

文章编号:1009-3087(2013)02-0001-05

粗化层破坏过程中的最大推移质输沙率试验研究

聂锐华,刘兴年,杨克君*,曹叔尤

(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:为了探讨清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率与水流强度的相关关系,进行了清水冲刷与粗化层破坏的概化试验研究。清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度随水流强度的增大而增大,其增速较梅叶-彼德公式、拜格诺公式、恩格隆公式的计算结果明显偏大。采用梅叶-彼德公式相同的形式,通过回归得到了清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度与水流强度的相关关系。这一成果对受清水冲刷时间较长河段的河床冲刷保护与取水防沙等有一定的参考价值。

关键词:推移质输沙率;清水冲刷;粗化层破坏;水流强度

中图分类号:TV142

文献标志码:A

Experimental Investigation on the Maximum Bed-load Transport Rate During the Process of Armoring Layer Destruction

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

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

Abstract: The relationship between bed-load transport rate and flow intensity was discussed. Armoring layer destruction experiments were carried out in natural channel with clear-water scour. The results showed that dimensionless transport rate strength, corresponding to the maximum bed-load transport rate, increases with flow intensity and the increasing speed is faster than the calculated results by Meyer-Peter formula, Bagnold formula, and Engelong formula. Using the same forms of Meyer-Peter formula, through regression the relationship between dimensionless transport rate strength, corresponding to the maximum bed-load transport rate, and flow intensity during the process of clear-water scour and armoring layer destruction was established.

Key words: bed-load transport rate; clear-water scour; armoring layer destruction; flow intensity

清水冲刷河床粗化规律研究是水利水电工程开发、内河航运、水源环境保护、河流综合管理与控制、水文物保护与水资源可持续利用等现代水利事业面临的重要工程实际问题之一。特别是目前中国大规模的水利水电工程建设,多面临这一科学问题。天然河流修建水库后,下游河道将因清水冲刷而发生一系列变化,明显的变化之一是河床粗化,伴随河床粗化的还有水位降落、比降调整与河床冲刷等^[1-2]。三峡工程首次蓄水至175 m后,中国工程院院士、长江水利委员会总工程师郑守仁表示,由于三峡蓄水

后清水下泻,对坝下河道冲刷的严重程度超出预期,部分河段发生崩岸等险情。

对于清水冲刷与河床粗化现象,国内外学者就这一问题开展了较广泛的研究,主要研究集中在冲刷与粗化机理、粗化层级配计算、极限冲刷深度计算等几个方面^[3-5]。近些年来一些研究者通过原型资料分析、水槽试验研究和数学模拟等方法,开展了清水冲刷条件下非均匀推移质和床面粗化保护机理的动力学研究^[6-10]。相对于粗化层与极限冲刷而言,无论是在理论研究上还是试验研究上,清水冲刷与粗化过程中的推移质输沙率的研究均相对较少^[11-12],而对于粗化完成后清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率则基本没有涉及。

推移质输沙率是河流动力学基本问题之一,是研究河道泥沙运动、河床演变、水沙数值模拟及泥沙灾害与防治等问题的重要方面^[13-15]。乐培九^[16]指

收稿日期:2012-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51079090);国家科技支撑计划资助项目(2012BAB05B02)

作者简介:聂锐华(1978—),男,副教授,博士。研究方向:河流动力学。E-mail:scuniec@163.com

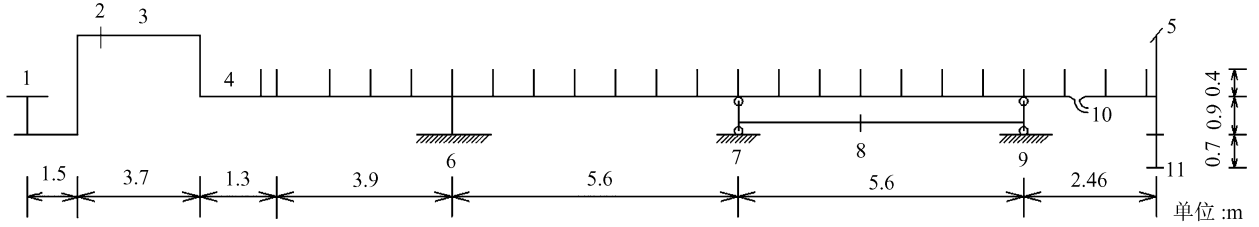
*通信联系人 E-mail:yangkejun@163.com

出虽然可用质量守恒原理写出冲刷过程中输沙率变化的微分方程,但是得不到解析解;由于部分参数难于确定,得到数值解也存在一定难度,相对简单可行的方法就是采用实测资料进行相关分析。作者通过室内概化模型试验探讨了清水冲刷与粗化层破坏过程中的最大推移质输沙率与水流强度的相关关系。

1 试验概况

清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率试验是在四川大学水力学与山区河流开发保护国家

重点实验室河流泥沙大厅进行的。本次试验水槽长16.0 m,宽0.3 m,高0.4 m,可调坡范围为0~2%。本次试验有效段长度为9.6 m。槽首设调节阀和静水池,水流由矩形薄壁堰流出进入静水池,经两级消力池和铁丝网消能后,进入水槽。槽尾设有接沙漏斗和平板闸门,接沙漏斗可接到由此经过的推移质,通过调整平板闸门开度还可以调节水面比降,进而可以改变水流条件。槽尾附近设有放水管,可实施放水倒灌。槽面顶部设有角钢导轨和活动测针架。测针架上安装刮沙板可平整床面。水槽示意图见图1。



1. 阀门; 2. 测针; 3. 量堰; 4. 静水区; 5. 尾门; 6. 上绞(固定); 7. 中绞(活动); 8. 调坡转轮; 9. 下绞(活动); 10. 接沙漏斗; 11. 出水口。

图1 水槽示意图

Fig.1 Sketch map of the flume

本次试验主要进行了2组试验,2组试验初始铺沙厚度均为10.0 cm,初始铺沙坡度分别为0.5%与0.9%,初始铺沙级配如图2所示。

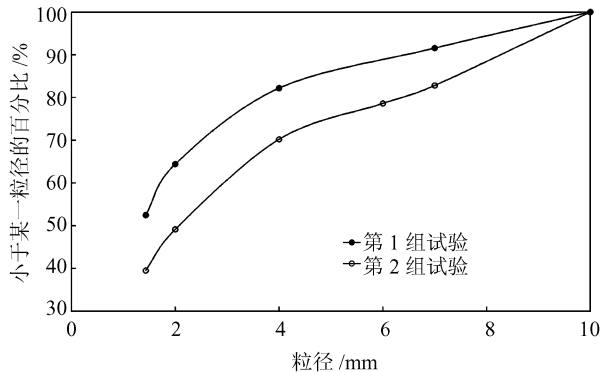


图2 试验铺沙级配

Fig.2 Particle size distribution curves of the experiments

2组试验施放的流量过程完全相同,即试验流程是相同的。试验流程如下:

1) 铺好床沙,确定比降,平整床面并进行倒灌,倒灌以后床面泥沙会更加密实,更接近天然状态。

2) 根据预备试验给定初始流量 Q_0 ,将水流调成均匀流,进行清水冲刷粗化试验,直至形成稳定的粗化层。以下称工况 A_0 。

3) 形成稳定的粗化层床面后,施放比 Q_0 大的流量 Q_1 (根据已有的粗化层破坏研究成果与预备试验研究成果,该流量下粗化层会被破坏),量测粗化

层破坏过程中的推移质输沙率。以下称工况A。

4) 重复1)与2)的过程,然后施放比 Q_1 更大的流量 Q_2 ,量测粗化层破坏过程中的推移质输沙率。以下称工况B。

5) 重复1)与2)的过程,然后施放比 Q_2 更大的流量 Q_3 ,量测粗化层破坏过程中的推移质输沙率。以下称工况C。

6) 重复1)与2)的过程,然后施放比 Q_3 更大的流量 Q_4 ,量测粗化层破坏过程中的推移质输沙率。以下称工况D。

2组试验的主要水力特性如表1与2所示。其中: Q 为流量; H 为水深; J 为水面比降; R 为水力半径; Θ_{ci} 为无量纲希尔兹剪切力,在恒定均匀流下 $\Theta_{ci} = RJ/\rho_r d_{50}$,其中, R 为水力半径,卵砾石的相对水下淹没密度 $\rho_r = 1.65$; Θ_{c0} 为无量纲临界剪切力; τ_{ci} 为床面剪切力; U_* 为摩阻流速; $g_{b\max}$ 为以水上重量计的实测推移质单宽输沙率最大值, g_b' 为以水上重量计的实测推移质单宽输沙率; G_* 为一表示输沙率大小的无量纲数,其表达式为:

$$G_* = \frac{g_b'}{\rho U_*^3} \quad (1)$$

图3与4分别为第1组试验与第2组试验实测的清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率过程。

表1 第1组试验的水力条件

Tab.1 Flow condition of the experiments of group 1

工况	$Q/(L \cdot s^{-1})$	H/cm	$J/\%$	R/m	Θ_{ci}	$\frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{c0}}$	$\tau_{ci}/(N \cdot m^{-2})$	$U_* / (m \cdot s^{-1})$	$g_{b \max} / (kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	$g_b' / (N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	$G_{* \text{实测}}$
A ₀ 始	5.62	3.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₀ 末	5.62	4.06	0.006 0	0.032 0	0.031 4	1.0	1.892	0.043 5	—	—	—
A	8.37	5.00	0.006 1	0.037 5	0.037 5	1.195	2.257	0.047 5	0.006 7	0.066	0.613
B	10.83	5.95	0.006 2	0.042 6	0.043 2	1.375	2.597	0.051 0	0.026 3	0.258	1.952
C	13.89	6.55	0.006 2	0.045 6	0.046 1	1.468	2.774	0.052 7	0.055 5	0.544	3.726
D	17.43	8.17	0.006 2	0.052 9	0.053 6	1.706	3.223	0.056 8	0.111 2	1.091	5.959

表2 第2组试验的水力条件

Tab.1 Flow condition of the experiments of group 2

工况	$Q/(L \cdot s^{-1})$	H/cm	$J/\%$	R/m	Θ_{ci}	$\frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{c0}}$	$\tau_{ci}/(N \cdot m^{-2})$	$U_* / (m \cdot s^{-1})$	$g_{b \max} / (kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	$g_b' / (N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	$G_{* \text{实测}}$
A ₀ 始	5.62	3.69	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₀ 末	5.62	3.63	0.009 4	0.029 2	0.031 2	1.000	2.695	0.051 9	—	—	—
A	8.37	4.49	0.009 4	0.034 5	0.036 9	1.183	3.192	0.056 5	0.035 4	0.347	1.925
B	10.83	5.65	0.009 2	0.041 0	0.042 8	1.373	3.704	0.060 9	0.066 3	0.650	2.884
C	13.89	6.24	0.009 3	0.044 1	0.046 5	1.491	4.022	0.063 4	0.125 4	1.230	4.821
D	17.43	7.46	0.009 5	0.049 8	0.053 7	1.721	4.643	0.068 1	0.184 6	1.811	5.726

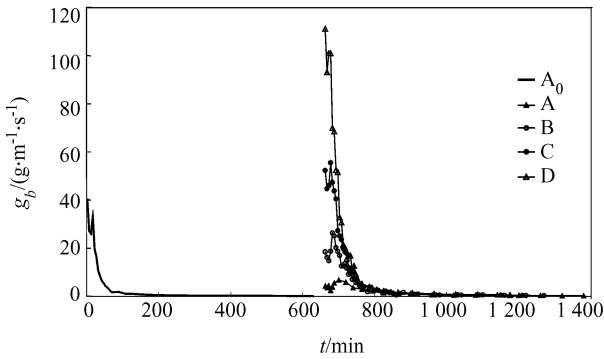


图3 第1组试验实测的粗化层破坏过程中的推移质输沙率
Fig.3 Bed-load transport rate during the process of armoring layer destruction of group 1

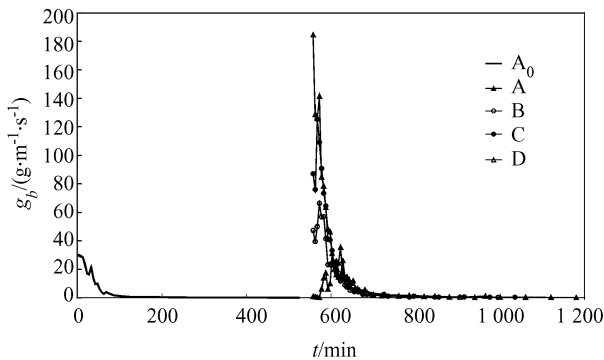


图4 第2组试验实测的粗化层破坏过程中的推移质输沙率
Fig.4 Bed-load transport rate during the process of armoring layer destruction of group 2

2 粗化层破坏过程中的推移质输沙率 $g_{b \max}$ 的探讨

试验观察发现,水流强度的增大并不一定就能破坏初始粗化床面结构,只有当水流强度增大到一定程度时,粗化层床面结构才会破坏,从而引起输沙率的陡增。文献[10]对粗护层破坏的临界条件进行了探讨,认为当 $1.15 < \Theta_{ci}/\Theta_{c0} < 1.2$ 时,可见部分床面大颗粒开始起动,但输沙率增大仍然不多;当 $\Theta_{ci}/\Theta_{c0} > 1.2$ 后,床面可动粗颗粒明显增多,输沙率明显增大,床面粗化层结构遭破坏。本次试验成果进一步表明文献[10]提出的粗化层破坏临界条件是合适的。

通常使用的爱因斯坦表示输沙率大小的无量纲数 Φ 为:

$$\Phi = \frac{g_b}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{gd^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, g_b 为以水下重量计的推移质单宽输沙率。通过式(1)与(2)可以得到:

$$\Phi = G_* \Theta_{ci}^{1.5} \quad (3)$$

根据 Chien 和 Wan^[15] 的研究,梅叶-彼德公式可以写成:

$$\Phi = 8 (\Theta_{ci} - \Theta_{c0})^{3/2} \quad (4)$$

通过式(3)可以将梅叶-彼德公式写为:

$$G_* = 8 \left(1 - \frac{\Theta_{c0}}{\Theta_{ci}} \right)^{3/2} \quad (5)$$

同理可以将拜格诺公式写为:

$$G_* = \left(1 - \frac{\Theta_{c0}}{\Theta_{ci}} \right) \left[\tan \alpha \left(5.751 \lg 30.2 \frac{mD}{K_s} - \frac{\omega}{U_*} \right) \right] \quad (6)$$

式中: $\tan \alpha$ 为摩擦系数, 取为 0.63; $m = 1.4 \times \left(\frac{U_*}{U_{*c}} \right)^{0.6}$; ω 为沉速; 取 $K_s = D$ 。

将恩格隆公式写为:

$$G_* = 11.6 \left(1 - \frac{\Theta_{c0}}{\Theta_{ci}} \right) \left(1 - 0.7 \sqrt{\frac{\Theta_{c0}}{\Theta_{ci}}} \right) \quad (7)$$

因此, 可以得到清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度 G_* 与水流强度 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的相关关系以及通过梅叶-彼德公式、拜格诺公式、恩格隆公式计算得到的 G_* 与 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的相关关系如表 1、2 与图 5、6 所示。

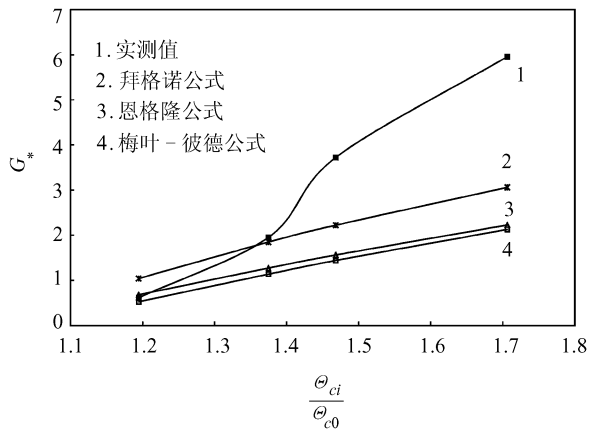


图5 第1组试验无量纲输沙强度 G_* 与 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的相关关系

Fig. 5 Relationship between G_* and Θ_{ci}/Θ_{c0} of group 1

从表 1、2 和图 5、6 可以看出, 清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度 G_* 随 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的增大而增大, 其增速较梅叶-彼德公式、拜格诺公式、恩格隆公式计算结果明显偏大; 换句话说, 随着 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的增大, 通过梅叶-彼德公式、拜格诺公式、恩格隆公式计算得到的 G_* 明显偏小。采用梅叶-彼德公式相同的形式, 通过回归得到清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度 G_* 与 Θ_{c0}/Θ_{ci} 的相关关系:

$$G_* = 27.1 \left(1 - \frac{\Theta_{c0}}{\Theta_{ci}} \right)^{1.76} \quad (8)$$

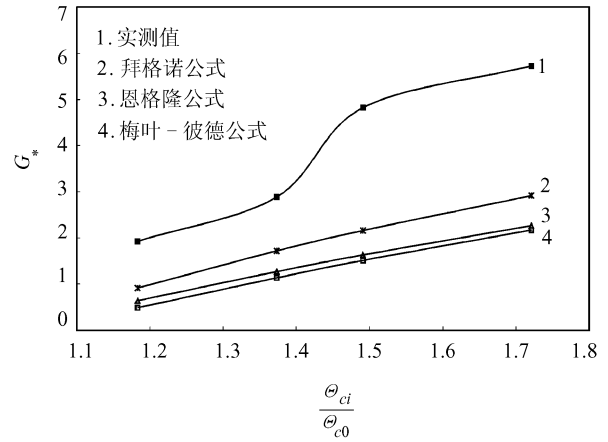


图6 第2组试验无量纲输沙强度 G_* 与 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的相关关系

Fig. 6 Relationship between G_* and Θ_{ci}/Θ_{c0} of group 2

图 7 为清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度 G_* 的实测值与式(8) 计算值以及梅叶-彼德公式计算值的对比情况。从图 7 可以看出, 在试验的水流强度变化范围内计算值与实测值符合较好。但考虑到试验条件的限制与实际问题的复杂性, 对于水流强度 Θ_{ci}/Θ_{c0} 变化更大情况下的清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度 G_* 值可能仍然可以采用式(8) 计算, 如图 7 中虚线 A 所示; 也可能随着 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的增大而增大, 但增幅减小, 直至为一均值, 如图 7 中虚线 B 所示; 也有可能随着 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的增大而增大, 但增幅加大, 甚至出现陡增, 如图 7 中虚线 C 所示。

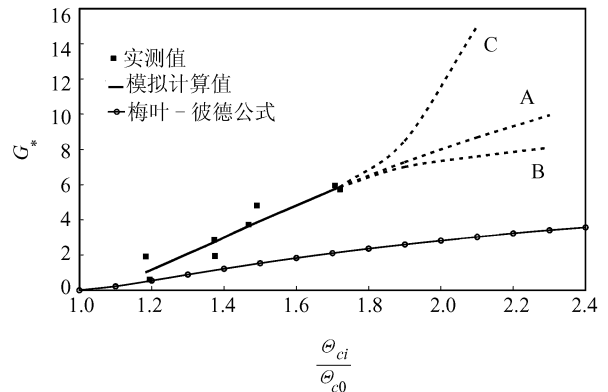


图7 无量纲输沙强度 G_* 与 Θ_{ci}/Θ_{c0} 的相关关系

Fig. 7 Relationship between G_* and Θ_{ci}/Θ_{c0}

3 结论与展望

清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输沙强度随水流强度的增大而增大, 其增速较梅叶-彼德公式、拜格诺公式、恩格隆公式的计算结果明显偏大。得到了清水冲刷与粗化层破坏过程中的推移质输沙率峰值相应的无量纲输

沙强度与水流强度的相关关系。研究成果对卵砾石河道的工程规划与设计、防洪减灾、河道整治、取水防沙等有一定参考价值。受限于试验条件,在以后的研究中可进一步开展粗化层破坏过程中水流强度更大变化情况下的推移质输移特性研究。

参考文献:

- [1] Parker G, Sutherland A J. Fluvial armour [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1990, 28(5): 529 - 544.
- [2] Vericat D, Batalla R J, Garcia C. Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro [J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 122 - 136.
- [3] Wilcock P R, DeTemple B T. Persistence of armour layers in gravel-bed streams [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8), L08402, doi: 10.1029/2004GL021772.
- [4] Odgaard A J. Grain-size distribution of river-bed armor layers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(10): 1479 - 1484.
- [5] Shen H W, Lu J Y. Development and prediction of bed armoring [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109(4): 611 - 629.
- [6] Gomez B. Effects of particle shape and mobility on stable armor development [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 2229 - 2239.
- [7] Church M, Hassan M A, Wolcott J F. Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: Field and experimental observations [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 3169 - 3179.
- [8] Hassan M A, Church M. Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1885 - 1895.
- [9] Pender G, Hoey T B, Fuller C, et al. Selective bedload transport during the degradation of a well sorted graded sediment bed [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 39(3): 269 - 277.
- [10] Wang Tao, Liu Xingnian, Huang Er, et al. Experimental study on the critical condition of armored layer's breakage [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2008, 40(4): 36 - 40. [王涛, 刘兴年, 黄尔, 等. 卵石河床清水冲刷粗化层破坏临界条件试验研究 [J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2008, 40(4): 36 - 40.]
- [11] Yue Peijiu, Cheng Xiaobing, Zhu Yude, et al. Rule of the bed-load transport rate variation by clear water scouring [J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2006, 27(6): 361 - 367. [乐培九, 程小兵, 朱玉德, 等. 清水冲刷推移质输沙率变化规律 [J]. *水道港口*, 2006, 27(6): 361 - 367.]
- [12] Sun Zhilin, Sun Zhifeng. Transport rate of bed-load in an armoring process [J]. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2000, 27(4): 449 - 453. [孙志林, 孙志峰. 粗化过程中的推移质输沙率 [J]. *浙江大学学报: 理学版*, 2000, 27(4): 449 - 453.]
- [13] Parker G. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1990, 28(4): 417 - 436.
- [14] Wong M, Parker G. Re-analysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(11): 1159 - 1168.
- [15] Chien N, Wan Z. *Mechanics of sediment transport* [M]. Reston: American Society of Civil Engineers Press, 1999.
- [16] 乐培九. 推移质非饱和和输沙问题. 河床演变与模拟文集 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2000.

(编辑 张琼)