

水库下游水沙变化与河床演变研究综述

傅开道¹, 黄河清², 钟荣华¹, 王兴勇³, 苏 斌¹

- (1. 云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 水库建设以满足人类日益增长的水资源及其利用的要求仍是当今世界, 特别是发展中国家在水利建设中的一项重要任务。建坝改变了上下游水流边界条件, 导致水沙输移变化, 同时也触发了河床形态发生相应的调整。自从20世纪30年代全球大规模修坝后, 关于此课题的研究就层出不穷。本文就此研究主题对国内外研究成果进行梳理与总结, 简要综述水库下游水流挟沙变异以及河床形态演变的研究历史与现状, 旨在对该领域的研究进展进行全面的归纳与总结。

关键词: 水沙变化; 河床调整; 水库下游; 研究综述

水库大坝将河流拦腰截断, 大坝尤其是梯级电站联合运营后巨大的调度功能对河流的径流起到巨大的调节作用, 改变了下游天然的水文循环和泥沙输送过程, 而水沙过程对于河流地貌系统结构和功能的维持起着至关重要的作用^[1]。水流是塑造河床的基本动力, 径流大小、变幅、各流量级持续时间等要素决定了水沙两相流的造床动力特征; 泥沙则是改变河床形态的物质基础, 沙量的多少、颗粒的粗细影响着河床演变的方向, 不同的水沙组合特征决定了河床的平面形态、断面特征、河弯数量、蜿蜒度、植物结构等。水、沙和河床是一个整体, 相互作用, 相互影响^[2]。河流水库的修建改变了下游水沙过程, 破坏原有的水文平衡, 必然会引起水沙输移特性改变、河道形态的调整^[3]。但由于不同区域的河流, 同一河流的不同河段存在着地质地貌、植被、人为活动等个体差异及区域气候环境的差异, 再加上不同水库的修建目的、规模大小和运行方式不一样, 因而所引起的水库下游水沙过程变异与河床响应也不尽相同。有关学者在相关领域开展了大量研究。本文从水库下游水沙过程变化、河床和微地貌演变两大方向的研究动态开展综述。

1 水库下游水沙变化

河流上游水库的修建改变了水库下游自然的水文过程, 下游河流的各种变化都可归因于水沙过程的改变^[3-4]。钱宁等认为上游水库的修建对下游水文过程的影响: 在来水条件方面, 主要表现为洪峰流量减少, 枯水流量增大, 径流的年内年际变幅减小, 以及接近恒定流状态的流量持续时间延长; 在来沙方面, 主要变化是下泄沙量减少, 下游河道的含沙量将会显著降低, 泥沙组成变细^[5]。随着全球大中小河流建库方兴未艾, 众多研究聚焦于直接受水库

收稿日期: 2011-03-26; 修订日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40801218, 40788001); 云南省中青年学术技术带头人后备人才计划 (2009CI050); “十二五”国家科技支撑计划重大项目 (2010BAE00739) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40801218, 40788001; The Reservers' Training Projects of Yunnan Mid-Youth Scientific Technical Leader, No.2009CI050; National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-Year Plan Period, No.2010BAE00739]

作者简介: 傅开道 (1976-), 男, 海南陵水人, 副研究员, 博士, 从事水文地理学、河流泥沙与河床演变研究。

E-mail: kdfu@ynu.edu.cn

调节影响的下游河道径流和输沙过程变化。

1.1 径流过程变化

水库对河流流量的调节,将严重影响大坝下游的径流过程。Petts认为修建水库对水文过程的显著调节作用是对河流影响范围最大、干扰最为深远的人类活动^[6]。据Graf 1999年的统计,全美共有约75000座水库,它们对河流径流过程的干扰数倍于全球气候变化的影响^[7]。早在20世纪60、70年代,学者们就对水库下游径流过程的变化特点进行了分析,发现水库改变了径流过程的多重属性,在不同时空尺度上影响着河流的自然水文过程。Lauterbach等的研究表明在欧洲中部的许多河流上,由于受水库调节的影响,50年一遇的洪峰流量减小了20%^[8]。Dolan等的研究表明,在美国的科罗拉多河Glen Canyon大坝下游,建库前10年一遇的洪水其流量减小了75%^[9]。Williams等曾对美国21座水库进行过分析,表明洪峰流量削减非常明显,建库后平均为建库前的45%,年平均流量和出现机遇为5%的洪水流量,建库后减少约10%,枯水流量则变化更大^[10]。

此外,水库还会改变流量过程季节性分配特点,许多河流上,由于水库的调节作用,使得流量季节性变化的特点消失,变为较为单一的恒定过程^[6]。例如江西万安水库来水量相同的年份,建库前1959年与建库后1995年相比,流量在1000~2000 m³/s流量级年出现天数,前者为69天,后者为122天;同样1954年与1996年相比,前者出现天数为41天,后者为110天^[11-12]。又如大渡河,建库后历年最小流量平均值为329 m³/s,建库前1972-1987年年最小流量的平均值为114 m³/s,其中历年最小值为18 m³/s^[13]。当然,对于水量少,调节能力弱的径流式电站,其下泄径流年内分配的总趋势是枯水期减少,洪水期反而增大,如广西柳江上游融江上的麻石电站^[14]。

1.2 输沙过程变化

水库不仅改变了径流过程,对输沙过程也有着显著影响。一般而言,流域上游的人类活动能敏感的被下游泥沙所记录,其中电站建设的下游泥沙响应表现为,建设期的增沙效应以及建成后的拦沙效应^[15-16]。据统计,对于大多数河流来说,其源头集水区域是泥沙产输的主要来源,提供了超过75%的沙量^[17]。尽管工程的施工会增加泥沙的产输,有些人为活动引起的产沙量增加甚至超过了50%^[18],但水库的修建,切断了河流的连续性,截断了泥沙从上游源头向下游输移的通道,使得大部分甚至是全部的泥沙被拦截在库区,无法输送到下游。据统计,水库的拦沙效率从33%到99%变化不等^[19]。正是由于水库这种巨大的拦截作用,使得下游沙量显著减小。官厅水库自1956年开始蓄水以来,三年内永定河下游的含沙量减少到不及建库前的十分之一^[20]。黄河三门峡水库在初期蓄水运用阶段,经过16个月的清水冲刷,下游河道的含沙量也大幅度减少,同样的情况也存在于丹江口水库下游^[21-22]。

水库下游的水沙输移变化与河道冲淤过程紧密联系,受下泄水沙过程、床沙组成、河型及其变化、河道工程等因素的影响,而且在向新平衡状态转化的动态过程中因素之间存在着相互干扰。多位学者开展了河道冲刷条件下含沙量恢复过程与机理研究^[23-24]。虽然这些研究都表明坝下输沙量不会超过建库前,但由于问题本身的复杂性,长期以来对水库下游的水沙输移规律一直未形成统一的明确认识^[10, 25]。如多个水库下游出现过对下游冲刷能力估算过高的现象,尼罗河阿斯旺高坝建设之初,埃及专家预测下游河道下切3~8.5 m,近40年过去,测量和分析表明下游河道平均下切只有0.25 m^[26-27]。对下游冲刷估计过甚也常常使人们将自然状态下本已存在的各种演变,如侧向的河岸侵蚀和横向摆动、洲滩消长等变化,归咎于水库对水沙条件的改变^[28]。因此,根据实测资料类比或统计分析,揭示水沙条件变化后的水沙输移的一般性规律还是很有必要的。

2 河道调整和微地貌演变

当前河流普遍受到建库干扰,需要预测水沙变化与河床相互作用的规律及机理,以及由此引起的断面形态变化、河型与河势的调整等,这是防洪、航运等水利工作所面临的紧急任务。前人对水库与下游河流地貌相互作用的研究,主要从(1)水沙变异与河床演变的关系;(2)河床纵向演变;(3)河床的横向变形;(4)河床的微地貌演变这四个主要方面开展,以下内容就按这四方面的研究进展进行梳理和总结:

2.1 水沙变异与河床演变的关系

一定的河道形态是来水来沙与河床长期相互作用的结果。水沙变化后,河流将通过自动调整来适应新的水沙条件。水流是塑造河床的直接动力,径流水平、变幅、各流量级持续时间等要素决定了水沙两相流的造床动力特征,泥沙则是改变河床形态的物质基础,沙量的多少、颗粒的粗细影响着河床变形的方向,不同的水沙组合特征决定了河床的平面形态、断面特征^[2, 28]。水库的径流调节和沙量拦截作用极大地改变河流的天然属性,造成径流、输沙过程两方面的变异。水沙变异破坏了河流原有的平衡,引起下游冲积河流的再造床作用,河床整体下切、滩槽演化、侧向冲蚀和河道摆动,并且河床下切将引起支流侵蚀基准面和汉道分流分沙变化问题,对防洪、航运、灌溉、滩地利用等很多方面带来了一系列的影响^[22, 29-32]。河流水沙和河床之间表现为一个整体联系和互相影响的关系。水流、泥沙是河流系统的动力因素,它在输移过程中塑造着各种河流地貌形态,并通过与河床相互作用,对河床演变起控制作用。自然情况下,水沙过程和河床演变表现出其固有的特性,它们之间维持着一种动态平衡,河流系统的各项功能,都能够适应于这种平衡。一旦水沙过程被干扰并且超过一定的限度,就会打破原有的平衡,引起河流系统的整体响应。认识河流水沙输移及河床演变规律,是研究水沙变化下河流生态、环境响应的基础^[2]。

水库下游水沙变异的造床关系研究受到众多学者的关注。学者们对水库下泄清水对河床的再造床复杂作用,包括下游河床冲刷与粗化机理、冲刷粗化起动流速计算、粗化输沙率计算、粗化层级配计算、极限冲刷深度计算及冲刷后水位降落计算等方面都开展了详尽研究^[33-36]。王兆印等^[37]对比分析了水库下泄清水与水工建筑物造成的局部冲刷的不同,通过对各种泥沙大量实验,证明了河床冲刷率正比于水流提供的冲刷功率并依赖于泥沙粒径和容重,提出了冲刷率公式。黄河清^[38-40]基于复杂性理论分析水沙与河床形态相互作用的平衡规律,利用变分法研究发现在平衡条件下冲积河流的床面剪力变化值的无量纲数和宽深比之间存在线性关系,冲积河流的河床平衡状态对输沙函数响应极为敏感。在理论分析的同时,也有很多研究结合了工程实际展开考察。杨克诚^[41]分析了丹江口水库清水下泄造成下游沿程不同程度刷深后,含沙量及级配的变化特性。陈枝霖^[42]对比了小浪底清水下泄冲刷计算成果与三门峡水电站实测冲刷资料,对小浪底水库下游的冲刷发展,防洪形势进行了分析判断,预估了小浪底对下游窄河道减淤的作用。刘东生等^[43]根据汉江中下游历年实测河道水文资料,分析了丹江口水库在建库前、滞洪期、蓄水后坝下冲刷的不同特点。乐培九等^[44]通过沙质河床清水冲刷水槽试验,揭示了清水冲刷,河床重建平衡的机理。通过水槽试验和理论分析,根据沙量守恒原理,从宏观上建立了清水冲刷深度估算公式^[45]。

国内外此类研究一般朝着两个方向开展,一是水沙造床的判别方法及其优化,二是具体研究区域水沙造床平衡关系分析。现有研究多从输沙力公式切入,缺乏对河流平衡体系的耦合,不能保证水沙作用对河流平衡体系的较好适应。另外,河床中参与造床的推移质,其推求公式往往是半经验性的,计算结果是否合理,精度能否得到保证,目前难于评价。

2.2 河床的纵向变化

河床的纵向形变主要是由河床的冲刷引起的,目前国内外对河床纵向形变的研究主要

集中在河段冲刷发展距离及沿程含沙量恢复上。在河道上修建水利枢纽以后,其下游河床将根据含沙量大小发生两种不同类型的冲刷:对于含沙量较小的河流,修建水库后,由水流的紊动性加大,使坝下原处于临界状态的泥沙起动机率增加,随着流程的增加又由于边界条件的制约,水流逐渐趋于平稳,起动的一部份泥沙停止运动,使坝下游的一部份河段产生冲刷,另一部份河段产生淤积。当受水流紊动影响较大的近坝河段泥沙冲刷平衡后,淤积河段挟沙能力转化为主要矛盾时,整个河段才转为冲刷;对于含沙量较大的河流,由于水库对泥沙的拦截作用,大量泥沙淤积于库内,改变了水库下游河流输沙特性,引起下游河道的再造床过程,而引起长距离冲刷。现有的研究大多从现象分析、机理模拟或3S技术使用等揭示水库下游河道水沙变化及河床冲刷特性等方面开展工作,然而在机理方面的研究则显得不足^[23, 37, 46-49]。

2.2.1 水库下游河床纵向变化现象研究 关于水利枢纽下游河床冲刷现象主要是河床自上而下普遍冲刷、含沙量显著降低、河床显著粗化、纵比降调整等方面。同样的水沙条件变化,对于不同的河床边界可能造成不同的响应,而且这种响应由于冲刷历时的长短也可能动态变化。关于这种动态性,一般的研究认为水库下游河床与水沙条件两者之间的不适应性在建库初期达到最大,因此,河床变形也以初期最为显著,并因时递减^[10]。冲刷过程中,随着河床及岸滩抗冲特性的变化,形态调整也产生变化。根据 Williams 等对美国河流的统计,截流后初期河床下切冲刷幅度最大,之后随着河床粗化和比降调平,冲刷幅度逐渐减缓^[10]。许炯心以同流量的清水冲刷原始河床来模拟建库后的河床冲刷,发现初期以下切为主,之后出现以侧蚀为主的阶段,宽深比先减后增^[50]。对于纵剖面比降的变化,一般资料均显示是初期以近坝段河床迅速调平为特征,之后逐渐向下游缓慢发展^[51]。水库下游的调整在趋向平衡的过程中,还会因为水文条件的变化出现间歇性的变缓和加速现象,完全达到平衡状态甚至需要上百年时间^[52]。从减小挟沙能力和流量调平两种作用来看,有研究表明,在建库初期以减小水流能量而引起的河床变形为主,而随着时间的延续,断面形态逐渐向适应调节后的流量过程发展^[53]。

河床沿程冲刷的深度受到泥沙补给条件、河床抗冲性变化等的影响。随着河床冲刷的进行,下伏卵石层可能会逐步暴露,或者床沙粗化形成保护层,从而对河床调整过程产生深远的影响。埃及尼罗河上阿斯旺水坝修建以后,大坝下游河段实际上观察到的下切深度仅为0.7 m,比不同的研究者所预测的数值(2.0~8.5 m)要小得多, Schumm 等认为这与河床以下埋藏着不连续的卵石层有关^[54]。许炯心运用地貌学方法对汉江丹江口水库下游河床调整过程中下伏卵石层的作用进行了系统的分析,下伏卵石层使河床下切受到抑制,随着卵石层的暴露,形成抗冲层,河床糙率将急剧增大,局部河床可能采取加大比降的方式进行补偿^[55]。

2.2.2 水库下游河床纵向变化模型预测 关于水库下游河床演变发展的分析及预测,目前存在着概念型模型、物理模型、机理型模型等。

(1) 概念型模型通过大量观测资料建立各影响因素与河床纵剖面或冲刷深度之间的关系,具有一定预测功能但经验性强。

(2) 物理模型作为现代河流动力地貌学研究的一种必需手段,已经广泛运用于河床演变学的各种问题研究中。其中河工模型因其可重现历史状况、弥补和扩充测验资料、多方案对比、局部问题细化、未来预测等优点,是最为常用的一种物理模型^[56-59]。

(3) 机理型模型也叫数学模型,是通过求解描述河床冲刷过程的封闭方程组得到冲淤的沿程变化,目前得到了大量应用。在对三峡工程的论证过程中,对下游长河段冲淤发展的预测即采用了这种方法。虽然数学模型是水流运动、泥沙输移和河床变形方程为基础的,但其中仍存在经验成分,对于含沙量恢复、河床粗化过程的模拟,还需要借助一些经验模式和参数。计算机性能的快速提高和数值计算技术的发展促进了数学模型的推广,由于不仅能够提供河床变化的最终幅度,而且能够详细描述出冲淤在空间上的分配以及时间上的发展过程,数

学模型在大坝下游河床变形预测中得到了大量应用。毛继新等根据泥沙起动及河床粗化理论公式,建立了水库下游河床粗化数学模型,以研究水库下游河道极限冲刷深度及粗化层级配,该模型计算较以往模型更简捷方便,能实现在缺乏实测床沙级配条件下研究水库下游局部河段冲刷^[47]。在实际应用方面,张耀新等通过建立一维非恒定悬沙数学模型,对赣江万安水电站下游河床冲刷的发展趋势及其对航道的影响进行了预报计算和分析^[60]。李义天等应用一、二维嵌套水流泥沙数学模型对三峡建库后宜昌至沙市河段河床冲刷及其对卵石浅滩的影响进行了数值模拟研究^[61]。

2.2.3 3S技术辅助分析 借用3S技术来建立模型进行河床演变分析。进入20世纪90年代以后,随着地理信息系统产业的出现和数字化信息产品在全世界的普及,GIS逐渐被应用到河床演变领域,进行河床演变的变形统计、计算、分析和可视化表达。GIS技术用于河床演变研究与传统河流模型方法完全不同,其有很强的宏观性、实时性,且其效果也非常直观,借助GIS空间分析功能可较为准确的定量分析河床演化趋势^[62]。信息模型主要是从河床演变的结果,即水下地形数据出发,来具体阐述河床演变,并研究这些演变与某些影响因素的关系。丁贤荣、张增发等应用先进的地理信息系统工具软件,对长江镇扬河段多年水下地形图进行信息化处理,通过对原始测点三角网插值产生不规则三角网模型,继而转化成栅格数据模型,在DEM的基础上,生成等高线、河道2D、3D模型和任意断面的形态图,据此对长江镇扬河段河床演变做了系统的分析^[63-64]。陈一梅基于现代技术(RS、神经网络和GIS)建立数学模型、预测模型对河道浅滩演变进行了研究,取得良好效果^[65]。吴华林等收集了自1842年至1997年的多幅不同年代的长江口南北港地区海图资料,利用地理信息系统进行处理,建立不同时期的长江口南北港水下数字高程模型,以此作为基础资料计算了南北港河槽容积,分析了南北港河槽容积及分叉口演变过程^[66]。此外,安徽省水利厅构建了安徽数字长江信息系统,利用GIS技术手段与平台构建了一套综合管理长江安徽段河道,分析其河床演变规律、监测河道变化等的软件系统。王强^[67]、武小勇^[68]、黄志文^[69]、徐志扬^[70]、贺巧宁^[71]和赵吉祥^[72]等分别基于ArcGIS平台对河床、洲滩冲淤,演变进行了系统、全面的探讨与分析。最近,刘杜娟等借助GIS技术,对1980-2005年间的6幅海图进行数字化分析,建立DEM,分析了长江口南支下段河势演变及稳定性^[73]。

2.3 河床横向变形

水库下游的横向变形涉及主流摆动,河势变化,河宽尺度、河道曲率、河型的调整等。横向调整可能威胁沿岸工程设施,但又对维持生态多样性起着重要作用。河流横向的稳定性和变化规律是许多领域研究的焦点,包括河流地貌学界、河流工程界、河流生态学界等。

2.3.1 横向变形及其驱动分析 大量观测现象表明,对于不同河型,横向变化的形式、幅度,乃至其发生发展的机理都不尽相同。Friedman指出,这些不同的变化形式除了取决于来水来沙之外,与原有的河型、河床形态等环境条件也存在关系^[74]。这是因为不同平面形态的河流,其横向变化的速率,导致横向变化的原因机理均不同。来水来沙是河床调整的原始动力和物质条件,而河岸一方面是来水来沙长期作用的结果,另一方面也是限制河床调整的制约因素。Nanson等认为,水流能量 QJ 对河床的侧向活动性影响甚大,除了水流能量之外,河岸抗冲性对河床横向移动的作用更大,并提出以河床 D_{50} 作为反映抗冲性的指标^[75]。河床横向变化包含着河岸相对于水流条件的抗冲性,简单地用粒径值表征以上复杂关系显然是不合适的,还有学者用更复杂的指标诸如河岸组成中粘土、细沙含量等来表征^[76],但其合理性还有待深入研究。关于不同河床平面形态对横向变化率的影响,也有多位学者从实测资料总结了一些初步的认识。Brice收集整理了美国200多条河流的横向移动速率与河床平面形态的资料发现:不同类型的河道其横向摆动率也不同,宽度均匀的弯曲河床活动性最小,横向最稳定;宽度过大的弯曲或蜿蜒河段,河弯与直过渡段之间宽度差别较大,因而横向极不稳定^[77]。Hickin发现河弯在蠕动前进过程中 R/B 值存在一个最低值,一旦河弯的 R/B 值超过这

一临界值,将很快通过调整使其降低到临界值附近,此现象反复发生^[78]。关于水沙条件变化后,河床横向调整速率的研究目前仍然限于一些经验方法。Williams等在整理美国河流上大坝下游河床变形资料时发现,河宽变化率是非线性变化的,并拟合出了经验型的双曲函数^[10]。Richard假定河宽变化率与当前河宽与平衡河宽的之间的差别程度成正比,从而构造出了描述河宽变化率的指数函数^[79]。与此相类似,Gilvear也提出了预测弯道横向移动速率的关系式,认为弯道移动速率在某种形态下达到最大^[80]。

一般来说,修建水利枢纽以后各种条件的变化是有利于使下游河道朝较为稳定的方向转化的。流量过程的调平和比降的减缓,将使河道的输沙强度减弱;下泄沙量的减少将使原河道转为侵蚀下切;滩槽高差的加大和床沙的粗化,将增加河床的抗冲能力,这些都是有利于削弱河道演变强度的。然而,河型是否能发生转化,还取决于清水下泄的过程、历时长短和复杂多样的区域边界条件。同样的水沙条件变化,对于不同的河床边界可能造成不同的响应,而且这种响应由于冲刷历时的长短也可能动态变化。Shields曾对美国Missouri河上Fort Peck Dam下游的侧向变化与各因素进行了相关分析,建库后横向调整速度与宽度、距离大坝距离紧密相关^[72]。Begin从理论上分析得出,随着水流能量增加,低能量顺直微弯河流发生侧蚀而趋于蜿蜒,随着能量进一步增加,河流动力半径增大,凸岸边滩遭切割,曲率将重新减小而趋于分汉游荡^[81]。Nicola Surian调查发现意大利多条河流上水库下游都出现了河床下切和缩窄现象^[82],一些研究成果也显示建库后河道横向调整速度小于建库前^[83]。然而,由于水库下游的河床调整的复杂性,不同河流上以及同一河流上不同时间、不同部位,河道横向调整并不是呈单一变化。丹江口水库下游就出现过先变窄、后变宽的过程^[84],在美国Yampa河的支流Elkhead Creek上,也出现建库后河道横向摆动速度大于建库前的情况^[85]。当前研究对于解释水库下游出现的复杂河床形变有一定帮助,但还需结合各种影响因素的变化过程,以及河流自身特有的边界条件和平面形态特征,深入研究水库下游动态变化过程中的一般性规律。

2.3.2 局部冲刷研究 除了河床平面上的宏观变化,河岸的局部冲刷也影响着河床演变的发展。20世纪70年代中期以前,局部河岸冲刷问题仍然是一个研究相对较少的领域,但近年来已取得了一定的进展。河流崩岸是来水来沙条件、河道冲淤演变、岸边土壤地质构造等诸因素共同作用的结果。其中河岸土质条件是内因,水流条件是外因。目前从不同因素对崩岸机理进行研究的成果较多,但对崩岸机理多种影响因素进行综合研究的成果较少。国外学者直接研究崩岸的并不多,主要是从研究河岸的侵蚀与河岸的稳定性出发。Simons等认为,水力因素是影响河岸冲刷的最主要因素,且河岸冲刷又是影响崩岸的主要因素,因此,崩岸的最主要影响因素是水力因素^[86]。Thorne认为,在一定水流条件下,河岸坡角泥沙的供给与坡角处因水流作用而引起泥沙输移之间的关系是决定各种类型崩岸的主要因素^[87]。有学者在Hasegawa研究非粘性河岸崩塌的基础上,从水沙运动方面考虑了非粘性河岸的崩塌过程^[88-90]。唐日长等根据荆江河道实测资料,分析了影响弯曲河道中凹岸崩坍强度的主要因素,认为汛期水流对崩岸起着主要作用,崩岸强度主要决定于水流输沙能力^[91]。王永^[92]、王家云^[93]等认为安徽河段崩岸的主要影响因素是水流作用、河岸地质条件及高低水位的突变产生的外渗压力。冷魁认为地下水运动对崩岸仅起抑制或促进作用,窝崩大多数发生在汛后或枯季^[94]。李宝璋分析长江南京河段窝崩成因时,提出形成窝崩的动力是大尺度纵轴(水流方向)螺旋流^[95]。

2.4 河道微地貌演变

河漫滩、边滩、心滩、深槽等构成河床的主要地貌组成单元,是河流生物的重要栖息地,其形态、面积、基质、流速、水深等因素都直接决定着栖息地的质量以及各种生物的生命过程^[96-98]。微地貌单元的演变与河床边界条件、水力输沙特性、河道形态等因素紧密相关,目前关于这些微地貌单元演变的研究已蓬勃开展^[22, 31, 99-105],其中许多是针对山区河流,或者是针

对具体的某个微地貌单元,关于平原河流的微地貌单元存在和发展的主要制约因素和一般性规律缺乏系统的总结,而建库后各地貌单元可能的变化趋势研究更为少见。对于研究微地貌单元变化规律的方法而言,实测资料收集和分析是最有成效的,但由于关于这方面的野外资料尤其是建库后的资料较为缺乏,二维数学模型成为较好的选择。在数值模拟过程中,如何能将水位、流速等水力要素变化以及单元演变特性通过模型参数准确地反映将直接影响着对建库后地貌单元演变趋势预估的精度。

我国是世界上拥有大坝数量最多的国家,对于水电大坝开发引发的下游水文过程变异与河床演变展开了非常广泛、系统、深入的研究。国内武汉大学的黄颖、何用、张为、孙昭华等对水库下游的水沙变异与河道系统响应的机理进行了系统研究,总结出大坝开发的下游水沙过程与河床形态的一般变化规律^[2-3, 5, 29]。研究结果认为水库下游河床在水沙条件发生较大变化时,河床调整十分迅速,并且调整随时间的发展是非线性的,在最初的时刻强度最大,逐渐减缓直至达到新的平衡;水库下游河床随着水沙条件变化的幅度,河床形态的调整速率具有阶段性。随着建库后下泄沙量急剧减少以及出库泥沙细化,河道含沙量显著减小,河床冲刷使输沙率沿程增大,悬移质泥沙粒径明显粗化。水库下游悬移质沙量主要由沿程冲刷补给。清水下泄后,下游河道将发生冲刷,冲刷所及的范围往往可以达到很长的距离,而且随着上段泥沙补给的减少,冲刷河段还将不断向下游延伸,冲刷发展的距离与水库下泄流量成正比。冲刷过程中,床沙粗化,河床下切,河道调整。

3 结语

当前对于水库下游水沙过程与河床形态的影响,已经取得了非常多的成果。而针对不同水库下游出现的不同水沙变异与河道响应现象,应对建库后下游水沙过程变化与河道调整的一般规律进行进一步总结和归纳,这对于水库下游水沙和河床动态变化研究的深入和变化趋势的预估十分必要。同时,由于不同河流,不同河段的个体和局部差异,以及不同大坝修建目的、运行方式等的不同,对于某水利工程的下流水沙变异与河床响应应具体问题具体分析。

展望未来,本领域今后的研究将侧重于传统或改进后的水沙造床理论及公式在水库下游河流系统再平衡研究中的应用精度问题的深入探讨。同时,全球或区域气候变化对水文循环和水资源系统已经产生不可低估的影响。如何综合考量气候变化以及其它人类活动干扰背景下,水库对下游水沙变化与河床演变的影响?针对此课题的研究前期鲜见报道。因此,耦合河道水沙、河床对流域气候变化,其他人类活动,水库建设三种主要驱动因素的响应研究,应该是该领域今后研究工作的一个创新方向。

参考文献 (References)

- [1] Benn P C, Erskine W D. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Applied Geography*, 1994, 14(2): 153-168.
- [2] He Yong. The interaction between flow & sediment process and riverine environment [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. [何用. 水沙过程与河流生态环境作用初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.]
- [3] 张为. 水库下游水沙过程调整及对河流生态系统影响初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006. [Zhang Wei. Flow & sediment regime alteration downstream dam and its impacts on riverine ecosystem [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.]
- [4] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. *Fluvial Process Theory*. Beijing: Science Press, 1987: 584-590. [钱宁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987: 584-590.]
- [5] Huang Ying. Channel adjustment downstream dams and its protective measures [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. [黄颖. 水库下游河床调整及防护措施研究. 武汉: 武汉大学, 2005.]
- [6] Petts G E. *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. New York: John Wiley, 1984: 344.
- [7] Graf W L. Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources*

- Research, 1999, 35(4): 1305-1311.
- [8] Lauterbach D, Leder A. The influence of reservoir storage on statistical peak flows. IASH Publication 85, 1969: 821-826.
- [9] Dolan R, Howard A, Gallenson A. Man's impact on the Colorado River in the Grand Canyon. *Am. Scientist.*, 1974, 62(4): 392-402.
- [10] Williams G P, Wolman M G. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Professional Paper 1286. US Geological Survey, Washington, DC, USA, 1984: 83pp.
- [11] Wei Zhilin, Luo Chun, Wang Yunhui. Study by way of two-dimensional mathematical model on riverbed deformation in the lower stream of Wanan reservoir on Ganjiang River. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2001, (4): 308-310. [韦直林, 罗春, 王运辉. 赣江万安水库下游河床变形二维数学模型研究. *广西大学学报: 自然科学版*, 2001, (4): 308-310.]
- [12] Lai Hougui. The dam down stream bed variation and affection after Wanan reservoir has been operated for five years. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 1995, (3): 163-166. [赖厚桂. 万安水库运行5年来坝下游河床变化及其影响. *江西水利科技*, 1995, (3): 163-166]
- [13] You Miao. Study on the united optimal dispatching of cascaded hydropower plant in lower reaches of Dadu River Basin [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. [尤渺. 大渡河流域下游梯级电站发电优化调度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.]
- [14] Tang Zhaohua. Impacts of hydro plant instability to downstream navigation: Rongjiang River case. *Port & Waterway Engineering*, 1981, (5): 20-28. [唐兆华. 从融江看水电站不均匀泄流对下游航道的影响. *水运工程*, 1981, (5): 20-28.]
- [15] Han Qiwei. Reservoir Sedimentation. Beijing: Science Press, 2003: 643pp. [韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003: 643pp.]
- [16] Wang Guangqian. Advances in river sediment research. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2): 64-79. [王光谦. 河流泥沙研究进展. *泥沙研究*, 2007, (2): 64-79.]
- [17] Petts G E, Gurnell A M. Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology*, 2005, 71(1/2): 27-47.
- [18] Nilsson B. The influence of man's activities in rivers on sediment transport. *Nordic Hydrology*, 1976, 7(3): 145-160.
- [19] Rausch D L, Heinemann H G. Controlling reservoir trap efficiency (Sedimentation). *Transactions of the ASAE (USA)*, 1975: 6154-6159.
- [20] River Institute of Water Conservancy and Hydropower Research Institute. Downstream Channel Adjustment after the Completion of Guanting Reservoir on Yongding River. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1960, 1-82. [水利水电科学研究院河渠研究所. 官厅水库建成后永定河下游的河床演变. 北京: 水利电力出版社, 1960, 1-82.]
- [21] Pan Xiandi, Li Yong, Zhang Xiaohua et al. Downstream Channel Adjustment after Reservoirs Construction on Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006: 458pp. [潘贤娣, 李勇, 张晓华等. 三门峡水库修建后黄河下游河床演变. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 458pp.]
- [22] Pan Qingshen, Zeng Jingxian, Ouyang Lutai. Fluvial process downstream of Danjiangkou Reservoir and its effect on the navigation channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982, (8): 54-63. [潘庆荣, 曾静贤, 欧阳履泰. 丹江口水库下游河道演变及其对航道的影响. *水利学报*, 1982, (8): 54-63.]
- [23] Liu Jinmei, Wang Shiqiang, Wang Guangqian. A study on non-equilibrium sediment transport process of long distance erosion in fluvial river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (2): 47-53. [刘金梅, 王士强, 王光谦. 冲积河流长距离冲刷不平衡输沙过程初步研究. *水利学报*, 2002, (2): 47-53.]
- [24] Han Qiwei, He Mingmin. A study on coefficient of saturation recovery. *Journal of Sediment Research*, 1997, (3): 32-40. [韩其为, 何明民. 恢复饱和系数初步研究. *泥沙研究*, 1997, (3): 32-40.]
- [25] Li Guoying. The Yellow River water and sediment regulation. *Yellow River*, 2002, 24(11): 1-5. [李国英. 黄河调水调沙. *人民黄河*, 2002, 24(11): 1-5.]
- [26] Cao Wenhong, Chen Dong. Sediment response and enlightenment from the Aswan High Dam. *Journal of Sediment Research*, 1998, (4): 79-85. [曹文洪, 陈东. 阿斯旺大坝的泥沙效应及启示. *泥沙研究*, 1998, (4): 79-85.]
- [27] Shalash S. Degradation of the River Nile. *International Water Power and Dam Construction*, 1983, 35(8): 56-58
- [28] Phillips J D. Toledo Bend Reservoir and geomorphic response in the lower Sabine River. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 137-159.
- [29] Sun Zhaohua. River system responses to flow & sediment regime variation and its function assessment. Wuhan: Wuhan University, 2004. [孙昭华. 水沙变异条件下河流系统调整机理及其功能维持初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.]
- [30] Timothy J R, Paul P H. Downstream hydrogeomorphic changes along the Macquarie River, southeastern Australia, leading to channel breakdown and floodplain wetlands. *Geomorphology*, 2010, 118: 48-64.
- [31] Hu Weizhong, Zhong Zhiyu, Guo Luzhi. Influence of the Three Gorges Reservoir on the downstream flood regulation and

- storage in middle and lower reaches of Yangtze River. Yangtze River, 1996, (4): 36-37. [胡维忠, 仲志余, 郭履炽. 三峡水库对长江中下游洪水实时调蓄作用分析. 人民长江, 1996, (4): 36-37.]
- [32] Amy E D, Joshua B L, Mark C M. Channel evolution on the dammed Elwha River, Washington, USA. *Geomorphology*, 2011, 127: 71-87.
- [33] Wang Zhanqiao, Chen Zhongyuan, Li Maotian et al. Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam. *Geomorphology*, 2009, 113: 217-229.
- [34] Jose C S, Debora P M, Meurer M. Changes in a large regulated tropical river: The Parana River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, 2009, 113: 230-238.
- [35] Nira L S, Carl E R, Francis J M. Short and long-term changes to bed mobility and bed composition under altered sediment regimes. *Geomorphology*, 2006, 76: 43-53.
- [36] Franklin T H, Paul F H. Downstream trends in sediment size and composition of channel-bed, bar, and bank deposits related to hydrologic and lithologic controls in the Llano River watershed, central Texas, USA. *Geomorphology*, 2009, 112: 246-260.
- [37] Wang Zhaoyin, Huang Jinchi, Su Dehui. River channel scour and scour rate of clear water flow. *Journal of Sediment Research*, 1998, (1): 1-11. [王兆印, 黄金池, 苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率. 泥沙研究, 1998, (1): 1-11.]
- [38] Huang H Q, Chang H H, Nanson G C. Minimum energy as the general form of critical flow and maximum flow efficiency and for explaining variations in river channel pattern. *Water Resources Research*, 2004, W04502, doi:10.1029/2003WR002539.
- [39] Huang H Q, Chang H H. Scale independent linear behavior of behavior of alluvial channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132: 772-780.
- [40] Huang Heqing. A mathematical-physical analysis of the sensitivity of the equilibrium condition of alluvial rivers to sediment transport functions. *Science Paper Online*, 2007, 2(9): 629-634. [黄河清. 冲积河流平衡条件对输沙函数敏感度的数理分析. 中国科技论文在线, 2007, 2(9): 629-634]
- [41] Yang Kecheng. Sediment concentration characteristic caused by clear water scour at downstream of Danjiangkou Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 1989, (1): 66-77. [杨克诚. 丹江口水库清水下泄冲刷含沙量的特性分析. 泥沙研究, 1989, (1): 66-77.]
- [42] Chen Zhilin. Effect of construction of Xiaolangdi Reservoir on the sedimentation in the lower Huanghe River. *Yellow River*, 1992, (2): 9-12. [陈枝霖. 小浪底水库的修建对下游河道冲淤的影响. 人民黄河, 1992, (2): 9-12.]
- [43] Liu Dongsheng, Xiong Ming, Dong Wei. Analyze on the scouring characteristic of clear water and silty water in downstream of Danjiangkou Reservoir. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 1998, 19(23): 23-26. [刘东生, 熊明, 董伟. 丹江口水库下游浑水与清水冲刷特点对比分析. 水利水电快报, 1998, 19(23): 23-26.]
- [44] Yue Peijiu, Zhu Yude, Cheng Xiaobing et al. Study on the process of river-bed adjustment caused by clear water scouring. *Journal of Waterway and Harbor*, 2007, 28(1): 23-29. [乐培九, 朱玉德, 程小兵 等. 清水冲刷河床调整过程试验研究. 水道港口, 2007, 28(1): 23-29.]
- [45] Yue Peijiu, Cheng Xiaobing, Zhu Yude et al. Estimation method of scouring depth of lower reach of hydro-junction. *Journal of Waterway and Harbor*, 2007, 28(2): 96-102. [乐培九, 程小兵, 朱玉德 等. 枢纽下游河床冲刷深度估算方法. 水道港口, 2007, 28(2): 96-102.]
- [46] Yadh Z, Abdelmajid G, Jean A. Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). *Journal of Hydrology*, 2008, 351: 318-330.
- [47] Dey S. Local scours at piers (Part 1): A review of development of research. *International Journal of Sediment Research*, 1997, 12(2): 23-44.
- [48] Boix-Fayos C, Barbera G G, Lopez-Bermudez F et al. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology*, 2007, 91: 103-123.
- [49] Wang Guangqian. *Advances in River Sediment Research*. Beijing: China Water Power Press, 2006: 416-455. [王光谦. 泥沙研究进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 416-445.]
- [50] Xu Jiongxin. An experimental study on the complex response in river channel adjustment downstream a reservoir. *Journal of Sediment Research*, 1986, (4): 50-57. [许炯心. 水库下游河道复杂响应的试验研究. 泥沙研究, 1986, (4): 50-57.]
- [51] Chien N. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, 10(2): 143-159.
- [52] Gilvear D J. Patterns of channel adjustment to impoundment of the upper River Spey, Scotland (1942-2000). *River Research and Applications*, 2004, 20(2): 151-165.
- [53] Han Qiwei, Tong Zhongjun. Characteristics and mechanism of branching river channel in the downstream watercourse of Danjiangkou Reservoir. Yangtze River, 1986, (3): 27-32. [韩其为, 童中均. 丹江口水库下游分汊河道河床演变特点及机

- 理. 人民长江, 1986, (3): 27-32.]
- [54] Schumm S A, Galay V J. The River Nile in Egypt//Schumm S A, Winkley B R. The Variability of Large Alluvial Rivers. New York: ASCE Press, 1994: 75-102.
- [55] Xu Jiongxin. Effects of underlying gravel layers on channel adjustment downstream from Danjiangkou Reservoir. Journal of Sediment Research, 1999, (3): 48-52. [许炯心. 汉江丹江口水库下游河床下伏卵石层对河床调整的影响. 泥沙研究, 1999, (3): 48-52.]
- [56] Ni Jinren, Ma Ainai. Streams Dynamic Geomorphology. Beijing: Peking University Press, 1998, 396pp. [倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学. 北京: 北京大学出版社, 1998, 396pp.]
- [57] Wang Guangqian, Zhang Hongwu, Xia Junqiang. Evolution and Simulation of Braided River. Beijing: Science Press. 2005: 451pp. [王光谦, 张红武, 夏军强. 游荡型河流演变及模拟. 北京: 科学出版社, 2005: 451pp.]
- [58] Huang Lunchao, Xu Guangxiang. Test Models for Hydraulic and River Engineering. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008: 253pp. [黄伦超, 许光祥. 水工与河工模型试验. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 253pp.]
- [59] Mao Jixin, Han Qiwei. A mathematical model on the armoring of river bed downstream reservoir. Journal of Sediment Research, 2001, (1): 57-61. [毛继新, 韩其为. 水库下游河床粗化计算模型. 泥沙研究, 2001, (1): 57-61.]
- [60] Zhang Yaixin, Wei Zhilin, Wu Weimin. Numerical simulation of 1-D instable flow water and sediment downstream Wanan Hydropower in Ganjiang River. Guangxi Electric Power Engineering, 1999, (4): 71-76. [张耀新, 韦直林, 吴卫民. 赣江万安水电站下游一维非恒定流水沙数学模型. 广西电力工程, 1999, (4): 71-76.]
- [61] Li Yitian, Gao Kaichun. Study of riverbed scouring numerical simulation of the Three Gorges downstream: Yichang to Shashi River reach. Journal of Sediment Research, 1996, (2): 3-8. [李义天, 高凯春. 三峡枢纽下游宜昌至沙市河段河床冲刷的数值模拟研究. 泥沙研究, 1996, (2): 3-8.]
- [62] Shao Xuejun, Wang Xingkui. Introduction to River Mechanics. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 248pp. [邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论. 北京: 清华大学出版社, 2005: 248pp.]
- [63] Zhang Zengfa, Li Qishun, Ding Xianrong. Analysis of fluvial process in Zhenyang reach of Yangtze River based on GIS. Yangtze River, 2001, (9): 39-40. [张增发, 李启顺, 丁贤荣. GIS支持下长江镇扬河段河床演变分析. 人民长江, 2001, (9): 39-40.]
- [64] Ding Xianrong, Wang Wen, Yang Tao et al. River digital terrain information system and GIS for Zhengyang Section of Yangtze River. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2001, (4): 116-119. [丁贤荣, 王文, 杨涛等. 河道数字地形信息系统与长江镇扬河段GIS研制. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, (4): 116-119.]
- [65] Chen Yimei. Study on river shoal evolution based on modern technique [D]. Nanjing: Hohai University, 2002. [陈一梅. 基于现代技术的河道浅滩演变研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.]
- [66] Wu Hualin, Shen Huanting, Mao Zhichang. Calculation of the amount of siltation and erosion in the south and north channel in the Changjiang Estuary and its evolution. Journal of Sediment Research, 2004, (3): 75-80. [吴华林, 沈焕庭, 茅志昌. 长江口南北港泥沙冲淤定量分析及河道演变. 泥沙研究, 2004, (3): 75-80.]
- [67] Wang Qiang. Application of GIS technologies in analysis on channel scouring and siltation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. [王强. GIS在河道冲淤及河床演变分析中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.]
- [68] Wu Xiaoyong. Channel processes of the north channel of the Changjiang Estuary. Journal of Sediment Research, 2006, (2): 46-53. [武小勇. 长江口北港河势演变分析. 泥沙研究, 2006, (2): 46-53.]
- [69] Huang Zhiwen. Analysis on channel deposition-scouring based on GIS [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. [黄志文. 基于GIS技术的泥沙冲淤及河床演变分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.]
- [70] Xu Zhiyang. Study on the Method and System of Riverbed Evolution Analysis on the Platform of ArcGIS. Nanjing: Hohai University Press, 2006: 67pp. [徐志扬. ArcGIS平台的河床演变分析方法与系统研究. 南京: 河海大学出版社, 2006: 67pp.]
- [71] He Qiaoning. Study of cross-section analysis methodology for fluvial process based on GIS [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. [贺巧宁. 基于GIS的河床演变断面分析方法体系研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [72] Zhao Jixiang. Spatial modeling analysis of bank evolution about digital riverbed [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. [赵吉祥. 数字河床洲滩演变空间建模分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [73] Liu Dujuan, Ye Yincan; Li Dong et al. GIS-supported analysis on riverbed evolution in lower segment of southern channel in Yangtze Estuary. Coastal Engineering, 2010, (3): 19-27. [刘杜娟, 叶银灿, 李冬等. 基于GIS的长江口南支下段河势演变及稳定性分析. 海岸工程, 2010, (3): 19-27.]
- [74] Friedman J M, Osterkamp W R, Scott M L et al. Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: Regional patterns in the Great Plains. Wetlands, 1998, 18(4): 619-633.
- [75] Nanson G C, Hickin E J. Channel migration and incision on the Beatton River. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109: 327-337.
- [76] Hooke J M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 1980, 5(2):

- 143-157.
- [77] Brice J C. Stream channel stability assessment, January 1982, Final report. US Department of Transportation, FHA, Washington, DC, 1982: 42pp.
- [78] Hickin E J. The development of meanders in natural river-channels. *American Journal of Science*, 1974, 274: 414-442.
- [79] Richard G A. Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from Cochiti Dam, Rio Grande, NM. Colorado State University, 2001: 244pp.
- [80] Gilvear D, Winterbottom S, Sickingabula H. Character of channel platform change and meander development: Luangwa River. *Zambia Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 254: 21-36.
- [81] Begin Z B. The relationship between flow-shear stress and stream pattern. *Journal of Hydrology*, 1981, 52(3/4): 307-319.
- [82] Surian N, Rinaldi M. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 2003, 50(4): 307-326.
- [83] Shields J F D, Simon A, Steffen L J. Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation*, 2000, 27(1): 54-66.
- [84] Xu Jiongxin. Complicated response of downstream channel morphology to Danjiangkou Reservoir on Hanjiang River. *Chinese Science Bulletin*, 1989, (6): 450-452. [许炯心. 汉江丹江口水库下游河床调整过程中的复杂响应. *科学通报*, 1989, (6): 450-452.]
- [85] Elliott J G, Gyetvai S. Channel-pattern adjustments and geomorphic characteristics of Elkhead Creek, Colorado, 1937-97. USGS Water-Resources Investigations Report 99-4098, 1999: 39pp. (<http://pubs.usgs.gov/wri/wri99-4098/pdf/wri99-4098.pdf>)
- [86] Simons D B, Li R M. Bank Erosion on Regulated Rivers. New York: John Wiley and Sons, 1982: 717-754.
- [87] Thorne C R, Others. Processes and Mechanisms of River Bank Erosion. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 227-271.
- [88] The ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. River width adjustment. I: Processes and mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(9): 881-902.
- [89] The ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. River width adjustment. II: Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(9): 903-917.
- [90] Hasegawa K. Universal bank erosion coefficient for meandering rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989, 115(6): 744-765.
- [91] Tang Richang. Preliminary study on control engineering of Jingjiang River four outlets. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, (2): 15-18. [唐日长. 荆江四口控制工程初步研究. *长江科学院院报*, 2001, (2): 15-18.]
- [92] Wang Yong. Cause of bank collapse along Anhui reach of Yangtze and its regulation measurement analysis. *Yangtze River*, 1999, (10): 19-20. [王永. 长江安徽段崩岸原因及治理措施分析. *人民长江*, 1999, (10): 19-20.]
- [93] Wang Jiayun, Dong Guanglin. Destroy of bank protection engineering and causes of bank collapse along the Anhui reach of Yangtze River. *Water Conservancy Management and Technology*, 1998, (1): 62-64. [王家云, 董光林. 安徽省长江护岸工程损坏及崩岸原因分析. *水利管理技术*, 1998, (1): 62-64.]
- [94] Leng Kui. Forming conditions and protective measures of Ω -collapse in the lower Yangtze River. *Advances in Water Science*, 1993, (4): 281-287. [冷魁. 长江下游窝崩形成条件及防护措施初步研究. *水科学进展*, 1993, (4): 281-287.]
- [95] Li Baozhang. Primary discussion on bank collapse and protection along the Nanjing reach of Yangtze River. *Yangtze River*, 1992, (11): 26-28. [李宝璋. 浅谈长江南京河段窝崩成因及防护. *人民长江*, 1992, (11): 26-28.]
- [96] Brookes A. Challenges and objectives for geomorphology in U.K. river management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, 20(7): 593-610.
- [97] Hey R D. Environmentally Sensitive River Engineering. Blackwell Science Ltd., 1994: 337-362.
- [98] Walker D R, Millar R G, Newbury R W. Energy profiles across constructed riffles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(3): 199-207.
- [99] Wilkinson S N, Keller R J, Rutherford I D. Phase-shifts in shear stress as an explanation for the maintenance of pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(6): 737-753.
- [100] Lu Yongjun, Liu Jianmin. Study on fluvial process and regulations of typical shoal of middle Yangtze River. *Engineering Science*, 2002, (7): 40-45. [陆永军, 刘建民. 长江中游典型浅滩演变与整治研究. *中国工程科学*, 2002, (7): 40-45.]
- [101] Booker D J, Sear D A, Payne A J. Modeling three-dimensional flow structures and patterns of boundary shear stress in a natural pool-riffle sequence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(5): 553-576.
- [102] Thompson D M, Wohl E E, Jarrett R D. Velocity reversals and sediment sorting in pools and riffles controlled by channel constrictions. *Geomorphology*, 1999, 27(3/4): 229-241.
- [103] Sear D A. Sediment transport processes in pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(3): 241-262.

- [104] Paolo R, Giacomo F, Michael N, Giampaolo D S. Morphological effects of damming on lower Zambezi River. *Geomorphology*, 2010, 115: 43-55.
- [105] Ronald C, Rose D, Michael Stewardson J, Harman C. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. *Geomorphology*, 2008, 99: 302-316.

Reservoir-induced Downstream Changes of Water, Sediment and Channel Morphology: A Literature Review

FU Kaidao¹, HUANG Heqing², ZHONG Ronghua¹, WANG Xingyong³, Su Bin¹

(1. *Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China;*

2. *The Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

Abstract: Reservoir building to meet human's growing need for water resources utilization is still an important mission in the water conservancy construction for the present world, especially for the developing countries. However, damming changes the condition of stream flow boundary as well as water and sediment transport, which trigger the corresponding adjustment of channel morphology. Large-scale dams have been built since the 1930s, associated with more and more researches focusing on the their impacts of dams building on downstream discharge regime, sediment decline and geomorphologic change. This paper devotes to emphasize rearrangement and summary on the global research progress of the above issues. A brief literature review on the historical and present situation for the reservoir-induced downstream changes of water, sediment and channel morphology is reported in this paper, aiming to conclude and sum up abundant research results in this field.

Key words: water and sediment changes; channel adjustment; downstream channel of dams; literature review