

# 往复潮流作用下推移质粒径趋势形成模拟初探\*

于 谦 高 抒

(南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093)

**提要** 粒径趋势分析是一种用于判断海洋环境中沉积物净输运方向的方法,但是至今粒径趋势形成的物理机制尚不够清楚,因而影响了粒径趋势分析适用条件的确定。针对这个问题,本文通过建立一维、推移质、往复流(近岸潮流)条件下的数值模型,采用正演方法模拟粒度参数在输运方向上的分布,以评价沉积动力过程的影响,初步探讨粒径趋势形成的物理机制。数值模型实验的初步结果显示,水动力条件的空间差异导致的沉积物粒度参数的空间分布符合粒径趋势分析的假设,粒径趋势分析中定义两种粒径趋势可由沉积物输运强度的空间梯度而形成,并且在沉积物净输运方向上出现的频率最高。

**关键词** 粒径趋势分析,推移质,输运过程,潮流作用,数值实验

**中图分类号** P731

粒度参数是沉积学和沉积动力学的重要参数,通常用平均粒径、分选系数、偏态和峰态等来表征(Syvitski, 1991)。从源地到堆积场所,沉积物粒度参数产生沿程的变化。由此产生的一个问题是,粒度参数的平面分布中是否含有沉积物输运的信息?不少学者对这个问题进行了探讨。针对海洋环境,在一维工作的基础上(McLaren, 1981; McLaren *et al.*, 1985), Gao 等(1991, 1992, 1994)发展了二维的“粒径趋势分析”方法,即利用粒度参数平面分布反演沉积物净搬运方向的方法。其基本假设是:在同一沉积环境内,沿净搬运方向,以下两种类型的粒径趋势出现的概率最大:平均粒径变细、分选更好且更加负偏;

平均粒径变粗、分选更好且更加正偏。这些假设得到了现场观察证据的支持,因而粒径趋势分析方法被应用于陆架区(Stevens, 1996; 石学法等, 2002; Cheng *et al.*, 2004)、海湾(汪亚平等, 2000; Le Roux, 2002; Duman *et al.*, 2004; Poizot *et al.*, 2006)、河口(Wu *et al.*, 1999; Mallet *et al.*, 2000; Duck *et al.*, 2001)、潮流沙脊(van Wesenbeck *et al.*, 2000; van Lancker *et al.*, 2004)、潮汐汉道(Jia *et al.*, 2003)、潮滩(Pedrerros *et al.*, 1996; 王爱军等, 2004; 贾建军等, 2005)、深海峡谷

(Liu *et al.*, 2004)等环境,所得结果与流场观测、示踪砂实验以及床面形态和地貌特征所显示的沉积物输运状况较为吻合。但是,也有一些研究指出,粒径趋势分析的结果与观察情况相矛盾,例如 Masselink(1992)曾观察到在输运方向上出现平均粒径变细、分选变差的情况。

从本质上来说,现有的粒径趋势分析只是一种经验性的方法。沉积物粒度参数在净输运方向上为什么最可能出现两种特定的分布组合,其形成机制并不清楚,也就是说尚不能确定在什么条件下粒径趋势分析是适用的。McLaren(1981)和 McLaren 等(1985)曾经针对单一沉积物来源的问题,在细颗粒侵蚀概率大于粗颗粒、输运过程中粗颗粒的堆积概率大于细颗粒的条件下,试图分析粒径趋势的形成过程。然而,McLaren(1981)所引用的水槽实验的结果显示,沉积物输运和堆积的概率与粒径大小的关系并不是单调函数。自从 McLaren(1981), McLaren 等(1985)、Gao 等(1991, 1992, 1994)等的研究工作以来,粒径趋势分析在技术上不断有人提出改进的办法(Le Roux, 1994; Chang, 2001; Poizot *et al.*, 2006),但是在粒径趋势形成的物理机制的分析上并没有明显的进步。为明晰这

\* 国家自然科学基金资助重点项目, 40231010 号。于 谦, 海洋沉积动力学专业, 现为德国不来梅大学博士研究生。

通讯作者: 高 抒 E-mail: shugao@nju.edu.cn

收稿日期: 2007-06-04, 收修改稿日期: 2008-04-08

个物理机制, Gao 等(2001)指出必须依靠控制条件下的数值模型, 即根据物质运输的物理图景, 采用沉积动力过程模拟来获取粒度参数的平面分布这样一种正演模拟方法。

沉积物运动导致粒度参数产生平面分布的机理主要是分选性输运和磨损。混合粒径沉积物分粒级输运的研究已取得了一些进步(Bridge *et al*, 1992; van Niekerk *et al*, 1992; Karim, 1998; Molinas *et al*, 2000; Wu *et al*, 2000; Wu *et al*, 2004)。分粒级输运公式和水动力特征的结合使物质输运和地貌演化模拟的研究得到了迅速发展(Parker, 1991a, b; Hoey *et al*, 1994, 1997; Ferguson *et al*, 2001; Wright *et al*, 2005a, b), 为粒径趋势形成机制的正演模拟提供了借鉴。

本文作者拟针对推移质输运的情况, 尝试通过正演的方法, 以数值模拟为手段, 辨析沉积动力过程的影响, 研究粒度平面分布形成的机制。作者选择推移质作为初步探讨的材料, 是因为粒径趋势分析早先是针对粗颗粒物而提出的(Gao *et al*, 2001)。本文中不考虑输运过程中的磨损作用, 根据水槽实验的结果(Seal *et al*, 1997; Toro-Escobar *et al*, 2000), 磨损相对于分选性输运而言在沉积物粒度的空间分布形成中处于次要地位。

## 1 方法

### 1.1 模型的建立

**1.1.1 基本假设** 建立简化条件下的数学模型, 设计代表性实验, 研究水动力(沉积物输运能力)的差异导致粒度参数在空间上的分布。模型中, 假设水流为一维往复流, 同一时刻沿程各处的单宽流量相同, 无波浪作用, 沉积物以推移质方式输运。设初始时刻的沿程粒度分布相同, 初始水深不同。由于单宽流量各点相同, 因此造成流速、总的和分粒级的沉积物输运能力不同。一段时间演化中产生优势流方向上沿程沉积物粒度参数的差异, 因而可以比较这种差异与粒径趋势分析中所用假设之间的关系。沉积物粒度参数采用矩法计算(McManus, 1988)。

**1.1.2 水动力条件** 设恒定单宽流量为  $Q$ , 水深为  $H$ , 垂向平均流速为  $U$ , 则:

$$U = Q/H \quad (1)$$

用于沉积物输运计算的底床摩阻流速  $U_{*sk}$  计算公式由 Soulsby(1997)给出,  $d_{50}$  为底质的中值粒径:

$$\frac{U_{*sk}}{U} = \frac{1}{7} \left( \frac{d_{50}}{H} \right)^{1/7} \quad (2)$$

**1.1.3 沉积物输运** 单一粒径沉积物输运时以推移质或悬移质方式的临界条件为:

$$W_s = b \cdot U_{*sk} \quad (3)$$

$W_s$  为颗粒沉速, 用 Soulsby(1997)的公式来计算:

$$W_s = \frac{v}{d} [(107.33 + 1.049D_*^3)^{1/2} - 10.36] \quad (4)$$

$$D_* = \left[ \frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho v^2} \right]^{1/3} d$$

式中,  $d$  为沉积物粒径,  $\rho_s$  为沉积物密度,  $\rho$  为流体密度,  $v$  为流体运动粘滞系数。系数  $b$  的推荐值有 1.25(Bagnold, 1966; Li *et al*, 2001), 1(Bridge, 1981; Harris *et al*, 2001), 0.64(Allen, 1971b)等, 本文中作者取值为 1。在非均匀粒径情况下, 由于大小颗粒混合对暴露-隐蔽状况的影响, 细颗粒的  $b$  值会减小, 而粗颗粒  $b$  值会变大。针对推移质情形, 根据(3)、(4)式所示的条件设定初始时刻粒度。

Vogel 等(1992)提出的 Bagnold 型推移质沉积物输运公式在模拟中被较多地应用(van Niekerk *et al*, 1992; Bennett *et al*, 1995; Robinson *et al*, 1998), 其形式如下:

$$i_{bijk} = (f_{ij} P_k) \frac{h}{\tan \alpha} (U_{*skk} - U_{*cij})(\tau_{skk} - \tau_{cij}) \quad (5)$$

式中, 下标  $i, j$  分别代表粒度和密度分级的序号,  $f_{ij}$  为底质中此组分所占比例,  $U_{*c}$  为临界起动摩阻流速,  $\tau_{sk}, \tau_c$  分别代表表面切应力和临界切应力,  $h/\tan \alpha$  为参数, 推荐值为 10; 下标  $k$  代表切应力的分级序号,  $P_k$  代表此切应力作用的出现频率,  $i_{bijk}$  为推移质质量输运率。为简化起见, 假设沉积物密度均匀, 将(5)式变化为沉积物体积输运率公式, 有:

$$q_{bi} = 10 f_i \rho (U_{*sk} - U_{*ci})(U_{*sk}^2 - U_{*ci}^2)/(\rho_s - \rho) \quad (6)$$

其中  $q_{bi}$  代表第  $i$  粒级推移质体积输运率,  $f_i$  代表底质中第  $i$  粒级所占比例。  $U_{*ci}$  代表第  $i$  粒级沉积物临界起动流速, 由下式计算(Komar, 1987; Vogel *et al*, 1992; Robinson *et al*, 1998):

$$U_{*ci} = \left[ \theta_{c50} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d_i \left( \frac{d_i}{d_{50}} \right)^{-m} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $d_i$  为第  $i$  粒级的粒径(以 m 为单位),  $m$  为暴露-隐蔽系数。  $\theta_{c50}$  代表单一粒径下中值粒径的临界起动 Shields 数, 可以由下式计算(Miller *et al*, 1977):

$$\begin{aligned} \log \theta_c &= 0.041(\log Y)^2 - 0.356 \log Y - 0.977, & Y &< 100 \\ \log \theta_c &= 0.132 \log Y - 1.804, & 100 &< Y < 3000 \\ \log \theta_c &= 0.045, & Y &> 3000 \end{aligned}$$

$$Y = [(\rho_s - \rho) g d^3 / \rho v^2]^{1/2} \quad (8)$$

**1.1.4 基本控制方程** 在不考虑构造沉降及沉积物压实等因素时, 采用以下连续性方程描述沉积物输运导致的底床地貌演化( $\eta$  为底床高程,  $\lambda$  为沉积物孔隙度, 取为 0.3,  $q_{bt}$  为推移质总输运率,  $N$  为粒度分级数):

$$(1-\lambda) \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial q_{bt}}{\partial x} \quad (9)$$

$$q_{bt} = \sum_{i=1}^N q_{bi}$$

假设床面活动层内垂向粒度分布均一, 第  $i$  粒级沉积物所占比例为  $F_i$ , 对活动层内各粒级沉积物分别建立连续性方程(Parker, 1991a; Hoey *et al.*, 1994; Wright *et al.*, 2005a), 有:

$$(1-\lambda) \frac{\partial (L_a F_i)}{\partial t} = -\frac{\partial q_{bi}}{\partial x} + E_i \left[ \frac{\partial q_{bt}}{\partial x} + (1-\lambda) \frac{\partial L_a}{\partial t} \right] \quad i=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中,  $L_a$  为活动层厚度,  $E_i$  为活动层和其下伏沉积物界面的第  $i$  粒级沉积物的出现频率, 其物理意义是通过此界面加入或脱离活动层的沉积物第  $i$  粒级的概率, 由下式计算(Hoey *et al.*, 1994):

$$E_i = \begin{cases} F_{bi} & \text{当 } \frac{\partial (\eta - L_a)}{\partial t} < 0 \\ cF_i + (1-c)P_i & \text{当 } \frac{\partial (\eta - L_a)}{\partial t} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $F_{bi}$  为下伏沉积物中第  $i$  粒级的出现频率,  $P_i$  为处于输运的沉积物中第  $i$  粒级的出现频率。式(11)的物理意义在于, 当活动层和下伏沉积物的界面向下移动, 下伏沉积物以其自身的粒度分布进入活动层; 当此界面上移, 以当时活动层内和处于输运的沉积物粒度分布的加权平均的结果脱离活动层。加权系数  $c$  与沉积物的输运强度有关, 当强度很大时处于输运的沉积物直接脱离活动层化为下伏沉积物, 即  $c=0$ ; 当输运强度较小时, 活动层改造不是十分剧烈, 以活动层的粒度分布转化为下伏沉积物, 此时  $c=1$  (Parker, 1991a)。在本模型中, 沉积物输运强度较小, 又由于选取的沉积物为砂质组分, 底床为运动的沙纹, 活动层对于处于输运中的沉积物具有过滤作用而使其在活动层内融为一体(Wright *et al.*, 2005a), 因此  $c$  的值取为 1。

活动层厚度  $L_a$  用床面沙纹波高  $\eta_{rip}$  的一半来估计(Hsu *et al.*, 1992)。对于中值粒径小于 0.8 mm 的砂质沉积物, 在水流作用下形成沙纹的波长  $\lambda_{rip}$  由下式估计(Yalin, 1964):

$$\lambda_{rip} = 1000d_{50} \quad (12)$$

根据 Allen(1970)公式计算波高  $\eta_{rip}$ :

$$\eta_{rip} = 0.074\lambda_{rip}^{1.19} \quad (13)$$

其中波长和波高的单位为 cm, 将(12)式代入并变化单位为 m, 得到:

$$L_a = \frac{1}{2}\eta_{rip} = 326.95 \cdot d_{50}^{1.19} \quad (14)$$

## 1.2 差分网格和初始、边界条件

模拟的空间步长设为 500 m, 在实验区范围内共设 21 个网格点, 代表 10 km 空间距离。为保证方程的解稳定, 时间步长设为 1.86 min(1/400 个潮周期, 一个潮周期以 12.4h 计)。

需要设定的初始变量有 3 项, 分别为初始沉积物粒度分布、初始水深、单宽流量。初始粒度分布假设在空间上均匀, 设计了两种粒度分布(GSD1 和 GSD2, 如图 1), 粒度范围为  $-0.5 \sim 2.0 \phi$ , 共分 25 级, 每级代表  $0.1 \phi$ 。两种粒度分布的平均粒径和偏态相同, 均为  $0.75 \phi$  和 0, GSD1 代表较好分选, 分选系数和峰态分别为 0.54 和 0.67, GSD2 代表较差分选, 分选系数和峰态分别为 0.67 和 0.79。单宽流量在一个潮周期内随时间呈正弦函数形式变化, 如图 2 所示, 正的数值代表正方向(图 3 中的自左向右方向), 负的代表负方向(图 3 中的自右向左方向)。其中, 正向流历时为负向流历时的  $2/3$ , 假设在一维上水流连续, 则正向流单宽流量为负向流的 1.5 倍。在水深 10m 处对应的正向最大流速为 0.9 m/s, 负向最大流速为 0.6 m/s。正向流处于优势, 自左向右方向是沉积物的输运方向。假设单宽流量在一个潮周期内变化固定, 不因为地形底质等因素的改变而变化。初始水深 ID1 为自最左端点(第 1 点)到最右端点(第 21 点)由 8 m 均匀变深为 12 m; 初始水深 ID2 为自第 1 点到第 21 点由 12 m 均匀变浅为 8 m。假设海平面不随时间变化而变化。2 种初始粒度和 2 种初始水深配合假定的单宽流量, 产生 4 种代表性的组合, 具体描述见表 1。

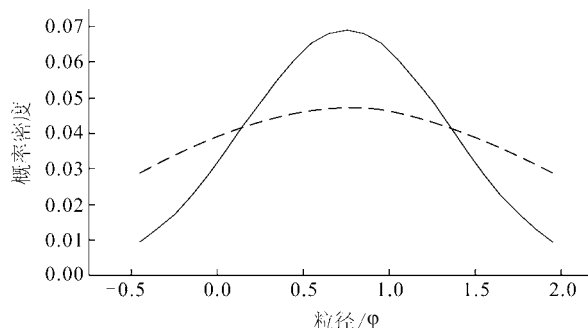


图 1 初始沉积物粒度分布(实线为 DS1, 虚线为 DS2)

Fig.1 Grain size distribution patterns at the initial stage (solid line:DS1, dashed line:DS2)

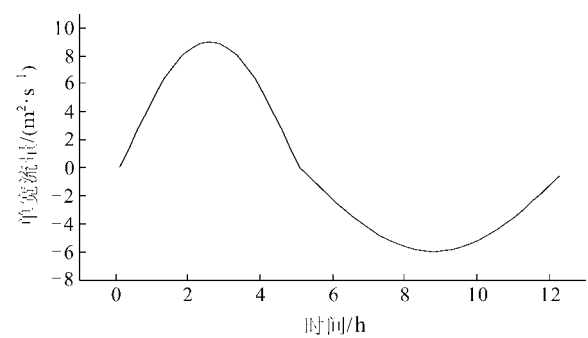


图2 一个潮周期内单宽流量随时间的变化  
Fig.2 Change of water discharge (per unit width) over a tidal cycle

设定第1点的水深, 沉积物粒度分布都不随时间变化。为计算需要, 在第21点向右增加一个辅助点, 此点的沉积物粒度分布与第21点相同, 水深 $H_{22}$ 满足:  
 $H_{22}=2H_{20}-H_{21}$ 。

2 模拟结果

模型运行 $5 \times 10^3$ 个潮周期后(等于7.08年), 沉积物各粒度参数沿程变化如图3所示(为了更清晰地显示沿程变化的总体趋势, 对曲线作了滑动平均处理)。在情形1和情形2下,  $5 \times 10^3$ 个潮周期后上游数点的各粒度参数都基本达到均衡态, 与物源相同, 所以只比较第5点至最后一点(第21点)各粒度参数的沿程变化。从图3可以发现, 4种情况下, 向右方向(即沉积物输运方向)沉积物平均粒径( $\phi$ 单位)和偏态的变化趋势相反, 即在输运方向上的可能情况为平均粒径变细, 更加负偏, 以及平均粒径变粗, 更加正偏。情形1和情形2输运方向上出现平均粒径变大, 偏态变小; 情形3和情形4平均粒径先变小后变大, 偏态先变大后变小, 且变化同步。相对于平均粒径和偏态, 分选系数的沿程变化从数值上较小, 情形1和情形2的分选系数明显变小, 而情形3和情形4分选系数先变大后变小。因此, 沿程分选系数变小即分选变好的可能性较大。峰态的变化与分选系数的变化几乎一致。这一结果与粒径趋

势分析的原理一致, 即在恒定物源下, 在净输运方向上, 两种粒径趋势出现的概率最大: 平均粒径变细、分选更好且更加负偏; 平均粒径变粗、分选更好且更加正偏。

表1 初始条件描述  
Tab.1 List of initial conditions

| 编号    | 初始粒度条件 | 初始水深条件 |
|-------|--------|--------|
| Case1 | GSD1   | ID1    |
| Case2 | GSD2   | ID1    |
| Case3 | GSD1   | ID2    |
| Case4 | GSD2   | ID2    |

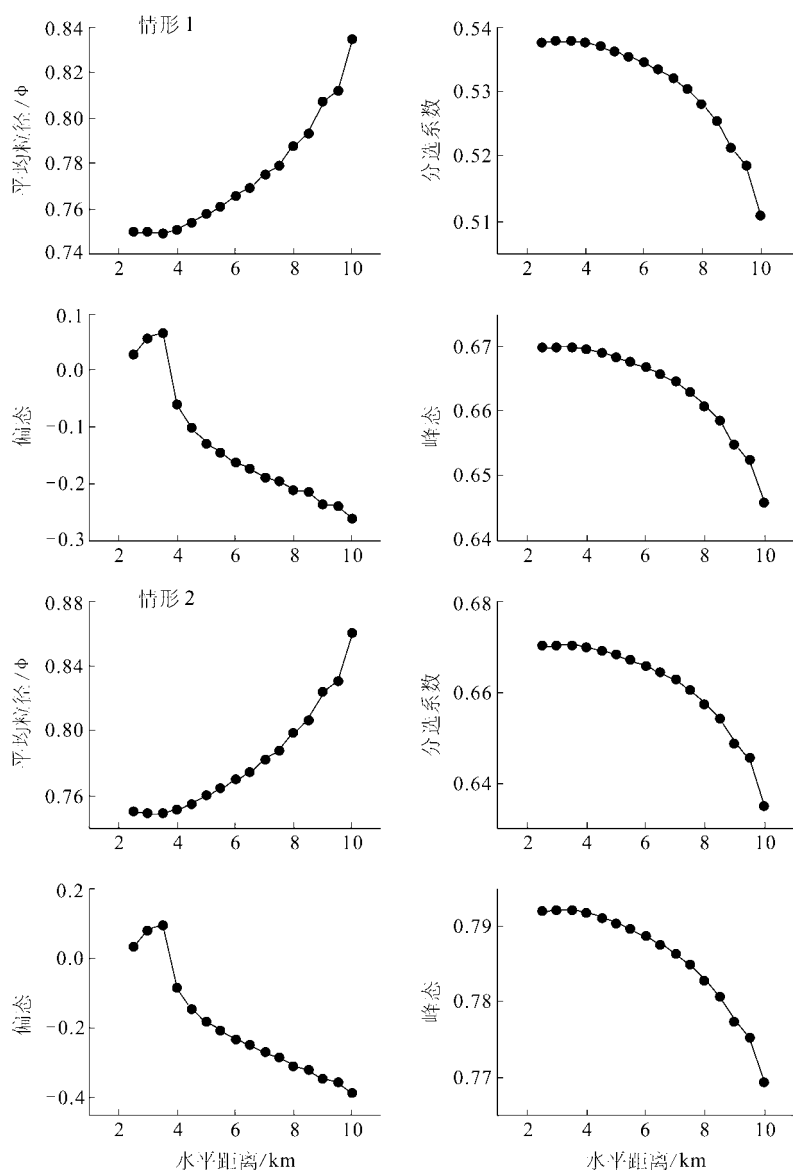


图3 沉积物粒度参数沿程变化(情形1和情形2)  
Fig.3 Changes in grain size parameters in transport direction (Cases 1 and 2)

### 3 讨论

#### 3.1 粒径趋势产生的机制

粒径趋势分析使用两种粒径趋势指示沉积物输运的净方向, 但反过来, 这两种粒径趋势是否仅仅是由沉积物在此方向上的净输运造成的? 在本文数值实验的结果中, 两种粒径趋势不是简单的向下游方向上的沉积物输运造成的, 而是在向下游方向上沉积物输运能力的差异造成的。换言之, 在本文数值实验条件下, 粒径趋势是由于沉积物输运强度的空间梯度造成的, 同时指示沉积物的输运方向。

程鹏等(2000)对北黄海西部粒度趋势的研究也

从一个侧面证实了这一结果。他们的研究表明, 粒度变化梯度最大的方向并不一定是沉积物的主要输运方向, 在其研究区, 粒度趋势反映了沉积物沿山东半岛向东的输运趋势, 同时也有强烈的向北输运趋势, 但就沉积物的输运率来说, 前者却是主要输运方向。这一特征可以用粒径趋势产生的机制来解释。沉积物沿山东半岛向东输运虽然占有优势, 但是它在向下游方向上沉积物输运能力的差异较小, 虽然向北的输运强度较小, 但是水动力条件变化明显, 沉积物输运能力的差异较大, 因此向北输运趋势显得更为强烈。

#### 3.2 净输运趋势与输运率的关系

粒径趋势模型可以计算出空间各点粒径趋势矢量, 包括大小和方向两个部分。矢量的方向可以用于确定沉积物净输运的方向。对于矢量大小, Gao 等(1992)最初是利用它进行统计检验, 除此之外没有明确的物理意义。但是既然有了矢量大小, 就有了是否可以从中提取输运强度信息的问题。本文正演模拟的结果显示, 粒径趋势产生的机制是沉积物输运强度的空间梯度造成, 它同时指示沉积物的输运方向, 所以与粒径趋势矢量的形成和大小直接关联的是沉积物输运强度的空间梯度, 而非沉积物的输运强度, 因而似乎难以从粒径趋势中提取有关输运率的定量化信息(如流速或输运率)。

#### 3.3 峰态信息的意义

在粒径趋势分析中, 使用了粒度的 3 个统计参数, 即平均粒径、分选系数、偏态, 粒度的第 4 个统计参数即峰态在输运方向上自身或者与其他参数组合是否存在一定规律的变化趋势, 一直是个疑问。本文所有的数值实验结果均显示峰态的变化趋势与分选系数相同, 换言之, 峰态不能提供更多的输运信息。贾建军等(2002)对大量实测样品的分选系数与峰态进行的回归分析也显示二者显著相关, 尽管从统计定义上二者是相互独立的(Dyer, 1986)。当然, 这一特点可能与实验中假设的单峰, 接近正态分布有关。

#### 3.4 数值实验研究的进一步工作

本模型所揭示的粒度空间分布形成的机制局限于一维均衡状态下的沉积物

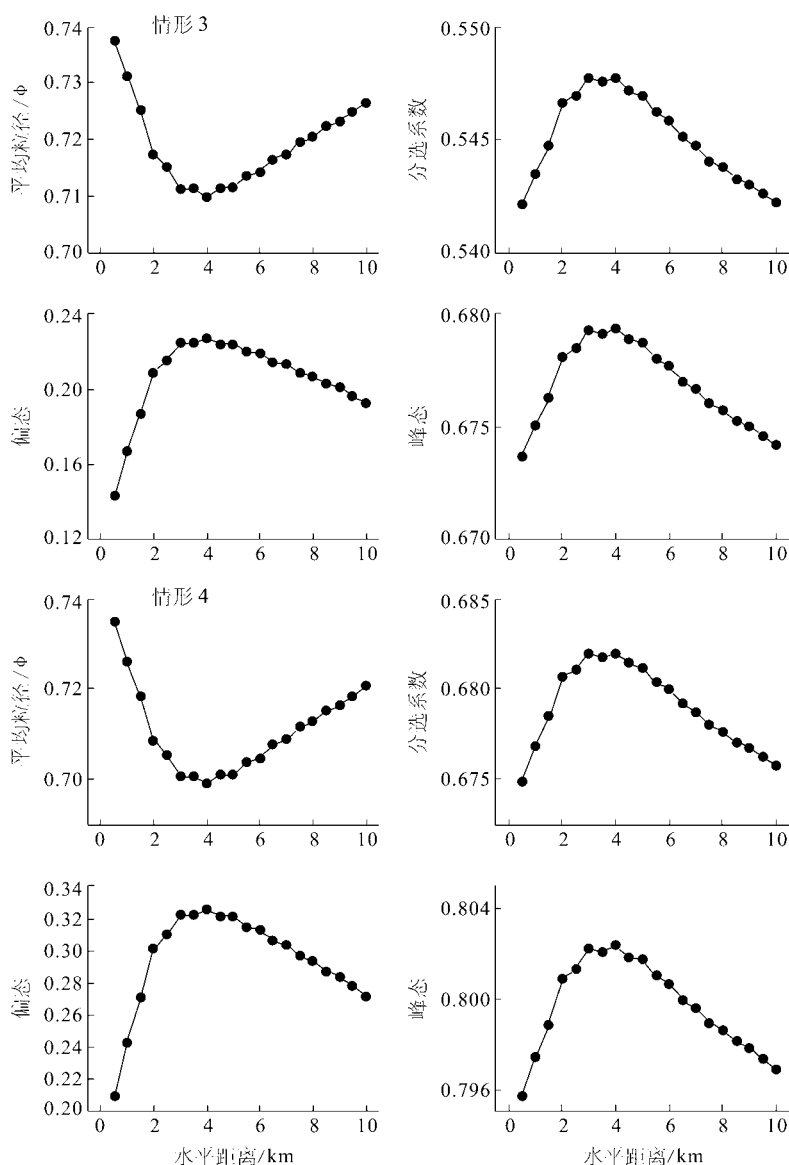


图 4 沉积物粒度参数沿程变化(情形 3 和情形 4)

Fig.4 Changes in grain size parameters in transport direction (Cases 3 and 4)

均衡输运, 不考虑磨损、波浪作用, 分粒级输沙率公式的精确有效性等限制条件, 受限于所设计的有限的初始条件, 因此所得出的结果只是对粒度空间分布形成以及粒径趋势分析的初步探索。Allen(1971b)发现波浪作用有助于使沉积物的分选变好, Channon(1976)进一步指出, 优势潮流的方向控制了沉积物粒径的变化, 而分选主要受控于波浪作用的强度。因此, 有必要通过进一步的研究, 考虑多种因素的影响, 设计更多更具代表性的实验, 以获得更加完整的结果。

### 参 考 文 献

- 程 鹏, 高 抒, 2000. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势. 海洋与湖沼, 31(6): 604—615
- 贾建军, 高 抒, 薛允传, 2002. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比. 海洋与湖沼, 33(6): 577—582
- 贾建军, 汪亚平, 高 抒等, 2005. 江苏大丰潮流推移质输运与粒径趋势信息解译. 科学通报, 50(11): 2546—2554
- 石学法, 陈春峰, 刘焱光等, 2002. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用. 科学通报, 47(6): 542—546
- 汪亚平, 高 抒, 贾建军, 2000. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势. 地理学报, 55(4): 449—458
- 王爱军, 汪亚平, 杨 旸, 2004. 江苏王港潮间带表层沉积物特征及输运趋势. 沉积学报, 22(1): 124—129
- Allen G P, 1971a. Relationship between grain size parameter distribution and current patterns in the Gironde estuary (France). *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 74—88
- Allen J R L, 1970. *Physical Processes and Sedimentation*. Unwin University Books, London, 1—248
- Allen J R L, 1971b. A theoretical and experimental study of climbing-ripple cross-lamination, with a field application to the Uppsala esker. *Geografiska Annaler*, 53A: 157—187
- Bagnold R A, 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey Professional Paper, 422(1): 1—37
- Bennett S J, Bridge J S, 1995. An experimental study of flow bedload transport and bed topography under conditions of erosion and deposition and comparison with theoretical models. *Sedimentology*, 42: 117—146
- Bridge J S, 1981. Hydraulic interpretation of grain-size distributions using a physical model for bed load transport. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(4): 1109—1124
- Bridge J S, Bennett S J, 1992. A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes, and densities. *Water Resources Research*, 28(2): 337—363
- Chang Y H, Scrimshaw M D, Lester J N, 2001. A revised Grain-Size Trend Analysis program to define net sediment transport pathways, *Computers & Geosciences*, 27: 109—114
- Channon R D, Hamilton D, 1976. Wave and tidal current sorting of shelf sediment Southwest of England. *Sedimentology*, 23: 17—42
- Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H, 2004. Net sediment transport patterns over the Bohai strait based on grain size trend analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60, 203—212
- Duck R W, Rowan J S, Tenkins P A, *et al*, 2001. A Multi-Method study of bedload provenance and transport pathways in an estuarine channel. *Physics and Chemistry of Earth (B)*, 26: 747—752
- Duman M, Avc M, Duman S *et al*, 2004. Surficial sediment distribution and net sediment transport pattern in Izmir Bay, western Turkey. *Continental Shelf Research*, 24: 965—981
- Dyer K R, 1986. *Coastal and estuarine sediment dynamics*. Chichester: John Wiley, 1—342
- Ferguson R I, Church M, Weatherly H, 2001. Fluvial aggradation in Vedder River: testing a one-dimensional sedimentation model. *Water Resources Research*, 37: 3331—3347
- Gao S, Collins M, 1991. Critique of the “McLaren Method” for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 143—146
- Gao S, Collins M, 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”. *Sedimentary Geology*, 80: 47—60
- Gao S, Collins M, 2001. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: a review. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 19(3): 265—271
- Gao S, Collins M, Lanckneus J *et al*, 1994. Grain size trends associated with net sediment transport patterns, an example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology*, 121: 171—185
- Harris C K, Wiberg P L, 2001. A two-dimensional, time-dependent model of suspended sediment transport and bed reworking for continental shelves. *Computers & Geosciences*, 27: 675—690
- Hoey T B, Ferguson R, 1994. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration. *Water Resources Research*, 30(7): 2251—2260
- Hoey T B, Ferguson R, 1997. Controls of strength and rate of downstream fining above a river base level. *Water Resources Research*, 33(11): 2601—2608
- Hsu S M, Holly F M, 1992. Conceptual bed-load transport model and verification for sediment mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8): 1135—1152
- Jia J, Gao S, Xue Y, 2003. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 783—801
- Karim M F, 1998. Bed material discharge prediction for nonuniform bed sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6): 597—604

- Komar P D, 1987. Selective entrainment by a current from a bed of mixed sizes—A reanalysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57: 203—211
- Le Roux J P, 1994. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain size trends. *Sedimentary Geology*, 94: 97—107
- Le Roux J P, O'Brian R D, Rios F *et al*, 2002. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences*, 28 (5): 717—721
- Li M Z, Amos C L, 2001. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. *Computers & Geosciences*, 27: 619—645
- Liu J T, Liu K-J, Huang J C, 2004. The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan. *Marine Geology*, 181: 357—386
- Mallet C, Howa H L, Garlan T *et al*, 2000. Residual transport model in correlation with sedimentary dynamics over an elongate tidal sandbar in the Gironde estuary (Southwestern France ). *Journal of Sedimentary Research*, 70: 1005—1016
- Masselink G, 1992. Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhne Delta, southern France: a test of the “McLaren Model”. *Journal of Coastal Research*, 8: 286—291
- McLaren P, 1981, An interpretation of trends in grain size measures, *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2): 611—624
- McLaren P, Bowles D, 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55: 457—470
- McManus J, 1988. Grain size determination and interpretation. In: Tucker M ed. *Techniques in Sedimentology*. Balckwell, Oxford, 63—85
- Miller M C, McCave I N, Komar P D, 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24: 507—527
- Molinas A, Wu B, 2000. Comparison of fractional bed-material load computation methods in sand-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1045—1068
- Parker G, 1991a. Selective sorting and abrasion of river gravel. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2): 131—149
- Parker G, 1991b. Selective sorting and abrasion of river gravel. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2): 150—171
- Pederos R, Howa H L, Michel D, 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, 135: 35—49
- Poizot E, Mear Y, Thomas M *et al*, 2006. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis. *Computers & Geosciences*, 32: 360—370
- Robinson R A J, Slingerland R L, 1998. Origin of fluvial grain-size trends in a foreland basin: The Pocono formation on the central Appalachian Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 68: 473—486
- Seal R, Paola C, Parker G *et al*, 1997. Experiments on downstream fining of gravel I: Narrow-channel runs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(10): 874—884
- Soulsby R L, 1997. *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford, Oxford, 1—249
- Stevens R L, Bengtsson H, Lepland A, 1996. Textural provinces and transport interpretations with fine-grained sediments in the Skagerrak. *Journal of Sea Research*, 35: 99—110
- Syvitski J P M ed. 1991. *Principle, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1—368
- Toro-Escobar C M, Paola C, Parker G *et al*, 2000. Experiments on downstream fining of gravel. II: wide and sandy runs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(3): 198—208
- van Lancker V, Lanckneus J, Hearn S *et al*, 2004. Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). *Continental Shelf Research*, 24: 1171—1202
- van Niekerk A, Vogel K R, Slingerland R L *et al*, 1992. Routing of heterogeneous sediments over movable bed: model development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118: 246—262
- van Wesenbeck V, Lanckneus J, 2000. Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: A comparison between the modified McLaren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 70 (3): 470—477
- Vogel K R, van Niekerk A, Slingerland R L *et al*, 1992. Routing of heterogeneous sediments over movable bed: model verification and testing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118: 263—279
- Wright S, Parker G, 2005a. Modeling downstream fining in sand-bed rivers I: Formulation. *Journal of Hydraulic Research*, 43(6): 612—619
- Wright S, Parker G, 2005b. Modeling downstream fining in sand-bed rivers II: Application. *Journal of Hydraulic Research*, 43(6): 620—630
- Wu F, Yang K. 2004. A stochastic partial transport model for mixed-size sediment: application to assessment of fractional mobility. *Water Resources Research*, 40, W04501, doi: 10.1029/2003WR002256
- Wu J, Shen H, 1999. Estuarine bottom sediment transport based on “McLaren Model”: a case study of Huangmaohai Estuary, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49: 265 — 279
- Wu W, Wang S S Y, Jia Y, 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38(6): 427—434
- Yalin M S, 1964. Geometrical properties of sand waves. *Journal of Hydraulics Division*, 90(5): 105—119

## SIMULATION ON SEDIMENT GRAIN SIZE TRENDS WITH BEDLOAD TRANSPORT UNDER RECTILINEAR TIDAL CURRENT

YU Qian, GAO Shu

*(MOE Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing, 210093)*

**Abstract** Grain Size Trends Analysis (GSTA) has been applied widely to marine environments to identify net sediment transport pathways. However, because the physical mechanisms for the formation of grain size trends are still not fully understood, it is not clear what conditions this technique can be applied. In the present study, we attempt to establish a forward modeling approach to model the formation of the trends. A number of numerical experiments were designed for the cases of multi-sized bedload transport by rectilinear tidal currents, and the spatial distributions of sediment grain size parameters associated with the transport processes were obtained, and the influences of sediment dynamic processes on the formation of the trends were evaluated. The experimental results are consistent with the assumptions adopted in the GSTA. The two types of grain size trends used in the GSTA could be simulated by varying spatial gradients in sediment transport rate in the net sediment transport directions.

**Key words** Grain size trend analysis, Bedload, Transport processes, Tidal action, Numerical experiments