水槽中所做的主要影响因素含沙量、盐度、水温、流速、泥沙粒度和沉降历时等对絮凝沉降强度影响的试验资料, 从中选取最有代表性的 15 组资料, 获取絮凝沉降强度与影响因素之间的对应值  $7 \times 186$  组为数据列, 由式(1)计算各影响因素对絮凝沉降强度的关联系数, 然后根据式(2)计算各影响因素的关联度, 结果如表 1 所示. 由表 1 可见, 在影响细颗粒泥沙絮凝沉降强度的 6 个主要因素中, 影响关联度最大的因素是水温, 其他依次为沉降历时、盐度、粒度、含沙量和流速.

表1 细颗粒泥沙絮凝沉降主要影响因素关联度

影响因素	含沙量	流速	水温	盐度	粒度	沉降时间
关联度	0.802 5	0.797 1	0.852 6	0.831 2	0.824 6	0.848 9

有关环形水槽的特征参数和实验的设计见参考文献[1, 9, 16], 在此不再重复。

### 3 主要影响因素对絮凝沉降的影响

#### 3.1 盐度的影响

盐度对细颗粒泥沙絮凝沉降作用的影响是细颗粒泥沙研究的首要内容之一, 对细颗粒泥沙的静水和动水絮凝沉降试验均显示, 在淡水环境中细颗粒泥沙基本不发生絮凝沉降, 其沉降也十分缓慢, 一旦加入盐, 细颗粒泥沙即发生迅速的絮凝沉降, 图1所示是细颗粒泥沙在静水条件下的盐度与沉速的关系曲线。由图1可见, 淡水环境中细颗粒泥沙沉降十分缓慢, 但在盐水环境中, 细颗粒泥沙发生了絮凝沉降。张志忠等<sup>[1]</sup>在研究时发现, 只要少量的盐分, 细颗粒泥沙就可出现絮凝现象, 在盐度为3以下时, 絮凝作用有类似加速的过程, 盐度达到3以后, 快速的絮凝作用使絮凝沉降量以近似恒定的值而迅速落淤, 可见盐度对细颗粒泥沙絮凝沉降是起阈值影响因素的作用, 即只要有盐分存在, 细颗粒泥沙就能发生絮凝沉降, 它是影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素, 为仅次于水温和沉降时间的第三大影响因素。

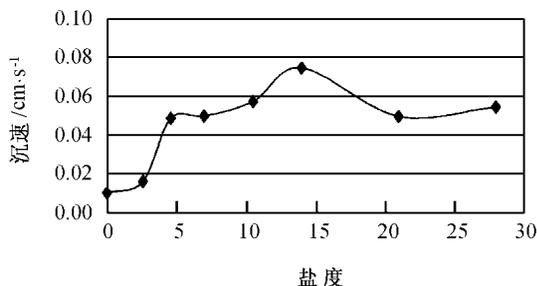


图1 静水环境中盐度与沉速的关系曲线(据文献[1])

#### 3.2 流速的影响

水流一方面能加强细颗粒泥沙的相互碰撞, 促进絮凝作用的发生, 另一方面水流又具有剪切破坏作用, 能将相互黏接不牢固的絮凝颗粒剪切分离, 因此水流对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响在低流速时表现为促进絮凝作用, 在高流速作用时表现为阻滞絮凝作用。动水絮凝沉降试验结果显示, 随着水流流速的减小, 细颗粒泥沙絮凝沉降强度逐渐增大; 一般情况下在流速大于40 cm/s时, 细颗粒泥沙基本不发生絮凝沉降, 但在流速小于或等于30 cm/s时, 细颗粒泥沙絮凝沉降强度随流速的减小逐渐增强。在不同流速作用的流动水体中细颗粒泥沙絮凝沉降强度随流速变化的过程如图2所示。

由图2可见, 当流速大于40 cm/s时基本不发生絮凝沉降, 而当流速小于或等于30 cm/s时, 在每档流速作用的初期, 细颗粒泥沙发生迅速的絮凝沉降, 但随着时间的推移, 细颗粒泥沙的沉降强度逐渐减小, 并最终趋近于0 cm/s。这表明, 流速降低时水流对絮凝团粒的剪切破坏能力减小, 细颗粒泥沙形成的絮凝团粒增大,

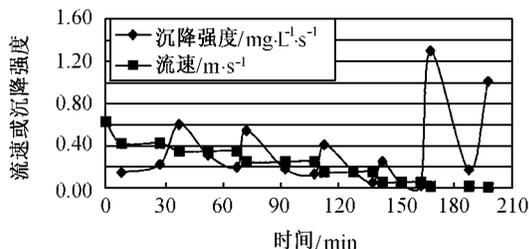


图2 细颗粒泥沙絮凝沉降强度随流速变化过程  
水温为26℃, 初始含水量为5g/L, 盐度为10

沉速增加, 悬沙落淤加快, 但随着时间的推移, 悬沙不断沉降, 大的絮凝团粒迅速减少, 形成絮团和絮团被水流剪切破坏之间逐渐达到平衡, 泥沙的沉降逐渐趋于停止; 当流速再减小后, 由于水流对絮团的剪切破坏能力减小, 细颗粒泥沙在新的水流条件下又絮凝增大, 并发生絮凝沉降, 悬沙的沉降强度增大, 并随着流速的稳定, 泥沙的沉降趋于新的平衡. 由此可见, 流速对细颗粒泥沙絮凝沉降有连续型影响因素的特性.

### 3.3 水温的影响

水温对细颗粒泥沙絮凝作用的影响长期以来不为大多数学者所重视, 但是实验室试验研究显示, 细颗粒泥沙絮凝沉降受水温的控制. 通常情况下水温较低时, 细颗粒泥沙絮凝沉降强度较低, 甚至不发生絮凝沉降, 但一旦水温超过  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 细颗粒泥沙发生迅速的絮凝沉降, 且具有随水温升高絮凝沉降强度增大的变化趋势.

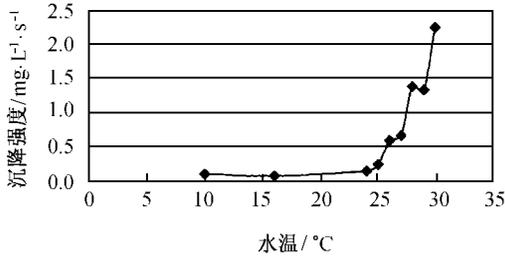


图3 水温与沉降强度关系

沙的显微镜下观测也发现, 水温低于  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 很少能观测到悬浮细颗粒泥沙形成的絮凝团, 即使出现絮凝作用, 所形成的絮凝体大多是鲷状絮粒, 粒径较小, 在动水条件下基本不发生沉降; 当水温超过  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 能观测到十分典型的细颗粒泥沙形成的絮凝团, 且水温越高, 形成的细颗粒泥沙絮凝团越典型, 出现链状、网状、雪花状等多种形式的大颗粒絮凝团. 由此可见水温低于  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时基本不发生细颗粒泥沙的絮凝沉降, 水温超过  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时就能发生迅速的絮凝沉降, 且随着水温的升高沉降强度迅速增大, 因此水温既具备阈值型影响因素的特性, 又具备连续型影响因素的特性, 是所有影响细颗粒泥沙絮凝沉降因素中关联度最大的因素.

### 3.4 含沙量的影响

图4所示是细颗粒泥沙沉降强度随含沙量的变化. 由图4可以发现, 细颗粒泥沙絮凝沉降的强度受悬沙供给量的影响, 含沙量越高细颗粒泥沙的絮凝沉降强度越大. 事实上, 含沙量与细颗粒泥沙絮凝沉降强度的关联度达0.8025, 其影响程度甚至超过了流速.

需要指出, 细颗粒泥沙沉降强度在随含沙量降低而递减的同时, 流速的变化也会导致沉降强度的变化, 尤其在流速迅速递减到接近于  $0\text{ cm/s}$  的时候, 细颗粒泥沙的沉降强度也能迅速增大(见图2). 由此可见, 细颗粒泥沙絮凝沉降强度在受到含沙量影响的同时, 还受到流速等其他因素的影响; 含沙量对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响显示出连续变量的特性.

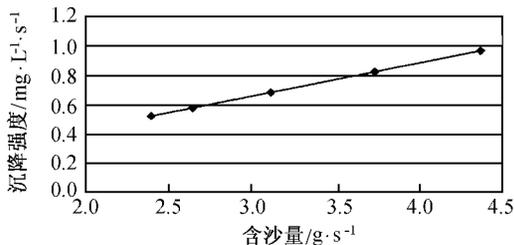


图4 沉降强度与含沙量关系曲线

图3表示不同水温条件下悬沙出现的最大沉降强度. 由图3可见, 悬沙在流动盐水中沉降时, 随着水温增大, 最大沉降强度也随之增大, 在水温低于  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 细颗粒泥沙沉降强度极低, 一旦超过  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 细颗粒泥沙发生絮凝沉降, 悬沙沉降强度迅速增大, 且对应于最大沉降强度的水流流速有增大的趋势, 这表明水温的升高能促成细颗粒泥沙的絮凝沉降. 对沉降泥

### 3.5 粒度的影响

悬沙粒度对絮凝沉降起着重要的作用. 张志忠等<sup>[11]</sup>根据不同粒径泥沙的比表面积、表面

电荷密度、矿物成分等因素, 将细颗粒泥沙的临界粒径划定为小于  $32 \mu\text{m}$ . 对不同粒度的细颗粒泥沙沉降试验研究显示, 当泥沙粒径大于  $32 \mu\text{m}$  时, 在盐水中的悬沙基本不发生絮凝沉降, 当悬沙粒度小于  $32 \mu\text{m}$  时, 细颗粒泥沙能发生絮凝沉降; 发生絮凝沉降的最大流速(絮凝临界流速)随粒径的增大而增大(图 5). 由此可见细颗粒泥沙絮凝作用受到泥沙粒径的影响,  $32 \mu\text{m}$  是细颗粒泥沙与粗颗粒泥沙的分界线, 大于  $32 \mu\text{m}$  的泥沙不发生絮凝作用, 小于  $32 \mu\text{m}$  的泥沙能发生絮凝沉降作用, 其絮凝临界流速受泥沙粒径的影响, 一般情况下粒径较细, 悬沙发生絮凝沉降的临界流速较小, 并随着粒径的增大而增大, 直到粒径大于  $32 \mu\text{m}$  时泥沙才不发生絮凝沉降.

### 3.6 沉降历时的影响

沉降历时是指流速、盐度、水温、沉降水深等因素不变条件下细颗粒泥沙沉降的时间, 以往的研究对于沉降历时对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响关注甚少, 但从表 1 可见, 在细颗粒泥沙絮凝沉降因素中沉降历时的影响仅次于水温.

在相同试验条件下, 细颗粒泥沙沉降强度随时间的变化如图 6 所示, 随着试验历时的延长, 细颗粒泥沙沉降强度逐渐减小, 并最终趋近于  $0 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{s})$ . 这表明, 在一定的环境条件下细颗粒泥沙发生絮凝作用时, 形成的絮凝颗粒大小是基本稳定的, 这些絮凝颗粒将逐渐沉降到底部, 但当这些颗粒全部沉降后, 由于水流的紊动和剪切破坏作用, 细颗粒泥沙形成的絮凝颗粒不再增大, 不能克服紊动上举力的作用, 因此也将不再发生沉降, 沉降强度趋近于  $0 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{s})$ .

从图 6 还可以发现, 细颗粒泥沙沉降强度还受到初始含沙量的影响, 当初始含沙量较大时, 细颗粒泥沙沉降强度在开始阶段也较大, 可见在沉降时间产生作用的同时, 其他因素也在产生影响, 但随着沉降历时的推延, 沉降强度逐渐趋于一致, 并最终接近于  $0 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{s})$ .

### 3.7 阈值型与连续型影响因素

由上述 6 个影响因素的讨论可以发现, 各因素对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响表现为两种状况, 一种状况是影响因素对细颗粒泥沙的絮凝沉降能产生持续的作用, 它不仅影响絮凝体的形成, 而且影响絮凝体的大小和沉降强度, 这种影响因素称之为连续型影响因素, 如流速、沉降历时和含沙量; 另一种状况是当影响因素小于某个量值时, 细颗粒泥沙不发生絮凝沉降, 但当量值超过某一阈值时, 细颗粒泥沙就发生絮凝沉降, 且其沉降强度不再受该影响因素量值变化的影响, 这一类型的影响因素称为阈值型影响因素, 如盐度和粒度. 需要指出, 细颗粒泥沙在水温低于  $25^\circ\text{C}$  时不发生絮凝沉降, 水温高于  $25^\circ\text{C}$  时就发生絮凝沉降, 且随着水温的升高絮凝

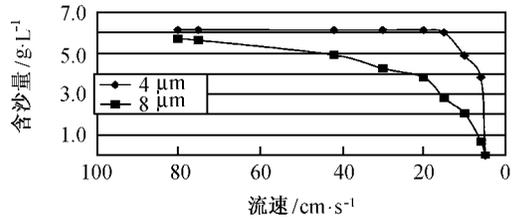


图 5 不同粒径悬沙的絮凝临界流速  
盐度为 10, 水温为  $25\sim 28^\circ\text{C}$

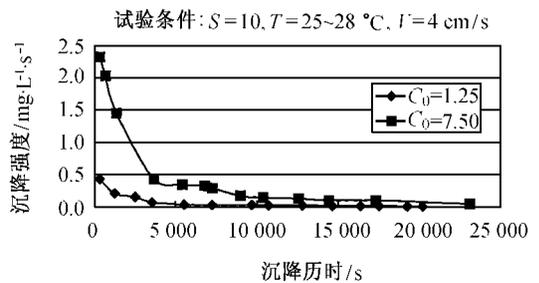


图 6 沉降历时对沉降强度的影响  
 $C_0$  为初始含沙量 ( $\text{g}/\text{L}$ )

沉降强度迅速增大, 呈现阈值型影响因素和连续型影响因素的双重特性。

## 4 结论

通过对影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素的分析, 可以得到以下结论:

(1) 影响细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素中, 根据关联度的大小其影响程度依次为水温、沉降历时、盐度、粒度、含沙量和流速, 此外水体的 pH 和有机质含量对细颗粒泥沙絮凝沉降可能有重要影响, 有待进一步研究。

(2) 可把细颗粒泥沙絮凝沉降的影响因素分成阈值型和连续型两类, 其中盐度和粒度是阈值型影响因素, 盐度的阈值为 3, 粒度的阈值为  $32 \mu\text{m}$ ; 沉降历时、含沙量和流速是连续型影响因素, 细颗粒泥沙沉降强度随影响因素的变化而连续变化; 水温是具有阈值型和连续型双重特性的影响因素, 水温的阈值是  $25^\circ\text{C}$ , 小于  $25^\circ\text{C}$  时细颗粒泥沙基本不发生絮凝沉降, 大于  $25^\circ\text{C}$  时随水温升高细颗粒泥沙沉降强度增大。

(3) 细颗粒泥沙絮凝沉降的影响因素是相互影响的, 在其中某个影响因素发生作用的同时, 其他因素则可能起着促进作用或制约作用, 这就使细颗粒泥沙絮凝沉降作用更加复杂化。

## 参考文献:

- [1] 张志忠, 王允菊, 徐志刚. 长江口细颗粒泥沙絮凝若干特性探讨[A]. 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1983. 274—285.
- [2] MANNING A J, DYER K R. A laboratory examination of floc characteristics with regard to turbulent shearing [J]. Marine Geology, 1999, 160(2): 147—170.
- [3] ELMALEH S. Flocculation energy requirement [J]. Water Research, 1991, 25(8): 939—943.
- [4] LI Guir bai. Flocculation sediment of high turbidity waters [J]. Water Research, 1991, 25(9): 1 137—1 143.
- [5] PARTHENIADES E. A fundamental framework for cohesive sediment dynamics [A]. MEHTA A. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies 14, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics [C]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer, 1984. 219—250.
- [6] PARTHENIADES E. Results of recent investigation on erosion and deposition of cohesive sediments [A]. SHEN H W. Sedimentation Symposium to Honor Professor Einstein H A [C]. Ft. Collins, CO. Chapter 12: 12. 20—12. 29.
- [7] MEHTA A J, PARTHENIADES E. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment [J]. J Hydrol Res, 1975, 92 (C13): 361—381.
- [8] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 1965, 91 (HY1): 105—139.
- [9] 阮文杰. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析 [J]. 海洋科学, 1991, (5): 46—49.
- [10] MATZ P A. Review of laboratory sediment transport research using fine sediments [A]. 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1983. 532—557.
- [11] 张志忠. 长江口细颗粒泥沙基本特性研究 [A]. 全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 1992. 369—375.
- [12] Van LEUSSEN W. Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs: a review. DRONKERS J, Van LEUSSEN, ed. Physical Processes in Estuaries [M]. New York. Springer-Verlag, 1988. 347—403.
- [13] 时 钟. 长江口细颗粒泥沙过程 [J]. 泥沙研究, 2000, (6): 72—81.
- [14] 张志忠, 阮文杰, 蒋国俊. 长江口动水絮凝沉降与拦门沙淤积的关系 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(6): 632—638.
- [15] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. 17—42.
- [16] 沈承烈, 阮文杰. 长江口河床质冲淤特性的试验研究 [J]. 泥沙研究, 1986, (3): 62—72.

## The analysis for influencing factors of fine sediment flocculation in the Changjiang Estuary

JIANG Guo-jun<sup>1</sup>, YAO Yarr-ming<sup>1</sup>, TANG Zr-wen<sup>1</sup>

(1. Harbor Coast & Near Ocean Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

**Abstract:** Based on the test data under dynamic water and static water, main factors which influence the fine sediment flocculation are analyzed using the relative analysis theory of the gray model analysis. It is pointed out that the main influencing factors are water temperature, settling time, salinity, grain size, sediment concentration and current velocity according to relevant values. In those factors, the salinity and the sediment grain size are critical type influencing factors, but the settling time, the sediment concentration and the velocity are continuous influencing factors, and the water temperature has characteristics of both the critical type and continuous type. When the critical values of the critical type influencing factors are reached or exceeded, the fine sediments are flocculated but the values do not influence the settling strength of the floc. The influence of the continuous type influencing factors is continuous. They not only influence the flocculation but also the settling strength of the floc.

**Key words:** floc settling; influencing factors; critical type; continuous type; relative analyses