

# 河道调整研究现状及其对黄河下游 游荡型河道调整的启示

李军华<sup>1</sup>, 许琳娟<sup>1</sup>, 张向萍<sup>1,2</sup>, 江恩慧<sup>1</sup>

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003;  
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**系统梳理了河道调整研究现状,全面论述了与冲积河流调整相关的河相关系、不同边界下河道调整过程、冲积河流线性理论的研究现状及发展动态。新形势下黄河下游游荡型河道调整应重点研究水沙变化与有限控制边界对河道调整的耦合效应、河道断面自调整数理分析中断面形态假定、有限控制边界条件下游荡型河流主槽摆动幅度和频率等问题,这不仅有助于加深对游荡型河道河床演变规律的认识,而且对于河道调整趋势预测、河道整治等具有重要的理论意义。

**关键词:**河道调整;游荡型河道;有限控制边界;人工约束;线性理论;黄河下游

**中图分类号:**TV143      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2021)04-0001-06

**Current research status of river regulation and its enlightenment to wandering river regulation in the lower reaches of the Yellow River**//LI Junhua<sup>1</sup>, XU Linjuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiangping<sup>1,2</sup>, JIANG Enhui<sup>1</sup> (1. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Yellow River Institute of Hydraulic Research, MWR, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** By systematically reviewing the current research of river regulation, the research situation and development tendency on the issue of hydraulic geometry related to alluvial river adjustment, channel adjustment process under different boundaries and the alluvial river linear theories were comprehensively discussed. The following problems should be focused on in the adjustment of wandering channel in lower reaches of Yellow River under new situation, including the coupling effect of flow and sediment change and limited control boundary on river regulation, the section shape assumption in the mathematical analysis of channel section self-adjustment, and the main channel oscillating amplitude and its frequency on the wandering river under partly controlled boundaries. Further study on these issues is not only helpful to deepen the understanding of wandering river fluvial process, but also has significant theoretical and practical values in prediction of river channel adjustment trend and river regulation.

**Key words:** river regulation; wandering river; partly controlled boundaries; artificial constraints; linear theory; the lower reaches of the Yellow River

游荡型河流是天然河流中常见的河型之一,广泛存在于世界各地,具有独特的地貌特征。黄河孟津至高村长299 km的河道属于典型的游荡型河段,该河段河床宽浅、水流散乱、沙洲密布、冲淤变化迅速,加之处于华北平原,滩区与两岸人口密集,防洪压力巨大<sup>[1]</sup>。随着黄河流域水沙变化以及黄河下游河道治理的逐步推进,下游游荡型河道受到的水沙和边界条件均发生了显著变化,其河道治理也面临着新的形势。具体表现为:一是流域水沙锐减,潼关水文站实测年平均水量和年平均沙量由1919—

1959年的426.10亿m<sup>3</sup>和15.92亿t分别减少到1987—2019年的251.19亿m<sup>3</sup>和4.74亿t,分别减少了41%和70%;二是现有河道边界已由天然河道逐步成为有限控制的约束边界,由于河道整治工程的逐步建设,河道边界已演化为由抗冲性弱的天然土质边界与抗冲性强的工程边界共同构成,这种边界作用下河道调整规律与天然河道及渠化河道均有所不同;三是河道整治工程与水沙过程不匹配,黄河下游游荡型河道整治工程的设计流量为4000 m<sup>3</sup>/s、含沙量为30 kg/m<sup>3</sup>,而小浪底水库投入运用后,黄河

基金项目:国家自然科学基金(42041006,42041004);国家重点研发计划(2018YFC0407403);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2018-03,HKY-JBYW-2020-15)

作者简介:李军华(1979—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事河流泥沙与河道整治研究。E-mail: ljhyym@126.com

通信作者:江恩慧(1963—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事河流泥沙研究。E-mail: ehjiang@yrihr.com.cn

下游长期缺少  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  以上的大流量过程,而低含沙小流量过程年均持续时间却长达  $340\text{ d}$  以上,与整治工程设计标准差异很大。

河道的调整与来水来沙以及河道边界条件关系密切。新形势下水沙条件的改变以及有限控制边界条件的约束,增加了游荡型河道河势演变的复杂性和不确定性,如主流大幅度摆动、滩地坍塌、畸形河势、工程脱河等现象时有发生,同时游荡性河段滩地坍塌、泥沙大量恢复,减少了水库拦沙对艾山以下窄河段的减淤效果,增加了防洪压力。

对于黄河长期清水小水、前期工程约束共同作用下游荡性河段河势演变问题,目前对于其调整机理与过程的认识主要还是以经验统计为主,对河道调整过程的物理解释与调整结果缺乏准确的预测<sup>[2]</sup>。本文在梳理国内外河道调整研究现状的基础上,对于新形势下黄河下游游荡型河道调整应重点开展研究的问题作一探讨。

## 1 河道调整研究现状

冲积河道调整的结果是力求塑造一定的河道断面形态,使来自上游的水量和沙量能通过下游河段下泄,河道保持一定的输沙平衡<sup>[3]</sup>。通常采用河宽、水深、比降、弯曲度等因子确定河道断面形态,河床演变过程中这些因子有时共同调整,有时单个或几个因子发生调整,使得河流在不同地域展现出不同的平衡河道形态;在河道调整过程中,水流作用于河床,使河道发生变化,河道变化又反过来影响水流结构,它们相互影响、相互制约,一直处于变化发展过程中<sup>[4]</sup>。因此,河道调整过程是多因素交织耦合的复杂过程。目前关于河道调整及过程的研究,多集中于河相关系、不同边界条件下河道调整过程、冲积河流线性理论等相关内容。

### 1.1 河相关系的研究

河相关系是指冲积河道通过自动调整作用达到平衡时,其纵剖面、断面形态与流域因素之间的某种定量关系。利用河相关系开展河道调整规律研究已有近百年的历史。早期的研究多采用经验统计法<sup>[5-7]</sup>,近期河相关系理论研究可以归结为探索第四个封闭方程的问题。河相关系模型中有 4 个未知数(河宽、水深、流速和比降),但只有 3 个方程,即水流连续方程、水流运动方程和输沙方程,导致了方程组不封闭,寻求额外的独立方程成了河相关系理论研究的切入点。众多研究方法可以分为两类:一类是以稳定性理论为基础的方法,以 Parker 等<sup>[8-9]</sup>的研究为代表,其方法是将河床边界划分为许多微小单元,然后对这些微小单元的剪切力与单元形态之

间的相互作用进行受力平衡分析,再对这些宏观形态效应进行积分求解;另一类是基于极值假说的方法,即通过引入一个极值假说作为第四个独立方程,与水流连续方程、水流运动方程和输沙方程闭合求解,这一假说主要有水流功率最小、最小能耗率、水流能耗率极值假说、最大熵原理、仙农熵等,以 Chang<sup>[10]</sup>、徐国宾等<sup>[11-13]</sup>、倪晋仁等<sup>[14]</sup>、黄才安等<sup>[15]</sup>、Bonakdari 等<sup>[16]</sup>、拾兵等<sup>[17]</sup>研究为代表。稳定性理论和极值假说的引入有助于从理论上探讨河相关系第四个封闭方程并为之提供清晰的物理意义,直接或间接反映了河床与河岸抗冲性的相对关系;但是,稳定性理论求解过程极为复杂,仅能对特定地点的河流平衡断面形态进行求解;极值假说求解过程直观简单,必要时可借助计算机迭代计算进行求解,但其缺点是难以准确地直接推导出令人信服的极值假说的物理表达式。

此外,我国许多学者还基于黄河、长江等河流实测资料,分析了河相关系的调整规律。如,胡春宏等<sup>[18]</sup>通过研究黄河下游不同洪水的冲淤规律,发现河相系数是涨水增大、落水减小;潘贤娣等<sup>[19-20]</sup>通过分析大量原型资料发现河相关系的变化与各河段河槽和河岸控制条件密切相关;陈立等<sup>[21]</sup>对丹江口和三峡工程下游河道断面调整的研究结果也支持了这一结论。围绕河相系数开展的研究更多侧重于河道几何形态的调整结果,而缺乏河道调整过程与机理的研究。

### 1.2 不同边界条件下河道调整过程研究

河道边界是河床演变塑造出的结果,同时又反作用于水流影响河床演变;天然河流不同河岸的抗冲性本身存在着一定的差异,加之人为修建河道工程使得边界约束更多,致使河道调整过程更为复杂。由于河道边界调整过程的复杂性以及原型观测资料的限制,众多学者大多通过自然模型或概化试验开展不同边界条件下河道调整规律的研究。

尹学良<sup>[22]</sup>利用在边滩植草及在大水中加入黏土的方法,把边滩固定下来,塑造弯曲河流,并对河流成因和造床试验进行研究,发现河床相对抗冲性增大后,初期形成的弯曲型河道切滩不断发生,逐渐变为游荡型。金德生<sup>[23]</sup>采用过程响应模型的水槽试验表明,河道的边界条件,尤其是河漫滩的物质结构和组成,对河流发育及河道调整有极大的影响。许炯心<sup>[24]</sup>通过游荡型河道清水冲刷自然模型试验,认为河道断面形态调整可分 3 个阶段,并给出了游荡型河道冲刷与展宽的相对关系与动态过程。倪晋仁<sup>[25]</sup>概化水槽试验表明,由初始顺直开始发展的河流,都无一例外地或迟或早经过流路弯曲直至形成

边滩交错的弯曲型河流的发展阶段,在这个阶段以后,如果边滩稳定发育,则保持弯曲型河流,否则河流切滩形成游荡型河流。陈立等<sup>[26]</sup>也开展了自然模型试验,与许炯心<sup>[24]</sup>开展的试验相比,床沙组成粗、初始河床比降小、水流强度小,表明顺直型河道在清水冲刷时将朝着宽浅方向发展,弯曲型河道水流的纵横向动量之比趋向和谐稳定。杨树青等<sup>[27]</sup>也运用自然模型法通过室内试验成功塑造了天然小河,并研究了不同初始河流几何边界条件以及水流条件对河流演变的影响,表明流量对河流展宽幅度影响最大,受边界条件影响,河流向下游演变具有滞后性及曲率变化的传递性等特点。

上述研究通过模型试验直观地给出了河道调整规律,但研究中河道两岸多为天然边界;而黄河下游游荡型河道内已经修建了大量河道整治工程,在不同水流作用下河道调整直接受到这些工程本身的约束,而且这些工程布置采用“微弯型”方案布局,在平面上表现为单岸交替修建,造成河道两岸可动性差异较大,河道调整规律更为复杂。

1.3 冲积河流线性理论研究

模拟试验在一定程度上揭示了河流调整的过程,为探索河床演变的非线性演化特征提供了直观的研究方法。近期,王光谦等诸多学者<sup>[3,18,28-38]</sup>在理论上对游荡型河道调整过程进行了大量的研究,其中 Huang 等<sup>[38]</sup>建立的冲积河流线性理论有一定的代表性,为认识河道的非线性调整提供了一种新的途径和方法。

不同于以往寻求第四个封闭方程研究河相关系的方法,Huang 等<sup>[39]</sup>提出了将河道宽深比引入到已知的3个水流运动方程中以减少自变量数目的数理分析方法,认为在河流水动力方程中隐含着两个等价的极值条件,即河流输沙能力最大与水流能耗比降最小。在流量、比降和泥沙组成给定的情况下,水流输沙能力可完全由过水断面形态参数(宽深比)来决定,河流输沙能力最大时与其对应的宽深比具有唯一解,也就是说输沙能力最大是河流达到稳定平衡的条件。Huang 等<sup>[40]</sup>在分析了水流动能与势能相互转化规律的基础上,发现水流运动在能量转换过程中存在着一种特殊的平衡状态,可以称为流体静态平衡;由于明渠水流大多数情况下都要偏离这一状态,据此提出了将冲积性河流划分为动态平衡、静态平衡及非平衡状态等3种形态,当河流处于静态平衡时,河道断面有唯一解,水流将呈现线性特征。

Huang 等<sup>[41]</sup>通过进一步研究发现对于有泥沙输移的冲积河流处于静态平衡时,剪切力和宽深比

也存在线性关系,这种线性关系不仅得出的理论渠道几何形状与以往广泛接受的经验公式得出的结果十分接近,而且还给出了一个无量纲参数  $H$ (剪切力的增量与宽深比的增量之比),当  $H=0.3$  时,河流处于静态平衡;并基于这一发现建立了冲积河流线性理论。冲积河流线性理论表明:

a.  $H$  在河流自动调整中的作用与弗劳德数  $Fr$  在定床明渠水流中的作用类似,即与定床明渠水流中以势能为主导的缓流( $Fr<1$ )、以动能为主导的急流( $Fr>1$ )和以总能量为最小的临界流( $Fr=1$ )3种状态相对应,冲积性河流存在着以侧向输沙为主导的宽浅流( $H<0.3$ )、垂向输沙为主导的剪切流( $H>0.3$ )和总能耗最小的临界流( $H=0.3$ )3种状态。

b. 水流也总是在这3种状态之间调整,这就为河道可能调整的方向或方式预测提供了理论依据。水流不是从  $H<0.3$  向  $H>0.3$  的状态过渡,就是从  $H>0.3$  状态调整到  $H<0.3$  的状态,中间经过  $H=0.3$  的状态并在  $H=0.3$ (静态平衡)时具有线性特征。

c.  $H$  的提出为天然河流自动调整过程的模拟提供了合理的相似比尺。

d. 此外,理论研究中还发现决定这一线性特征的条件是河流输沙方程与阻力方程存在紧密联系,并在修正梅叶-彼得输沙率公式的基础上提出了适用性更强的输沙率公式。

冲积河流线性理论对于冲积河流河道的调整具有很强的适应性,已在顺直型河流<sup>[41]</sup>及分汊型河流<sup>[42]</sup>的河道调整中得到了较好的应用;能否适应于非线性特征极强的游荡型河道的调整也有待进一步的检验。

2 新形势下黄河下游游荡型河道调整研究启示

从上面分析可以看出,目前对河道调整相关研究成果各具特色,假说、理论丰富多彩,推动了学科的发展。然而,游荡型河道河床演变规律极其复杂,特别是新形势下黄河下游游荡型河段来水来沙明显减少,沙量锐减得尤为突出,河床演变又受到现有工程边界约束,河势调整更为复杂。目前黄河下游游荡型河道调整规律研究还存在以下问题:①河流受到人工控制边界的约束越来越强,而对河岸两侧可动性不对称边界的水力几何形态调整规律及过程的研究,以及有限控制边界对河道几何形态调整的影响研究还很少,耦合河道有限边界与水沙条件共同开展游荡型河道调整规律的研究更少。②以往围绕河相关系开展的断面几何形态调整研究,更多侧重于几何形态的调整结果,缺乏其调整机理与过程的



研究;Huang 等<sup>[40]</sup>基于变分原理提出了冲积河流线性理论,为深入认识河道非线性演变机理提供了新途径,但是其数理分析过程中将河流过水断面几何形态概化为矩形形态开展研究,而黄河下游游荡型河道为典型的宽浅型,能否适用于黄河下游也有待进一步的检验。③河道整治工程修建后,黄河下游游荡型河道的主槽摆动范围和频率已大幅度减小,然而在长期小水作用下,下游出现的畸形河势为防洪带来了一些新问题,甚至会导致横河、斜河现象的出现,使防洪面临很大的压力。

因此,根据黄河下游游荡型河道面临水沙变化及自身已建工程约束的新形势,应对以下问题开展进一步的深入研究:

a. 水沙变化与有限控制边界对河道调整的耦合效应。随着河流的开发利用程度增强,河流受到的边界约束也越来越多,河道调整需要考虑有限的工程(硬边界)与抗冲性较弱的天然河岸(软边界)的共同影响。有限控制边界是对河道治理工程进行概括抽象的一个新概念,水沙过程和有限控制边界虽然是两个独立的因素,但它们对河道演变的作用是紧密相关的。因此,研究水沙变化与边界约束共同作用下的河道调整及演变也是河床演变学科的难点与关键科学问题。在今后的研究过程中应基于精细的模型试验,并结合理论及原型具体河段的工程分析,固定单侧河道工程,变化水沙条件,先研究有限控制边界条件下水沙对河道调整的影响,然后在模型中布设不同密度的河道工程,重点研究软硬边界及不同密度的边界对河道调整的影响,揭示不同控制边界下游荡型河道调整的机理与过程。

b. 河道断面自调整数理分析中断面形态假定问题。冲积河流线性理论为深入认识河流形态自调整机理提供了新方法,但其主要分析的对象为顺直型河道,其断面河相系数在 1.39~7.80 之间,断面形态可假定为矩形,分析得到的  $H=0.3$ ,可以采用线性理论研究;然而,游荡型河流多为宽浅型河道,黄河下游高村河段的河相系数为 19~32,个别河段甚至达到 60,若仍采用顺直型河道的方法假设,有可能导致与天然河流实际情况不符。因此,下一步研究中应通过黄河下游实测断面资料初步建立不同水沙变幅下河道断面形态的判别式,基于模型试验成果分析输沙平衡时工程弯道处的断面形态及出弯道后自由段的断面形态,将这一断面形态代替原数理分析方法中的矩形形态;采用变分方法,推导分析、构建适应于游荡型河道自调整的数理分析方法;最后将计算成果与原型实测资料及模型试验成果对比分析,检验该方法在游荡型河道调整中的适应性。

c. 有限控制边界条件下游荡型河流主槽摆动幅度和频率问题。据统计,1949—1960 年黄河下游游荡型河段基本处于天然河道状态,其主流摆动范围平均为 4.33 km;1964—1973 年受三门峡水库运用影响,其主流摆动范围平均为 3.01 km;此后,随着河道整治工程的修建,主流摆动范围逐渐减小,到 20 世纪 90 年代末减小为 1.93 km。2006 年底黄河下游游荡型河段开展新一轮河道整治后,游荡型河流主槽摆动幅度和频率大幅度减小,其中主流摆动范围减小至 300~500 m。然而,新形势下黄河下游游荡型河道长期面临的流量仅为  $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$  以下的小水过程,由于黄河下游河道整治工程是按照设防  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  流量设计的,因而在长期小流量过程作用下河流的宽度、河湾跨度等进一步缩小,这使畸形河湾出现的概率大幅度增大,产生诸多畸形河势,进而影响两岸稳定供水,危害灌区粮食安全。因此,针对有限控制边界下游荡型河流主槽摆动幅度和频率问题,找到控制畸形河湾发生发展的工程技术措施,避免畸形河湾在防洪上带来的问题,也是需要进一步研究的一个重要课题。

### 3 结 语

河道边界既是河床演变的结果,又反过来影响河道调整过程;新形势下黄河下游游荡型河道受到了软硬边界共同的约束,而这种约束不同于天然河道也不同于完全渠化的河道,而是有限控制边界条件。以往研究更多聚焦于水沙变化与河床演变的关系,而开展有限控制边界与水沙变化共同作用下河道调整机理的研究还很少。在今后的研究中,应注重开展水沙变化与有限控制边界对河道调整的耦合效应、河道断面自调整数理分析中断面形态假定、有限控制边界条件下游荡型河流主槽摆动幅度和频率等问题的研究。此外,游荡型河流由于其输沙量大、河势调整迅速,通过加入有限控制边界条件,河道输沙平衡时弯道工程及下游自由段河道断面的形态是衔接游荡型河道输沙与断面形态塑造的关键点,模型试验测量及研究中应给予特别关注。

### 参考文献:

[1] 谢鉴衡. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利出版社, 1981.

[2] 倪晋仁,张仁. 河相关系研究的各种方法及其间关系[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 368-375. (NI Jinren, ZHANG Ren. Methods and their relationships in studies of regime relations[J]. Acta Geographical Sinica, 1992, 47(4): 368-375. (in Chinese))

[3] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版

- 社,1987.
- [ 4 ] 王光谦,胡春宏.泥沙研究进展[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [ 5 ] 周志德.20 世纪的河床演变学[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):226-231. ( ZHOU Zhide. River bed evolution in 20th century [ J ]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003,1(3):226-231. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] LACEY G. Stable channels in alluvium[J]. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1930, 229:259-292.
- [ 7 ] LEOPOLD L B, MADDOCK T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implication [ C ]//US Geological Survey Professional Paper. Washington, D. C. : United States Government Printing Office, 1953:1-57.
- [ 8 ] PARKER, G. Hydraulic geometry of active gravel rivers [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105: 1185-1201.
- [ 9 ] PARKER G, WILCOCK P, PAOLA C, et al. Physical basis for quasi universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: F04005.
- [ 10 ] CHANG H H. Fluvial processes in river engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc. , 1988: 227-322.
- [ 11 ] 徐国宾,杨志达.基于最小熵产生与耗散结构和混沌理论的河床演变分析[J].水利学报,2012,43(8):948-956. ( XU Guobin, YANG Zhida. Analysis of river bed changes based on the theories of minimum entropy production dissipative structure and chaos [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 ( 8 ): 948-956. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] 徐国宾,赵丽娜.基于能耗率的黄河下游河型变化趋势分析[J].水利学报,2013,44(5):622-626. ( XU Guobin, ZHAO Lina. Analysis of channel pattern changes in the lower Yellow River based on the rate of energy dissipation [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 ( 5 ): 622-626. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] XU G, ZHAO L, YANG C T. Derivation and verification of minimum energy dissipation rate principle of fluid based on minimum entropy production rate principle [ J ]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(1): 16-24.
- [ 14 ] 倪晋仁,张仁.河相关系的物理实质[J].水文,1991(4):1-6. ( NI Jinren, ZHANG Ren. Physical essence of regime relations [ J ]. Journal of China Hydrology, 1991 ( 4 ): 1-6. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 黄才安,周济人,赵晓冬.基本河相关系指数的理论研究[J].泥沙研究,2011(6):55-58. ( HUANG Caian, ZHOU Jiren, ZHAO Xiaodong. Theoretical study of exponent in basic hydraulic geometry relation [ J ]. Journal of Sediment Research, 2011(6):55-58. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] BONAKDARI H, GHOLAMI A, MOSAVI A, et al. A novel comprehensive evaluation method for estimating the bank profile shape and dimensions of stable channels using the maximum entropy principle [ J ]. Entropy, 2020, 22 ( 11 ): e22111218.
- [ 17 ] 拾兵,王燕,杨立鹏,等.基于仙农熵理论的河相关系[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(1):95-98. ( SHI Bing, WANG Yan, YANG Lipeng, et al. Hydraulic geometry based on shannons entropy principle [ J ]. Periodica of Ocean University of China, 2010, 40 ( 1 ): 95-98. ( in Chinese ) )
- [ 18 ] 胡春宏,陈建国,郭庆超,等.黄河水沙调控与下游河道中水河槽塑造[M].北京:科学出版社,2007.
- [ 19 ] 潘贤娣,赵业安,李勇,等.三门峡水库修建后黄河下游河道演变[C]//黄河三门峡水利枢纽运用研究文集.郑州:河南人民出版社,1994:99-159.
- [ 20 ] 陈建国,周文浩,陈强.小浪底水库运用十年黄河下游河道的再造床[J].水利学报,2012,43(2):127-135. ( CHEN Jianguo, ZHOU Wenhao, CHEN Qiang. Channel re-establishment of the lower Yellow River in ten years operation of Xiaolangdi Reservoir [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 ( 2 ): 127-135. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] 陈立,鲍倩,何娟,等.枢纽下游近坝段不同类型河段的再造床过程及其对航道条件的影响[J].水运工程,2008(7):109-114. ( CHEN Li, BAO Qiang, HE Juan, et al. Process of river reformation and impact on navigation channel condition near-dam reach in different types of rivers downstream the junction [ J ]. Port & Waterway Engineering, 2008(7):109-114. ( in Chinese ) )
- [ 22 ] 尹学良.河型成因研究[J].水利学报,1993,24(4):1-11. ( YIN Xueliang. Formation of river patterns [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 24(4):1-11. ( in Chinese ) )
- [ 23 ] 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[J].地理研究,1986,5(3):12-21. ( JIN Desheng. An experimental study of the influence of boundar conditions on meandering development with process response model [ J ]. Institute of Geography, 1986, 5(3):12-21. ( in Chinese ) )
- [ 24 ] 许炯心.水库下游河道复杂响应的试验研究[J].泥沙研究,1986,11(4):50-57. ( XU Jiongxin. An experimental study on the complex response in river channel adjustment downstream a reservoir [ J ]. Journal of Sediment Research, 1986, 11(4):50-57. ( in Chinese ) )
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 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[J].水利学报,2003,34(7):42-45. ( CHEN Li, ZHANG Junyong, XIE Baoling. Characteristics of

- non-uniform muddy flow transportation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 ( 7 ): 42-45. ( in Chinese))
- [27] 杨树青,白玉川. 边界条件对自然河流形成及演变影响机理的实验研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(1):1-5. ( YANG Shuqing, BAI Yuchuan. Experiment on influence mechanism of boundary conditions to the formation and evolution of natural river [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2012,23(1):1-5. ( in Chinese))
- [28] 吴保生,马吉明,张仁,等. 水库及河道整治对黄河下游游荡性河道河势演变的影响[J]. 水利学报,2003,34(12):12-20. ( WU Baosheng, MA Jiming, ZHANG Ren, et al. Experiment on influence mechanism of boundary conditions to the formation and evolution of natural river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(12):12-20. ( in Chinese))
- [29] 江恩惠,曹永涛,张林忠,等. 黄河下游游荡型河段河势演变规律及机理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [30] 白玉川,冀自青,徐海珏. 窄深型河湾多尺度紊流拟序结构动力稳定与自适应特征研究[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42 ( 11 ): 1264-1273. ( BAI Yuchuan, JI Ziqing, XU Haiyu. Stability and self-adaption character of turbulence coherent structure in narrow-deep river bend [J]. Science in China: Technology Science, 2012, 42 ( 11 ):1264-1273. ( in Chinese))
- [31] 汤韬,李志威. 黄河源区弯曲河群分布与形态及边界条件[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 ( 1 ): 10-16. ( TANG Tao, LI Zhiwei. Distribution, planform and boundary conditions of meandering river groups in source region of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 ( 1 ): 10-16. ( in Chinese))
- [32] 白玉川,李岩,张金良,等. 黄河下游高村—陶城铺河段边界阻力能耗与河床稳定性分析[J]. 水利学报,2020,51(9):1165-1174. ( BAI Yuchuan, LI Yan, ZHANG Jinliang, et al. Energy dissipation of boundary resistance and stability analysis of river bed of Gaocun to Taochengpu reach in lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 ( 9 ): 1165-1174. ( in Chinese))
- [33] 许栋,张炳昌,徐彬,等. 复式断面明渠浅滩水深及雷诺数对湍流结构影响的大涡模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2020, 35 ( 1 ): 74-83. ( XU Dong, ZHANG Bingchang, XU Bin, et al. Investigation on the influence of floodplains depth and reynolds number on the turbulence structure of flow in compound open-channels using large eddy simulation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2020,35(1):74-83. ( in Chinese))
- [34] 夏军强,王光谦,吴保生. 平面二维河床纵向与横向变形数学模型[J]. 中国科学:E 辑,2004,34(增刊1):165-174. ( XIA Junqiang, WANG Guangqian, WU Baosheng. Two dimensional mathematical model of longitudinal and transverse deformation of river bed [J]. Science in China: Series E,2004,34(Sup1):165-174. ( in Chinese))
- [35] 王英珍,夏军强,邓珊珊,等. 黄河下游游荡段断面滩岸崩退过程概化模拟[J]. 水力发电学报,2021,40(3):39-49. ( WANG Yingzhen, XIA Junqiang, DENG Shanshan, et al. Conceptual modelling of bank erosion processes at typical sections in braided reach of lower Yellow River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021,40(3):39-49. ( in Chinese))
- [36] 张诗媛,夏军强,李洁,等. 近期黄河下游游荡河段床面下切与横向展宽的定量关系[J]. 泥沙研究,2020,45(2):8-15. ( ZHANG Shiyuan, XIA Junqiang, LI Jie, et al. Recent quantitative relationships between channel incision depth and bank retreat width in the braided reach of the lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2020,45(2):8-15. ( in Chinese))
- [37] 夏军强,王光谦,张红武,等. 河道横向展宽机理与模拟方法的研究综述[J]. 泥沙研究,2001,26(6):71-78. ( XIA Junqiang, WANG Guangqian, ZHANG Hongwu, et al. A review of the research on lateral widening mechanisms of alluvial rivers and their simulation approaches [J]. Journal of Sediment Research, 2001, 26 ( 6 ):71-78. ( in Chinese))
- [38] HUANG H Q, CHANG H H. Scale independent linear behavior of alluvial channel flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,132(7):721-730.
- [39] HUANG H Q, NANSON G C. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000(25):1-16.
- [40] HUANG H Q, NANSON G C, FANAN S D. Hydraulic geometry of straight alluvial channels and the variational principle of least action-reply [J]. Journal of Hydraulic Research,2004,2(2):19-222.
- [41] HUANG H Q. Reformulation of the bed load equation of Meyer-Peter and Müller in light of the linearity theory for alluvial channel flow [J]. Water Resources Research, 2010,46:1-11.
- [42] 于思洋,黄河清,范北林,等. 利用河流平衡理论检验推移质输沙函数的应用性[J]. 泥沙研究,2012,37(2):19-25. ( YU Siyang, HUANG Heqing, FAN Beilin, et al. Investigation of applicability of bed load transport functions in terms of river equilibrium theory [J]. Journal of Sediment Research, 2012, 37 ( 2 ): 19-25. ( in Chinese))

(收稿日期:2020-07-27 编辑:骆超)