

河流网引水分沙的动力学瞬态模拟

曹世峰,王旭明,霍杰,郝睿

宁夏大学物理电气信息学院,银川 750021

摘要 汇流是河网上最基本的自然过程,引流则通常与水利工程相关。汇流和引流都会引起水沙变化,进而影响河道冲淤状态的变化。相较而言,对河道冲淤状态的研究更具现实意义。通过建立基于汇流-引流的河流网泥沙动力学模型,分析了在某一河段引流对其下游河段的影响,探讨了水沙变化与河道的冲淤调整。模型的模拟结果能够定性再现黄河上引流与河道冲淤之间的关系,即“引流增淤”。瞬态过程显示了冲淤动力学对分流比的强烈依赖;显示了冲淤动力学对水沙条件的复杂依赖。本研究发现了冲淤量沿程分布的指数标度律,获得了关于河网泥沙输移动力学的一些新理解。

关键词 河流网;分流比;流量;含沙量;冲淤量

中图分类号 TV143+.4

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0060-06

Simulation of Transient Sediment Transport Processes in a River Network with Water Diversions

CAO Shifeng, WANG Xuming, HUO Jie, HAO Rui

School of Physics and Electric Information Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract The confluence of streams is a fundamental process in natural river networks, while a diversion is often related to hydraulic projects. Both the confluence and diversion will cause changes of the discharge, and result in variations of the Quantity of Erosion or Sedimentation (QES). The latter is of practical significance. In this paper, a sediment transport dynamic model, based on the consideration of streams confluence and/or diversion, is proposed to investigate the influence of water diversion on the mainstream. The model considers the mechanisms that the sediment-carrying capability of a stream is modified by the QES and driven by the sediment concentration of the injecting streams. This model can be used to numerically simulate the dynamic behavior of real river networks, to show that water diversion can cause sedimentation to increase. The transient dynamics reveals some interesting characteristics. (1) There is a critical value of the so-called

diverting ratio of water at which the state of the segments below the diversion mouth will be transformed from increasing sedimentation to decreasing sedimentation. (2) Water diversion will cause the dynamics of sediment transport more complex, lead to an abrupt change of the erosion-sedimentation state. On each of the segments below the diversion mouth, the sedimentation will oscillate between the states of increase and decrease, as a quick response of the channel to the diversion. (3) If the diverting ratio is fixed and after the quick response, the oscillation extent will decay in the downriver direction. The sedimentation on each of the segments will exponentially decrease with time. (4) There is a maximum quantity of sedimentation on each of segments, as is dominated by a scaling law, that is, the quantity of sedimentation depends exponentially on the number of the segments. These may help us to better understand the nature of the sediment transport process in river networks.

Keywords river network; diverting ratio of water; flow discharge; sediment concentration; quantity of erosion or sedimentation

0 引言

河流因其攸关人类生存生活,长期以来备受关注。河流网因其完全开放性和其中水沙输移过程的复杂性,从而成为一些物理学家的研究兴趣所在^[1-6],而其研究主要集中在两方面:①研究侵蚀过程以理解河网的形成和存在于自然河网不同参数间的普适标度关系^[1-4];②利用统计力学理论和方法揭示标度关系的成因^[4-6]。河流网实际是自组织网络,其中的水沙输移动力学过程是水流与河道之间通过泥沙冲淤变化而

收稿日期:2009-02-01

基金项目:国家自然科学基金项目(10565002),教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0914)

作者简介:曹世峰,研究方向为复杂性科学,电子信箱:caosf02@163.com;王旭明(通信作者),教授,研究方向为非线性科学与复杂性科学,电子信箱:wmxwang@nxu.edu.cn

进行的反馈自调节过程。河道在改变其形态以适应水沙输入的过程中改变了水流的携沙能力。本研究组曾提出基于汇流的反映冲淤与水流携沙能力反馈调节机制的网络动力学模型,尝试理解自然河网的水沙动力学行为^[7-9]。现实生活中常常要进行引流。一般是在主河道一侧开挖引流渠将水分流出去以满足灌溉或饮用之需,这是关乎国计民生的水利工程。然而,引流即意味着部分水沙要退出自然河网,从而导致引流口以下河段的冲淤变化。因此,建立模型模拟和评估这种变化具有非常重要的现实意义。

事实上,早在1920年前后,德国学者就开始对不同分水角度与底沙分配的关系进行研究,1930年以后特别是近几十年来前苏联及俄罗斯学者在这方面做了大量工作^[10],中国在1960年对黄河的引水淤积现象给予高度重视,进行了大量实验研究。引水引沙实验大致有两类:①以某几个站点为研究对象,分析实测数据,拟合关系,而后采用公式推导进行计算;②实验室研究,多在水槽、模型小河中观察不同边界条件、水力泥沙因子与底沙分配的关系。这些工作基本上都得出“引流增淤”的结论^[11-14]。黄河下游引流导致的淤积就更为严重。以往的引水引沙计算模式多不考虑支流汇入的影响。汇流是河网中的基本过程,汇入支流水沙条件的多样性和随机性使得本来复杂的水流结构更加复杂化,这样就改变了只在单一河道仅考虑引流的水沙运动规律。鉴于此,本研究建立汇流-引流泥沙输移动力学模型,以求更好地探索引流对泥沙输移的影响。

为便于描述泥沙输移过程,采用图1所示的河流分级并定义河段^[8]。支流的级别定义为该支流在流入大海过程中,作为测流发生汇流的次数。显然,干流的级别为0。某级支流因为上一级支流的汇入将其分割成若干河段,两相邻入汇点之间即为一河段。图1中显示了第*l*条*h*级支流的第*i*、*i*+1、*i*+2段。其中,第*i*和*i*+1段由第*i*条*h*+1级支流的末端*i*_{last}的汇入分割而成。

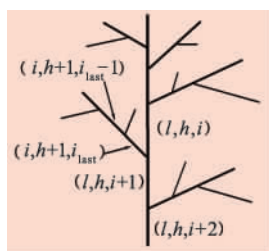


图1 河网分级、分段示意

Fig. 1 Schematic diagram of ranks of a river and the segments

1 模型建立

汇流-引流所引起的水沙流动的变化必然会导致河道泥沙冲淤状态的变化,从而引起河道形态的变化。河道形态的变化又会影

响携沙力之间存在一种反馈作用机制。对于高含沙水流,携沙力不仅受冲淤态的调节,还受(上河段)来水含沙量的驱动。前者是携沙力的主动调节,后者是被动调节^[15]。被动调节可以直接反映在输沙量*S*对含沙量*q*的非线性依赖关系上,即

$$S=AQ^a q^b \quad (1)$$

其中,*q*为所讨论河段上段水流含沙量;*Q*为流量;*A*为携沙系数,可将携沙力的主动调节归结为冲淤态对这个系数的影响,即*A*代表携沙力中主动调节的部分;*a*、*b*为指数,是流域的特征量,反映流域地形地貌等因素对水流输沙率的影响,随河流流量、含沙量的高低有不同取值,这里*a*=1.1,*b*=0.7。

以下讨论携沙力的主动调节机制。

1) 汇流情形:某河段自身淤积,河床和水流中沙粒细化,水流黏性增强,水流与河床间摩擦增大,携沙力增强,淤积的情形与此相反;某河段的上游汇入河段淤积,下游输沙压力减小,则该河段水流携沙力调小,冲刷的情形与此相反^[9]。

2) 引流情形:引流与汇流的主要差别在于水流方向不同,因而对主河道中的水沙流动的影响不同。这种影响主要取决于分流比

$$\kappa=\frac{Q_{i,h+1}(i_{\text{last}},t)}{Q_{l,h}(i,t)} \quad (2)$$

以及对应的分沙比

$$\lambda=\frac{S_{i,h+1}(i_{\text{last}},t)}{S_{l,h}(i,t)}=\frac{Q_{i,h+1}(i_{\text{last}},t)q_{i,h+1}(i_{\text{last}},t)}{Q_{l,h}(i,t)q_{l,h}(i,t)} \quad (3)$$

式中各量有4个指标,如*Q*_{*l,h*}(*i*,*t*)为第*t*时步第*l*条*h*级支流的第*i*段上的流量。引出水流的输沙量为

$$S_{l,h+1}(i_{\text{last}},t)=B\kappa^\alpha Q_{l,h}^\beta(i,t)S_{l,h}(i,t) \quad (4)$$

式(4)根据黄河引水试验所得到的分沙比的经验公式 $\lambda=B\kappa^\alpha Q_{l,h}^\beta(i,t)$ 得出^[16],表明分沙比非线性依赖于分流比,试验结果给出系数*B*=8.0, $\alpha=1.2$, $\beta=-0.2$ 。当 $\kappa>\lambda(q_{l,h}(i,t)>q_{i,h+1}(i_{\text{last}},t))$,说明引出水流的含沙量小于主河道的含沙量,在上游来沙不变的情况下,主河道水流的输沙压力增加,迫使其携沙系数有调高的趋势;反之,当 $\kappa<\lambda$,携沙系数调低。这实质是引流时携沙力的又一被动调节机制,与汇流时通过含沙量的被动调节机制相同。同时,引流导致的含沙量的突变将引起河道冲淤的即时响应。因此,引流时携沙力的主动调节与汇流情形一致。于是,同时考虑汇流和引流的携沙系数可以表达为

$$A_{l,h}(i+1,t+1)=A_{l,h}(i,t)-\frac{k_1\Delta S_{l,h}(i+1,t)}{Q_{l,h}^a(i+1,t+1)q^{t_b}(t+1)}+\frac{k_2\Delta S'(t)}{Q_{l,h}^a(i+1,t+1)q^{t_b}(t+1)} \quad (5)$$

其中,汇流时 $q'(t+1)=q_{l,h}(i,t+1)+q_{i,h+1}(i_{\text{last}},t+1)$,冲淤量 $\Delta S'(t)=\Delta S_{l,h}(i,t)+\Delta S_{i,h+1}(i_{\text{last}},t)$;引流时 $q'(t+1)=q_{l,h}(i+1,t+1)$ (代表引流之后*t*+1时步流动在第*i*+1河段的水流含沙量,即入流含沙量), $\Delta S'(t)=\Delta S_{l,h}(i,t)$ 。此式表明未考虑引出水沙对主河道的影响,认为引流一旦发生,引出水流即退出河网。*k*₁、*k*₂分别为所讨论河段自身及其上游邻近河段,以及汇入支流冲淤态对携沙系数的影响强度。研究表明黄河所有河段均为*k*₁>*k*₂。

汇流-引流过程变化最直接的是流量,为简化表示,忽略水流损失,即假设流量守恒。则有

$$Q_h^l(i+1, t+1) = Q_{lh}(i, t) \pm Q_{i,h+1}(i, t) \quad h=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

公式右边第 1 项表示第 t 时步 l 条 h 级支流在第 i 段的出流量,第 2 项表示第 t 时步 i 条 $h+1$ 级支流的出流量(或引出水流流量),“+”、“-”号分别对应汇流和引流。左边 $Q_{lh}(i+1, t+1)$ 表示第 $t+1$ 时步运行在第 l 条 h 级支流的第 $i+1$ 段,并作为其出流的水流量(出流实际是该段前一时步的入流)。

流量的变化和水流携沙力的调整将导致河段的出流携沙量与入流携沙量不平衡,即发生泥沙冲刷或淤积,冲淤量可定义为河段出流与入流的携沙量之差,即

$$\Delta S_{L,h}(i+1, t) = \begin{cases} S_{L,h}(i+1, t) - (S_{L,h}(i, t) + S_{i,h+1}(i_{\text{last}}, t)) & \text{汇流} \\ S_{L,h}(i+1, t) - (S_{L,h}(i, t) - S_{i,h+1}(i_{\text{last}}, t)) & \text{引流} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $S_{i,h+1}(i_{\text{last}}, t)$ 在汇流中代表汇入支流的携沙量,由方程(1)决定;在引流中代表引出的泥沙量,由方程(4)得到。

对于每条河流,任一河段可以选作它的源头, $\xi(t)$ 和 $\zeta(t)$ 两函数的规则或随机变化可以表示不同降雨过程导致的源头流量和含沙量的变化,即

$$Q_{L,h}(1, t) = Q_0 + \xi(t) \quad (8)$$

$$q_{L,h}(1, t) = q_0 + \zeta(t) \quad (9)$$

$$\Delta S_{L,h}(1, t) = \Delta S_0 \quad (10)$$

综合上述方程,便形成本研究所构造的河流网泥沙冲刷的节点汇流-引流模型。

在引流中,影响河道冲淤的因素很多,如分流比的大小、主河道来水来沙条件和冲淤状态以及其高级支流的冲淤状态等,这样导致原有的水沙条件可能发生急剧变化,正是诸多因素间相互影响、相互调整的结果改变了原来河道的输沙规律,从而引起下游河道的冲淤变化。因此,研究分流分沙的各种影响因素,分析各个因素变化对河道的影响程度具有重要的理论和实践意义。本研究讨论最简单的情形,即只考虑一级支流的汇流和从干流的引流。去掉以上各式的角标 l 并取 $h=0$ 。首先讨论分流比对携沙力、冲淤态的影响,假设河段数 $N=30$ (干流河段的节点数 30,把河段分为 31 段,一般只研究 2~31 河段,第 1 河段为干流源头),引流发生在第 20 河段末(第 21 河段头)。

2 分流比对泥沙输移的影响

分流比与分沙比的相对大小(依赖于流量,图 2)影响主河道水流携沙力,进而影响冲淤态。图 2 是 $\Delta S_0(i, 1)=15.0$, $S_0(i, 1)=10.0$, $k_1=6.0 \times 10^{-4}$, $k_2=9.0 \times 10^{-5}$, $A(i, 1)=5.7 \times 10^{-2}$, $Q_1(i, t)=80.0$, $q_1(i, t)=10.0$, $Q_0(i, 1)=\text{rand}(i=1 \sim 30, 100.0 \sim 150.0)$ (此函数表示把 100.0~150.0 之间的 30 个随机数当作干流各河段的流量,相应的 $Q_0(20, 6000)=1644$)输出引流后 6 000 时步的计算结果。图 3 给出分流口以下几个邻近河段的冲淤量(图 3(a))和携沙系数(图 3(b))随分流比的变化。

为模拟自然河道上的引流,将干流的第 20 个节点预留为引流渠口,并将第 20 河段的各个参量赋予第 21 河段(引流前

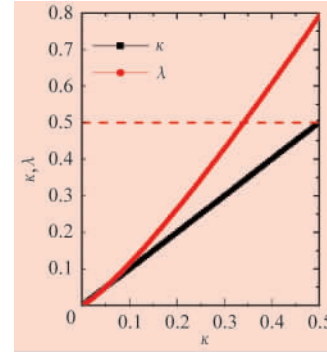
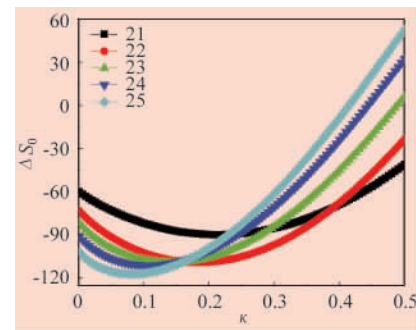


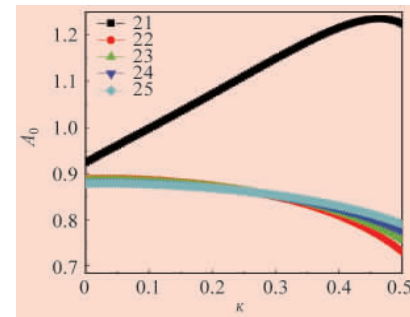
图 2 分流比与分沙比的相对大小

Fig. 2 Relationship between diverting ratio of water and that of sediment



(a) 冲淤量

(a) quantity of erosion-sedimentation



(b) 携沙系数

(b) sediment carrying coefficient

图 3 分流比对泥沙输移动力学的影响

Fig. 3 Influence of diverting ratio of water on the dynamics of sediment transport

这两河段实际是同一河段的两部分)。在这样的条件下计算 2 000 时步,以获得与初设的输入(流量)相适应的干流冲淤态和携沙力。在此基础上,计算引流后 6 000 时步的结果。冲淤态与携沙力之间的反馈表明两者互为因果,加之分流比与分沙比之间的相对大小对携沙系数、进而对冲淤态的影响,导致引流河道泥沙输移动力学的复杂性。图 2 显示当 $\kappa < \kappa_c = 0.051$ 时 $\lambda < \kappa$,图 3 显示引流一旦发生即导致引流口以下干流河道淤积,这两种因素一致决定干流 21 河段携沙系数 A_0 的提高(图 3(b));当 $\kappa > \kappa_c$ 时 $\lambda > \kappa$,各河段的淤积量随分流比的

增加趋向于各自的最大值,即在 $\kappa=\kappa'_c=0.216, 0.186, \dots$ 时, 21, 22, $\dots$ 河段淤积量分别达到最大, 出现淤积加强向淤积减弱的转变。这与黄河上实际引流导致引流口以下河段随分流比增加先淤积加强后淤积减弱的变化定性一致^[12]。显然, 引流导致 21 河段携沙系数的剧烈变化以使河道通过大幅度冲淤调整适应这种变化。需要说明的是, 图 3 只是为了比较分沙比对冲淤态和携沙系数的影响, 在其他参变量相同的条件下输出引流后时间序列上第 6 000 个值得到的结果。显然, 这样的输出与其在时间序列上的位置紧密相关。

为确信以上数值结果的正确性及获得更多细节的理解, 将第 21 河段冲淤量随时间的变化与解析结果进行对比。方便起见, 假设分流比每一时步增加 $\Delta\kappa=0.00005, Q_1(i, t)=295.0$, 其他条件同图 2, 考查由此导致冲淤量在时步 $t+1$ 与前一时步 t 的差, 即

$$\delta\Delta S_0(21, t+1)=\Delta S_0(21, t+1)-\Delta S_0(21, t) \quad (11)$$

经化简可得

$$\delta\Delta S_0(21, t+1)=(a\kappa^{0.2}-b(1-\kappa)^{0.1})\Delta\kappa-k_1\Delta S_0(21, t)+k_2\Delta S_0(20, t) \quad (12)$$

其中, $a=9.6Q_1^{-0.2}(20, t+1)q_0(20, t+1), b=1.1q_0^{0.7}(20, t+1)Q_1^{0.4}(20, t+1)\cdot A_0(21, t)$ 。图 4 显示, 解析结果与数值模拟结果基本一致。从图 4 可看出, 分流比随时间增加, 引流口下游河段淤积量先增加后减少。式(12)表明分流比 κ 较小时, $(1-\kappa)^{0.1}$ 相对较大; 随着分流比的增加, $\kappa^{0.2}$ 增加的同时, $(1-\kappa)^{0.1}$ 减小, 决定了 $\delta\Delta S_0(21, t)$ 起初为负, 然后逐渐转变为正。说明随着分流比的增加, 引流口下游邻近河段先淤积加重后淤积减轻。对应 κ'_c 的存在。这样的临界分流比与水沙条件和河道本身有关系。

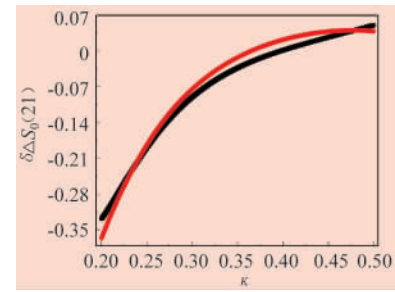


图 4 解析所得 $\delta\Delta S_0(21, 6000)$ 与数值计算结果的比较

Fig. 4 Comparison of $\delta\Delta S_0(21, 6000)$ obtained analytically with that obtained numerically

3 引流导致泥沙输移动力学的复杂性

由于引流对下游水沙的影响不同于汇流, 使得引流时水沙动力学过程更加复杂。为便于说明这种复杂变化, 图 5 显示确定分流比 $\kappa=0.1, Q_1(i, t)=25.0, q_1(i, t)=30.0$, 其他计算条件同图 2、图 3 时, 从稳定汇流(前 6 000 时步)到开始引流(6 000~12 000 时步之间), 再到引流流量不断增加(每条一级支流流量每时步增加 $\delta Q_1=0.0042, Q_1(i, t)=25.0+\xi(t), \xi(t)=(t-12000)\delta Q_1$), 引流口下游河段携沙系数和冲淤量随流量的变化情况。图 5(a)、5(c) 分别显示此过程携沙系数和冲淤量的变化; 5(b) 显示引流前后主河道水流含沙量的变化; 5(d)、5(e) 为图 5(c) 的局部放大, 分别显示引流导致冲淤量的剧烈变化和从稳定引流到引流流量均匀增加的冲淤量变化。

3.1 稳定引流的泥沙输移动力学

图 5(a) 显示, 引流导致第 21 河段的携沙系数明显增加,

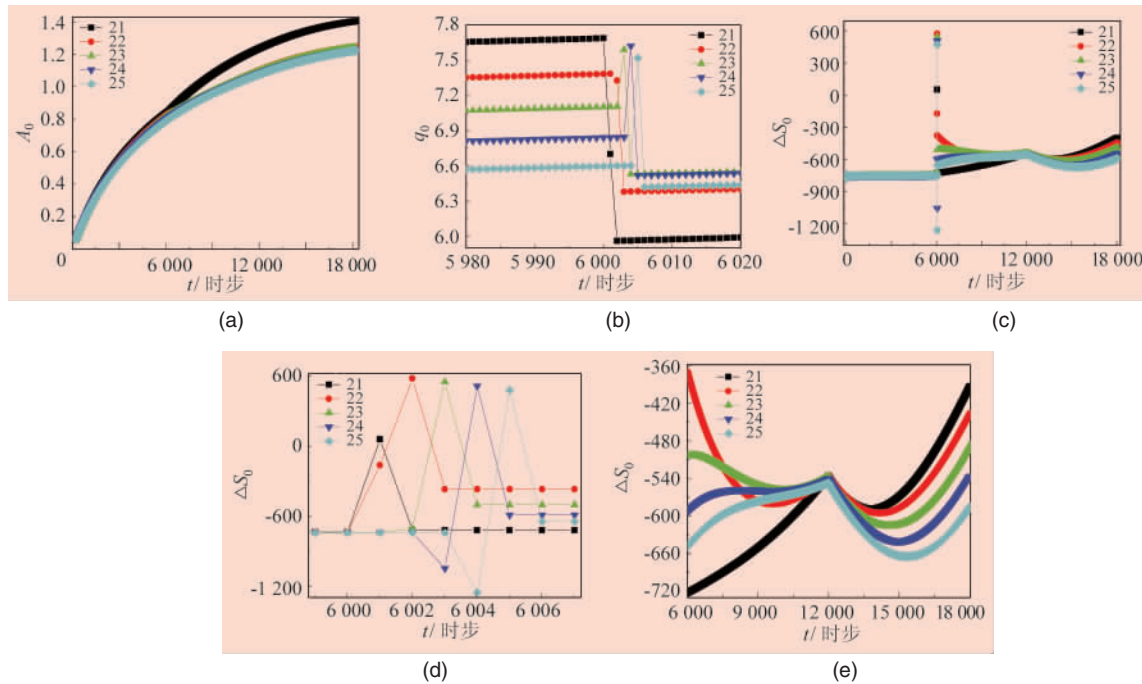


图 5 引流口下游河段携沙系数与冲淤量随流量增加的变化

Fig. 5 Variations of the quantity of sedimentation or erosion and the sediment-carrying coefficient on the mainstream segments below the water-diversion exit

滞后其 1 个时步,第 22 河段携沙系数突然减小。与此同时,由于引流导致第 21 河段入流流量突然减小,而且 $\lambda > \kappa$,入流含沙量突然减少(图 5(b)),决定该河段淤积减少(图 5(c)、5(d))。该河段水流含沙量的减少意味着它对第 22 河段入流携沙的驱动减小,导致第 22 河段入流输沙量较之引流前减小,最后决定了该河段淤积减小(图 5(d))。到了 6 002 时步,第 22 河段的入流流量减少(引流造成流量减少的水流在这一时步成为第 21 河段的出流,同时成为第 22 河段的入流),携沙量亦大幅降低,导致该河段转而大幅冲刷。至 6 003 时步,该河段的流量不再变化,重回淤积状态。这样的变化将分别延迟 1 个时步自上而下向各河段(23,24,...)依次传递。而且,变化的幅度逐渐衰减,表明引流的影响向下游逐渐减弱。这种减弱也体现在各河段携沙系数变化的幅度自第 22 河段向下游迅速减小。图 5(e)显示,总体上引流导致引流口以下河段淤积加重(特别是引流口附近,即第 21 河段),与实际观测的“引流增淤”定性一致。

图 5(d)显示,若保持稳定引流,第 22 河段携沙系数在引流发生的第 3 个时步突然减小后逐渐增加,第 23 河段携沙系数变化滞后 1 个时步且略有降低,第 24 河段携沙系数变化非常微小,再向下游几乎不变。对应于这些河段的冲淤状态的变化分别是:第 21 河段淤积逐渐减小;第 22 河段淤积加重且存在一个极值,之后淤积逐渐减轻;第 23 河段变化的走势与第 22 河段相同。这与无引流时各河段间冲淤量和携沙系数差异较小的情形极不相同,体现了引流导致的泥沙冲淤动力学的复杂性。而各河段调整的总体趋势是减小彼此间的差别,且趋向于冲淤平衡。在这个过程中,冲淤量趋向于指数分布(演化时间越长,符合程度越好),即如图 6(持续稳定引流达 20 000 时步)所示,有

$$|\Delta S_0(i-21, 20000)| \propto e^{\tau(i-21)} \quad (13)$$

这个分布体现了河网经长时间演化对固定输入适应并自组织起来的标度规律性。需要特别指出的是,在引流刚发生时,引流口附近河段冲淤量和携沙系数的大幅度变化是相互抑制的,更显示了这种自组织特征。这实际是河网对水沙条件突变的快速响应机制^[8](快瞬态过程),以削弱这种变化的影响。

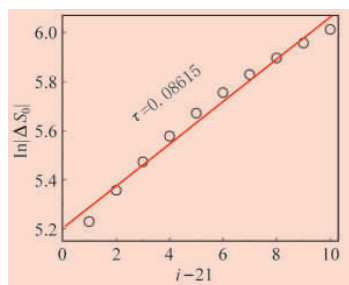


图 6 引流口以下河段趋向冲淤平衡过程即时淤积量的标度规律

Fig. 6 Scaling law of instantaneous sedimentation distribution on the segments below the diverting water exit when they tend to an erosion-sedimentation equilibrium state

3.2 流量变化的影响

引流比一定,一级支流流量的突然变化打断了稳定引流下各河段冲淤态趋向于冲淤平衡并建立上述指数分布规律的变化。12 001 时步,各河段的入流都突然增加(第 21 河段除外),而出流的变化总是滞后一个时步,导致相应河段出现淤积加重的变化(图 5(e))。值得注意的是图 5(e)中对 $t=12000$ 附近放大显示的一段比较特殊的时间序列片段。对应流量突变后的各一级支流依次汇入所观察河段造成的影响。当开始增加流量的第一条(最上游)一级支流汇入某河段时,该河段的此时间序列片段即告结束。对应第 21,22,...河段的这一时间序列片段依次延长 1 时步结束。如第 21 河段,这个时间序列片段中,每时步流量增加量来自于分流后第 20 河段的流量变化,即

$$\delta Q(21, t+1) = (1-\kappa)\delta Q(20, t) = (1-\kappa)(t-12001)\delta Q_1 \\ t=12002, 12003, \dots, 12020 \quad (14)$$

而此后(自 12 021 时步起)的流量增量保持不变,即

$$\delta Q(20, t+1) = 19\delta Q_1 \quad t > 12020 \quad (15)$$

显然,12 020 时步也发生了一次水沙条件的突变(流量增量达到极值,流量呈均匀增加),水沙条件变化方式的改变再次改变了河道冲淤态的变化趋势——随流量增加,淤积增加相对变缓。

由上述讨论可见,存在引流的河网泥沙输移动力学对各种突变的响应更加复杂,关联因素更多。显然,各条支流变化不一或考虑更高级支流时,相应的情况将更加复杂。

有趣的是,如果这种流量均匀增加的变化持续下去,各河段从上而下依次出现由淤积增强到淤积减弱的转变,即各河段存在最大即时淤积量(冲淤量 ΔS_0 的最小值)。这个最大淤积量亦服从指数标度规律(图 7)

$$|\Delta S_{0\min}(i-21)| \propto e^{\gamma(i-21)} \quad (16)$$

这样的分布反映了河网在适应输入规则变化的过程中倾向于建立时间序列的一种秩序。然而,实际河网上输入水沙的随机起伏阻断了它的出现。

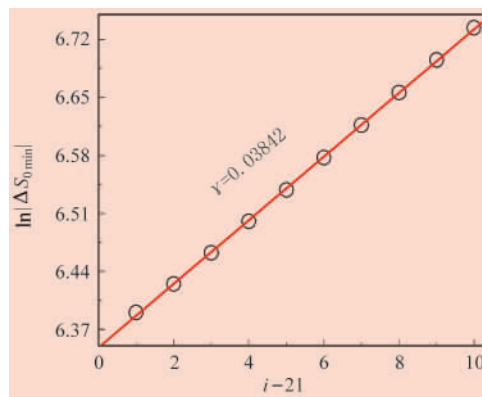


图 7 引流口以下河段流量均匀增加过程最大淤积量的标度规律

Fig. 7 Scaling law of the maximum sedimentation on the segments below the diverting water exit as the flux of water increases linearly



4 结论

本研究建立了基于汇流-引流的河流网泥沙输移动力学模型,用携沙系数、输沙量、冲淤量、分流比等量对河网的泥沙动力学进行了描述。相对于汇流模型,此模型重点考虑了引流导致的两点不同:①引出水流退出了河网,引水渠道的冲淤态对引流口以下主河道泥沙输移无影响。实际的引水渠道充分流畅时即属这种情形;②分流比与分沙比相对大小影响主河道携沙力。模型的模拟结果能够定性再现黄河引水试验显示的“引流增淤”现象。表明该模型能够在一定程度上描写存在引流的河网泥沙输移动力学。

该模型的模拟结果能够显示引流导致的河网泥沙输移复杂行为的很多细节。这些细节能对理解相关行为及其机制提供帮助。引流一旦发生将导致引流口下游邻近河段携沙系数和冲淤量的剧烈变化,两者变化的趋势(增、减)相反,互相抑制,结果是削弱水沙条件突变的影响。时间序列上,这种对水沙条件突变所做的响应强度逐渐衰减;空间上,这种剧烈响应的强度自上而下亦逐渐衰减,体现了河网的自组织和自适应能力。这种动力学特征更体现在稳定引流条件下各河段即时冲淤态趋向于减小彼此间的差异,从而建立起一种冲淤量分布的秩序,即沿程分布的标度规律。然而这种规律预示着一段时间冲淤量累积的效应所造成下游河段严重淤积的灾难。不过,这种分布不会出现在实际河网上,这是因为各支流间的差异,同一支流上因降雨造成的水沙随机起伏,阻断了通向这种分布的道路。从这种意义上讲,消灭一种规则(沿程分布规律),引进一种随机(水沙起伏),使得河网这类完全开放系统能够建立大尺度秩序——各河段冲淤平衡(水沙随时间涨落引起的效应互相抵消),可以维持河道的相对稳定。

参考文献 (References)

- [1] Kramer S, Marder M. Evolution of river networks[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(2): 205-208.
- [2] Giacometti A, Maritan A, Banavar J R. Continuum model for river networks[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(3): 577-580.
- [3] Sinclair K, Ball R C. Mechanism for global optimization of river networks from local erosion rules[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76(18): 3360-3363.

- [4] Leopold L B. Downstream change of velocity in rivers[J]. *Am J Sci*, 1953, 251(8): 606-624.
- [5] Banavar J R, Colaioni F, Flammini A, et al. Scaling, optimality, and landscape evolution[J]. *J Statistical Physics*, 2001, 104(1/2): 1-48.
- [6] Dodds P S, Rothman D H. Geometry of river network III: Characterization of component connectivity[J]. *Phys Rev E*, 2000, 63(1): 016117.
- [7] Hao R, Wang X M, Huo J, et al. Simulating sediment transport on networks[J]. *Mod Phys Lett B*, 2008, 22(2): 127-137.
- [8] 霍杰, 王旭明, 郝睿, 等. 河流网泥沙输移过程的瞬态特点 [J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(3): 253-258.
Huo J, Wang X M, Hao Rui, et al. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2008, 30(3): 253-258.
- [9] Wang X M, Hao R, Huo Jie, et al. Modeling sediment transport in river networks[J]. *Physica A*, 2008, 387(25): 6421-6430.
- [10] 佟二勋. 关于目前分流分沙的研究成果综述[J]. 水利水电技术, 1962 (9): 39-48.
Tong E X. The current researches of water-sediment diversion[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1962(9): 39-48.
- [11] 张德茹, 梁智勇. 黄河下游引水引沙与河道冲淤关系综述[J]. 泥沙研究, 1995(2): 32-42.
Zhang Deru, Liang Zhiyong. *Journal of Sediment Research*, 1995 (2): 32-42.
- [12] 王延贵, 尹学良. 分流淤积的理论分析及其计算 [J]. 泥沙研究, 1989 (4): 60-65.
Wang Yangui, Yin Xueliang. Theoretical analysis of sediment diversion and it's calculation[J]. *Journal of Sediment Research*, 1989(4): 60-65.
- [13] 牛文臣, 徐建新. 引黄与河道冲淤关系的研究 [J]. 泥沙研究, 1987(2): 21-29.
Niu Wenchen, Xu Jianxin. *Journal of Sediment Research*, 1987(2): 21-29.
- [14] 尹学良. 关于分汊淤积问题[J]. 水利学报, 1988(3): 65-72.
Yin Xueliang. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988(3): 65-72.
- [15] Huo J, Wang X M, Hao R, et al. Sediment transport dynamics in river networks: A model for higher-water seasons [R]. Complex 2009, Part I, LNCS, 2009: 832-840.
- [16] 赵文林, 张红武, 潘贤娣, 等. 黄河泥沙 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
Zhao Wenlin, Zhang Hongwu, Pan Xiandi, et al. *Sediment research*[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservation Press, 1997.

(责任编辑 陈广仁)

·学术动态·

“第 19 届全国桥梁学术会议”征文



“第 19 届全国桥梁学术会议”定于 2010 年 6 月在上海召开,会议由中国土木工程学会桥梁及结构工程分会主办,主题是“桥梁安全、耐久与创新”。

会议征文范围包括:桥梁安全、耐久与管养,基于性能的桥梁设计,桥梁概念设计与美学,轨道交通、高速铁路桥梁,桥梁设计、施工的新理论与新技术,桥梁抗风与抗震研究新进展,桥梁监测、检测与加固,桥梁施工技术与设备。详见学会网站:www.bssces.com。

论文摘要截稿时间为:2009 年 9 月 30 日。

联系方式:上海市四平路 1239 号同济大学桥梁馆中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 (200092) 华彦常; 电话:021-65983116-2709(传真), 13916817164; 电子信箱:paper@bssces.com。

