

三峡蓄水后典型河段分形维数的变化分析

周银军^{1,2}, 陈 立¹, 欧阳娟¹, 刘 金¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072 2. 长江科学院河流研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对三峡工程蓄水后下游河道河床表面形态的变化, 采用分形维数对河床表面形态进行量化, 并分析河道冲淤调整特点, 对河床表面分形维数 (BSD) 的变化特点及物理意义进行探讨。结果表明, BSD 与河床各个剖面形态之间的关系是整体与部分的关系, BSD 能全面地反映床面形态的复杂程度。三峡蓄水后, 宜昌-虎牙滩和宜都河段 BSD 明显增大, 关洲河段增大幅度较小, 而芦家河河段 BSD 值略有减小, 同时, 各河段 BSD 的变化可在一定程度上表征三峡蓄水后下游河道河床综合阻力的调整结果。可通过对各河段演变趋势的分析, 来预测其 BSD 的变化, 进而为分析其阻力和水位的变化趋势提供依据。

关键词: 河道; 三峡工程; 河床表面分形维数; 演变; 河床综合阻力

中图分类号: TV 147.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)03-0299-08

三峡工程蓄水后, 改变了下游河道的来水来沙条件, 将引起下游河道一系列的冲淤调整^[1-2]。其中河床表面形态的冲淤调整直接关系到河床形态阻力的变化^[3], 进而影响到河段枯水位的变化^[4]。床面形态的量化历来是河流动力学中的一个难题^[3], 分形理论的出现则为此提供了一个有力工具。Nikora^[5]、冯平^[6]、马宗伟^[7]和白玉川等^[8]先后研究了河段平面形态(河长)的分形特征, 认为河床形态分维体现了河流的蜿蜒程度^[8], 甚至可用于河型判别^[56], 且与洪水频率存在关系^[7]。Robert^[9]和金德生^[10]则分别对河道断面及深泓纵剖面分维进行了研究, 认为河道纵剖面分维体现了河道纵剖面的复杂程度, 可作为河流纵向消能的一种量度。可见, 目前对河流形态分形的研究多针对某个剖面的线分维(其分维数介于 1~2)特征, 缺乏对整个河床表面形态的分形研究^[11], 且尚未能将河床形态分维与河床冲淤调整较好地进行结合。

本文针对三峡工程坝下游河段河床表面形态的冲淤调整, 选取典型河段, 通过计算河床表面分形维数 (Bed Surface fractal Dimension, BSD, 介于 2~3 之间) 来对河床表面形态调整进行量化, 并建立了 BSD 与相应河段冲淤演变的关系, 一方面来进一步阐释 BSD 的物理意义, 另一方面可通过 BSD 的变化来分析蓄水后各河段河床表面形态的调整特点, 并以此探讨河床阻力的调整结果。

1 BSD 的计算方法

BSD 的计算在分形理论中属于面分维的范畴^[12]。作为一个新兴的理论, 面分维的计算方法有很多, 目前还没有形成相应的规范可供遵循^[13], 同时, 在此之前, 虽然面分维已在流域地貌等领域略有显现^[14+16], 但尚未用以描述河床表面形态复杂程度并以此来进行河床阻力分析^[17], 因此, 有必要在此简要说明本文 BSD 的计算方法。

(1) 数据源来自实测河道水下地形图 (DWG 格式), 在提取高程数据以后利用 GIS 软件建立河床表面 DEM, 以此作为分维分析的对象;

(2) 采用改进的投影覆盖法^[11] (表面积-尺码法^[18]的一种) 来对河道 DEM 进行分形分析, 计算出河床表面的分形维数 D , 图 1 为投影覆盖法示意图, 式 (1) 为计算公式。

收稿日期: 2009-07-01

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划资助项目 (2006BA B05B03-05); 国家自然科学基金资助项目 (10672125)

作者简介: 周银军 (1983-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究工作。

E-mail: zhouyinjun1114@126.com

通信作者: 陈立, E-mail: chenliwuhe@263.net

$$D = 2 - \frac{\ln A - \ln C_0}{\ln r} \tag{1}$$

式中 A 为河床表面的欧氏面积, 即方格覆盖后各空间四边形面积之和; r 为尺码, 即覆盖所用方格的边长, 本文采用人工判定法确定无标度区, 经过相关试验, 并考虑到建立的河道 DEM 的精度, r 的取值范围设定为 (30 m, 100 m); C_0 为常数, $\ln C_0$ 可由 $\ln A \sim \ln r$ 的线性拟合方程得出; D 即为粗糙表面的分形维数, 介于 2~3 之间, D 为 2 时表示为绝对光滑平面, 数值越大则表面越凹凸不平^[19], 因而阻力越大。

计算所用各河段 DEM 精度均为 30 m × 30 m, 且范围均以两岸大堤堤线为准, 即各年份河段平面位置是一定的, 所计算的 BSD 的反映的即是这一平面范围内的冲淤变化。

2 三峡蓄水后典型河段冲淤调整特点及其 BSD 变化

针对三峡工程坝下游河段河床表面形态的冲淤调整 (图 2), 选取了 4 个分汊河段作为典型河段, 分别为宜昌河段、宜都河段、关洲河段和芦家河河段, 通过计算河床表面分形维数来对河床表面形态调整进行量化。



图 2 分析河段整体示意图
Fig. 2 Entire map of the analysis reach

三峡蓄水以后, 改变了下游河段的来水来沙条件, 引起相应的河床冲淤调整, 床面形态的变化亦为其河床冲淤的结果之一, 其复杂程度的变化可由 BSD 的大小来定量反映。本文基于 2003 年 3 月 ~ 2008 年 3 月原观地形, 对各河段的演变特点进行了分析, 其中表 1 给出了各河段历年 BSD 的变化情况。

表 1 各河段历年河床表面分形维数统计
Table 1 BSD of each reach from Yichang to Yangjiaao

时 间	不同河段分形维数 D			
	宜昌河段	宜都河段	关洲河段	芦家河河段
2003 年 3 月	2. 158 830	2. 133 536	2. 214 215	2. 151 803
2004 年 3 月	2. 162 856	2. 137 392	2. 216 419	2. 136 814
2005 年 3 月	2. 165 821	2. 133 913	2. 218 278	2. 140 337
2006 年 3 月	2. 166 418	2. 143 229	2. 213 920	2. 143 105
2007 年 3 月	2. 166 028	2. 145 942	2. 217 589	2. 142 240
2008 年 3 月	2. 167 527	2. 149 892	2. 216 437	2. 142 517

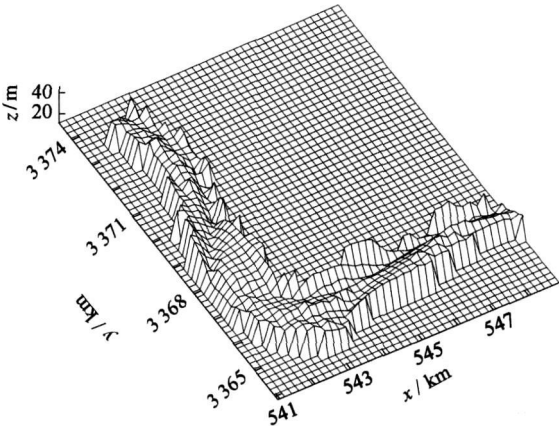


图 1 河床表面投影覆盖法示意图
Fig. 1 Schematic view of the projection covering method

2.1 宜昌河段

宜昌(宜昌—虎牙滩)河段为一顺直分汊河段,上起镇川门,下接云池水道,全长 19.4 km,处于山区河道与平原河道之间的过渡段,河段较大的洲滩为胭脂坝江心洲。三峡蓄水以来,宜昌河段总体河势稳定、河床调整以冲刷为主,通过对 2003 年 3 月~2008 年 3 月宜昌河段原观测资料分析,可知其冲刷调整具有以下主要特点:

- (1) 冲刷年际间分布不均,以蓄水第一年为最大,冲刷量占 5 年间的 48.5%,其余各年虽有所冲刷,但冲刷量均较小。
- (2) 冲刷主要在河道主槽内进行,深泓线下切的沿程分布具有集中性,历年均集中于胭脂坝汊道下段和河段中下部的临江坪段。
- (3) 胭脂坝洲头略有后退,尤以 2006 年 3 月~2007 年 3 月较为明显,洲头冲刷、高程下降,出现 0m 线贯通的横向串沟,使原来的洲头与胭脂坝主体分开,胭脂坝整体在蓄水后略有萎缩,但程度有限。
- (4) 从表 1 可以看出,2003 年 3 月~2008 年 3 月宜昌河段河床表面分形维数整体呈增大趋势,尤其以蓄水后第 1 年增大最多。

2.2 宜都河段

宜都河段距离宜昌 39 km,上起云池,下至白洋镇,全长 14 km,为急弯、低水分汊河段。在河段右岸弯顶略下的位置有清江入汇,入汇口稍上的河心有南阳碛潜洲,水道因此分为左右两泓,左泓为沙泓,右泓为石泓。河段内左岸有中沙咀边滩和沙坝湾边滩,右岸有三马溪边滩和大石坝边滩。三峡蓄水以后,冲淤调整以冲刷为主,河段整体河势变化不大,其冲刷具有以下特点:

- (1) 各年持续冲刷,且幅度较大,年均冲刷量在 700万 m^3 以上。
- (2) 河床冲刷主要在枯水河槽内进行,河段上部冲刷以深泓下切为主要形式,下部以边滩冲刷、枯水河槽展宽、深泓摆动为主要形式。
- (3) 分汊段沙泓上、下浅区深泓明显下切,石泓深泓及南阳碛洲面高程亦有一定程度的下降,但期间有冲淤反复。
- (4) 洲滩变化以南阳碛和沙坝湾边滩变化为主,南阳碛因沙、石泓的冲刷,横断面“W”特征更为明显,南阳碛滩面高程亦有所降低,以 2005 年 4 月为最低,与 2003 年 3 月相差 1.9 m;沙坝湾边滩 0 m 等深线(航基面为黄海高程 35.79 m)在 2003 年 3 月~2008 年 3 月期间累计冲刷达 250 m,深泓随之左移贴岸。
- (5) 2003 年 3 月~2008 年 3 月宜都河段河床表面分形维数整体呈增大趋势(表 1)。

2.3 关洲河段

关洲河段位于长江中游荆江河段进口,属双股微弯高水分汊河型,起于枝城大桥,止于伍家口,长 14 km。关洲左汊习称为关洲夹,为次槽,右汊为主槽,河道左岸有沙集坪边滩和同心垸边滩。三峡蓄水以来,关洲河段有冲有淤,以冲为主,整体河势基本稳定,其冲刷调整具有以下特点:

- (1) 冲刷量在时间分布上具有集中性,主要集中在 2004 年 3 月~2005 年 3 月,该年冲刷量占 2003 年 3 月~2008 年 3 月 5 年总体冲刷量的 78.4%,其余各年冲刷量相对较小,有些年份甚至为淤积。
- (2) 主要冲刷部位在枯水河槽,间有淤积,中、高水河槽各年持续小幅冲刷。
- (3) 关洲左右两汊相比而言,右汊相对稳定,略有冲刷下切,左汊关洲夹冲淤变化较为剧烈,主要冲刷形式以深泓下切,汊道进出口展宽为主,而淤积则表现为关洲夹中心滩的出没。
- (4) 洲滩变化特点为沙集坪边滩冲刷后退、关洲基本稳定、同心垸边滩冲淤反复。
- (5) 三峡蓄水以后关洲河段河床表面分形维数整体上有所增大,尤其是蓄水后头两年其 BSD 持续增大,2005 年 3 月至 2006 年 3 月则有所减小,其后再次增大,而 2008 年 3 月的 BSD 又相对 2007 年 3 月的为小。

2.4 芦家河河段

芦家河河段自陈二口至昌门溪,全长 12 km,为微弯放宽且有分流口的水道,其进口右侧有松滋河分流入洞庭湖。河道内有碛坝将河槽分为两汊,沙泓位于左侧,为枯水期主航道;石泓位于右侧,为中、洪水期

主航道。三峡蓄水后, 芦家河河段河势保持稳定, 各年份有冲有淤, 整体表现为冲刷, 但冲淤量相对以上几个河段为小, 2003年 3月~2008年 3月其冲淤调整具有以下特点:

(1) 河段并非持续冲刷, 而是冲淤相间, 以冲为主, 冲刷量相对较小。

(2) 河道主槽的冲刷下切并不明显, 更多是在碛坝尾部, 羊家老边滩头部附近有较大幅度的冲淤变化, 其形式主要以边(心)滩淤长崩退和枯水河槽宽度变化为主。

(3) 石泓冲刷幅度相对沙泓为大, 尤其在石泓尾部冲淤变化剧烈, 河槽有一定的下切, 沙、石泓深泓平均高程差减小了 0.93 m。

(4) 三峡蓄水以后芦家河河段河床表面分形维数整体上略有减小, 尤其是蓄水后第 1 年其 BSD 为历年最小, 其后有所增大, 2007年 3月复有所减小, 而 2008年 3月 BSD 又相对 2007年 3月的为大。

3 河段 BSD 变化的物理意义

BSD是从整体上描述床面形态的复杂程度, 而传统上对床面形态的研究则往往通过对河床表面取不同剖面来观察进行^[12], 如在横断面上取的是断面形态, 纵向上则为深泓纵剖面, 平面上为河床的平面形态。显然 BSD 与这些剖面形态都有一定的相关关系, 当河床某部冲淤变化剧烈, 引起其剖面形态变化时, 其 BSD 亦将发生相应改变。以下通过 4 个河段 BSD 大小与典型剖面变化的相关分析, 来进一步阐释 BSD 与各剖面的关系及其物理意义。

3.1 宜昌河段

该河段胭脂坝多年洲面高程变化不大, 而三峡蓄水以来, 深泓下切明显且部位集中, 其深泓下切程度改变着纵剖面的曲折程度, 因此取其深泓剖面变化与 BSD 进行相关分析, 图 3 给出了 BSD 与深泓高程对应图。

从图 3 可以看出, 宜昌河段 BSD 与深泓高程呈明显的负相关性, 基本上是随着深泓的降低而增大。而 2006年 3月~2007年 3月略有例外, 其原因有二: 一是当年深泓下降程度极小, 仅为 0.046 m; 二是 2006年 3月~2007年 3月, 胭脂坝洲头高程降幅较大, 甚至形成横向串沟, 在一定程度上抵消了该年深泓下降而产生的滩槽差距。

鉴于 BSD 值变化幅度的绝对值较小, 故针对 BSD 是否能显著反映床面形态调整进行了单因素方差分析, 其中采用深泓平均高程来作为宜昌河段床面变化的特征值, 计算其与 BSD 间的显著性检验结果 F 值为 5347, 而 $F_{0.99}(1, 10)$ 为 10, 可见宜昌河段 BSD 能在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的情况下极为显著地反映床面形态的变化。

3.2 宜都河段

宜都河段主要的冲淤调整体现在汉道段冲刷以及南阳碛和沙坝湾边滩的崩退, 尤其是沙坝湾边滩, 逐年崩退, 滩体缩小, 对整个河段的平面形态造成明显影响, 其必将引起 BSD 的变化, 图 4 给出了沙坝湾边滩 0 m 线后退幅度与河段 BSD 对应关系。

从图 4 可以看出, 宜都河段 BSD 与沙坝湾边滩冲刷后退程度呈明显的相关关系, 基本上是随着边滩的冲刷后退而增大。其中 2004年 2月~2005年 4月为例外, 这要结合典型横断面的变化来分析, 南阳碛横断面位于汉道中部, 其在该年度的变化出现了特殊情况: 在其右汉石泓冲刷下切的同时, 南阳碛洲面高程也大幅下降, 仅为 34.37 m, 为历年最低, 使得滩槽高差减小, 整个横断面形态趋于平缓, 不规则程度有所减小, 见图 5。

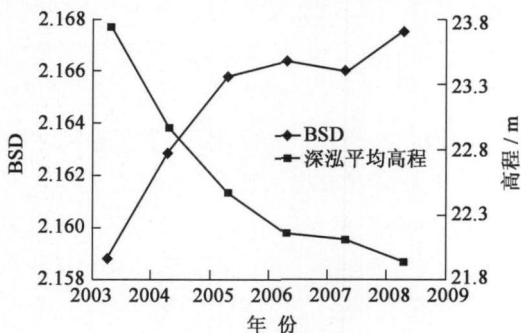


图 3 宜昌河段 BSD 与深泓平均高程对应图

Fig. 3 Relationship between BSD and thalweg average elevation in Yichang reach

以沙坝湾边滩 0m 线后退幅度为床面形态调整的特征值, 计算图 4 中两个因素的 F 值为 14.8 大于 $F_{0.99}(1, 10)$, 即宜都河段 BSD 亦能极为显著地反映床面形态的变化。

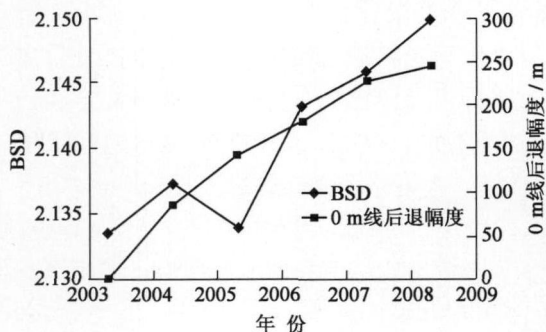


图 4 宜都河段 BSD 与沙坝湾边滩 0m 线后退幅度对应图

Fig. 4 Relationship between BSD and retreat extent of Shabawan 0m line in Yidu reach

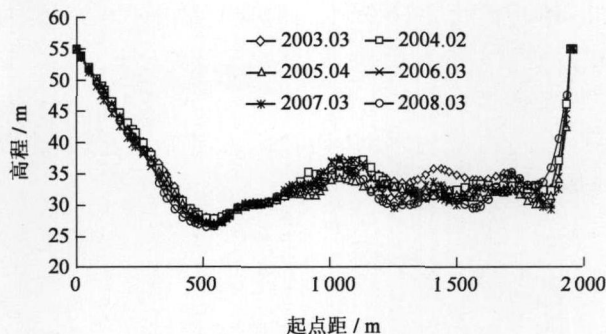


图 5 南阳碛横断面冲淤变化图

Fig. 5 Changes of Nanyangqi cross section in Yidu reach

3.3 关洲河段

由上可知, 关洲河段冲淤变化较为剧烈的部位是发生于关洲夹, 关洲夹出口段心滩的出现, 是关洲夹, 乃至整个关洲河段冲淤变化最为剧烈的体现, 导致相应横断面形态的改变, 甚至呈现出“W”形式, 以心滩高程与其左汊深泓之差作为“滩槽差”, 用来表述该断面“W”形程度的大小, 图 6 给出了该滩槽差与河段 BSD 对应关系。

从图 6 可以看出, 关洲河段 BSD 与关洲夹下段心滩冲淤涨退呈明显的正相关关系, 滩槽差加大, BSD 加大, 滩槽减小, 则 BSD 减小。当然这个关系同样不是呈线性比例的, 如 2007 年 3 月滩槽差高达 4.06 m, 远高于 2005 年 3 月的 0.96 m, 而其 BSD 为 2.2176 却小于 2005 年 3 月的 2.2182。这里的主要原因是尽管 2007 年 3 月心滩断面的“W”形程度加剧, 但其下关洲夹出口断面也因为淤积而使得断面形态“W”形程度缓和(图 7)。2007 年 3 月两个断面同样为淤积, 但淤积的部位不同, 也使得其对断面“W”形态的影响不同。

计算图 6 中两个因素的 F 值为 3.6 大于 $F_{0.90}(1, 10)$, 即关洲河段 BSD 能在一定程度上反映床面形态的变化。

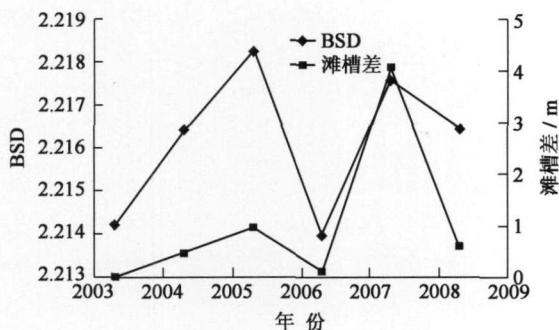


图 6 关洲河段 BSD 与关洲夹尾部滩槽差对应图

Fig. 6 Relationship between BSD and the difference of main channel and flood plain in Guanzhoujia channel

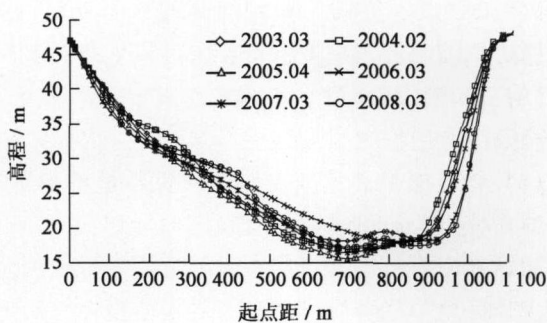


图 7 关洲夹出口段横断面冲淤变化图

Fig. 7 Changes of exit cross section in Guanzhoujia channel

3.4 芦家河河段

芦家河河段冲淤变化较为剧烈的部位是发生于石泓尾部, 其具体表现以羊家老边滩滩缘向碛坝尾部方向淤长、崩退为主, 河段表面形态的冲淤调整可用羊家老边滩上段的面积 (0m 线范围) 变化作为指标来反映。

如图 8 为羊家老边滩上段面积与河段 BSD 对应关系。

从图 8 可以看出, 芦家河河段 BSD 与羊家老边滩上段部分的冲淤涨退呈明显的正相关关系, 边滩面积加大, BSD 加大, 面积减小, 则 BSD 减小。同前述河段一样, 单个因素的变化是很难完全决定出整个河段

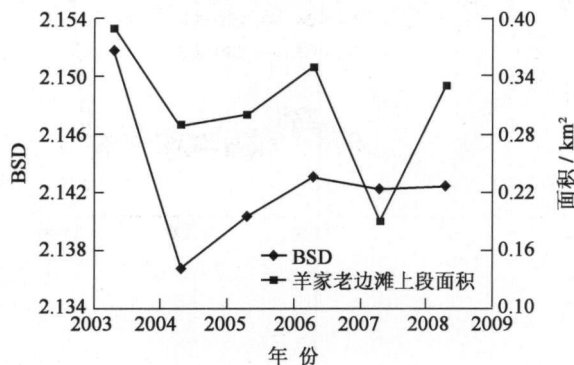


图 8 芦家河河段 BSD 与羊家老边滩上段面积对应图

Fig 8 Relationship between BSD and the area of Yangjialao bar in Lujiuhe reach

BSD 变化的, 对于芦家河河段而言, 2007 年 3 月堪为典型: 羊家老边滩上段部分面积仅为 0.19 km^2 , 为历年最小, 但其 BSD 为 2.142 2, 高于 2004 年 3 月和 2005 年 3 月的 BSD 值。主要原因分析如下:

(1) 三峡蓄水以后, 清水下泄, 芦家河河段整体冲淤少, 羊家老边滩面积减小的同时, 碛坝尾部也多呈冲刷态势 (碛坝面积基本为减小趋势), 二者共同的作用, 影响着整个河段 BSD 值大小。

(2) 2006 年为典型小水年, 水流靠岸时间较长, 使羊家老边滩上段冲刷崩退, 这也是 2007 年 3 月羊家老边滩上段部分面积为历年最小的主要原因, 同时也因为其汛期水流动力条件较正常年份偏弱, 使汛期碛坝尾部冲刷较小, 并在枯水期淤积加大, 使得该年碛坝面积为蓄水后历年最大, 达 1.91 km^2 。由于碛坝尾部的淤积在一定程度上抵消了部分羊家老边滩上段的冲刷, 使得 2007 年 3 月的河段 BSD 并未明显减小。

计算图 8 中两个因素的 F 值为 4313 大于 $F_{0.99}(1, 10)$, 即芦家河河段 BSD 能在极为显著地反映河段床面形态的变化。

3.5 典型河段 BSD 变化特点及物理意义

通过以上分析, 可进一步认识到 BSD 与各剖面形态的关系, 并体现出了其部分物理意义。BSD 的变化, 其缘由为河床表面形态的变化, 是河床冲淤调整的结果。其与河床表面形态在剖面上的几何特征值有关, 但二者关系为非线性的, 通过单因素方差分析, 可以发现 BSD 能显著地反映着河床表面整体形态的变化。BSD 变化的后果则是沙波阻力和成型淤积体阻力发生相应的变化。三峡蓄水后各典型河段 BSD 变化的特点及其物理意义如下:

(1) 三峡蓄水后近坝典型河段的 BSD 值整体表现为有所增大, 尤其以宜虎、宜都近坝河段最为明显, 关洲河段增大幅度较小, 芦家河河段 BSD 则是先减小而后小幅增大, 因各河段离葛洲坝距离不同, 其 BSD 变化趋势的不同可能与坝下游冲刷沿程发展有关。

(2) 考虑到河势和人工建筑物常年变化不大, 再加之河床的粗化, 近坝河段 BSD 的加大将使相应的河床综合阻力有所增大。

(3) BSD 是描述河床表面非线性特征的参数之一, 其主要是在整体上描述河床表面形态的复杂程度, 较之剖面分析法能更全面的反映床面形态的复杂程度, 且其与河床各个剖面形态特征值均存在一定的相关性, 如纵剖面曲折程度、横断面滩槽高差以及洲滩淤长进退所引起的平面形态变化等等, 但很难由某一个剖面变化来完全单独地反映, 二者之间是整体与部分的关系。

(4) 宜昌、宜都以及关洲河段河槽冲刷较大, 表现为两汉深泓下切、甚至纵剖面出现一定程度的陡坎, 河道的纵剖面曲折程度、滩槽高差有所加大, 使得其 BSD 值有所增大。芦家河河段因其坡陡流急, 蓄水后冲刷幅度较小, 河槽下切并不明显, 以边滩冲刷为主, 滩槽差减小, 使得其 BSD 值略有减小。

(5) BSD 的变化结果说明了蓄水后各河段河床综合阻力有一定程度的增大, 而河道阻力的增大可作为宜昌枯水位暂时未降的原因之一, 可通过对各河段演变趋势的分析, 来预测其 BSD 的变化, 进而为分析其阻力和水位的变化趋势提供依据。

4 结 论

(1) 河床表面形态分形维数是描述河床表面非线性特征的参数之一,可在整体上描述河床表面形态的复杂程度,其与河床各个剖面形态之间是整体与部分的关系。

(2) 三峡蓄水后,宜虎、宜都以及关洲河段河槽冲刷较大,河道的纵剖面曲折程度、滩槽高差有所加大,使得其表面分维有所增大。芦家河河段蓄水后冲刷以边滩为主,滩槽差减小,其河床表面分维略有减小。

(3) 通过各河段河床表面分维的变化结果可以看出,三峡蓄水后近坝河段阻力整体呈增大趋势,这可作为河槽冲刷情况下,宜昌枯水位暂时未降的原因之一。

鉴于河床表面分维可作为河床表面形态复杂程度的定量工具,同时又在一定程度上表征着河床阻力的变化结果,因此可通过对各河段演变趋势的分析,来预测其河床表面分维的变化,进而为分析其阻力和水位的变化趋势提供依据。

参考文献:

- [1] 李义天,孙昭华,邓金运.论三峡水库下游的河床冲淤变化[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(3):283-295.(LI Yitian, SUN Zhaohua, DENG Jinyun, et al. A study on riverbed erosion downstream from the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(3): 283-295. (in Chinese))
- [2] 谢作涛,侯卫国,任昊.葛洲坝下游宜昌-杨家脑河段平面二维水沙数学模型[J].水科学进展,2008,19(3):309-316.(XIE Zuotao, HOU Weiguang, REN Hao. 2D horizontal modeling for the movement of flow and sediment from Yichang to Yangjiaoba reach at the Gezhouba downstream[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 309-316. (in Chinese))
- [3] 陈立,明宗富.河流动力学[M].武汉:武汉大学出版社,2001:2-3.(CHEN Lijun, Ming Zongfu. River mechanics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 2-3. (in Chinese))
- [4] 葛华,李义天,朱玲玲,等.三峡蓄水初期宜昌枯水位稳定机理初步分析[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(1):47-53.(GE Hua, LI Yitian, ZHU Lingling, et al. Primary analysis of stability mechanism of Yichang low-water level during TGP's initial impoundment period[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(1): 47-53. (in Chinese))
- [5] NKORA V I. Fractal structures of river plan forms[J]. Water Resour Res, 1991, 27(4): 1327-1333.
- [6] 冯平,冯焱.河流形态特征的分维计算方法[J].地理学报,1997,7(4):324-330.(FENG Ping, FENG Yan. Calculation on fractal dimension of river morphology[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 7(4): 324-330. (in Chinese))
- [7] 马宗伟,许有鹏,李嘉峻.河流形态的分维及与洪水关系的探讨:以长江中下游为例[J].水科学进展,2005,16(4):530-534.(MA Zongwei, XU Youpeng, LI Jiarun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood: Case study in the middle and lower course of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 530-534. (in Chinese))
- [8] 白玉川,黄涛,许栋.蜿蜒河流平面形态的几何分形及统计分析[J].天津大学学报,2008,41(9):1052-1056.(BAI Yuchuan, HUANG Tao, XU Dong. Fractal and statistic analysis of planar shape of meandering rivers[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9): 1052-1056. (in Chinese))
- [9] ROBERT A. Statistical properties of sediment bed profiles in alluvial channels[J]. Math Geol, 1988, 20(6): 205-225.
- [10] 金德生,陈浩,郭庆伍.河道纵剖面分形-非线性形态特征[J].地理学报,1997,52(2):154-162.(JIN Desheng, CHEN Hao, GUO Qingwu. A preliminary study on non-linear properties of channel longitudinal profiles[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(2): 154-162. (in Chinese))
- [11] 周银军,陈立,刘欣桐,等.河床表面分形特征及其分形维数计算方法研究[J].华东师范大学学报:自然科学版,2009(3):170-178.(ZHOU Yijun, CHEN Li, LIU Xintong, et al. Study on fractal properties of river bed and the calculation method of fractal dimension[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009(3): 170-178. (in Chinese))
- [12] VAN B T L, RENALDO R R, FERNANDO M R, et al. Water level dynamics in the Amazon flood plain[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(7): 725-732.
- [13] 谢和平,张永平,宋晓秋.分形几何:数学基础与应用[M].重庆:重庆大学出版社,1991:189-192.(XIE Heping,

- ZHANG Yong-ping, SONG Xiao-qin. Fractal geometry: Mathematical base and application[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991: 189-192. (in Chinese))
- [14] 崔灵周, 肖学年, 李占斌. 基于 GIS 的流域地貌形态分形盒维数测定方法研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(2): 38-40. (CUI Ling-zhou, XIAO Xue-nian, LI Zhan-bin. GIS-based approach for measuring the fractal box dimension of watershed topography[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(2): 38-40. (in Chinese))
- [15] 汪富泉, 曹叔尤, 丁晶. 河流网络的分形与自组织及其物理机制[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 368-376. (WANG Fu-quan, CAO Shu-you, DING Jing. Fractal self-organization and its physical mechanism of river networks[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 368-376. (in Chinese))
- [16] MICHEAL S, BOMMANNA G K, MONICA B E. The effect of bed age and shear stress on the particle morphology of eroded cohesive river sediment in an annual flume[J]. Water Research, 2008, 42(15): 4179-4187.
- [17] PHILIP R K, JOHN M F, DAVID P L, et al. A roughness-corrected index of relative bed stability for regional stream surveys[J]. Geomorphology, 2008, 99(4): 150-170.
- [18] XIE H P, WANG J A, STEN E. Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surface[J]. Physics Letters A, 1998, 242(2): 41-50.
- [19] 沈中原, 李占斌, 李鹏, 等. 流域地貌形态特征多重分形算法研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 385-391. (SHEN Zhong-yuan, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Multifractal arithmetic for watershed topographic feature[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 385-391. (in Chinese))

Changes in fractal dimensions of representative reaches after the impoundment of Three Gorges Project^{*}

ZHOU Yin-jun^{1,2}, CHEN Li¹, OUYANG Juan¹, LIU Jin¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract The changes in erosion-deposition patterns of downstream river bed surface after the impoundment of Three Gorges Project (TGP) are quantified by the river bed surface fractal dimension (BSD). The changing character and the physical mechanism associated with the changes are also analyzed. The study reveals a whole-part relationship between the BSD and each cross-section. The complexity of river bed surface can be well represented by BSD. After the TGP impoundment, there is a significant increase in BSD along the Huyatan and Yidu reaches. While, less increase is found for the Guanzhou reach and the opposite result is obtained in the Lujiache reach. The change in BSD of each river reach is able to characterize the deformation in the river bed surface, which is resulted from the new regime of integrated frictions after the TGP impoundment. The BSD can thus be predicted through analyzing the trend change in each reach, which provides necessary data for studying the new relationship of bed friction and water level.

Key words waterways; Three Gorges Project (TGP); bed surface fractal dimension; river evolution; bed friction

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Period Plan (No. 2006BAB05B03-05) and the National Natural Science Foundation of China (No. 10672125).