

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0124

刘一漩,张晶,赵进勇,等.赤水河平面形态分形特征无标度区识别方法[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):130-137. LIU Y X,ZHANG J,ZHAO J Y,et al. Recognition method for scale-free area of Chishui River plane morphology and fractal characteristics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(6):130-137. (in Chinese)

赤水河平面形态分形特征无标度区识别方法

刘一漩^{1,2},张晶²,赵进勇²,韩会玲¹,于子铨²

(1.河北农业大学 城乡建设学院,河北 保定 071001;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:以赤水河干流选取的86组弯曲河段为研究对象,应用网格覆盖法测算水边线长度信息维数和河床水上地貌面积信息维数,通过归纳分维“粗算值”的变化规律得出一种无标度区间的识别方法,并对所选弯曲河段平面形态地貌特征进行分析。结果表明:以粗算值“失稳”现象作为判别条件可有效识别分形体无标度区间,且[10,40]为此次信息维数测算的无标度区;所测弯曲河段水边线信息维数区间范围为[0.915 7,1.042 1]、平均值为0.997 9,地貌面积信息维数区间范围为[1.301 3,1.923 0]、平均值为1.676 0,弯曲率值区间范围为[1.025 9,2.651 2]、平均值为1.271 2;赤水河中游、下游河段,水边线信息维数与弯曲率的相关系数依次为0.469和0.644,均为显著性相关,且相关程度逐渐加强,在整个干流地貌面积信息维数与水边线信息维数、弯曲率相关性皆较弱,且与水边线信息维数呈负相关。

关键词:河道平面形态;信息维数;无标度区;弯曲率;统计分析

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Recognition method for scale-free area of Chishui River plane morphology and fractal characteristics

LIU Yixuan^{1,2}, ZHANG Jing², ZHAO Jinyong², HAN Huiling¹, YU Zicheng²

(1. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China;

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

Abstract: Taking 86 groups of curved sections selected from the mainstream of the Chishui River as the research object, the information dimension of the length of the waterline and the information dimension of the riverbed water landform area are calculated based on the grid covering method. By summarizing the variation law of fractal dimension "rough calculation value", a method of scale-free interval identification is obtained, and the plane morphological and geomorphic characteristics of the selected curved river section are analyzed. The results show that: The "instability" phenomenon of the rough calculation value can be used as the criterion to effectively identify the scale-free interval of the fractal body, and [10,40] is the scale-free area of the information dimension calculation; the information dimension range of the water edge line of the measured curved river section is [0.915 7, 1.042 1] with an average value of 0.997 9, the landform area information dimension range is [1.301 3, 1.923 0] with an average value of 1.676 0, and the tortuosity value range is [1.025 9, 2.651 2], the average value is 1.271 2, respectively; in the middle and lower reaches of the Chishui River, the correlation coefficients of the waterfront information dimension and the tortuosity are 0.469 and 0.644 respectively, both of which are significantly correlated, and the degree of correlation is gradually strengthened. The correlation between the information dimension of the landform area and the information dimension of the waterfront line and the curvature rate is weak and has a negative correlation with the information dimension of the water-

收稿日期:2020-03-16 修回日期:2020-09-07 网络出版时间:2020-09-010

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200909.1104.006.html

基金项目:国家自然科学基金(51509271);国家水专项(2018ZX07105-002)

作者简介:刘一漩(1994—),男,河北廊坊人,主要从事水生态修复研究。E-mail:1159083507@qq.com

通信作者:张晶(1981—),女,江苏泰兴人,高级工程师,博士,主要从事生态水工学、水生态修复理论与技术等研究。E-mail:zhangjing@iwahr.com

front line.

Key words: river channel plan; information dimension; unscaled area; bending rate; statistical analysis

河流形态多样性是流域生态系统生境的核心,是生物群落多样性的基础^[1],其具有水-陆及水-气的联系紧密性、空间异质性、蜿蜒性、横断面多样性、河床材料的透水多孔性等5种表现^[2]。河流地貌形态多样性不仅决定了沿河生物栖息地的有效性和总量,其地貌特征参数更是制定河流生态修复方案的基础信息^[3]。弯曲率是蜿蜒型河流最具代表性的地貌指标之一,弯曲率的变化对构成河流复杂的地貌形态、支持生物群落多样性均有较大意义。董哲仁^[3]依据弯曲率归纳河道的平面形态分为3种类型:蜿蜒型、微弯顺直型和分叉型;王宏涛^[4]基于赤水河对蜿蜒型河流空间异质性和物种多样性相关关系进行研究。国内外学者^[5-11]均有深入研究。弯曲率对于河流形态的描述直观且方便,但对于大型河流或某河湾接近于裁弯取直时,此时单一使用弯曲率进行表征,会掩盖河流弯曲的很多细节^[12]。分形几何理论由美国数学家 Mandelbrot^[13]于1983年首先提出,其研究的对象是广泛存在于自然界和人类社会中没有特征尺度却有自相似结构的复杂形状和现象,分形理论自产生之后就被广泛应用于河流地貌形态的研究分析^[14-19]中。对于具有分形特征的客体,自相似性和标度不变性是其两个重要特性,研究某一分形体首先要分析分形体的无标度区间,即标度不变性的适用范围,超出无标度区间的范围,标度不变性不再适用,结构的分形也失去意义。近年来较少有分析无标度区对分形维数影响的研究^[20],大部分采用人工判定的方法确定无标度区^[21-23],而陶象武^[24]基于改变观察尺度的数盒子法,通过粗算信息维数的数值变化范围确定三维体积的无标度区间,构建表征地面起伏度的地貌形态分形三维特征信息维数 GIS 模型。本文使用网格覆盖法测算一维水边线长度信息维数和二维河床水上地貌面积信息维数,基于“粗算”思想提出一种利用分维粗算值变化规律进行无标度区间识别的方法,并将此方法应用于赤水河干流的弯曲河段,进行一维线分形和二维面分形的无标度区间的识别。

1 研究区域概况

赤水河发源于云南省镇雄县,流经贵州省多市,至四川省合江县汇入长江,系长江上游的一级重要支流。赤水河干流全长 436.5 km,流域面积 20 440 km²,

总落差 1 475 m,其中上游天然落差为 1 274.8 m,中游为 182.9 m,下游为 17.3 m,平均比降 3.4 ‰,河口多年平均流量 284 m³/s。赤水河 3/4 流域在大山中,是一条典型的山区河流,全流域(除部分支流外)保持着天然的河流自然属性,受污染程度低,总体上水质良好,因而成为长江上游特有鱼类及多种水生生物的重要栖息地或产卵场。河流生态系统和功能保存相对完整,部分河段的弯曲性明显,具有较高的空间异质性,具备复杂生境结构,是进行地貌研究的理想区域。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 数据来源

2020年2月利用 Google Earth 及 ArcGIS 针对赤水河干流,自上游河口村开始进行弯曲河段的人工识别,其选取标准为弯曲率计算尺度,即河段长度为河宽的 10~20 倍。本次共识别 86 组弯曲河段,位置见图 1。所统计的地形数据为弯曲河段水边线长度及河床水上地貌面积,在识别的全部弯曲河段中,有 46 组弯曲河段有明显的河床水上地貌,例如图 2 典型弯曲河段(81)。其弯曲河段于赤水河干流分布情况见表 1。

表 1 赤水河干流弯曲河段分布情况
Tab. 1 Distribution of the curved section of the main stream of the Chishui River

弯曲段位置	弯曲河段数目/个	含水上地貌河段数目/个
上游	44	29
中游	30	11
下游	12	6

2.2 信息维数计算及无标度区识别方法

2.2.1 信息维数定义

在分形研究中,分形维数的定义和计算根据研究对象的不同而具有不同的测定方法,目前应用较为广泛的维数形式为容量维数(D_c)^[25]。 D_c 的测算采用网格覆盖法,其具体做法为用边长为 r 的网格覆盖分形体,统计非空网格数 $N(r)$,所构建双对数坐标中 $\ln N - \ln r$ 的斜率即为容量维。 D_c 定义为

$$D_c = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (1)$$

式中: $N(r)$ 表示非空网格数; r 表示网格边长,m。



图 1 赤水河干流弯曲河段位置

Fig. 1 Location map of the curved section of the mainstream of the Chishui River



图 2 典型弯曲河段(81)卫星图

Fig. 2 Satellite map of a typical curved section (81)

但容量维数只统计了覆盖网格的数量,未考虑每个网格覆盖分形体的信息量不同。假设分形体由 $N(r)$ 个点组成,原计算方法对于覆盖一点和覆盖多点的网格取同等权重,未充分体现分形体空间分布的复杂程度。因此,信息维数 (D_i) 的计算方法基于上述情况做出了改进,定义为

$$D_i = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I_r}{\ln r} \quad (2)$$

$$I_r = \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$P_i = N_i(r) / N(r) \quad (4)$$

式中: D_i 表示信息维数; $N_i(r)$ 表示第 i 个网格中的点数; $N(r)$ 表示总点数; P_i 表示网格中点数为 $N_i(r)$ 的概率; I_r 为信息量公式; r 表示覆盖网格的边长。可见,当 $P_i = 1 / N(r)$ 时,信息维 D_i 等于容量维 D_c 。以水边线长度作为一维信息量,测算水边线的长度信息维数,以下统称水边线信息维数;以河

床水土地貌面积作为二维信息量,测算其信息维数,以下统称地貌面积信息维数。

2.2.2 无标度区判别

基于网格覆盖法,采用“粗算”分形维数方法对无标度区间进行确定。首先根据分形体大小,初步拟定一个网格边长变化区间 $[r_1, r_{(n+1)}]$,为避免降维现象对无标度区的识别产生影响,故 $r_{(n+1)}$ 应小于分形体的最小边长^[23]。其测算示例见表 2。

表 2 测算示例

Tab. 2 Calculation example table

序号	r	$\ln r$	I_r	D'
1	r_1	$\ln r_1$	I_{r_1}	D'_1
2	r_2	$\ln r_2$	I_{r_2}	D'_2
3	r_3	$\ln r_3$	I_{r_3}	D'_3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	r_n	$\ln r_n$	I_{r_n}	D'
$n+1$	r_{n+1}	$\ln r_{n+1}$	$I_{r_{n+1}}$	—

依据分形定义,表中任意两行数据均可粗算分形体信息维数,表中 D' 为粗算维数,其定义为

$$D' = (I_{r_j} - I_{r_{j+1}}) / (\ln r_j - \ln r_{j+1}) \quad (5)$$

根据表 2 数据,以 r 为横坐标, D' 为纵坐标得粗算信息维数点位图。当网格边长 $r > r_m$ 时,点位图分布会呈现一种特殊的“失稳”变化规律,从而判断区间 $[r_1, r_m]$ 为分形体的无标度区,可通过判定系数 R^2 进行验证。

3 结果分析与讨论

3.1 结果分析

3.1.1 无标度区间的识别及验证

确定无标度区。弯曲河段(62)、(63)、(73)、(74)、(75)、(77)、(79)、(81)、(82)及(83)位于赤水河中下游,其河道蜿蜒程度大小不一、各具特点,且均含有辨识度较高的河床水上地貌,故选取

此 10 组河段作为典型弯曲河段进行无标度区判别的范例,其位置见图 1。采用网格覆盖法对 10 组典型弯曲河段的水边线长度及水上地貌面积进行信息维数粗算,初步拟定网格边长 r 的变化区间为 $[10,100]$,变化步长为 5,每组河段可形成 19 组测算数据。因典型弯曲河段(82)的数据变化规律较明显,故以此河段的测算数据为例进行展示,见表 3。

表 3 典型弯曲河段(82)粗算维数统计

Tab. 3 Statistical table of rough calculation dimension of typical curved river reach(82)

序号	r	$\ln r$	水边线信息量及粗算维数		地貌面积信息量及粗算维数	
			I_{r_1}	D'_1	I_{r_2}	D'_2
1	10	2.302 585	6.542 930	0.965 928	7.376 890	1.954 940
2	15	2.708 050	6.151 280	1.047 615	6.584 230	1.933 037
3	20	2.995 732	5.849 900	0.914 479	6.028 130	1.913 611
4	25	3.218 876	5.645 840	1.098 992	5.601 120	1.919 685
5	30	3.401 197	5.445 470	0.903 013	5.251 120	1.901 840
6	35	3.555 348	5.306 270	1.062 222	4.957 950	1.815 528
7	40	3.688 879	5.164 430	1.146 260	4.715 520	1.986 958
8	45	3.806 662	5.029 420	0.892 175	4.481 490	1.759 008
9	50	3.912 023	4.935 420	0.672 856	4.296 160	1.579 789
10	55	4.007 333	4.871 290	1.523 479	4.145 590	1.760 345
11	60	4.094 345	4.738 730	0.207 014	3.992 420	2.267 914
12	65	4.174 387	4.722 160	1.483 106	3.810 890	1.529 660
13	70	4.248 495	4.612 250	0.723 553	3.697 530	1.942 809
14	75	4.317 488	4.562 330	1.587 734	3.563 490	1.299 379
15	80	4.382 027	4.459 860	0.111 671	3.479 630	2.083 477
16	85	4.442 651	4.453 090	1.280 126	3.353 320	1.278 552
17	90	4.499 810	4.379 920	1.447 642	3.280 240	2.332 097
18	95	4.553 877	4.301 650	1.459 645	3.154 150	1.815 442
19	100	4.605 170	4.226 780	—	3.061 030	—

根据表 3,以网格边长 r 为横坐标,水边线信息维粗算值 D'_1 及地貌面积信息维粗算值 D'_2 为纵坐标绘得典型弯曲河段(82)的粗算分维图,见图 3。可以看出:当 r 属于 $[10,40]$ 时,粗算分维值的分布处于一种稳定的变化中;当 $r > 40$ 时,粗算维数的变化出现一种“失稳”的现象。

整理发现,10 组弯曲河段的水边线粗算维数及地貌面积粗算维数均当 r 大于某值时呈现相同的变化规律。当“失稳”现象发生时,此 10 组弯曲河段对应 r 值见图 4。由图可知:水边线粗算分维值点位分布发生“失稳”现象的 r 值区间为 $[25,50]$,其中 70% 的弯曲河段当 $r=40$ 时发生;地貌面积粗算分维值点位分布发生“失稳”现象的 r 值区间为 $[40,55]$,其中 60% 的弯曲河段当 $r=40$ 时发生。且有研究^[17]表明,

水系分维的测算结果受网格边长 r 变化倍数影响,当变化倍数小于 1.4 时,计算值趋于稳定,故本次信息维数测算区间取 $[10,40]$, r 的变化倍数设定为 1.2。

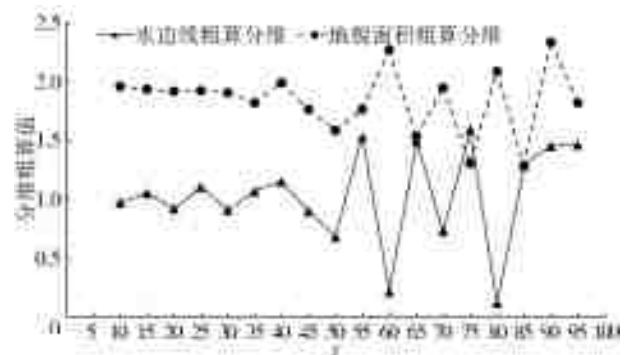


图 3 典型弯曲河段(82)粗算分维图

Fig. 3 Rough calculation fractal dimension diagram of typical curved river reach (82)

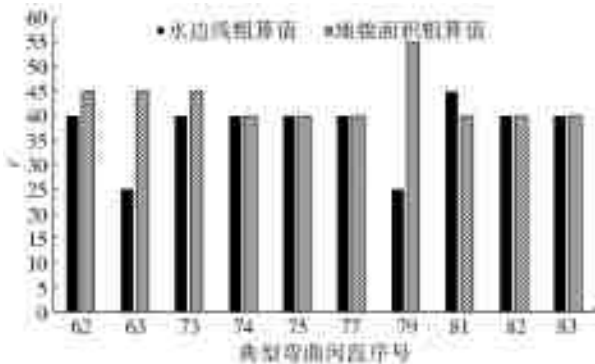


图 4 各弯曲河段“失稳”发生对应 r 值统计
Fig. 4 Corresponding r -value statistics of "instability" in each curved river reach

无标度区验证。将区间 $[10, 40]$ 应用到全部弯曲河段进行水边线信息维数和地貌面积信息维数的测算,建立 $I_r-\ln r$ 的一元线性回归方程,通过判定系数 R^2 检验方程的拟合程度,进而对此无标度区间的适用性进行验证。经整理,所测 86 组弯曲河段中有 82 组弯曲河段的测算数据通过坐标 $I_r-\ln r$ 建立的回归方程拟合程度均较高,判定系数皆大于 0.990 0,仅弯曲河段 18 的水边线信息维数和弯曲河段 3、弯曲河段 6 及弯曲河段 8 的地貌面积信息维数对应回归方程的拟合程度较低,数

据见图 5。因此,判定 $[10, 40]$ 为本次信息维数测算的有效无标度区。且由图 5 可知,自上游至下游其判定系数点位分布趋于收敛,判定系数值逐渐变大,而赤水河干流弯曲河段受地形影响,从上游到下游其大小规模亦逐渐增大,说明相对于上游而言,中下游弯曲河段的大小尺度更适合此无标度区间。

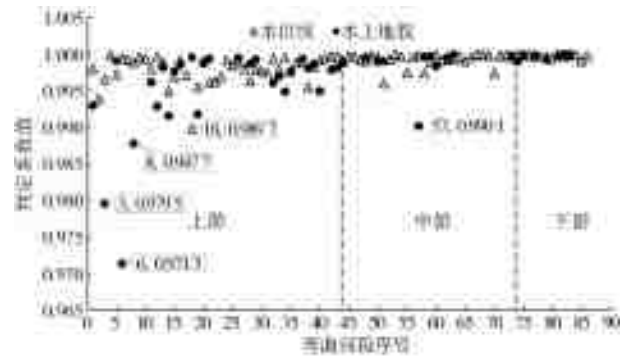


图 5 判定系数 R^2 统计图
Fig. 5 Statistical graph of coefficient of determination R^2

3.1.2 研究区域信息维数分布规律

赤水河干流所选 86 组弯曲河段的水边线信息维数和地貌面积信息维数分布规律见图 6。

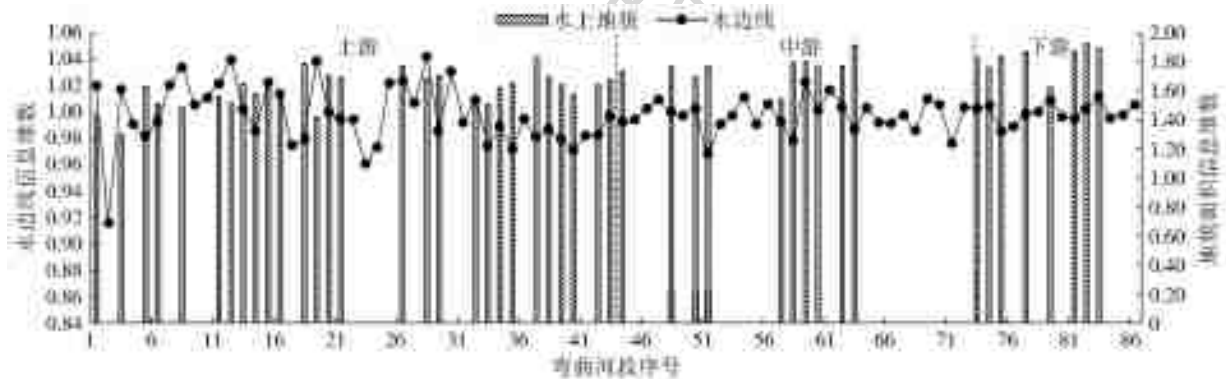


图 6 弯曲河段信息维数分布
Fig. 6 Information dimension distribution of curved river section

所测弯曲河段水边线信息维数区间范围为 $[0.915 7, 1.042 1]$ 、平均值为 0.997 9。其中:上游弯曲河段水边线信息维数平均值为 0.997 6,方差为 0.000 601;中游弯曲河段水边线信息维数平均值为 0.998 1,方差为 0.000 136;下游弯曲河段水边线信息维数平均值为 0.998 7,方差为 0.000 056。

所测弯曲河段地貌面积信息维数区间范围为 $[1.301 3, 1.923 0]$ 、平均值为 1.676 0。其中:上游弯曲河段地貌面积信息维数平均值为 1.610 5,方差为 0.014 4;中游弯曲河段地貌面积信息维数平均值为 1.762 3,方差为 0.008 3;下游弯曲河段地貌面积信息维数平均值为 1.834 7,方差为 0.011 9。

赤水河上游及中游都属于山区河道,河宽较

窄,其上游天然落差远大于中、下游,河道形态发育受地形限制大,较平原冲击河流发育程度小且参差不齐,因此上游弯曲河段的分维小、方差大。下游属于平原冲积型河道,河宽较宽,河道弯曲率较大,水边线形态复杂,河床水上地貌可识别程度高,因此相比于中、上游河道,下游弯曲河段的分维大、方差小。

3.1.3 分维与典型河道地貌特征指标相关性分析

弯曲率的定义为

$$B=S/L \quad (6)$$

式中: B 表示弯曲率; S 表示河道中心线长度, m ; L 表示河湾跨度, m 。弯曲率分布规律见图 7。

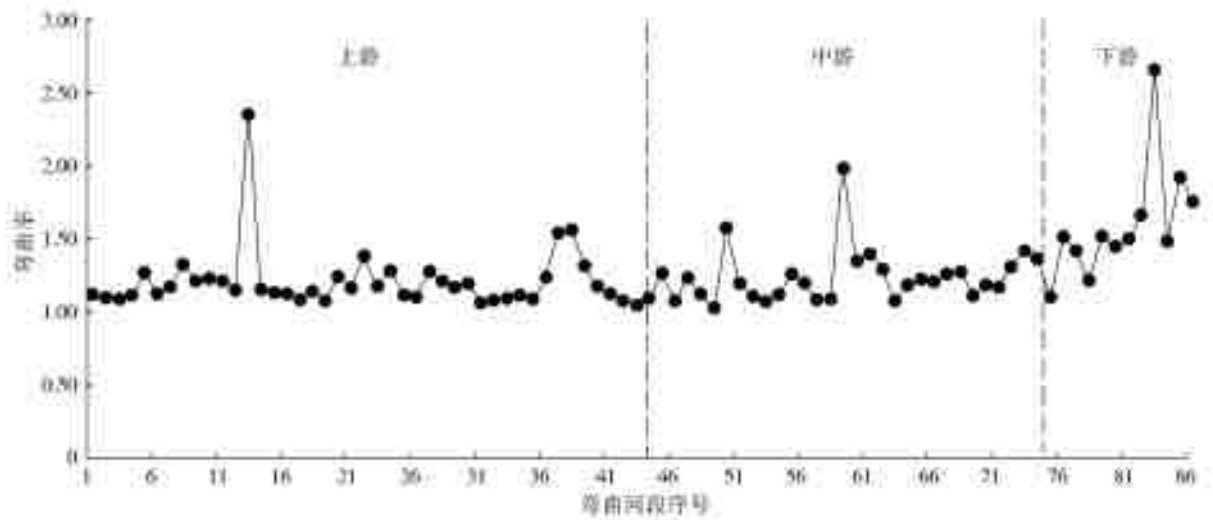


图7 弯曲率分布

Fig. 7 Bend rate profile

所测弯曲河段弯曲率区间范围为[1.025 9, 2.651 2],平均值为1.271 2。其中:上、中游弯曲河段弯曲率平均值分别为1.204 4和1.238 7,多属于微弯型河道;下游弯曲河段弯曲率平均值为1.597 5,多属于蜿蜒型河道。基于上、中、下游3部分河段,利用SPSS进行相关性分析,结果见表4。

表4 弯曲率及分维相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of bending rate and fractal dimension

相关性	水边线信息维数	地貌面积信息维数
弯曲率	上游	0.005
	中游	0.469**
	下游	0.644*
水边线信息维数	上游	1
	中游	-0.044
	下游	-0.245

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著;*表示在0.05级别(双尾)相关性显著。

弯曲率与水边线信息维呈正相关,相关性在上游河段较低,于中、下游处显著,在下游河段相关系数达到最高。弯曲率及水边线信息维与地貌面积信息维在不同河段处均无较强相关性,其中水边线信息维与地貌面积呈负相关。

相对于弯曲率,分形维数更适合表征形态复杂、细节丰富河段的分形几何特征,随着中、下游地区弯曲河段发育趋于成熟,河道变宽,所测河段规模逐渐加大,两者对于地貌特征的刻画趋于相近,体现在弯曲率与水边线信息维数在中、下游地区相关性显著加强。在整个赤水河干流,地貌面积信息维与两者皆无显著相关性,原因可能为,水边线信息维数和弯曲率皆根据一维空间线所求,而地貌面积信息维为

测算二维空间面求得,异维空间指标无较强相关性。

3.2 讨论

基于判定的无标度区间,整理回归方程拟合程度较高的82组弯曲河段信息维测算数据时发现,不同网格边长 r 对应的信息量 I_r 之间的差值趋于某一常数,以此可作为此区间为有效无标度区的进一步验证。以弯曲河段(74)水边线信息维数据为例阐述此规律,河段位置见图1。弯曲河段(74)的水边线信息维数 $D_i=1.005 1$,判定系数 $R^2=1$,其数据在无标度区内构建方程的拟合程度最高,对于此规律的体现具有较强的代表性,测算数据见表5。

表5 弯曲河段(74)水边线测算数据

Tab. 5 Calculated data of the waterline of the curved river section (74)

r	I_r	ΔI_r
10	6.37	0.18
12	6.19	0.16
14	6.04	0.19
17	5.84	0.21
21	5.63	0.18
25	5.45	0.18
30	5.28	0.19
36	5.08	—

其中:

$$\Delta I_r = I_{r_j} - I_{r_{j+1}} \quad (7)$$

求得此弯曲河段 ΔI_r 的平均数为0.18。经统计,排除弯曲河段(18)的水边线信息维数测算数据,其余85组弯曲河段的 ΔI_r 值变化范围为[0.171 0, 0.191 1],平均数为0.182 4。可见在无标度区内,计算弯曲河段水边线信息维数时,不同网格边长 r 对应的信息量 I_r 之间的差值趋于0.18。

地貌面积信息维数也展现了相同的规律。经统计,排除弯曲河段(3)、弯曲河段(6)及弯曲河段(8)的地貌面积信息维数值,其余 43 组弯曲河段的 ΔI_r 值变化范围为[0.255 7, 0.351 4],平均数为 0.310 0。在无标度区内,计算弯曲河段地貌面积信息维数时,不同网格边长 r 对应的信息量 I_r 之间的差值趋于 0.3。

当计算区间非分形体的无标度区时,上述规律亦不存在。以坐标 I_r - $\ln r$ 建立的回归方程拟合程度最低的弯曲河段(6)为例,河段位置见图 1,其地貌面积信息维数 $D_i=1.508 3$,其粗算分维见图 8。在区间[10,40]内,当 $r>12$ 时粗算维数的变化便出现明显“失稳”的现象,由此判断[12,40]非弯曲河段(6)地貌面积信息维的无标度区,且推测其无标度区应在 $r<12$ 的范围内确定,其测算数据见表 6,可见当分维计算区间为非无标度区时,不同网格长度 r 对应的信息量 I_r 之间的差值无规律可循。

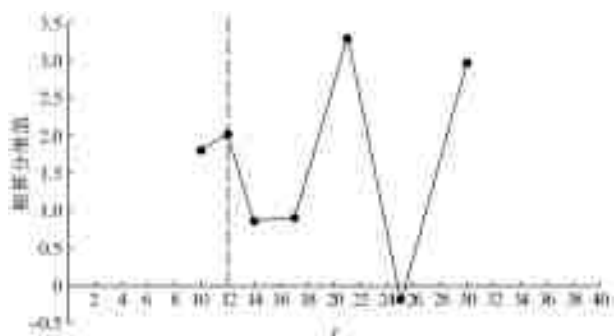


图 8 弯曲河段(6)粗算分维图

Fig. 8 Fractal dimension of rough river(6)

表 6 弯曲河段(6)地貌面积测算数据

Tab. 6 Geomorphological area measurement data of curved river reach(6)

r	I_r	ΔI_r
10	2.81	0.33
12	2.48	0.31
14	2.17	0.16
17	2.00	0.19
21	1.81	0.57
25	1.24	-0.04
30	1.28	0.54
36	0.74	0.74

4 结 论

本文采用粗算分形维数方法,将粗算分维点位分布图呈现的一种“失稳”规律作为无标度区间的判别依据,对赤水河干流所选弯曲河段平面形态分形特征的无标度区进行识别,同时通过判定系数对回

归方程拟合优度的检验,判定[10,40]为此次信息维数测算的无标度区,此方法对于一维、二维分形体无标度区的识别有良好效果。

赤水河干流所测弯曲河段水边线信息维数区间范围为[0.915 7, 1.042 1],平均值为 0.997 9,其中上、中及下游平均值依次为 0.997 6、0.998 1 和 0.998 7;所测弯曲河段地貌面积信息维数区间范围为[1.301 3, 1.923 0],平均值为 1.676 0,其中上、中及下游平均值依次为 1.610 5、1.762 3 和 1.834 7。赤水河干流弯曲河段弯曲率区间范围为[1.025 9, 2.651 2],平均值为 1.271 2。上、中游弯曲河段弯曲率平均值分别为 1.204 4 和 1.238 7,多属于微弯型河道,下游弯曲河段弯曲率平均值为 1.597 5,多属于蜿蜒型河道。相比于下游的平原冲积型河道,上游及中游都属于山区河道,河道形态发育受地形限制大,因此上游弯曲河段的分维小、方差大,下游弯曲河段的分维大、方差小。

通过信息维数与弯曲率的相关性分析可多角度定量描述蜿蜒河段平面形态。在赤水河中、下游河段,水边线信息维数与弯曲率的相关系数依次为 0.469 和 0.644,相关性逐渐加强。在赤水河干流,地貌面积信息维数与弯曲率、水边线信息维数相关性皆较弱,其相关系数绝对值均小于 0.4,且与水边线信息维数呈负相关,故本文对于分维在二维空间地貌平面形态的表征及异维分形还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 1-7. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2003.11.001.

[2] 赵进勇. 基于 3S 技术的多尺度河流栖息地定量评价方法研究:以瓯江为例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.

[3] 董哲仁. 河流生态修复[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

[4] 王宏涛. 蜿蜒河流空间异质性和物种多样性相关关系研究:以赤水河为例[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.

[5] 李志威, 石雪岑, 李贝贝, 等. 弯曲河流裁弯过程与机理综述[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 74-80. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.02.011.

[6] PASTERNAK G B. 2D Modeling and Ecohydraulic Analysis[M]. Publisher: Createspace, 2011.

[7] GIBSON S A, PASTERNAK G B. Selecting between one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic models for ecohydraulic analysis[J]. River Research

- and Applications, 2016, 32 (6): 1365-1381. DOI: 10.1002/rra.2972.
- [8] 于子铖,张叶,赵进勇,等. 城市河流生态适宜性平面蜿蜒度确定方法研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 95-102. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2019.11.012.
- [9] HOOKE J M. Complexity self-organisation and variation in behaviour in meandering rivers [J]. *Geomorphology*, 2007, 91 (3): 236-258. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.04.021.
- [10] GUO X Y, CHEN D, PARKER G. Flow directionality of pristine meandering rivers is embedded in the skewing of high-amplitude bends and neck cutoffs [J]. *PubMed*, 2019, 116(47): 23448-23454. DOI: 10.1073/pnas.1910874116.
- [11] ALESSANDRO IELPI, MATHIEU G A. Biotic forcing militates against river meandering in the modern Bonneville basin of Utah [J]. *Sedimentology*, 2018, 22 (5): 1896-1929. DOI: 10.1111/sed.12562.
- [12] 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. DOI:10.3969/j.issn.0493-2137.2008.09.006
- [13] MANDELBROT B. B. *The fractal geometry of nature* [M]. New York: Freeman, 1983.
- [14] HU Q, ZHOU Y, WANG S X, et al. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: Case study from the Jinsha River basin [J]. *Geomorphology*, 2019, 351 (15): 1-46. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106975.
- [15] CARLO D, FERNANDO M ADRIANO M, et al. Fractal dimension of the hydrographic pattern of Three Large Rivers in the mediterranean morphoclimatic system: Geomorphologic interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) Fluvial Geometry [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172 (7): 1975-1984. DOI: 10.1007/s00024-014-0910-z.
- [16] WILLIAMS Z C, PELLETIER J D, MEIXNER T. Self-affine fractal spatial and temporal variability of the San Pedro River, southern Arizona [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019 (12): 1540-1558. DOI: 10.1029/2018JF004853.
- [17] SUN H G, GU X F, ZHU J T, et al. Fractal nature of groundwater level fluctuations affected by riparian zone vegetation water use and river stage variations [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 139-146. DOI: 10.1038/s41598-019-51657-0.
- [18] 谢琼英,赵银军. 基于 DEM 的南流江流域水系分维数计算及其影响因素分析[J]. 广西师范学院学报, 2018, 35(3): 73-78. DOI: 10.16601/j.cnki.issn1001-8743.2018.03.016.
- [19] 孟宪萌,张鹏举,张宏,等. 水系结构分形特征的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(1): 48-56. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2019.01.0048.
- [20] 张桐,周德全. 分形理论在地貌学的应用研究进展与展望[J]. 价值工程, 2018, 11(33): 279-283. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2018.33.119.
- [21] 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[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009 (3): 170-178. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2009.03.020.
- [22] 安全,贺中华,赵翠薇,等. 黔中喀斯特筑坝流域水系分维估算与地貌发育特征分析[J]. 2019, 50(4): 73-81. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.04.010.
- [23] 王娜娜,唐庆,陈伟华. 基于 GIS 的马莲河流域水系分维研究 [J]. 绿色科技, 2017 (18): 33-34. DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2017.18.010.
- [24] 陶象武. 基于 GIS 的流域地貌形态分形空间变异特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [25] 周银军,陈立,刘同宜. 分形理论在泥沙研究中的应用概述[J]. 泥沙研究, 2012, 45(2): 73-80. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2012.02.011.