

文章编号: 1672-3031(2009)02-0134-07

河流泥沙学科几个方面发展跟踪

郭庆超, 曹文洪, 陈建国, 方春明

(中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048)

摘要: 河流泥沙学科是一门综合性的基础技术科学, 它是研究泥沙在水体中的输移、冲刷和淤积的规律, 是水利学科的理论基础之一, 包括泥沙运动力学、河床演变学、工程泥沙、航道与港口治理、高含沙水流与泥石流等多方面的内容。本文在查阅浏览大量研究资料基础上, 着重从泥沙运动、河床演变、水库泥沙和数值模拟技术等几个方面对泥沙学科的历史进程、重要成果和发展动态进行了跟踪, 对比分析了国内外研究水平, 提出了今后发展的新方向和值得关注的议题, 对我国河流泥沙在国际上发挥更大的作用具有参考意义。

关键词: 学科发展; 河流泥沙; 河床演变; 工程泥沙; 数值模拟技术

中图分类号: TV143

文献标识码: A

由于河流泥沙学科涉及面很广, 很难全面覆盖, 本文仅仅从泥沙运动、河床演变、水库泥沙和数值模拟技术等几个方面对泥沙学科的历史进程、重要成果和发展动态进行跟踪。尽管在撰写本文时力求比较全面地反映这几方面的研究成果, 但由于水平和掌握的资料有限, 难免挂一漏十, 敬请批评指正。

1 泥沙运动基本理论

1.1 非均匀沙不平衡输沙 窦国仁^[1]详细分析了非平衡输沙机理, 在苏联早期研究成果的基础上提出了初步的理论体系。韩其为^[2]进一步研究了非均匀不平衡输沙问题, 给出了恒定情况下一维非均匀流条件下含沙量沿程变化的解析解, 以及明显淤积与明显冲刷条件下悬移质级配与床沙级配的变化方程; 提出了挟沙能力级配和有效床沙级配概念, 并给出了一般条件下的表达式。关于非平衡泥沙扩散过程的理论研究, Hjelmfelt 和 Lenau^[3]以及张启舜^[4]等作了深入细致的分析工作, 对冲刷过程中含沙量沿程恢复问题和淤积过程中含沙量沿程递减问题进行了很好的理论分析, 得出的结果至今还有指导意义。

现阶段非平衡输沙计算中的恢复饱和系数的确定和床面泥沙与运动泥沙的交换机理为该方面研究的焦点问题。韩其为^[2]是最早采用实际资料反算得到经验的恢复饱和系数, 冲刷时取 1, 淤积时取 0.25。这一系数在国内数学模型中广泛引用, 在三峡等重要工程中也得到应用。后来, 韩其为^[2]根据统计理论推导得到平衡时的恢复饱和系数介于 0.02~ 1.78 之间, 近似证明当时的经验系数具有一定的依据。对于平面二维模型或简单均匀沙的恢复饱和系数, 上述经验系数的可靠性需要进一步研究。周建军^[5]针对非平衡输沙计算中存在的问题进行了理论研究, 探讨了恢复饱和系数的计算方法, 从理论上给出了从三维床面边界条件到天然河道一维泥沙数学模型恢复饱和系数统一的理论和公式。

目前有些国外的泥沙数学模型仍然采用平衡输沙的概念。这对于卵石推移质为主的少沙和粗沙河流, 由于悬移质含量少, 河床调整速度快, 还可近似采用, 而对于多沙河流, 河床调整速度慢, 影响距离长, 平衡输沙理论将产生较大误差, 必须用非平衡输沙理论描述。

1.2 泥沙浓度与挟沙能力 水流挟沙能力是泥沙研究的基本问题, 其理论基础、物理方程、计算公式等早在 20 世纪 50 年代左右已基本成型。具有代表性的研究者包括 Rouse^[6]、Velikanov^[7]、Bagnold^[8]、

收稿日期: 2009-05-01

作者简介: 郭庆超 (1965-), 男, 安徽六安人, 教授级高级工程师, 主要从事河道水库河口海岸有关泥沙问题研究。

E-mail: Guoq@iwhr.com

Laursen^[9]、Lane-Kalinske^[10]、武汉水院^[11]等。

挟沙水流运动特性研究包括泥沙浓度分布、流速分布、紊动特性等方面的内容,是河流泥沙研究的基础课题,中外学者从不同角度开展了大量研究,已经取得了丰富的成果。

泥沙浓度分布的理论研究是最基本的工作,Rouse^[6]首先引入扩散理论并导出浓度分布公式,开创了理论研究的先河。Velikanov^[7]提出的重力理论独具特色,揭示出泥沙运动的能量耗散图景。倪晋仁和王光谦^[12]从理论上揭示无论采用扩散理论、能量理论、混合理论、相似理论及随机理论,在求解悬移质浓度分布公式时都能归化为扩散方程的简单形式,而且通过对掺混长度及紊流特性的研究提出泥沙浓度分布公式的统一模式,使得传统的计算公式都成为特例。提出浓度分布存在两种典型类型,即传统的浓度上小下大的Ⅱ型与最大浓度不出现在底部的Ⅰ型。导出了描述Ⅰ型分布的浓度公式,并认为Ⅰ型分布的最大浓度位置出现在泥沙颗粒重力与升力相等之处。

高含沙水流是挟沙水流的一种,在我国黄河干支流经常发生,实测最高含沙量达 $1\ 600\text{kg}/\text{m}^3$ 。由于含沙量高,水流的运动呈现出与低含沙水流明显不同的特性^[13]。浆体表现为非牛顿体特性,通常为宾汉体。在流态上不仅出现高浓度两相紊流,也经常出现高浓度层流流动,流体表面淅沥出一层清水,平静如镜,两岸树木倒影清晰可辨。在一定条件下,整个河段还可能出浆河,即当河床切应力小于宾汉屈服应力时流动冻结,随着上游高含沙水流持续到来,水深不断增加,浆河“开河”再次流动。高含沙水流在一定流态下具有较小的阻力系数,小于同水流条件下清水的阻力系数。由于颗粒在高浓度浆体中沉速大为降低,高含沙水流的挟沙力相对低含沙水流要大。与浆河现象相对应,高含沙洪水有时也会发生揭河底现象,在短时间内能使河床刷深数米(2~10m),导致水位大幅下降,影响桥墩、护岸及其他涉河工程的安全。我国在高含沙水流研究方面处于国际先进行列,国外目前关于高含沙水流的研究主要借鉴我国的方法和理论。

水流挟沙能力是泥沙研究中一个重要课题,Einstein^[14]、Bagnold^[8]、Ackers和White^[15]、张瑞瑾^[16]、沙玉清^[17]等从不同理论和假设对挟沙能力进行了大量研究,取得了丰富的研究成果。其中张瑞瑾公式既有一定的理论基础,又考虑经验修正,体现了对泥沙运动基本问题的研究特色。Yang^[18]从单位水流功率的理论模式入手,建立了包括沙质推移质在内的水流挟沙力公式。

长期以来不少研究认为只有在强平衡条件下才存在挟沙能力关系。但是这种看法难以解释全部由上游来沙补给含沙量(已含在来水中)和完全由充足床沙补给含沙量(全部由床沙冲起)时的挟沙能力的差别,也难以解释细颗粒泥沙的起动流速与止动流速的差别。韩其为^[2]的研究表明,水流挟沙能力是受上游来流输沙状态和床沙组成共同影响的,也就是说在淤积、平衡与冲刷等不同输沙状态下,水流的挟沙能力是不同的,因而建立了高低含沙水流统一的挟沙能力公式。从水流泥沙运动基本原理上解释了水流挟沙能力系数在高含沙河流与低含沙河流的不同,同一条河流中水库的挟沙能力系数与河道的不同,以及高含沙洪水的多来多排现象。

挟沙能力系数 k_0 是数学模型中最重要的系数之一,大量实际应用和相关研究^[9]表明,一般情况下,冲积性河流和水库的挟沙能力系数值的变化范围在0.010~0.050之间。在南方少沙河流中 k_0 取值较小,如长江和汉江下游 k_0 可取为0.014~0.020;在北方多沙河流中,系数 k_0 应该大一些,如黄河下游的 k_0 可取为0.025~0.033;水库取值大于河道。根据这些原则可以基本上估计某一河流或水库的挟沙能力系数取值范围,避免了泥沙数学模型中水流挟沙能力系数选取的不确定性。

与河流泥沙运动规律相比,河口海岸泥沙运动有其独特的规律。从动力特性上看,受潮汐与波浪的共同作用,河流泥沙运动力学中大量的关于恒定均匀流的研究成果和基本概念在这里是不适用的。曹文洪等^[20]基于湍流猝发的时空尺度得到波浪和潮流作用下床面泥沙上扬通量,然后根据连续律,建立了平衡近底含沙量的理论表达式,进而根据波浪掀沙和潮流输沙的模式,推导得出了物理概念清晰和充分考虑床面附近泥沙交换力学机理的潮流和波浪共同作用下的挟沙能力公式。

2 河床演变

2.1 河床演变理论

Chien和Wan^[13]把河流分为顺直、弯曲、分叉、游荡4种类型。这种分类不仅是对

每一种类型河流平面形态的直观理解,更重要的是包括了对不同类型河流演变规律的深刻描述。这种分类比 Leopold 和 Wolman^[21] 的顺直、弯曲、辫状 3 种河型的分类法具有明显的先进性。因为, Leopold 和 Wolman^[21] 的分类法偏重于平面形态的描述,没有明确区分不同类型河流的演变特性。例如,按 Leopold 和 Wolman^[21] 的分类,从平面形态上看长江中下游和黄河下游河道都为辫状(分叉)河流,但一个相对稳定,而另外一个摆动不定。按钱宁的分类,长江中下游河道属于分叉型,而黄河下游属于游荡性,表现出不同的演变规律。

除了河型分类外,河流演变的主要进展包括:不同河型的演变规律、河相关系、河流的自动调整作用、河流的稳定性指标、各种类型河流的形成、水库上游泥沙淤积与下游河道的冲刷规律、河床变形计算、河口演变规律。钱宁把河流演变的规律加以分析总结,上升到理论高度,完成专著“河床演变学”,反映出该研究领域的系统成果。同时期, Chang^[22] 完成了“河流演变工程学”专著,在河型、河流的自动调整机理等重要理论或方法的处理和弯道变形、河宽调整和河床冲淤的数学模拟等方面很有特色,对过去仅能定性描述的一些河流问题提出了定量的处理办法,配合各类问题列举了大量工程实例。

2.2 河型转化 针对河型问题,较早的研究以实验和野外观测研究为主,如 Edgar^[23] 用松散的含有黏性成份的天然沙在不同比降、不同流量(定常流量)下进行了实验,还给出了天然河道调查资料。另外一些人的实验研究是用不同的沙进行的。在国内,20 世纪 60 年代就开展了河型成因与分类研究,如方宗岱的分类方法研究等。在试验研究方面,尹学良^[24] 的研究较具代表性,通过在水中加黏土的方法成功地塑造了弯曲型河道。近年国内开展的试验研究和统计分析研究也较多。

针对大型水利枢纽工程下游河型变化,许炯心^[25], Schumm^[26], 陈立等^[27] 试验研究了水库下游河道的复杂响应。韩其为^[2] 就丹江口水库修建后下游河道河势和河型变化进行了较全面的观测资料分析研究,并与三峡水库下游河道的河型变化进行了类比分析,对小浪底水库修建后黄河下游游荡性河段河型变化趋势也进行了分析。

但河型研究还很薄弱,主要是理论认识还不充分。除临界起动假说、最小活动性假说、最小功原理、最小方差理论等假设外,也有一些其它的研究成果,如尹学良提出了“水沙条件决定河型论”,方春明^[27] 提出在河相关系研究中需补充的方程应是河流边界条件等。

目前,河型问题的研究在 3 个方向上发展,传统的统计分析,试验研究,及处于探索阶段的数学模型研究。统计分析方法,由于天然河流影响因素过多,难以获得普遍符合实际的经验公式。同样,理论研究要获得较本质的数学模式和理论公式也存在困难。模型试验方法由于试验组次和研究范围的限制,虽在单个河型或个别影响因素上取得成功,但缺乏对演变方式和过程的广泛模拟,难以形成完整的体系,得出系统化的结论。河型的数学模拟研究尚处在探索阶段^[29-31],受到对河型问题理论认识不充分的限制。

2.3 河道萎缩 胡春宏等^[32] 对河道萎缩进行了阐述,河道萎缩是指由于水沙条件发生变异,河床演变脱离了在长期水文学意义下水沙过程中所建立的“相对平衡”状态,出现过流断面缩小、泄洪输沙能力降低等河道基本功能衰减的演变现象。黄河下游河道萎缩是一种复杂的河床过程,其根本原因是水沙过程变异的结果,但水沙条件变异是河槽萎缩的主要因素,而生产堤等不利的河道边界条件只是加快了河槽的萎缩。

河道萎缩是河道排洪输沙功能衰退的一种河床演变过程,其主要反映是河槽过流能力降低、同流量下水位不断抬升。若长期缺乏大流量洪水过程,其泄洪输沙能力会发生累积性降低,河道萎缩将进一步加剧,当河道萎缩至一定程度后,即使发生小流量洪水过程,也会形成漫滩成灾现象,从而产生“小水大灾”效应。在一定的条件下,萎缩性河道是可以逆转的。如黄河小浪底水库的调度运用将大量泥沙拦截在水库里,下泄水流含沙量低且具有一定流量,挟沙能力有较大富余,可冲刷河床,展宽河槽,有利于萎缩性河道的重新塑造。实践证明,利用小浪底水库初期拦沙运用的有利时机,将萎缩性河道恢复为中水河槽是可能的。

3 水库泥沙淤积

Mahmood^[33]对世界水库泥沙淤积总结得出结论:在世界范围内,人造水库的平均使用寿命约22年左右,这与从技术上来讲一个水库的使用寿命至少100年以上相差甚远。水库泥沙淤积是个古老而年轻的问题,瑞士的Giovanni和Raymond^[34]通过浏览400篇有关水库泥沙的文献认为:在20世纪前半叶,泥沙运动和水库泥沙淤积理论就已基本建立,在一些特定的水库中也曾采用冲刷和疏浚的办法清除泥沙;1970年以后水库清淤技术的研究和应用得到进一步发展;1980年代水库泥沙综合管理理念变得更加清晰;1999年ICOLD在115期简报“Dealing with reservoir sedimentation”中已经清楚地阐述了水库泥沙淤积及防治对策。

在我国,韩其为经过近40年的系统和深入研究,建立了水库淤积的理论体系,出版了《水库淤积》专著^[2]。《水库淤积》的出版,标志着对水库淤积的认识基本完成了将其由定性的描述到机理揭示和定量表达的过渡,研究内容广泛深入,包括水库淤积的机理、水库泥沙运动规律,淤积形态和形成条件的定量表达,三角洲及锥体淤积纵剖面方程,横剖面塑造特点、异重流淤积及倒灌,变动回水区冲淤,推移质淤积,回水抬高,淤积物随机冲填时干容重确定,混合沙及其密实过程中干容重变化,淤积过程中糙率变化等。此外在水库淤积控制和调度方面,如水库长期使用的理论,变动回水区航道控制措施等也有出色成果。修建水库一般会引起坝下游河床发生较大变形。初期的蓄水拦沙会引起出库含沙量显著降低,坝下游较长河段发生自上而下的冲刷、河床粗化明显、断面形态与河床纵比降的重新调整,甚至引起下游部分河段河型的转化。三门峡水库、官厅水库修建后下游河道发生的冲刷现象都较为显著,目前我国围绕大型水利工程开展的水库泥沙研究代表该领域的领先水平。

对水库泥沙淤积的认识改变了只注重大坝建设技术的观念,对如何选择经济有效、技术可行的方法来延长水库的使用寿命产生了重要影响。在水库的规划、设计、建设和运行中,如果忽视泥沙淤积的影响,那么水库的功能是不可持续的,也不是环境友好的,更不易被公众接受。在这方面,三峡总公司走在前列。在金沙江下游梯级水电站规划期间,就充分考虑了泥沙在水库规划、设计、施工和运行阶段的影响,制订梯级水电站水文泥沙监测与研究实施规划,将水文泥沙作为一个重要议题贯穿于水电站开发的全过程,这必将对梯级水电站的联合运用、安全运行和延长水库使用寿命发挥积极的作用。

4 河流泥沙数值模拟

河流泥沙数学模型的发展始于20世纪60年代,70年代以后逐步成熟,是20世纪70年代以后泥沙研究的一个最重要进展。

在一维泥沙数学模型方面,较有代表性的有美国的HEG-6^[35]和国内的韩其为^[36]开发出的一维河流泥沙数学模型。韩其为的模型是建立在非均匀沙不平衡输沙理论之上,对不同的冲淤模式建立了不同的输沙理论体系,模型还包括了水库异重流、支流倒灌异重流、河流的分流分沙模型等。目前已广泛用于水库及河道泥沙的计算研究中。

20世纪70年代,Festa和Hansen^[37]建立了平面二维模型,成功地用于河口最大浑浊带形成机理的研究。在国内,李义天^[38]等在20世纪80年代末也建立起二维泥沙数学模型。针对水流和泥沙侧向变化较小的情况,立面二维模型也逐渐发展。20世纪90年代以来,随着计算机的发展和泥沙研究领域的扩展和研究水平的不断深入,三维泥沙数学模型在河流局部河段、湖泊,尤其在河口海岸泥沙问题研究方面得到了大量的发展与工程应用^[39-40]。目前,一、二维泥沙数学模型已比较成熟,三维模型也能应用来解决一些具体问题。特别是近些年来,数学模型在理论研究和生产实践中发挥了越来越重要的作用。

目前泥沙数学模型不仅在数值格式上朝着精度高、稳定性和守恒性好、收敛速度快的方向发展;在功能上还逐渐将产流产沙的坡面流模型、河口海岸的泥沙输移模型与传统的河道冲淤、河宽调整模型一体化;在适用性方面,发展了基于完整的(而不是简化的)控制方程的全耦合数学模型,以适用于输沙率

高、河床变形很快的强冲积河流过程^[41];在模拟技术上,将精细的三维模型与快速的一、二维模型结合起来,形成所谓的耦合、嵌套模型来处理复杂的模拟区域。王光谦等提出了流域泥沙数字模型^[42]。流域泥沙数字模型将全流域(包括坡面、沟道及河道)作为一个系统,较好地流域面上的产沙和河道输沙结合在一起,是对目前利用遥感技术进行水土流失调查和长河道水沙数值模拟分别研究流域产沙和输沙的重要补充。此外,采用新的模式分离技术和并行计算发展了大尺度的河道水流三维数学模型,其突出优点是数值稳定性高,计算时间短。

5 对我国未来河流泥沙研究的思考

综观泥沙学科的发展过程,可以清楚的看到,许多基本理论早在20世纪80年代前就已基本建立。比如泥沙运动力学、悬移质泥沙运动、挟沙能力、含沙量沿垂线分布、河道演变、水库泥沙。相对来看,20世纪80年代以后,关于基本理论方面研究的亮点不是很突出,但泥沙数值模拟技术得到了很好发展,并已成为解决江河治理和水利工程建设中泥沙问题的重要手段。

从总体上看,我国在泥沙运动基本理论、水流挟沙能力、水库泥沙淤积等方面处于国际先进行列,泥沙数值模拟的理论基础也很扎实。但是将河流作为一个完整系统加以研究的观念落后于经济发达国家,这使得我国在河流生态健康、生态友好型的水利工程建设、环境泥沙等研究和实践都相对落后。在河流泥沙数学模型的标准化、通用化和商业化方面也远远落后。为使我国河流泥沙研究在国际上占据更重要的地位,建议加强下面几个方面的工作。

(1) 继续加强泥沙基本理论研究。我国在非均匀沙运动理论研究水平方面处于世界先进行列,然而由于这一课题属于泥沙研究的前沿问题,研究内容广、难度大,有些研究尚处于探索阶段,继续加强这方面研究是十分必要的。非均匀沙不平衡输沙条件下挟沙能力级配及有效床沙级配是非均匀沙不平衡输沙的重要组成部分,也是当前研究的前沿,今后应进一步研究非均匀沙的挟沙能力结构,冲淤条件下挟沙能力的多值性,出现单值的条件,以及如何确切表达。其次是非均匀沙挟沙能力与均匀沙的关系也是值得进一步研究的。

(2) 将河床演变与环境生态泥沙相结合。从发展趋势上看,泥沙学科与河流生态学科融合是必然的。早在20多年以前,为了分析、评估和量化人类活动对河流系统生态的影响,建立和发展了生态模型或栖息地模型。然而,由于认识和学科的限制性,以前的模型主要集中于河流内的流量过程评估,特别是最小流量问题,最多只考虑恒定条件下河床变形,而没有合理考虑流量动态变化过程和河床动态冲淤过程的影响,而这种动态过程对许多水生生物来说是至关重要的,特别是在卵石河床产卵的鱼类,它们对于河床颗粒大小、淤积物压密程度、淤积物厚度、细沙比例等都有特别要求。在这种情况下,生态模型的模拟成果是否可以作为决策参考,完全取决于对河床变形过程的模拟^[43]。由此可见,泥沙学科在现代生态模型中占有相当的地位,将泥沙运动研究成果与生态学结合在一起,可以大大拓宽泥沙学科的应用范围,开辟泥沙研究的新领域。

(3) 开发商业应用软件。目前,我国不少科研单位都在大量引进国外比较成熟的商业软件。国外的商业软件之所以能够比较快地打入国内市场,并不是因为它们在模拟能力上显著优于国内的软件,而是因为这些软件具有前后处理方便快捷,可视化程度高,计算成果能够动态显示,计算效率高,模拟功能全,网格灵活可变,易学易用等优点。国外的商业软件在水动力学计算方面已经相当成熟,但在泥沙和河床演变模拟方面尚需不断改进。相比而言,国内的软件虽然很多,有些软件的物理基础和基本原理处于国际领先地位,模拟成果常常优于商业软件,特别是在泥沙运动和河床演变模拟方面。然而,由于国内的软件多数是由个人或少数几个人开发的,功能比较单一,通用性较差,程序结构欠合理,计算效率不高,界面不规范,可视化和动态显示程度弱,限制了其推广应用。笔者认为,国内现有的不少软件离成熟的商业软件只差一步之遥,只要能够切实转变观念,建立稳定的研发队伍,投入一定的财力,相信在不长的时间里,一定会在泥沙商业软件中占有一席之地。

致谢:王崇浩同志也参与了此项工作。

参 考 文 献:

- [1] 窦国仁. 潮汐水流中悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4): 13- 24.
- [2] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [3] Hjelmfelt A T, Lenau C W. Non-equilibrium transport of suspended sediment[J]. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(HY7): 1567- 1586.
- [4] 张启舜. 明渠水流泥沙扩散过程的研究及其应用[J]. 泥沙研究, 1980, 复刊号: 37- 52.
- [5] Zhou J, Lin B N. One dimensional mathematical model for suspended sediment by lateral integration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124(7): 712- 717.
- [6] Rouse H. Modern conceptions of the mechanics of turbulence[J]. Trans. ASCE, 1937, 102: 436- 507.
- [7] Velikanov M A. Alluvial Process[M]. State Publishing House for Physical and Mathematical Literature, Moscow, 1958: 241- 245. (in Russian).
- [8] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[Z]. U. S. Geological Survey Professional Paper 422- I, 1966
- [9] Lausen E M. A concentration distribution fomula from the revised theory of Prandtl mixing length[C]//Proc. 1st Int. Symp. on River Sedimentation, Guanghai Press, Beijing, China, Vol. 1 1980: 237- 244.
- [10] Lane E W, Kalinske A A. Engineering calculations of suspended sediment[J]. Trans. AGU, 1941, 22: 56- 65.
- [11] 武汉水利电力学院水流挟沙能力研究组. 长江中下游水流挟沙能力研究[J]. 泥沙研究, 1959, 4(2).
- [12] 倪晋仁, 王光谦. 论悬移质浓度垂线分布的两种类型及其产生的原因[J]. 水利学报, 1987, (7): 60- 68.
- [13] Chien N, Wan Z. Mechanics of sediment transport[M]. Publisher: ASCE. 1999.
- [14] Einstein H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows[R]. Technical Bulletin 1026, U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C. 1950.
- [15] Ackers P, Whit W R. Sediment transport: new approach and analysis[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1973, 99(11): 2041- 2060.
- [16] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [17] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1996.
- [18] Yang C T. Incipient motion and sediment transport[J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1973, 99(HY10).
- [19] 郭庆超. 天然河道水流挟沙能力研究[J]. 泥沙研究, 2006, (5): 45- 51.
- [20] 曹文洪, 张启舜. 潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力的研究[J]. 泥沙研究. 2000, (5): 16- 21.
- [21] Leopold L B, Wolman M G. River channel pattern: braided, meandering and straight[R]. Physiographic and Hydraulic Studies of River U. S. G. S Professional Paper 282-b: 85, 1957
- [22] Chang H H. Fluvial processes, in river engineering[M]. John Wiley & Sons, Inc. 1988.
- [23] Edgar D E. The role of geomorphic thresholds in detemining alluvial channel morphology. River Meandering[C]// Proceedings of the Conference River' 83.
- [24] 尹学良. 弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J]. 地理学报, 1965, 31(4).
- [25] 许炯心. 水库下游河道复杂响应的试验研究[J]. 泥沙研究, 1986, (4).
- [26] Schumm S A, et al. Experimental study of fluvial system[M]. John Wily and Sons, NY 1987.
- [27] 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, (7).
- [28] 方春明. 分析河相关系时的补充条件分析[J]. 泥沙研究, 1999, (1).
- [29] Cunge J A. Feasibility of mathematical modeling of meanders. River meandering[C]//Proceedings of the Conference River' 83.
- [30] Charles E Smith. Modelling high sinuosity meanders in a small flume[J]. J. Geomorphology, 1998, 25: 19- 30.
- [31] Lewin J, Brewer P A. Prediction channel patterns[J]. Geomorphology, 2001, 40: 329- 339.
- [32] 胡春宏, 等. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [33] Mahmood K. Reservoir sedimentation[R]. Impact, Extent and Mitigation, World Bank technical paper. No 71, 1987.
- [34] Giovanni D C, Raymond L. Outline of the historical development regarding reservoir sedimentation[C]// Proceedings of 32nd Congress of IAHR, July 1-6, Venice, Italy, 2007.

- [35] Hydrologic Engineering Center (HEC). HEG-6 scour and deposition in rivers and reservoirs[Z]. Users' Manual, US Army Corps of Engineers, Davis, CA. 1977
- [36] 韩其为, 何明民. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型[J]. 泥沙研究, 1987, (3): 14- 29.
- [37] Festa J F, Hansen D V. Turbidity maximum in partially mixed estuaries: a two-dimensional numerical model[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1978, (7): 347- 359.
- [38] 李义天. 冲积河道平面变形计算初步研究[J]. 泥沙研究, 1988(1): 34- 44.
- [39] Nicholson J, O' Connor B A. Cohesive sediment transport model[J]. J. Hydr. Engrg., ASCE, 1986, 112(7): 621- 640.
- [40] Fang H W, Wang G Q. 3D mathematical model of suspended sediment transport[J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. 2000, 126(8): 575- 592.
- [41] Cao Z, Pender G, Wallis S, Carling P. Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(7): 689- 703.
- [42] 王光谦, 刘家宏. 数字流域模型[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [43] Schneider M, Kopecki I, Eisner A, Noack M. Linking morphodynamic and fish habitat modeling- case study Bodendorf. River Mur (Austria) [C]// Abstracts of 32nd Congress of IAHR. July 1-6, Venice, Italy, 2007.

Track investigation on several aspects of river sediment discipline

GUO Qing-chao, CAO Wen-hong, CHEN Jian-guo, FANG Chun-ming

(*Department of Sediment Research IWHR, Beijing 100048 China*)

Abstract: The river sediment discipline is a comprehensive technical science, which studies the rules of movement, erosion and deposition of sediment in flows, covering sediment transport mechanics, fluvial river morphology, engineering sediment, regulation of navigation channel and harbor, hyper-concentrated flows, debris flow and so on. On the basis of browsing massive research literatures published at home and abroad, the authors carried out a tracking investigation on the sediment discipline's historic evolution, major achievements as well as the development trend, with focus being laid on sediment movement, fluvial processes, reservoir sedimentation and numerical simulation technology. After analyzing and comparing the domestic and foreign researches, the authors put forward some proposals on development direction and issues worth paying more attention to.

Key words: discipline development; river sedimentation; fluvial processes; engineering sediment; numerical simulation technology

(责任编辑: 李福田)