

·学科进展·

沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学

高 抒*

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

Michael Collins

(英国南安普顿大学海洋系, Southampton SO14 3ZH, UK)

[摘要] 沉积物粒度数据除可用来识别沉积环境的类型或判定物质运动方式之外, 还可用于海洋环境中沉积物输运方向的研究, 即将沉积物净输运方向与粒度参数的空间变化(粒径趋势)相联系。利用粒径趋势分析, 可根据粒度参数的平面分布图式定义粒径趋势矢量, 进而将趋势矢量转换为沉积物净输运图像。粒径趋势分析的基本假设是, 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。初步研究表明这个假设是成立的, 但今后还需要从物理原理上说明粒径趋势与颗粒态物质运动的关系, 从水槽实验和数学模型实验入手, 进一步完善这一分析方法。以促进粒度特征研究乃至颗粒态物质动力学的进步。

[关键词] 沉积物粒度, 粒径趋势, 沉积物输运, 海洋环境

沉积学家用沉积物粒度数据来识别沉积环境的类型或判定物质运动的方式(悬移、跃移或推移)。沉积学家还发现, 在同一个沉积环境中, 底质的粒度分布曲线往往随采样地点而异。这种粒度特征的空间变化是由多种动力搬运作用所造成, 如颗粒的磨损、选择性搬运和不同来源物质的混合等^[1]。由此可引出一个逆问题, 即能否根据粒度特征的空间差异反演颗粒堆积前的搬运过程? 如果答案是肯定的, 那么怎样才能从粒度数据中提取物质运输的信息? 这些问题的解决对于海洋沉积动力学有着重要意义。与河流环境相比, 海洋环境中沉积物的运动状况和所涉及的动力学过程要复杂得多, 沉积物输运计算公式的验证也更为困难, 而任何有关物质运输的信息都可以为动力学过程的研究和输沙率计算的验证提供帮助。

针对上述有关粒度数据的解释, 加拿大地质学家 McLaren 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^[2]。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”(grain size trend analysis)的方法, 以找出粒度特征与物质运动格局之间的联系。本文的目的是综合评述这个领域的研究进展, 并探讨今后的发展方向。

* 1997年度国家杰出青年科学基金获得者。

本文于1998年6月22日收到。

1 粒径趋势的定义

1.1 沉积物粒度分析

粒度分析的目的在于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(pipette method)分析,粗颗粒物质用筛法(sieving method)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: $D_\phi = -\log_2 D$ (式中 D 为以毫米计的粒径, D_ϕ 为 ϕ 变换后的无量纲粒径)。近年来,由于激光粒度仪等仪器的发展,移液管法和筛法的弱点(这两种方法原理不一致)部分地得到克服,分析的自动化程度也大大提高了。虽然,迄今的粒度分析方法都有各自的弱点,粒径分布的准确测定也有待于进一步发展,但是在粒径趋势分析中,我们所考虑的是粒度特征的空间变化信息,因此现行的分析方法已基本能满足分析的准确度要求。

对于一定的粒径分布曲线,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,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。在以下的讨论中,我们将采用这3个粒度参数来表示沉积物的粒度特征。

1.2 粒径趋势的概念

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。在图1所示的采样网格中,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,这些都代表不同类型的粒径趋势。用多个粒度参数可以形成组合的粒径趋势,例如用平均粒径(μ)、分选系数(σ)和偏态系数(Sk),从采样点A到采样点B可构成如下8种类型的粒径趋势:

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| 类型1 | $\sigma_A < \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A > Sk_B$ | 类型2 | $\sigma_A < \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A < Sk_B$ |
| 类型3 | $\sigma_A < \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A < Sk_B$ | 类型4 | $\sigma_A < \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A > Sk_B$ |
| 类型5 | $\sigma_A > \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A > Sk_B$ | 类型6 | $\sigma_A > \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A < Sk_B$ |
| 类型7 | $\sigma_A > \sigma_B, \mu_A < \mu_B, Sk_A < Sk_B$ | 类型8 | $\sigma_A > \sigma_B, \mu_A > \mu_B, Sk_A > Sk_B$ |

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,定义其大小为一个单位长度。这样的矢量称为粒径趋势矢量^[3]。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。

1.3 粒径趋势矢量的各向异性

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分布。在各向同性的情况下,合矢量的长度应接近于零;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,但其存在却是一个已经确认的事实。

1.4 将粒径趋势用于沉积动力学研究的基本假设

怎样解释粒径趋势矢量的各向异性? 沉积动力学的假说是, 各向异性与沉积物净输运方向有关, 即沿着净输运方向, 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^[4]。进一步的分析表明, 由于各向异性是针对某种粒径趋势矢量, 因此上述假说应确切地表达为: 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^[5]。若这个假说成立, 则通过粒径趋势矢量的各向异性的分析, 可反推沉积物净输运方向。实现这个任务的手段是粒径趋势分析, 其要点包括: (a) 确定适用的粒径趋势类型; (b) 定量地表示粒径趋势矢量的各向异性; (c) 将各向异性数据转化为沉积物净输运方向的信息。

2 粒径趋势分析

2.1 代表沉积物运动的粒径趋势类型

在前述的8种粒径趋势中, 基于经验的证据^[3,4], 类型1和2被认为在净搬运方向上有较高的出现概率。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, 这还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, 类型1和2是否适用于粒径趋势分析, 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。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(Side-Scan Sonar)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的确有较高的出现概率^[5]。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和2的联合概率, 则其效果比分别地单独考虑类型1或类型2更好。

2.2 输运信息的提取方法

从粒度数据中提取输运信息有两种具代表性的方法: (a) 对一条线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^[4]。对于由采样点 S_1, S_2, \dots, S_n 所构成的采样剖面, 这种方法的要点就是在所有可能组合的两个采样点之间搜寻要求的粒径趋势。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 的距离大大不同于 S_1 和 S_n 之间的距离), 而且预先设定的采样剖面走向未必与输运方向平行^[6], 因而在实际应用中容易出现差错^[7]。(b) 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像, 从而用图像处理技术来提取平面二维粒径趋势矢量图像中所含的沉积物输运信息^[3]。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)。

2.3 粒径趋势分析步骤

粒径趋势分析^[3,11]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_{cr} 来衡量(D_{cr} 通常用最大

采样间距)。如果两采样点的实际间距小于 D_{cr} ，则判定为“相邻”，否则判定为“不相邻”。第二步是求出每个采样点的趋势矢量的和 $R(x, y)$ 。第三步是对 $R(x, y)$ 进行平滑处理，以消除 $R(x, y)$ 图像中所含的“噪声”（即 $R(x, y)$ 在空间上的高频变化）。平滑处理后的趋势矢量的平面分布图像即代表沉积物净运输的格局。

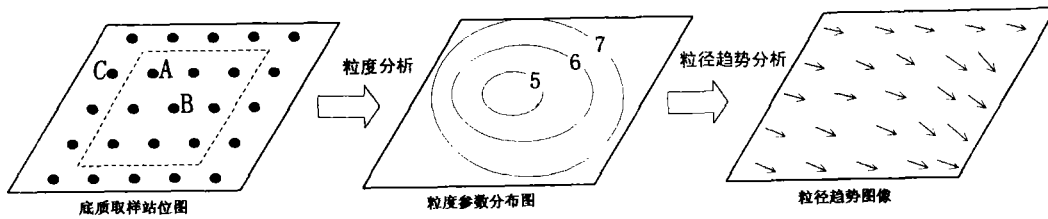


图1 从底质采样到获取趋势矢量图像的流程图

有的研究者认为，粒径趋势分析中还应该包括另一个假设，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重合，并为此设计了相应的计算方法^[8]。实际上，沉积物净运输方向并非必定与粒度参数的最大梯度方向一致，故这个假设是违背观察事实的，而且它对于粒径趋势分析也是多余的。

2.4 采样方法与数据解译

上述粒径趋势分析方法曾应用于多种海洋环境，如海南岛洋浦港潮汐汉道海湾^[3]、英国南部河口海岸^[9]、法国莱茵河三角洲海岸^[9]、欧洲北海潮流沙脊^[5]及法国西部砂质海岸^[10]，所得的结果与流场观测、人工示踪沙实验和地貌沉积特征显示的物质运输格局较为吻合，说明粒径趋势分析方法具有一定的合理性。粒径趋势分析的 Fortran 程序也已发表，可从因特网上调用^[11]。

尽管如此，在粒径趋势图像与净运输图式的联系上，有几个需要注意的方面：(a) 粒径趋势图像显示的是沉积物的净运输方向，而矢量的大小并不表示输运率的大小，这个特点是由分析方法本身所决定的。到目前为止，粒径趋势与输运率之间的联系仍然是悬而未决的问题，有待今后的深入研究。(b) 粒径趋势图像受到采样深度的影响^[3]。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—30cm 以内的样品。从物质运输角度看，所涉及的样品应该是受输运动力影响的物质，因此应限于近底床的活动层（moving layer）之内。研究表明，活动层的厚度与所考虑的时间尺度有关。例如，在海岸带环境，以半日潮汐周期（12.5 小时）为时间尺度的活动层厚度常以厘米计，而在年际时间尺度上可达数十厘米。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，在将粒径趋势图像与其它沉积动力输运计算数据对比时必须注意时间尺度的匹配。(c) 粒径趋势图像的质量与采样的空间尺度有关^[3]。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输运系统中的物质相混淆，从而在粒径趋势图像中引入噪声。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。但若采样间距过小，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。随着粒度分析技术的提高，

采样间距可以进一步缩小, 但有一个下限。对某些海域而言, 采样间距不宜过小但又必须远小于输运系统的尺度。这两个条件可能难以同时满足, 此时相应的粒径趋势图像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像, 当降质达到一定程度时原图像就无法恢复了。粒径趋势图像所含的输运信息是否显著, 可用统计方法加以检验^[3]。(d) 在粒径趋势分析中还会受一种边缘效应的影响。如图 1 中的底质站位图所示, 位于虚线内的采样点有 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, 在应用粒径趋势图像时应避免使用边缘点上的矢量。

3 今后研究方向

过去几年中沉积物粒径趋势分析主要是应用于粗颗粒物质的沉积环境。但许多海洋环境中细颗粒沉积物是优势组分, 而细颗粒物质具有不同的动力学特征, 如细粒沉积物和砂质物质对于选择性搬运可有不同的反应, 细粒沉积物还受到絮凝作用的影响。因此, 在这个方面还需要进一步观测和实验。

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, 而要最终解决其理论和应用问题, 还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。这项工作可从水槽实验和数学模型两方面入手。在水槽实验中, 可以人为地控制水流的大小, 还可进行波浪运动的模拟。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, 模拟经过不同水动力搬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。

根据沉积物在输运过程中的磨损、动力分选和混合作用的定量表达式, 可以对粒径趋势的形成进行数值模拟。模型的输入参数包括动力条件、初始的沉积物分布和粒度组成。模拟的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或多处, 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下形成的粒径趋势, 所涉及的工作量和需要分析的数据量非常巨大。模拟粒径趋势的尝试早在 1972 年就已进行^[12], 但当时由于受计算条件的限制和对沉积物输运机制的了解不够, 这项研究未能得到充分发展。如今, 随着计算机技术和沉积动力学本身的进步, 这项工作的开展将会大大促进粒径趋势乃至颗粒态物质动力学的研究。

参 考 文 献

- [1] Russell R D. Effects of transportation of sedimentary particles. In: Trask, P. D. (editor), Recent Marine Sediments. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa (Oklahoma). 1939, 32—47.
- [2] McLaren P. An interpretation of trends in grain size measurements. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51: 611—624.
- [3] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". Sedimentary Geology, 1992, 81: 47—60.
- [4] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55: 457—470.

- [5] Gao S, Collins M B, Ianckneus J, et al. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: an example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology*, 1994, **121**: 171—185.
- [6] Gao S, Collins M. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, **61**: 143—146.
- [7] Masselink G. Longshore variation of grain size distribution along the coast of the Rhône Delta, southern France: a test of the "McLaren Model". *Journal of Coastal Research*, 1992, **8**: 286—291.
- [8] Le Roux J P. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain size trends. *Sedimentary Geology*, 1994, **94**: 97—107.
- [9] Gao S, Collins M. Analysis of grain size trends, for defining net sediment transport patterns in marine environments. *Journal of Coastal Research*, 1994, **10**: 70—78.
- [10] Pederos R, Howa H L, Michel D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, 1996, **135**: 35—49.
- [11] Gao S. A FORTRAN program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers and Geosciences*, 1996, **22**: 449—552.
- [12] Swift D J P, Ludwick J C, Boehmer W R. Shelf sediment transport: a probability model. In: Swift, D. J. P., Duane, D. B. and Pilkey, O. H. (editors), *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern*. Dowden, Hutchinsonson and Ross, Stroudsburg, 1972, 195—223.

THE USE OF GRAIN SIZE TRENDS IN MARINE SEDIMENT DYNAMICS

Gao Shu

(*Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071*)

Michael Collins

(*Department of Oceanography, University of Southampton, Southampton SO14 3ZH, UK*)

Abstract Grain size parameters have been used to identify the type of sedimentary environments and the mode of sediment transport. Further, spatial changes in the parameters (i. e. grain size trends) contain information on net sediment transport pathways. An analytical procedure can be applied to transform the grain size trends into an image of trend vectors representing net sediment transport patterns. A fundamental assumption for the analysis is that the frequency of occurrence of the trend adopted is much higher in the transport direction, than in any other directions. Preliminary studies have shown that such an assumption is consistent with observations. However, further investigations into the physical processes and mechanisms for the formation of grain size trends are required to improve the technique, including flume experiments and numerical modeling. This study will improve the approach to interpretation of grain size data and help with the establishment of the physics of granular materials.

Key words grain size, trend vectors, sediment transport, marine environment