

赤水河弯曲河段地貌特征参数统计分析

刘一漩^{1,2}, 张晶¹, 赵进勇¹, 韩会玲², 于子铖¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 河北农业大学, 河北 保定 071001)

摘要:探究弯曲河段的地貌演变规律,揭示河流蜿蜒形态发展机理和地貌形态发育过程,可为西南山区河道保护与生态修复提供定量参考。选取赤水河干流自然蜿蜒的125组弯曲河段,应用统计学原理,归纳分析蜿蜒波形波长、蜿蜒河道波形振幅、曲率半径、中心角、半波弯曲弧线长度、横向偏移度、河道转向角、河道平滩宽度及弯曲率共9项指标的参数分布规律,并基于经验关系公式求算赤水河干流地貌特征系数数值范围。结果表明,赤水河左右两岸的弯曲发育有较强的对称性,干流弯曲河段的河道类型主要为微弯型,各指标参数的分布规律与赤水河地形地势变化密切相关。赤水河水系发育情况统计的经验公式中,弯曲河段蜿蜒波形波长和河道平滩宽度系数 k_1 主要变化为[13.2, 20.4],曲率半径与河道平滩宽度系数 k_2 主要变化为[3.0, 5.7],半波弯曲弧线长度与河道平滩宽度系数 k_3 主要变化为[13.8, 23.5]。研究表明,经验公式适用于赤水河地貌特征,且推断平原河道与山区河道所对应的系数值范围具有不同的变化规律。

关键词:赤水河;地貌特征;弯曲率;宽度系数

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)03-0044-07

河流生态系统由生物和非生物两部分组成,地貌属于非生物部分,其构成了生物部分的环境,通过河流生物与非生物环境的相互作用,可进行物种流动、能量流动、信息流动、物质循环等生态过程。河流地貌多样性决定了沿河生境的有效性和总量、生境的复杂性和连通性,是河流生物多样性和生态系统功能完善的基础,同时河流地貌特征参数更是制定其生态修复方案的基础信息,统计与分析相关特征参数对于揭示河流地貌演变规律具有重要意义(董哲仁,2013;董哲仁等,2014;董哲仁,2019)。

自然河流多为蜿蜒曲折,弯曲的河流含有丰富的地貌单元类型,其异质性的地貌空间为河流生物群落提供了多样化的生境空间(董哲仁,2003)。弯曲河流的地貌形态长久以来一直都是国内外学者重要的研究对象,已有学者基于弯曲率、河道蜿蜒波长、振幅、平滩河道宽度、河道蜿蜒振幅、曲率半径等地貌参数变化规律提出了经验关系公式(Hasfurther, 1985; Leo-

pold et al, 1995; Mitsch & Jorgensen, 2004)。董哲仁(2013)根据弯曲率的大小归纳河道的平面形态为蜿蜒、微弯顺直型和分汊型共3种类型,其中分汊型又可分为辫状型、网状型和游荡型;王随继等(2005)以澜沧江云南段为例,选取其集水面积在100 km²以上的一、二、三级支流的流域面积、河长、河道比降等地貌参数,运用统计学方法研究全部支流以及同一级别支流的上述有关参数之间的定量关系;张斌等(2007)通过Google Earth的卫星图像对嘉陵江河湾的形态参数进行了定义和测算,认为嘉陵江河湾是最不规则和最弯曲的河湾之一;蔡玉鹏等(2007)基于不同河流的形态平面形态变化规律,提出了河流类型与生态之间的关系就是在研究弯曲率的观点;李志威等(2011)选择平均河宽、颈口宽度、曲颈河宽等7项河湾形态参数,计算分析了弯曲率及其与其他形态参数的关系;Guo等(2019)通过研究弯道振幅与弯曲率的关系发现,低振幅弯道倾向于下游倾斜,而弯曲度大于2.6的弯道主要是向上游倾斜。

目前,有关蜿蜒河流弯曲河段的研究,从研究尺度、研究方法和数据获取方法等方面都截然不同,所得数据信息也不具有直接的参考意义。选择自然属性相对较高的赤水河作为研究对象,通过探究其上游、中游及下游不同河段的地貌特征,揭示河流蜿蜒形态发展机理和地貌形态发育规律,并基于经验关系公式确定赤水河干流地貌特征参数范围,可为西南山区河道的保护与生态修复提供定量参考。

收稿日期:2020-10-19 修回日期:2022-03-22

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年生,男,硕士研究生,研究方向为水生态修复。E-mail:1159083507@qq.com

通信作者:张晶,1981年生,女,教授级高级工程师,博士,主要从事生态水工学、水生态修复理论与技术研究。E-mail:zhangjing@iwhr.com

1 赤水河地貌特征表征指标

赤水河作为人类涉足相对较少的自然水域,具备较高的空间异质性及地貌形态多样性(王宏涛,2017)。本文以赤水河干流为研究区域,选取125组弯曲河段,河段位置如图1所示(卫片来源为Google Earth,摄影时间为2019年)。

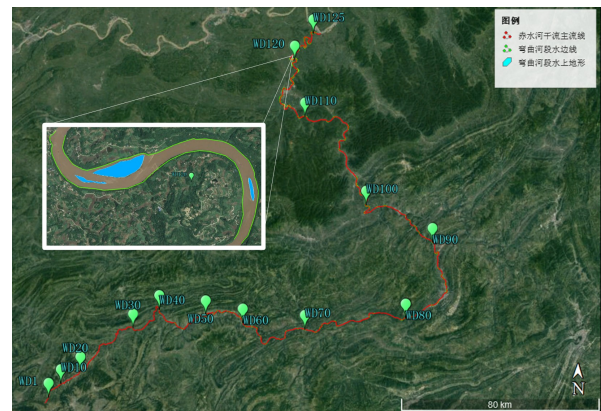


图1 研究区弯曲河段卫星影像

Fig.1 Satellite image of the meandering river segments in the study area

基于实地调研与相关地理信息数据的归纳梳理,针对河段的平面形态,本文共统计计算9种指标参数,分别为蜿蜒波形波长(L_m)、蜿蜒河道波形振幅(A_m)、曲率半径(R_c)、中心角(θ)、半波弯曲弧线长度(Z)、横向偏移度(T_m)、河道转向角(α)、河道平滩宽度(W)及弯曲率(B),各参数定义如图2所示。

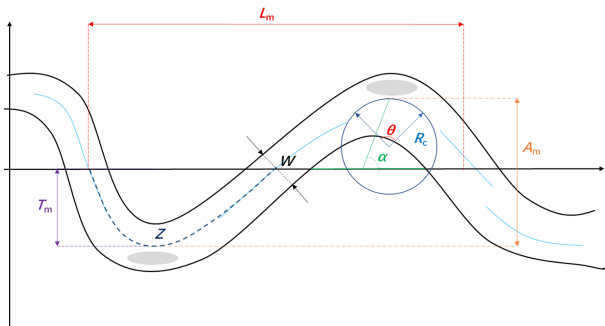


图2 弯曲河段形态参数

Fig.2 Definition of the geomorphological parameters of the curved river section

主泓线是设计蜿蜒型河道首先要确定的要素,通过统计蜿蜒波形波长(L_m)、蜿蜒河道波形振幅(A_m)、曲率半径(R_c)、中心角(θ)及半波弯曲弧线长度(Z)各参数,可反映河道主泓线特征;其中,蜿蜒波形波长指相邻两个波峰或波谷点之间距离,蜿蜒河道波形振幅指相邻两个弯道波形振幅,曲率半径指

河道弯曲的曲率半径,中心角指河道弧线中心角。

横向偏移度(T_m)和河道转向角(α)分别反映弯曲河段于横向和纵向的发育程度,通过定量分析可探究天然河段的形态演变规律。为尽可能减小误差、提高数据的准确性,上述各参数均利用Google Earth与ArcGIS地理信息空间结合技术,在统一的标准下测算而得。

河道平滩宽度(W)的定义是平滩流量下的河道平滩宽度,所谓平滩流量是指河流水位与河漫滩齐平时对应的河道流量,本文依据实地勘测的典型断面确定平滩水位,推求平滩流量,进而利用MIKE21软件计算出各弯曲河段的河道平滩宽度。

弯曲率(B)是蜿蜒型河流最具代表性的地貌指标之一(图3),其对河段的弯曲程度及形状走势的表征具有直观效果,但对于河流地貌细节特征的刻画不够详尽(白玉川等,2008)。弯曲率的变化反映了弯曲型河道的侧向移动演变,这种演变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;同时,弯曲率可作为划分河道类型的判别依据。董哲仁(2013)归纳河道平面形态为3种类型:弯曲率在1~1.05为直线型河道,1.05~1.3为微弯型,1.3~3.0为蜿蜒型,蜿蜒型是世界上分布最广的河流形态。弯曲率(B)定义为弯曲河段的弯曲弧线长度(S, m)与蜿蜒波形波长(L_m, m)的比值(无量纲),即: $B=S/L_m$

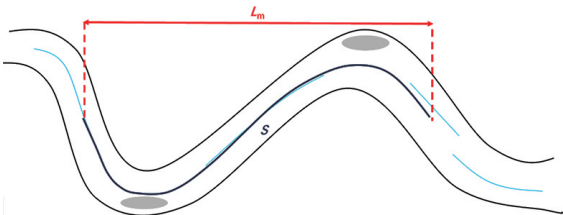


图3 河段弯曲率

Fig.3 Definition of bending rate

2 弯曲河段地貌特征指标统计

赤水河干流所选125组弯曲河段的9项指标统计结果如表1。所统计数据的主要内容为最大值、最小值、25%~75%区间范围值、平均值和中位数。

3 赤水河干流的地貌特征

赤水河上游及中游属山区河道,天然落差较大,河道较窄,河段蜿蜒形态的发育程度受地形限制大,且参差不齐;而赤水河下游属冲积型河道,地势整体较为平坦,河道宽度明显加大,河段蜿蜒形态的发育程度较为成熟。经统计,弯曲河段于左、右两岸的数量分别为62

和63,近似各占50%,由此可以说明赤水河自身的蜿蜒发育具有较强的对称性,同时也说明其作为天然蜿蜒河流独特的自然属性;同样,在对指标进行定量分析可以发现,各指标的变化规律符合赤水河干流的地形地势,体现了河道类型的演变规律。

表 1 指标定量统计

Tab.1 Quantitative statistics of eight morphological parameters

指标	最小值	最大值	25%~75% 区间值	平均值	中位数
蜿蜒波形波长/m	146	1754	[557, 1081]	882	794
蜿蜒河道波形振幅/m	42	511	[147, 312]	288	205
曲率半径/m	21	596	[100, 313]	228	186
中心角/°	18	144	[49, 87]	69	67
半波弯曲弧线长度/m	109	2038	[576, 1198]	1039	884
横向偏移度/m	30	511	[128, 289]	269	194
河道平滩宽度/m	4	98	[25, 57]	53	45
弯曲率	1.03	1.75	[1.12, 1.38]	1.28	1.21

3.1 弯曲河段河道类型分布规律

通过分别统计上游、中游及下游河段的弯曲率发现,上游和中游的河段弯曲率普遍较小,平均值分别为1.21和1.19。上游和中游对应赤水河山区河段,其弯曲率主要变化区间为[1.11, 1.33],平均值为1.20;而下游为平原冲积型河段,弯曲率主要变化区

间为[1.45, 1.75],平均值为1.51。根据弯曲率对河道类型的划分结果见表2(董哲仁,2019)。赤水河干流弯曲河段河道类型多为微弯型,上游和中游河段分别占比66.3%和74.2%;而下游河段平坦宽阔,河段弯曲率较大,河道类型主要为发育成熟的蜿蜒型弯道,占比高达90.9%,此规律契合赤水河的地形走势。

3.2 地貌指标综合分析

综合分析9项指标的变化规律,发现蜿蜒波形波长、半波弯曲弧线长度、河道平滩宽度、波形振幅、横向偏移度及曲率半径6项指标整体上具有相同的变化趋势(图4)。

由图4可以看出,6项指标参数值由上游至下游均呈增加趋势,在赤水河干流下游河段处均出现骤增变化。通过表1指标定量统计可见,各参数的平均值与最大值均相差较大,且下游的指标值明显异常于干流的整体范围,说明干流各指标值大小整体趋于上游、中游河段。考虑赤水河地形地势,其上游及中游河段蜿蜒形态发育受地形限制大,故进入到下游河段后,各指标值均骤然增大。

统计发现,所测中心角数据与弯曲率的变化规律大致上具有相同的趋势,由上游到下游,数值变化整体呈先减后增的趋势,变化舒缓,未出现数值骤变的现象。经计算,两者相关系数为0.414,如图5及表3所示。可见河段弯曲率与其中心角分布有一定关联。

表 2 河道类型划分统计

Tab.2 Statistics of river segment types based on the bending rate

统计 指标	上游			中游			下游		
	直线型(1.00 <B<1.05)	微弯型(1.06 <B<1.29)	蜿蜒型(1.30 <B<3.00)	直线型(1.00 <B<1.05)	微弯型(1.06< B<1.29)	蜿蜒型(1.30 <B<3.00)	直线型(1.00 <B<1.05)	微弯型(1.06 <B<1.29)	蜿蜒型(1.30 <B<3.00)
河段数	1	55	27	2	23	6	0	1	10
占比/%	1.2	66.3	32.5	6.5	74.2	19.3	0	9.1	90.9

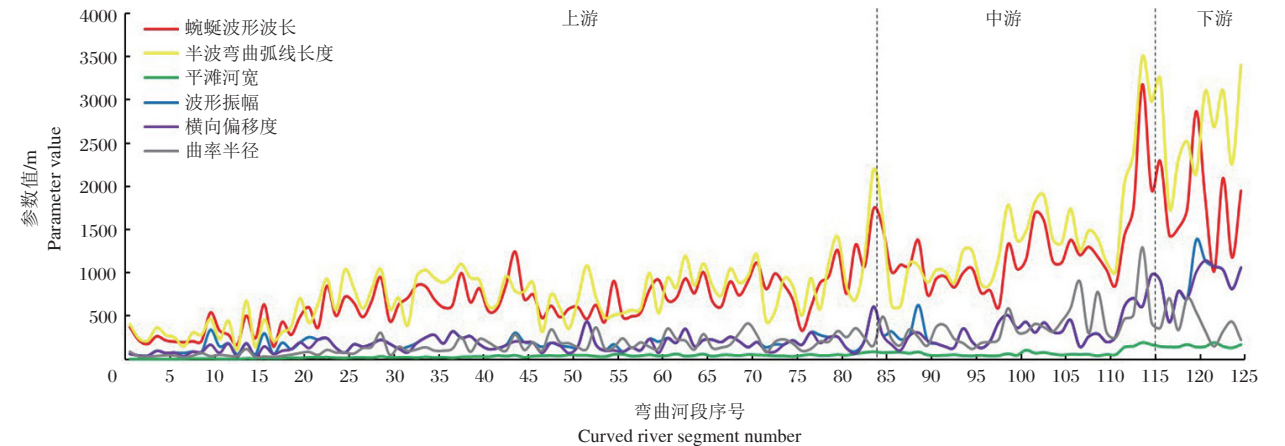


图 4 6 项地貌指标参数变化趋势

Fig.4 Change trend of six geomorphological parameters

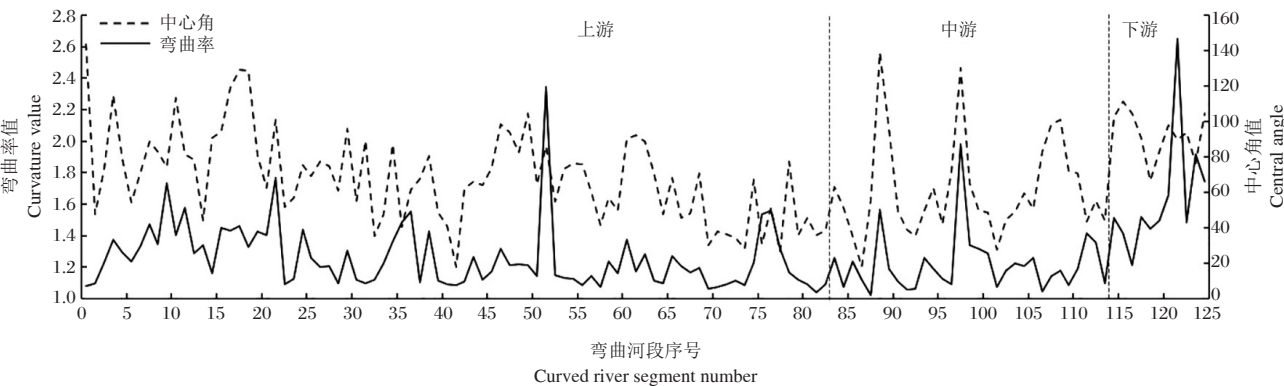


图5 弯曲率及中心角变化趋势
Fig.5 Change trend of bending rate and central angle

表3 弯曲率及中心角相关性分析
Tab.3 Correlation analysis of bending rate and central angle

相关性		弯曲率	中心角
弯曲率	皮尔逊相关性	1	0.414**
	显著性(双尾)		0.000
	个案数	125	125

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著。
Note: ** highly significant correlation ($P<0.01$, two-tailed).

河道转向角可判断弯曲河段于上、下游的倾向,其中河道转向角 $\alpha>90^\circ$ 弯曲河段为上游倾斜, $\alpha<90^\circ$ 弯曲河段为下游倾斜(表4)。随着上游至下游河段弯曲率的逐渐加大,河道上游倾斜的弯曲河段数量也逐渐增多,上游、中游及下游占比依次为24.1%、38.7%和45.5%,其中右岸上游倾斜的河段数量占比相对于左岸较大,为33.3%,而左岸为25.8%,说明平原冲积型河道相较之山区河道受地形影响较小,地貌发育较成熟,其弯曲河段向上游倾斜的机率也相对较大,而此河段倾斜规律与Guo(2019)所得结论类似。

表4 河段转向角统计
Tab.4 River steering angle statistics

统计指标	上游		中游		下游	
	上游倾斜 ($\alpha>90^\circ$)	下游倾斜 ($\alpha<90^\circ$)	上游倾斜 ($\alpha>90^\circ$)	下游倾斜 ($\alpha<90^\circ$)	上游倾斜 ($\alpha>90^\circ$)	下游倾斜 ($\alpha<90^\circ$)
河段数	20	63	12	19	5	6
占比/%	24.1	75.9	38.7	61.3	45.5	54.5

3.3 地貌特征经验关系式

蜿蜒型河道的宽度、深度和平面形态是相互关联的变量,平滩流量决定河流的平均形态。有学者通过大量河段样本调查分析,运用统计学方法,总结了若干地貌参数之间的统计公式,确定了各参数的范围(Guo,

2019; Mitsch & Jorgensen, 2004),但公式对于不同区域的适用性及参数的参考价值还需进一步考量。

3.3.1 经验公式 本文基于3组经验公式对赤水河地貌特征参数的相关关系进行统计分析。

(1)弯曲河段蜿蜒波形波长与河道平滩宽度:
$$L_m = k_1 W \tag{1}$$

式中: L_m 为蜿蜒波形波长(m), k_1 为系数, W 为河道平滩宽度(m)。

(2)曲率半径与河道平滩宽度:
$$R_c = k_2 W \tag{2}$$

式中: R_c 为曲率半径(m), k_2 为系数, W 为河道平滩宽度(m)。

(3)半波弯曲弧线长度与河道平滩宽度:
$$Z = k_3 W \tag{3}$$

式中: Z 为半波弯曲弧线长度(m), k_3 为系数, W 为河道平滩宽度(m)。

3.3.2 公式应用 首先基于公式①研究弯曲河段蜿蜒波形波长与河道平滩宽度的关系,计算系数 k_1 ,分布规律如图6所示。

由图6可见,依据数值变化规律,可将系数 k_1 散点分布划分成A、B、C三部分,各部分具体定量展示如表5所列。

显然,A、B、C散点分布明显具有不同的规律。A部分散点分布位置由散乱逐渐趋于汇集,系数 k_1 值整体逐渐变小;B部分散点分布趋于稳定,系数 k_1 值主要波动区间为[13.2,20.4];而C部分散点值逐渐有由平稳向变小发展的趋势,其平均值为11.7。

结合赤水河流域地形高程(图7),区域A对应于赤水河河源处至河口村,此范围属于赤水河上游范畴,从图7可以看出,此区域地势极高,且赤水河水系发育未见端倪。区域B对应于河口村至赤水市,此范

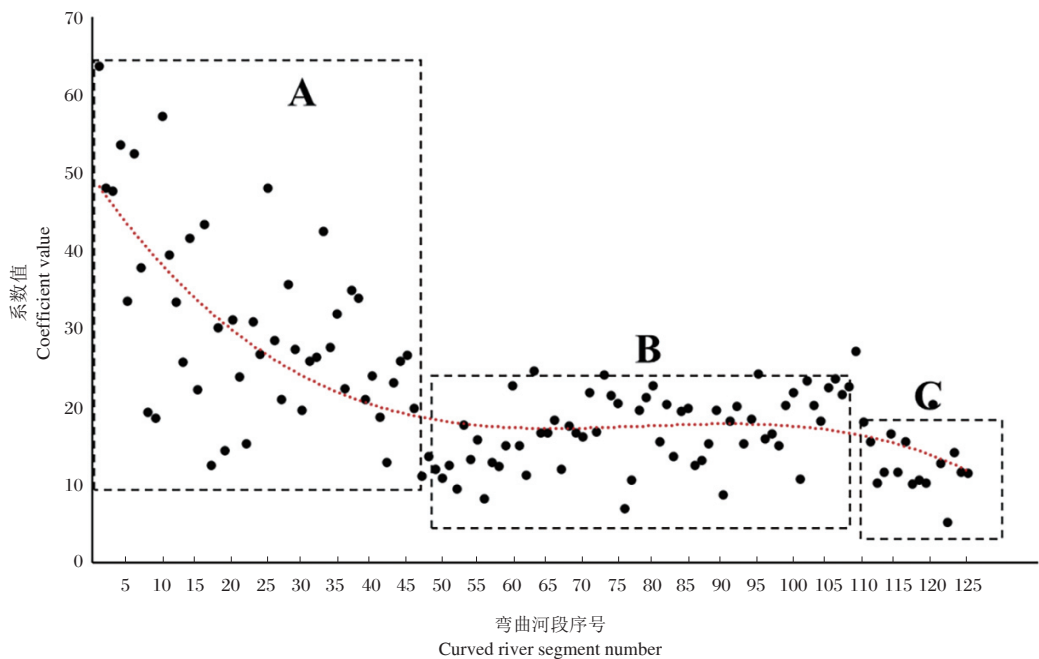


图 6 系数 k_1 散点分布
Fig.6 Scatter plot of coefficient k_1

围包含了赤水河部分上游河段及中游河段,此区域内的赤水河水系发育逐渐趋于成熟,地形地貌也逐渐成型,因此区域B的弯曲河段(46~109)可作为赤水河流域代表性弯曲河段,而其散点系数 k_1 值区间在[13.2,20.4],平均值16.7,可作为赤水河流域典型山区河道参考系数。区域C主要对应于赤水河下游,河段发育充分且成熟蜿蜒度较大,其散点系数 k_1 平均值11.7,恰属于2001年 Soar 和 Thorne 提出的11.3~12.5范围,因此证明弯曲河段蜿蜒波形波长和河道平滩宽度关系的经验公式适用于本研究区。

表 5 系数 k_1 统计

Tab.5 Statistics for coefficient k_1					
区域	河段序号	最大值	最小值	25%~75%区间值	平均值
A	1~45	57.2	12.5	[22.3,38.7]	27.6
B	46~109	24.7	7.0	[13.2,20.4]	16.7
C	110~125	20.4	5.3	[10.5,16.1]	11.7

同样,基于区域B及区域C,应用经验公式对系数 k_2 和系数 k_3 进行统计,结果如表6所示。

表 6 系数 k_2 和系数 k_3 统计

Tab.6 Statistics for coefficient k_2 and coefficient k_3					
系数	B 区域		C 区域		平均值
	25%~75%区间值	平均值	25%~75%区间值	平均值	
k_2	[3.0, 5.7]	4.9	[2.3, 4.8]		4.2
k_3	[13.8, 23.5]	18.8	[15.0, 20.6]		18.3

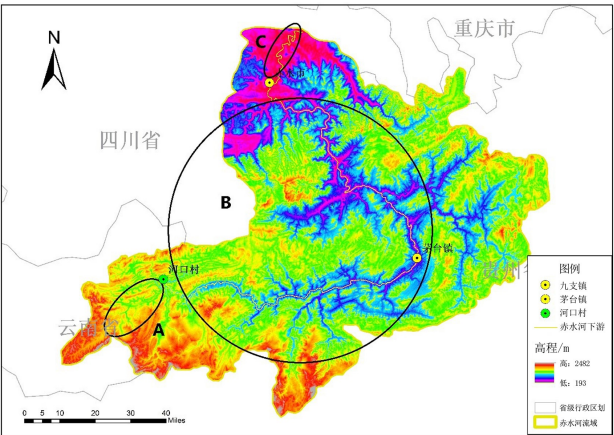


图 7 流域地形高程信息
Fig.7 Terrain elevation map of the Chishui River watershed

统计表明,区域C对应的弯曲河段曲率半径与河道平滩宽度系数 k_2 值的平均值,符合美国陆军工程兵团(USACE,1994)所提出的系数范围(1.5~4.5)。综合区域C的河段地形及系数 k_1 和 k_2 数值变化可以发现,早先经验公式的应用可能更多是基于平原型河流,其取值范围也更适应于冲积型河道,但赤水河下游河段较短,所统计识别的弯曲河段数量也相对较少,由此推断平原河道与山区河道的发育演变应具备不同的规律;同时,将区域B范围内统计所得的 k_2 和 k_3 系数范围值作为赤水河流域典型山区河道参考系数。

4 小结

(1)通过对赤水河干流125组弯曲河段共计9项地貌指标参数进行统计分析,总体各指标的分布规律,充分反应了赤水河的地貌地势,其中蜿蜒波形波长、蜿蜒河道波形振幅、曲率半径、半波弯曲弧线长度、横向偏移度和河道平滩宽度6项指标参数的变化规律符合赤水河由上游至下游的地形走势,至下游平坦区域各参数数值大小明显骤增。

(2)赤水河干流河段的弯曲率为[1.12,1.38],弯曲河段类型主要为微弯型。结合水系发育情况,赤水河流域可划分出区域B和区域C两部分作为水系发育成熟的地区,区域B可视作赤水河流域典型山区河段的代表区域,统计得经验公式参考系数值范围, k_1 为[13.2, 20.4], k_2 为[3.0, 5.7], k_3 为[13.8, 23.5]。

(3)综合区域C的河段地形及系数 k_1 和 k_2 值可以发现,早先经验公式的应用可能更多是基于平原型河流,其取值范围也更适应于冲积型河道,推断平原河道与山区河道的发育演变规律不同。研究结果可为制定赤水河生态修复方案提供地貌特征参数的设计方案,对类似河流生态修复具有一定参考和借鉴意义。

参考文献

白玉川,黄涛,许栋,2008. 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,41(9):1052-1056.
蔡玉鹏,2007. 大型水利工程对长江中下游关键生态功能区影响研究[D]. 合肥:河海大学.

董哲仁,2003. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报,(11):1-6.
董哲仁,2013. 河流生态修复[M]. 北京:中国水利水电出版社.
董哲仁,孙东亚,赵进勇,等,2014. 生态水工学进展与展望[J]. 水利学报,45(12):1419-1426.
董哲仁,2019. 生态水利工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社.
李志威,秦小华,方春明,2011. 天然河湾几何形态统计分析[J]. 水科学进展,22(5):638-644.
王宏涛,2017. 蜿蜒型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.
王随继,吴绍洪,戴尔阜,2005. 河流地貌参数统计关系反映的河性分异现象——以澜沧江云南段有关支流为例[J]. 自然科学进展,15(7):824-829.
张斌,艾南山,黄正文,等,2007. 中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. 科学通报,52(22):2671-2682.
Guo X Y, Chen D, Parker G, 2019. Flow directionality of pristine meandering rivers is embedded in the skewing of high-amplitude bends and neck cutoffs[J]. Pubmed, 116(47):23448-23454.
Hasfurther V R, 1985. The use of meander parameters in restoring hydrologic balance to reclaimed stream beds[C]. In: Gore J A, ed. The Restoration of Rivers and Streams: Theories and Experience. Boston: Butterworth Publishers.
Leopold L B, Wolman M G, Miller J P, 1995. Fluvial processes in Geomorphology[M]. Dover: Dover Publications.
Mitsch W J, Jorgensen S E, 2004. Ecological Engineering and Ecosystem Restoration[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

(责任编辑 万月华)

Statistical Analysis of Geomorphological Parameters in Meandering Sections of Chishui River

LIU Yi-xuan^{1,2}, ZHANG Jing¹, ZHAO Jin-yong¹, HAN Hui-ling², YU Zi-cheng¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R. China;

2. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, P.R. China)

Abstract: Geomorphological diversity of rivers is the basis of biodiversity and ecosystem integrity of rivers, and geomorphological parameters provide basic information for planning the restoration of river ecosystems. In this study, Chishui River was selected for study because of its natural attributes. The geomorphological characteristics of 125 meandering segments of the river were analyzed, aiming to reveal the mechanisms driving the geomorphological evolution of the meanders. Nine geomorphological parameters of the meandering segments were selected for the analysis of landform distribution using statistical techniques that included the meandering waveform length, amplitude, radius of curvature, central angle, half-wave arc length, lateral deviation, and the channel turning angle, flat beach width and bending rate. The range of characteristic coefficient values of the geomorphological parameters was then calculated based on empirical relationships. Results show that the curve development of Chishui River on the left and right banks is strongly symmetric. The meandering sections of the mainstem tend to be slightly curved, and the distribution of the geomorphological parameters was closely related to the topography of Chishui River. Based on statistics collected on the Chishui River system, various coefficient ranges for the empirical formula were obtained. The change intervals of coefficient k_1 for meander wavelength and channel flat width of the curved river section were 13.2 and 20.4; the change intervals of coefficient k_2 for curvature radius and the channel flat width were 3.0 and 5.7; the change intervals of coefficient k_3 for half-wave bending arc length and river flat width were 13.8 and 23.5. Our results show that the empirical formula is suitable for the landform characteristics of Chishui River, and the coefficient value ranges infer that plain river courses and mountain river courses have different change laws.

Key words: Chishui River; landform features; bending rate; width coefficient