

河型转化机理及其数值模拟 —— 模型应用

周 刚, 王 虹, 邵学军, 假冬冬, 胡德超

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用平面二维河流数学模型, 系统研究概化河道的河型转化过程及其控制因素, 成功模拟得到了初始比降、流量、入口含沙量增大和河岸抗冲性减弱时, 河流从弯道向分汊、游荡河型转化的过程。根据模拟得到的河道平面形态、横断面形态、河床纵剖面, 沿程水面线及沿程输沙率的变化, 分析了河床初始比降、入口含沙量、流量和河岸抗冲性等各种因素对河型转化的影响。结果表明, 模型计算得到的河型转化过程, 与经典的河型成因及河型转化理论给出的趋势较为一致。

关键词: 河型转化; 数值模拟; 河岸抗冲性; 输沙率; 分汊河道

中图分类号: TV147.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)02-0153-08

天然冲积河流的河型演变过程十分复杂, 采用数值方法对短期内水沙条件或边岸抗冲性等条件变化而引起的河型转化过程进行定量化研究, 是目前的一个重要发展方向^[1], 且已有模型应用于天然河道演变研究^[2-4]。冲积河流的演变具有自我调整的功能, 即针对不同的来水来沙条件和河床边界条件, 通过河道形态的不断自我调整, 力图使河道中的水沙运动达到相对平衡状态^[5]。本文基于笔者所建立的平面二维河流数学模型^[6], 在概化河道数值模拟中采用不同比降、含沙量、流量、河岸抗冲性等, 在数百天的计算时间内获得较为稳定的河道最终形态, 系统地探讨短期内不同水沙条件及边岸抗冲性的变化对河型转化过程的影响, 并与经典的河型成因及河型转化理论^[7]进行比较。

1 概化河道

概化河道研究的计算区域全长 10000m, 宽 2000m, 如图 1 所示。计算中统一采用宽 300m、深 3m 的矩形河道作为初始河槽, 其初始河底纵比降在 1/10 000 ~ 4/10 000 之间, 根据不同计算工况选用不同的数值。计算工况如表 1。为了诱发河道变形、加速形成稳定河型, 入口处采用一个曲率半径等于初始河槽宽度的 90 急弯, 进入急弯之前有一段长 700m 的直道。该急弯段比降为固定值 ($J = 0.0004$), 且边岸不可冲。边界组成为均匀沙, 床沙粒径 $D = 0.1\text{mm}$ 。

研究区域中河岸土体的属性设定如下: 令河岸土体干容重 $\gamma_{bk} = 18.0\text{ kN/m}^3$, 河岸土体平均粒径 $D_{bk} = 0.1\text{mm}$, 河岸土体凝聚力 $c = 11.0\text{ kPa}$, 初始岸坡角度 $i_0 = 80^\circ$; 土体内摩擦角 $\phi = 14^\circ$, 河岸横向展宽系数 $C_1 = 0.011$, 在弯道进入直道段沿左岸纵向 500 m 长的河岸设为不可冲。除边岸抗冲性变化的算例外, 以下

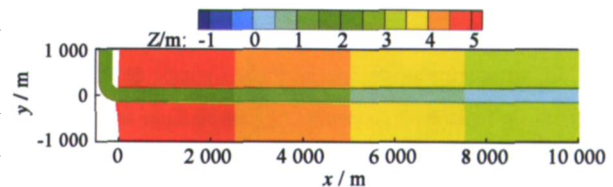


图 1 概化河道平面图

Fig. 1 Layout of the conceptual river channel

收稿日期: 2009-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50879042); “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAB05B03)

作者简介: 周 刚 (1980 -), 男, 山东莱芜人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: zhoug03@mails.tsinghua.edu.cn; zhougang@craes.org.cn

计算分析的各工况中河岸土体属性保持不变。

本计算中，各计算变量布置采用交错网格，高程数据位于节点上，计算时采用的是网格中心点高程及边线中点高程。采用的边岸土体崩塌后处理方式是：将土体体积在其崩塌网格处 3 个网格以 1.4 1 0.6 的比例进行分摊。在采用这一土体处理方式的前提下，从河道平面形态、横断面变化、河床纵剖面变化、水面比降等方面对不同变化条件下的河型转化过程进行计算模拟。计算中假定河道下切深度不受限制（河床没有下伏抗冲层）。

2 河道初始比降的影响

通过计算模拟，分析比较其它条件相同、但初始河道比降不同时所形成的最终稳定河道形态。计算条件为表 1 工况 A。

2.1 平面形态变化

图 2 是初始河道比降分别为 $J = 0.0002$ 、 $J = 0.0004$ 下，计算时间达到 250 d 时的河道平面形态计算结果。由于入口的布置影响了下游河流弯曲的发展，故将本算例的河道平面形态分成两段，前段为相对顺直段，后段为充分发展段，主要观察后段的演变情况（与下节同）。从河道平面形态可以看出，其它条件相同的情况下，随着比降的增大，河道平面形态有从弯曲型向分汉型或游荡散乱型变化的趋势。对于弯曲河道而言，河槽主流的曲率也将从小变大。

表 1 不同计算条件

Table 1 Different computed conditions

相同条件	比较条件	工况
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ $S = 0.0 \text{ kg/m}^3$ $C_1 = 0.011$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$J = 0.0001$ $J = 0.0002$ $J = 0.0004$	A
	$S = 0.3 \text{ kg/m}^3$ $S = 1.0 \text{ kg/m}^3$ $S = 3.0 \text{ kg/m}^3$	B
	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$	C
$S = 0.0 \text{ kg/m}^3$, $J = 0.0002$ $C_1 = 0.011$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$	C
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ $J = 0.0004$ $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$C_1 = 0.011$ $C_1 = 0.005$	D
$S = 0.0 \text{ kg/m}^3$ $J = 0.0002$ $C_1 = 0.011$	$D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$ $D_{bk} = 0.2 \text{ mm}$	E

2.2 横断面变化过程

为了考虑河道的充分发展，取距起始断面 8000 m 处的河道横断面随时间变化的过程进行分析，如图 3 所示，其中 0 d 为计算初始时刻，25 d、100 d、250 d 分别为模拟天然情况下的时刻，下文中相同。河道由矩形断面开始、经过边岸的崩塌淤积，形成的断面在初期呈现 U 型或 V 型。随着比降增加、河道断面展宽率逐渐加大，横断面形态向多汉道的 W 型发展。

2.3 河床纵剖面变化

图 4 中的沿程距离系沿着初始河道中心线的距离，河床高程取为断面最低点高程。可以看出，河道的上游部分自始至终处于下切过程；河道的下游部分在计算的初始时段处于淤积状态，随着计算时间的增加也转为冲刷下切，此时河床发生自上而下的冲刷下切过程，导致河床纵剖面的比降越来越小。计算表明，在其它条件相同、但河道初始比降不同时，初始比降越大的河流其上游下切速度越快，河床纵剖面比降降幅越大。

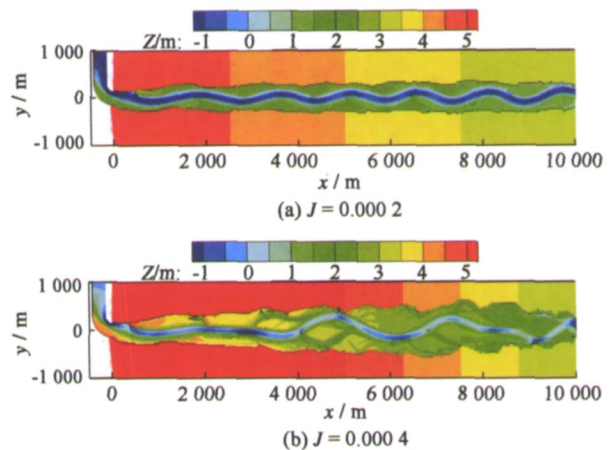


图 2 250 d 后不同初始河道比降下河道平面形态模拟结果

Fig. 2 Simulated channel patterns for different initial channel slope after 250 d

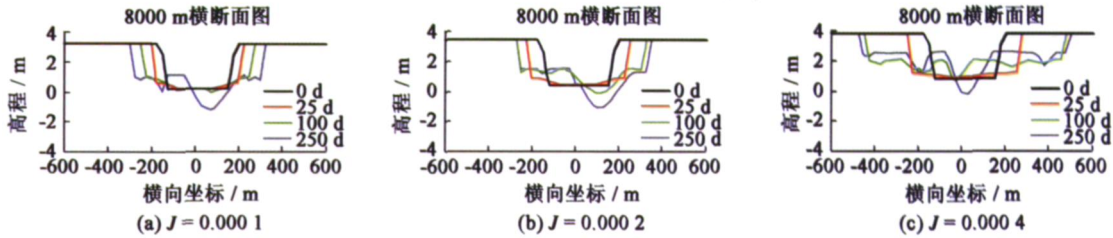


图 3 不同初始河道比降下 8000 m 处河道横断面变化过程

Fig. 3 Bed deformation processes for different initial channel slopes at the section of 8000 m from the inlet

因为弯段直道和浅滩的交替出现, 在河床沿程纵剖面上出现了一系列的上下波动, 表现为锯齿状的外形。整体上看, 冲刷过程使得河道比降趋于平缓, 水面比降也逐渐减小, 最后达到一个平衡比降, 此后河道平面形态基本保持不变。

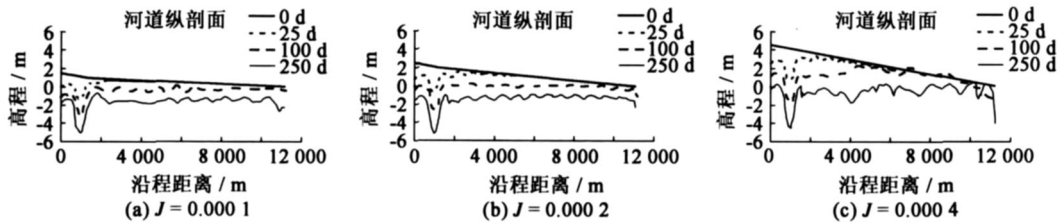


图 4 不同初始河道比降条件下河道纵剖面变化过程

Fig. 4 Change processes of longitudinal bed profile for different initial channel slopes

2.4 沿程水面线变化

沿程水面线采用河道断面最低点的水位值, 以更好地代表水流动力轴线上的水面比降。从图 5 可以看出各组计算中, 沿程水面比降随着河床比降的调整也相应趋于平缓。河道的初始河床比降越大, 则沿程水面比降变缓的速度就越快。初始河床比降越大的河道上, 从上游向下游的泥沙输移量也越大, 下游河床堆积抬高速度较快, 使得河道出现分叉甚至游荡散乱形态, 水流漫滩、水位壅高也越显著。随着计算时间的增加, 水面比降的减小速度有所放缓。

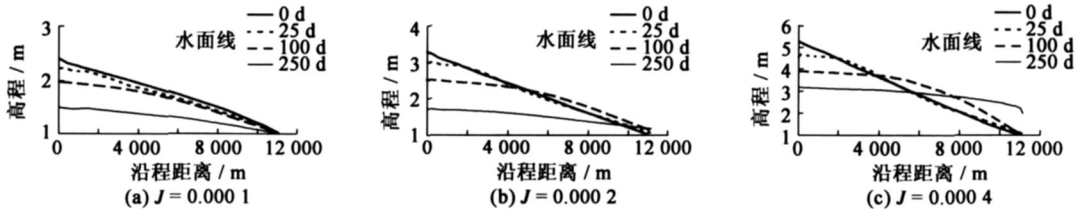


图 5 不同初始河道比降条件下水面线

Fig. 5 Processes of water surface profile changes for different initial channel slopes

2.5 沿程输沙率变化

根据河道主槽及平面形态取一系列“局部河段”进行统计: 弯曲型河道上取深潭与深潭之间为一个局部河段(弯曲河道的两个波峰之间), 游荡散乱型河道上则直接取计算域轴线上的直线段, 比降按所取局部河段的相应端点计算。输沙率为单位时间内通过某断面的泥沙量(即断面悬移质输沙率)。从计算时间为 100 d 时沿程局部河段输沙率与比降的关系可以看出, 在弯曲型河道上, 输沙率与比降呈较稳定的正相关关系(均沿程增大, 即沿程冲刷), 但是随着初始比降的增加, 在河道出现分叉或散乱游荡情况下, 这种正相关关系就不再很好满足, 有时会出现相反的关系。为了节省篇幅, 下文只给出计算模拟的结论性成果。

3 含沙量和流量的影响

河道在其它条件相同下,不同的入口含沙量和不同的给定流量对河道演变的影响,如表 1 工况 B 和工况 C 所示。

3.1 平面形态变化

图 6(a)为入口含沙量为 3.0 kg/m^3 下 250 d 时河道平面形态模拟结果。可以看出,随着入口含沙量的增大,河道从弯曲型向游荡散乱型发展。图 6(b)给出了恒定流量为 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,放水 250 d 后所得河道平面形态。可见,随着流量的增加,河道最终形成的平面形态也逐渐趋于分汉型或散乱型,但相对于第 2 节中比降对河型影响的算例,其河型转化的程度略小一些。

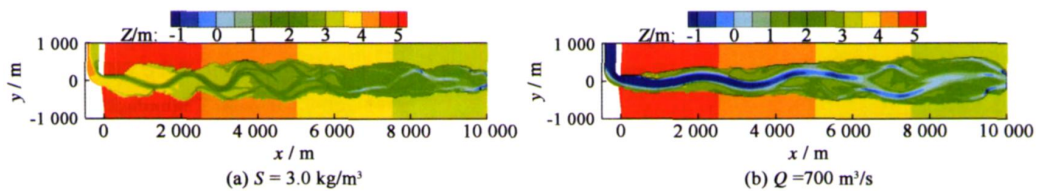


图 6 250 d 后不同入口含沙量和流量下河道平面形态模拟结果

Fig. 6 Channel patterns for different inlet sediment concentration and inlet water discharge after 250 d

3.2 横断面变化过程

不同入口含沙量下的横断面计算结果表明,计算初期,下游 8000 m 处横断面均呈对称展宽状。上游来沙量较小时,河道最终能够形成单一稳定主槽,只在出口水面比降突增处发生分汉;上游来沙量较大时,河道最终形成的主槽明显变浅;在含沙量超出挟沙能力后,河道无法形成一个单一的主槽,而是出现了分汉、河道展宽等过程,横断面形态也更加复杂,向宽浅、多汉道方向发展。

不同流量下的横断面计算结果表明,流量增大导致河道从初始顺直逐渐发展为弯曲、分汉或游荡型,流量越大,断面越宽浅,这与河床比降增大后影响河型转化的方向一致。

3.3 河床纵剖面变化

图 7(a)为计算得到的不同入口含沙量下最终形成的河道纵剖面。当上游入口处含沙量较小时,河道中出现了沿程冲刷,使得河床的最终比降小于初始比降;随着入口含沙量的增加,河道出现了沿程淤积,使得河床的最终比降超过了初始比降,河道比降无法调平。河道整体淤积抬升,下游河道淤塞现象明显。这与前述不同入口含沙量下计算得到的河道最终平面形态是对应的。

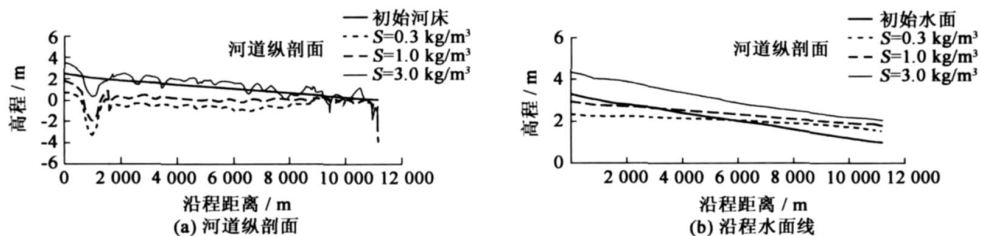


图 7 不同入口含沙量下 250 d 河道纵剖面和沿程水面线

Fig. 7 Change process of longitudinal bed profile and water surface profile for different inlet sediment concentration after 250 d

不同流量下的河床纵剖面计算结果表明,随着流量的增加,河道纵剖面比降不断减小,最终形成倒坡,即上游河床高程比下游的还要低。主要原因在于清水流量增加,对上游河床持续冲刷,上游河床因缺乏泥沙补给而不断降低。水流将泥沙搬运至下游后补给下游河床,使下游河床降低的程度小于上游河床。

3.4 沿程水面线变化

由图 7(b)所示沿程水面线可以更加清楚地看出含沙量对河道纵剖面的影响。当上游入口处含沙量较小时, 由于河道存在沿程冲刷, 最终形成的沿程水面线比初始水面线平缓。入口含沙量增大后, 最终形成的沿程水面线将抬高, 比降调平程度也小一些。当入口含沙量为 3.0 kg/m^3 时, 最终形成的沿程水面线全程高于初始水面线, 局部比降甚至超过了初始比降。

不同流量下的沿程水面线计算结果表明, 给定的流量越大, 最终形成的水面比降越平缓, 反映出河道的自我调节过程趋于水沙运动平衡。在大流量的算例中, 由于河底形成倒坡、下游河道分汊后水流阻力增加, 导致下游的水位有较大幅度的抬高。

3.5 沿程输沙率变化

当上游入口处含沙量较小时, 输沙率始终沿程增大, 即河床始终处于沿程冲刷状态, 比降与输沙率呈正相关, 符合弯曲型河道特性。随着入口含沙量的增加, 在入口含沙量为 1.0 kg/m^3 时, 河道基本达到冲淤平衡, 输沙率沿程不变或略有变小。入口含沙量为 3.0 kg/m^3 时, 输沙率沿程急剧变小、河床处于沿程淤积状态。由于河道发展为散乱游荡型, 局部河段水面比降与断面悬移质输沙率的关系不再完全正相关, 甚至出现负相关转变的趋势, 与宽浅河段洲滩较多时的一般规律相符。

不同流量下的沿程输沙率计算结果表明, 随着给定流量的增加, 输沙率是沿程增加的, 局部水面比降大时输沙率也大。

4 河岸稳定性的影响

河岸土体抗冲性的强弱可以用土体的起动切应力 τ_c 表示。根据 τ_c 的计算式可知, 泥沙粒径在 $0.08 \sim 0.1 \text{ mm}$ 时最容易起动。河岸抗冲性越弱, 越容易发生冲刷而崩塌后退, 河岸越不稳定。横向展宽系数是反映河岸冲刷后退速度的综合参数, 横向展宽系数越小, 所需的临界起动切应力越大。因此, 本文通过改变横向展宽系数和泥沙粒径来间接反映泥沙抗冲性的强弱对河道演化的影响。计算工况如表 1 中 D 和 E。

4.1 平面形态变化

图 2(b)为河岸横向展宽系数 $C_1 = 0.011$ 时计算结果, 在本节中给出 $C_1 = 0.005$ 、其它条件不变的情况下, 放水 250 d 后河道演化的平面形态, 与其进行对照。图 2(a)为河岸土体平均粒径 $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$ 时计算结果。将图 8 与图 2(b)、图 9 与图 2(a)对照分析可以看出其它条件相同情况下, 在一定范围内, 横向展宽系数减小、或河岸泥沙直径增加, 则所需的临界起动切应力越大, 最终的河岸展宽距离越小, 最终形成的河道平面形态越趋于弯曲河型。

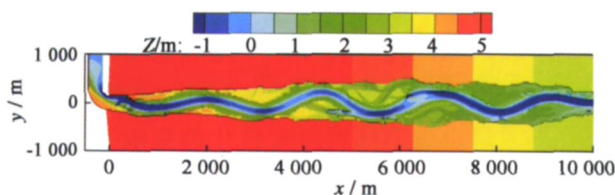


图 8 $C_1 = 0.005$ 河道平面形态模拟结果(250 d 后)

Fig. 8 Channel pattern for $C_1 = 0.005$ after 250 d

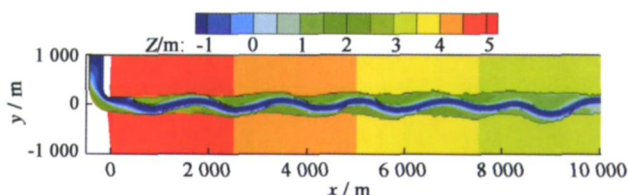


图 9 $D_{bk} = 0.2 \text{ mm}$ 河道平面形态模拟结果(250 d 后)

Fig. 9 Channel pattern for $D_{bk} = 0.2 \text{ mm}$ after 250 d

4.2 横断面变化过程

250 d 后, 河岸横向展宽系数为 $C_D = 0.005$ 的 8000 m 处横断面左右河岸各自展宽到 400 m 左右, 而 $C_1 = 0.011$ 同一位置处横断面左右河岸展宽到 450 m 左右。 $D_{bk} = 0.2 \text{ mm}$ 时, 所需河岸临界起动切应力要比 $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$ 时大, 随着临界起动切应力的增大, 可以看出展宽幅度减小。

4.3 河床纵剖面变化

河岸横向展宽系数 C_1 的减小和河岸土体起动切应力的增加都导致河床冲刷深度增加, 河岸展宽距离减小。河岸展宽系数越小、河岸抗冲性越强, 则上游河床冲刷量和下游河床淤积量就都越小, 河床纵剖面就越不易形成倒坡。

4.4 沿程水面线变化

其它条件相同时, 河岸土体稳定性越弱, 河床纵剖面调整越剧烈, 最终河道水面线越平缓。

4.5 沿程输沙率变化

需要注意的是图 10 中沿程输沙率的变化, 放水 250 d 时的沿程输沙率要比 100 d 时大, 与前几节条件下所得结果相反。这组计算的条件见表 1 工况 D。从计算河道平面形态的变化过程中可以发现, 在 100 d 时, 河道主槽散乱, 而到 250 d 时反而形成了明显的主槽。不同的河道平面形态导致了沿程输沙率变化。

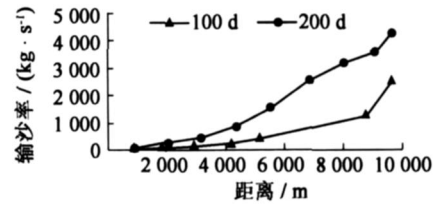


图 10 $C_1 = 0.005$ 下沿程输沙率变化

Fig. 10 Sediment transport rate for $C_1 = 0.005$ at different time

5 计算结果与已有河型理论的对比

将本文前几节各种计算条件及相应的模拟计算结果进行统计归纳, 如表 2 所示。其中, 参数 B_{\max}/B_0 、 J_w/J_{w0} 、 J_b/J_{b0} 、 B/H_{8000} 分别为模拟 250 d 时, 最大河宽与初始河宽、水面比降与初始水面比降、河道比降与初始河道比降的比值以及 8000 m 处河道的宽深比, 表中比降值为沿河道深泓线的沿程比降。

为了方便比较, 采用 Schumm 在 1985 年提出的一种分类图解方法^[8]的定性结果, 与本文的数值模拟结果进行对比。Schumm 把河道的平面形态按其相应的河流水动力因素和泥沙输移动力特性进行区分, 认为特定河型的形成取决于该段河道内的动力条件, 如水动力因子、泥沙输移特性、边岸抗冲性(粘性颗粒含量)等, 把河流分成 3 大类、14 亚类, 并给出了 14 种河型与动力条件的关系。本文分析对比如下。

Schumm 指出河流地貌界限中最主要的界限是各种河型及其转化的河谷比降界限, 即: 在输沙平衡时, 无论对哪种边界条件, 总是存在两个极限比降 J_1 和 J_2 , 当河谷比降小于 J_1 时, 河型将维持单一顺直; 当河谷比降大于 J_1 时, 河型将变为弯曲河流; 而当比降超过另一极限值 J_2 时, 河型将由弯曲河流转化为游荡性分叉河流^[9]。Leopold 等都认为比降的大小是造成河型是顺直、弯曲还是分叉的主要原因^[10]。钱宁在分析不同河型形成条件时尽管没有正面说明比降是河型转化的决定性因素, 但是同样认为, 游荡河型河谷比降陡, 而弯曲顺直河型河谷比较缓^[11]。本文中给定不同初始河床比降时数值模拟的计算结果, 与经典理论指出的趋势相符合, 即初始河床比降越大, 则越容易向分叉或江心洲型发展。

从来沙条件和河岸稳定性的变化对河型转化的影响看, 本文计算表明, 其它条件不变时, 入口含沙量增加后, 水流挟沙力与含沙量不相适应, 导致河床堆积抬高, 进而分叉、游荡; 而河岸稳定性变弱的后果与增大河流功率 QJ 的后果相同, 将使河道向分叉、江心洲型发展。河岸稳定性对河型转化的影响是显而易见的, 大部分河型转化的室内实验都考虑了不同粒径河岸土体对河型过程的影响。河岸的稳定性越弱, 同样水沙条件下, 宽深比越大, 江心洲河型越容易形成, 并可能向游荡散乱型转化。钱宁和周文浩^[12]曾指出造成游荡型河型的根本原因就是河床的堆积抬高和两岸的不受约束。并认为床沙质的相对来量和河岸的相对可冲刷性是河型形成中起决定作用的因素。可见, 数值模拟的计算结果定性上符合经典理论和以往的试验研究所指出的趋势。

在来水条件对河型转化的影响方面, 本文没有考虑流量的非恒定变化过程, 而是给出了不同的入口恒定流量。河道的其它条件相同时, 入口恒定流量的增大, 相当于河流功率增大、河道水流挟沙能力增加, 计算结果表明上游河床缺乏补给而出现下切, 下游河床获得上游的补给而减小了下切程度甚至出现淤积抬高, 河道比降调平。这符合下切河道演变的一般规律。特别地, 较大的流量造成了河床沿程的大幅度冲刷, 河道下

游部分泥沙堆积、出现分汊或江心洲型河道。倪晋仁^[13]通过所做室内实验分析恒定流量影响时得出, 流量对河型的过程的影响与初始比降是相同方向的, 即流量增加, 同一河流向游荡河型转化。

综上所述, 概化河道河型转化的数值模拟所得结论定性上符合以往的河型转化理论结果和试验研究结果。这说明本文建立的水沙动力学和河床变形数学模型能够从本质上反映河道演变的一般趋势。

表 2 不同条件计算结果比较

Table 2 Summary of simulated results for different conditions

相同条件 (工况 A、B、C、D、E)	比较条件	$\frac{B_{max}}{B_0}$	$\frac{J_w}{J_{w0}}$	$\frac{J_b}{J_{b0}}$	$\frac{\sqrt{B}}{H_{8000}}$	河型	最终河底比降
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.0 \text{ kg/m}^3$ $C_1 = 0.011$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$J = 0.0001$	1.83	0.39	0.01	22.99	顺直	调平
	$J = 0.0002$	2.33	0.25	-0.16	16.94	弯曲	倒坡
	$J = 0.0004$	3.67	0.18	-0.21	18.43	分汊	倒坡
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, $J = 0.0002$ $C_1 = 0.011$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$S = 0.3 \text{ kg/m}^3$	2.58	0.30	-0.22	22.33	弯曲	倒坡
	$S = 1.0 \text{ kg/m}^3$	2.75	0.43	0.07	24.02	弯曲	调平
	$S = 3.0 \text{ kg/m}^3$	3.58	0.74	0.93	40.92	散乱	无法调平
$S = 0.0 \text{ kg/m}^3$, $J = 0.0002$ $C_1 = 0.011$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	2.33	0.25	-0.16	16.94	弯曲	倒坡
	$Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	3.58	0.23	-0.57	31.73	分汊	倒坡
	$Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$	4.33	0.13	-1.29	32.50	分汊	倒坡
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, $D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$	$J = 0.0004$	3.67	0.18	-0.21	18.43	分汊	倒坡
	$C_1 = 0.011$ (小)	2.83	0.35	0.16	11.00	弯曲	调平
$S = 0.0 \text{ kg/m}^3$	$J = 0.0002$	2.33	0.25	-0.16	16.94	弯曲	倒坡
	$D_{bk} = 0.1 \text{ mm}$ (小)	2.33	0.25	-0.16	16.94	弯曲	倒坡
	$C_1 = 0.011$	2.08	0.30	-0.10	12.30	弯曲	倒坡
	$D_{bk} = 0.2 \text{ mm}$ (大)	2.08	0.30	-0.10	12.30	弯曲	倒坡

注: “-”表示 250 d 时沿程河床比降为负, 统计值为计算 250 d 时结果

6 结 论

(1) 基于已建平面二维河流数学模型, 通过概化河道河型转化的数值模拟, 从河道平面形态、横断面变化、河床纵剖面, 沿程水面线及输沙率等方面分析不同初始比降, 入口含沙量, 流量和河岸抗冲性对河型转化的影响。成功模拟得到了初始比降、流量、入口含沙量增大和河岸抗冲性弱时, 河流从弯道向分汊、游荡河型转化的过程。所得结果与已有的河型转化理论结果符合较好, 且其动力学机理更加明确。

(2) 特定条件下的模拟结果表明, 入口含沙量保持不变 (清水) 而增大河流功率 QJ (或减小河岸抗冲性、减小泥沙粒径), 都将造成上游冲刷、下游淤积, 最终河底比降调平 (有时出现倒坡), 在概化河道下游最终形成的稳定河型属于分汊或江心洲型; 若 QJ 保持不变而入口含沙量增大到 3.0 kg/m^3 , 则泥沙将散乱堆积在河道中, 最终河底比降无法调平, 在概化河道下游形成的稳定河型是游荡散乱型。

(3) 由于本文是基于力学机理的粘性土河岸崩塌河流数学模型, 针对到具体河段应根据河岸土体的实际情况而采用不同的崩塌模式。对于非粘性土和混合土河岸崩塌模式的模拟也是模型以后扩展的方向。

参考文献:

- [1] 张俊勇, 陈立, 王家生. 河型研究综述 [J]. 泥沙研究, 2005 (4): 76-81. (ZHANG Jun-yong, CHEN Li, WANG Jia-sheng. Review on the research of river patterns [J]. Journal of Sediment Research, 2005 (4): 76-81. (in Chinese))
- [2] 夏军强, 王广谦, 吴保生. 黄河下游河床纵向与横向变形的数值模拟: 二维混合模型的应用 [J]. 水科学进展, 2003, 14 (4): 396-400. (XIA Jun-qiang, WANG Guang-qian, WU Bao-sheng. Numerical simulation for the longitudinal and lateral deformation of riverbed in the lower Yellow River: Application of a 2-D composite model [J]. Advances in Water Science, 2003, 14 (4): 396-400. (in Chinese))
- [3] 假冬冬, 邵学军, 王虹, 等. 考虑河岸变形的三维水沙数值模拟研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20 (3): 311-317. (JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. Three dimensional mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion [J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (3): 311-317. (in Chinese))
- [4] 假冬冬, 邵学军, 王虹, 等. 三峡工程运用初期石首河弯演变三维数值模拟 [J]. 水科学进展, 2010, 21 (1): 43-49. (JIA

- Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. 3-D numerical simulation of fluvial processes in the Shishou bend with the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 43-49. (in Chinese)
- [5] 徐国宾, 练继建. 河流调整中的熵、熵产生和能耗率的变化 [J]. *水科学进展*, 2004, 15(1): 1-5. (XU Guo-bin, LIAN Jijian. Changes of the entropy, the entropy production and the rate of energy dissipation in river adjustment[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 1-5. (in Chinese))
- [6] 周刚, 王虹, 邵学军, 等. 河型转化机理及其数值模拟: I. 模型建立 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 1-8. (ZHOU Gang, WANG Hong, SHAO Xue-jun, et al. Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation: I. Mathematical model [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 1-8. (in Chinese))
- [7] 周刚. 河型转化机理及其数值模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009. (ZHOU Gang. Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation [D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese))
- [8] Schumm S A. Patterns of alluvial rivers[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1985(13): 5-27.
- [9] 倪晋仁, 张仁. 河型成因的各种理论及其间关系 [J]. *地理学报*, 1991, 46(3): 366-372. (NI Jin-ren, ZHANG Ren. Theories on the cause of channel pattern formation[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 1991, 46(3): 366-372. (in Chinese))
- [10] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel patterns: Braided, meandering and straight[R]. US Geological Survey Professional Paper 282B, 1957: 35-85.
- [11] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 410. (QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHOU Zhi-de. Fluvial processes [M]. Beijing: Science Press, 1987: 410. (in Chinese))
- [12] 钱宁, 周文浩. 黄河下游河床演变 [M]. 北京: 科学出版社, 1965: 224. (QIAN Ning, ZHOU Wen-hao. Fluvial Processes in lower Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 1965: 224. (in Chinese))
- [13] 倪晋仁. 不同边界条件下河型成因的试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1989. (NI Jin-ren. An experimental study on the river pattern processes with different boundary conditions [D]. Beijing: Tsinghua University, 1989. (in Chinese))

Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation :

II. Application *

ZHOU Gang, WANG Hong, SHAO Xue-jun, JIA Dong-dong, HU De-chao

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An improved two dimensional (2-D) numerical model for river flow, sediment transport and bank erosion is presented and tested in Part I of this paper series. Using the 2-D model, a series of numerical experiments are further carried out in an idealized river channel with different variations of channel patterns in this study. The impact on channel pattern changes by various factors, such as initial channel slope, sediment supply, water discharge, and resistance to bank erosion is studied using the model simulations. The numerical results of river channel planform change, longitudinal bed profile, channel cross section, water surface profile and channel sediment transport are analyzed and discussed. The channel patterns simulated by the improved 2-D model agree well with the classic theory of channel pattern formation.

Key words: channel pattern changes; numerical simulation; resistance to bank erosion; sediment delivery rate; braided channel

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879042) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Period Plan (No. 2006BAB05B03).