

粗颗粒河床泥沙位移的特征研究

白文举 张浩宇

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：目前无法测量驱动颗粒与水流、床层和其他颗粒相互作用，因此采用随机运动的方法来理解散体输运特性及其与通道稳定性和形态的联系。本文认为当粗颗粒作为推移质在河流中运动时，所有与自然背景相关的复杂性都会使它们的移动距离遵循细尾或重尾分布。结果表明：流道形态比流态对尾部行为的影响更强烈；步长极值的截断是由于粗颗粒的移动超出了研究范围的测量范围，使原本重尾分布的粒子位移距离显得更短；推移质输移模型应考虑沉积物垂向混合的影响；砾石层流中颗粒的步长可能偶尔会出现拖尾现象。

关键词：粗颗粒泥沙；位移；泥沙运动；特性分析

DOI: 10. 69979/3041-0673. 24. 7. 005

引言

河流输沙的量化一直以测量法为主，主要研究河流输送泥沙的整体能力。这种方法最初是针对沙床河流开发的，但是不适用于砾石床河流，因为砾石床河流的水流能力会随着泥沙供应、泥沙组成或河床粗化状态的变化而变化^[1-2]。表征河流中单个颗粒的位移模式是估算泥沙输移和河道稳定性的另一种方法。由于目前无法测量驱动颗粒与水流、床层和其他颗粒相互作用的确定性力，因此采用随机运动的方法来理解散体输运特性及其与通道稳定性和形态的联系。河流中的推移质输运由单个颗粒的运动组成，颗粒的运动并不是连续的，而是由一系列的台阶和休止期组成，这是由于床面边界的不规则性和流动的湍流性质造成的，或在部分或完全移动的情况下。

本文认为当粗颗粒作为推移质在河流中运动时，所有与自然背景相关的复杂性都会使它们的移动距离遵循细尾或重尾分布。本文通过相关试验数据，为了分析驱动粗颗粒驱动因素，使用了在一系列床层状态和床层形态下收集的磁和被动集成应答器(PIT)以标记的粒子场数据。

1 分析数据及来源

在这项研究中，我们分析了在一定的输沙率下单个粗颗粒的移动距离。粒子的移动距离由 PIT 标记粒子的观测得到。我们收集了现有的一些数据（如图 1），涵盖了广泛的流动和沉积物供应制度和渠道形态。我们同时考虑了单个事件和多个事件。在干旱地区，单个事件是孤立的，因为在连续事件之间，床层是干燥的。在湿润地区，单个事件以几天内恢复到基流为特征，而在融雪为主的溪流中，单个事件覆盖了整个融雪季。这里的多事件是指超过一个事件的累积运动^[3-10]。

Stream	Grain Size (mm)			Number of	Percent Recovered	Flow Regime	Tracing Method	Channel Morphology	Source
	Surface ^a	Subsurface ^a	Tracers	Events/					
				Surveys					
Nahal Hebron	70	35	45–180	3	90–93	Arid	Magnetic	Riffle-pool	Hassan et al. [1991]
Nahal Og	35	15	45–180	2	55–56	Arid	Magnetic	Riffle-pool-bar	Hassan et al. [1991]
Alt Dubaig (reaches 1,2,3)	39–60	15–31	22–185	13	64–81	Humid	Magnetic	Riffle-pool-bar	Drew [1991]; Ferguson et al. [2002]
Monachyle Burn	75	49.5	30–140	9	73–99	Humid	Magnetic	Riffle-pool-bar	Drew [1991]
Lainbach		50–65	30–170	18	80	Humid	Magnetic	Step-pool	Gintz et al. [1996]
Harris Creek	60	20	06–512	6	70	Snowmelt	Magnetic	Riffle-pool	Hassan et al. [1992]
East Creek	40–57	20–31	08–128	5 ^b	65–95	Humid	Magnetic	Riffle-pool-rapid	This study
Forfar	40–50	29	32–172	15	60–100	Snowmelt	Magnetic	Riffle-pool-bar	Gottesfeld et al. [2004] Hassan et al. [2008]
O'Ne-ell	40–50	31	32–176	13	60–100	Snow melt	Magnetic	Riffle-pool-bar	Gottesfeld et al. [2004] Hassan et al. [2008]
Bouinence Torrent	15–29		23–520	3 ^b	25–78	Humid	PIT	Riffle-pool-bar	Liebault et al. [2012]

图 1 数据来源

2 方法

示踪试验用于获取泥沙的河流输运信息。理想情况下，这将包括泥沙运动的速率和方向，静止期和运动期的长度，单个颗粒的步长，停留时间，流动能力，虚拟泥沙运动速率，移动距离，埋藏深度，沉积物来源和沉积面积。在野外，最常见的泥沙弥散度量是对于给定的流动事件、季节或年份，颗粒的移动距离。这些可能反映了单个步骤或多个步骤的总和，使得各种数据集的比较成为一项非平凡的任务。单个或多个事件的出行距离是本文关注的重点。与水槽数据相比，野外的示踪剂覆盖了一系列可能影响移动距离的尺寸。由于缺乏单个颗粒的移动距离与粒径之间的关系以及示踪剂的数量有限，我们没有单独分析每个粒径的移动距离。

同时，本文进行了数值模拟，以观察截断对重尾数据的影响。提出了两种情形：截断极值（即从被测区域或水槽中流出的粒子）和随机截断（对约 1 % 的示踪种群的极值进行截断），导致重尾分布转变为薄尾分布。另一方面，随机截断不影响出行距离分布，保持了重尾分布。因此，本文假设在我们的野外站点中缺失的粒子对传输特性是重尾还是薄尾的推断几乎没有影响。

3 结果与分析

3.1 粒子运动状态

我们首先描述了从涵盖广泛水文情势的溪流中收集的单个事件数据集。其次，我们考察了多个事件和年份的累积出行距离。最后，我们讨论了埋藏对砾石床流中等待时间和泥沙平流/扩散的影响。为了研究出行距离分布，本文分析了来自一系列环境的现场数据，包括单次和多次流动事件。值得注意的是，单次测量可能包含一个或多个流动事件，并且可能反映连续不流动期间代表运动的不止一个粒子步，本文总共考虑了 79 个数据样本。在有重尾分布的站点中，有 6 个站点的水文情势，其中有 5 个站点的水文情势为降雨驱动型（一个是短暂的沙漠山洪水文情势）。

为了研究床层表面上的示踪剂的长期行为，这些示踪剂在床层内垂直均匀混合，在形态之间和沿通道的空间分布，我们研究了累积移动距离的分布。在可能的情况下，我们评估了粒子的总移动距离。我们的分析得到了野外场地质点运动距离分布的广泛的尾部斜率估计。

我们绘制了按通道形态排序的尾部斜率的范围。总体而言，阶梯池和急流形态产生了更小的尾部移动距离，其值范围比沟壑池条状形态更广。位移距离分布的尾部斜率与流量大小、流量持续时间、总多余流功率以及与峰值流量相关的流功率之间没有相关性。大多数重尾位移距离分布是在相对较小到中等事件期间发展起来的。主要有两种形态下泥沙夹带的阶段性特征。一些粒子运动，而相邻的粒子保持静止。沉积物的流动性是空间可变的，仅限于河道内的小范围区域。这意味着在这些事件期间，通道内的大面积区域仍然是静态的。

此外，大多数示踪剂没有改变它们在床内的垂直位置，这意味着沉积物的垂直混合很小。大部分示踪物在大事件期间发生了移动，很大比例的颗粒被掩埋在沉积物层中，暗示了床面强烈的垂向混合。

3.2 粒子静止周期

由于颗粒在亚表面的停留时间直接影响颗粒在流向上扩散的快慢，因此我们还必须考虑它们在床层中的停留时间，以了解它们的整体分散行为。每次搬运事件对颗粒的搬运不仅发生在河床大范围区域，而且发生在冲刷层内部的垂直方向上。这种在空间和时间上的双重间歇性状态意味着任何推移质分布理论除了考虑纵向弥散外，还需要考虑颗粒的垂向混合。在河流泥沙输移的情况下，埋藏颗粒保持静止，直到冲刷事件到达颗粒位置。在一定时间内，埋置颗粒的运动概率小于表面颗粒，埋置颗粒在冲刷层中的停留时间随深度的

增加而增加。泥沙在地下停留时间的增加降低了泥沙的虚拟速度，导致总的运动距离变短。总体而言，停留时间分布进一步受到通道形态的影响。

移动时间是通过时间的整体旅行距离分布的关键组成部分。不可能为我们的研究地点跟踪精确的等待时间数据，但我们研究了一种替代模型，该模型允许在有能力的流动期间对移动的沉积物比例进行推断颗粒夹带所需的临界流量是基于对两条溪流中沉积物流动性的现场观测。如果一个粒子在事件发生时发生了移动，则将其赋值为零等待时间。取流动过程中未运动颗粒的等待时间等于事件长度。

4 结论

(1) 流道形态比流态对尾部行为的影响更强烈，台阶池和急流池形态比沟壑池和棒形态获得了更薄的尾部移动距离和更高的颗粒保留率。

(2) 步长极值的截断是由于粗颗粒的移动超出了研究范围的测量范围，使原本重尾分布的粒子位移距离显得更短。缺失颗粒往往不会离开研究区域，而是由于测量误差或埋藏较深而未能被识别。

(3) 推移质输移模型应考虑沉积物垂向混合的影响。与浅埋或地表石块相比，深埋粗颗粒被移动的概率更低，停留时间更长。

(4) 砾石层流中颗粒的步长可能偶尔会出现拖尾现象，但深埋时间很长的颗粒的等待时间似乎对整体的运动距离分布有更强的影响，这也是之前观测到的颗粒虚拟速度降低的原因。

参考文献

- [1] 秦毅, 李子文, 刘强, 等. 黄河内蒙段泥沙组成与力学运动特征[J]. 水利水运工程学报, 2017, (03): 16-24.
- [2] 张红武, 张俊华, 吴腾. 基于河流动力学的黄河“粗泥沙”的界定[J]. 人民黄河, 2008, (03): 24-25+27+8.
- [3] Hassan, M. A., M. Church, and A. P. Schick. Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams[J]. Water Resour. Res., 1991, 27, 503-511.
- [4] Drew, I. B. Bedload transport, vertical exchange and sediment storage in two Scottish Highland gravel bed streams[D]. Univ. of St. Andrews, St. Andrews, Fife, Scotland, 1991.

- [5]Ferguson, R. I. ,D. J. Bloomer, T. B. Hoey, and A. Weir. Mobility of river tracer pebbles over different timescales[J]. Water Resour. Res. ,2002, 38(5), 1045.
- [6]Gintz, D. ,M. A. Hassan, and K. -H. Schmidt. Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river[J]. Earth Surf. Processes Landforms, 1996, 21, 433-445.
- [7]Hassan, M. A. ,M. Church, and P. J. Ashworth. Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels[J]. Earth Surf. Processes Landforms, 1992, 17, 617-627.
- [8]Gottesfeld, A. S. ,M. A. Hassan, J. F. Tunnicliffe, and R. W. Sediment dispersion in fish bearing streams: the influence of floods and spawning salmon[J]. J. Am. Water Resour. Assoc. ,2004, 40, 1071-1086.
- [9]Hassan, M. A. ,et al. Salmon-driven bedload transport and bed morphology in mountain streams[J]. Geophys. Res. Lett. ,2008, 35, L04405.
- [10]Liebault, F. ,H. Bellot, M. Chapuis, S. Klotz, and M. Deschatres. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream[J]. Earth Surf. Processes Landforms, 2012, 37, 385-399.

作者简介：白文举，1970.08.10，本科学历，高级工程师，一直从事水利工程建设管理，履历：企业总工程师，总经理、党委书记、董事长等职务。