

河流过程的累积现象和随机模型

景 唤¹, 钟德钰^{1,2}, 张红武¹, 石旭芳³, 王彦君¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016; 3. 青海大学水利电力学院, 西宁 810016)

摘要: 累积现象普遍存在于河流过程中, 准确考虑前期水沙条件的累积影响对冲积河流河床演变规律的研究至关重要。为揭示累积现象的物理实质, 本文对国内外多条典型冲积河流上枢纽修建后其上下游河道冲淤实测资料进行了分析。定义水沙条件变化为外部扰动, 并假定其发生概率符合泊松分布及单个扰动引发的系统反馈强度随时间呈指数衰减。本文运用统计力学中的随机理论给出了冲积河流外部扰动诱发的内部反馈随时间的累积过程及其时空间演进的数学描述和理论模型, 并将其应用于枢纽修建后其上下游河道形态时空调整过程的模拟。结果发现, 从时间上看, 断面垂向、横向及全河段的冲淤调整速率早期较快, 之后迅速减缓, 河床累积冲刷深度、河宽及河段累积淤积量随时间不断增大直至平衡, 表现出典型的累积特性; 从空间上看, 坝下河段冲刷强度沿程非线性衰减直至消失, 这种空间分布上的不平衡是外部扰动引发的系统反馈在空间传播的同时随时间衰减的综合结果, 是河流过程累积特性的另一外在表现。模型应用结果表明, 河道垂向、横向、纵向及全河段的时空冲淤调整过程均可用归一化公式来描述, 计算值与实测值符合较好, 相关系数 R^2 达0.92、0.93、0.76和0.95。本文模型同时考虑了河流过程的累积特性和系统反馈的空间传播特性, 可为定量描述扰动后非平衡态河道的时空调整过程提供理论依据和新的计算方法。

关键词: 累积现象; 河流过程; 累积冲淤量; 累积冲刷深度; 河宽

DOI: 10.11821/dlxb202005014

1 引言

自然界中具有不同时空尺度效应的各种过程都是内部或外部作用累积的结果, 累积现象是自然界普遍存在的过程, 该现象同样普遍存在于河流过程中。来自流域的径流和泥沙是冲积系统物质和能量的基本输入形式, 物质和能量的累积是各类河流过程的根本动力。例如, 挟带泥沙的水流进入宽阔的河谷或河口后, 随着水面骤然展宽, 水流流速放缓, 泥沙长期淤积, 河谷中逐渐形成深厚的冲积层, 河口淤积成广阔的三角洲。中国黄河下游的华北平原及长江口三角洲的形成即是如此^[1]。因而, 从物质和能量的角度来说, 冲积河流的形成可视为水流挟带泥沙长期累积的结果, 所有历史水沙条件变化对冲积系统而言均为外部扰动, 扰动发生后冲积系统会做出尺度不同的响应, 扰动的响应在系统中不断累积, 促使河流演变路径也相应调整, 最终与来水来沙条件相适应。由此可

收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(91547204); 国家重点研发计划(2016YFC0402500, 2017YFC0404303) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.91547204; National Key R&D Program of China, No.2016YFC0402500, No.2017YFC0404303]

作者简介: 景唤(1993-), 女, 河南虞城人, 博士生, 研究方向为河流动力学。E-mail: jingh16@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 钟德钰(1970-), 男, 甘肃金昌人, 博士, 教授, 研究方向为泥沙运动基本理论与水沙运动数值模拟等。

E-mail: zhongdy@mail.tsinghua.edu.cn

见, 冲积系统发生的变化, 不仅是对当下扰动的反馈, 而且是对一定历史时期内发生的所有扰动的累积响应, 可称为河流过程的累积特性, 而描述这种累积特性的变量称为“累积变化量”, 用来衡量历史过程中扰动对冲积河流河床演变影响的累积效应。

关于历史水沙过程对冲积河流河床演变的累积影响, 以往学者开展了大量研究。如钱意颖等^[2]在研究多沙河流的水库泥沙问题时, 指出平滩流量与多年汛期平均流量有关, 体现了当前河槽形态受前期水沙条件影响的观点。张红武等运用模型试验与数学模型研究黄河干支流修建水库后其下游河段的河床演变趋势时, 发现前期水沙过程及河床冲淤状况直接影响当前洪水表现^[3-4], 并认为造床流量^[5]、河型^[6]等均受前期相当时期水沙条件的影响。梁志勇等^[7]在探讨黄河下游断面几何特征与水沙条件的相关关系时, 发现河道几何形态不仅受当前来水条件影响, 还受前期若干年水沙系列影响, 并建立了河槽形态指标与进口平均水沙特征值的定量关系, 对历史水沙系列的累积影响进行了初步量化。此外, Xia等^[8-9]和陈建国等^[10]亦通过滑动平均方法, 经验性地考虑前期累积影响, 对长江荆江河段及黄河下游的平滩河槽特征参数对前期若干年来水来沙条件的响应关系进行了分析。为解决前期影响的经验性问题, 吴保生等^[11-13]基于冲积系统的“速率定律^[14]”, 在假定冲积河流受到外部扰动后河道特征变量的调整速率与该变量的当前值和新平衡值之差成正比的基础上建立了滞后响应模型, 计算时通过将前一时刻的计算结果作为下一时刻的初始值以考虑前期水沙条件的累积影响, 对库区泥沙淤积量、平滩流量和平滩面积等随时间的调整过程进行了模拟。但值得注意的是该模型属于概念模型, 在解释产生滞后响应现象的原因时, 仍然有困难。关于发生扰动后河槽形态的空间调整特征, 贾锐敏^[15]、杨云平等^[16]基于长系列水沙及断面形态实测资料对丹江口水库和三峡水库投入运用后枢纽下游河道沿程典型断面的形态调整规律进行了分析; 王兆印等^[17]和李昌志等^[18]等依据渭河下游大断面实测资料研究了潼关高程对渭河下游冲淤的影响, 认为潼关高程抬升和下降引起的溯源淤积和冲刷均以冲淤行波的形式向上游传播, 上升时产生淤积波, 下降时产生冲刷波, 该研究提出外部扰动影响的空间传播观点, 但并未给出确切的数学描述。

上述研究均集中于累积性变化量的研究, 如水库泥沙累积淤积量与平滩河槽参数等, 说明了累积性影响的重要性: 累积特性是河流过程的固有属性, 考虑前期水沙条件的累积影响对认识和预测冲积河流的演变趋势具有重要作用。以往研究虽已认识到冲积河流的河槽塑造不仅受当前水沙条件的影响, 还在一定程度上受前期相当时期水沙过程的影响, 但计算时多通过算术平均、滑动平均、数值迭代等方法对前期水沙条件的累积影响进行简单量化。河流泥沙学科对于当前水沙条件对河槽塑造影响的定量分析尚有相当差距。以往研究难以体现清晰的物理图形, 尚不能揭示河流过程中累积现象的物理内涵。此外, 当前少有研究关注外部扰动影响的空间传播规律。为此, 本文将运用统计力学中的随机理论, 给出冲积系统中外部扰动诱发的内部反馈随时间的累积过程及其时空演进的数学描述。此外, 所得模型将被应用于国内外多条典型冲积河流上枢纽修建后其上下游河道的横向、垂向、纵向与全河段时空调整过程的模拟。此研究尝试为揭示河流过程累积现象的物理实质和实践中描述突发扰动后非平衡态冲积河流的时空演变规律提供一个新方法。

2 研究对象及其累积现象

2.1 研究对象

本文选取美国的科罗拉多河、密苏里河和中国的长江及其支流汉江、黄河共计5条

代表性冲积河流为研究对象, 研究断面与河段特征参数如表 1 所示。研究河段(断面)覆盖的河长范围自数公里至数百公里不等, 不同河段间水流特性也相去甚远, 其中长江水量最大, 黄河与汉江次之, 科罗拉多河与密苏里河较小。本文收集整理了各研究对象的长序列冲淤实测资料, 以河床累积冲刷深度、河宽、河段累积冲淤量等冲积河流形态特征参数为研究变量, 对枢纽修建后其上下游河道的垂向、横向、纵向与全河段的时空调整规律进行研究。

表 1 研究断面与河段特征参数^[15-16, 19-20]

Tab. 1 River characteristic parameters for the studied cross sections and channel reaches

枢纽名称	所在河流	年平均流量(m ³ /s)		断面(河段)编号	距坝里程(km)	河流特征量	测试时段(a)	测量次数
		建库前	建库后					
胡佛大坝	科罗拉多河	520	400	CHD-1—CHD-3	10~36	累积冲刷深度	1935—1948	15
帕克大坝		230	340	CPD-1—CPD-3	39~95		1938—1975	16
戴维斯大坝		400	340	CDD-1—CDD-2	1~9		1948—1975	28
佩克堡大坝	密苏里河	200	280	MFP-1—MFP-3	9~75	河宽	1936—1973	8
加里森大坝		600	660	MGD-1—MGD-3	32~54		1949—1976	6
加文斯角大坝		930	740	MGP-1—MGP-3	7~48		1955—1974	5
丹江口水库	汉江	1335	1091	黄家港—皇庄	3~270	枯水位降低值	1960—1976	6
三门峡水库	黄河	1522	1412	小浪底—利津	61~678		1961—1984	21
小浪底水库	黄河	1266	807	四站—潼关(库区)	—	冲淤量	1965—1984	20
三峡水库	长江	14027	12873	小浪底—利津	61~678		2000—2015	16
				宜昌—湖口	30~807		2003—2016	14

注: 距坝里程为各研究断面或研究河段中点距枢纽的距离。

2.2 垂向调整

冲积河流上水库的修建会破坏水库下游河道原有的平衡, 引起下游河道的再造床过程^[21]。由于水库的调峰拦蓄作用, 进入下游河道的水沙特性发生显著变化, 含沙量大幅降低, 枢纽下游河段通常因得不到足够的物质补充而进入持续冲刷过程。本文以美国科罗拉多河上胡佛大坝、帕克大坝和戴维斯大坝坝下各研究断面的河床累积冲刷深度(这里指研究断面的平均河底高程累积降低值)随时间的变化过程为例, 分析冲积河流上枢纽修建后其下游河道的垂向调整规律。各研究断面平均河底高程的累积降低值随水库运用年限的变化如图 1 所示。从图 1 中可以发现, 时间上看, 坝下河段总体呈冲刷下切趋势, 平均累积冲刷深度随时间不断增大, 胡佛大坝运用 10 年后各断面平衡冲刷深度分别为 4.5 m、2.6 m 和 2.4 m, 帕克大坝运用 20 年后各断面平衡冲刷深度分别为 3.8 m、2.7 m 和 1.0 m, 戴维斯大坝运用 20 年后各断面平衡冲刷深度分别为 5.1 m 和 2.8 m。就调整速率而言, 枢纽下游河段的垂向调整速率在其建成后的前 5 年较大, 可迅速完成平衡冲刷深度的一半以上, 之后调整速率随时间快速非线性衰减, 经过约 10~20 年, 虽然累积冲刷深度仍会随时间小幅度上下波动, 但变化较小, 垂向调整已基本完成。从空间上看, 上游断面的冲刷深度通常大于下游断面, 且往往先于下游断面开始冲刷, 如图 1a 中距离坝址最近的 CHD-1 断面自水库运用即开始冲刷, 而距坝址相对较远的 CHD-3 断面则在约 1 年之后才开始冲刷。

2.3 横向调整

水库拦沙运用使进入下游河道的泥沙供应量减少, 若主流在横向上仍有摆动的可

能,而两岸的抗冲性又较差,则在摆动的过程中,滩地将大量崩塌,造成坝下游河道展宽^[22]。美国密苏里河上修建大坝后,长时期的清水下泄造成下游河道河岸大量崩塌,冲刷高滩,回淤低滩,河槽较之前明显展宽^[23]。本文依据美国密苏里河上佩克堡大坝、加里森大坝和加文斯角大坝坝下各研究断面的河宽观测资料,对枢纽修建后其下游河道的横向调整规律进行分析。河宽随时间的变化过程如图2所示。由图2可知各研究断面均存在不同程度的河道展宽,横向展宽速率早期较快,之后随时间逐渐减缓,最终趋于动态平衡。定义断面相对展宽率 r_w 为最终平衡河宽 $W_{末}$ 和初始河宽 $W_{初}$ 之差与初始河宽 $W_{初}$ 的比值,即 $r_w = (W_{末} - W_{初}) / W_{初}$ 。可以得到,加里森大坝下游(图2b)各研究断面间相对展宽率相差较大,沿程自上而下3个研究断面的相对展宽率分别为10.9%、119.0%和110.1%,绝对展宽值分别为140 m、625 m和414 m。佩克堡大坝下游(图2a)和加文斯角大坝下游(图2c)各研究断面间相对展宽率相差不大,平均分别为26.5%和26.6%,绝对展宽量平均分别为67 m和250 m。由于河道横向调整特性与河床、河岸的物质组成及抗冲性、水库运用方式等多种因素有关,因而不同河段间横向展宽幅度与展宽速率存在较大差异。

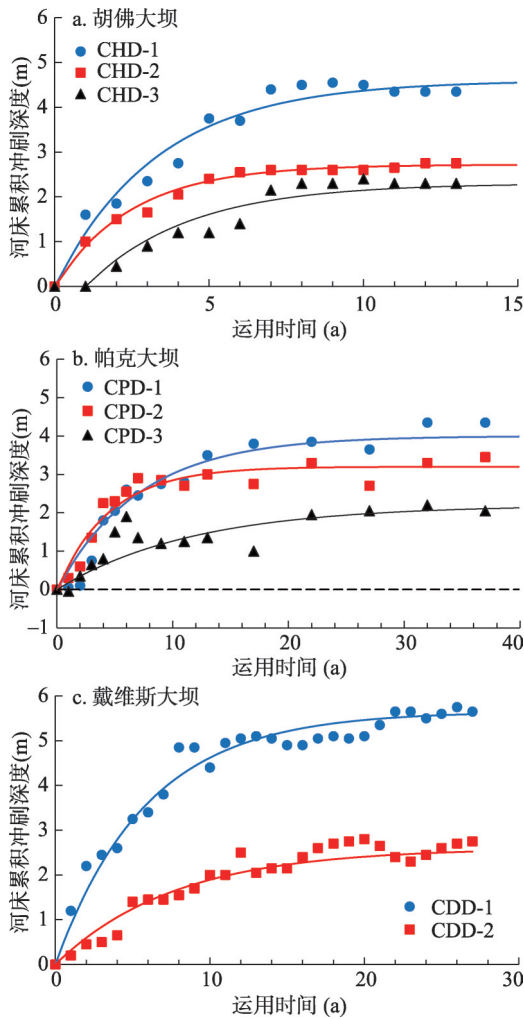


图1 科罗拉多河坝下研究断面的河床累积冲刷深度
Fig. 1 Accumulated riverbed degradation in the studied cross sections downstream of dams on the Colorado River

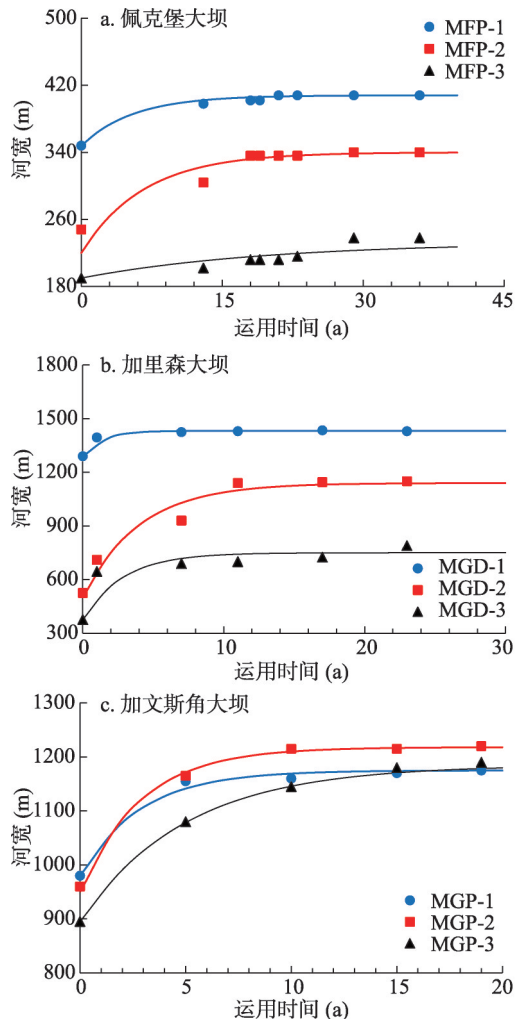


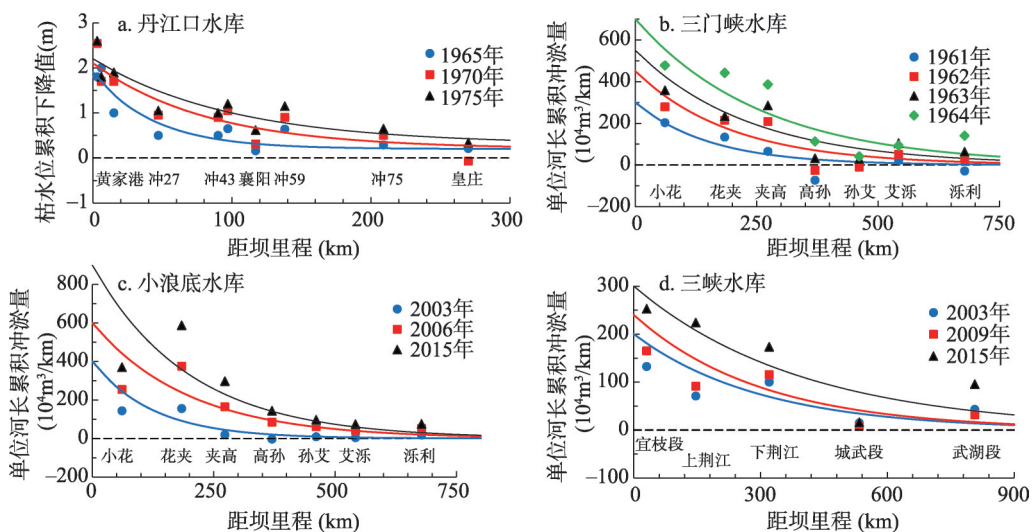
图2 密苏里河坝下研究断面的河宽横向调整
Fig. 2 Lateral adjustment process of river width in the studied cross sections downstream of dams on the Missouri River

2.4 纵向调整

水库运用造成的水沙过程变化往往在下游河道内造成长距离的沿程冲刷, 给下游河道的防洪、航运等带来重大影响。随着冲刷的发展, 含沙量沿程逐渐恢复, 冲刷强度相应减缓。本文采用长江三峡水库、汉江丹江口水库及黄河三门峡水库与小浪底水库修建后其下游河道的典型断面枯水位和河段累积冲淤量实测资料, 对坝下河段的纵向冲淤调整特点进行研究。丹江口水库下游各观测断面枯水位累积降低值的沿程分布情况如图 3a 所示(因各断面观测时间不完全一致, 部分点值为相邻时刻实测值线性插值所得), 三门峡水库(这里指水库蓄水拦沙运用期)、小浪底水库及三峡水库下游各小河段单位河长累积冲淤量的沿程分布情况如图 3b~3d 所示。可以发现, 从时间上看, 水库投入运用后, 坝下各研究河段持续冲刷, 累积冲刷幅度随时间逐渐增大, 冲刷速率先快后慢。从空间上看, 研究河段(断面)冲刷强度总体沿程降低, 近坝段冲刷最为剧烈, 此后冲刷强度沿程非线性减缓直至消失, 空间衰减特征显著。注意到三门峡水库下游花高段(花园口—高村段)和小浪底水库下游花夹段(花园口—夹河滩段)冲刷量总体较大, 原因为该河段是以主槽摆动剧烈、迁徙无常而著称的典型游荡性河段^[24-25]。据统计, 花高段河床中径约为 0.09 mm, 而坡降却达到 0.02%。由于坡陡、流急、泥沙颗粒细, 沙洲与边滩运动迅速, 河床变形既多且强^[26], 因而上游水库拦沙运用后该河段冲刷强度较大。此外, 三峡水库下游城武段(城陵矶—武汉段)冲刷量相对上游河段锐减是因为该河段河床比降偏缓, 流速小, 挟沙能力不足, 其上游宜昌河段输沙特性则与之相反, 比降陡, 流速急, 挟沙能力大^[27], 水库下泄清水在宜昌河段已得到较多物质补充, 一定程度上也限制了城武段的冲刷。

2.5 全河段调整

三门峡水库自投入运用后, 库区泥沙淤积问题严重。为解决出现的泥沙问题, 坝体曾两次进行工程改建(1966年7月—1970年6月和1970年7月—1973年末)、水库也先后历经蓄水拦沙及改为滞洪运用初期(1960年9月—1964年10月)、滞洪排沙(1964年11月—1973年10月)、蓄清排浑(1973年至今)等运用方式调整。但由于上游来水来沙条



注: b~d 实测点横坐标为河段中心距上游枢纽的距离;纵坐标单位河长累积冲刷量正值表示冲刷, 负值相反。

图3 坝下各研究河段的纵向调整特征

Fig. 3 Longitudinal adjustment characteristics of the studied channel reaches downstream of dams

件恶劣,水少沙多,来沙量巨大,21世纪前水库库区仍呈持续淤积趋势,且随着库区泥沙的大量排出、下游滩区生产堤的修建及引黄涵闸的大量运用,黄河下游河道状况不断恶化,沿程淤积严重,悬河局面加剧^[28-29]。本文依据三门峡水库库区四站至潼关河段的冲淤实测资料,对库区淤积发展规律进行分析(蓄水拦沙期及改为滞洪运用初期水库处于初始淤积期,淤积特性与后续运用方式下有所不同,因而资料选择1965年—1984年)。关于黄河全下游河道淤积规律的分析,考虑到滞洪拦沙期内第一次工程改建初期(1968年前)下游河道淤积特性与后续时段亦稍有不同,资料选择1968年—1984年。同时考虑到1973年末水库运用方式转变的影响,将下游河道实测资料划分为两个时段(结合冲积河流河床演变的滞后特性,分割点选为1975年)分别对其长时段的冲淤演变规律进行研究。三门峡水库库区与黄河下游河道累积淤积量随时间的变化过程如图4所示(淤积量计算起点均为1950年)。结果显示,研究时段内三门峡潼关以上库区与黄河全下游河道总体呈持续淤积趋势,淤积速率先快后慢,累积淤积量随时间不断增大,最终趋于动态平衡。同时注意到三门峡水库运用方式由滞洪拦沙转为蓄清排洪后,全下游累积淤积量出现明显拐点,出现这一现象的根本原因为天然来流条件变化与水库运用方式调整导致的进入黄河下游河道的水沙条件显著变化。具体表现为:三门峡水库滞洪排沙运用期间,由于上游来水来沙条件恶劣(水少沙多,来沙量巨大)^[28],加之随着增建的泄流设施投入使用(1966年之后),水库在降低水位排沙运用过程中,前期淤积在库内的部分泥沙被冲刷出库,使得进入下游河道的水流含沙量骤增,水沙不协调致使下游河道淤积严重;其后三门峡水库转为蓄清排浑运用(即非汛期下泄清水,汛期排泄全年泥沙),加之该时期黄河流域来水来沙条件相对有利,进入下游河道的泥沙量相对较少,因而下游河道虽仍有淤积,但总体淤积量较少^[30]。

通过对冲积河流上枢纽修建后其上下游河道垂向、横向、纵向与全河段时空调整特征的分析(图1~图4),可以得出:从时间上看,稳定外部扰动作用下(指枢纽运用造成的上下游河道水沙条件变化),研究断面垂向、横向及全河段的冲淤调整速率通常在枢纽建成后的前几年较大,之后随时间迅速非线性衰减。各研究断面的河床累积冲刷深度、河宽、水库库区和河道累积淤积量随时间不断增大,最终趋于动态平衡,表现出典型的累积特性;从空间上看,枢纽下游河道累积冲刷强度沿程降低,近坝段冲刷最为剧烈,向下游冲刷强度沿程非线性衰减,衰减速率普遍先快后慢,指数衰减特性显著,这种空间分布上的不平衡,事实上是外部扰动引发的系统反馈在空间中传播的同时随时间衰减的综合结果,同样是河流过程累积特性的另一外在表现。可见,累积特性是河流过程的固有属性,是研究冲积河流河床演变规律时需加以考虑的关键要素。

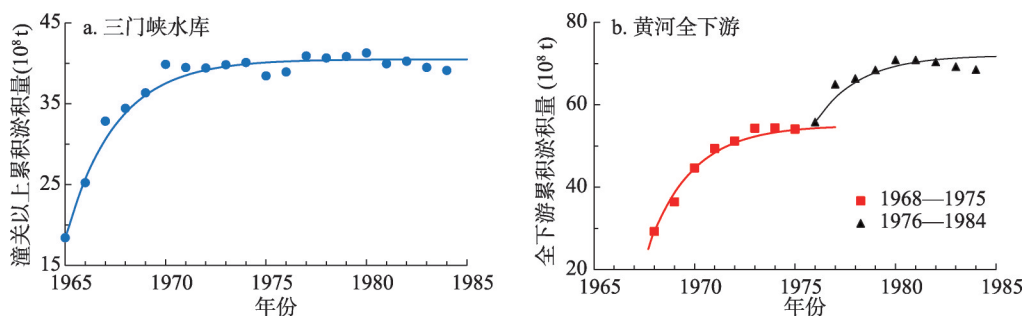


图4 三门峡水库库区与黄河全下游河道累积淤积量

Fig. 4 Accumulated sedimentation in the Sanmenxia Reservoir area and whole lower reaches of the Yellow River

3 累积现象的研究方法与应用

3.1 随机描述

外部扰动作用下处于非平衡态的冲积河流通过自动调整作用建立新平衡的过程, 本质上是持续发生的外部扰动引发的内部反馈随时间不断累积的过程。本文采用随机理论研究这种累积作用^[31]。首先, 将河流过程中外部作用累积形成的反馈描述为:

$$I(t) = \sum_k F(t - t_k) \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为河流过程的累积作用量, 可视作为冲积河流的某一累积特征变量; $F(t)$ 为单次扰动诱发的内部反馈强度; t_k 为外部扰动发生的时间。河流过程中外部扰动影响的累积过程如图5所示。显然, 欲确定累积作用量 $I(t)$ 的表达式, 需确定两个关键指标, 其一为外部扰动的概率分布, 其二为单个扰动引发的反馈强度 $F(t)$ 随时间的变化关系。

考虑到冲积河流的河床调整主要发生在汛期^[8-9, 32], 即汛期洪水是影响河流演变的最主要扰动形式, 因而假定外部扰动(即汛期洪水过程)的发生次数 $N(t)$ 符合参数为 $\lambda(t)$ 的泊松分布, 定义增量函数 $\mu(t)$ 为:

$$\mu(t) = dN(t)/dt \quad (2)$$

当扰动发生次数 $N(t)$ 在微小时间间隔 Δt 内增加1时 $\mu(t)$ 不为0, 其余情况下 $\mu(t)$ 均为0, 即变量 $\mu(t)$ 具有狄拉克函数的性质 ($\int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) dt = 1$), 则累积作用量 $I(t)$ 的积分形式可表达为:

$$I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t-t')\mu(t') dt' \quad (3)$$

外部扰动发生前, 冲积系统尚未产生反馈, $F(t-t')$ 为0; 外部扰动发生后时间趋于无穷时, 冲积系统对外部扰动的反馈消失, $F(t-t')$ 亦为0。研究表明, 指数衰减规律普遍存在于冲积河流过程中, 例如气候变化下的冲沟长度发展、天然裁弯后的河道形态调整、河道渠化后的河床坡度变化、火山爆发后的河床高度调整等均表现出初始阶段调整迅速, 随后速率减缓的典型衰减特性^[33-37]。据此, 本文假定单次扰动引发的反馈强度满足如下函数关系

$$F(t) = \begin{cases} qe^{-\alpha t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: q 为初始反馈强度, 即河道特征参数的初始调整速率; α 为衰减系数, 随不同河间流域气候、水沙特性的差别而有所不同。考虑到突发扰动导致的河道输沙不平衡是推动河床再调整的原动力, 因而系数 α 越大, 即原动力衰减愈迅速, 此时冲积河流愈快克服输沙不协调并建立新平衡。为了便于计算, 文中假定其为常数。

将式(4)代入式(3), 可得:

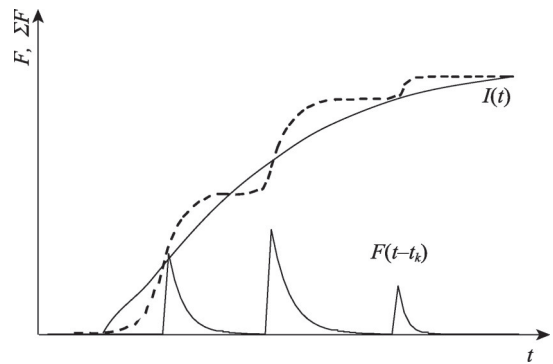


图5 河流过程中外部扰动影响累积示意图

Fig. 5 Diagram of the accumulation effects of external disturbances in fluvial processes

$$I(t) = \int_{-\infty}^t dt' q e^{-\alpha(t-t')} \frac{dN(t')}{dt'} \quad (5)$$

将累积作用量 $I(t)$ 对时间 t 求导有:

$$\frac{dI(t)}{dt} = - \int_{-\infty}^t dt' \alpha q e^{-\alpha(t-t')} \frac{dN(t')}{dt'} + \left[q e^{-\alpha(t-t')} \frac{dN(t')}{dt'} \right]_{t'=t} \quad (6)$$

上式化简可得:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -\alpha I(t) + q\mu(t) \quad (7)$$

式(7)为随机微分方程,波动驱动力由右侧 $q\mu(t)$ 项提供,该式表明冲积河流形态特征变量的调整速率与反馈强度大小及衰减速率、外部扰动发生频率等因素有关。

定义波动量 $\eta(t)$ 为 $dN(t)$ 与其均值之差,表达式如下:

$$\eta(t) = dN(t) - \lambda dt \quad (8)$$

随机微分方程式(7)移项可改写成:

$$dI(t) = -\alpha I(t) dt + q\mu(t) dt \quad (9)$$

将 $\mu(t) = dN(t)/dt$ 及 $\eta(t) = dN(t) - \lambda dt$ 代入式(9)可得:

$$dI(t) = [\lambda q - \alpha I(t)] dt + q d\eta(t) \quad (10)$$

等式两侧同时取期望,并考虑 $\langle q d\eta(t) \rangle = 0$, 方程变形有:

$$\frac{d\langle I(t) \rangle}{dt} = \lambda q - \alpha \langle I(t) \rangle \quad (11)$$

取极限 $t \rightarrow \infty$ 可得冲积河流累积特征变量随时间调整的平衡值 $\langle I(\infty) \rangle$ 表达式如下:

$$\langle I(\infty) \rangle = \lambda q / \alpha \quad (12)$$

将该表达式代入式(11),可得累积作用量 $\langle I(t) \rangle$ 的一阶常微分方程如下:

$$\frac{d\langle I(t) \rangle}{dt} = \alpha \langle I(\infty) \rangle - \alpha \langle I(t) \rangle \quad (13)$$

分析方程可知,外部扰动后,随着河流特征参数值 $\langle I(t) \rangle$ 不断接近平衡值,即冲积系统逐渐接近新的平衡态,特征变量的调整速率将逐渐减缓。求解上式可得河流特征参数随时间调整过程的理论模型

$$\langle I(t) \rangle = (1 - e^{-\alpha t}) \langle I(\infty) \rangle + e^{-\alpha t} \langle I_0 \rangle \quad (14)$$

式中: $\langle I(\infty) \rangle$ 为冲积河流某一累积特征变量随时间演化的平衡值; $\langle I_0 \rangle$ 为初始值; $\langle I(t) \rangle$ 为任意时刻 t 的取值。式(14)为可描述冲积河流外部扰动后河流累积特征变量随时间的调整过程的理论模型,其中衰减系数 α 与平衡值 $\langle I(\infty) \rangle$ 通常受河道水沙特性、河床物质组成、流域地质气候特征等多种因素影响。观察可得,该模型形式上与滞后响应模型^[13-14, 38-40]一致。也就是说,滞后响应模型本质上是本文基于冲积河流的累积作用原理,在假设冲积系统外部扰动发生概率符合泊松分布及系统对单个扰动的反馈强度满足指数衰减律的基础上所得的一个特解。

为探讨外部扰动影响的空间传播特性,给扰动后河流形态参数空间调整规律的预测提供科学参照,考虑到累积作用量 $\langle I(t) \rangle$ 同时是空间位置 x 与时间 t 的多元函数,外部扰动影响作用的空间位置 x 同样是时间 t 的函数,依据换元求导法对上式进行坐标变换可得

$$\frac{d\langle I \rangle}{dt} = \frac{d\langle I \rangle}{dx} \frac{dx}{dt} = \alpha \langle I(\infty) \rangle - \alpha \langle I \rangle \quad (15)$$

引入扰动影响的空间传播速度变量 $v = dx/dt$, 可得累积作用量 $\langle I \rangle$ 关于空间变量 x 的一阶常微分方程:

$$v \frac{d\langle I \rangle}{dx} = \alpha \langle I(\infty) \rangle - \alpha \langle I \rangle \quad (16)$$

求解式 (16) 可得突发扰动后河流特征参数沿程调整规律的理论模型:

$$\langle I(x) \rangle = (1 - e^{-\alpha x/v}) \langle I(\infty) \rangle + e^{-\alpha x/v} \langle I_{x_0} \rangle \quad (17)$$

式中: v 为外部扰动影响的空间传播速度; α/v 为综合衰减系数; $\langle I_{x_0} \rangle$ 为初始位置系统特征参数值; $\langle I(\infty) \rangle$ 为特征参数在空间上的平衡值, 考虑到外部扰动引发的系统反馈随着在空间中的传播最终将衰减消失, $\langle I(\infty) \rangle$ 通常为零。该模型可用于冲积河流上枢纽修建后其下游河道空间调整规律的模拟。值得注意的是, 影响传播速度 v 与河道水沙特征、河床物质组成以及流域气候、地质特征等因素密切相关, 在不同河流间相差很大, 如美国 Milburn 大坝建成 12.3 年后坝下冲刷发展至距坝址 7.4 km 处, 而 Hoover 大坝建成 4 年后冲刷即行进至坝下 117 km 处^[9], 说明不同河流的累积响应时空尺度与流域性质、扰动强度等具有密切关系。

3.2 时空调整模型应用

3.2.1 方程归一化 将上文描述突发扰动后河流某一累积特征变量时空调整过程的理论模型式 (14) 与式 (17) 移项变形可得归一化公式如下:

$$\frac{\langle I(t) \rangle - \langle I_{t_0} \rangle}{\langle I(\infty) \rangle - \langle I_{t_0} \rangle} = (1 - e^{-at}) \quad (18)$$

$$\frac{\langle I(x) \rangle - \langle I_{x_0} \rangle}{\langle I(\infty) \rangle - \langle I_{x_0} \rangle} = (1 - e^{-\alpha x/v}) \quad (19)$$

式中: $[\langle I(t) \rangle - \langle I_{t_0} \rangle] / [\langle I(\infty) \rangle - \langle I_{t_0} \rangle]$ 为冲积河流某一累积特征变量随时间调整的完成度, 扰动发生时, 其值为 0, 达到新平衡时, 其值为 1; $[\langle I(x) \rangle - \langle I_{x_0} \rangle] / [\langle I(\infty) \rangle - \langle I_{x_0} \rangle]$ 为冲积河流累积特征变量空间调整的完成度, 计算起点其值为 0, 不受扰动影响的平衡区域其值为 1, 表明外部扰动的影响已完全衰减消失。上述两式可用于预测突发扰动后冲积河流累积特征变量的时空调整路径。

3.2.2 时空调整过程模拟 运用式 (18) 与式 (19) 预测河道特征参数的时空调整过程时, 需确定模型参数。本文采用多元非线性回归方法对每组实测数据对应的公式参数进行了率定, 结果如表 2 和表 3 所示。

基于非线性回归分析所得公式参数将实测值参照式 (18) 与 (19) 左侧无量纲结构进行变形, 并按照垂向、横向、纵向和全河段将河床累积冲刷深度、河宽、河段累积冲淤量等实测点分别点绘于图 6a~6d 中。图 6a、图 6b 与图 6d 中横坐标为加权时间, 纵坐标

表 2 式(18)关键参数值

Tab. 2 Values of the crucial parameter in equation (18)

垂向调整	衰减系数 α	横向调整	衰减系数 α	全河段调整	衰减系数 α
CHD-1—CHD-3	0.30, 0.40, 0.30	MGP-1—MGP-3	0.40, 0.45, 0.50	三门峡库区四站—潼关	0.40
CPD-1—CPD-3	0.14, 0.22, 0.09	MFP-1—MFP-3	0.18, 0.15, 0.05	黄河全下游(1968—1975年)	0.45
CDD-1—CDD-2	0.17, 0.16	MGD-1—MGD-3	0.60, 0.25, 0.40	黄河全下游(1976—1984年)	0.40

注: 参数值基于实测资料回归分析得到, 各参数值之间以逗号分隔。

为冲积河流累积特征变量随时间调整的完成度。图 6a 中纵坐标 $(\delta Z_t - \delta Z_0)/(\delta Z_e - \delta Z_0)$ 中 δZ_t 为河床累积冲刷深度在 t 时刻的取值, δZ_0 和 δZ_e 分别为其初始值与平衡值。图 6b 中纵坐标 $(W_t - W_0)/(W_e - W_0)$ 中 W_t 为河宽在 t 时刻的取值, W_0 和 W_e 分别为其初始值与平衡值。图 6d 纵坐标 $(\delta V_t - \delta V_0)/(\delta V_e - \delta V_0)$ 中 δV_t 为河段累积淤积量在 t

时刻的取值, δV_0 和 δV_e 分别为其初始值与平衡值。图 6c 中横坐标为加权距离, 纵坐标为冲积河流累积特征变量沿程调整的完成度。图 6c 纵坐标 $(\delta E_x - \delta E_0)/(\delta E_e - \delta E_0)$ 中 δE_x 为单位河长累积冲刷量 (或枯水位累积降低值) 在距坝址 x 处的取值, δE_0 和 δE_e 分别为其初始值与平衡值。图 6 中曲线为模型计算结果, 可以发现河道垂向、横向、纵向与全河段累积特征变量的时空调整过程均服从统一的理论曲线。从时间上看, 垂向河床累积冲刷深度、横向河宽及全河段泥沙累积淤积量的早期增长速率较快, 随后变化速率指数衰减, 直至系统建立新的平衡 (图 6a、图 6b 与图 6d); 从空间上看, 河流累积特征变量 (枯水位累积降低值与单位河长累积冲刷量) 的沿程调整规律与上述时间调整规律类似, 随着加权距离增大, 河流累积特征变量调整完成度的变化速率沿程非线性减缓, 即靠近枢纽处, 冲刷强度沿程减小迅速, 远离枢纽减小速率放缓, 呈典型的负指数衰减特性 (图 6c)。垂向、横向、纵向与全河段河流累积特征变量实测值与模型计算值间的相关系数 R^2 分别达到 0.92、0.93、0.76 和 0.95, 相关程度较高。上述结果表明, 考虑河流过程中的累积特性及系统反馈的空间传播特性所得理论模型能够准确定量模拟枢纽修建后其上下游河道累积特征变量的时空调整过程, 冲积河流的河床演变是外部扰动诱发的系统反馈累积及其空间传递协同作用的结果。

3.2.3 模型应用举例 选取科罗拉多河胡佛大坝下游 CHD-2 断面、密苏里河佩克堡大坝下游 MFP-1 断面、汉江丹江口水库下游黄家港—皇庄河段及黄河三门峡水库库区潼关以上河段大坝修建后的冲淤实测资料作为冲积河流枢纽修建后其上下游河道垂向、横向、纵向及全河段河道调整的典型代表, 探讨其时空调整特征, 结果如图 7 所示。图 7a 和图 7b 分别给出了胡佛大坝下游断面的河床累积冲刷深度与佩克堡大坝下游断面的河宽随时间的变化过程, 由图 7 可知, 河道垂向与横向调整速率早期较快, 随后迅速减缓, 实测值与计算值相关系数 R^2 均达到 0.99。图 7c 给出了丹江口水库下游黄家港—皇庄河段 1970 年各监测断面枯水位累积降低值的沿程分布情况, 实测值与计算值相关系数 R^2 为 0.84。图 7d 为三门峡水库潼关以上库区累积淤积量随时间的调整过程, 实测值与计算值相关系数 R^2 达 0.97。注意到, 图 7c 中靠近枢纽段观测断面的实测枯水位累积降低值总体略低于计算值, 远离枢纽段则恰恰相反。原因为本文模型计算的是一种平均情况, 即河床为均匀沙的理想情况, 并未考虑断面间河床物质组成差异的影响。由于天然冲积河流的河床组成通常是上游粗、下游细的非均匀状态, 水库下游近坝段更粗的初始床沙组成使其在清水冲刷过程中更易形成粗化层, 使冲刷进程停止, 因而近坝段实际冲刷深度总体小于模型计算结果, 远离坝址河段情况则与此相反, 即水库下游河床组成不断细化的沿程分布特性是导致实测值与计算结果出现规律性差异的主要原因。

可见, 冲刷进程中的床沙粗化使得河床冲刷整体呈现指数衰减规律, 但初始床沙组

表 3 式(19)关键参数值

Tab. 3 Values of the crucial parameter in equation (19)

纵向调整	综合衰减系数 α/ν
黄家港—皇庄段(1965—1975)	0.0160, 0.0120, 0.0090
小浪底—利津段(1961—1964)	0.0065, 0.0060, 0.0042, 0.0038
小浪底—利津段(2003—2015)	0.0100, 0.0050, 0.0050
宜昌—湖口段(2003—2015)	0.0033, 0.0033, 0.0025

注: 参数值基于实测资料回归分析得到, 各参数值之间以逗号分隔。

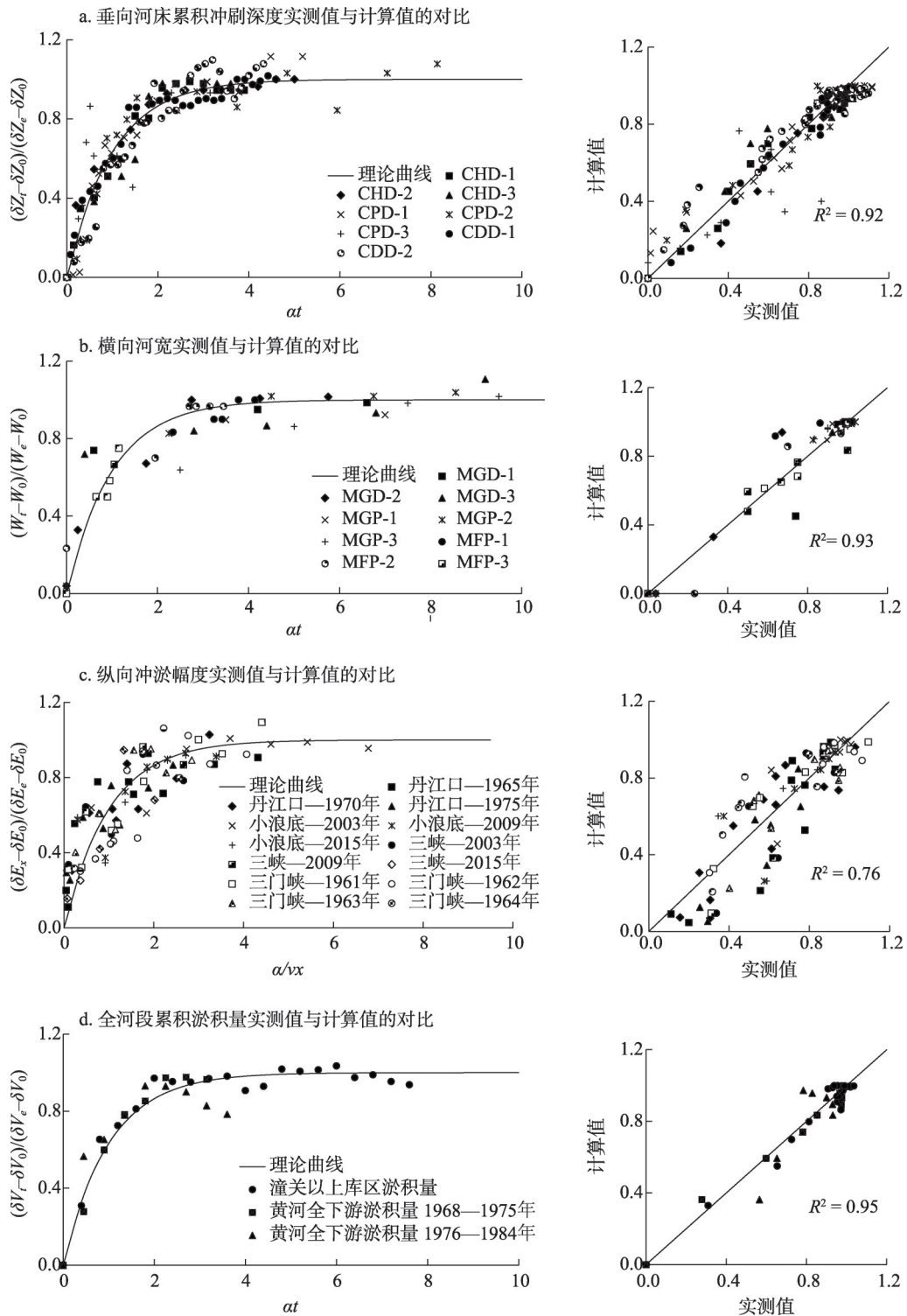


图6 研究断面与河段河流累积特征变量实测值与计算值的对比
 Fig. 6 Comparison between measured data of river accumulation characteristic variables and calculated results in the studied cross sections and channel reaches

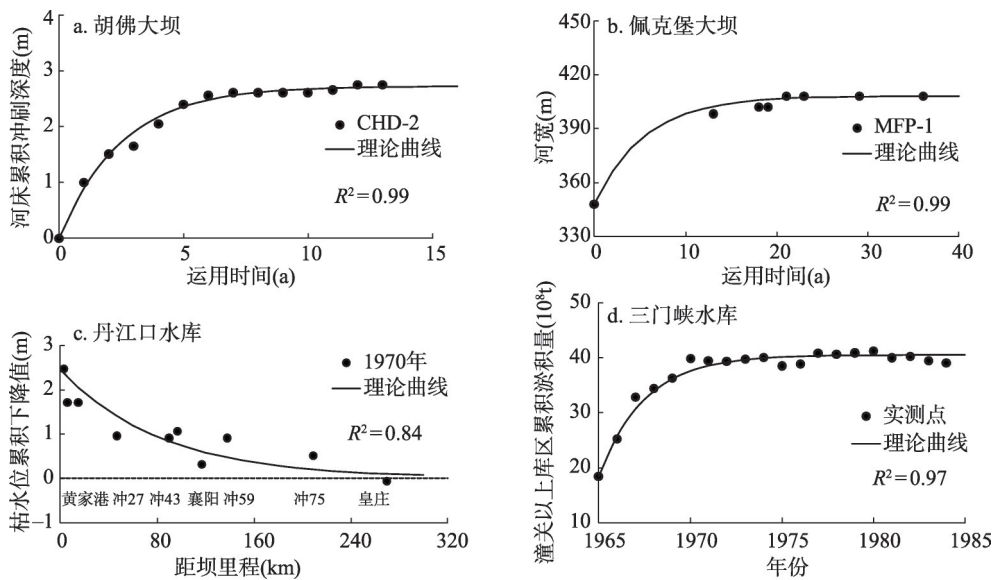


图7 大坝修建后河流累积特征变量先快后慢的调整过程

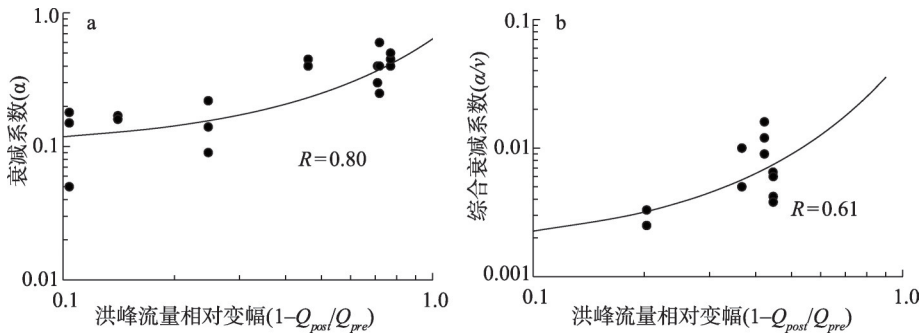
Fig. 7 Declining change rate of river accumulation characteristic variables following dam construction

成的沿程细化则导致冲刷深度计算值与实测值相比, 出现上段偏大, 下段偏小的规律性现象。

4 讨论

注意到, 本文揭示河流过程中累积现象物理实质的理论模型与当前广泛运用的滞后响应模型^[11-13, 41-42]方程形式基本一致。然而, 滞后响应模型是通过假定外部扰动后河道特征变量的调整速率与该变量的当前值和新平衡值之差成正比得到, 同时将本时段河床调整的结果作为下一个时段的初始条件, 以体现前期水沙条件对后期河床调整的累积影响, 曾先后应用于渭河下游河道和三门峡水库库区累积淤积量、黄河下游平滩河槽形态参数随时间调整过程的预测, 在河流演变机理认识上有重要价值, 但该模型较难从物理层面揭示河流过程中累积现象的物理实质。本文基于随机过程理论对河流过程中外部扰动诱发的内部反馈随时间的累积过程进行数学阐述, 揭示了累积现象的内在机理, 同时通过变量代换引入系统反馈的空间传播速度变量, 进一步建立了描述冲积河流累积特征变量空间调整过程的理论模型, 为突发扰动后冲积河流累积特征变量时空调整规律的预测提供了一种新方法。

此外, 时间衰减系数 α 和综合衰减系数 α/v 是本文模型中的关键参数, 直接决定扰动后河流特征变量时空间调整的相对速率。图8分别给出了衰减系数 α (图8a) 和综合衰减系数 α/v (图8b) 与枢纽修建前后坝下洪峰流量相对变幅 $1-Q_{post}/Q_{pre}$ 的相关关系, 其中 Q_{pre} 和 Q_{post} 分别为建库前后河道洪峰流量的算术平均值。由图8可知, 参数 α 和 α/v 均与建库前后洪峰流量相对变幅呈正相关关系, 相关系数 R 分别为0.80和0.61, 即枢纽修建前后洪峰流量相对变幅越大, 河流累积特征变量的时空调整速率越快。同时模型中的其他未知参数如河流累积特征变量平衡值 $\langle I(\infty) \rangle$ 等应也与河道水沙特性有关。未来若能在充分考



注: 由于三门峡库区泥沙淤积主要受坝前基准面抬升影响, 图中不予显示。

图8 参数 α 和 α/v 与建库前后洪峰流量相对变幅的关系

Fig. 8 Relationships between parameters α , α/v and relative peak discharge variation before and after dam closure

虑河道来水来沙条件与河床、河岸物质组成及抗冲性的基础上, 建立主要公式参数与河道水沙要素间的数值关系, 可进一步提高本文理论模型的实用性, 以便更好的服务于突发扰动后非平衡态冲积河道时空调整过程的模拟预测。

5 结论

(1) 基于收集的国内外多条典型冲积河流上枢纽修建后其上下游河道的长序列冲淤实测资料, 对河道特征变量的时空调整规律进行了分析, 结果发现: 从时间上看, 研究断面的垂向、横向调整速率及全河段冲淤调整速率通常在枢纽建成后的前几年最大, 之后随时间快速非线性减缓。累积河床冲刷深度、横向河宽、河段累积淤积量随时间不断增大, 最终趋于动态平衡, 特征变量的变化表现出典型的累积特性; 从空间上看, 坝下河段冲刷强度沿程非线性衰减, 近坝段冲刷最为剧烈, 其后冲刷强度沿程降低, 这种空间分布上的不平衡, 事实上是外部扰动引发的内部反馈在空间中传播的同时随时间衰减的结果, 同样是河流过程累积特性的另一外在表现。

(2) 本文在假定冲积系统外部扰动发生概率符合泊松分布和系统对单个扰动产生的内部反馈强度时间上满足指数衰减律的基础上, 借鉴电学领域中描述电子脉冲累积形成电流的方法, 对外部扰动诱发的冲积系统的内部反馈随时间的累积过程进行了数学描述, 建立了描述扰动后河流特征变量时间调整过程的理论模型, 同时通过变量代换引入系统反馈的空间传播速度变量, 进一步建立了模拟突发扰动后河流特征变量空间调整规律的理论模型。

(3) 运用本文模型对国内外多条典型冲积河流上枢纽修建后其上下游河道形态的时空调整过程进行了模拟, 结果表明: 河道垂向、横向、纵向与全河段的时空调整过程均可用统一的归一化公式来描述, 实测点均匀分布在理论曲线的两侧, 两者间的相关系数 R^2 分别达到0.92、0.93、0.76和0.95。可见, 考虑河流过程的累积特性及系统反馈的空间传播特性是准确定量模拟非平衡态河道时空调整过程的关键, 冲积河流的河床演变是外部扰动诱发的系统反馈累积及其空间传递协同作用的结果。

(4) 时间衰减系数 α 和综合衰减系数 α/v 是本文模型中的关键参数, 一定程度上直接决定扰动后河道特征变量时空调整的相对速率, 对冲积河流河床演变规律的研究至关重要。本文在模型应用时简单将参数 α 和 α/v 取为常数, 未考虑河道水沙特性与河床物质组成等因素的影响, 后续工作中需进一步对参数 α 和 α/v 的主要影响因素和相关变化规律加以探讨。

参考文献(References)

- [1] Xie Jianheng. River Evolution and Renovation. Wuhan: Wuhan University Press, 2013: 7-10. [谢鉴衡. 河床演变及整治. 武汉: 武汉大学出版社, 2013: 7-10.]
- [2] Qian Yiying, Wu Zhi, Zhu Cuixia. Preliminary analysis on maintaining effective storage capacity of reservoirs on heavy sediment-laden river//Compilation of Reservoir Sediment Reports. Communication Meeting about the Sediment Observation and Research Achievements of the Yellow River Reservoir. Zhengzhou: Yellow River Institute of Hydraulic Research, 1972: 102-111. [钱意颖, 吴知, 朱粹侠. 关于在多沙河流上修建水库保持有效库容的初步分析//水库泥沙报告汇编. 黄河水库泥沙观测研究成果交流会. 郑州: 黄河水利科学研究院, 1972: 102-111.]
- [3] Zhang Hongwu, Liu Hailing, Jiang Enhui, et al. Study of evolution trend of wandering channel in the lower Yellow River during sediment storage period of Xiaolangdi Reservoir. Yellow River, 1998, 20(11): 5-7. [张红武, 刘海凌, 江恩惠, 等. 小浪底水库拦沙期下游游荡性河段演变趋势研究. 人民黄河, 1998, 20(11): 5-7.]
- [4] Zhang Hongwu, Huang Yujie, Zhao Lianjun, et al. Mathematical model of river bed change downstream of Xiaolangdi Reservoir in early operation period. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(1): 139-145. [张红武, 黄玉婕, 赵连军, 等. 小浪底水库运用初期下游河道冲淤数学模型预测计算. 水力发电学报, 2002(1): 139-145.]
- [5] Zhang Hongwu, Zhang Qing, Jiang Enhui. Calculation of dominated discharge in the lower Yellow River. Journal of Sediment Research, 1994(4): 50-55. [张红武, 张清, 江恩惠. 黄河下游河道造床流量的计算方法. 泥沙研究, 1994(4): 50-55.]
- [6] Zhang Hongwu, Zhao Lianjun, Cao Fengsheng. Research of the cause of formation of wandering river model and its changes. Yellow River, 1996, 18(10): 11-15. [张红武, 赵连军, 曹丰生. 游荡河型成因及其河型转化问题的研究. 人民黄河, 1996, 18(10): 11-15.]
- [7] Liang Zhiyong, Yang Lifeng, Feng Pulin. Relations of channel geometry to water and sediment rate for the lower Yellow River. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(6): 68-71. [梁志勇, 杨丽丰, 冯普林. 黄河下游平滩河槽形态与水沙搭配之关系. 水力发电学报, 2005, 24(6): 68-71.]
- [8] Xia Junqiang, Zong Quanli, Zhang Yi, et al. Prediction of recent bank retreat processes at typical sections in the Jingjiang Reach. Science China Technological Sciences, 2014, 57(8): 1490-1499.
- [9] Xia Junqiang, Li Xiaojuan, Li Tao, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River. Geomorphology, 2014, 213(4): 255-265.
- [10] Chen Jianguo, Hu Chunhong, Dong Zhandi, et al. Change of bankfull and bed-forming discharges in the Lower Yellow River. Journal of Sediment Research, 2006(5): 10-16. [陈建国, 胡春宏, 董占地, 等. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究. 泥沙研究, 2006(5): 10-16.]
- [11] Wu Baosheng, Wang Guanqian, Xia Junqiang, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River. Geomorphology, 2008, 100(3): 366-376.
- [12] Wu Baosheng, You Tao. Theoretical model for delayed response of reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 627-632. [吴保生, 游涛. 水库泥沙淤积滞后响应的理论模型. 水利学报, 2008, 39(5): 627-632.]
- [13] Wu Baosheng, Zheng Shan, Thorne C R. A general framework for using the rate law to simulate morphological response to disturbance in the fluvial system. Progress in Physical Geography, 2012, 36(5): 575-597.
- [14] Knighton D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. London: Routledge, 2014: 279-289.
- [15] Jia Ruimin. Effect of bed erosion and fall of water at the lower reach of Danjiangkou Reservoir on the waterway. Journal of Waterway and Harbor, 1992(4): 12-22. [贾锐敏. 丹江口水库下游河床冲刷与水位降落对航道的影响. 水道港口, 1992(4): 12-22.]
- [16] Yang Yunping, Zhang Mingjin, Sun Zhaohua, et al. The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD). Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 776-789. [杨云平, 张明进, 孙昭华, 等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究. 地理学报, 2017, 72(5): 776-789.]
- [17] Wang Zhaoyin, Li Changzhi, Wang Feixin. Effect of Tongguan's elevation on the fluvial process of the lower Weihe River. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(9): 1-8. [王兆印, 李昌志, 王费新. 潼关高程对渭河河床演变的影响. 水利学报, 2004, 35(9): 1-8.]
- [18] Li Changzhi, Wang Zhaoyin, Wu Baosheng, et al. Effect of descending Tongguan's elevation on flood defense situation of Weihe River. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 147-154. [李昌志, 王兆印, 吴保生, 等. 潼关高程下降对渭河下游防洪的影响. 水利学报, 2005, 36(2): 147-154.]
- [19] Williams G P, Wolman M G. Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. United States Geological Survey Professional Paper 1286. Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1984: 66-83.
- [20] Peng Tao, Yan Hao, Guo Jiali, et al. Impact of Danjiangkou Reservoir operation on downstream hydrological regime.

- Yangtze River, 2016, 47(6): 22-26. [彭涛, 严浩, 郭家力, 等. 丹江口水库运用对下游水文情势影响研究. 人民长江, 2016, 47(6): 22-26.]
- [21] Chien Ning. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, 10(2): 143-159.
- [22] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. *Riverbed Evolution*. Beijing: Science Press, 1987: 473-476. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987: 473-476.]
- [23] Rahn P H. Erosion below main stem dams on the Missouri River. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 1977, 14(3): 157-181.
- [24] Wang Suiji. Channel pattern specialities and the formation of the lower reaches of the Yellow River. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(1): 73-78. [王随继. 黄河下游河型的特性及成因探讨. 地球学报, 2003, 24(1): 73-78.]
- [25] Xu Jiongxin, Zhang Ouyang. Complicated fill-scour behaviors of the Huanghe River and the channel-forming processes. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 67(3): 274-280. [许炯心, 张欧阳. 黄河下游游荡段河床调整对于水沙组合的复杂响应. 地理学报, 2000, 67(3): 274-280.]
- [26] Chien Ning, Zhou Wenhao, Hong Roujia. The characteristics and genesis analysis of the braided stream of the lower Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 28: 1-27. [钱宁, 周文浩, 洪柔嘉. 黄河下游游荡性河道的特性及其成因分析. 地理学报, 1961, 28: 1-27.]
- [27] Fu Renshou, Qi Meilan, Fang Hongwei, et al. Sediment transport characteristics of Yangtze River in river section from Yichang to Hankou. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(1): 35-41. [府仁寿, 齐梅兰, 方红卫, 等. 长江宜昌至汉口河段输沙特性分析. 水利学报, 2005, 36(1): 35-41.]
- [28] Liu Ning. On the control of Tongguan elevation and operation mode of Sanmenxia Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9): 1019-1028. [刘宁. 对潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究的认识. 水利学报, 2005, 36(9): 1019-1028.]
- [29] Pang Jiazhen. Some observations on the management strategy of the lower Yellow River. *Yellow River*, 2005, 27(1): 3-4. [庞家珍. 对黄河下游治理方略的几点思考. 人民黄河, 2005, 27(1): 3-4.]
- [30] Zhao Yean, Pan Xiandi, Fan Zuoying, et al. The basic law of souring and filling in the lower Yellow River//Li Baoru. *Collected Scientific Research Papers (Sediment & Soil And Water Conservation)*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1989: 13-15. [赵业安, 潘贤弟, 樊左英, 等. 黄河下游河道冲淤情况及基本规律//李保如. 科学研究的论文集(泥沙·水土保持). 郑州: 河南科学技术出版社, 1989: 13-15.]
- [31] Gardiner C W. *Stochastic Methods*. Vol. 4. Berlin: Springer, 2009: 14-18.
- [32] Wu Baosheng, Xia Junqiang, Fu Xudong, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(10): 1585-1601.
- [33] Graf W L. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science*, 1977, 277(2): 178-191.
- [34] Hooke J M. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England. *Geomorphology*, 1995, 14(3): 235-253.
- [35] Simon A, Robbins C H. Man-induced gradient adjustment of the South Fork Forked Deer River, West Tennessee. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1987, 9(2): 109-118.
- [36] Rinaldi M. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2003, 28(6): 587-608.
- [37] Simon A, Thorne C R. Channel adjustment of an unstable coarse-grained stream: Opposing trends of boundary and critical shear stress, and the applicability of extremal hypotheses. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(2): 155-180.
- [38] Richard G A. Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from Cochiti Dam, Rio Grande, NM [D]. Fort Collins: Colorado State University, 2001.
- [39] Richard G A, Julien P Y, Baird D C. Case study: modeling the lateral mobility of the Rio Grande below Cochiti Dam, New Mexico. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(11): 931-941.
- [40] Wang Zhaoyin, Wu Baosheng, Wang Guangqian. Fluvial processes and morphological response in the Yellow and Weihe rivers to closure and operation of Sanmenxia Dam. *Geomorphology*, 2007, 91(1/2): 65-79.
- [41] Wu Baosheng. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers: II Model applications. *Journal of Sediment Research*, 2008(6): 30-37. [吴保生. 冲积河流河床演变的滞后响应模型: II. 模型应用. 泥沙研究, 2008(6): 30-37.]
- [42] Wu Baosheng. Delayed response model for bankfull area of the Gaocun Station on the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2010(2): 31-34. [吴保生. 黄河下游高村站平滩面积的滞后响应模型. 泥沙研究, 2010(2): 31-34.]

The accumulation phenomenon and stochastic model in fluvial processes

JING Huan¹, ZHONG Deyu^{1,2}, ZHANG Hongwu¹, SHI Xufang³, WANG Yanjun¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The accumulation phenomenon commonly occurs in fluvial processes. Accurately considering the accumulation effects of previous water and sediment conditions is essential for the study of riverbed evolution. To reveal the physical dynamics of the accumulation phenomenon, herein various geometry observations upstream and downstream of dam on several domestic and overseas typical fluvial rivers were analyzed. To do this, the changes in water and sediment conditions were defined as external disturbances, based on assumptions that the probability of an external disturbance conforms to the Poisson distribution and the feedback intensity induced by an individual disturbance decays exponentially with time. In this paper, a mathematical description of the accumulation processes of internal feedback induced by external disturbances is given, and a corresponding theoretical model is proposed for simulating the spatio-temporal adjustment processes of river characteristic variables on the basis of the stochastic theory in statistical mechanics. Further, the above models were then applied to investigate the spatio-temporal adjustment processes of the upper and lower reaches of dams after their construction. Results revealed two key findings. (i) Temporally, the vertical, lateral, and whole reaches' adjustment rates over time are relatively fast in the early period following disturbances but then slow down rapidly, while the accumulated bed degradation, river width and accumulated sedimentation continuously increase until a new dynamic equilibrium state is attained; these phenomena reflect the representative accumulation characteristics of fluvial processes. (ii) Spatially, the erosion intensity downstream of dams decreases nonlinearly along the channel until it eventually diminishes. In fact, the unbalanced distribution of erosion intensity across space arises from the system feedback caused by external disturbances propagating in space yet decaying over time, which is another external manifestation of an accumulation characteristic in fluvial processes. Model applications indicate that the spatio-temporal adjustment processes of cross sections and channel reaches can be accurately described by the unified theoretical formula derived from equation deforming, since the model predictions show good agreement with observed field data: coefficient of determination (R^2) between them attained values of 0.92, 0.93, 0.76, and 0.95. The proposed theoretical models take both the accumulative characteristics of fluvial processes and the spatial propagation characteristics of system feedback into account synthetically. In demonstrating this approach, this study provides the theoretical basis and new calculation method for quantitatively describing the spatio-temporal adjustment processes of non-equilibrium fluvial channels following disturbances.

Keywords: accumulation phenomenon; fluvial process; accumulated erosion and sedimentation; accumulated riverbed degradation; channel width