

文章编号:1009-3087(2013)02-0006-07

清水作用下全动床复式河槽泥沙输移特性及其模拟

杨克君, 聂锐华*, 曹叔尤, 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, 四川 成都 610065)

摘要:推移质运动是河流动力学的基本问题之一,通过水槽试验探讨了清水作用下全动床复式河槽泥沙的输移特性,并通过理论分析提出了该类河道的推移质输沙率的计算方法。试验表明:在清水作用下全动床复式河槽推移质输沙率先随时间单调递增,而后随时间单调递减;推移质中值粒径先随时间大幅度增大,后随着时间的增加中值粒径增大的幅度减小,最终将趋于初始床沙中值粒径。根据推移质输沙率的变化特性,运用仙农熵的概念与理论,通过最大熵原理和变分法推导了河道粗化过程中的推移质输沙率公式,并对该公式参数的敏感性进行了分析。计算结果表明,该公式可以模拟全动床复式河槽河道粗化过程中的输沙率随时间的变化特性。

关键词:全动床;复式河槽;清水冲刷;推移质运动特性;输沙率计算方法

中图分类号:TV133.1

文献标志码:A

Sediment Transport Nature and Its Simulation in Fully Mobile Bed Compound Channels Under the Action of Clear Water

YANG Ke-jun, NIE Rui-hua*, CAO Shu-you, LIU Xing-nian

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Sediment transport is one of the basic issues in the field of river dynamics. The sediment transport nature in fully mobile bed compound channels was experimentally studied under the action of clear water and then the method for modeling the sediment transport rate in the type of channels was proposed. The experimental results showed that the sediment transport rate first increases and then decreases with time. The median diameter of sediment first rapidly and then slowly increases with time, and finally approach the median diameter of the original bed material. According to the motion nature of sediment transport, the computational method for sediment transport rate in the type of channel was proposed. Meanwhile, the sensitivity analysis of parameters in the proposed method was undertaken. The computed results showed that the method can be capable of modeling the sediment transport in the processes of clear-water action.

Key words: fully mobile bed; compound channels; clear-water scour; motion nature of sediment transport; computational method for sediment transport rate

在天然河流中,具有滩地和深槽的复式河槽广泛存在。当中小水时,水流主要集中在主槽内流动;而发生洪水时,水位超过滩面,形成漫滩水流,主槽较快流动与滩地较慢流动相互作用,产生大量的动量交换、质量交换和泥沙交换。由于水流与河床边界相互作用、相互依赖,水流塑造河道,河床形态又影响水流结构。因此,研究漫滩水流泥沙输移特性

及规律不仅具有重要的理论价值,还具有广泛的实际应用价值,它是河流动力学的重要问题之一^[1-2]。

近年来,许多研究学者开展了复式河槽泥沙输移特性及规律的研究。陈立等^[3]提出了漫滩高含沙水流滩槽水沙交换形式。吉祖稳和胡春宏^[4]通过试验发现,滩槽泥沙交换除含沙量外,粒径级配也发生交换。周宜林^[5]、Hu等^[6]提出了挟沙水流悬移质垂线平均流速及含沙量横向分布的计算方法。Knight和Brown^[7]研究了动床复式河槽泥沙输移特性、阻力系数随水深及滩地粗糙度的变化关系。Lyness等^[8]比较与分析了动床条件下弯曲复式河槽与顺直复式河槽水流阻力变化规律的异同。Myers等^[9]讨论了复式河槽床动床阻力对流速分布和流量的影响,并建立了漫滩水流滩槽流速比的经验关

收稿日期:2012-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279117;50709021);
全国博士学位论文作者专项资金资助项目(201051)

作者简介:杨克君(1973—),男,副教授。研究方向:河流动力学。E-mail: yangkejun@163.com

*通信联系人 E-mail: scunie@163.com

系式。Knight 等^[10]、Tang 和 Knight^[11]分析了归槽水流、平滩水流及漫滩水流对床面形态、水面坡度、推移质输沙率的影响。Atabay 等^[12]通过试验分析发现,滩地粗糙将增大推移质输沙率的预测难度。Atabay 和 Knight^[13]探讨了运用河槽协同度方法^[14]计算推移质输沙率,并对推移质输沙率计算精度进行了分析。Karamisheva 等^[15]提出了基于 Akers-White 公式和杨志达输沙率公式的漫滩水流推移质输沙率的计算方法。Knight^[16]讨论了复式河槽泥沙输移的若干问题,指出非恒流、非均匀流输沙研究存在若干困难。Shiono 等^[17-18]通过试验研究了不同的滩地粗糙度对动床弯曲复式河槽水流结构、泥沙输移和床面形态的影响;并发现,水流漫滩后弯曲复式河槽推移质率先随水深减小,而后又随水深增加。Wormleaton 等^[19]研究了弯曲复式河槽床面形态及床沙分选对水流结构的影响。

然而,目前复式河槽泥沙输移研究仅限于主槽为动床边界,而天然复式河槽整个边界都是可动的(其河床演变不仅表现为冲淤变化,还体现为自由地河宽调整)。因此,作者旨在通过水槽试验,探讨

清水作用下的全动床复式河槽泥沙输移特性,进而探讨其推移质输沙率的计算方法。

1 试验概况

全动床复式河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泥沙厅大型河床演变水槽中进行。大型水槽长 50 m,宽度 6 m,深 1 m。全动床复式河槽由 2 个对称的滩地及主槽组成,由中值粒径为 0.8 mm 的天然沙均匀构筑而成,主槽泥沙厚度为 14 cm。另外,主槽边坡 s_m 为 1.75,主槽底宽为 0.60 m,每侧滩地宽度为 0.85 m,滩槽高差为 0.20 m,如图 1 所示。复式河槽长 31 m,其中试验动床段长 27 m,粗卵石过渡段长 4 m。过渡前设置了 3 m 长的消能段。漫滩流量为 $0.180 \text{ m}^3/\text{s}$,河道初始床面底坡为 0.2%。在复式河槽末端全程连续收集推移质,每次接沙时间为 10 min。直到清水冲刷完全粗化(推移质输沙率趋于 0)时,才停止接沙。当泥沙变干后,进行筛分并称各级泥沙质量,以确定推移质输沙率及推移质级配随时间的变化。

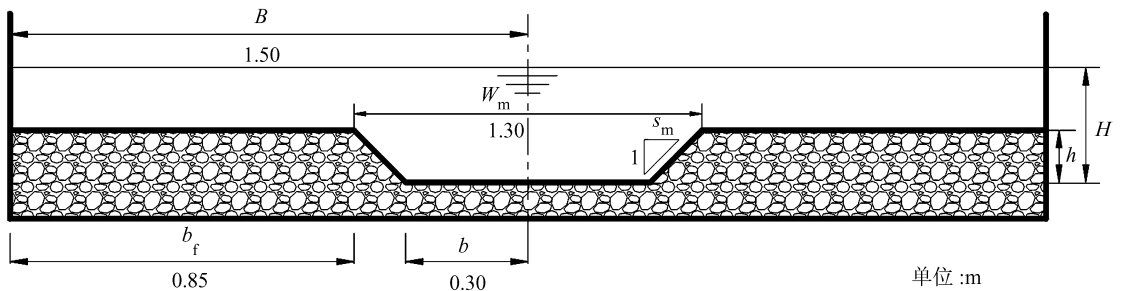


图 1 全动床复式河槽初始断面形态

Fig. 1 Cross section of self-formed compound channels

2 推移质泥沙输移特性

2.1 推移质输沙率随时间的变化特性

全动床复式河槽在施放清水后,河道床面的泥沙开始运动。当泥沙刚起动时,断面出口的推移质输沙率近似为零。泥沙起动后,床面运动的泥沙将增加,到达出口的泥沙量也相应增加,其表现为出口断面推移质输沙率随时间不断增大,最终将达到某个最大值。在泥沙运动的同时,河床也开始粗化,使得河床有减少泥沙补给的趋势。当推移质输沙率达到最大值后,河床补给泥沙行为不断受到更大程度的约束,其表现为推移质输沙率开始呈现随时间有减小的趋势。当整个河床补给泥沙的行为受到最大约束时,即河道完全粗化时,推移质输沙率趋于零。推移质的运动往往以沙波的形式整体运动。由于沙

波尺寸大小不均,到达出口断面的时间先后间隔不等,床沙交换程度有别,泥沙运动随机性极强,以及还有其它可能因素的影响,使得推移质输沙率在河道粗化全过程中表现出极强的随机性,如图 2 所示。从图 2 可以看出,全动床复式河槽在清水作用下,输沙率表现出 2 种趋势,即先随时间单调递增,而后随时间单调递减。这 2 种趋势可以表达为:

$$\begin{cases} g_b(T_0) < g_b(T) < g_b(T_1), & T_0 < T < T_1; \\ g_b(T_1) > g_b(T) > g_b(T_2), & T_1 < T < T_2 \end{cases} \quad (1)$$

即

$$\begin{cases} g_{b0} < g_b < g_{b1}, & T_0 < T < T_1; \\ g_{b1} > g_b > g_{b2}, & T_1 < T < T_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, g_b 为断面输沙率, T 为时刻。

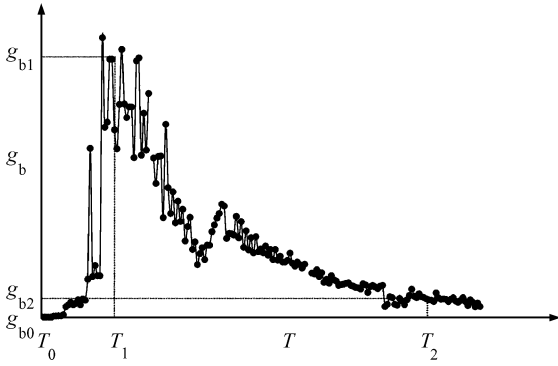


图2 清水冲刷河道粗化过程中推移质输沙率随时间的变化特性

Fig. 2 Variation of sediment transport with time in the process of armouring

2.2 推移质中值粒径随时间的变化

图3反映了清水作用粗化过程中推移质中值粒径 d_{50} 随时间的变化关系。从图3可以看出,中值粒径有先随时间增加而大幅度增大的趋势,后随着时间的增加中值粒径增加的幅度减小,最终将保持某一恒定的值,维持恒定的中值粒径将接近于原始床沙中值粒径值。图3反映了清水作用过程中,较细的泥沙最先起动(或运动速度最快,最先达到出口断面)的特性。当床面粗化后,起动粒径(或运动的粒径)越来越大,在一定的水流条件下,如果泥沙大于最大起动粒径,泥沙起动的机会将变小。当推移质输沙率趋于0时,而此时的推移质中值粒径将最大(对趋势变化而言)。

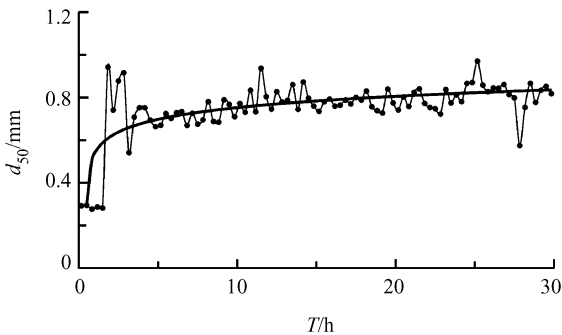


图3 清水冲刷过程中推移质中值粒径随时间的变化

Fig. 3 Variation of median diameter of bed-load in the process of clear-water scour

3 推移质输沙率公式的建立

目前,推移质输沙率公式的建立多采用确定性的物理力学方法。尽管确定性的物理力学方法取得了很大的成效,但是不少河流泥沙问题尚未得到满意解决,这类问题有可能通过概率论的方法予以解决^[20-21]。近年来,一些学者运用仙农熵的概念与理

论^[22]探讨水力学及河流动力学中一些具有随机特性变量的变化规律,如曹叔尤等^[21]提出了长江三峡卵石推移质粒径沿程分布的计算方法;Cao^[23]、Cao和Knight^[24]、Nield等^[25]研究了冲积河流稳定的床面形态;Sterling和Knight^[26]探讨了圆形断面和梯形断面明渠床面剪切应力的横向分布;Chiu^[27-28]研究了床面剪切应力和垂线平均流速的分布;Chiu和Said^[29]、Chiu和Tung^[30]建立了明渠水流的最大流速与平均流速的计算方法;Chiu和Chen^[31]探讨了河流流量的预测方法;Lien和Tsai^[32]建立了基于仙农熵的泥石流含沙浓度分布模型。

由于推移质输沙率都表现出极强的随机性,因此作者拟根据清水作用下的泥沙输移特性,运用仙农熵的理论与方法,探讨清水作用下全动床河道粗化过程中的推移质输沙率公式。

3.1 单调递增趋势段推移质输沙率公式

以图2单调递增趋势段为例,探讨推移质输沙率公式的推求。假定在 T_0 至 T_1 中的任何 T 都具有相等的出现概率。其物理意义是在推移质采样时刻 $T = T_0$ 至 $T = T_1$ 时段内,在任一时刻理论上均可进行推移质采样,即采样概率在任意时刻相等。 $T = T_0$ 至 $T = T_1$ 时段内,推移质输沙率随时间呈单调递增的趋势,因此输沙率等于或小于 g_b 的概率是 $(T - T_0)/(T_1 - T_0)$ 。因此, g_b 对应的累积概率分布函数为:

$$F(g_b) = (T - T_0)/(T_1 - T_0) \quad (3)$$

由此得到推移质输沙率的概率密度函数为:

$$p(g_b) = \frac{dF(g_b)}{dg_b} = \frac{dF(g_b)}{dT} \frac{dT}{dg_b} = \frac{1}{T_1 - T_0} \left(\frac{dg_b}{dT} \right)^{-1} \quad (4)$$

概率密度函数 $p(g_b)$ 的具体形式应满足概率空间的性质,其第1个约束条件应满足随机概率空间全概率的定义:

$$\int_{g_{10}}^{g_{b1}} p(g_b) dg_b = 1 \quad (5)$$

第2个约束条件是输沙率的数学期望 $\overline{g_b}$ 的定义:

$$\int_{g_{10}}^{g_{b1}} g_b p(g_b) dg_b = \overline{g_b} \quad (6)$$

输沙率在 g_{10} 和 g_{b1} 之间的概率熵为:

$$E(g_b) = - \int_{g_{10}}^{g_{b1}} p(g_b) [\ln p(g_b)] dg_b \quad (7)$$

为了求解式(7)定义的熵在满足式(5)及(6)约束条件下的极大值,须采用变分方法求解约束条件为等式的条件极值。因此,推移质输沙率随时间的

变化须满足下面的方程:

$$\frac{\partial[-p(g_b)\ln p(g_b)]}{\partial p(g_b)} + \lambda_1 \frac{\partial p(g_b)}{\partial p(g_b)} + \lambda_2 \frac{\partial[g_b p(g_b)]}{\partial p(g_b)} = 0 \quad (8)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为拉格朗日算子。式(8)简化为:

$$-\left[\frac{p(g_b)}{p(g_b)} + \ln p(g_b)\right] + \lambda_1 + \lambda_2 g_b = 0 \quad (9)$$

式(9)整理为:

$$-1 - \ln p(g_b) + \lambda_1 + \lambda_2 g_b = 0 \quad (10)$$

求解式(10)有:

$$p(g_b) = e^{-1+\lambda_1+\lambda_2 g_b} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)有:

$$\int_{g_{b0}}^{g_{bl}} e^{-1+\lambda_1+\lambda_2 g_b} dg_b = 1 \quad (12)$$

因此,

$$\lambda_2 = e^{\lambda_1-1} (e^{\lambda_2 g_{bl}} - e^{\lambda_2 g_{b0}}) \quad (13)$$

将式(11)代入式(6)有:

$$\int_{g_{b0}}^{g_{bl}} g_b e^{-1+\lambda_1+\lambda_2 g_b} dg_b = \bar{g}_b \quad (14)$$

因此,

$$\frac{e^{\lambda_1-1}}{\lambda_2} \left[e^{\lambda_2 g_{bl}} \left(g_{bl} - \frac{1}{\lambda_2} \right) - e^{\lambda_2 g_{b0}} \left(g_{b0} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right] = \bar{g}_b \quad (15)$$

将式(11)代入式(7)有:

$$E(g_b) = - \int_{g_{b0}}^{g_{bl}} e^{-1+\lambda_1+\lambda_2 g_b} (-1 + \lambda_1 + \lambda_2 g_b) dg_b \quad (16)$$

整理式(16)有:

$$E(g_b) = e^{-1+\lambda_1} \left\{ e^{\lambda_2 g_{bl}} \left[\frac{-1 + \lambda_1}{\lambda_2} + g_{bl} - \frac{1}{\lambda_2} \right] - e^{\lambda_2 g_{b0}} \left[\frac{-1 + \lambda_1}{\lambda_2} + g_{b0} - \frac{1}{\lambda_2} \right] \right\} \quad (17)$$

将式(13)代入式(17)化简为:

$$E(g_b) = \frac{1}{(e^{g_{bl}} - e^{g_{b0}})} \left\{ e^{g_{bl}} [\lambda_2 g_{bl} - 2 + \lambda_1] - e^{g_{b0}} [\lambda_2 g_{b0} - 2 + \lambda_1] \right\} \quad (18)$$

比较式(4)与式(11)有:

$$\frac{1}{T_1 - T_0} \left(\frac{dg_b}{dT} \right)^{-1} = e^{-1+\lambda_1+\lambda_2 g_b} \quad (19)$$

即

$$\frac{1}{T_1 - T_0} e^{1-\lambda_1-\lambda_2 g_b} = \frac{dg_b}{dT} \quad (20)$$

积分式(20):

$$\frac{e^{1-\lambda_1}}{T_1 - T_0} T + C_1 = \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 g_b} \quad (21)$$

当 $T = T_0$ 时, $g_b = g_{b0}$, 因此积分常数 C_1 为:

$$C_1 = \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 g_{b0}} - \frac{e^{1-\lambda_1}}{T_1 - T_0} T_0 \quad (22)$$

因此,

$$g_b = \frac{1}{\lambda_2} \ln \left[\lambda_2 \left(\frac{e^{1-\lambda_1}}{T_1 - T_0} T + \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 g_{b0}} - \frac{e^{1-\lambda_1}}{T_1 - T_0} T_0 \right) \right] \quad (23)$$

将式(13)代入式(23)有:

$$g_b = \frac{1}{\lambda_2} \ln \left[\left(e^{\lambda_2 g_{bl}} - e^{\lambda_2 g_{b0}} \right) \frac{T}{T_1 - T_0} + e^{\lambda_2 g_{b0}} - \left(e^{\lambda_2 g_{bl}} - e^{\lambda_2 g_{b0}} \right) \frac{T_0}{T_1 - T_0} \right] \quad (24)$$

为使式(24)量纲合谐, $\frac{1}{\lambda_2}$ 应具有输沙率的量纲。

因此,可令

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{g_{b0}}{k_1} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24),即可获得单调递增趋势段推移质输沙率公式:

$$g_b = \frac{g_{b0}}{k_1} \ln \left[\left(e^{\frac{g_{bl}}{k_1 g_{b0}}} - e^{k_1} \right) \frac{T}{T_1 - T_0} + e^{k_1} - \left(e^{\frac{g_{bl}}{k_1 g_{b0}}} - e^{k_1} \right) \frac{T_0}{T_1 - T_0} \right] \quad (26)$$

3.2 单调递减趋势段推移质输沙率公式

该小节推移质输沙率公式的推导与第3.1节推移质输沙率公式的推导相似。如图2所示, $T = T_1$ 至 $T = T_2$ 时段内,推移质输沙率随时间呈单调递减的趋势。因此,输沙率等于或小于 g_b 的概率是 $1 - (T - T_1)/(T_2 - T_1)$ 。因此, g_b 对应的累积概率分布函数为:

$$F(g_b) = 1 - (T - T_1)/(T_2 - T_1) \quad (27)$$

采用单调递增趋势段推移质输沙率公式的相似推导,可以获得单调递减趋势段的推移质输沙率公式为:

$$g_b = \frac{1}{\lambda_4} \ln \left[\lambda_4 \left(-\frac{e^{1-\lambda_3}}{T_2 - T_1} T + \frac{1}{\lambda_4} e^{\lambda_4 g_{bl}} + \frac{e^{1-\lambda_3}}{T_2 - T_1} T_1 \right) \right] \quad (28)$$

式中, λ_3 、 λ_4 为拉格朗日算子。

根据输沙率 g_b 应满足概率空间的约束条件,并整理有:

$$\lambda_4 = e^{\lambda_3-1} (e^{\lambda_4 g_{bl}} - e^{\lambda_4 g_{b2}}) \quad (29)$$

令

$$\frac{1}{\lambda_4} = \frac{g_{bl}}{k_2} \quad (30)$$

并将式 (29) ~ (30) 代入式 (28), 有:

$$g_b = \frac{g_{b1}}{k_2} \ln \left[\left(e^{\frac{g_{b2}}{k_2 g_{b1}}} - e^{k_2} \right) \frac{T}{T_2 - T_1} + e^{k_2} - \left(e^{\frac{g_{b2}}{k_2 g_{b1}}} - e^{k_2} \right) \frac{T_1}{T_2 - T_1} \right] \quad (31)$$

因此, 对于整个时段, 推移质输沙率公式可以表达为:

$$g_b = \begin{cases} \frac{g_{b0}}{k_1} \ln \left[\left(e^{\frac{g_{b1}}{k_1 g_{b0}}} - e^{k_1} \right) \frac{T}{T_1 - T_0} + e^{k_1} - \left(e^{\frac{g_{b1}}{k_1 g_{b0}}} - e^{k_1} \right) \frac{T_0}{T_1 - T_0} \right], & T_0 < T < T_1; \\ \frac{g_{b1}}{k_2} \ln \left[\left(e^{\frac{g_{b2}}{k_2 g_{b1}}} - e^{k_2} \right) \frac{T}{T_2 - T_1} + e^{k_2} - \left(e^{\frac{g_{b2}}{k_2 g_{b1}}} - e^{k_2} \right) \frac{T_1}{T_2 - T_1} \right], & T_1 < T < T_2 \end{cases} \quad (32)$$

4 参数 k_1 与 k_2 的敏感性分析

在推移质输沙率公式 (32) 中, k_1 与 k_2 为待定参数, 与水流条件与边界条件有关。假设 $g_{b0} = 2$ g/s, $g_{b1} = 50$ g/s, $g_{b2} = 2$ g/s, $T_0 = 2$ h, $T_1 = 20$ h, $T_2 = 100$ h, 对 k_1 与 k_2 进行敏感性分析。当 k_1 与 k_2 的绝对值越小时, 输沙率曲线越趋于对角线。从图 2 可知, 当输沙率单调增加 (趋势) 时, 开始一段时间输沙率变化缓慢, 而后一段时间变化迅速; 当输沙率单调递减 (趋势) 时, 输沙率的变化特性却相反。

结合图 4 ~ 5 可知, k_1 与 k_2 取适当的负值可以满足这种趋势变化。 k_1 与 k_2 的具体取值与水沙条件及水流边界有关, 因此针对具体情况选取适当的值可以预测推移质输沙率随时间的变化。

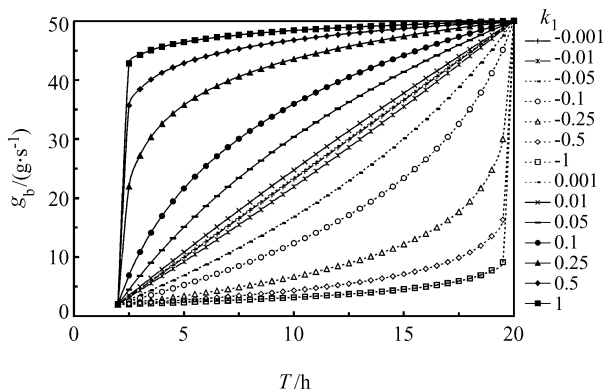


图 4 输沙率对参数 k_1 的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of parameter k_1

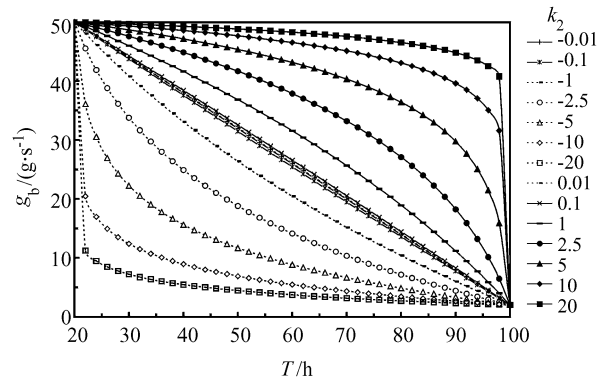


图 5 输沙率对参数 k_2 的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of parameter k_2

5 推移质输沙率公式的应用

根据全动床复式河槽推移质运动的特性, 结合图 4 ~ 5 参数 k_1 与 k_2 的敏感性分析可知, k_1 与 k_2 可选取适当的负值可以满足这种趋势变化, 其值可采用试算法寻求最优值。因此, 选择适当的 k_1 与 k_2 , 以及根据图 5 选择相应的 g_{b0} 、 g_{b1} 、 g_{b2} 、 T_0 、 T_1 、 T_2 , 可以模拟给定水流条件下输沙率随时间的变化。对于文中考虑的漫滩水流, 相关参数的选择见表 1, 模拟的推移质输沙率见图 6 中粗实线。图 6 表明, 作者建立的推移质输沙率公式, 可以模拟输沙率的变化特性。

表 1 公式 (32) 中相关参数的选择

Tab. 1 Choosing of the related parameters in Eq. (32)

T_0/h	T_1/h	T_2/h	$g_{b0}/(g \cdot s^{-1})$	$g_{b1}/(g \cdot s^{-1})$	$g_{b2}/(g \cdot s^{-1})$	k_1	k_2
0.167	4	30	0.023	55	2.112	-0.008	-4

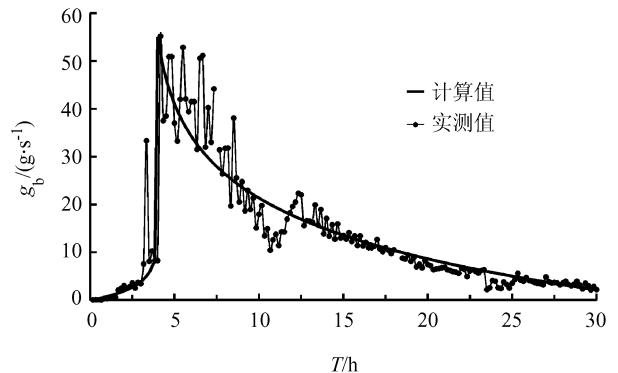


图 6 清水冲刷过程中推移质输沙率随时间变化

Fig. 6 Variation of sediment transport rate with time under the action of clear water

6 结论

1) 全动床复式河槽在清水作用下, 输沙率表现出 2 种趋势, 即先随时间单调递增, 而后随时间单调

递减。推移质中值粒径先随时间增加而大幅度增大,后随着时间的增加中值粒径增加的幅度减小,最终将趋于初始床沙中值粒径。

2)运用仙农熵的概念与理论,推导了清水作用下随时间变化的推移质输沙率公式。无论是输沙率单调递增段还是单调递减段,推移质输沙率公式都具有相同的表达形式。对于给定的水沙条件和水流边界条件,输沙率公式中的参数 k_1 与 k_2 基本分别为某一常数。计算结果表明:该公式可以模拟全动床复式河槽清水作用粗化过程中的输沙率随时间的变化特性。

参考文献:

- [1] Chien N, Wan Zhaohui. Mechanics of sediment transport [M]. Virginia: ASCE Press, 1999.
- [2] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 王明甫, 等. 河流泥沙运动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [3] Chen Li, Zhan Yizheng, Zhou Yilin, et al. Forms and functions of sediment transfer in compound channels with overbank flow[J]. Journal of Sediment Research, 1996(2): 45-49. [陈立, 詹义正, 周宜林, 等. 漫滩高含沙水流滩槽水沙交换的形式与作用[J]. 泥沙研究, 1996(2): 45-49.
- [4] Ji Zuwen, Hu Chunhong. Experimental study of the distribution of suspended load in compound channels with overbank flow[J]. Journal of Sediment Research, 1997(2): 64-68. [吉祖稳, 胡春宏. 漫滩水流悬移质分布规律的试验研究[J]. 泥沙研究, 1997(2): 64-68.]
- [5] Zhou Yilin. The lateral distribution of depth-averaged velocity in compound channels with suspended load[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1994, 27(6): 678-684. [周宜林. 漫滩挟沙水流流速横向分布研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(6): 678-684.]
- [6] Hu Chunhong, Ji Zuwen, Guo Qingchao. Flow movement and sediment transport in compound channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(1): 23-32.
- [7] Knight D W, Brown F A. Resistance studies of overbank flow in rivers with sediment using the flood channel facility[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(3): 283-301.
- [8] Lyness J F, Myers W R C, Cassells J B C, et al. The influence of planform on flow resistance in mobile bed compound channels[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy, 2001, 148(1): 5-14.
- [9] Myers W R C, Lyness J F, Cassells J. Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(3): 311-319.
- [10] Knight D W, Brown F A, Valentine E M, et al. The response of straight mobile bed hannels to inbank and overbank flows[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy Division, 1999, 136(4): 211-224.
- [11] Tang X N, Knight D W. Sediment transport in river models with overbank flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132(1): 77-86.
- [12] Atabay S, Knight D W, Seckin G. Effects of overbank flow on fluvial sediment transport rates[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 2005, 158(1): 25-34.
- [13] Atabay S, Knight D W. 1-D modelling of conveyance, boundary shear and sediment transport in overbank flow [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44(6): 739-754.
- [14] Ackers P. Flow formulae for straight two-stage channels [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(4): 509-531.
- [15] Karamisheva R D, Lyness J F, Myers W R C, et al. Overbank flow depth prediction in alluvial compound channels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 2006, 159(3): 195-205.
- [16] Knight D W. Sediment transport in rivers with overbank flow[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37(Supp): 16-29.
- [17] Shiono K, Chan T L, Spooner J, et al. The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I[J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2009, 47(1): 5-19.

- [18] Shiono K, Chan T L, Spooner J, et al. The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part II[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(1): 20 - 28.
- [19] Wormleaton P R, Sellin R H J, Bryant T, et al. Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed[J]. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 2004, 42(2): 145 - 162.
- [20] Cao Shuyou. *Fluvial Hydraulic Geometry* [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996.
- [21] Cao Shuyou, Liu Xingnian, Fang Duo. Gravel bed-load particle size distribution along the Three Gorges Channel of Yangtze River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 1998, 17(2): 50 - 57. [曹叔尤, 刘兴年, 方铎. 长江三峡卵石推移质粒径沿程分布[J]. *水力发电学报*, 1998, 17(2): 50 - 57.]
- [22] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 623 - 656.
- [23] Cao Shuyou. Regime theory and a geometric model for stable alluvial channels [D]. Birmingham: The University of Birmingham, 1995.
- [24] Cao Shuyou, Knight D W. Entropy-based design approach of threshold alluvial channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1997, 35(4): 505 - 524.
- [25] Nield J M, Walker D J, Lambert M F. Breakwater morphological modelling: Predicting equilibrium morphologies using entropy based techniques[C]. *The 5th International Conference on Coastal Dynamics*, Barcelona, Spain, 2005.
- [26] Sterling M, Knight D W. An attempt at using the entropy approach to predict the transverse distribution of boundary shear stress in open channel flow[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2002, 16: 127 - 142.
- [27] Chiu C L. Application of entropy concept in open-channel flow study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1991, 117(5): 615 - 628.
- [28] Chiu C L. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1988, 114(7): 738 - 756.
- [29] Chiu C L, Said C A. Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1995, 121(1): 26 - 35.
- [30] Chiu C L, Tung N C. Maximum velocity and regularities in open-channel flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2002, 128(4): 390 - 398.
- [31] Chiu C L, Chen Y C. An efficient method of discharge estimation based on probability concept[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, 41(6): 589 - 596.
- [32] Lien H P, Tsai F W. Sediment concentration distribution of debris flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(12): 995 - 1000.

(编辑 张琼)