

# 明渠非恒定流下输沙对比研究

吴国茂<sup>1</sup>, 胡江<sup>2</sup>, 杨胜发<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200;  
2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 明渠非恒定流下的输沙是河流泥沙运动力学的基础问题。针对现阶段水库下泄、山洪暴发引起的非恒定流对泥沙的影响与恒定流下不同, 利用现阶段国内外的非恒定流输沙数据进行对比分析, 发现各研究者未得到一致结论, 因此非恒定流及对应的输沙仍处于起步阶段。通过定义了一个新的非恒定系数, 将各个研究者的数据进行对比整合, 找到了非恒定流与输沙的普遍规律。

**关键词:** 非恒定流; 输沙; 非恒定系数; 对比分析

中图分类号: TV 133.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0117-05

## Comparative study on sediment transport under unsteady flow of open channel

WU Guo-mao<sup>1</sup>, HU Jiang<sup>2</sup>, YANG Sheng-fa<sup>2</sup>

(1. Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo 315200, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The sediment transport under unsteady flow in open channel is the basis of river sediment movement mechanics. Comparing the sediment data under unsteady flow both at home and abroad, we find that the researchers have not reached a consistent conclusion, which indicate that the unsteady flow and sediment is still in the starting stage. By defining a new unsteady factor, we integrate all the researchers' data and find the universal rule concerning sediment transport of unsteady flow.

**Keywords:** unsteady flow; sediment transport; unsteady factor; comparative analysis

在自然条件下, 河流中的流量及水位均较为稳定, 变幅较小, 水流的非恒定性较弱; 但是, 在汛期受暴雨山洪影响下形成非恒定流, 水位流量有较大的变幅, 且水流非恒定性较强。当前, 随着水利开发建设步伐的加快, 河道非恒定流问题日益突出, 研究非恒定流对泥沙的作用迫在眉睫。现阶段主要河流的干流及其支流上水电站梯级相继开发, 如在长江上游河段开发有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝共4个枢纽, 枢纽蓄水运行后, 对于枢纽的上游, 加深了水深, 提高了通航水位, 但是对于枢纽的下游, 在中枯水期受枢纽调峰发电影响下形成“人造洪峰”的非恒定

流, 在汛期枢纽一般敞泄又形成洪水波, 水流非恒定性较强, 造成下游河道内的泥沙运动不同于恒定流, 部分出现了碍航浅滩, 因此研究非恒定流下的输沙对于航道整治是很有必要的。现阶段泥沙输沙公式主要是针对恒定流下进行研究, 而对于非恒定流下输沙仍处于起步阶段。Griffiths<sup>[1]</sup>认为恒定流下的输沙与非恒定流下的输沙是不同的; Graf等<sup>[2-3]</sup>认为非恒定流下的输沙大于恒定流下的输沙; Lee<sup>[4-5]</sup>认为下降段的输沙率大于上涨段的输沙率; Ghimre B<sup>[6]</sup>、Bestawy A<sup>[7]</sup>、马爱兴<sup>[8]</sup>得到上涨段的输沙率大于下降段的输沙率; De Sutter<sup>[9]</sup>、Lee等<sup>[4]</sup>认为非恒定流下的输沙存在滞后现象。

收稿日期: 2014-09-07

作者简介: 吴国茂(1987—), 男, 助理工程师, 从事港口、航道设计与研究工作。

可以看出, 研究非恒定流下的输沙时间较短、研究者较少, 主要是针对上涨段的输沙率是否大于下降段的输沙率、最大输沙率的位置, 但一直都没有得到一致的结论, 本文将各研究者的数据结果进行对比分析, 得到一个整体性的规律。

### 1 现阶段定义的非恒定系数

非恒定强度的表示一般利用非恒定系数, 其定义形式见表 1。

表 1 各研究者定义的非恒定系数

研究者	非恒定系数
①Song <sup>[10]</sup>	$P = \frac{1}{u_{*b}} \cdot \frac{h_p - h_b}{T}$
②Nezu <sup>[11]</sup>	$\alpha = \frac{1}{(u_b + u_p)/2} \cdot \frac{h_p - h_b}{T}$
③Qu <sup>[12]</sup>	$\Omega = \frac{1}{u_{*b}^2} \cdot \frac{Q_p - Q_b}{T}$
④Lee <sup>[4]</sup>	$W_k = \frac{V_{*b}^2 V_{ol}}{g B h_b^3}$
⑤De Sutter <sup>[9]</sup>	$P = \frac{h_p - h_0}{T_r [(u_b + u_p)/2]} \cdot \frac{u_{*p}^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2}$
⑥Bombar G <sup>[5]</sup>	$P_{gt} = \left  gJ - \left( \frac{u_p - u_b}{T_r} \right) \right  / g$
⑦马爱兴 <sup>[8]</sup>	$P = \frac{1000 B T_r}{Q_p - Q_b} \cdot \left( \frac{h_p - h_b}{T_r} \right)^2$

表中  $u_{*b}$ 、 $u_{*cr}$  为基流、泥沙起动摩阻流速;  $u_b$ 、 $h_b$ 、 $Q_b$  和  $u_p$ 、 $h_p$ 、 $Q_p$  分别为基流与峰流流速、水深及流量;  $W_k$  为一个周期内的整体无量纲流量;  $V_{ol}$  为一个周期内包括基流的流量。其中非恒定系数①、②、③、④是针对非恒定流水流进行定义, ⑤、⑥、⑦是针对非恒定流下的输沙进行定义。从结构来看, 都为无量纲系数, 都是基于非恒定的强弱与水深或流量的峰值与基值差成正比、与周期成反比的原理而定义。

## 2 各研究者的数据结果

### 2.1 Bestawy A<sup>[7]</sup>

Bestawy A 利用三角形波进行试验, 针对泥沙粒径  $d_{50} = 4 \text{ mm}$ , 均匀卵砾石在不同比降、不同基流下进行 60 组非恒定流输沙试验, 得到上涨段的输沙率大于下降段的输沙率, 最大输沙出现在最

大水深之前, 未出现输沙滞后现象, 平均提前一个周期的 5% ~ 10%。

### 2.2 Lee<sup>[4]</sup>

Lee K 利用试验数据, 以泥沙起动流量为基流, 得到无量纲输沙率  $W_t$  与非恒定系数  $P$  的关系成指数关系。同时上涨段的输沙率小于下降段的输沙率, 泥沙的最大峰值出现滞后现象, 滞后值在 6% ~ 15%。

### 2.3 Bombar G<sup>[5]</sup>

Bombar G 认为随着  $W_k = \frac{V_{*0}^2 V_{ol}}{g B h_0^3}$  的增加, 上涨

段的整体输沙率与下降段的输沙率的比值逐渐增加趋向 1 但小于 1, 从他的试验数据中可以看出, 上升的时间  $t_r$  小于下降段的时间  $t_d$ , 造成了下降段的输沙率大于上涨段的输沙率。

### 2.4 马爱兴<sup>[8]</sup>

马爱兴以流速峰值为界限, 自定义一个非恒定参数  $P$  (表 1 中式⑦), 当  $P > 0.32$  时, 最大输沙率值滞后于最大流速值; 当  $P < 0.32$  时, 最大输沙率值先于最大流速值。

### 2.5 Bhuban G<sup>[12]</sup>

Bhuban Ghimre 利用自己推导的非恒定流下的摩阻流速公式代替恒定流输沙公式中的摩阻流速, 因此床面切应力是影响非恒定流的最主要的因素。

对比分析见表 2。

表 2 不同研究者最大输沙率的对比分析

研究者	最大输沙率	$W_R/W_F$
马爱兴 <sup>[8]</sup>	非恒定系数 $P > 0.32$ 时, 滞后于流速峰值; 当 $P < 0.32$ 时, 先于流速峰值的现象	
Lee K <sup>[4]</sup>	滞后于最大水深	< 1
Bombar G <sup>[5]</sup>	滞后于最大水深	< 1
Bestawy A <sup>[7]</sup>	最大输沙率先于最大水深, 先于最大流速	> 1

除了 Bestawy A 未得出泥沙存在滞后现象外, 其他的研究者认为滞后是存在的。

## 3 各研究者数据结果分析

各研究者结果不统一的原因主要有: 1) 研究者们都是基于尾门接沙的方式来对试验数据进行分析, 因此分析的结论达不到水流的流速、水位

与输沙率同步的要求; 2) 试验控制是三角形非恒定, 而实际情况下在峰流突变的情况很难实现, 未考虑非恒定流波在传播过程中会发生变形; 而实际上上涨段的时间小于下降段的时间; 3) 泥沙输移随着运距的增加, 上一个周期的泥沙极有可能进入下一个周期, 影响试验数据的准确性。

但是, 通过各研究者之间的输沙率发现所有的数据有相同的特点: 泥沙输移从泥沙起动开始, 如果利用水流的非恒定来分析输沙, 可能造成各个研究者进行分析时都要定义一个新的非恒定系数, 因此定义一个新的非恒定泥沙输移系数应与泥沙起动、水流的非恒定性相结合, 这里利用常用的水流非恒定系数  $P = \frac{1}{u_{*b}} \cdot \frac{h_p - h_b}{T}$  定义了一个新的泥沙输移非恒定系数:

$$P_w = \frac{1}{u_{*b}} \cdot \frac{h_p - h_c}{T} \quad (1)$$

式中:  $h_c$  为泥沙起动时的水深。

其实即使水流的非恒定系数很大, 但也可能达不到泥沙起动, 因此, 泥沙输移的非恒定系数还与泥沙起动有关, 这里将水流非恒定系数  $P$  中的  $h_b$  变为  $h_c$ 。同时从式 (1) 中可以看出, 当  $h_p < h_c$  时, 泥沙未起动, 泥沙输移非恒定系数变为 0; 当  $h_p$  和  $h_c$  不变时,  $h_b$  减小, 即  $u_{*b}$  减小, 水流的非恒定增大,  $P_w$  也随之增大, 说明上式的定义是合理的。

利用 Lee<sup>[4]</sup> 的数据得到图 1。

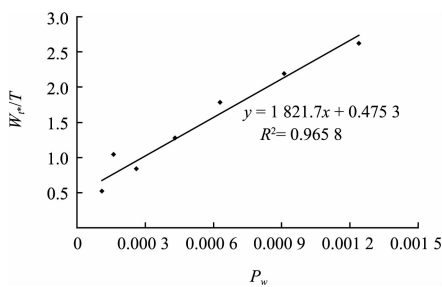


图 1 Lee 的试验数据与  $P_w$  的关系

图 1 中  $W_{t*} = W_t / (\rho_s B D^2)$ ,  $W_{t*}$  为一个周期内的无量纲输沙率,  $W_{t*} / T$  表示一个周期内的平均输沙率。由于 Lee 试验时所有的基流流量为泥沙起动流量, 因此这里泥沙非恒定系数  $P_w = \alpha$ ,  $\alpha$  为

水流非恒定系数, 其相关系数较高。

利用 Qu<sup>[12]</sup> 的数据得到图 2。

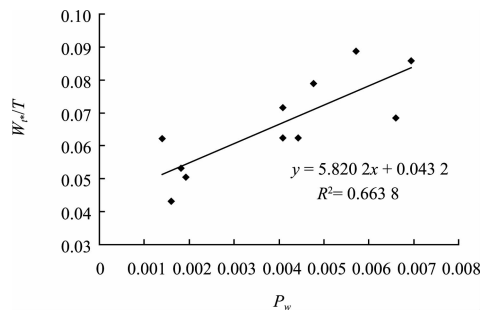


图 2 Qu 的试验数据与  $P_w$  的关系

利用刘春晶<sup>[3]</sup> 的数据得到图 3。

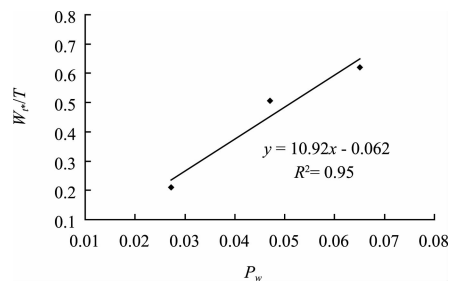


图 3 刘春晶的试验数据与  $P_w$  的关系

利用 Bombar G<sup>[5]</sup> 数据, 将上述非恒定系数  $P_w$  代入分析, 得到图 4。

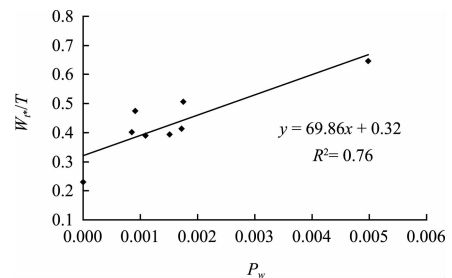


图 4 Bombar G 的试验数据与  $P_w$  的关系

利用马爱兴<sup>[8]</sup> 的数据得到图 5。

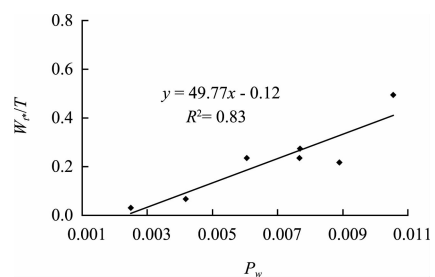


图 5 马爱兴的试验数据与  $P_w$  的关系

各研究者的试验数据见表 3。

表 3 各研究者的试验数据

研究者	试验组次	$T/s$	$h_b$	$h_p$	$u_{*b}$	$P/(10^{-3})$	$P_w/(10^{-3})$	$W_{t*}$	$W_{t*}/T$	说明
Lee	UA1a、1b	2 520	0.088	0.099	0.040	0.11	0.11	762.24	0.31	$h_c = 0.088 \text{ m}$ $J = 2\text{‰}$ $D = 2.08 \text{ mm}$ $B = 0.6 \text{ m}$
	UA2a、2b	2 100	0.088	0.110	0.040	0.26	0.26	997.13	0.51	
	UA3a、3b	1 800	0.088	0.119	0.040	0.43	0.43	1 327.96	0.77	
	UA4a、4b	1 575	0.088	0.127	0.040	0.63	0.63	1 651.73	1.07	
	UA5a、5b	1 400	0.088	0.139	0.040	0.91	0.91	2 038.56	1.31	
	UA6a、6b	1 260	0.088	0.150	0.040	1.24	1.24	2 278.59	1.57	
Qu	1	300	0.123	0.205	0.048	5.69	2.43	21.31	0.07	$h_c = 0.17 \text{ m}$ $J = 3\text{‰}$ $D_{50} = 5.8 \text{ mm}$ $B = 0.6 \text{ m}$
	2	300	0.124	0.207	0.048	5.76	2.57	20.19	0.07	
	3	100	0.109	0.212	0.049	21.02	8.57	14.21	0.14	
	4	60	0.111	0.205	0.051	30.72	11.44	10.66	0.18	
	5	600	0.119	0.220	0.051	3.30	1.63	43.56	0.07	
	6	60	0.100	0.210	0.048	38.19	13.89	10.28	0.17	
	7	60	0.098	0.208	0.048	38.19	13.19	8.23	0.14	
	8	20	0.106	0.182	0.049	77.55	12.24	3.74	0.19	
	9	20	0.105	0.183	0.049	79.59	13.27	3.74	0.19	
	10	60	0.093	0.206	0.048	39.24	12.50	6.73	0.11	
	11	60	0.091	0.194	0.049	35.03	8.16	8.60	0.14	
刘春晶	1	10	0.049	0.052	0.019	18.28	65.05	6.20	0.62	$h_c = 0.17 \text{ m}$ $J = 1.21\text{‰}$ $D = 2.19 \text{ mm}$ $B = 0.295 \text{ m}$
	2	15	0.049	0.052	0.017	12.55	47.06	7.59	0.51	
	3	20	0.042	0.047	0.014	19.12	27.21	4.20	0.21	
Bagmao	1	67	0.040	0.090	0.040	16.86	0.00	15.40	0.23	$h_c = 0.09 \text{ m}$ $J = 5\text{‰}$ $D_{50} = 4.8 \text{ mm}$ $B = 0.8 \text{ m}$
	2	150	0.040	0.100	0.040	9.04	1.51	59.00	0.39	
	3	208	0.040	0.100	0.040	6.52	1.09	80.90	0.39	
	4	267	0.040	0.100	0.040	5.08	0.85	107.50	0.40	
	5	99	0.070	0.100	0.060	5.17	1.72	40.90	0.41	
	6	187	0.070	0.100	0.060	2.74	0.91	88.90	0.48	
	7	136	0.040	0.120	0.040	13.29	4.98	87.80	0.65	
	8	388	0.040	0.120	0.040	4.66	1.75	196.50	0.51	
马爱兴	1	72	0.122	0.158	0.056	4.78	10.52	35.40	0.49	$h_c = 0.115 \text{ m}$ $J = 2.65\text{‰}$ $D_{50} = 3.2 \text{ mm}$ $B = 0.8 \text{ m}$
	2	80	0.119	0.149	0.056	3.62	7.65	21.66	0.27	
	3	88	0.110	0.135	0.053	2.89	4.16	5.70	0.06	
	4	96	0.108	0.128	0.053	2.14	2.46	2.67	0.03	
	5	60	0.118	0.144	0.055	4.39	8.87	12.84	0.21	
	6	70	0.116	0.144	0.055	3.98	7.65	16.28	0.23	
	7	90	0.112	0.144	0.054	3.56	6.03	20.94	0.23	

注： $P$ 为水流的非恒定系数； $P_w$ 为笔者自定义的泥沙输移非恒定系数； $B$ 为水槽宽度； $h_c$ 为泥沙起动水深，这里各研究者在试验中比降未发生变化，因此只有一个对应的 $h_c$ 。

总体来说，从 Lee、Qu、刘春晶、Bombar G 及马爱兴的试验数据可以得到平均无量纲输沙率与泥沙输移非恒定系数之间的统一表达式为：

$$\frac{W_{t*}}{T} = aP_w + b \tag{2}$$

式中： $a$ 、 $b$ 为待定系数，其中当 $P_w = 0$ 时，如果

有泥沙输移及正处于起动阶段,这时水流非恒定系数  $\alpha$  为 0,因此  $b = \frac{kW_{tc}}{B\rho D^2}$ ,  $W_{tc}$  为泥沙起动时的输沙率。

可以看出一个周期内的平均输沙率  $W_{t*}/T$  随着非恒定系数  $P_w$  的增加而增加,进一步表明了上涨段的输沙率和下降段的输沙率之和的平均值在增加,产生这一现象的原因可能有两种:1) 上涨段的输沙率和下降段输沙率都会随着非恒定系数  $P_w$  的增加而增加;2) 上涨段的输沙率随着非恒定系数  $P_w$  的增加而增加,下降段输沙率随着非恒定系数  $P_w$  的增加而减小,但减小的速率没有上涨段增加的速率快。

#### 4 结论

1) 通过国内外研究非恒定的文献,进行了对比分析,各研究者并未得到一致的结论,说明了非恒定流下的输沙研究有一定的进展,但仍还需深入研究。

2) 针对各个研究者的试验数据需要重新自定义一个新非恒定系数才能满足的特点,因此定义了一个适用于各研究者的新泥沙输移非恒定系数  $P_w$ ,得到了各研究者的输沙率与  $P_w$  普遍的关系。

#### 参考文献:

- [1] Griffiths G A, Sutherland A J. Bedload transport by translation waves[J]. Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers, 1977(11):1 279-1 291.
- [2] Graf W H, Suszka L. Unsteady flow and its effect on sediment transport[C]// Proc 21st IAHR Congr. Melbourne, Australia: Int Assoc for Hydro-Environment Eng and Res, 1985: 540-544.
- [3] 刘春晶, 曲兆松, 李丹勋, 等. 明渠非恒定流推移质输沙试验研究[J]. 水力发电学报, 2006(2): 31-37.
- [4] Lee K T, Liu Y L, Cheng K H. Experimental investigation of bed-load transport processes under unsteady flow conditions[J]. Hydrol Processes, 2004, 18(13): 2 439-2 454.
- [5] Bombar G, Elçi S, Tayfur G, et al. Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(10): 1 276-1 282.
- [6] Ghimire B, Deng Z. Event flow hydrograph-based method for modeling sediment transport[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 18(8): 919-928.
- [7] Bestawy A. Sediment transport at steady and unsteady flow: a laboratory study[D]. France: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1997.
- [8] 马爱兴, 陆永军, 陆彦, 等. 非恒定流作用下砾石推移质输移特性试验研究[J]. 水利学报, 2013(7): 800-809.
- [9] De Sutter R, Huygens M, Verhoeven R. Unsteady flow sediment transport in a sewer model[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(9): 121-128.
- [10] Song T, Lemmin U, Graf W H. Uniform-flow in open channels with movable gravel-ged[J]. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32(6): 861-876.
- [11] Nezu I, Kadota A, Nakagawa H. Experimental study on the turbulent structure in unsteady open-channel flows [C]// Proc Symp Fund-amentals and Advancements in Hydr Measurements and Experimentation. New York: ASCE, 1997: 185-193.
- [12] Qu Z. Unsteady open-channel flow over a mobile bed[D]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [13] Song T, Graf W H, Lemmin U. Uniform flow in open channels with movable gravel bed[J]. Journal of Hydraulic Research, 1994(6): 861-876.
- [14] De Sutter R, Verhoeven R, Krein A. Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiments[J]. Hydrological Sciences Journal, 2001, 46(4): 599-610.

(本文编辑 武亚庆)