

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0826-11

沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件^①

高 抒

(南京大学地理与海洋科学学院海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093)

摘 要 长期以来, 沉积学家尝试用粒度数据来识别沉积环境的类型或判定物质运动的方式, 但只取得了部分成功。粒度参数还有一项可能的用途, 即用其平面差异来获取物质运输信息。沉积学家将粒度参数的平面差异定义为“粒径趋势”, 并建立了以“粒径趋势分析”为基础的定性物质运输模型。粒径趋势分析的基本科学问题包括: 如何提取粒径趋势信息; 如何确定含有物质运输信息的粒径趋势类型; 粒径趋势分析的应用条件是什么。粒径趋势信息可通过粒径趋势矢量的定义及其各向异性显著性的检验而获得, 而经验证据也显示, 含有物质运输信息的粒径趋势类型是存在的。初步研究表明, 粒径趋势分析应满足以下条件: 粒径趋势矢量具有显著性; 底质采样深度应代表同一时间尺度; 平面采样间距应符合地统计法的规则; 避免使用位于于采样网格边缘上的采样点的粒径趋势矢量; 沉积物样品应属于同一个输运体系或研究区处于堆积状态。但是, 由于不同来源的物质混合、源区沉积物特征及变化、不同水动力条件下的物质运输、悬沙沉降、溶解态—颗粒态物质转换、物质输运动力的侧向分布等因素与粒径趋势形成之间的关系还不够明确, 因此这些条件还不是完备的, 这个问题的解决依赖于粒径趋势形成的过程和机制的进一步研究。

关键词 沉积物运输 粒度参数 粒径趋势分析 数值模拟 海洋环境

作者简介 高抒 男 1956 年出生 教授 沉积学 E-mail shuga@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

地球表面 75% 的面积被沉积物或沉积岩所覆盖。一个砂质或者泥质沉积物样品所含的颗粒数量巨大, 应该含有丰富的统计信息, 这引发了沉积学家的极大兴趣, 他们最初对沉积物粒度组成进行了大量的统计分析, 发展了日益成熟的粒度分析技术。随着研究的深入, “粒度参数”有什么用, 这个问题已成为沉积学的核心问题之一。

从 20 世纪中期开始, 沉积学家尝试用粒度数据来识别沉积环境的类型^[1~5], 或判定物质运动的方式, 例如悬移、跃移或蠕移^[6,7]。后来发现, 粒度参数与沉积环境类型的关系是多解的, 例如在 *CM* 图^[8]上, 同样的坐标位置可能对应于不同的沉积环境。因此, 粒度数据无法成为沉积环境识别的决定性判据。此外, 粒度累积分布曲线上的一个正态组分可以与悬移、跃移或蠕移运动方式相联系, 这种主张也与流体力学的边界层理论相冲突。现在我们知道, 悬移或推移状态实际上是同时与粒径和底部切应力有关^[9], 处于悬移或推移状的颗粒不一定呈正态分布。在上述初看起来很有希望的两个研究领域, 实际上并未取

得很大的成功。在沉积学的基础研究中, 粒度分布曲线和粒度参数往往被用于沉积物粒度范围的划分, 以便使地球化学等分析的结果可以在不同类型的沉积物之间进行对比^[10], 或者被用作沉积环境演化研究的佐证资料^[11]。

“粒度参数”还有一项可能的用途, 即粒度参数的不同地点的差异可能含有物质运输信息。McCave^[12]最早将粒度参数的平面差异定义为“粒径趋势”, 并认为它是沉积物运输、堆积的结果。沉积学家早就发现, 在同一个沉积环境中, 底质的粒度分布曲线随采样地点而异, 粒径趋势是由多种动力过程所造成的^[13~15], 包括颗粒的磨损^[16~21]、选择性搬运^[22~29]和不同来源物质的混合^[30~32]。由此产生的一个逆命题是: 能否从粒径趋势中提取沉积动力学信息尤其是运输信息? 针对这一问题, 在前人研究^[33~35]的基础上, McLaren^[36]提出沉积物净输运方向必定与粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态系数等)的某种空间变化型式相联系。之后, 不少研究者在这一领域进行了深入研究, 逐步建立了一种称为“粒径趋势分析”的方法, 并提出了相应的物质运输模型^[37~39]。在这些研究中, 基本的科学问题有三个,

①国家自然科学基金重点项目(批准号: 40231010)资助

收稿日期: 2009-04-22 收修修改稿日期: 2009-06-08

第一是如何提取粒径趋势信息, 第二是如何确定哪些类型的粒径趋势含有物质运输信息, 第三是如何确定粒径趋势分析的应用条件。本文的目的是综合评述这些科学问题的研究进展, 并探讨今后的发展方向。

1 粒度分析与粒径趋势识别

1.1 沉积物粒度分析

粒度分析的目的是获得沉积物粒径的概率分布曲线。习惯上将沉积物样品分为粗颗粒和细颗粒(以 0.063 mm 粒径为界), 细颗粒物质用移液管法分析, 粗颗粒物质用筛法分析, 最后将两部分综合起来, 获得完整的粒径分布曲线。要注意的是, 沉积学中的粒径通常不以毫米表示, 而是以无量纲数值 D_ϕ 来表示: $D_\phi = -\lg_2 D$ (式中 D 为以毫米计的粒径, D_ϕ 为 ϕ 变换后的无量纲粒径)^[40-41]。近年来, 由于激光粒度仪等仪器的发展, 移液管法和筛法这两种方法原理不一致的弱点部分地得到了克服, 分析的自动化程度也大大提高了^[42]。在粒度趋势分析中, 我们所关心的是粒度特征的平面变化信息, 而现行的分析技术已基本能够满足分析的精度要求。

对于一定的粒度分布曲线, 可以计算出一系列粒度参数。最常用的粒度参数包括平均粒径、分选系数和偏态系数。分选系数和偏态系数有多种计算公式^[37-43-46], 但前者一般表示为统计学中定义的二阶矩的函数, 而后者表示为三阶矩的函数。

1.2 沉积物粒径趋势的定义

粒径趋势是指沉积物粒度参数平面分布的变化趋势。对于一个海区, 可以布设一定的采样网格进行底质取样。在采样网格中, 如果考虑任意两个相邻的采样点 A 和 B, 则这两个采样点的粒度参数之间有多种可能的空间变化。例如, 从采样点 A 至采样点 B, 分选系数可能减小, 平均粒径可能变大, 这些都代表粒径趋势的不同类型。用多个粒度参数可以形成组合的粒径趋势, 一般而言, 用 n 个粒度参数可构成 2^n 种粒径趋势; 例如, 用平均粒径、分选系数和偏态系数, 从采样点 A 到采样点 B 可构成如表 1 所列的 8 种基本类型^[47]。此外, 还可以用基本类型来进一步形成复合的类型, 如表 1 中的类型 1 与类型 2 之和就是一种复合类型。

1.3 粒径趋势显著性的识别

上述任何一种类型的粒径趋势都可以用一个矢量来表示, 该矢量的方向是从采样点 A 指向 B, 其大小定义为一个单位长度。这样的矢量称为粒径趋势

矢量^[38]。对于一个采样网格, 每一个采样点的粒度参数都可以与相邻采样点的参数进行比较, 从而找出对应于这个采样点的所有粒径趋势矢量。粒径趋势矢量还有不同的定义方法^[39], 但其目的都是为了将粒径趋势量化, 或者将粒径趋势表示为平面图形。Poizot 等^[48]总结了粒径趋势的各种表示方法, 并试图统一关于粒径趋势描述的术语。Poizot^[49]还进一步制作了相应的获取粒径趋势平面图形的计算机软件。

表 1 用平均粒径、分选系数和偏态系数等三个粒度参数所构成的粒径趋势类型 (μ 为平均粒径, σ 为分选系数, Sk 为偏态系数, 下标 A 和 B 代表采样点位置)

Table 1 The types of grain size trends formed using the first three grain parameters (μ is mean grain size, σ is sorting coefficient, Sk is skewness, and the subscripts A and B denote sampling sites)

粒径趋势类型	定义
1	$\sigma_A < \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A > Sk_B$
2	$\sigma_A < \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A < Sk_B$
3	$\sigma_A < \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A < Sk_B$
4	$\sigma_A < \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A > Sk_B$
5	$\sigma_A > \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A > Sk_B$
6	$\sigma_A > \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A < Sk_B$
7	$\sigma_A > \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A < Sk_B$
8	$\sigma_A > \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A > Sk_B$

粒径趋势矢量具有各向异性。进一步考察粒径趋势矢量, 可以发现在一个采样网格中各个方向上出现某一类型的粒径趋势的概率是不相同的。如果将某一采样点的所有粒径趋势矢量相加, 求出这些矢量的合矢量, 则各个采样点的合矢量往往构成一种有序的分布。在各向同性的情况下, 合矢量的长度应该接近于零, 因此, 合矢量的有序分布代表一种各向异性的特征。在天然海洋环境中, 粒径趋势矢量的各向异性的程度随地点而异。

设想我们将粒度参数随机地分配给平面上的系列站位, 对于这样的一幅粒度参数分布图来说, 其粒径趋势矢量的各向异性应该较弱, 但各向异性或多或少还会存在。这就是说, 虽然粒径趋势的各向异性在自然环境中的存在是一个已经确认的事实, 但是仍然需要建立评价其显著性的方法。M. Laren^[37]提出用 Z 计分法来定义显著性, 而 Gao 和 Collins^[38]建议用粒径趋势矢量的平均长度检验法。在 Gao 和 Collins^[38]研究的基础上, Chang 等^[50]提出了改进的平均矢量长度检验法。Poizot 和 Mar^[51]提供了各种

评价方法的程序软件。粒径趋势矢量需要具有显著的各向异性,这是粒径趋势分析的一个重要条件。

2 粒径趋势的沉积动力学信息

2.1 将粒径趋势用于沉积动力学研究的前提

怎样解释粒径趋势矢量的各向异性?沉积动力学上的一个假说是各向异性与沉积物净输运方向有关,因而可以用于净输运方向的判断^[36-39, 47, 52-54]。

McLaren 和 Bowles^[37]曾提出:沿着净输运方向,某种(或某些)粒径趋势出现的概率远高于其它类型的粒径趋势。进一步的分析表明,由于各向异性是针对某种类型的粒径趋势矢量,因此上述前提应表述为:沿着净输运方向,某种粒径趋势出现的概率远高于其在别的方向上出现的概率^[47]。

在表 1 所列的 8 种基本类型中,类型 1 和 2 被认为在净输运方向上有较高的出现概率,这一观点是基于经验的证据^[38, 47]。用文字来表达,类型 1 相当于“沉积物在运移方向上分选变好、粒径变细且更加负偏”,而类型 2 相当于“沉积物在运移方向上分选变好、粒径变粗且更加正偏”。在净输运方向上粒径参数究竟如何变化,这个问题的最终解决必将依赖于颗粒态物质动力学的原理,但目前颗粒态物质物理学还不能提供答案。因此,粒径趋势的类型 1 和 2 是否含有净输运信息,这仍然只能用经验方法来判定,即在沉积物净输运方向为已知的环境中考察粒径趋势的状况。对海洋环境而言,浅海的潮流脊提供了一个良好的验证场所:北半球潮流脊脊线两侧的物质净输运方向相反,在平面上构成一个逆时针环流。因此,在欧洲北海东南部的一处潮流脊上进行了底质取样,并同步采集了潮流和旁视声纳数据,然后对前述的 8 种粒径趋势逐个检查其在已知净输运方向上和其它方向上的出现概率(净输运方向根据潮流脊形态特征、潮流数据计算和微地貌的解译而确定),结果发现类型 1 和 2 在净输运方向上的确有较高的出现概率^[47]。这项实验还发现,把类型 1 和 2 合并而形成的复合粒径趋势类型具有更高的出现概率,即如果考虑类型 1 或 2 的联合概率,则其效果比分别地单独考虑类型 1 和类型 2 更好。

2.2 粒径趋势分析的方法和结果解释

如果表 1 中的类型 1 和 2 含有净输运信息的假设成立,则如何对粒度数据进行分析以提取输运信息,就成了关键的问题。现在多数研究者都同意,粒径趋势分析的目的是确定沉积物净输运方向。具体

而言,粒径趋势分析的任务是:(1)确定适用的粒径趋势类型;(2)定量地表示粒径趋势矢量的各向异性;(3)将各向异性数据转化为沉积物净输运方向的信息。不同的研究者提出了多种方法,以下的三种方法是有代表性的。

第一种方法(McLaren 方法)是对一维方向上的若干采样点的粒度参数进行两两对比,然后得出代表净输运方向的粒径趋势类型在两个方向上的出现频率,最后把出现频率充分大的方向定为净输运方向^[37, 55]。对于由采样点 S_1, S_2, \dots, S_n 所构成的采样断面,这种方法的要点就是在所有可能组合的两个采样点之间(如 S_1 和 S_2 之间、 S_1 和 S_n 之间、 S_2 和 S_3 之间、等等)搜寻所需的粒径趋势。Prakash 和 Prithiviraj^[56]、McLaren 等^[57]、Wu 和 Shen^[58]、以及 van Wessenbeck 和 Lanckneus^[59]提供了这种方法的应用实例。这种方法的缺陷是混淆了不同的空间尺度(例如, S_1 到 S_2 的距离远小于 S_1 到 S_n 的距离),而且预先设定的采样断面走向未必与输运方向平行^[52],因而在实际应用中容易出现较大误差。Masselink^[60]来自法国莱茵河三角洲海岸的资料指出了这个缺陷。

第二种方法(Le Roux 方法)是根据以下假设,即每个采样点的粒径趋势合矢量的方向与粒度参数的最大梯度方向相重合,并为此设计了相应的计算方法^[39]。实际上,沉积物净输运方向并非必与粒度参数的最大梯度方向一致^[61, 62],粒度参数的最大梯度方向很可能仅代表水动力作用方式差异的最大方向,如河道中从边滩到水道中心位置的粒度参数的梯度可以大于上、下游方向的梯度,但物质输运是从上游指向下游的,因此最大梯度的假设是不符合观察事实的。

第三种方法(Gao-Collins 方法)是把粒径趋势矢量的平面分布图看成为一幅同时包含信息和噪声的图象,从而用图象处理技术来提取平面二维粒径趋势矢量图象中所含的沉积物输运信息^[38]。按照这种方法,对于所考虑的海域可通过各采样点底质的粒度分析获得粒径参数的平面分布图式,然后经粒径趋势分析获得沉积物输运图式(图 1)。粒径趋势分析的第一步是在采样点网格上对每两个相邻的采样点进行比较,找出所有的粒径趋势矢量。两个采样点是否“相邻”,可用特征距离 D_c 来衡量(D_c 通常为最大采样间距)。如果两采样点的实际间距小于 D_c ,则判定为“相邻”,否则判定为“不相邻”。第二步是用下式求出每个采样点的趋势矢量的和:

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}(x, y) \quad (1)$$

式中 n 为所考虑的采样点的趋势矢量总数, $r(x, y)$ 为趋势矢量, $R(x, y)$ 为各个趋势矢量之和。

分析的第三步是对合矢量 $R(x, y)$ 进行平滑处理, 其目的是消除 $R(x, y)$ 图象中所含的“噪声”(即 $R(x, y)$ 在空间上的高频变化)。平滑处理的数学变换公式如下:

$$\vec{R}_m(x, y) = \frac{1}{K+1} [\vec{R}(x, y) + \sum_1^k \vec{R}_j(x, y)] \quad (2)$$

式中 R_j 是由 (2) 式得到的合矢量, k 是相邻采样点的总数 (相邻与否仍用特征距离 D_σ 来判定), $R_m(x, y)$ 为平滑处理后的趋势矢量。 $R_m(x, y)$ 的平面分布图象即代表沉积物净运输的格局。Gao^[63] 编写了获取 $R_m(x, y)$ 的平面分布图象数据的 Fortran 程序。

在进行粒径趋势分析和解释分析结果时, 应注意粒径趋势方法所依据的原理。目前已经确认, 除粒径趋势矢量需要具有显著的各向异性的条件之外, 还应充分考虑以下几点。

首先, 粒径趋势图象受到采样深度的影响^[38]。采样深度是受采样方式控制的, 如抓斗式采泥器采集的是表层 10~30 cm 以内的样品。从物质运输角度看, 所涉及的样品应该是受运输过程影响的物质, 因此应限于近底床的活动层之内。研究表明, 活动层的厚度与所考虑的时间尺度有关。因此, 采样深度在一定程度上指示了与该深度相联系的时间尺度下的净运输过程; 在对比粒径趋势图象和其它沉积动力运输计算数据时, 必须注意时间尺度的匹配。如果所进行的分析是针对沉积层序中的粒径趋势, 则同年代、同层位的采样是必须的^[64]。

其次, 粒径趋势图象的质量与采样的空间尺度有关。沉积物粒径参数往往与沉积环境的类型相关, 故来自不同环境的沉积物样品可能并不存在运输过程上的联系。如果采样间距过大, 则有可能把处于不同运输系统中的物质相混肴, 从而在粒径趋势图象中引入噪声。因此, 相对于沉积环境单元或物质运输系统的尺度而言, 采样距离应达到充分小^[38]。另一方面, 如果采样间距过小, 粒度分析中引入的误差将掩盖粒径参数在真实环境中的空间变化, 造成新的噪声^[38]。随着粒度分析技术的提高, 采样间距可以进一步缩小, 但仍然存在一个可行的采样间距的下限。对某些海域而言, 采样间距不宜过小但必须远小于运输系统的尺度, 这两个条件可能难以同时满足, 此时相应的

粒度趋势图象必然包含较多的噪声; 当噪声达到一定水平时就会破坏粒径趋势的有序性。这就如同一幅降质图象, 当降质达到一定程度时原图象就无法恢复了。一些研究者探讨过不同采样间距对分析结果的影响^[65]。在操作层面上, 采样间距可以通过地统计法 (Geostatistics) 来确定^[66~69]。其基本原理是, 沉积物平均粒径或其他粒度参数的空间梯度如果较大 (即在短距离内有很大变化), 则采样间距应较小, 反之则采样间距应较大。对于平均粒径等参数, 可构造以下函数^[70]:

$$V_h = \sum_{i=1}^{N-h} (Z_i - Z_{i+h})^2 / 2N \quad (3)$$

式中 h 为基本水平距离的倍数, N 为断面上数据点的个数, Z_i 为原点处的参数值, Z_{i+h} 为 h 之外站位的参数值, V_h 为“半方差值” (Semivariance)。式 (3) 中, 随着 h 由小到大变化, V_h 取不同的值, 因此可得到 $V_h - h$ 曲线的图形, 称为“半方差图” (Semivariogram)。在半方差图上, 当 h 增大到某一定值时, V_h 达到一个相对稳定的常数, 此时的 h 值即可定义合适的采样间距。要注意的是, V_h 可以针对不同的方向, 因此它可能是具有各向异性特征的^[67], 在确定采样间距时要综合地考虑这个因素。

最后, 粒径趋势分析结果还会受到边缘效应的影响^[71]。例如, 在正方形采样网格内部, 每个采样点有 8 个相邻采样点, 而处于边缘上的采样点的相邻采样点不超过 5 个, 由此造成的结果是与边缘上的采样点相联系的粒径趋势可能受到歪曲。因此, 在应用粒径趋势图象时应避免使用边缘点上的矢量。

2.3 粒径趋势分析方法的应用

前述的三种粒径趋势分析方法的应用均有文献报道, 其中第三种方法应用的报道相对较多。应用 Gao-Collins 方法进行了潮汐汉道海湾^[38, 72~74]、河口三角洲海岸与砂质海滩^[71, 75, 76, 51]、潮滩^[77]、河口与内陆架^[78~82]、陆架潮流沙脊^[47]、陆架泥砂沉积区^[82, 83]、半封闭海^[84]等海洋环境的沉积物运输研究。

关于数据处理和解释的步骤, Poizat 等^[48] 注意到各文献并不统一, 如粒径趋势显著性的检验有些研究中就没有进行。其中的原因之一, 是对粒径趋势分析的应用条件还不够明确。因此, 一些研究者虽然认识到粒径趋势显著性等条件的重要性, 但把研究的重点放在了趋势分析结果与流场观测、床面形态显示的物质运输格局、研究区堆积状况等的对比上, 其目的是

获得更多的经验证据^[47, 75]。从粒径趋势分析的完整性角度来说, 粒径趋势分析的应用条件和分析结果的多重证据对比都是很重要的。为此, 笔者提出关于粒径趋势分析的数据处理和解释的步骤的建议, 如图 1 所示。

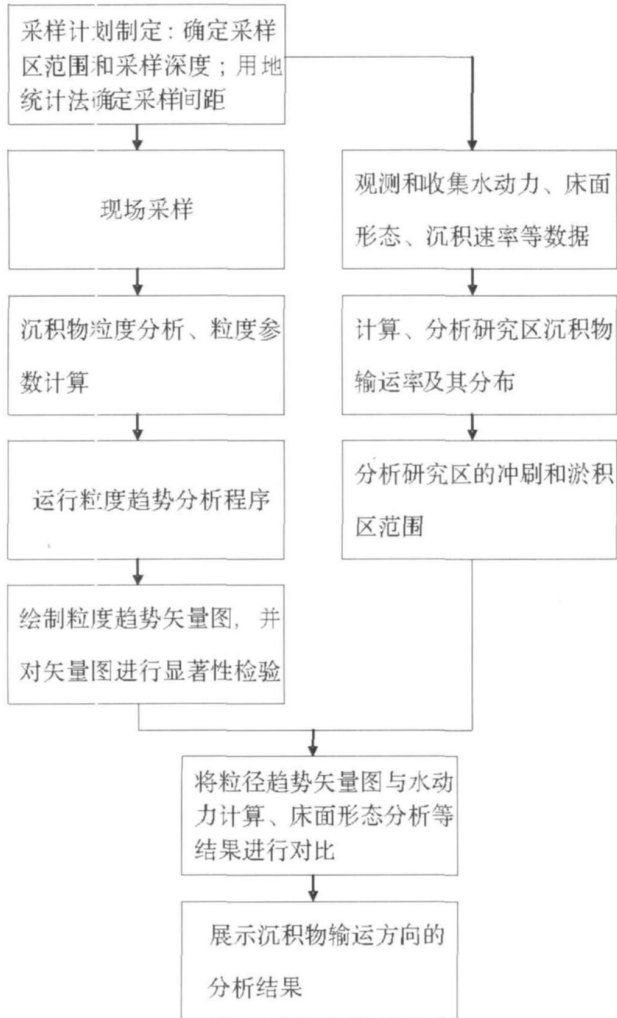


图 1 粒径趋势分析的数据处理和解释的流程

Fig. 1 A flow chart for data treatment and interpretation in grain size trend analysis

3 粒度趋势形成机制和粒度趋势分析的适用条件

3.1 粒度趋势形成的过程和机制研究

迄今关于沉积物粒径趋势的解释都是根据经验的观测资料, 而要最终解决粒径趋势的理论和应用问题, 就必须从物理原理上说明粒径趋势与颗粒态物质运动的关系^[85]。如果不能从沉积动力过程中说明粒

径趋势的形成, 就无法完全确定粒径趋势分析在哪些条件下可以应用, 这是粒径趋势分析的关键问题。目前, 在作为颗粒态物质物理学的重要组成部分沉积动力学本身还不够完善的条件下^[86], 要解决粒径趋势的形成过程问题还有很长一段路要走。笔者认为, 这项工作可从现场观测、水槽实验和数值模拟等三个方面入手。

粒径趋势形成的现场观测可以通过示踪物实验来实现。粒度特征是沉积物的示踪标记之一^[87], 因此粒度特征随输运而发生的变化就可能用示踪物动力学方法^[88, 89]进行研究。例如, 配制可以与现场物质相区分的、粒度分布为已知的示踪物, 在沉积物输运方向为已知的海洋环境中释放, 然后进行沿程采样, 对所获的示踪物进行粒度分析, 这样就可以确定在输运方向上粒度参数发生了怎样的变化。这种示踪物实验方法称为“空间积分法”, 在技术上已经非常成熟^[90]。已有研究者用示踪物方法探讨了砾石海滩上粒径和颗粒形状的分选过程^[91, 92]。

水槽实验过程中, 可以人为地控制水流的强弱, 还可以进行波浪运动的模拟^[93-95]。因此, 海洋中的多种水动力条件, 如潮流作用和浪流共同作用, 都能在水槽内得到重现。这样就能够对已知其粒度组成特征的沉积物, 模拟经历过不同水动力输运之后的底质粒度参数的时间和空间变化, 进而建立粒径趋势与输运过程的关系。

根据对混合粒径沉积物的输运过程的定量计算, 包括对磨损、动力分选和混合作用的定量模拟, 可以对粒径趋势的形成进行数值模拟。这里的核心问题是如何确定混合粒径沉积物中每一粒度组分物质的输运率。经过沉积动力学研究者的努力, 已经提出了一些混合粒径沉积物的输运率公式^[96-103], 为粒径趋势形成的数值模拟创造了条件。已有一些学者应用这些成果或其他方法进行了粒度参数在输运中的变化的模型研究^[104-106]。值得注意的是, 在这类模拟研究中, 水动力条件包括潮流、波浪作用、浪流共同作用等情形; 初始的沉积物可以是基岩风化产物, 也可以是典型沉积环境中的物质; 沉积物的源地可以是一处, 也可以是多处, 其分布状况也有多种可能性; 沉积物磨损和选择性输运的计算公式有多个, 各自应用范围不同。因此, 模拟上述条件的各种组合情形下形成的粒径趋势, 所涉及的工作量和需要分析的数据量会非常巨大, 而到目前为止已进行的模拟分析工作还很少。

3.2 粒度趋势形成过程模拟示例

关于底质粒度特征的模拟早就有研究者进行了尝试^[107, 108]。如今, 计算机技术和沉积动力学本身已有了长足的进步, 深入开展这项工作的条件已经成熟, 不过到目前为止关于粒度趋势形成过程的研究报道尚不多。于谦和高抒等^[109]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, 初步探讨了粒径趋势形成的物理机制。

在文献[109]所报道的模拟实验中, 假设水流为潮汐成因的一维往复流, 同一时刻沿程各处的单宽流量相同, 初始时刻的沿程粒度分布相同, 初始水深不同, 因此流速和沉积物输运能力有沿程差异。应用 van N iekerck 等^[102]提出的推移质沉积物输运公式不同粒径组分的输运率, 进而计算各个区间不同粒径组物质的收支状况, 经过充分长的一段时间之后, 对各个区间活动层内的留存物质进行粒度参数计算, 并绘制沿输运方向的粒度参数分布图。模拟实验针对初始沉积物粒度分布、初始水深的沿程分布和单宽流

量, 设置了不同的数值, 因而构成了多组实验。

数值模型实验的初步结果显示, 在一定的条件下, 所形成的沉积物粒度参数的沿程分布符合粒径趋势分析的假设^[47], 即在恒定物源下, 在净输运方向上, 以下两种粒径趋势出现的概率最大: (1) 平均粒径变细、分选更好且更加负偏; (2) 平均粒径变粗、分选更好且更加正偏。例如, 在源区沉积物平均粒径 = 0.75 ϕ , 偏态 = 0, 分选系数 = 0.54, 峰态 = 0.67, 在输运方向上水深从 8 m 逐渐提高至 12 m 的输入条件下, 在净输运方向上出现了前述的第一种粒径趋势(图 2)。在源区沉积物粒度参数相同但在输运方向上水深从 12 m 逐渐降低至 8 m 的输入条件下, 床面首先经历了冲刷阶段, 然后出现了前述的第二种粒径趋势。

值得注意的是, 上述实验结果不是简单地由于向下游的沉积物输运造成的, 而是输运方向与沿程沉积物输运能力的差异共同造成的。在水深逐渐变大的条件下, 发生了沿程的堆积, 而在水深逐渐变小的条件下, 先是发生沿程的冲刷, 但冲刷的深度尚未达到

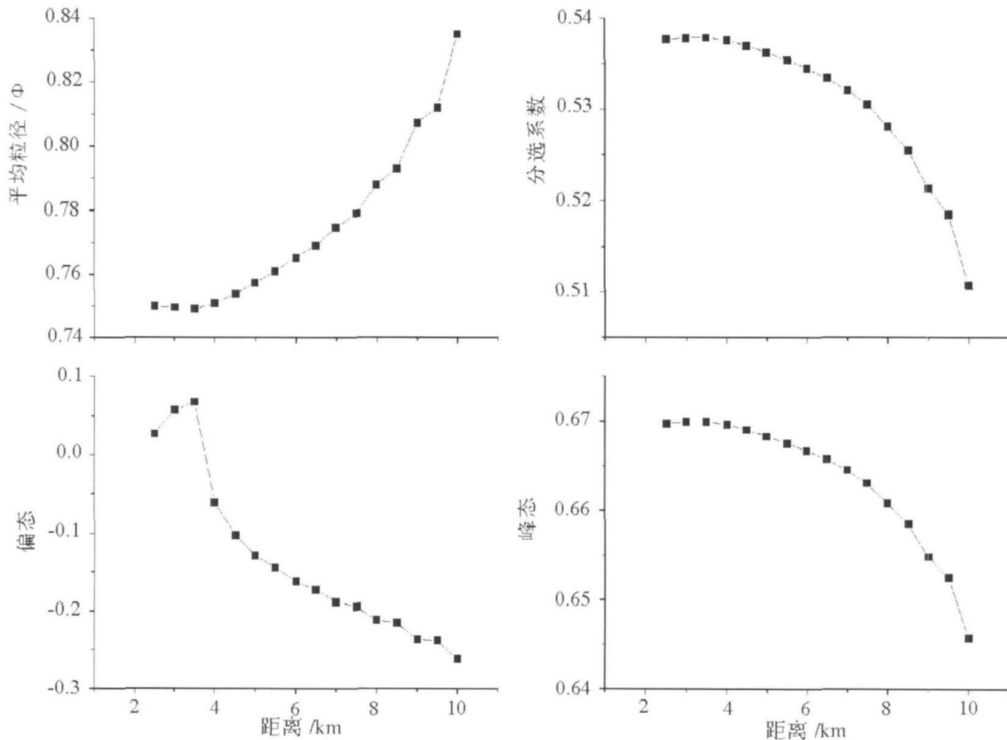


图 2 沉积物粒度参数沿程变化的实验结果(源区沉积物平均粒径 = 0.75 ϕ , 偏态 = 0, 分选系数 = 0.54, 峰态 = 0.67, 在输运方向上水深从 8 m 逐渐提高至 12 m)(据于谦和高抒[109])

Fig 2 Results of a numerical experiment for the changes in grain size parameters along the transport pathway (assumptions made for the experiment at the source area of sediment $\mu = 0.75 \phi$, $\sigma = 0.54$, $Sk = 0$, $Ku = 0.67$ and the water depth increases from 8 m to 12 m along the transport pathway) (after the reference[109])

与运输无关的沉积层,然后接受了来自源区的物质。这组实验说明,在进行粒径趋势分析时,所涉及的沉积物样品应处于同一输运体系之内,对于源区物质而言应处于堆积状态。

3.3 粒度趋势分析的应用条件

根据前述的研究进展,粒度趋势分析应满足的条件可总结为:(1)粒径趋势矢量需要具有显著的各向异性;(2)明确采样深度与时间尺度的关系;(3)采样间距根据地统计方法而确定;(4)消除边缘效应的影响;(5)沉积物样品应处于同一输运体系之内,对于源区物质而言应处于堆积状态。但是,从粒度趋势形成过程的复杂性来看,这些应用条件还不是完备的。影响沉积物粒度组成和粒径趋势特征的要害还有不同来源的物质混合、源区沉积物特征及变化、不同水动力条件下的物质运输、悬沙沉降、溶解态—颗粒态物质转换、物质输运动力的侧向分布等。表 2 列出了与上述六大要素有关的一些沉积动力过程。

表 2 可能影响粒径趋势分析可行性的若干因素和过程

Table 2 Factors and processes that may influence the feasibility of grain size trend analysis

序号	要素	沉积动力过程
1	多个来源物质的混合	物理混合过程、磨损过程、水力分选过程
2	源区沉积物特征及变化	母岩风化过程、流域过程、海岸与海底冲淤过程
3	不同水动力条件下的物质运输	底部边界层过程、细颗粒物悬浮过程、浪流共同作用下的输运过程
4	悬沙沉降	絮凝过程、动水沉降过程
5	溶解态—颗粒态物质转换	化学过程、生物地球化学过程、生物分解过程、生物颗粒生长过程
6	物质输运动力的侧向分布	陆架环流与水团运动过程、底部浑浊层运动过程

这些要素及相关过程的可能影响简述如下。首先,当不同来源的物质发生物理混合时,沉积物粒度组成必定发生变化,但它对粒径趋势矢量的影响还不够清楚^[32-110]。在混合发生之前,从源地到混合地点,沉积物还受到持续的磨损和水力分选过程影响。其次,粒度组成受到源区沉积物的深刻影响^[36],当源区沉积物的母岩性质变化时,进入输运系统的物质也会发生相应的变化。此外,如果源区沉积物来量发生变化,则沉积区的冲淤状况也可能变化,从而导致沉积

物的重新分布,冲刷区就成为新的或附加的源,这也会影响输运系统中物质的粒度特征。再次,在不同水动力条件下,如波浪为主、潮流为主或浪流共同作用的海洋环境中,物质的输运和堆积方式不同^[111],甚至使输运方向逆转^[112],这可能影响粒径趋势的形成和分布。第四,细颗粒物常以絮凝的方式沉降,因而对于选择性搬运的反应可与粗颗粒物不同,这可能使悬沙沉降所形成的粒度趋势具有独特性^[78]。第五,在海洋环境,由于多种化学反应和生物作用,溶解态—颗粒态物质发生频繁的转换,这个因素对总体粒度组成的影响需要有定量的评估。最后,由于海底地形、水动力分布等的影响,物质输运动力往往产生侧向差异,所形成的粒径趋势矢量可能受到这种侧向差异的影响,而与优势输运方向不完全一致^[61, 83]。由于上述这些影响的作用,粒径趋势分析方法的还存在着不确定性,因此在粒径趋势分析结果的解释中应该包含与其他物质输运证据的对比(参见图 1)。今后,通过对粒径趋势形成的各种过程(表 2)的深入研究,图 1 所示的分析流程可望得到进一步的改进。

致谢 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室牛战胜工程师在图件绘制上提供了帮助,谨致谢忱。

参考文献 (References)

- Mason C C, Folk R L. Differentiation of beach dune and aelian flat environments by size analysis: Mustang Island [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1958, 28: 211-226
- Shepard F P, Young R. Distinguishing between beach and dune sands [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1961, 31: 196-214
- Irani R, Callis C F. Particle Size: Measurement, Interpretation and Application [M]. Wiley, New York, 1963: 165
- Spencer D W. The interpretation of grain-size distribution curves of clastic sediments [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1963, 33: 180-190
- Friedman G M. Differences in size distributions and populations of particles among sands of various origins [J]. *Sedimentology*, 1979, 26: 3-32
- Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39: 1074-1106
- Christiansen C, Blaesild P, Dalgaard K. Re-interpreting "segmented" grain-size curves [J]. *Geological Magazine*, 1984, 121: 47-51
- Passega R. Grain size representation by G-M patterns as a geological tool [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, 34: 830-847
- Stenberg R W, Larsen L H, Miao Y T. Tidally driven sediment transport on the East China Sea continental shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4: 105-120

- 10 Lin D I, Jung H S, Choi J Y, *et al*. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: Grain-size normalization and sediment provenance [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 15-24
- 11 Gyllencreutz R. Late Glacial and Holocene paleoceanography in the Skagerrak from high-resolution grain size records [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222: 344-369
- 12 McCave IN. Grain-size trends and transport along beaches: Example from eastern England [J]. *Marine Geology*, 1978, 28: 43-51
- 13 Russell R D. Effects of transportation of sedimentary particles [C]// Trask P D, ed. *Recent Marine Sediments*. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa (Oklahoma), 1939: 32-47
- 14 Knighton A D. Longitudinal changes in size and sorting of stream bed material in four English rivers [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1980, 91: 55-62
- 15 Nordstrom K F. Down-drift coarsening of beach foreshore sediments at tidal inlets: An example from the coast of New Jersey [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14: 691-701
- 16 Krumbein W C. The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments [J]. *Journal of Geology*, 1941, 49: 482-520
- 17 Tanner W F. Modification of sediment size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, 34: 156-164
- 18 Schumm S A, Stevens M A. Abrasion in place: a mechanism for rounding and size reduction of coarse sediments in rivers [J]. *Geology*, 1973, 1: 37-40
- 19 Parker G. Selective sorting and abrasion of river gravel I: Theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991a, 117: 131-149
- 20 Parker G. Selective sorting and abrasion of river gravel II: Applications [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991b, 117: 150-171
- 21 Kodan A Y. Downstream changes in the lithology and grain size of fluvial gravels: the Watarase River, Japan: Evidence of the role of abrasion in downstream fining [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 68-75
- 22 Imman D L. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1949, 19: 51-70
- 23 Carr A P. Size grading along a pebble beach: Chesil Beach, England [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39: 297-311
- 24 Passega R. Sediment sorting related to basin mobility and environment [J]. *AAPG Bulletin*, 1972, 56: 2440-2450
- 25 Kumar P D. Selective longshore transport rate of different grain size fractions within a beach [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1977, 47: 1444-1453
- 26 Kumar P D. Selective entrainment by a current from a bed of mixed sizes: A reanalysis [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57: 203-211
- 27 Ashworth P J, Ferguson R I. Size selective entrainment of bed load in gravel bed streams [J]. *Water Resources Research*, 1989, 25: 627-635
- 28 Bartholm A, Flemming B W. Progressive grain-size sorting along an intertidal energy gradient [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202: 464-472
- 29 Frings R M. Downstream fining in large sand-bed rivers [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 87: 39-60
- 30 Self R P. Longshore variation in beach sands: Nautla area, Veracruz, Mexico [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1977, 47: 1437-1443
- 31 Velegrakis A F, Collins M B, Bastos A C, *et al*. Seabed sediment transport pathways investigations: Review of scientific approach and methodologies [C]// Baskin P S, Collins M B, ed. *Coastal and Shelf Sediment Transport*. London: Geological Society of London, 2007: 127-146
- 32 Flemming B W. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: Implications for sediment trend analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 425-435
- 33 Pettijohn F G, Ridge J D. A textural variation series of beach sands from Cedar Point, Ohio [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1932, 2: 76-88
- 34 Plumley W J. Black Hills terrace gravels: A study in sediment transport [J]. *Journal of Geology*, 1948, 55: 526-577
- 35 Pettijohn F G, Potter P D, Siever R. *Sand and Sandstone* [J]. New York: Springer-Verlag, 1972: 618
- 36 McLaren P. An interpretation of trends in grain size measurements [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51: 611-624
- 37 McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55: 457-470
- 38 Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends based upon definition of "transport vectors" [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81: 47-60
- 39 Le Roux J P. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain size trends [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 94: 97-107
- 40 Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Journal of Geology*, 1922, 30: 377-392
- 41 Krumbein W C, Pettijohn F J. *Manual of Sedimentary Petrology* [M]. New York: Appleton-Century-Crofts, 1938: 549
- 42 Syvitski J P M, editor. *Principle Methods and Application of Particle Size Analysis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 368
- 43 Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3-27
- 44 Boggess Jr. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* [M]. Merrill: Columbus (Ohio), 1987: 784
- 45 McManus J. Grain size determination and interpretation [C]// Tucker M, editor. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85
- 46 Leeder M R. *Sedimentology* [M]. London: Harper Collins Academic, 1991: 344
- 47 Gao S, Collins M B, Lanckneus J, *et al*. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1994, 121: 171-185

- 48 Poizot E, MarY. Ecsedtrend A new software to improve sediment trend analysis[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34: 827-837
- 49 Poizot E, MarY, Biscara L. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications[J]. Earth-Science Reviews, 2008, 86: 15-41
- 50 Chang YH, Srimshaw M D, Lester JN. A revised grain-size trend analysis program to define net sediment transport pathways[J]. Computers & Geosciences, 2001, 27: 109-114
- 51 Pinaritis T A, Paphitis D, Collins M. The use of grain size trend analysis in macrotidal areas with breakwaters: Implications of settling velocity and spatial sampling density[J]. Marine Geology, 2008, 253: 132-148
- 52 Gao S, Collins M. Critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61: 143-146
- 53 Le Roux JP, Rojals EM. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: Overview and state of the art[J]. Sedimentary Geology, 2007, 202: 473-488
- 54 Le Roux JP, O'Brien R D, Rijs F, *et al*. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 717-721
- 55 McLaren P, Hills S H, Bowles D. Deriving transport pathways in a sediment trend analysis (STA) [J]. Sedimentary Geology, 2007, 202: 489-498
- 56 Prakash T N, Prihvinam J. A study of seasonal longshore transport direction through grain-size trends: An example from the Quilon coast Kerala, India[J]. Ocean and Shoreline Management, 1988, 11: 195-209
- 57 McLaren P, Collins M B, Gao S, *et al*. Sediment dynamics in the Severn Estuary and Bristol Channel[J]. Journal of the Geological Society (London), 1993, 150: 589-603
- 58 Wu J, Shen H T. Estuarine bottom sediment transport based on "McLaren Model": A case study of Huangnashai Estuary, South China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49: 265-279
- 59 van Wessenbeck V, Lanckneus J. Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: A comparison between the modified McLaren model and bed form analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70: 470-477
- 60 Masselink G. Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhone Delta, southern France: a test of the "McLaren Model" [J]. Journal of Coastal Research, 1992, 8: 286-291
- 61 Asselman N E M. Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, River Waal, the Netherlands[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69 (1): 51-61
- 62 Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai strait based on grain size trend analysis[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 203-212
- 63 Gao S. A Fortran program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways[J]. Computers and Geosciences, 1996, 22: 449-552
- 64 Morton R A, Goff J R, Nichols L. Hydrodynamic implications of textural trends in sand deposits of the 2004 tsunami in Sri Lanka[J]. Sedimentary Geology, 2008, 207: 56-64
- 65 贾建军, 程鹏, 高抒. 利用插值试验分析网格对粒度趋势分析的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 135-141
- 66 Pebesma E J, Wesseling C G. Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation[J]. Computers & Geosciences, 1998, 24: 17-31
- 67 Caeiro S, Painho M, Goovaerts P, *et al*. Spatial sampling design for sediment quality assessment in estuaries[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 853-859
- 68 Poizot E, MarY, Thomas M, *et al*. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis. Computers & Geosciences, 2006, 32: 360-370
- 69 Verfaillie E, van Lancker V, van Meirvenne M. Multivariate geostatistics for the predictive modelling of the surficial sand distribution in shelf seas[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26: 2454-2468
- 70 Davis J C. Statistics and data analysis in geology (2nd edition). New York: John Wiley, 1986: 646
- 71 Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends based upon definition of "transport vectors"-reply[J]. Sedimentary Geology, 1994a, 90: 157-159
- 72 Gao S, Collins M. Analysis of grain size trends for defining net sediment transport patterns in marine environments[J]. Journal of Coastal Research, 1994b, 10: 70-78
- 73 汪亚平, 高抒, 贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势[J]. 地理学报, 2000, 55: 449-458
- 74 Jia J, Gao S, Xue Y. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 783-801
- 75 Pederos R, Howarth L, Michel D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas[J]. Marine Geology, 1996, 135: 35-49
- 76 Duc D M, Nhuan M T, Ngoi C V, *et al*. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 558-565
- 77 贾建军, 汪亚平, 高抒, 等. 江苏大丰潮滩推移质运输与粒度趋势信息解译[J]. 科学通报, 2005, 50: 2546-2554
- 78 Stevens R L, Bengtsson H, Lepland A. Textural provinces and transport interpretations with fine-grained sediments in the Skagerrak[J]. Journal of Sea Research, 1996, 35: 99-110
- 79 Mallet C, Howarth L, Garlan T, *et al*. Residual transport model in correlation with sedimentary dynamics over an elongate tidal sandbar in the Gironde estuary (Southwestern France) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70: 1005-1016
- 80 van Lancker V, Lanckneus J, Heam S, *et al*. Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK) [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 1171-1202
- 81 Friend P L, Velegrakis A F, Weatherston P D, *et al*. Sediment transport pathways in a dredged ria system, southwest England[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67: 491-502

- 82 王华强, 高抒. 杭州湾北岸高潮滩沉积特征与沿岸物质输运趋势 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 25-30
- 83 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31: 604-615
- 84 石学法, 刘焱光, 任红, 等. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用 [J]. 科学通报, 2002, 47: 542-546
- 84 Duman M, Avc M, Duman S *et al*. Surficial sediment distribution and net sediment transport pattern in Izmir Bay, western Turkey [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 965-981
- 85 Gao S, Collins M. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: A review [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2001, 19(3), 265-271
- 86 Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P. The physics of granular materials [J]. Physics Today, 1996, 49(4), 32-38
- 87 White T E. Status of measurement techniques for coastal sediment transport [J]. Coastal Engineering, 1998, 35: 17-45
- 88 高抒. 示踪沉积物方法的理论框架 [J]. 科学通报, 2000, 45: 329-334
- 89 高抒. 海洋沉积动力学的示踪物方法 [J]. 沉积学报, 2003, 21: 61-65
- 90 Madsen O S. Transport determination by tracer A: Tracer theory [C] // Seymour R J, editor. Nearshore Sediment Transport. New York: Plenum Press, 1989, 103-114
- 91 Carr A P. Experiments on longshore transport and sorting of pebbles Chesil Beach, England [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41: 1184-1204
- 92 Calkwell N E. Using tracers to assess size and shape sorting processes on a pebble beach [J]. Proceedings of the Geologists Association, 1983, 94: 86-90
- 93 Sleath J F H. Sea Bed Mechanics [J]. New York: John Wiley, 1984, 335
- 94 Bennett S J, Bridge J S. An experimental study of flow bed load transport and bed topography under conditions of erosion and deposition and comparison with theoretical models [J]. Sedimentology, 1995, 42: 117-146
- 95 Panagiotopoulos J, Voulgaris G, Collins M B. The influence of clay on the threshold of movement of sandy beds [J]. Coastal Engineering, 1997, 32: 19-44
- 96 Misi R L, Garde R J, Ranga Raju K G. Bed load transport of coarse nonuniform sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110: 312-328
- 97 Sanaga B R, Ranga Raju K G, Garde R J. Bed load transport of sediment mixtures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112: 1003-1018
- 98 Ludwick J C. Bed load transport of sand mixtures in estuaries: A review [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 14315-14326
- 99 Hardwick R J, Willetts B B. Changes with time of the transport rate of sediment mixtures [J]. Journal of Hydraulic Research, 1991, 29: 117-127
- 100 Bridge J S, Bennett S J. A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes, and densities [J]. Water Resources Research, 1992, 28: 337-363
- 101 Hsu S M, Holly F M. Conceptual bed-load transport model and verification for sediment mixtures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118: 1135-1152
- 102 van Niekerk A, Vogel K R, Slingerland R L, *et al*. Routing of heterogeneous sediments over movable bed: model development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118: 246-262
- 103 Vogel K R, van Niekerk A, Slingerland R L, *et al*. Routing of heterogeneous sediments over movable bed: model verification and testing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118: 263-279
- 104 Hoey T B, Ferguson R. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration [J]. Water Resources Research, 1994, 30: 2251-2260
- 105 Hoey T B, Ferguson R. Controls of strength and rate of downstream fining above a river base level [J]. Water Resources Research, 1997, 33: 2601-2608
- 106 Cui Y, Parker G, Paola C. Numerical simulation of aggradation and downstream fining [J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34: 185-204
- 107 Swift D J P, Ludwick J C, Boehmer W R. Shelf sediment transport: a probability model [C] // Swift D J P, Duane D B, Pikey O H, eds. Shelf Sediment Transport: Process and Pattern. Dowden Hutchinson & Ross, Stroudsburg, 1972, 195-223
- 108 Svitski J P M, Alcott J M. Grain size predictions of particle size seaward of river mouths [J]. Computers & Geosciences, 1993, 19: 399-446
- 109 于谦, 高抒. 往复潮流作用下推移质粒径趋势形成模拟初探 [J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(4): 297-304
- 110 Moore A I, McAdo B G, Ruffman A. Landward fining from multiple sources in a sand sheet deposited by the 1929 Grand Banks tsunami in Newfoundland [J]. Sedimentary Geology, 2007, 200: 336-346
- 111 Dyer K R. Coastal and estuarine sediment dynamics [J]. John Wiley, Chichester, 1986, 342
- 112 Gao S, Collins M B. Changes in sediment transport directions in response to wave action and tidal flow time asymmetry in an estuary [J]. Journal of Coastal Research, 1997, 13: 98-201

Grain Size Trend Analysis: Principle and Applicability

GAO Shu

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract For a long time sedimentologists have used grain size parameters as a criterion to determine the type of sedimentary environments or to identify the mode of transport before accumulation. However, such efforts have been only partly successful. Another possible usage of grain size data is to delineate sediment transport pathways on the basis of the spatial distribution patterns of grain size parameters, which is defined as “grain size trends”. Based upon analysis of grain size trends, qualitative models for sediment transport have been established. The basic scientific problems for grain size trend analysis include: the procedure to subtract the information on transport, the method to determine which types of the trends contain transport information, and the conditions under which the method can be applied. For the first two questions, it has been proposed that the patterns of the trends can be obtained by defining the “trend vector” and identifying its spatial anisotropy (the significance of which can be tested using statistical methods), and empirical evidence has shown the existence of the trend types that contain transport information. With regard to the third question, preliminary studies indicate that the following conditions should be satisfied for the application of grain size trend analysis: (1) the spatial anisotropy of the trend vectors is statistically significant; (2) the sampling depth matches the temporal scale of the transport phenomenon; (3) the sampling interval is in agreement with the geostatistical principle; (4) the edge effect is eliminated; and (5) the samples are from the same transport system or the sedimentary environment is in an accretional status. However, these conditions are still incomplete, because of the uncertainties from the effects of material mixing, the characteristics and their changes of sediment in source areas, transport in different hydrodynamic settings, settling processes of suspended sediment, transformation between dissolved-particle materials and lateral distribution patterns of sediment movement. A thorough solution to the problem depends upon future progress in the study of the processes and mechanisms for the formation of grain size trends.

Key words sediment transport, grain size parameters, grain size trend analysis, numerical modeling, marine environments