

泥沙输移与河道形态演变规律研究

李国栋

山西水务集团建设投资有限公司, 山西省太原市, 030006;

摘要: 卵石河流的推移质输沙率的时间演变得到了较多的研究, 为了进一步研究泥沙输移与河道形态演变之间的关系。本文采用 Froude 比尺实验室模型的结果, 对推移质输沙率与河道形态之间的关系进行了进一步分析。结果表明: 辫状河道中宏观和巨尺度推移质脉冲的产生是河流形态的结果; 河段内沟道数量的变化反映了输沙率的大小; 对辫状河流中的床载脉冲的解释必须参考河床形态的三维性质; 对泥沙输移和形态学之间关系的精确识别仅限于实验室模型, 还存在许多不足。

关键词: 泥沙输移; 河道形态; 演变规律; 物理试验

DOI: 10.69979/3041-0673.24.7.004

引言

卵石河流的推移质输沙率的时间演变得到了较多的研究, 这些成果大多来自实验室水槽、原型河流以及野外调查, 并且主要集中于辫状河。一般而言, 输沙与河道形态之间存在着一定的联系。典型的床面特征是单元沙坝和复杂的沙坝组合, 控制推移质输运的因素是决定水系地貌形态的因素, 而不是河道内的流体动力状态^[1]。Carson^[2]根据相对河床物质供给率和河岸可蚀性对河道形态进行了分类。泥沙输移和河道发育过程都主要发生在高流量, 但是负责大量砾石输移和河道形态的过程并不一定相同^[3-5]。因而, 本文采用 Froude 比尺实验室模型的结果, 考虑了单断面测量的推移质输沙率与 2 个比尺测量的河道形态之间的关系。第一个尺度是测量推移质输沙率的断面尺度。第二个尺度是该断面上游延伸约 10 个河道宽度的河段。以识别通道形态和泥沙输移之间的关系。

1 试验方法

1.1 试验参数

卵石河流的水力学模拟原理已由阿什莫尔 (1988) 和 Davies 和 Lee (1988)。所用泥沙 $d = 0.57 \text{ mm}$ 。两个实验分别记为 Runs 1 和 Runs 2。实验所用装置长 14.2 m, 宽 3.0 m。每次试验开始时床面坡度设置为 0.01, 在沙床中部切取宽 1.0 m、深 0.009 m 的直矩形通道。渠道深度的选择是为了在平滩阶段输送所施加的 $1.9 \times \text{m}^3/\text{s}$ 的水流量。在装置的头部引入干沉淀物, 用于沉淀物输出。对于 Run 1, 这是基于阿什莫尔对一系列现场和实验室数据拟合的经验方程。在这个运行的早期阶段, 输入速率是变化的, 以抵消最上部 3 m 的沉积。Run 2 的输入速率基于 Run 1 期间测量的平均输出速率。收集从下游端输出的沉积物, 排水 5 分钟, 称重, 并使用经验确定的转换系数转换为干重。

1.2 Froude 数定义为

$$Fr = \bar{u} / (g\bar{h})^{0.5} \quad (1)$$

其中, \bar{u} 平均流速 (m/s), g 加速度, \bar{h} 平均流深 (m)。单个通道的平均值为 0.90 和 0.86 分别运行 1 和 2。这些与报告的现场数据密切相关。粒子雷诺数的定义为

$$Re_p = u_* k_s / \nu \quad (2)$$

其中 u_* 剪切速度 (m/s), k_s 粗糙长度 (m), ν 水的运动粘度 (m^2/s)。

两次试验的 Re 平均值分别为 68.1 和 65.7。在部分模型中, 颗粒雷诺数低于 70, 表明局部区域为过渡型湍流。只要 Re 的低值与推移质大量输移的区域不重合, 它们对整体模型行为的影响就可以认为是较小的。

通过测量通道横截面形状, 进一步评估了模型在复制原型通道几何结构时的成功性。无因次水力几何数据 (无量纲水深和宽度, 以及根据无量纲流量绘制的水面坡度) 与前人发表的砾质辫状河数据一致。使用的无量纲变量如下: 深度:

$$h^* = \bar{h} / d_{50}; \text{宽度: } b^* = b / d_{50}; \text{流量: } Q^* = Q / [(S_s - 1)gd_{50}^5]^{0.5}。$$

其中 b 为通道宽度 (m), Q 为水流量 (m^3/s), S_s 为 ρ_s/ρ (ρ_s 沉积物密度 (kg/m^3)), ρ 为水密度。

1.3 试验方案

在两种运行中, 水流量保持恒定。水必须隔夜关闭, 并在恢复 30 分钟期间增加流量。每次运行的前 20 小时在三天内进行, 总共运行 50 小时。在 20 小时后, 第一次调查是在沿托盘距离 1 米的 12 个通道横截面上进行的, 每 4 小时重复一次 (2 小时为最后 10 小时)

运行 1)。调查点间最小横断面间距为 0.01 m。所有水道床面长剖面均采用同一仪器 (地形扫描仪, 图 1) 进行测量, 并定期测量水面长剖面。

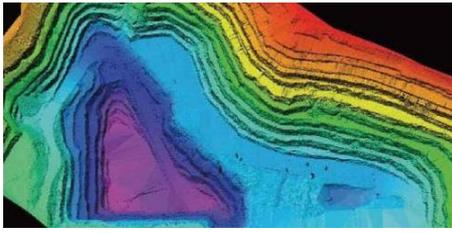


图1 扫描仪测量结果

利用横断面调查数据计算活动河床(即排除初始渠道的银行)的平均床面高程。此外,还计算了位于初始河槽内的断面部分的无量纲浮床指数(BRI)。这是一个关于平均床面高程的每个横截面标准差的度量。

2 试验结果

2.1 输沙量

从托盘下游端的沉积物输出速率显示出运行内和运行间的变化。通过计算时间序列中的主要和次要极大值,识别了两次运行的泥沙输出量的三点移动平均值中的振荡。平均时长分别为247和440分钟。Run 1的泥沙输出量在统计上依赖于前两次输出量的测量值,Run 2的泥沙输出量只依赖于前一次输出量的测量值。

2.2 下游通道几何结构

调查断面最靠近托盘下游端,位于集沙仪上游13m,1.2m处。由于在这1.2m的长度上,通道的几何形状变化很小。在前期(1690 min)Run 2的13 m横截面河道处于退化状态,与此相关的是较低的平均床面高程(MBE)、较高的BRI和较高的输沙率。2650分钟的渐变条件与相对较高相关

在加积过程中,河道变浅导致更多的水流穿过沙坝表面,退化阶段与水面高程降低、更大程度的拦门沙出现和非活动水库中的泥沙储量增加有关。在2410min时,的Run 1河道处于渐变的低BRI状态,具有较低的沉积物输送速率。到2530min时,已经开始了一个阶段的退化,因为在该河段开发的两个主要渠道,导致BRI的上升和非活动存储水库中沉积物体积的增加(图2所示)。



图2 沉积物体积的增加

2.3 泥沙运动-河道几何形态的联系

在超过15分钟的输沙采样间隔内,几何不变的渠道的稳定状态被确定。在没有护面的情况下,稳定的河道条件应与平衡的泥沙输移相联系。随着通道几何形状由加积型向退化型转变,预测的输运速率下降,而测量的输运速率上升。

2.4 泥沙输移与河道几何形态

淤积和退化的发生意味着河道中水流和输沙率之间存在着非平衡关系。在实验运行中,稳定的河道形态很少发生,这是由单个分支河道的流量近乎连续的变化引起的。在总排水量波动的情况下,达到平衡条件的次数可能更少。已有研究表明,泥沙输出量的峰值与一个或两个主要河道的退化期有关,而低谷则与河床的普遍淤积和河道的增殖有关。



图3 淤积



图4 退化

在退化过程中,运输速率超过了假设渠道平衡时的预测值。在加积型河道中,部分进入河段的泥沙沉积在加积型河道中,因此实际输沙率低于基于平衡条件的预测。在加积过程中似乎存在运输的供应限制,而在退化过程中则存在运输能力过剩。这是由于河道非均衡的性质和正在发生的向均衡的调整,而不是泥沙可利用性的限制。Richards[6]指出,使用一个均衡公式来定义能力假定了该公式的有效性。目前的研究表明,一个这样的公式不适用于非平衡条件,而且这样的条件很少达到。均衡条件的相对不经常出现允许出现明显的供给有限的情况。这种情况对于在流动沉积物中自形成的平衡水道来说是很难解释的,因为水道的形成预期会产生一个平衡形状。

3 结论

(1) 辫状河道中宏观和巨尺度推移质脉冲的产生是河流形态的结果。河段内沟道数量的变化反映了输沙率的大小,

可以作为不同河段泥沙淤积的指标。

(2) 对辫状河流中的床载脉冲的解释必须参考河床形态的三维性质。

(3) 对泥沙输移和形态学之间关系的精确识别仅限于实验室模型。在原型河流中识别类似关系的方法还不太完善，但已经对流浪的砾石河床河流进行了研究。这些结果可应用于大型辫状河流，但是还存在许多不足。

参考文献

[1] Smith, N. D. and Smith, D. G. William River: an outstanding example of channel widening and braiding caused by bed-load addition[J]. *Geology*, 1984, 12, 78-82.

[2] Carson, M. A. and Griffiths, G. A. Bedload transport in gravel channels[J]. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 1987, 26, 1-151.

[3] 晏自立, 徐元, 李丹勋. 推移质翻越低坝输移特性的试验研究[J]. *水科学进展*, 2020, 31(03): 356-365. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.005.

[4] 陈晨. 水沙条件和河道形态等因素对河道出汉过程的数值模拟研究[D]. 华北水利水电大学, 2020. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2020.000395.

[5] 张晨玲, 关见朝, 方春明, 等. 山区河流形态对不同来沙过程的响应试验研究[J]. *泥沙研究*, 2018, 43(02): 15-20. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2018.02.003.

Richards, K. S. *Fluvial geomorphology*[J]. *Progress in Physical Geography*, 1988, 12, 435-56.

作者简介: 李国栋, 1983.05 汉族, 忻州市忻府区, 副高职称, 科技创新中心主任, 太原理工大学研究生, 研究方向: 水库河道清淤, 固废资源生态转化。