水流泥沙进入浅水层初期的河槽形态演替规律

刘飞

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048

E-mail: lf512512@163.com

2016-07-13 收稿, 2016-09-22 修回, 2016-09-23 接受, 2016-11-01 网络版发表

中国水利水电科学研究院专项(KY1613, KY1635)、国家自然科学基金(51079104, 51309255)、水利部科技示范项目(SL2016-10)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室课题(2016TS07)资助

摘要 采用非均匀沙进行水槽概化试验, 在恒定的来水来沙、河床比降和出口侵蚀基准面不变的条件下, 研究水流泥沙进入浅水层初期的河槽形态演替变化规律. 研究表明, 河槽形态的演替规律经历3个阶段变化: 第一阶段, 顺直河槽和分汊河槽交替出现; 第二阶段, 随支汊河槽分流能力逐渐减小并消亡, 分汊河槽逐渐向微弯状河槽演替; 第三阶段, 微弯河槽不断地在堆积体表面摆动, 随其凹岸不断冲刷后退致使曲折系数变大, 逐渐向蜿蜒状河槽演替. 经分析, 第二阶段和第三阶段的河槽形态呈现明显的正弦曲线特征: 上段河槽处在正弦曲线进水口处, 中、下段河槽的弯道段位于正弦曲线的波峰和波谷位置; 随历时增加, 正弦拟合曲线的振幅和方向角逐渐变大, 河槽的弯曲系数逐渐趋于稳定. 最后从泥沙运动和边界条件两个角度对河槽形态演替变化的形成条件进行了分析.

关键词 泥沙运动, 河槽形态, 演替规律, 概化试验

冲积河流是在一定的外界条件下由水流和泥沙运动塑造形成, 并在发育过程中表现出不同河型. 目前对河型的划分有多种, 具有代表性的是将河道分为顺直型、弯曲型、分汊型和游荡型四类^[1]. 冲积河流的形成是地质构造运动、水流侵蚀、泥沙堆积、人工干预等综合作用的结果. 如历史上荆江河道的塑造过程, 就是江汉地区在现代构造运动中持续沉降, 长江出江陵以漫流形式进入云梦泽, 河道形态并不显著, 由于泥沙长期淤积, 形成以沙市为顶点的三角洲分流, 并在向东发展的同时, 向南迅速扩展, 在人工控制下逐渐形成荆江河道. 由此可见冲积河流形成和发展是一个漫长而复杂的过程, 由于河道河型常处于变化中, 往往给航道、防洪和两岸工农业生产等带来不利影响, 因此需要深入研究冲积河流形成和演变规律.

自然模型试验是研究河型演替的重要技术手段之一. 国内外学者大多数主要对4种河型中的某一种河流的水沙特性单独进行研究, 具体表现为: 顺直河槽方面, 唐日长^[2]和金德生^[3]均以顺直河槽为初始试验条件, 对滩槽区的输沙变化和河流形态可能的演替变化均进行了研究, 其结果对进一步认识顺直河槽内的水沙输移规律起到很好的帮助作用, 但对顺直河槽从无到有的演变过程及水沙输移变化过程未进行相关试验研究. 同理, 尹学良^[4]的水槽试验也存在同样的问题, 虽然通过试验研究了不同因素对河型演替的影响, 但其试验过程的初始条件也是在有初始小河的基础上进行研究, 没有展现出河槽从无到有的发育变化过程. 倪晋仁^[5]主要从一元相边界和二元相边界条件的变化角度分析了顺直河槽向其他河槽形态的演替变化过程, 重点指出了河型演替过

引用格式: 刘飞. 水流泥沙进入浅水层初期的河槽形态演替规律. 科学通报, 2016, 61: 3982–3992

Liu F. The evolutionary changes of channel morphology in initial stage of water flow and sediment transport in shallow water (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3982–3992, doi: 10.1360/N972016-00230

程受边界的影响较大,其试验结果分析对本试验的设计起到了非常好的指导作用,但其整个实验仍是以顺直小河为基础.分汊河槽方面,Friedkin^[6]与Federici等人^[7]仍然从边界条件去分析了分汊河槽的塑造过程,而没有从河型演变的角度对其具体的演替过程进行分析,即没有分析分汊河槽是由哪一个河槽演变而来或向另一种河槽怎样演替.游荡型河槽方面:张红武等人^[8]、Ashmore^[9,10]主要从实测资料分析角度单独研究了游荡型河流的形态变化及水沙输移规律变化,其提出的措施对治理游荡型河道提供较好的参考,但对游荡型的发育和演变过程未进行系统研究.弯曲性河槽方面:许栋^[11]、Smith^[12]、Luchi等人^[13]、Dulal等人^[14]通过试验塑造了弯曲度很大的曲流,并分析了弯道环流内的水沙变化,但缺少对弯曲河槽的演替变化过程研究,若能将弯曲性河槽自由演替的过程展现出来,并在此基础上进一步对水沙输移变化规律进行分析后的研究意义更大.Schumm^[15]从地貌界限假说角度研究了顺直-弯曲-游荡型河的演替过程,但主要从比降角度进行分析,由于试验历时较短,结论的准确性值得探讨.Parker^[16,17]主要研究了河岸处于冲淤平衡条件下的砂-粉砂质河床和砾质河床可动性及其自然形成的顺直河流的特性,其研究结果体现出了河槽形态的自由发育过程,这对本文具有非常大的指导意义.在水沙自由造床试验中,陈立等人^[18]通过室内概化水槽实验研究了清水下泄时河道比降、入流角、流量及河床组成等因素影响河流再造床过程中的河型变化规律,其研究的初始条件也是在顺直小河上进行.由上述

分析可知,国内外学者还是对某单一河槽形态变化研究较多,缺少系统研究河槽形态从无到有的变化过程,刘飞等人^[19-21]在前人研究的基础上,已在无初始小河的基础上对均匀沙(随水流以悬移质运动)的自由造床过程进行了试验研究,对其塑造从无到有的河槽形态的不断演替变化进行了初步分析,为能进一步展现推移质运动形式的水沙所塑造的河槽形态变化,本文着重对此进行研究.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验水槽位于武汉大学水利水电学院内的泥沙与防洪实验大厅内,它由水库、首部装置、进水口、概化水槽、沉沙池和回水渠组成一个完整的水循环系统,试验结构见图1(a).整个概化模型25 m(长)×3 m(宽)×0.6 m(高),在模型上段人工概化1 m(长)×0.2 m(宽)×0.3 m(高)的“河流”,其出水口位置居模型中间,与概化河流衔接的是19 m(长)×3 m(宽)的“浅水层”.模型的来水过程由离心泵控制,大小由变频器调节,数值通过电磁流量计显示.来沙过程由布置在概化河流上方的自动加沙器控制,大小由变频器调节.湖泊末端布设尾门,用于调节出口基准面(本试验的出口基准面较低,整体形成浅水层).水流从河流流入浅水层,再经过尾门后进入沉沙池,之后溢流至水库,整个试验装置组成一个完整的水循环系统,试验模型实物图见图1(b).为方便分析,从入湖河流与试验段的衔接断开始,自上而下将试验段以1 m间

图1 试验结构图(a)和实物图(b)

Figure 1 Experimental apparatus (a) and physical map (b)

隔标记成1#, 2#, ……., 17#等不同断面. 试验过程中的水位测量由布设在沿程断面上水位仪读取, 其中17#的水位仪的读数可记录出口基准面变化过程.

1.2 试验方法

本模型底部为抗冲边界层, 为防止水流泥沙进入浅水层后出现较大冲淤变化, 试验前期先在模型底部铺设一层床沙, 其初始厚度为5 cm, 按0.1%比降自上而下铺设, 床面平整且无开挖小河, 见图2(a). 试验开始前, 先用软管从尾门处缓慢注水, 在下游17#处水深达到2 cm后停止注水, 此时整个试验段的基床表面形成一个浅水层, 之后在恒定的来水来沙条件下, 水流泥沙不断进入浅水层开始自由造床过程, 在三角洲不断发育基础上进一步研究其表面河槽形态的演替变化. 试验中每隔一段历时, 用地形仪(此地形仪是一种接触式地形仪, 由伸缩探针触碰床面后自动采集示数, 其精度为0.1 mm. 为了后期能绘制出清晰的地形变化图, 在数据采集过程中, 每隔10 cm测一个断面, 且每个断面方向上5 cm测一个点)在典型断面上精确测取地形资料, 通过sufer软件分析后可展现出三角洲表面河槽在每个阶段的演替变化. 为分析方便, 现规定: 起点距在-150~-50 cm之间为左侧区域; 起点距在-50~50 cm之间定为中间区域; 起点距在50~150 cm之间定为右侧区域, 具体见图2(b)(图中X表示泥沙在输移过程中的纵向推进方向, cm; Y表示泥沙在输移过程中的横向展宽方向,

cm; Z表示泥沙在输移过程中的垂向淤积抬高方向, cm, 下同).

1.3 试验沙选取原则

试验沙为非均匀沙, 取自长江河道, 表面淡黄色, 比重为 $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $d_{50}=0.44 \text{ mm}$, 级配曲线见图3. 试验沙的选取原则: 河槽形态的演替过程是伴随在三角洲堆积体的形成发展过程中, 在天然河流中泥沙多以悬移质形式向前推进和堆积发展, 并且在发育过程中形成显著的滩槽形态, 这一发育过程多是经过数十年、上百年的自我调整过程才达到与流域来水来沙相适应的均衡状态, 形成稳定的河型. 若继续用悬沙进行室内概化试验去模拟天然河流的河型演变规律, 则很难在时间尺度和动态变化的内外动力因素上与实际河流相吻合. 因此, 在真实反映滩槽自由发育过程的同时且加快试验进程的基础上, 本文选择推移质泥沙进行室内试验, 它更易于随水流向前推进且能快速淤积抬高发展, 这一现象能够体现出水流泥沙在自由造床过程中向不同滩槽形态的发育过程. 在试验设计过程中, 以水流流速刚好大于泥沙起动流速为泥沙起动的初始条件, 考虑选用的天然沙密度较大, 试验沙在试验过程中随水流多以推移质形式运动. 若泥沙过细会产生絮凝现象, 颗粒的黏结作用将影响试验推进过程; 泥沙过粗, 受起动影响, 来水量较大, 三角洲的发育过程难以塑造, 且受水流流态影响更不易在三角洲堆积体的基础上研究河槽形态的演替过程, 因此, 将天然河道泥沙进行筛选后用于本次试验是较为合适且可行的.

1.4 试验方案

试验主要在恒定的来水量(2.45 L s^{-1})、来沙量(15.72 kg h^{-1})作用下, 并保持下游出口基准面(水深2 cm)恒定不变的情况下进行, 主要研究非均匀沙作用

图2 初始河床底部示意图. (a) 侧面; (b) 正面

Figure 2 The initial longitudinal bed of the main flume. (a) Side view; (b) top view

图3 泥沙颗粒级配曲线

Figure 3 Sediment grading curve (cumulative frequency distribution)

下三角洲表面河槽形态的演替变化过程, 整个试验历时为652 h. 上述各试验参数数值的确定原则如下: 来水量, 上游河流水流流速需大于泥沙起动流速, 而泥沙的起动流速可根据试验沙的 d_{50} 及水深利用沙莫夫公式计算出; 来沙量, 为能加快试验进程, 缩短试验周期, 来沙量大小以加沙器所能输送的最大量进行试验; 初始床面比降和下游水深, 小比降和浅水层能将整个水沙的自由造床过程展现出来, 方便观察和总结三角洲从无到有的发育过程. 若大比降和深水层, 河床的冲刷过程可能会加剧且试验周期较长, 不易观察三角洲的变化规律. 整个概化水槽配有全自动操作系统, 能保证试验的可重复性.

因本项目采用概化试验进行水沙自由造床过程中基础理论研究, 相比常规比尺模型试验, 概化试验可定性的反映水沙运动的基本情况, 且有较大的灵活性, 可通过约定试验条件来突出某一特定条件, 从而更清楚地反映出该种条件对试验的影响, 故本文的整个试验模型参数不涉及比尺问题. 因笔者前期已在图1的试验平台上进行了均匀沙造床试验研究, 相关成果见参考文献[19~21], 这可为本次试验提供前期的研究基础, 也能进一步验证整个试验设计的合理性.

2 河槽形态演替规律

2.1 河槽形态演替变化

由文献[1]可知天然河流主要包括顺直河流、蜿蜒状河流、分汊河流和游荡型河流四种形态, 且四种河流的几何形态、水流特性和输沙特性均不相同. 在模型试验中, 河槽几何形态变化在试验中最能直观的体现出来, 且河槽形态演替主要受水沙输移过程中的冲淤变化影响, 两者呈现明显的共生关系. 经分析, 河槽形态随三角洲的发育过程呈现出从无到有的自由塑造过程, 具体形态的演替变化总共经历三个阶段的演变过程, 具体如下.

(i) 顺直河槽和分汊河槽交替出现阶段. 经分析, 河槽形态变化伴随在三角洲的发育过程中, 而三角洲的发育过程又是泥沙沿河槽主流不断在三角洲前缘位置通过纵向推进、横向展宽和垂向淤积抬高过程中逐渐发育而来, 因此三角洲前缘体的形成规律能直接反映整个三角洲的发育过程, 其纵向、横向和垂向变化过程将决定泥沙的输移规律, 最后影响三角洲表面河槽形态变化. 试验历时初期, 水流泥沙进

入浅水层后, 受水流流速减小影响, 泥沙在入口处纵向推进、横向展宽和垂向淤积抬高发展, 随其不断发生淤积, 试验段的入口处很快形成不同形状的三角洲, 受水流惯性作用, 三角洲表面冲刷出明显居中顺直河槽, 见图4(a). 之后泥沙沿顺直河槽的纵向推进作用逐渐加强, 随三角洲前缘体淤积抬高, 泥沙自上而下落淤, 使顺直河槽逐渐淤积萎缩, 水流流速减小, 引起堆积体上段河槽水深增加, 进而使水沙向两侧区域分流, 并逐渐由细小分流口向多个分汊河槽转变, 具体见图4(b). 综上, 上述变化规律呈现出河槽形态与三角洲发育过程的共生变化关系: 水流泥沙沿顺直河槽纵向推进, 因泥沙在纵向推进中逐渐淤积抬高(Z方向的地形高程), 进而引起水沙纵向推进速率减缓, 致使上段河槽水深不断增加, 并逐渐向两侧区域分流分沙, 受沿X方向的水流侧蚀作用, 河槽由原先垂向边壁方向的分流分沙逐渐转为斜向边壁分流分沙, 形成分汊河槽. 因来水来沙恒定, 泥沙沿分汊河槽的主流在推进中也是不断淤积抬高发展, 致使两侧区域的堆积体高程明显高于中间区域, 进而引起水流从两侧区域向中间区域回落, 很快顺直河槽又出现在堆积体表面, 见图4(c)之后泥沙又沿顺直河槽又重复上述输移过程, 使河槽形态在这一阶段呈现出分汊河槽和顺直河槽交替出现的变化规律. 具体见图4(d)~(f).

(ii) 分汊河槽向微弯状河槽演替变化阶段. 随试验历时增加, 分汊河槽的主、支汊出现易位现象: 即原主汊(图4(f))表现为单向淤积, 河床抬高, 断面尺度缩小, 分流能力减弱逐渐变为支汊; 原支汊则表现为单向冲刷, 河床下切, 断面尺度扩大, 分流能力增强逐渐变为主汊, 易位后的分汊河槽形态见图5(a). 随堆积体推进长度变长, 新生主汊河槽的分流能力减弱且逐渐消亡, 而支汊河槽的分流能力增强, 此时堆积体表面河槽形态由分汊河槽向单一微弯状河槽逐渐演替, 见图5(b), 之后泥沙沿单一微弯河槽在三角洲前缘不断摆动发展. 同上述叙述的内容相似, 待三角洲前缘体继续淤高, 水流泥沙沿主河槽方向的推进过程减弱, 进而引起河槽水深自上而下增加, 很快在现河槽的对侧区域形成新的分流口, 随分流口逐渐变大, 河槽在堆积体表面又形成新的微弯状河槽, 见图5(c), 这一过程呈现出河槽的摆动发展变化阶段. 随历时增加, 河槽在堆积体表面不断摆动, 整体形态仍然呈微弯状, 具体见图5(d)~(f).

(iii) 微弯状河槽向蜿蜒状河槽演替变化阶段.

图4 顺直河槽和分汊河槽交替出现(图中流线方向代表河槽形态变化趋势,下同)。试验历时 40 (a), 93 (b), 137 (c), 169 (d), 205 (e), 230 h (f)

Figure 4 Straight channel and branching channel appear alternately (streamlines in the figure represent the channel morphology change trend, the same below). Test duration: 40 (a), 93 (b), 137 (c), 169 (d), 205 (e), 230 h (f)

随微弯河槽在堆积体表面不停摆动,其局部弯道段出现了凹岸冲刷后退、凸岸淤积加长的变化现象,整个河槽的蜿蜒程度不断加剧,河长增加,曲折系数随之变大,显然蜿蜒状河槽的变化形态逐渐呈现出来。观察图6(a)和(b),河槽形态具有明显的3个弯道段,受弯道螺旋流作用,弯道河槽处的水沙呈现明显的凹岸崩塌和凸岸淤积现象。随泥沙沿新河槽主流不断向前蠕动,三角洲堆积体不断向下段淤积延展,引起堆积体表面河槽主流不断发生横向摆动,使河槽形态随湾顶向下游蠕动而不断改变形状,但主要围绕中间部位连成的摆轴进行,由图6(c)和(d)中还可以明显观察出弯道段河槽仍然普遍存在两个弯道段,整体上形成明显的蜿蜒状。

综上,河槽形态的演替规律经历3个阶段:第一阶段,顺直河槽和分汊河槽交替出现;第二阶段,分汊河槽向微弯状河槽演替;第三阶段,微弯河槽向蜿

蜒状河槽演替。

2.2 河槽形态正弦曲线特征

经分析,第二阶段的微弯河槽形态和第三阶段的蜿蜒状河槽形态变化均呈现出明显的正弦曲线特征,具体见图7。由其拟合后的深泓线变化趋势可明显观察出:上段河槽处在正弦曲线的进水口处,中、下段的弯道河槽处均位于正弦曲线的波峰和波谷位置;随历时增加,正弦拟合曲线的振幅和方向角逐渐变大,河槽的弯曲系数在变化中趋于稳定;第二阶段的河槽形态具有显著的正弦曲线特征,其正弦拟合度较好,见图7(a)和(b);第三阶段的河槽形态呈现蜿蜒状,受弯道河槽局部的锐弯性影响,其正弦拟合度较小,但正弦曲线形态显著,见图7(c)~(f)。

综上,第二阶段的微弯河槽和第三阶段的蜿蜒状河槽的形态变化呈现明显的正弦曲线特征。

图5 分汊河槽向微弯河槽演替变化. 试验历时 245 (a), 285 (b), 345 (c), 367 (d), 387 (e), 425 h (f)

Figure 5 The changes of channel morphology from branching channel to slightly curved channel. Test duration: 245 (a), 285 (b), 345 (c), 367 (d), 387 (e), 425 h (f)

图6 微弯状河槽向蜿蜒状河槽演替. 试验历时 470 (a), 512 (b), 542 (c), 605 h (d)

Figure 6 The changes of channel morphology from slightly curved channel to meandering channel. Test duration: 470 (a), 512 (b), 542 (c), 605 h (d)

图7 河槽形态的正弦曲线特征。试验历时 307 (a), 345 (b), 433 (c), 501 (d), 542 (e), 652 h (f)

Figure 7 The sine curve characteristics of channel morphology. Test duration: 307 (a), 345 (b), 433 (c), 501 (d), 542 (e), 652 h (f)

2.3 河槽断面形态变化

断面形态变化既能观察出三角洲的发育过程, 又能反映出泥沙在河槽中的输移过程, 进而可分析出河槽形态的演替变化趋势。分别对上段(1#和2#)、中段(5#和10#)和下段(12#和14#)共6个典型断面中的

河槽形态进行分析, 其中研究对象以50 h为试验间隔的地形资料为基础进行分析, 具体如下。

(i) 上段河槽断面形态。观察图8, 上段河槽断面形态主要呈现以下规律: 河槽位居堆积体中间区域, 受泥沙堆积影响, 河槽不断淤积抬高发展; 河槽淤积抬高后, 断面形态沿X方向由窄深状(1#)向宽

图8 上段河槽断面形态. (a) 1#; (b) 2#

Figure 8 The change laws of cross-section in upper river channel. (a) 1#; (b) 2#

浅状(2#)发展,说明泥沙在河槽淤积抬高后使水流从中间区域逐渐向两侧区域不断分流;河槽断面整体上呈现出水流泥沙先沿河槽纵向推进,再逐渐淤积抬高,最后横向展宽的变化规律。

(ii) 中段河槽断面形态. 观察图9,水流泥沙从上段进入中段后,河槽断面形态呈现以下变化规律:形态变化,河槽分别在两侧区域(5#)和中间区域(10#)摆动,且河槽不断处于淤积抬高状态,河槽断面呈现宽浅状;冲淤变化,在水流侧蚀作用下,河槽形态在两侧区域出现深蚀下切现象,而在中间区域以微摆动为主,这与河槽形态在第三阶段的平面形态变化相吻合。

(iii) 下段河槽断面形态. 观察图10,水流泥沙从中段进入下段后,下段河槽断面形态主要呈现以下规律:形态变化,河槽在堆积体表面不停摆动,河槽断面呈现宽浅状;冲淤变化,单个历时下的河槽水流挟沙力较大,冲刷作用明显大于淤积状态,断面呈现窄深状;随历时增加,河槽在整个堆积体表面摆动中不断淤积抬高发展。

综上,当水流泥沙从进入浅水层后,河槽断面形态主要呈现:在堆积体表面不停摆动,且在摆动中不断淤积抬高,局部出现冲刷作用大于淤积状态,河槽断面以宽浅状为主。

图9 中段河槽断面形态. (a) 5#; (b) 10#

Figure 9 The change laws of cross-section in middle river channel. (a) 5#; (b) 10#

图10 下段河槽断面形态. (a) 12#; (b) 14#

Figure 10 The change laws of cross-section in downside river channel. (a) 12#; (b) 14#

3 河槽演替形成条件分析

前文已从平面形态及断面形态两个角度对河槽形态的演替过程进行分析,现从形成条件角度进一步分析形态的演替变化.河床演变是具有动边界的

水沙两相流必然发生的现象,河床决定水流,水流反过来通过泥沙冲淤使河床发生变化.影响河床演变的主要因素有来水来沙、侵蚀基准面和河床周边条件三个组成^[22].因试验中的来水量恒定、出口侵蚀基准面恒定,故主要从泥沙运动和边界条件对河槽形态变化进行分析.

3.1 泥沙运动

由上述第2部分内容分析可知,在试验初期,水流从上段中间区域的河槽向两侧区域按漫流→串沟→细小沟槽→新河槽方式流动,因泥沙随水流以推移质形式不断向前堆积推进,受水流运动形式不同,泥沙在堆积体表面的淤积厚度呈现不均匀性.因成型堆积体具有明显的抗冲性,会对水沙的推进过程起到阻碍作用,水流横向发展受到限制后便自然而然向中间区域回流,顺直河槽呈现出来.随顺直河槽底部逐渐淤积抬高,河身出现展宽,流速减小,水流挟沙能力降低,泥沙在中间区域落淤而堆积成心滩,受其阻碍作用,水流极易向两侧区域分流分沙并很快形成分汊河槽;待分汊河槽淤积抬高后,水沙过程又重复上述过程的演变过程,顺直河槽和分汊河槽的交替出现是试验初期的主要特点.随堆积体长度逐渐变长,堆积体表面以微弯河槽和蜿蜒状河槽呈现,其主要原因是试验段已经形成成型堆积体,在恒定的来沙作用下,边滩的推进速率较慢,边滩造成的弯曲水流所产生的环流加强了对两侧区域堆积体的冲刷作用,使其成为有一定曲率的凹岸,环流随着凹岸的形成进一步加强,一方面将继续淘刷凹岸,另一方面以横向输移的方式将泥沙带到对岸的边滩,使其发展成凸岸,当凹岸和凸岸形态比较明朗化的时候便形成了弯道,受其影响水动力轴线发生弯曲,进而影响下一个弯道,故整个蜿蜒状河槽形态便呈现出来.

3.2 试验边界影响

边界条件是影响河槽形态变化的另一重要影响因素.本试验中的河床两侧边壁由基岩组成,抗冲性强,当河槽形态摆动到边壁时,受边壁的阻碍影响,

河槽主流的横向摆动作用逐渐减弱,进而使河槽主流在平面形态上从两侧边壁区域向中间区域斜向推进,这一现象在三个阶段中均有所呈现,具体见图4(b), (d), (f), 图5和6.从泥沙输移角度,当河槽主流摆动至边界位置时,泥沙横向展宽作用减弱,进而使水流不能直接冲刷岸坡,转而向河床底部攫取泥沙满足其挟沙力.当河床底部被冲刷到一定程度后,此处很快形成弯道河槽,水流动力轴线在进入弯道时偏靠凸岸,则出现向河床中间方向的侧蚀现象;在弯道段则偏向凹岸,则出现向边壁方向的侧蚀现象.随着凹岸形成冲刷坑,凸岸出现崩塌,其坡度由陡变缓,结合边壁阻力作用,河槽主流离开边壁向河床中间方向发展,这一过程在河槽演替的第三个阶段中更为明显,具体见图6靠近两侧边壁处的弯道河槽形态变化.随历时增加,受堆积体的整体纵向坡降较缓影响,河槽的弯曲系数增加,形成显著地蜿蜒状形态.

4 结论

(1) 在恒定的来水来沙、河床比降和出口侵蚀基准面不变条件下,水流泥沙造床初期的河槽形态的演替过程经历三个阶段变化:顺直河槽和分汊河槽交替出现阶段;随分汊河槽的支汊分流减小并消亡,河槽形态逐渐向微弯状演替;随微弯河槽的凹岸冲刷后退、凸岸淤长,河槽形态逐渐向蜿蜒状演替.

(2) 河槽形态的正弦曲线特征:上段河槽处在正弦曲线的进水口处,中、下段的弯道河槽处均位于正弦曲线的波峰和波谷位置,随历时增加,正弦拟合曲线的振幅和方向角逐渐变大,河槽的弯曲系数在变化中趋于稳定.

(3) 河槽断面形态的变化特征:当水流泥沙从进入浅水层后,河槽断面形态在堆积体表面的变化规律呈现出不停摆动现象,且在摆动中不断淤积抬高,局部河床出现冲刷作用大于淤积的变化状态,河槽断面整体上以宽浅状为主.

(4) 泥沙运动形式和河床边界条件是河槽形态演替变化的两个重要影响因素.

参考文献

- 1 Chien N, Zhang R, Zhou Z D. Fluvial Processes Study (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987 [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987]

- 2 Tang R C. Experimental study on the bed-forming and preliminary analysis meandering reach formation (in Chinese). *Yangtze River*, 1964, (2): 13–21 [唐日长. 蜿蜒性河段成因的初步分析和造床试验研究. 人民长江, 1964, (2): 13–21]
- 3 Jin D S. An experimental study of the influence of boundary conditions on meandering development with process response model (in Chinese). *Geogr Res*, 1986, (5): 12–21 [金德生. 边界条件对曲流发育影响的过程响应模型实验研究. 地理研究, 1986, (5): 12–21]
- 4 Yin X L. The preliminary study on meandering river formation and bed-forming experimental (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1965, 31: 287–303 [尹学良. 弯曲型河流形成原因及造床试验初步研究. 地理学报, 1965, 31: 287–303]
- 5 Ni J R. Experimental Study on the Causes of River Pattern in Different Boundary Condition (in Chinese). Beijing: Peking University, 1989 [倪晋仁. 不同边界条件下河型成因的试验研究. 北京: 清华大学, 1989]
- 6 Friedkin J F, Tyler M C. A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers. Vicbburg: U. S. Waterways Experiment Station, 1945
- 7 Federici B, Paola C. Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments. *Water Resour Res*, 2003, 39: ESG3-1–ESG3-15
- 8 Zhang H W, Zhao L J, Cao F S. Study on the causes of wandering river and pattern transformation problem (in Chinese). *Yellow River*, 1996, (10): 11–15 [张红武, 赵连军, 曹丰生. 游荡河型成因及其河型转化问题的研究. 人民黄河, 1996, (10): 11–15]
- 9 Ashmore P E. Bed load transport in braided gravel-bed stream models. *Earth Surf Proc Land*, 1988, 13: 677–695
- 10 Ashmore P E. Channel morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams. *Geogr Ann A*, 1991, 73: 37–52
- 11 Xu D. A study on the dynamic process of meandering rivers (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Tianjin: Tianjin University, 2008 [许栋. 蜿蜒河流演变动力过程的研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2008]
- 12 Smith C E. Modeling high sinuosity meanders in a small flume. *Geomorphology*, 1998, 25: 19–30
- 13 Luchi R, Zolezzi G, Tubino M. Modelling mid-channel bars in meandering channels. *Earth Surf Proc Land*, 2010, 35: 902–917
- 14 Dulal K P, Shimizu Y. Experimental simulation of meandering in clay mixed sediments. *J Hydro-Environ Res*, 2010, 4: 329–343
- 15 Schumm S A. Patterns of alluvial rivers. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2003, 13: 5–27
- 16 Parker G. Self formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part1: The sand-silt river. *J Fluid Mech*, 1978, 89: 109–125
- 17 Parker G. Self formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part2: The gravel river. *J Fluid Mech*, 1978, 89: 127–146
- 18 Chen L, Zhang J Y, Xie B L. Experimental study on development of river pattern in the process of river reformation (in Chinese). *J Hydraul Eng-ASCE*, 2003, (7): 42–51 [陈立, 张俊勇, 谢葆玲. 河流再造床过程中河型变化的实验研究. 水利学报, 2003, (7): 42–51]
- 19 Liu F. The preliminary experimental study on the processes of water and sediment bed-forming (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2014 [刘飞. 水流泥沙造床过程的初步试验研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2014]
- 20 Liu F, Zhang X F, Luo P A. Experimental study on the formation and development of river channel with water and sediment transport in initial plain (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2013, 44: 379–387 [刘飞, 张小峰, 罗平安. 水流泥沙进入平原初期河槽形成发展规律的试验研究. 水利学报, 2013, 44: 379–387]
- 21 Liu F, Zhang X F, Deng A J. The formation and development process of inland river delta deposition (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2015, 26: 378–387 [刘飞, 张小峰, 邓安军. 内陆河三角洲堆积体形成发展过程. 水科学进展, 2015, 26: 378–387]
- 22 Xie J H. Fluvial Process and Regulation (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 1997 [谢鉴衡. 河床演变与整治. 北京: 中国水利水电出版社, 1997]

The evolutionary changes of channel morphology in initial stage of water flow and sediment transport in shallow water

LIU Fei

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

When sediment laden flow enters the broad areas from a narrow river channel, the flow velocity declines abruptly, due to the enlarging width. As a result, the sediment silts in the region. This phenomenon occurs when the sediment laden flow enters a plain from a mountainous river, or when it flows into lakes and oceans from rivers. The former condition results in the development of an alluvial fan, while the latter leads to the formation of a delta, and then again gradually evolved into an alluvial river which by the developing process of water flow and sediment transport, and it appears various pattern along with its growth. The river pattern can divide into many types, the classics types are straight channel, meandering channel, branching channel and braided channel.

Model test is one of the most important technical means researching water flow and sediment transport and predicting riverbed evolution. At present, many scholars, domestic and overseas, excavate straight river in the foundation bed to research channel morphology changes, and do less research on non-straight river in the foundation channel morphological changes. The formation and development process of alluvial river is a continuous variation, the essay will mainly discuss the evolution change of river channel from nothing on the surface of rivers into the lake delta, under the constant coming water and sediment and constant erosion base level.

In this study, in order to study the evolutionary changes of channel morphology in initial stage of water flow and sediment transport in shallow water, non-uniform sediment was used, for a model generalization test, under the conditions of a constant inflow water and sediment, gradient, as well as an outlet base level. The sediment test results showed that the evolutionary changes of channel morphology experienced three stages. At the first stage, straight channel and branching channel were appeared alternately. At the second stage, a single micro-bend channel morphology swing development on the surface of delta deposition occurred with the branching channel of tributary shunt gradually decrease and die. At the third stage, there's mainly meandering channel occurred with the coefficient of twists become larger with the concave bank continuously scouring regressive in the micro-bend channel. Through analysis and experiment, results show that the channel morphology of the second stage and the third stage present as sine curve characteristics: the upper channel located in the inlet of the sine curve, the middle and lower of the bend channel are located in the peaks and troughs of sine curve. With time going on, the amplitude and direction of sine curve become large gradually, and the coefficient of channel tends to be stable. Finally, the evolutionary changes of channel morphology is analyzed from the bed load and boundary conditions.

This study is of great theoretical significance, and the achievements will enrich the theory of river dynamics and riverbed evolution.

sediment transport, channel morphology, evolutionary changes, generalized experiment

doi: 10.1360/N972016-00230