

非均匀推移质颗粒的扩散与分选试验研究

谢玉姝,范念念*,刘兴年

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院,四川 成都,610065)

摘要:为研究非均匀的泥沙颗粒同均匀泥沙颗粒扩散特性的不同,开展一系列水槽试验。在不同水力条件下,通过高清摄像技术拍摄不同粒径推移质颗粒的运动轨迹。利用 Dxo Viewpoint 软件将拍摄得到的静态图片进行矫正处理,使用 ImageJ 软件提取每个时刻颗粒的位移数据。分析位移均值与方差随时间的变化,得到以下结论:不同的时间尺度上,颗粒将表现出不同的扩散特征;水力条件及粒径范围不同,表现出的颗粒扩散特征也将不同;在长时间尺度上,非均匀推移质颗粒的扩散特征会有逐渐趋向于弹道运动 $\beta = 2$ 的趋势,这是由于颗粒本身的非均匀导致的分选现象;颗粒的非均匀性越强,颗粒的分选现象出现越快;天然河流的尺度远大于水槽,这种分选现象将会更加明显。

关键词:非均匀;推移质运动;示踪;弹道运动;分选

中图分类号:TV142.2

文献标志码:A

Experimental Study on Diffusion and Sorting Characteristics of Mixture Bed-load Particles

XIE Yushu, FAN Niannian*, LIU Xingnian

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: For studying the difference of diffusive characteristics between mixture and uniform particles, sets of flume experiments were conducted. The trajectories of particles with different size were extracted under various particles and hydraulic conditions by using HD camera technology. Dxo Viewpoint was applied on image correction, besides, displacement datas of particles were extracted by ImageJ. The relationship between the variance of displacements and time from the data was analyzed. The results showed that, firstly, particles would present different diffusion characteristics at different time scales, for different hydraulic conditions and the ranges of particles. Secondly, the diffusion characteristics of mixture particles would always tend to be ballistic movement ($\beta = 2$) on large time scale, which corresponded to a sorting phenomenon resulting from the heterogeneity of particle. Thirdly, the stronger the particle's heterogeneity, the faster sorting phenomenon occurred, and lastly in the nature rivers, sorting phenomenon would be more obvious due to the much more larger scale than flume experiments.

Key words: mixture; bed-load transport; tracing; ballistic; sorting

单个推移质颗粒受水流紊动、床面形态等因素的影响,受力复杂,且颗粒的运动由交替出现的单步运动状态与停止状态构成,因此其运动具有极大的随机性。而这种单颗粒运动的随机性体现到群体运动特征上,表现为扩散(diffusion或dispersion)现象。通常情况下,通过颗粒运动位移的方差随时间的增

长来描述颗粒的扩散特征,即

$$\sigma_x^2 = \langle (x_i - \bar{x})^2 \rangle \propto t^\beta \quad (1)$$

式中, x_i 为每个颗粒的位移,幂指数 β 表示颗粒的扩散特性。当 $\beta = 1$ 时,为正常扩散;当 $\beta \neq 1$ 时,为反常扩散;相应地,当 $\beta < 1$ 时为欠扩散, $\beta > 1$ 时为超扩散,特别地, $\beta = 2$ 为弹道运动。

收稿日期:2016-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509172);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAB05B02);四川大学青年启动基金项目资助(2015SCU11046)

作者简介:谢玉姝(1992—),女,硕士生。研究方向:水力学与河流动力学。E-mail:549419522@qq.com

*通信联系人 E-mail:fannian7172@126.com

网络出版时间:2016-8-26 21:59:11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160826.2159.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Sayre 等^[1]首次系统地研究了颗粒的扩散,在天然河流中追踪了大量带有放射性的细颗粒运动,并改进 Einstein^[2-3]的随机模型,假定步长与停时满足指数分布,对颗粒的扩散进行模拟;其后, Yang 等^[4]在水槽试验研究中,假定步长与停时呈伽玛分布,模拟结果显示颗粒呈现正常扩散;韩其为等^[5]大量的学者开始利用随机游走模型对颗粒扩散问题进行研究;Drake 等^[6]对天然河流中颗粒的运动进行研究,得到的结果被后续研究者多次引用和进一步分析。

除了颗粒的正常扩散之外, Nikora 等^[7]首次提出在不同时间尺度上颗粒应具有不同的扩散特征,且会出现反常扩散;随后, Schumer 等^[8]利用随机游走模型,通过数学方程的推导,得到步长、停时在窄尾/长尾分布下,颗粒的正常/反常扩散。在这里,窄尾分布是指随机变量衰减较快,各阶距都存在的分布;长尾分布是指随机变量衰减较慢,各阶距不一定存在,而距的离散性可能导致反常扩散(扩散是位移 2 阶矩的表达)。常见分布中,指数分布、伽玛分布和正态分布都是窄尾分布,而幂率分布为长尾分布。进一步, Ganti 等^[9]通过数学推导,在考虑颗粒非均匀性的基础上,认为颗粒的非均匀性将会导致窄尾分布向长尾分布的转变,从而导致颗粒的反常扩散; Hill 等^[10]进一步讨论了 Ganti 等^[9]的理论; Martin 等^[11]针对颗粒反常扩散的物理因素进行了水槽试验研究。

基于 Fan 等^[12]给出的基于单颗粒受力的随机微分方程,范念念等^[13]对非均匀颗粒的长尾分布停时进行模拟,指出非均匀颗粒即便表现出长尾分布,与具有相同长尾分布的均匀颗粒的扩散特性完全不同,颗粒的扩散与分布无关,原因是非均匀颗粒运动中,随机变量不满足独立同分布,中心极限定理不再适用。非均匀颗粒在长时间尺度上表现为弹道运动 $\beta = 2$,而这种弹道运动反映的是颗粒分选现象。范念念^[14]虽然通过数学模型,从理论上揭示了非均匀

颗粒的扩散与均匀颗粒完全不同,但仍然缺乏相应的试验验证。

随着图像采集技术和相关图像分析软件的快速发展,越来越多的学者将高速摄影技术引用到推移质的研究中。如胡春宏等^[15]利用高速摄影技术对水流中跃移颗粒的运动进行研究;刘明潇^[16]和孙东坡^[17]等采用图像识别技术,探讨了双峰型非均匀粗细颗粒对推移质输移的影响;唐立模等^[18-19]利用 3 维粒子示踪测速技术对推移质颗粒的运动特性进行研究; Campagnol 等^[20]通过改变床面形态和水力条件进行水槽试验,对颗粒的扩散进行研究。以上学者都利用相关图像采集技术对推移质的运动进行大量的研究,使得对不同水流条件、不同粒径的单颗粒运动规律的认识更加深入。但从时间/空间尺度上看,其试验均对单颗粒追踪范围有限(一般小于 20 cm),缺乏相对较大尺度上颗粒扩散研究。

通过水槽试验,利用高速摄影技术,分别追踪了均匀和非均匀推移质颗粒的运动轨迹,将两者之间的扩散特征进行对比,进一步揭示了均匀颗粒与非均匀颗粒扩散特性的差异。

1 推移质颗粒的试验研究

1.1 试验概况

水槽试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室进行。水槽断面为矩形,长 7.5 m,宽 0.4 m,高 0.4 m,底坡为 0.33%。水槽底面为抹平的水泥,表面涂刷白色油漆以便观察颗粒的运动,侧面为有机玻璃,水槽末尾设置尾水闸门来调节水深。在水槽正上方布置单反相机(相机型号为佳能 Eos700D,镜头焦距为 18 mm)拍摄颗粒的运动轨迹,拍摄长度为 6 m,视频每秒 30 帧,分辨率 1 920 × 1 080 像素。试验水槽平面布置见图 1。

试验用沙来自天然河沙,采用标准试验筛筛选粒径,试验沙示意图见图 2。

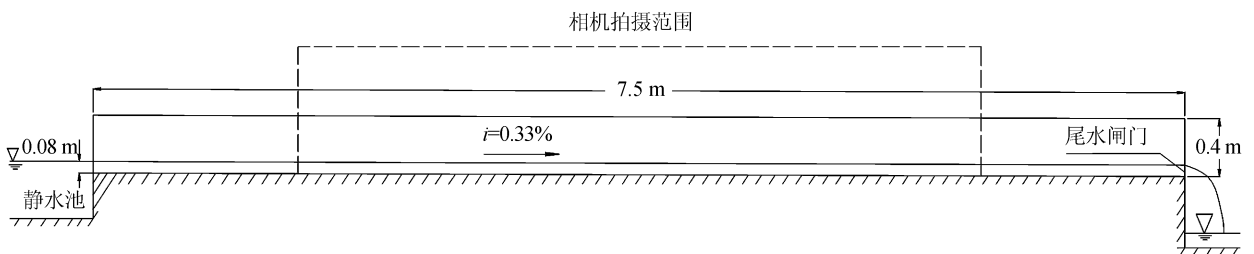


图 1 试验水槽平面布置

Fig.1 Sketch of model test arrangement plan



(a) 3~4 mm 粒径组颗粒



(b) 8~10 mm 粒径组颗粒

图2 试验用沙

Fig.2 Sand of the experiment

1.2 试验内容

在系列水槽试验过程中,保持水槽底坡不变,通过进水管阀门调节上游来水流量,并利用下游尾水闸门调节水深。流量用直角三角形薄壁堰量取,水深则用水尺读取。每组次试验中,保持水力条件不变,将粒径范围为3~10 mm的颗粒按不同粒径组合,分别投入水中,观察颗粒的扩散现象。每组次试验包含3组基本对照试验:第1组含有50颗粒径为3~4 mm的颗粒;第2组含有50颗粒径为8~10 mm的颗粒;第3组含有3~4 mm与8~10 mm粒径的颗粒,共50颗组成的混合颗粒。

在对拍摄图片进行处理时,由于水流波浪的影响,虽能得知每个时刻各颗粒的位移坐标,却难以区分粗细颗粒。但是为保持试验段明渠水流特性,试验没有采用将玻璃板覆盖在水面^[16-17,20]以消除波浪影响的方法。因此,为了更好地分析不同粒径均匀颗粒的运动特征,进行2组均匀颗粒的试验,每组仅包含3颗相同粒径范围的颗粒,追踪它们位移

随时间的变化情况。由于每组包含颗粒数目较少,能够较容易地追踪区分每个颗粒位移随时间的变化关系。试验时在水槽上段投放泥沙颗粒,同时用相机拍摄泥沙颗粒的运动视频,直至第1颗泥沙颗粒运动到拍摄视窗以外。需要注意的是,研究颗粒的扩散,必须保证每一时刻所研究的颗粒都能被追踪到,如果追踪到的颗粒个数减少,得到的扩散幂指数 β 将会小于实际值^[13],因此试验中第1颗泥沙颗粒运动到拍摄视窗以外即停止观测。

为了尽可能做出分选现象,在正式进行试验观测前,反复调整试验条件,使得大小颗粒尽可能体现出运动-停止的间歇状态,且停止时间不能太长,该时间的控制标准是从颗粒投放到最后颗粒起动的的时间间隔比第1颗颗粒运动到视窗以外所需时间小1个数量级。试验采用的水槽宽度为0.4 m,宽深比一般小于5:1,采用Vanoni等^[21]的方法分割床面和边壁剪切力。

部分组次试验水力条件见表1。

表1 试验水力条件

Tab.1 Test hydraulic characteristic parameters of the experiment

组次	流量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深 h/m	流速 $u/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	床面剪切 应力 τ_b/Pa	弗劳德数 Fr	雷诺数 Re
1	0.016 7	0.097	0.430	3.08	0.441	21 600
2	0.019 1	0.176	0.271	5.61	0.206	19 500
3	0.050 5	0.182	0.694	5.76	0.520	50 900
4	0.022 0	0.080	0.688	2.41	0.778	30 300

1.3 数据处理

对于相机拍摄得到的视频,首先使用Total Video Converter软件存储成静态图片,然后将静态图片通过Dxo Viewpoint软件进行畸变矫正,最后利用ImageJ软件,从经过矫正的图片中读出每时刻每个

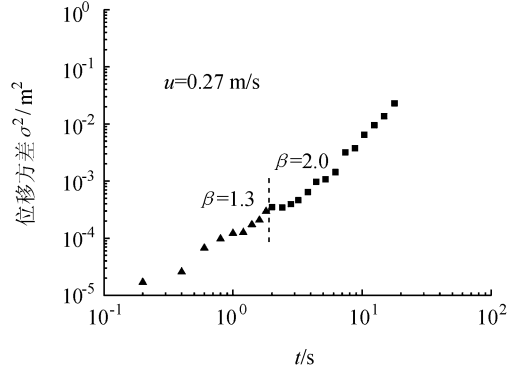
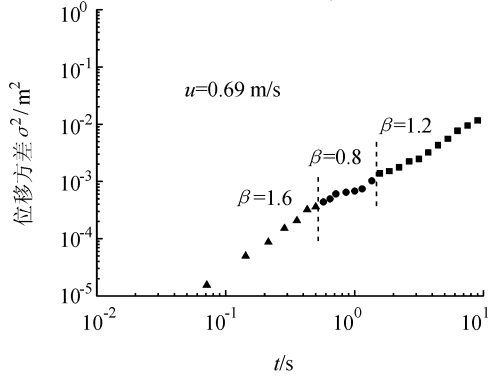
泥沙颗粒的坐标,进而得到颗粒的位移。通过式(1)计算可得到泥沙颗粒位移方差随时间的变化。

2 数据结果分析

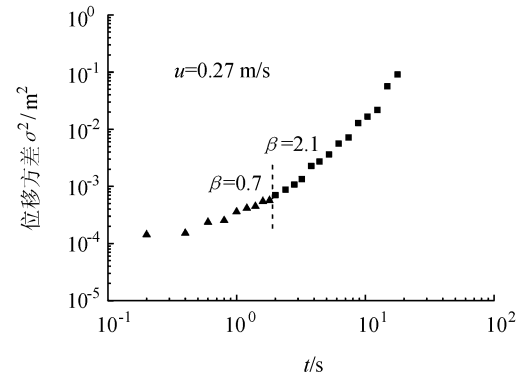
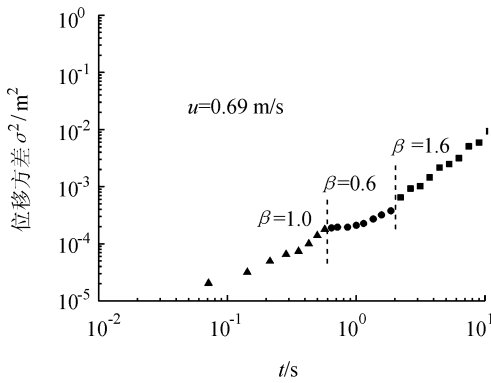
将计算得到各粒径组的位移方差数据点绘在双

对数坐标上,拟合曲线得到颗粒在各时间尺度上的扩散幂指数 β 。选取表1中第2组和第4组两种水力条件下($u = 0.69 \text{ m/s}$ 和 $u = 0.27 \text{ m/s}$)的试验数据进行分析,各粒径组颗粒位移方差-时间关系如图3所示。图3中各条曲线拟合方程的相关因子都在0.9以上,数据点拟合情况较为良好。图3数据显示,各粒径组颗粒在不同的时间尺度上都有不同的扩散特征。需要说明的是,Nikora等^[7]建议将粒径

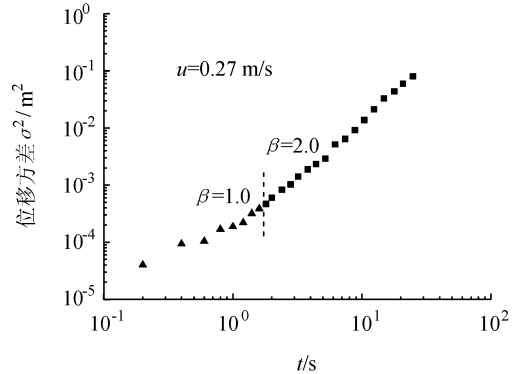
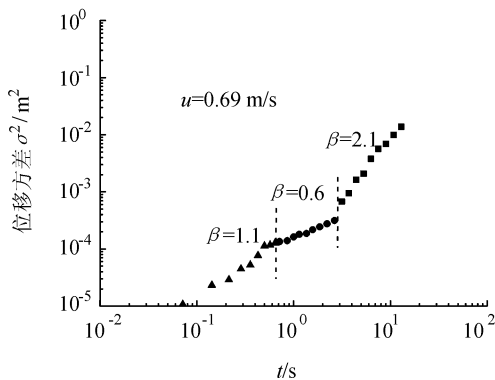
除以摩阻流速(d/u_*)的值作为特征时间,将时间进行无量纲化。然而范念念^[14]对均匀颗粒的扩散研究表明,该特征时间并没有较好的代表性,对于非均匀颗粒,更难找到代表性较强的特征量进行无量纲化,因此,图3中保留了各物理量的原始量纲。为了描述方便,下文将3~4 mm颗粒称为小颗粒,8~10 mm颗粒称为大颗粒,两粒径组的混合颗粒称作混合颗粒。



(a) 3~4 mm 粒径组颗粒位移-方差



(b) 8~10 mm 粒径组颗粒位移-方差



(c) 混合粒径颗粒位移-方差

图3 两种水力条件下不同粒径组的位移方差-时间关系

Fig.3 Both hydraulic conditions of different size groups variance displacement-time graph

在不同的水力条件下,颗粒的扩散特性有所不同。在 $u = 0.69 \text{ m/s}$ 的水力条件下,每组粒径颗粒的扩散都可以分成3个阶段,其中:小颗粒各阶段的

扩散幂指数 β 分别为1.6、0.8、1.2;大颗粒各阶段的扩散幂指数 β 分别为1.0、0.6、1.6;混合颗粒各阶段的扩散幂指数 β 分别为1.1、0.6、2.1。在 $u = 0.27$

m/s的水力条件下,每组粒径颗粒的扩散都可以分成两个阶段,其中:小颗粒各阶段的扩散幂指数 β 分别为1.3、2.0;大颗粒各阶段的扩散幂指数 β 分别为0.7、2.1;混合颗粒各阶段的扩散幂指数 β 分别为1.0、2.0。

$u = 0.69$ m/s的试验过程中,水流强度较大,颗粒运动速度较快。颗粒运动形式以滚动和滑移为主,间歇有跃移的现象,但跃移高度不大,且持续时间很短。在相同水力条件下,3组粒径的推移质颗粒各阶段的幂指数有相似的变化规律。对比大颗粒和混合颗粒:两者在前两个阶段的扩散幂指数几乎相同,但是在长时间尺度上,则明显表现出了差别。小的颗粒与前述两种粒径颗粒相比,扩散幂指数除了在长时间尺度上有所差别之外,在第1个扩散阶段也有所差别。

$u = 0.27$ m/s的试验过程中,水流流速较小,颗粒的运动速度也较慢,颗粒在整个试验过程中没有出现跃移的运动形式,多以滑移和滚动为主。3组推移质颗粒均只表现出了2个不同的扩散阶段;3组推移质颗粒在第1个阶段的扩散幂指数有所不同,但是在第2个阶段中,三者的幂指数均接近2。

3 颗粒的扩散与分选性讨论

3.1 非均匀推移质颗粒扩散幂指数的理论解释

在前人的研究里,将颗粒的扩散根据幂指数 β 的值划分为正常扩散或者反常扩散^[8-10]。事实上,由于颗粒非均匀性的存在,违背了许多模型中随机变量独立同分布这一假定。范念念^[14]根据数学模型的模拟指出:不同的幂指数分布下,非均匀颗粒在长时间尺度上都能表现出 $\beta = 2$ 的弹道运动,即便选择任意分布,只要颗粒之间存在差异,都会表现出 $\beta = 2$ 的弹道运动。也就是说,非均匀颗粒在长时间尺度上表现出的弹道运动与分布形式无关,这是由颗粒本身非均匀性所决定的,此时颗粒的运动由随机性转为确定性的分选运动。

分选描述的是确定性过程,即大颗粒确定性得比小颗粒运动速度慢(或快)。可用如下简化的数学算例说明 $\beta = 2$ (弹道运动)描述的是确定性分选:对于非均匀颗粒群体,可视其为不同粒径均匀颗粒群体的组合,现假设一组非均匀颗粒由两种均匀粒径的颗粒组成,第1种粒径颗粒的平均运动速度为 v_1 ,第2种粒径颗粒的平均运动速度为 v_2 ,经过时间 t 之后,两种颗粒的位移分别为 v_1t 和 v_2t ,计算得这组非均匀颗粒的位移方差为 $0.25(v_1 - v_2)^2t^2$,幂指数

$\beta = 2$ 。即非均匀颗粒在长时间尺度上的扩散幂指数将表现为2。

弹道运动 $\beta = 2$ 反映的是颗粒确定性的运动过程,对于非均匀颗粒,在大时间尺度上出现弹道运动则是分选的体现。然而在小的时间尺度上,由于颗粒惯性的作用^[7],也会出现弹道运动 $\beta = 2$ 。在两段弹道运动中间,可能会出现 $\beta = 1$ 的正常扩散,正常扩散体现的是纯随机作用,或称为无记忆性、马尔科夫性,如布朗运动,这是由于颗粒运动本身具有随机性,在该尺度颗粒运动的自相关性已减弱消失,而确定性的分选还没有出现。

综上所述,随时间尺度的增大,非均匀颗粒扩散在理论上可依次出现 $\beta = 2、1、2$ 这3个阶段; $\beta = 2$ 体现确定性过程,而 $\beta = 1$ 体现纯随机过程,在分选作用较强的情况下,第2段 $\beta = 1$ 可能消失。

3.2 非均匀推移质颗粒扩散的试验分析

数据分析显示颗粒在不同的时间尺度上表现出不同的扩散特征。但可以明确,在不同的水流条件下,混合粒径颗粒在时间尺度较大时均出现 $\beta = 2$ 的弹道运动($u = 0.69$ m/s时 $\beta = 2.0$, $u = 0.27$ m/s时 $\beta = 2.1$,两者均接近2,见图3(c))。其中, $u = 0.69$ 和 0.27 m/s两种试验工况下开始出现弹道运动 $\beta = 2$ 的时间分别是3 s和2 s。

为了进一步揭示分选现象,在 $u = 0.69$ m/s条件下追踪了大小两种粒径单颗粒(各3颗)的位移(图4)。从图4中可以看出,相同粒径范围的颗粒速度变化趋势相似,不同粒径的两组颗粒速度有本质的差别,小颗粒比大颗粒运动速度快。结合3.1节中对颗粒扩散的理论解释,非均匀颗粒可视为不同粒径组颗粒的组合,在长时间尺度上会出现幂指数 $\beta = 2$ 的弹道运动,即分选现象。

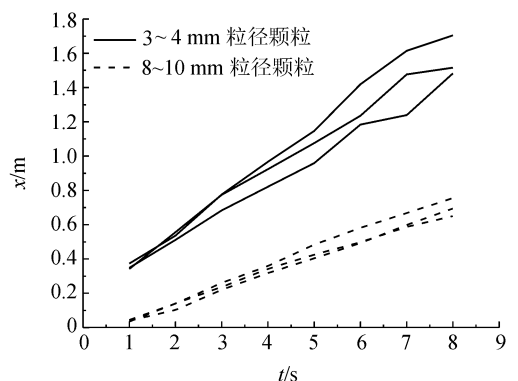


图4 单颗粒位移-时间

Fig. 4 Single particle displacement-time
不同水力条件的2组试验结果显示弹道运动 $\beta = 2$ 出现的时间不同($u = 0.69$ 和 0.27 m/s分别

是3 s和2 s),即水流强度较弱时分选开始出现的时间更小。另外 $u = 0.27$ m/s时,推移质颗粒只有2个不同的扩散阶段;而 $u = 0.69$ m/s时,推移质颗粒则出现了3个不同的扩散阶段。对比这2组试验,最明显的区别是水流流速的不同。在水流流速较低时,粒径较大的颗粒起动较慢,单步步长小,停时较长,而已经起动的推移质颗粒运动较快,单步步长大,停时也较短。水流流速较大时,颗粒的运动比较剧烈,无论是大粒径颗粒还是小粒径颗粒,都有起得快、停时短的特点。因此,与同水流流速高相比,水流流速低的条件下,不同粒径的颗粒运动特性差异较大,颗粒运动的确定性分选作用出现较早。 $u = 0.27$ m/s时扩散指数只有2段,即分选作用较强时3段扩散过程的中间段会消失,与范念念^[14]的理论分析一致。在 $u = 0.69$ m/s的试验中,颗粒扩散的第2阶段的扩散出现停滞现象。此处,颗粒扩散的停滞是指颗粒的扩散指数增长幅度很小。也就是说,在水流流速较大时,颗粒在运动过程中不会一直迅速地扩散下去,而是在经过较为明显的扩散现象以后,会达到一个相对稳定的状态并持续一段时间,该阶段随机性占主导,接着出现强烈的颗粒分选现象。

3.3 均匀颗粒的相对性

图3显示,较大时间尺度上,两种水力条件下,混合颗粒的扩散幂指数与范念念等^[13]的模拟结果表现出一致性,幂指数 β 均趋于2;但在小颗粒(3~4 mm粒径组)和大颗粒(8~10 mm粒径组)的扩散中,表现出的幂指数 β 在1~2之间,并不满足均匀颗粒大尺度上幂指数 $\beta = 1$ 的理论结果^[14]。这是由于试验用沙为天然河沙筛选得到,不可能存在粒径相同且形状相同的均匀沙。因此,试验设计时虽然视小颗粒和大颗粒为对照的均匀颗粒组,但事实上,以上两粒径组颗粒具有一定的非均匀性,因此会表现出与理论上均匀颗粒不一样的扩散特征。

$u = 0.69$ m/s的水力条件下,大时间尺度上扩散幂指数 β 值,对于混合颗粒组试验在长时间尺度上的扩散指数为2.1(图3(c)),小颗粒为1.2(图3(a)),大颗粒为1.6(图3(b))。因为小颗粒和大颗粒这2组试验为相对均匀的颗粒粒径组,长时间尺度上的扩散指数没有混合颗粒大,且后者比前者更趋向于2。这是由于大颗粒与小颗粒相比,粒径变化范围更大,更重要的是,相对较大的颗粒形状差异较大(图2),即使在筛分粒径一致的情况下,形状差异也将导致运动特征的明显差异。因此,虽然在理论上,足够大的时间尺度下都会出现 $\beta = 2$ 的弹道运

动,但受试验尺度上的限制,这种弹道运动还没有出现;第3个阶段,小颗粒的扩散幂指数 β 比大颗粒要小,即小颗粒相对均匀,分选作用相对较弱。 $u = 0.27$ m/s的水力条件下,颗粒运动不剧烈,此时颗粒的非均匀性导致的分选表现更明显,3组粒径颗粒在长时间尺度上都出现了幂指数 $\beta = 2$ 的现象。

3.4 颗粒间的碰撞与阻挡作用

在有大颗粒存在的颗粒群体中(大颗粒与混合颗粒),发现颗粒的运动会受到阻挡作用。有少许的大粒径颗粒在运动一定时间之后会停在水槽中,当后面的颗粒撞击到停止的颗粒时,会出现3种情况:2个颗粒都停在水槽中、2个颗粒都开始运动、后面的颗粒绕过前面的颗粒继续向前运动。这种阻挡作用在大颗粒中表现的更为明显。一般情况下,停时较长的颗粒为大粒径颗粒,混合粒径组的颗粒在运动时,小粒径颗粒撞击到大粒径颗粒上时,在水流的作用下,将绕开大粒径颗粒的阻挡,继续向前运动。

这种颗粒的碰撞和阻挡作用增加了颗粒运动的随机性,体现在颗粒的幂指数上,会使颗粒在第1阶段的幂指数 β 趋向1。由于试验开始时把颗粒集中投放到起始位置,随着时间尺度的增大,颗粒越来越分散,发生碰撞的机率减小,因此这种碰撞阻挡作用对颗粒扩散运动的影响主要体现在小时间尺度上。大颗粒组中颗粒的碰撞和阻挡作用较强,颗粒运动的随机性增强,对应的幂指数 β 更趋向1。如 $u = 0.69$ m/s时,在第1阶段,大颗粒的扩散幂指数 $\beta = 1.0$ (图3(b))而小颗粒的扩散幂指数 $\beta = 1.6$ (图3(a))。

3.5 水槽试验结果在河流中的推广应用

天然河流中,泥沙颗粒均具有更大的不均匀性,而这种不均匀性可由粒径大小、形状和密度导致。且泥沙颗粒的隐蔽作用、床面形态这些不确定的因素会增加颗粒运动的随机性。但颗粒运动的随机性体现出的扩散特征,只发生在较小的时间尺度上。从长时间尺度上看,颗粒的运动是由本身的不均匀性导致的确定性运动。天然河流的空间和时间尺度远远大于水槽,因此在天然河流中更应该表现颗粒运动的确定性,即分选过程。

在一定的水流条件下,分选一旦发生,便是不可逆的,可以用类似于热力学第二定律的熵增原理解释。分选只能随时间/空间尺度的增加越来越明显,幂指数 β 值会一直保持为2。本文的水槽试验中,在1~10 s的时间尺度上,即表现出明显的颗粒分选

现象,幂指数 $\beta = 2$ 。天然河流的空间和时间尺度远远大于水槽,因此在天然河流中更应该表现颗粒运动的确定性,即分选过程。

4 结 语

通过水槽试验追踪推移质颗粒的运动轨迹,分析了不同粒径组颗粒位移方差随时间的关系,得出以下结论:

1) 由颗粒运动随机性导致的扩散现象,在不同的时间尺度上将表现出不同的扩散特征。水力条件不同,颗粒粒径范围不同,表现出的扩散特征也不同。

2) 长时间尺度上,颗粒的扩散都有逐渐趋向弹道运动 $\beta = 2$ 的趋势,这是由于颗粒本身的非均匀性导致的分选现象。且颗粒的非均匀性越强,颗粒的分选现象出现的越快。在水槽尺度上颗粒运动即表现为弹道运动的分选现象;在天然河流中,分选将更加明显。

3) 在满足不同粒径颗粒均能起动的条件下,水流强度较小时,分选作用更强,颗粒的扩散可能只会表现为2个阶段;水流强度较大时,颗粒扩散更容易出现3个阶段。

4) 与地下水、可溶性污染物不同,泥沙颗粒具有非均匀性,使得随机变量的独立同分布假定不再满足。因此对于泥沙运动,正常/反常扩散过程并不重要,更重要的是分选过程。

5) 本文试验是在相同水流条件、平整的定床床面下进行,没有考虑到水流条件不同以及动床条件和粗糙床面的情况。下一步研究中,将会考虑床面形态和水流条件的变化,进一步对颗粒的分选条件及结果进行探讨。

参考文献:

[1] Sayre W W, Hubbell D W. Transport and dispersion of labeled bed material, North Loup River, Nebraska[R]. U. S. Geological. Survey. Professional. Paper, 1965.

[2] Einstein H A. Formulas for the transportation of bed load [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1942, 107(1): 561 - 597.

[3] Einstein H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows[M]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1950.

[4] Yang C T, Sayre W W. Stochastic model for sand disper-

sion[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1971, 97(2): 265 - 288.

- [5] Han Qiwei, He Mingmin. Bedload diffusion stochastic models and statistical laws[J]. Science China: Ser A, 1980 (4): 396 - 408. [韩其为, 何明民. 推移质扩散的随机模型及统计规律[J]. 中国科学: A 辑, 1980 (4): 396 - 408.]
- [6] Drake T G, Shreve R L, Dietrich W E, et al. Bedload transport of fine gravel observed by motion-picture photography[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 192(4): 193 - 217.
- [7] Nikora V, Habersack H, Huber T, et al. On bed particle diffusion in gravel bed flows under weak bed load transport[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 17 - 1 - 17 - 9.
- [8] Schumer R, Meerschaert M M, Baeumer B. Fractional advection-dispersion equations for modeling transport at the Earth surface[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface(2003—2012), 2009, 114(F4): F00A07.
- [9] Ganti V, Meerschaert M M, Foufoula-Georgiou E, et al. Normal and anomalous diffusion of gravel tracer particles in rivers[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003—2012), 2010, 115(F2): F00A12.
- [10] Hill K M, DellAngelo L, Meerschaert M M. Heavy-tailed travel distance in gravel bed transport: An exploratory enquiry[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003—2012), 2010, 115(F2): F00A14.
- [11] Martin R L, Jerolmack D J, Schumer R. The physical basis for anomalous diffusion in bed load transport [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003—2012), 2012, 117(F1): 81 - 83.
- [12] Fan N, Zhong D, Wu B, et al. A mechanistic-stochastic formulation of bed load particle motions: From individual particle forces to the Fokker-Planck equation under low transport rates[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(3): 464 - 482.

- [13] Fan Niannian, Wu Baosheng. Anomalous diffusion of non-uniform bed load particles based on a stochastic model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(2): 246 - 250. [范念念, 吴保生. 基于随机 - 动力学模型的非均匀推移质扩散[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 246 - 250.]
- [14] Fan Niannian. Bed load transport: From individual particle forces to group transport behavior [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. [范念念. 从单颗粒受力到群体运动特征的推移质研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.]
- [15] Hu Chunhong, Hui Yujia. Forces acting on saltation particles in flowing water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(1): 11 - 20. [胡春宏, 惠遇甲. 水流中跃移颗粒的受力分析[J]. 水利学报, 1993(1): 11 - 20.]
- [16] Liu Mingxiao, Sun Dongpo, Wang Pengtao, et al. Interactions between the coarse and fine particles and their influences on the bimodal non-uniform bed load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7): 819 - 827. [刘明潇, 孙东坡, 王鹏涛, 等. 双峰型非均匀沙粗细颗粒相互作用对推移质输移的影响[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 819 - 827.]
- [17] Sun Dongpo, Liu Mingxiao, Wang Pengtao. Movement characteristics and transport laws of the bimodal bed load [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 660 - 667. [孙东坡, 刘明潇, 王鹏涛, 等. 双峰型非均匀沙推移运动特性及输移规律[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 660 - 667.]
- [18] Tang Limo, He Ye, Tang Hongwu, et al. Experimental study on the 3D motion turbulence characteristics of bed-load particles [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(2): 13 - 17. [唐立模, 何晔, 唐洪武, 等. 推移质颗粒3维运动紊动特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(2): 13 - 17.]
- [19] Tang Limo, Wang Xingkui. Experimental study on average movement characteristics of bed-load particles [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8): 895 - 899. [唐立模, 王兴奎. 推移质颗粒平均运动特性的试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 895 - 899.]
- [20] Campagnol J, Radice A, Ballio F, et al. Particle motion and diffusion at weak bed load: Accounting for unsteadiness effects of entrainment and disentrainment [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(5): 633 - 648.
- [21] Vanoni V. Sedimentation engineering, ASCE manuals and reports on engineering practice—No. 54 [R]. New York: American Society of Civil Engineers, 1975.

(编辑 李轶楠)