

# 河流演变规律的实验研究

李思维, 乔富斌

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 通过自然模型实验的方法, 借助模型小河模拟了自然界中顺直河道洪水情况的演变和正常情况下河流弯曲与分叉的演变过程, 针对自然河流的形态特征, 弯道的形成条件以及河湾的演变趋势进行了研究。实验再现了自然河流的演变过程, 通过数据分析得到了自然河流的演变规律。

**关键词:** 河流演变; 弯曲河流; 分叉河流; 模型实验

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0132-05

## Experiment on law of river evolution

LI Siwei, QIAO Fubin

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The evolution of straight rivers in the flood situation and the evolution of meandering rivers and the bifurcated rivers in nature situation were simulated in this article by the natural model test method. The morphological characteristics of the natural river, the conditions of curve forming and the evolution trend of bend were also studied. The process of the evolution of the natural river was observed directly. Through data analysis, the evolution laws of the natural river were also obtained.

**Key words:** river evolution; meandering rivers; braided rivers; model experiments

## 0 引言

河流演变是指河流在自然情况下或在受人工建筑物干扰时所发生的变化。这种变化是水流和河床的相互作用的结果<sup>[1]</sup>。天然河流最初都是由顺直河道演变发展而来的。平面河流经过水流泥沙的交互运动, 引起河床的演变及岸滩的冲淤变形进而引起河道的变化。平原河流中根据其形态和演变特性可分为弯曲河道、分叉河道、顺直(微弯)河道和游荡河道4种主要类型, 各种类型的河道有着各自的特点和演变规律。中外的很多学者都对河流的演变过程进行过研究。Tiffany和Friedkin<sup>[2]</sup>两位学者分别于1939年和1942年建立了模型小河道, 可以说是对此问题的最早研究。但由于他们的实验历时时间短、分析简单, 尚不能说明河床已达稳定。此后, 我国的学者对此问题也做了一系列的研究, 包括20世纪60年代的唐日长<sup>[3]</sup>和尹学良<sup>[4]</sup>, 20世纪80年代中后期的洪笑天等<sup>[5]</sup>, 王平义等<sup>[6]</sup>。而他们所做的工作主要是针对弯曲型河道, 这主要是因为弯曲型河道在自然界中分布最为广泛。

4种类型的河流在自然界中都存在, 并且每一

种类型的河流都有其独特的形成过程和演变规律。为了更直观的了解自然界河流的演变的过程, 本文主要通过实验模拟了顺直河道在不同流量和河宽的条件下的弯曲演变以及分叉或者游荡的演变过程。

## 1 实验内容及实验现象描述

### 1.1 实验内容

本次实验的主要研究内容有: 自然河流的形态特征和弯道的形成条件; 弯道的演变趋势和过程; 分叉河道的发展和消亡。

该次实验在室内进行。实验水池底部为水泥地面, 上铺放厚度为20 cm的模型沙。水池的尺寸为长1500 cm, 宽300 cm, 深50 cm。水池最前端设有消能池, 尾部设有沉沙池, 沉沙池之后是蓄水池。蓄水池内设有潜水泵, 用于在实验时将水流输送到水池前端, 经消能池消能后进入河道入口。在河道的一侧取10个特征断面, 由上游到下游依次标记为1、2至10, 间距为100 cm。整个装置如图1所示。

实验初始河槽在实验开始之前由人工塑造, 位于水池中央, 为矩形断面。实验用水采用自来水, 循环过程中水流含沙量较小, 因而可以看作是清水造

收稿日期: 2012-08-25; 修回日期: 2012-09-30

作者简介: 李思维(1987-), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事河流动力学方面的研究。

床实验,即水流中不含床沙质,河道是松散砂体在水流冲刷下自由发展的结果。每次实验开始,启动水泵使水流缓慢增大到控制流量,流量由智能电磁流量计读出。当床面出现明显变化时在待测的各个断面处测出水深以及断面的形状。当河道相对稳定后关闭水泵,并在水流停止一段时间后测量整个地形。3 组实验的实验参数如表 1。

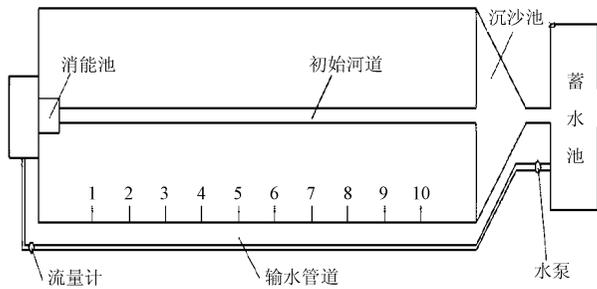


图 1 实验装置

表 1 实验参数 %e, cm, m<sup>3</sup>/h, h

实验组次	RUN1	RUN2	RUN3
初始比降 J	8	8	8
初始河深	4	4	5
初始河宽	30	15	15
设计流量	2.3	2.24	3.56
实验历时	24	30	30

### 1.2 实验现象描述

第一组实验中,水流集中,槽内流速很大,初期水面具有沙文结构。随着时间的增长,河槽两岸不断坍塌展宽,呈现不规则锯齿状。当冲刷至 10 h 时河床未有明显的弯曲摆动。在 24 h 之后,河面相对稳定,展宽与底床形态不再变化,平面形态上无明显摆动与弯曲现象,只在上游部分有不明显的弯曲。同时上游底沙在水流的作用下逐渐形成大的淤积体,使整个河槽底坡调整到一个与流量对应的坡度。

第二组实验在起始端预设一定的河湾。水流进入河槽后水流动力轴线发生弯曲,岸壁的崩塌和淤积在下游形成了连续的河湾。由于凹岸崩退的速度与凸岸淤进的速度并不相同,使得河流在平面上发生摆动,河宽发生变化。下游先出现边滩,随后上游出现边滩,终至全河上下都出现一系列排列整齐的边滩。于此同时,随着时间的延续,弯道不断发展,河流弯曲程度加大,浅滩逐渐发展。随后发生边滩切割,形成新汉道,出现心滩和江心洲,原来的河道变为分汊河道。部分地区河流的切割作用较为强烈,出现了裁弯取直现象。最终河床趋于稳定,河宽加大,河底壅高,水深变浅,流速减小。

第三组实验与第二组实验过程基本类似,但由于控制流量较大,流速较大,在调整河槽的过程中更为迅速。实验开始后观察到岸线逐渐变得犬牙交错,主流左右弯曲,河床深泓线呈波浪起伏。随着水流的进一步冲刷,在河道下游出现心滩,心滩出露成为江心洲,形成分汊河道。随着时间的发展,某一支汊逐渐淤塞消亡,另外一支汊继续发展成较稳定的弯道。

## 2 数据结果分析

### 2.1 河道坡降的变化

3 组实验稳定后的坡降均在原基础上有所减小,其中第一组实验变化较大,第二、三组实验的变化在一定的范围内。这是因为,第一组实验中,河槽较宽,给定的流量较大,水流大而急,底床泥沙几乎都可以启动,两岸崩退迅速,水中的泥沙冲击较快,相当于在自然界中的洪水发生。水流将大量的泥沙挟带到下游,从而降低了上游的高程,而加大了下游的高程,这样就使坡度发生了特别明显的减小。而第二、三组实验河宽较窄,流量较小,流速相对平缓,能够对河床进行较为细微的塑造,相当于自然河流的一般情形下的演变。这在图中表现特别显著。

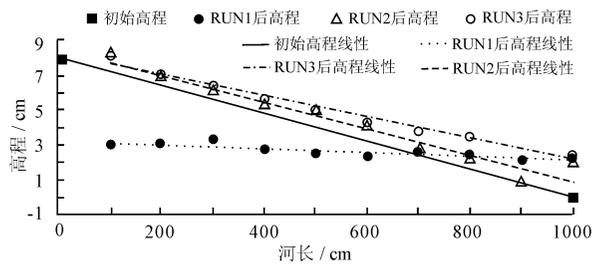


图 2 三组实验坡度拟合图

同时,从图 2 中可以看出,河道坡降在局部地区并不均匀,表现为在河道的起始端和出水口段的坡降较大,在中间段表现的比较平缓。这是因为在清水进入河槽之后,开始冲刷底槽,泥沙以推移质的形式向下游移动,但是上游没有持续的泥沙补给,才会导致上游河段的河床明显降低,坡降较大。在出水口段,由于水泵在输水过程中,水流从出水口处进入到蓄水池,存在较大的水位差,使得下游段输沙较为强烈,冲刷严重,所以坡降比中间段的更大。

对比 3 组实验可以看出,对于平原河流,当水流量越大的时候,对于坡降的改变就越明显。而当发生相当于洪水的流量时,对河槽底床坡降的塑造更为显著。当坡降降低后,水流的流速也会降低,挟沙能力也会减小,从而延缓河流继续淤积的速度。这是河流自身的调整作用,使得其向着协调的方向发展。

### 2.2 河道展宽的变化

随着底床形态的变化,河宽也不断变化。本文针对第二组实验的河道展宽变化进行研究,河道展宽取不同时刻各个特征断面处河宽的平均数。不同时刻下的河宽的沿程变化以及最终变化见图3。

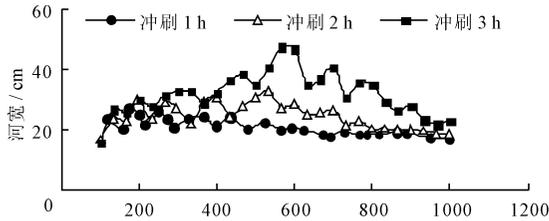


图3 不同时刻下河宽沿程变化

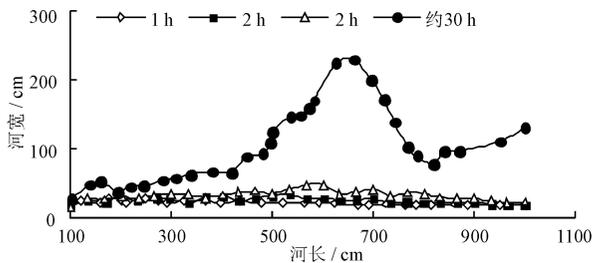


图4 最终河宽沿程变化图

分析图4可知,河道总体上是随着时间逐渐展宽的,展宽的幅度以中游幅度最大,在不同的河段,河面有所收缩,可能是由于弯曲的形成,一部分泥沙淤积,导致河岸的收窄。经历足够长的时间之后,河道发生弯道的裁弯取直,边滩切割等一系列现象,河道宽度都会增大。

另外中游部分发生的河道展宽过于大,有可能是局部的其他因素导致的。比如一侧岸线较低,水流漫滩之后发生的冲刷与切割,形成了新的河槽,从而使河道展宽幅度很大。

### 2.3 河道的平面摆动

第一组实验宽深比较大,在较大流量冲击之下,河道迅速展宽,只出现了微弱的弯曲,基本可忽略其弯曲程度。

第二组实验平面地形摆动情况如图5。

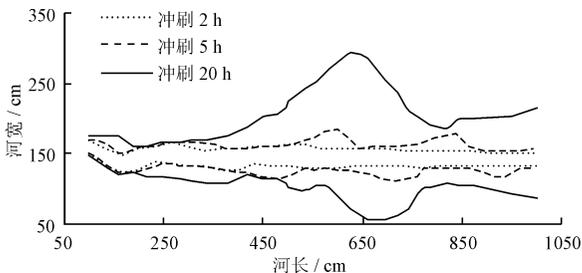


图5 岸线总体变化示意图

由图5中可以看出,在第二组实验中,由于在起

始端有弯曲段存在,水流进入河槽之后,水动力轴线发生偏移,使得一侧岸线不断后退,形成凹岸,另外一侧则淤积前进,称为凸岸。在沙洲形成之后,会有切滩现象出现,在岸线处形成较为尖锐的河段。在该河段处,随着切滩的进一步进行,边滩的一侧逐渐形成了河槽,这样子,河道就被分为两部分,形成了分汊河道。分汊河道形成之后,随着进一步的冲刷,还会继续上述过程,凹岸后退,凸岸淤积,形成边滩,心滩以及江心洲等,形成分汊河道。

第三组实验冲刷5h和13h后岸线形态以及深泓线分布见图6。

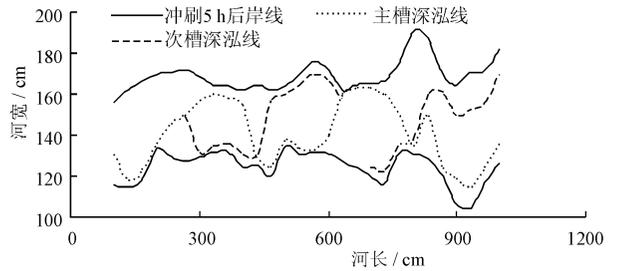


图6 第三组实验冲刷5h岸线及深泓线示意图

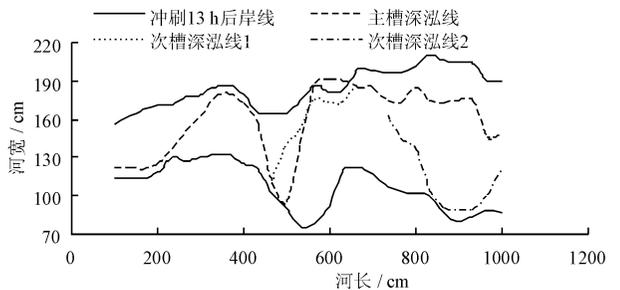


图7 第三组实验冲刷13h岸线及深泓线示意图

由图7中可以看到,河流会随着时间的发展发生较为显著的摆动,而且河流沿程的展宽变化差异也很大。比较不同时刻河流的展宽情况,发现河流在下游部分展宽最为明显。河流在整体上都是展宽的,但是在局部有相对收窄的趋势。

分析图7岸线的变化情况还能看到,在河流给定初始弯段的条件下,一般河流在演变过程中,首先会出现河湾。河湾的凹岸一侧则形成单河槽的深槽,在凸岸的一侧则会淤积形成边滩。从图中可以看到,冲刷5h,岸线出现的是较为规则的弯曲,波长约为2.5~3m水动力轴线也是较为光滑的正弦曲线形式。冲刷13h后,岸线上游部分河段(4~6m)弯曲度越来越大,展宽幅度也较大,在河段中心形成了江心洲等。在这里水动力轴线发生散乱,形成了分汊型的河道。当河湾弯曲度达到一定的程度时,会出现裁弯取直现象,原来弯道则成为支汊,随着时间发展,会淤死成为小型的牛轭湖。在下游

部分,比较不同时刻的岸线及深泓线的摆动情况,可以看到弯曲河道的深泓线是比较规则的,而散乱的水动力轴线是因为该段地形复杂,形成了分汊河道,出现不同的河槽,所以导致该部分的水流形态也相当复杂。

### 2.4 河道断面地形的变化

由于在大流量冲刷下,顺直河道主要是出现较大展宽,而断面地形变化不大,所以本文主要讨论第二和第三组实验的河道断面变化。第二组实验中各特征断面稳定后的地形示意图如图 8 所示。

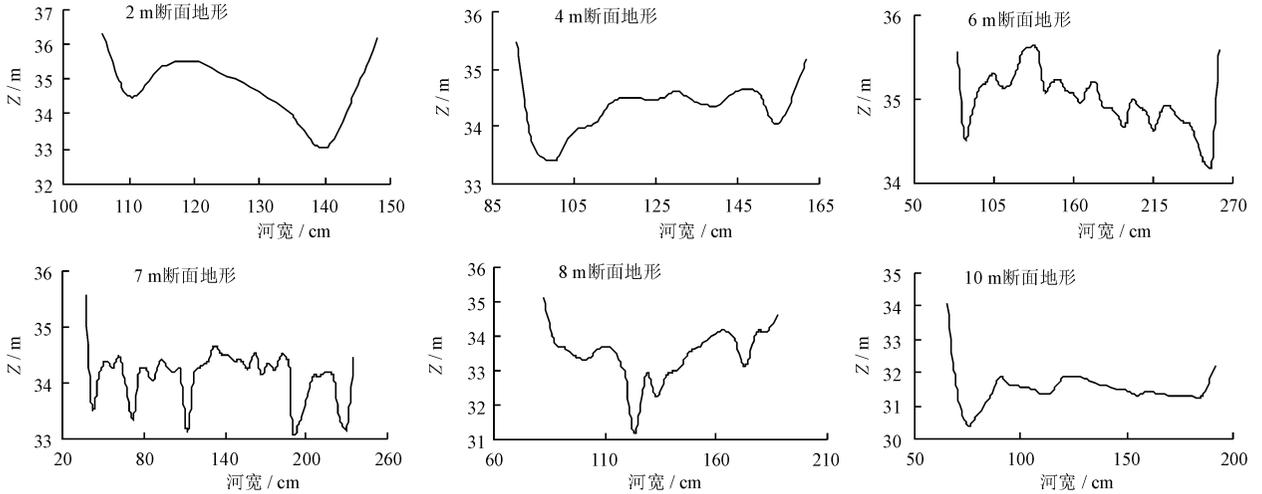


图 8 第二组实验各特征断面稳定后的地形示意图

通过图 8 可以看出,在 4 m 断面处有 3 个深槽,说明已经形成了分汊河道。在 6、8 m 断面处,地形很复杂,床面散乱,有沙纹、沙坡发育,导致床面层次不齐,这是因为该河槽形成了河湾,在弯道环流的作用下,在泥沙横向输移的过程中,会对泥沙粒径有较明显的分选作用,不同粒径的沙粒堆积在不同的地方,使河床表面高低不平,层次不齐。在河床中间部

位甚至形成沙洲出露于水面。

同时,对比河床的展宽程度,也可以看到,下游的河床展宽幅度较大,下游底床相对平坦,地形变化也较为简单,有一些心滩的发育,随着时间的发展,可能进一步发展为江心洲。

第三组实验特征断面地形变化如图 9 所示。

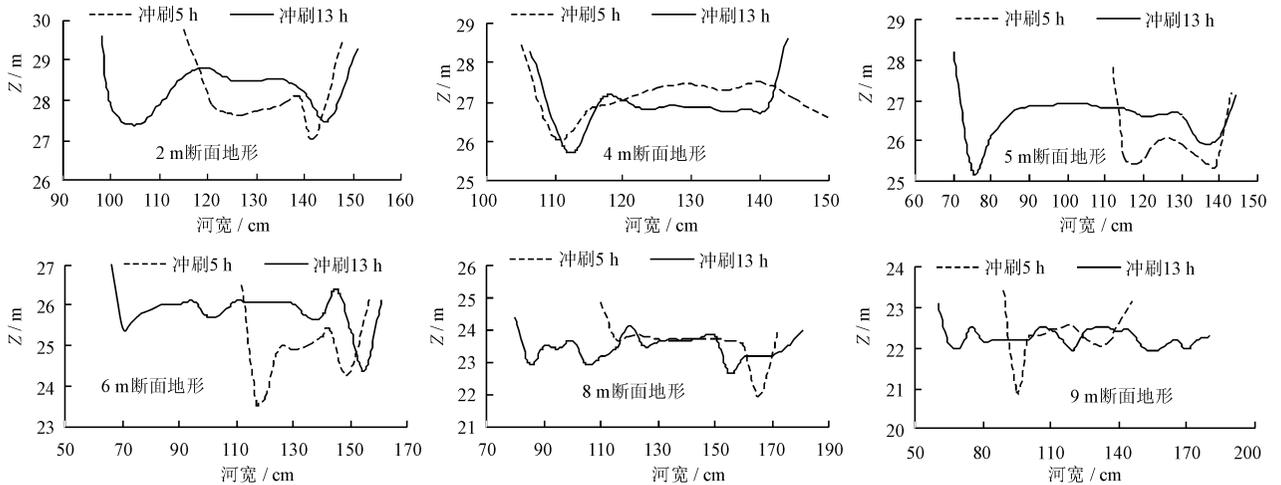


图 9 第三组实验各特征断面地形示意图

第三组实验中,对比不同时刻的断面地形,可以观察到展宽由上游到下游先增后减的趋势。上游河段的河槽展宽以后,河槽的基本形式和原来的断面形式类似,岸边有两深槽,展宽后深槽发展更深,更明显,中间部位有可能出露形成浅滩。

在中下游部分,河槽内地形较为散乱,由于边滩、心滩、沙坡等复杂地形的影响,部分河床上形成滩出露于水面,将河身切割。而且由于河流动力轴线的反复变化,会在河床上形成不同的分汊河道,分汊河道的此消彼长,用进废退的持续变化,使得地形

高低不平。对比不同时刻不同断面的图像,可以看到下游的断面变化的趋势是向平坦的方向发展。而且由于纵向输沙的不平衡,在下游堆积了很多泥沙,使得下游河槽断面的高程有所提升。

另外,由于河面变宽,河槽的深度变浅,其宽深比越来越大,越来越不利于输沙,所以也导致了随着时间的发展,河床的变形速率会逐渐减慢,并趋向一个相对稳定的状态。

### 3 结 语

在自然界中,随着水流的流动,河流底面坡降呈减小的趋势,并最终达到一个与该流域来水来沙条件相适应的平衡状态,达到平衡的速度取决于该流域的水流流量以及泥沙的特性。清水作用下河宽调整是一个由快到慢的过程。在水流作用初期,由于冲刷剧烈,河道宽度增加较快,到后期,由于河道逐渐达到平衡状态,河道宽度的变化较为缓慢。伴随着水动力轴线的变化,河流出现弯曲,形成连续的河湾并出现边滩。弯道不断发展进而发展出浅滩,继而发生边滩切割,形成汉道、心滩和江心洲,同时发生裁弯取直等一系列现象。分汊河道形成后,某一支汊逐渐淤塞消亡,另外一支汊继续发展成较稳定的弯道,继续进行下一轮的河流演变。

整个河流演变是一个周而复使的过程,内在的机制就是河床与水流的相互依存和相互制约,使河流不断处于运动和发展之中,并且总是向着趋于稳定与平衡的方向发展。正确的认识和了解河流演变的过程与规律有利于人们更好的治理与利用河流资源。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Friedkin J F. A laboratory study of the meandering of alluvial river[R]. US Water Exp Sta, 1945:225-271.
- [3] 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,1963,18(2):13-21.
- [4] 尹学良. 弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J]. 地理科学,1965(4):287-303.
- [5] 洪笑天,马绍嘉,郭庆伍. 弯曲河流形成条件的实验研究[J]. 地理科学,1987,7(1):35-43.
- [6] 王平义,文岑. 冲积河湾蠕动过程的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2001,16(3):312-318.
- [7] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 武汉:水利水电出版社,1998.
- [8] 丁君孙. 分汊河段若干问题的探讨[J]. 泥沙研究,1982(4):39-51.
- [9] Howard A D. A simulation model of stream structure[J]. Geological Society of America Bulletin,1971,82(5):1355-1375.
- [10] 倪晋仁,王遂继. 论顺直河流[J]. 水利学报,2000,31(12):14-20.
- [11] 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.
- [12] 李昌华,金德春. 河工模型实验[M]. 北京:人民交通出版社,1981.
- [13] 倪晋仁,马葛乃. 河流动力地貌学[M]. 北京:北京大学出版社,1998.
- [14] 尹学良. 弯曲型河流形成原因及造床实验初步研究[J]. 地理学报,1995,50(4):287-303.
- [15] 王随继. 两类多河道河流的形成模式及河道稳定性比较[J]. 地理学报,2002,57(1):89-93.
- [16] 倪晋仁,张仁. 弯曲河型与稳定江心洲河型的关系[J]. 地理学报,1991,46(2):68-75.
- [17] Ackers P, Charlton F G. The geometry of small meandering streams[C]//. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement,1970:289-317.
- [18] Yang C. Potential energy and stream morphology[C]//. Water Resources Research, 1971,7:311-322.
- [19] Leopold L B, Wolman M G. River channel patterns: braided, meandering and straight[J]. US Geological Survey Professional Paper, 1957,282:85-103.
- [20] Chang H. Minimum stream energy and channel patterns[J]. Journal of Hydrology, 1979,41:303-327.
- [21] Ferguson R I. The threshold between meandering and braiding[J]. Channels and Channel Control Structures, 1984,6:15-29.
- [22] Ferguson R I. Hydraulic and sedimentary controls of channel patterns, in Richards[C]//. River Channels: Environment and Processes, Blackwell, Oxford, 1987:129-158.
- [23] 姚冠荣,高全洲. 河流碳输移与陆地侵蚀——沉积过程关系的研究进展[J]. 水科学进展,2007,18(1):133-139.
- [24] 王兆印,吴永胜,刘芳. 水流移床力及河道运动学力的初步探讨[J]. 水利学报,2002,33(3):6-11.