



长江上游河道剖面分维数与通航水力要素的关系*

倪志辉^{1,2}, 李明伟¹, 吴立春³

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 3. 重庆第二师范学院, 重庆 400067)

摘要: 通过对向家坝坝下宜宾—朱沱河段建立一维及二维非恒定-分形数学模型, 研究该河段及局部滩段水流条件, 利用累计和变维分形方法, 得到河道纵剖面河流长度分形维数和河道横剖面河流宽度分形维数。在此基础上, 探讨了河道纵剖面分维数和河道横剖面分维数与通航水力指标的响应关系。研究表明: 1) 在宜宾—朱沱河段中, 随着河道纵剖面分维数的减小, 横剖面分维数逐渐变小。2) 在满足最低通航流量要求情况下, 宜宾—泸州段的纵剖面分维数的取值范围为-1.297~-1.049, 泸州—朱沱段的纵剖面分维数的取值范围为-1.305~-1.032。3) 在宜宾—朱沱河段中, 某一流量下横剖面分维数值反映的是某断面的地形与该级流量的相关度, 而滩段横剖面分维数反映的是全河段地形与流量过程的相关度。

关键词: 变维分形; 非恒定流; 通航水力指标; 分维数; 流速

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0116-09

Relationship between the Yangtze River channel profile fractal dimension and navigable hydraulic elements

NI Zhi-hui^{1,2}, LI Ming-wei¹, WU Li-chun³

(1.Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2.Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;
3. Chongqing Education University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Based on the one-dimensional and two-dimensional unsteady-fractal mathematical model of Yibin to Zhutuo reach downstream Xiangjiaba dam, we research the flow conditions and local beaches with the cumulative and variable dimension fractal method and obtain the channel length of river profile fractal dimension and fractal dimension river cross-section width. We also probe into the response of the river profile fractal dimension and river channel transverse section to the fractal dimension of navigation hydraulic indices. The results show that: 1) in Yibin-Zhutuo river reach, with the decrease of the longitudinal profile fractal dimension, the river cross-section fractal dimension turns smaller gradually; 2) under the condition of meeting the requirements of the lowest navigable flow, the profile fractal dimension values of Yibin-Luzhou section is within the range of -1.297~-1.049, and that of Luzhou-Zhutuo section is within the range of -1.305~-1.032; 3) in Yibin-Zhutuo river, under a certain flow cross-section, the fractal dimension numerical reflects the degree of correlation of the terrain and traffic, while beach profile fractal dimension reflects degree of correlation of the whole river topography and discharge process.

Keywords: variable fractal dimension; unsteady flow; navigable hydraulic indices; fractal dimension; flow velocity

收稿日期: 2016-01-04

*基金项目: 省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金(SLK2016B03), 内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金(NHHD-201514)

作者简介: 倪志辉(1980—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为河流海岸水动力学、环境及数值模拟。

非恒定流是指流场中任意运动要素随时间而变化的流体运动,它十分普遍地存在于自然界中,比如天然河道中的洪水过程、水库溃坝、船闸充排水、电站泄洪、潮流等等。水电站日调节过程和泄洪过程引起的非恒定流改变了下游河道的天然水沙过程,对坝下游河道的防洪、航道、港口、通航设施的正常使用以及船舶的安全航行等将造成一定影响,因此研究电站下泄非恒定流的传播规律、关注航道内比降与流速的变化就显得尤为重要。

20世纪70年代,Mandelbrot提出了分形理论^[1]。随着科学技术的发展,分形理论在各个领域的应用也越来越广泛。Gupta等^[2]研究了河道水网的统计自相似性以及流域坡降与其几何特征的经验相关关系。倪志辉等^[3-4]将分形理论应用于河流垂线流速分布及水流掺混长度的研究上,并讨论了长江重庆主城河段河流长度的分维数与洪水的关系,得出如下结论:同一河段,河流长度分维数越大,河流的泄洪能力越差,洪水发生的可能性和洪水的强度越大。金德生等^[5]对河道断面及深泓纵剖面分形进行了研究,认为河道纵剖面分形体现了河道纵剖面的曲折性,可作为河流纵向消能的一种量度。国内外还有许多学者对分形理论的应用做了许多研究^[6-16]。目前对长河段河道纵横剖面的分形机制的研究还比较鲜见,尤其是对揭示枢纽下泄非恒定流特征与河道形态分维数大小两者的关系更是未见相关文献报道。所以关于坝下非恒定流长河段剖面维数与通航水力指标的响应关系探讨的研究具有重要的理论价值和实践意义。

1 河段概况

长江上游宜宾—朱沱河段属大型山区河流,该河段长约240 km,是沟通大西南与华中、华东地区以及沿海各地的唯一水运干线。长江叙渝段航道曾于20世纪70年代初至90年代中期进行过整治,但由于当时的运量水平较低、维护经费较少,部分复杂滩险治理效果不理想,该段航道的

维护尺度仅为1.8 m×40 m×400 m。其后交通部在2003及2007年对宜宾至泸州段航道的建设工程相继实施了一系列的整治,目前叙渝段(宜宾—重庆段)航道技术等级为Ⅲ级,航道维护尺度为2.7 m×50 m×560 m,水深保证率为98%。

杨柳碛滩位于宜昌上游1 017.8 km,处于一顺直河段,为过渡段浅滩。滩段内左岸有一巨大的卵石碛——杨柳碛,碛坝长约1 800 m、宽约400 m,碛坝顶靠河心侧较高,最高点高出零水位上5 m,左侧较低,与左岸间形成一突嘴,零水位上1 m才开始过流。滩段上游右岸有黄家碛碛坝侵占河床,至使河面宽约300 m,杨柳碛与黄家碛之间河面较宽,达500 m,水流减缓,形成过渡段浅区。其下段受杨柳碛碛坝的挤压,河面宽仅250 m。碛尾下游右岸有纤子、黑脸观音石梁突嘴缩窄河床,河面宽约350 m。

2 非恒定-分形数学模型

2.1 分形模型的建立

按照Mandelbrot^[1]的定义,分形是指其组成部分以某种方式与整体相似的形体。分形分布满足如下关系式:

$$s = Ay^{1-D} \quad (1)$$

式中: S 为欧氏长度; y 为度量尺码; D 为分形维数; A 为比例常数。

对式(1)其两端取自然对数得:

$$\ln s = \ln A - D \ln y \quad (2)$$

再把 $\ln s$ 和 $\ln y$ 绘于 y 轴和 x 轴坐标上,用最小二乘法拟合该直线,它的斜率取为 $-D$ 。这样就可以求出它的分维值 D 。

本文分别进行了河道横剖面和纵剖面分维,其物理意义是流量在河流横向宽度方向的维数以及流量在河流纵向长度方向的维数。因此,流量与河流宽度及长度间也存在统一的自相似性:

$$Q = Ar^{-D} \quad (3)$$

式中: Q 为流量; r 为滩段最窄处河道宽度或河道长度单元; D 为河流横剖面或纵剖面分形维数,主要与流速、地形、水深等方面有关; A 为一个

比例常数。

通常情况下 D 为常数，将这类分形称为常维分形。若 D 与特征线度成函数关系，则称之为变维分形。事实上，自然界中大量的复杂现象都需要用变维分形来描述，严格满足常维分形形式的现象是不存在的，维数是尺度变换下的不变量。许多学者对变维分形进行了研究，并提出了多种方法。本文采用由累计和序列获得的分维模型^[13]，称为“累计和分形”。该方法的具体步骤如下：

1) 根据二维非恒定数学模型计算结果，统计各特征流量下满足一定河道水深的水面宽度或河道长度，确定流量、河宽的原始数据对 (N_i, r_i) ，其中按 N 从小到大排列， $i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 构造一阶累计和。以 (N_1, N_2, N_3, \dots) 等为基本序列，按下面的规则构造各阶累计和：

$\{S1_i\} = \{N_1, N_1+N_2, N_1+N_2+N_3, \dots\} \quad i=1, 2, \dots, n$ (4)
式中： $S1$ 为一阶累计和序列。

3) 建立一阶累计和的分段变维分形模型。利用式(4)计算数据点 $(S1_i, r_i)$ 和 $(S1_{i+1}, r_{i+1})$ ，在双对数坐标中的斜率的相反数 $D1_{i,i+1}$ ，即一阶累计和的分段变维分形的分维数。根据 n 个数据对，可以得到 $n-1$ 条线段的分段变维分形的分维数，称之为分维数序列。

4) 将 $(S1_i, r_i)$ 绘于双对数坐标中，并对该数据序列做线性拟合，所得直线斜率即相应河段的河流宽度分维数。

2.2 一维非恒定数学模型

一维非恒定数学模型计算一般以圣维南方程组作为基本方程，包括水流连续方程和水流运动方程。本文采用 Pressimann4 点线性隐式差分格式进行离散，并建立二阶累计和变维分形模型求解计算相应河段的河流长度分维数。在全计算河段布设 240 个断面，断面间距平均为 0.96 km，断面布设基本垂直于河流走向，一维断面布置见图 1。

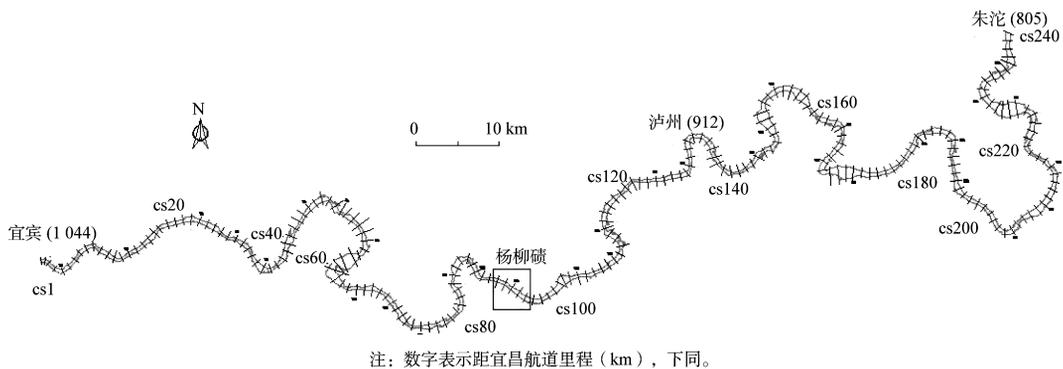


图 1 长江干流宜宾—朱沱段一维计算断面布置

2.3 二维非恒定-分形数学模型

基于笛卡尔坐标系，采用非结构化网格建立二维水动力模型，采用单元中心的有限体积法求解控制方程组，采用非结构化三角形网格拟合复杂河道边界。根据二维非恒定数学模型，统计各特征流量下满足一定河道水深所对应的水面宽度，确定流量、河宽的原始数据对 (N_i, r_i) 。建立一阶累计和的分段变维分形数学模型，求得相应河段的河流宽度分维数。

杨柳碛滩河段模型进口取滩段上游水流平缓处，出口取滩段下游一维计算断面处，位于牛屎碛附近；模拟河段长约 5.0 km。计算网格采用三

角形非结构网格，网格间距约 20 m，杨柳碛滩河段内，共布设 39 661 个网格单元，共 19 560 个网格结点，见图 2。

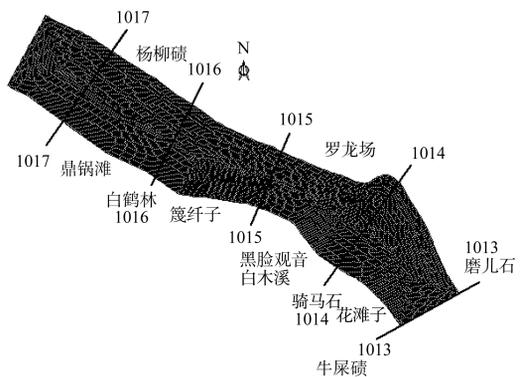


图 2 杨柳碛滩计算网格

2.4 模型验证

2.4.1 一维数学模型水面线验证

选取有实测瞬时水面线资料的杨柳碛滩段河段,在不同流量级下进行水面线验证,其验证流量为洪、中、枯3级流量,验证流量分别为9 322、3 675、2 100 m³/s。结果表明,计算水位与实测水位的差值在0.15 m以内,可见数模计算与原型实测资料吻合较好。

2.4.2 一维数学模型流速验证

选取有实测流速资料的杨柳碛滩河段,在不同流量级下进行流速验证,其验证流量级同2.4.1,结果表明,计算流速与实测流速的差值在0.03 m/s以内,可见一维数模计算与原型实测资料吻合较好。

2.4.3 二维数学模型水面线验证

采用部分实测资料结合一维计算结果进行二维数学模型水面线验证。所选河段为杨柳碛滩河段,验证流量为2 100 m³/s。根据杨柳碛滩的实测水面线验证结果,发现计算值与实测值吻合较好,误差基本都小于0.10 m,符合相关规范的计算精度要求。

2.4.4 二维数学模型流速验证

选取有实测流速资料的杨柳碛滩河段进行二维数学模型流速验证,其验证流量为2 100 m³/s,验证断面为航道里程1 017、1 014 km两个断面。验证结果表明,实测值与计算值流速误差未超过0.05 m/s,各断面实测值与计算值吻合较好,达到计算精度要求。其余滩段结合一维计算所得的平均流速值,对比验证相应流量下的二维数模岸边流速,验证结果与杨柳碛滩段的验证结果相似,流速误差控制在规范要求的范围内。

3 分维数计算

3.1 纵剖面分维数的计算

在天然河流中不同河段的弯曲程度不同,故不同分段的纵剖面分维数不同,有时相差很大。而且河流中有支流入汇,导致不同河段的流量不同,所以将河流进行分段来计算纵剖面分维数。

忽略较小支流的入汇,以沱江汇流口作为分段节点,将240 km的宜宾—朱沱段分作两个河段进行分段计算。以河流长度与流量数据对建立分形数学模型,用二阶累计和分形的方法,按左、右岸分别计算各河段的纵剖面分维数,计算结果见表1。

表1 宜宾—朱沱段各河段计算数据直线相关方程及纵剖面分维数计算结果

滩段	岸别	直线相关方程	分维值	相关系数 R ²
宜宾—泸州	左岸	$y=1.0781x-5.3232$	-1.0781	0.9993
	右岸	$y=1.0818x-5.3919$	-1.0818	0.9993
泸州—朱沱	左岸	$y=1.0737x-4.9425$	-1.0737	0.9993
	右岸	$y=1.0766x-4.9981$	-1.0766	0.9992

注: $y=\ln(S2)$, $x=\ln(r)$, 其中 $S2$ 为二阶流量累积和序列, y 为其对数值, r 为河宽值。

由表1可得,研究各分段的纵剖面分形维数,其相关系数都在0.99以上,说明宜宾—朱沱段河流纵向分维呈现二阶累计和分形关系。故宜宾—朱沱段纵剖面分维数具有二阶分维特性。同时还可以发现,各分段纵剖面分形维数都是小于0的,即为负分维数。负分维是分形理论的创始人Mandelbrot为描述多重分形系统的复杂性时引入的。从数学上理解,它刻划的是空集中表示空的程度,本质上是由系统的随机性产生的。因此,负分维反映了必然性与偶然性的内在联系,从一个侧面描述了系统的随机特性,更具有普遍意义^[3]。

由表1可知,宜宾—泸州段左岸分维数 $D2=-1.0781$, 宜宾—泸州段右岸分维数 $D2=-1.0818$, 泸州—朱沱段左岸分维数 $D2=-1.0737$, 泸州—朱沱段右岸分维数 $D2=-1.0766$ 。各分段中左岸分维数要稍大于右岸分维数。河流长度的分维数大小反映了河流的弯曲程度,分维数越大表示河流越曲折;反之,分维数越小河流越平顺^[4]。故各分段中右岸要比左岸更平顺。

3.2 不同水深下横剖面分维数的计算

根据二维数学模型的计算结果,结合研究河段的航道等级,按航道现状统计满足最低维护水深要求的各特征流量的河宽,即统计宜宾—朱沱段各滩满足2.7 m最低通航水深时滩段最窄处河

道宽度。在航道现状计算水流条件下,统计宜宾—朱沱段 3.2、3.5 m 水深下滩段最窄处河道宽度。以最窄处河道宽度与流量数据对建立分形数学模型,用一阶累计和分形的方法,计算宜宾—朱沱段内各滩段的横剖面分维数,计算结果见表 2。

表 2 宜宾—朱沱段各滩计算数据直线相关方程及横剖面分维数计算结果

水深/m	滩段	直线相关方程	分维值	相关系数 R^2
2.7	杨柳碛滩	$y=1.0434x+2.9639$	-1.0434	0.9996
	过兵滩	$y=0.9251x+3.4852$	-0.9251	0.9948
	金鱼碛滩	$y=1.1792x+1.1988$	-1.1792	0.9967
	两条牛滩	$y=1.2653x+1.1953$	-1.2653	0.9937
	白龙滩	$y=1.0832x+2.2353$	-1.0832	0.9998
	磨盘石滩	$y=1.2257x+1.1502$	-1.2257	0.9947
3.2	杨柳碛滩	$y=1.0143x+3.3002$	-1.0143	0.9997
	过兵滩	$y=0.9622x+3.3574$	-0.9622	0.9921
	金鱼碛滩	$y=1.1740x+1.3190$	-1.1740	0.9961
	两条牛滩	$y=1.2689x+1.1950$	-1.2689	0.9931
	白龙滩	$y=1.0852x+2.3162$	-1.0852	0.9996
	磨盘石滩	$y=1.1762x+1.6177$	-1.1762	0.9930
3.5	杨柳碛滩	$y=0.9973x+3.4868$	-0.9973	0.9997
	过兵滩	$y=0.9614x+3.4042$	-0.9614	0.9912
	金鱼碛滩	$y=1.1695x+1.4019$	-1.1695	0.9960
	两条牛滩	$y=1.2776x+1.0338$	-1.2776	0.9941
	白龙滩	$y=1.0885x+2.2446$	-1.0885	0.9997
	磨盘石滩	$y=1.1562x+1.7446$	-1.1562	0.9954

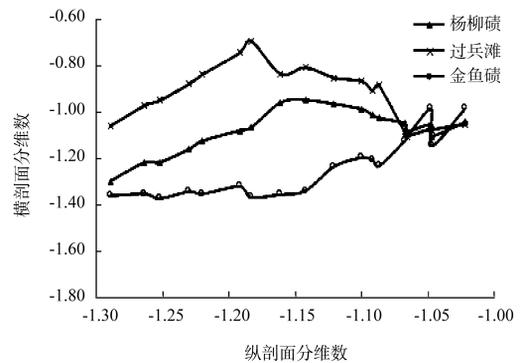
注: $y=\ln(S1)$, $x=\ln(r)$, 其中 $S1$ 为一阶流量累积和序列, y 为其对数值, r 为河宽值。

从表 2 看出,研究各滩段的横剖面分形维数,其相关系数都在 0.99 以上,各滩段横向分形成一阶累计和分形关系。即宜宾—朱沱段内各滩段横剖面分维数具有一阶分维特性。同时可以得到,横剖面分维数随水深的大小而增大的滩段为杨柳碛滩、金鱼碛滩及磨盘石滩;横剖面分维数随水深的大小而减小的滩段为两条牛滩和白龙滩;横剖面分维数不随水深变化的为过兵滩。

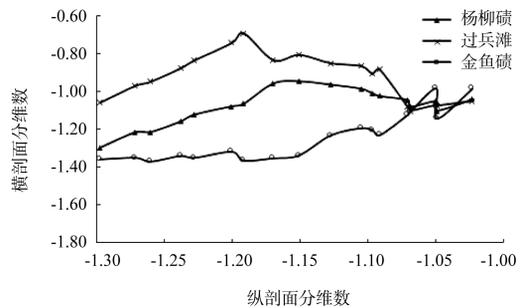
4 剖面分维数的关系及响应

4.1 横剖面分维数与纵剖面分维数的关系

将一维非恒定-分形数学模型计算所得的各分段内滩险河段的纵剖面分维数与二维非恒定-分形数学模型计算所得的横剖面分维数绘于直角坐标系中(图 3、4),图中横剖面分维数均为各航段内满足现行航道最小维护水深下的河流宽度分形维数。



a) 左岸



b) 右岸

图 3 宜宾—泸州段各滩险河段左、右岸纵剖面分维数与横剖面分维数关系

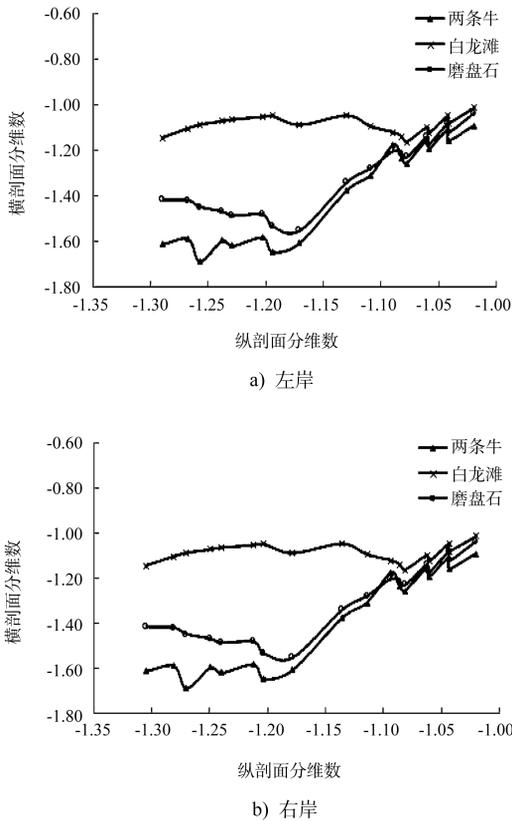


图 4 泸州—朱沱段各滩险河段左、右岸纵剖面分维数与横剖面分维数关系

由图 3、4 可知, 宜宾—朱沱段内各滩险中, 随着纵剖面分维数的减小, 除过兵滩外, 其余滩段河道横剖面分维数虽有起伏变化但整体上呈逐渐减小的趋势, 即随着纵剖面分维数的减小横剖面分维数逐渐变小。

4.2 纵剖面分维数与流量的响应关系

以 1990—2010 年屏山站逐日平均流量作为入流条件、向家坝建成投产后向家坝保证率 98% 出库流量为 1 818 m³/s 作为限定计算条件, 对向家坝—朱沱段沿程各站设计通航流量进行修正, 最终确定各站设计通航流量(表 3)^[17]。

表 3 长江水富—朱沱段设计通航流量

站点	向家坝	宜宾	李庄	泸州	朱沱
流量/(m ³ /s)	1 818	1 902	2 644	2 708	2 803

根据一维非恒定-分形数学模型计算结果统计可知, 宜宾—泸州段最低通航流量范围为 1 902~2 708 m³/s, 左岸满足通航条件的河流纵剖面分维数在-1.289 7~-1.049 0, 右岸纵剖面分维数在

-1.297 3~-1.051 2, 即宜宾—泸州段纵剖面分维数在-1.297~-1.049 时, 满足最低通航流量要求; 泸州—朱沱段最低通航流量范围为 2 708~2 803 m³/s, 左岸满足通航条件的河流纵剖面分维数在-1.289 5~-1.032 3, 右岸纵剖面分维数在-1.304 6~-1.033 3, 即泸州—朱沱段纵剖面分维数在-1.305~-1.032 时, 满足最低通航流量要求。

上述分析得出的满足最低通航流量要求的纵剖面分维数区间, 是从较宏观的角度讨论的, 以此作为判断航道能否通航, 相对来说简单粗陋。因此, 考虑在较长的分段, 即宜宾—朱沱段, 取非碍航河段作为研究对象, 统计河段内最大比降值, 计算其纵剖面分维数, 结合该非碍航河段附近滩段纵剖面分维数值, 分析纵剖面分维数与流量之间的响应关系。

在长江宜宾—朱沱段, 取航道里程 1 039~1 018 km 的非碍航河段作为本航段内的研究对象, 暂命名为非碍航河段 A; 河段 A 位于杨柳碛滩上游, 河段地形见图 5。根据一维数学模型计算结果可知, 河段 A 处河道最大纵比降为 0.203‰, 平均比降在 0.165‰; 杨柳碛滩河段最大纵比降为 0.168‰, 平均比降在 0.132‰。统计河段 A 左、右岸各级流量下河道长度, 按照一维非恒定-分形数学模型计算中纵剖面分维数计算过程, 计算河段 A、杨柳碛河段左、右岸纵剖面分形维数, 计算结果见表 4。

表 4 宜宾—朱沱段杨柳碛滩及河段 A 计算数据
直线相关方程及分维数计算结果

滩段	岸别	直线相关方程	分维值	相关系数 R ²
河段 A	左岸	y=1.072 3 x-3.514 8	-1.072 3	0.998 8
	右岸	y=1.074 1 x-3.709 3	-1.074 1	0.998 3
杨柳碛滩	左岸	y=1.081 2 x-4.069 5	-1.081 2	0.998 6
	右岸	y=1.082 5 x-4.285 1	-1.082 5	0.998 8

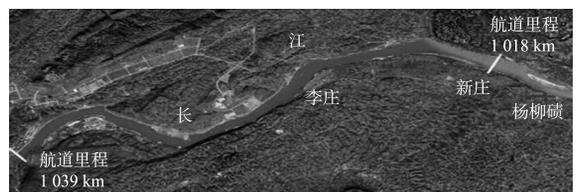


图 5 宜宾—朱沱段非碍航河段 A 河道地形

根据表 4 可看出，河段 A 的左、右岸纵剖面分维数也大于杨柳碛滩相应的纵剖面分维数。对比各级流量下的分维数，发现同一流量下，A 的纵剖面分维数也都大于对应滩段的纵剖面分维数。这是因为纵剖面分维数反映了河道流量与河流长度的相关程度，在流量过程相同的情况下，若河流弯曲度较小，河流长度随流量的变化程度会更剧烈，也即河道纵剖面分维数会相对较大。

河段 A 左岸河流长度与航道里程平均比值约 1.088，而杨柳碛滩左岸河流长度与航道里程平均比值约 1.095；同一河流分段内，非碍航河段单位航道里程内河流长度的弯曲变化程度要小于其附近滩险河段的变化程度。因此，相对于滩险河段来说，非碍航河段河流长度随流量过程的变化程度要稍微大些，也即河道纵剖面分维数相对较大。

综上所述，在满足最低通航流量要求情况下，宜宾—泸州段的纵剖面分维数的取值范围为 -1.297 ~ -1.049，泸州—朱沱段的纵剖面分维数的取值范围为 -1.305 ~ -1.032；且在同一河流分段内，同一流量下非碍航河段 A 的通航水流条件比杨柳碛滩的通航水流条件好。

4.3 横剖面分维数与水深的响应关系

选取杨柳碛滩险河段为例来分析横剖面分维数与水力要素的关系。在二维非恒定-分形数学模型中统计可得到，当滩段可以满足最低维护水深 2.7 m 下航道尺度的要求时，横剖面分维数在 -0.945 0 ~ -1.298 6；3.2、3.5 m 水深下河流宽度横剖面分维数在 -0.852 6 ~ -1.242 7 与 -0.814 6 ~ -1.216 3。由杨柳碛滩河段河道横断面地形可知，当河道内的流量变化时，满足特定水深的最

窄河道宽度出现的位置不同，所得的横剖面分维数也不同。并且天然河道地形不是均匀变化的，任取两个相邻横断面，河道地形都不一样。故在宜宾—朱沱河段中，某一流量的横剖面分维数反映的是某断面的地形与该级流量的相关度，而滩段横剖面分维数反映的是全河段地形与流量过程的相关度。

4.4 剖面分维数与通航水力指标的响应关系

长江上游水力指标理论计算方法是通过建立有效推力和航行阻力的表达式，计算不同比降下所对应的流速值，得到船舶自航上滩允许的比降和流速组合值^[18-19]。长江叙渝段 1 000 吨级船舶通航水力指标见表 5。

表 5 长江叙渝段(宜宾—重庆段)1 000 吨级船舶自航上滩水力指标

比降/‰	0.5	1	2	3
流速/(m/s)	4.12	3.50	3.00	2.60

以宜宾—泸州段为例来说明河道剖面分维数与通航水力指标的响应关系：一维非恒定-分形数学模型计算结果中河道纵剖面分维数的范围为 -1.270 ~ -1.075，统计得该河道平均比降为 0.257 1‰~0.263 1‰，结合表 5 可知，1 000 吨级船舶自航上滩的最大流速不应大于 4.66 m/s；二维非恒定-分形数学模型计算结果中，河道横剖面分维数的范围为 -1.095 ~ -0.960，统计可知该河道内险滩段的最大平均流速不应大于 3.37 m/s；综合流速指标后得到，该河段的通航流速不应大于 3.17 m/s。同理可以得到泸州—朱沱段中河道剖面分维数与通航水力指标的响应关系。初步探索长江宜宾—朱沱段剖面分维数与通航水力指标的响应关系，结果见表 6。

表 6 长江水富—朱沱段剖面分维数与通航水力指标的响应关系

河段	分维数类别	分维数值	统计平均比降/‰	统计流速/(m/s)	查找流速/(m/s)	综合流速/(m/s)
宜宾—泸州	纵剖面分维数	-1.297 ~ -1.049	0.257 1 ~ 0.263 1		4.66	3.37
	横剖面分维数	-1.059 ~ -0.834		3.37		
泸州—朱沱	纵剖面分维数	-1.305 ~ -1.032	0.254 3 ~ 0.288 5		4.67	3.28
	横剖面分维数	-1.143 ~ -1.012		3.28		

表5、6只是粗略地统计了较长的河流分段内河道纵、横剖面分维数与通航水力指标的响应关系,对具体某一河段的通航水力指标,以此判断

会有一些误差。故结合杨柳碛滩具体说明滩段剖面分维数与通航水力指标的响应关系,结果见表7。

表7 杨柳碛滩剖面分维数与通航水力指标的响应关系

航道里程/km	滩段	分维数类别	分维数值	统计比降/‰	统计流速/(m/s)	查找流速/(m/s)	流速/(m/s)
1 012.8~1 017.8	杨柳	纵剖面分维数	-1.339 8~-1.058 0	0.257 5~0.259 2		4.68	3.36
	碛滩	横剖面分维数	-1.298 6~-0.945 0				

由表7可知,当杨柳碛滩各流量下纵剖面分维数的范围为-1.339 8~-1.058 0,横剖面分维数的范围为-1.298 6~-0.945 0时,最大流速不应大于3.36 m/s。杨柳碛滩位于宜宾—泸州段内,且杨柳碛滩平均比降为0.257 5~0.259 2,在宜宾—泸州段河道平均比降范围内,杨柳碛滩的最大流速小于宜宾—泸州段的最大流速,故分析得到的关于剖面分维数与通航水力指标的响应关系是合理的。

5 结论

1) 在宜宾—朱沱河段内,纵剖面分维数具有二阶分维特性,各滩段横剖面分维数具有一阶分维特性;随着纵剖面分维数的减小,滩段河道横剖面分维数虽有起伏变化但整体上呈逐渐减小的趋势,即随着纵剖面分维数的减小横剖面分维数逐渐变小。

2) 在满足最低通航流量要求的情况下,宜宾—泸州段的纵剖面分维数的取值范围为-1.297~-1.049,泸州—朱沱段的纵剖面分维数的取值范围为-1.305~-1.032;且在同一河流分段内,同一流量下非碍航河段的通航水流条件比杨柳碛滩的通航水流条件好。

3) 在宜宾—朱沱河段中,某一流量下横剖面分维数反映的是某断面的地形与该级流量的相关度,而滩段横剖面分维数反映的是全河段地形与流量过程的相关度。

4) 得到宜宾—朱沱河段的纵、横剖面分维数与通航水力指标的响应关系为:当宜宾—泸州段各流量下纵剖面分维数为-1.297~-1.049、横剖面分维数为-1.059~-0.834时,最大流速不应大

于3.37 m/s。当泸州—朱沱段各流量下纵剖面分维数为-1.305~-1.032、横剖面分维数为-1.143~-1.012时,最大流速不应大于3.28 m/s。当杨柳碛滩各流量下纵剖面分维数为-1.339 8~-1.058 0、横剖面分维数为-1.298 6~-0.945 0时,最大流速不应大于3.36 m/s。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 156: 636-638.
- [2] Gupta V K, Waymire E. Statistical self-similarity in river networks parameterized by elevation [J]. Water Resources Research, 1989, 25(3): 463-476.
- [3] 倪志辉,张绪进,胥润生.长江黄河含沙量垂线分布的分形研究[J].人民长江, 2011, 42(19): 73-76.
- [4] 吴立春,倪志辉.长江重庆主城段河流长度分维数与洪水的关系[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2012, 31(5): 1 042-1 045.
- [5] 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.
- [6] Barbera L P, Rosso R. On the fractal dimension of stream networks [J]. Water Resources Research, 1989, 25(4): 735-741.
- [7] Nikora V I. Fractal structures of river planforms [J]. Water Resources Research, 1991, 27(6): 1 327-1 333.
- [8] Fu Y H. Fractal dimension and fractals in ocean engineering [J]. China Ocean Engineering, 1994(4): 285-292.
- [9] Shan J N, Yuan C, Zhang H. Electropolymerization of two-dimensional polypyrrole with fractal patterns under a mica [J]. Chemistry Letters, 1997: 209-210.
- [10] Zhu X H. Coastline fractal dimension methods and their

comparative study [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2002, 20(2): 31-36.

[11] Witold Kinsner. A unified approach to fractal dimensions[J]. International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence, 2007, 1(4): 26-46.

[12] Ni Z H, Song Z Y, Zhang X J, et al. A modification to vertical distribution of tidal flow reynolds stress in shallow sea[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(3): 431-442.

[13] Ni Z H, Wu L C, Zhang X J. A new model for the regulation width of waterway based on hydraulic geometry relation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(4): 883-907.

[14] Wang X K, Jia J J. Relationship between the fractal dimension and percentage of artificial coastlines of islands in Zhejiang province[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(4): 25-31.

[15] Zhou Z Z, Yang J, Deng Y J, et al. Shortest-path fractal dimension for percolation in two and three dimensions[J]. Physical Physical Review E, 2012, 86(6): 1-5.

[16] Jiang Q Y, Niu R Q. Research on fractal and fractal dimension of Three Gorges Reservoir bank's geometric shape[J]. Yangtze River, 2010, 41(9): 42-44.

[17] 西南水运工程科学研究所. 金沙江向家坝水电站投产期非恒定流对下游通航条件影响长河段物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 西南水运工程科学研究所, 2014.

[18] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81.

[19] 童思陈, 许光祥, 邓明文. 澜沧江船舶航行阻力及通航水力指标研究[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 67-72.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 92 页)

参考文献:

[1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第 12 分册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 144.

[2] 龙颖贤, 檀笑, 韩保新, 等. 茅尾海营养状况及其来源研究[J]. 生态科学, 2012, 31(5): 572-576.

[3] 陆敏, 孙志国, 孙大鹏. 人工岛对海湾水环境影响数值研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 88-93.

[4] 张坤, 娄安刚, 孟云, 等. 钦州湾海域纳潮量和水交换能力的数值模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 585-591.

[5] 董德信, 李宜纯, 陈宪云, 等. 大规模填海工程对钦州湾水动力环境的影响[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 357-364.

[6] 高劲松, 陈波, 陆海生, 等. 钦州湾潮流场及污染物输运特征的数值研究[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 345-350.

[7] 刘洋, 孙永福, 杨宗严, 等. 钦州湾港口功能区布局对海洋动力环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(3): 360-363.

[8] 蒋雷明, 陈波, 邱绍芳, 等. 钦州湾潮流模拟及其纳潮量和水交换周期计算[J]. 广西科学, 2009, 16(2): 193-195.

[9] 杨小迪, 刘桂海, 李金亮, 等. 防城港核电厂全潮水文观测与分析报告[R]. 天津: 天津水运工程勘测设计院, 2009.

[10] 阎新兴, 刘国亭. 钦州湾近海区沉积特征及航道淤积研究[J]. 水道港口, 2006(2): 79-83.

[11] 方神光. 水质扩散系数在伶仃洋水域水体交换中的影响分析[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 177-185.

[12] 李大鸣, 林毅, 宋双霞, 等. 二维赤潮生态数学模型及其在渤海的影响[J]. 海洋科学, 2010(9): 87-93.

[13] 刘浩, 潘伟然, 骆智斌. 深沪湾水交换特性的研究[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 157-160.

[14] Roger L, Thomas P. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach [J]. Deutsche Hydrografische Zeitschrift, 1995, 47(4): 287-299.

[15] 张玮, 王国超, 刘燃, 等. 环抱式港池水体交换与改善措施研究[J]. 水运工程, 2013(4): 37-41.

(本文编辑 武亚庆)