

边界条件对自然河流形成及演变影响机理的实验研究

杨树青^a, 白玉川^{a,b}

(天津大学 a. 河流海岸工程泥沙研究所; b. 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 运用自然模型法, 采用清水冲刷成功地塑造了室内天然小河。实验研究了不同的初始河流几何边界条件以及水流条件对河流演变的影响。研究发现流量对河流展宽幅值影响最大。水流入射角的大小与河流展宽幅度及河流弯曲度的变化没有必然的联系, 30°入射角时小河的河流展宽及弯曲度变化最明显。入射角对河流演变的作用只是短期的, 且在演变初始阶段影响较大。受初始边界条件的影响, 河流向下游演变具有滞后性及曲率变化的传递性等特点。本文最后分析了河流演变过程中的泥沙分选现象。

关键词: 河流演变; 自然模型法; 弯曲度; 入射角; 泥沙分选

中图分类号: TV147.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0001-05

Experiment on influence mechanism of boundary conditions to the formation and evolution of natural river

YANG Shuqing^a, BAI Yuchuan^{a,b}

(a. Institute for Sediment on River and Coast Engineering; b. State Key Laboratory for Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using the natural model method, an indoor natural river has been successfully portrayed with the scouring water. The experiment includes the study of the influence of different initial river geometric boundary conditions on river channel evolution process and different flow conditions. Studies reveal that flow is mostly influence to river stretcher amplitude. There are no necessary relationships among the size of the inflow angle and river's stretcher range and the changes of river bend degrees, when the inflow angle is 30°, changes of river width and curvature are the most obvious. The inflow angle affects the river evolution in a short-term and has a greater impact in the initial stage of evolution. Subjecting to initial boundary conditions, river's evolution downward is lag and transitivity of curvature changes. Finally, this paper analyzed the sediment sorting phenomena in the process of river evolution.

Key words: river evolution; natural model method; curvature; inflow angle; sorting of sediment

0 引言

弯曲河流是天然河流中最常见的河流形态。弯曲河流演变过程非常复杂, 河湾演变的实验研究对于更深入的研究演变机理以及指导河流整治都有重要的意义。一般动床模型比尺的确定都是由几个方程式推导得出的(如阻力公式、输沙能力公式等)。这样的做法有一个先决条件, 就是假定所有的公式既符合于原型的情况, 又符合模型的情况。事实上河床演变过程的问题是非常复杂的, 有时无法用公式来计算。而且冲积河流的形态、坡降、水流及泥沙条件之间存在着河相关系, 模型变率不能任意选定, 而是应该根据河相关系

的自然规律来选择。因此本文为了定性地研究河湾演变的规律, 采用自然模型法进行实验。

Friedkin^[1]早在1945年在实验室内系统地塑造了弯曲河流, 发现对于给定坡降的初始小河, 只要河岸或河底两者之一能被冲动, 河流就并不稳定于顺直河流而向弯曲形态发展。唐日长^[2](1963)利用在边滩上植草和尹学良^[3](1965)利用水中加粘土的方法成功塑造了弯曲型河流。Yang^[4](1971)提出最小能耗理论, 认为从顺直河流开始发育的河流为了用最小能量消耗输送水沙, 唯一采取的路径就是弯曲型。倪晋仁^[5](1989)通过实验研究认为, 河型发展及转化随时间遵循一定的规律。本文采用自

收稿日期: 2011-10-30; 修回日期: 2011-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979066)

作者简介: 杨树青(1986-), 女, 内蒙古丰镇人, 硕士, 主要从事河流动力学及水流泥沙的数值模拟研究。

通讯作者: 白玉川(1967-), 男, 山西神池人, 博士, 教授, 主要从事河流海岸工程泥沙研究。

然模型法研究了河流演变过程中河宽、弯曲度随时间的变化规律,鉴于在河流演变过程中水流对泥沙的分选作用十分明显,并对不同河段凹岸及凸岸泥沙粒径进行了比较,并分析了产生泥沙分选的原因。

1 实验介绍及参数选取

实验在室内实验水池(长 12 m,宽 3m,深 0.5 m)中进行(如图 1),池中铺有选定的实验沙,用于建造模型小河。沿长度方向,水池的边壁顶端固定有测桥轨道,用于来回移动测桥采集数据。根据实验条件塑造不同的初始河流,用水准仪控制河流比降,河流出口有不可冲节点作为控制基准点。另外配有表面流场粒子跟踪测速系统(PTV),用于测量流速场。管道离心泵、蓄水池和供水管道构成了本实验的水流循环系统,可通过调节离心泵上的蝶阀来控制实验所需流量大小。实验过程为清水冲刷,属推移质泥沙运动。泥沙采用均匀无粘性沙,中值粒径 $d_{50} = 0.62 \text{ mm}$ 。

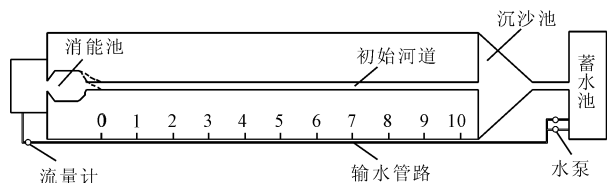


图 1 实验设备

将模型小河的控制段(取 10 m)平均分为 10 段,从 1 m 处开始计,断面间隔为 1 m,共得到 10 个断面,并用测杆标记,以它们为特征断面,进行相关的观测研究。参考 Schumm^[6]的弯曲度曲线,水流坡降与弯曲度的关系,当水流坡降在 2‰~15‰之间时稳定河型呈现弯曲状态,当弯曲度在 6‰~14‰之间弯曲形态尤为明显。因此选取五组不同的坡降、流量及初始入射角组合进行实验,以研究它们之间的关系。表 1 为不同组次实验布置情况。

在实验过程中,因本实验选用的无粘性沙抗冲能力低,所以为了保持河岸的稳定性,成功塑造出弯曲的河流形态,将初始流量调节较小,使用小流量冲刷。这是因为若初始时刻就将流量放至计算稳定状态值时将会使河流迅速展宽而影响河流蜿蜒的形成过程。同时实验过程中要始终保持水面坡降与河槽坡降相同,避免下游出现急流或者流速过大的情况而导致的水流下切作用。这种情况会带走大量泥沙,影响实验的效果。待河流自调整约 1 h 后逐渐加大流量至计算值。

R_1 、 R_2 、 R_3 初始条件为入射角 0° ,不同流量、河

宽及水深情况下的顺直初始河流的演变实验。 R_1 未能成功塑造典型的河湾形态, R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 都成功的塑造了弯曲河流形态,见表 2。 R_4 、 R_5 组实验选取了水流入射角分别为 45° 、 30° 的情况,从而讨论不同入射角对河流演变的影响。在探讨河流演变规律时,定性的描述和逻辑推理将多于定量的数学公式表达,这是河流演变分析的一大特点^[7]。

表 1 河流演变特性实验组次 ($^\circ$), cm, m^3/h , ‰, h

组次	入射角	初始宽度 B	初始深度 H	流量 Q	床面比降 J	实验历时 t
R_1	0	15	3	2.45	3	17.00
R_2	0	20	4	3.60	6	29.00
R_3	0	24	4	4.80	10	22.00
R_4	45	15	3	2.56	6	20.83
R_5	30	15	3	2.56	6	20.83

表 2 实验稳定情况 cm, m

组次	河宽均值 B'	水深均值 H'	增宽幅度 (B/B')	弯道长 L	直线长 M	曲率半径 r	河型
R_1	42	1.45	2.80	1.0	1.0	1.00	顺直
R_2	37	1.21	1.85	4.0	4.2	1.05	弯曲
R_3	42	1.20	1.75	3.8	3.88	1.02	微弯
R_4	32	1.59	2.13	3.0	3.18	1.06	弯曲
R_5	32	1.68	2.13	4.6	4.78	1.04	弯曲

2 实验过程

顺直河流的发展演化分两个过程,一为顺直河流发展演变为弯曲河流,另一个为弯曲河流的继续演变过程^[8,12-13]。通过实验看到,在第一个过程中,河流的发展变化是很缓慢的,河流先调整自身的宽度,以使河流的宽度和深度符合流量的要求。在河流调整好宽度的同时,河流的床面上会进行动平整,动平整会使河流内形成沙纹,沙纹在河流内慢慢向前推移,并最终在河流内形成交错分布的浅滩。

受浅滩的影响,水流的主流线发生变化,不再按原来的直路方向前进,而是沿浅滩的边缘蜿蜒向前;同时,水流的流动又反过来影响浅滩,从而在浅滩处,由于水流的主流线发生弯曲而产生环流作用,造成在浅滩处的凸岸淤积,在上下浅滩的衔接处发生相对的凹岸冲刷,并最终形成绝对的凹岸冲刷现象,弯曲的河流形态形成,这也是顺直型河流转化为弯曲型河流的原因,图 2 为变化过程的印记。图 3 为河流演化过程流速场,图中越偏红色,流速越大,因此可以清晰地看到,凹岸流速较大,冲刷明显。

弯曲型河流在形成之后会继续演变发展,当河流从原来的位置移开后,点沙坝沉积使得河流主河

宽基本保持不变,点沙坝沉积一般由粗沙组成,随高程的降低泥沙粒径逐渐变细。由于本实验场地有限,所以河流演变到一定程度,有两个因素制约了河流的继续演化。一是水深已经达不到演化所需要的几何水深,二是沉沙池对下游河流演化的制约作用随时间的延长而越发明显。图 4 可以清晰地看到第四组 0~10 m 河湾随时间的演变发展过程。



图 2 河流演化过程印记

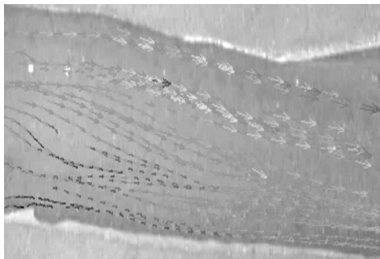


图 3 河流演化过程流速场

3 实验结果分析

3.1 河宽随时间的变化及其分析

图 5 为不同的实验组次平均河宽随时间的变化。从图中可以看出,不同组次河流的展宽幅值及展宽速率各不相同。坡降、流量及入射角对河流展宽均有一定的影响。由于 R_1 初始坡降较小,河流很容易向横向发展。 R_3 流量较大,所以对河两岸侵蚀作用强烈,故 R_1 与 R_3 展宽尤为明显。 R_4 展宽最小,比较初始水流及边界条件可知,河流展宽不同的主要原因是初始流量的不同。从展宽速率上看,在前 5 小时河流展速率较大,随着时间的推移,河流展宽速率呈下降趋势。 R_4 、 R_5 比较可知,不同的入射

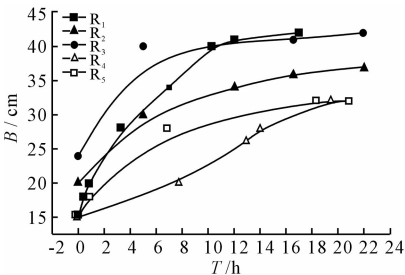


图 5 河宽随时间的变化曲线

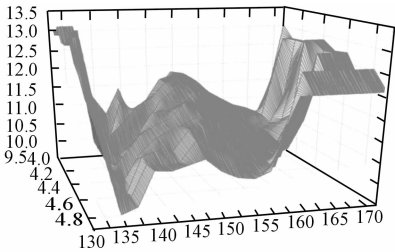


图 6 4~5 m 断面河底三维地形图

角对河流展宽也有一定的影响。但入射角与河流展宽幅度没有必然的增减关系,入射角大,只能说明水流对河岸的顶冲作用越强烈。实验发现 30° 入射角的河流展宽反而越明显。这是因为河流展宽是河流的横向演化,而入射角对河流演化的影响即体现在横向又体现在纵向,且入射角对河流的影响范围只在河流演变初始阶段作用较大,因此相比流量对河流展宽的影响来说较小。

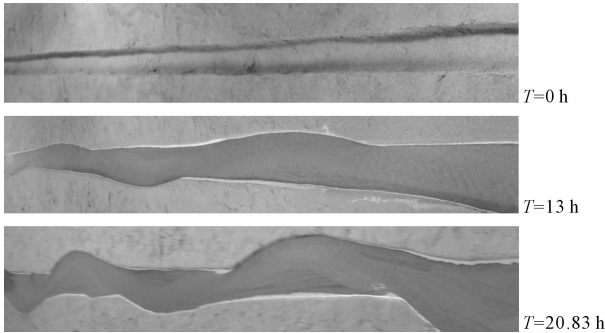


图 4 河流随时间演变过程

河流展宽速率反映了河流断面与水流条件不相协调的程度^[10]。随着时间的推移,河流展宽逐渐减弱,最后达到稳定状态。河宽、水深的逐渐趋于稳定,体现了自然河湾的自适应以及自调整能力。

图 7 为 R_5 稳定状态河岸线及河流主流线。从图中可以看出,水流动力轴线靠近凹岸,且偏向下游。实验过程中同时发现,河流主流线的位置同样也是泥沙粒径较小的位置,这主要是水流对泥沙的分选作用所致,下面小节将详细说明。

图 8 为河流左岸、右岸以及河流主流线左侧、右侧高程图,从图中可以看到主流线两侧高程呈现交替变化的规律,越靠近岸线高程越低,越到河流中心线高程越高。图 9、图 10 分别为 4、6.3 m 断面初始及最终状态横断面图。同样也证实了这一点。这主要是由于凹岸冲刷,凸岸淤积所至。

3.2 弯曲度变化规律及其分析

河湾的形成过程是水流泥沙相互作用的结果,河流几何状态与水流状态相互适应和调整的过程。

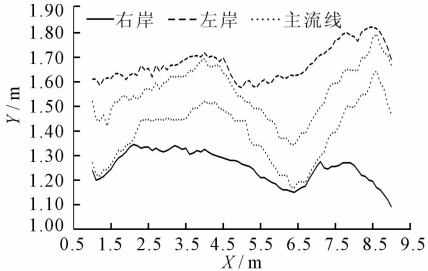


图 7 R_5 稳定状态河岸线及河流主流线

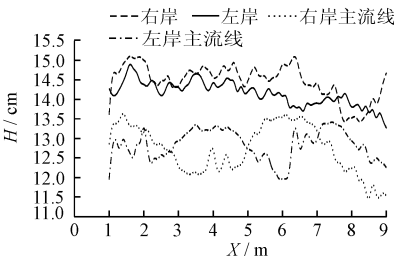


图8 R_5 河岸及河流主流线高程图

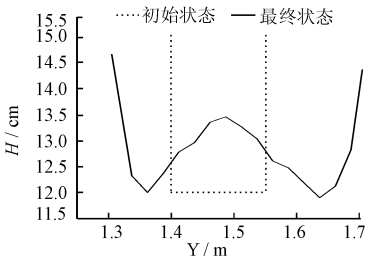


图9 4 m 横断面图

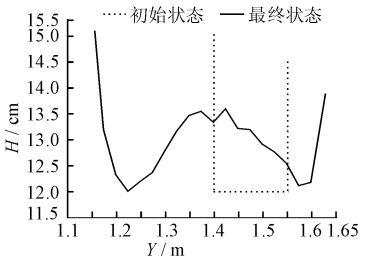


图10 6.3 m 横断面图

初始阶段河流弯曲度基本保持为1,表明河湾弯曲的波幅值极小,弯道波长 L 与河流流路长 M 基本相同。当弯道流路长达到一个稳定的值之后,河湾波幅开始出现较快增长,同时河湾整体以较快的速度向下游迁移。

图11为不同组次河流下游弯曲度的变化曲线。河流的弯曲度随时间的推移在不断的调整过程中。 R_4, R_5 为初始河宽、水深、流量及床面比降均相同,入射角不同的两组河湾。从图中看到,45°入射角水流对河流的顶冲作用较30°入射角大,河流变弯速率反而越小。假设选取入射角度为90°,可想而知,水流只产生向岸侵蚀而没有向下游方向的侵蚀,弯道主流线没有明显的弯曲,因此弯道环流作用反而很小。因此河湾的演化速率与入射角不是成比例的。

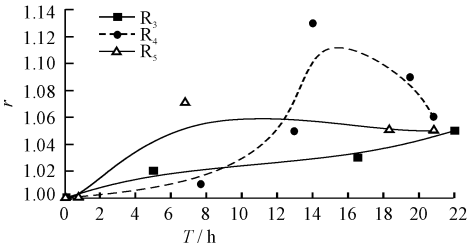


图11 河流下游弯曲度变化曲线

弯道的曲率应与河流形态及水流条件相适应,当弯道曲率过大而与两者不适应时,弯道将通过凸岸侵蚀的方式逐渐消亡,从而形成尺度更大的弯道^[10]。实验过程中,入射角45°时,水流对弯道的顶冲作用强烈,凸岸发生侵蚀,待入射角调整到30°左右时,弯道环流作用加剧,河流演变加剧。自然河湾的这种功能与随机信号处理中的滤波非常相似,称作河流的滤波功能^[11]。河流的滤波功能根源于弯道水流作用与弯道形态之间的相互适应与自调整。当弯道的曲率过大时,弯道中的水流动力轴线偏向凸岸,引起凸岸边滩的冲刷及后退,从而减小了河流的曲率。在演变的初期,入射角对水流起到了指引的作用,成为河流演变的初始约束条件。加速了河湾的形成,起到了正效应。随着演变的不断进行,河

宽、水深及输沙特性都在不断的进行调整,模型小河逐渐想要摆脱初始的约束条件,按照自身的河相关系进行演变。这样,入射角对河流弯曲度变化产生了负效应。因此从图11中可以看出,弯曲度出现了先增大后减小的不断调整的趋势。 R_3 为入射角为0°的情况,入射角对河湾初始弯曲没有约束作用,因此弯曲度不断地增大。

因上游入射角的影响,上游先开始变弯,从而影响下游,图12为 R_4 上游、下游河流弯曲度的变化曲线,可以明显的看出,河流下游演变滞后于上游。这便是河湾曲率的向上传递性。但随着演变过程的不断进行,下游河湾水流条件逐渐成熟,弯曲速率加大,下游河湾按照自身的演变机理进行演化,同时对上游起到了制约作用。最后经过长期的相互影响而达到平衡状态。因此,入射角对河湾演变的影响是短期作用,在初始时刻加速了其变化,但从长期来看,河流会按照水沙条件及河流几何条件达到自身的平衡状态。

3.3 演变过程中泥沙的分选分析

许多因素影响河流沉积物的形成及其特征,包括河流比降、构造、气候、沉积物组成、流量变化等^[14]。前1 h,由于流量较小,水流流速较小,能跃起的泥沙很细,所以大部分不能跃起的泥沙则以沙浪的形式向前推移。当加大流量,则分选作用明显,并随着河湾的演变,河流曲率的不断增大,床面泥沙表现为层状结构。这些层状结构同时也体现出了河流演变的历史沉积过程。表3为第五组实验结束后,4、6.3 m凹岸和凸岸床沙粒径级配表。

表3 床沙粒径含量分布表					mm, %
粒径	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
初始	4.9	50.9	41.8	2.0	0.4
4 m 凹岸	1.2	43.2	47.7	7.8	0.1
4 m 凸岸	2.3	67.8	28.6	1.1	0.2
6.3 m 凹岸	1.3	41.8	51.3	5.5	0.1
6.3 m 凸岸	7.3	73.2	17.8	1.4	0.3

沙质河床在清水冲刷作用下,将通过床沙与悬沙间的不等值交换发生粗化。但实验过程中并没有明显的颗粒粗化现象,只是床沙颗粒的分选及转移。所以在本次自然河流演变的过程中,基本遵循了泥沙的等值交换。随着泥沙分选作用的不断进行凸岸处床沙粒径变大,凹岸处床沙粒径变小。凸岸糙率也随之变大,对水流的阻力加大,水流的输沙能力减弱,在粗颗粒泥沙掩盖下的细粒泥沙不再被扬起参

加跃移或悬移运动。凹岸糙率随之减小,阻尼变小。这样促使水流动力轴线偏向凹岸,不断的凹岸冲刷,凸岸淤积。图13及图14分别为4、6.3 m处初始时刻及河湾稳定时刻的泥沙颗粒级配曲线。从图中可以看出,相比初始颗粒级配曲线,凹岸曲线变陡,而凸岸曲线变缓。凸岸泥沙粒径明显大于凹岸泥沙粒径。通过实验观察可以看出,细颗粒泥沙分布在河流的凹岸,且分布带与水流动力轴线分布基本一致。

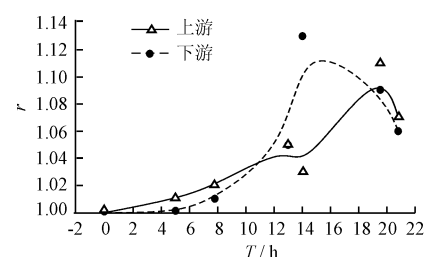


图12 R_4 上、下游河流曲度的变化曲线

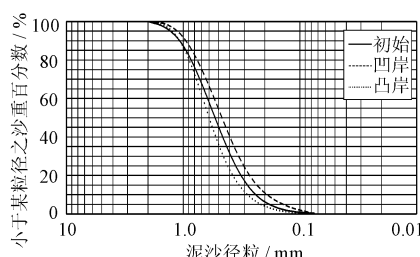


图13 R_5 4 m断面初始状及稳定状态凹岸、凸岸颗粒级配曲线

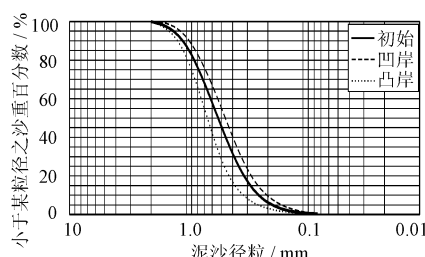


图14 R_5 6.3 m断面初始状及稳定状态凹岸、凸岸颗粒级配曲线

4 结 语

本文运用自然模型法通过合理地控制河床尺寸、流量大小、流量过程、河床组成及河床比降等因素,成功地塑造了与天然河流形态基本相似的小河。

实验得出了河湾演变过程中河宽及泥沙的运动变化规律。认为随着时间的增大,河流宽度逐渐增大,最后达到稳定状态。展宽速率呈现先增大后减小的规律。讨论了两种条件,不同初始河流几何边界条件和水流条件对河流演变过程中河流展宽及弯曲度的影响。几何边界主要是坡降及水流入射角,水流条件主要是流量条件。认为流量对河流展宽幅值影响最大,水流入射角与河流展宽幅度及河流弯曲度变化没有必然的增减关系,30°入射角时河流展宽及弯曲度变化最为强烈。入射角对河流演变只是短期作用,在演变初始阶段影响较大。受初始条件的影响,河流向下游演变具有滞后性及河湾曲率变化的传递性等特点。

实验分析了河流演变过程中的泥沙分选现象。随着凹岸的冲刷及凸岸的淤积,粗颗粒泥沙逐渐淤积到凸岸,细颗粒泥沙则随水流主流线不断向前运动,凹岸泥沙逐渐变细。且细颗粒分布带与水流动力轴线分布基本一致。在天然河流上修建水库后,下游河流将因遭受清水冲刷而发生一系列变化,明显的变化之一就是河床组成颗粒的分选。因此,研究河流演变过程中的泥沙分选问题对于预报河流演变趋势及提出河流整治方案有重要的实践指导意义。

参考文献:

- [1] Friedkin J F. A laboratory study of the meandering of alluvial river [R]. United States Waterways Experiment Station, 1945.
- [2] 唐日长. 蜿蜒性河段成因的初步分析和造床实验研究[J]. 地理学报, 1963, 29(2): 13-21.
- [3] 尹学良. 弯曲性河流形成的原因及造床实验的初步研究[J]. 地理学报, 1965, 31(4): 287-303.
- [4] Yang C T. On river meanders [J]. Journal of hydrology, 1971, 13(3): 231-253.
- [5] 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.
- [6] Schumm S A. Experimental study of channel patterns[J]. Geological Society of America Bulletin, 1972, 83: 1755-1770.
- [7] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪, 等. 河流动力学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007.
- [8] 钱宁. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社, 1987: 375-385.
- [9] 许栋, 白玉川. 蜿蜒河流横向摆动及河谷地形沉积过程数值模拟[J]. 泥沙研究, 2010(4): 73-80.
- [10] 许栋, 白玉川, 谭艳. 正弦派生曲线弯道中水沙运动特性动床试验[J]. 天津大学学报, 2010, 43(9): 762-770.
- [11] 沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京:科学出版社, 1986.
- [12] 许炯心. 边界条件在河型形成中的作用. 地理集刊第16号[M]. 北京:科学出版社, 1985: 25-37.
- [13] 倪晋仁, 王随继. 论顺直河流[J]. 水利学报, 2002, 33(12): 14-20.
- [14] 王随继, 倪晋仁, 王光谦. 河流沉积学研究进展及发展趋势[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(4): 362-369.