

中国嘉陵江河曲的形态与成因

张 斌 艾南山 黄正文 易成波 覃发超

(西华师范大学国土资源学院, 南充 637002; 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065. E-mail: envgeo@163.com)

摘要 作为河系的基本范畴之一, 对不同区域和类型河曲形态的定量参数进行比较研究, 有助于识别其特征并探究其形成与演化, 也可作为河曲资源的保护与开发提供地貌学基础. 基于 Google Earth 图像, 定义了河曲参数并进行了测算, 结果表明嘉陵江深切河曲是世界上最复杂、最不规则和最弯曲的河道之一. 特殊的河流比降、地质结构、岩层、岩性以及地形的顶托是嘉陵江河曲发育的重要因素. 嘉陵江河曲的演化遵循能量耗散极小-极大值原理; 遥感数据的易得性使进行区域性乃至全球性的对比研究成为可能, 进而才能探讨其成因的差异; 河曲形态为先成河提供了证据, 显示了河道的下切与地壳的抬升; 河流地貌学“离堆山”术语名称源于嘉陵江畔孤山之称谓; 深切河曲是一种需要保护的资源.

关键词 河曲 形态特征 分形维数 比较 嘉陵江 成因

近 100 年以来, 河流地貌学的研究已经取得了丰硕的成果. 而一直偏重于研究河曲与辫状河的河流形态学, 是河流地貌学的重要组成. 现代河流的几何形态参数对于古水文的重建与河流的演化研究至关重要^[1], 河流形态研究可为河流景观环境保护及水力资源开发提供地貌学依据.

河曲, 意指迂回曲折的河道^[2]. 拉丁语maeander出自希腊语maiandros, 源于土耳其西部流入地中海的一条河流的名称(该河原名Maender, 现作Büyük Menderes, 英文Great Menderes, 中文译为大门德雷斯河)^[3]. 对河曲的形态特征、分类和成因的研究已经比较成熟. Matthes把河曲定义为发育于冲积平原上的 S 形河道, 划分为正常和非正常两种河曲类型; 后者呈大环状并伴有裁弯取直和牛轭湖的产生. 谷坡、推移质、流量、河床阻力和横向振动是河流弯曲的基本因素^[4]. Schumm把大平原上稳定的冲积性河曲分为弯曲的、不规则和规则的 3 种类型^[5]. Brice^[6]定量地给出了环状河曲的定义(但其标准存在缺陷), 提出了河曲的演化过程并划分出 4 种类型: 简单对称、简单不对称、复合对称、复合不对称. 另外, 河曲还有规则或不规则、简单或复合、陡峻或平坦等分类方法^[7]. 规则河曲由系列具有相同曲率和波长的河湾组成; 河曲的规则性取决于波长与曲率半径的比率. 不规则河曲因变形而导致不同河曲带具有不同的波长. 地形、不均匀的冲积层、支流可变流量以及可渗岩层都是形成不规则河曲的必要条件. 简单河曲具有一

种数量上占优势的河曲带宽和波长; 复合河曲发育在具有多种主导流量的河段上. Frothingham定义的 4 种河曲类型与Brice的类似, 只是以延长对称型代替了简单不对称, 其划分依据包括入流角、曲流颈长、曲率半径及曲流颈到环顶的垂直距离^[8]. 为了定量研究河曲带, Hasfurther^[9]提出了计算波长、弯曲率、曲率半径和振幅等参数的公式; Leopold和Wolman建立了波长、平滩河道宽、振幅和曲率半径之间的关系式^[10]; Dury^[11~13]通过对宽阔弯曲河谷不对称河的深入研究建立了现代河曲的波长与平滩流量之间的关系.

沈玉昌等人^[14]按照地形把河曲分为平原河曲和山地深切河曲两种类型. 前者又分为一般弯曲(弯曲率为 1.2~1.5)和蛇曲(1.5~5.0); 后者包括正常深切河曲和变形深切河曲, 岩性对其形态具有重要影响. 根据形状和演化过程, 平原河曲可分为自由河曲和强制性河曲. 自由河曲通常形成于宽广的冲积平原或河漫滩上; 强制性河曲的水流紧靠不易侵蚀的岩岸流动, 形成非常急剧的弯曲, 形态极不自然. 根据成因河曲还可划分为原生和次生河曲. 原生河曲的形成主要取决于原始地面形态和地质构造等, 河曲半径大小不一, 弯曲形态不规则且较稳定. 次生河曲的形成主要是由于水流本身的作用所造成, 形态多变. 依据河流的平面形态、河床边界与河流地貌的稳定性, 陈宝冲^[15]划分出固定弯曲、稳定弯曲和不稳定弯曲 3 种河曲类型. 固定河曲具有规则的平面形态; 稳定河曲经历着缓慢的凹岸冲刷、凸岸淤积, 而不稳定河曲

凹岸冲刷与凸岸淤积作用都较强烈。林承坤^[16]根据稳定性把冲积弯曲河床分成稳定弯曲和自由弯曲;前者因凸岸可动性小不易自然裁弯,使河道在演变中愈来愈弯曲;后者弯道演变十分迅速。本研究中,采用自由河曲和深切河曲的分类体系。

对河曲的研究注重运用河流动力学来阐述其组成物质和形态在流水作用下的演化和分布规律。河曲平面形态是河型研究的主要内容,与横向变化及纵向变化存在着相互制约的紧密关系^[17]。自由河曲形态学及判别参数的研究已经取得了很大进展,而深切河曲则较少,体现出两者在研究上的失衡。过去对河曲的研究往往基于单一河流或河系,缺乏横向的比较研究。本文目的在于通过识别嘉陵江河曲的典型性和复杂性,并与世界上其他河曲进行参数对比,以探索不同地区、不同类型的河曲形成条件的异同,把河曲形态及其演化联系起来。对深切河曲的研究也有助于弥补相对于自由河曲研究的不平衡。

1 研究区概况

嘉陵江发源于秦岭南麓,向南流经川中丘陵区,切穿盆东平行岭谷,于重庆市朝天门注入长江,干流

全长1120 km,流域面积 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1~3)。四川广元市昭化镇至嘉陵江源为上游,长360 km,地质构造异常复杂。阳平关以上河段处于冒地槽褶皱带,阳平关以下至昭化段则主要位于龙门-大巴台缘褶皱带。上游山地海拔1000~3000 m,相对高差400~1000 m,河流深切,多数地段河谷狭窄、水流湍急,河谷呈V型。嘉陵江中下游地区,在构造分区上属于中、新生代四川台坳。四川台坳在古生代时期是扬子准地台相对隆起的地带,印支运动后转变成大型凹陷,喜马拉雅运动后全面褶皱隆起,川中基底刚硬,故地表褶皱非常和缓。昭化至重庆合川市为中游,长630 km;合川以下为下游,长130 km。中游河流蜿蜒于盆中丘陵区,地势低矮,海拔250~600 m;软硬相间的紫红色砂泥岩层大体呈水平分布,经河流切割后,形成坡陡、顶平的方山丘陵。河道自上而下逐渐开阔,河曲发育。下游流经盆东平行岭谷区,切穿华蓥山伸向西南的3条支脉。水面宽150~200 m,峡、沱、滩、碛相间成串是下游河谷地貌的突出特征。嘉陵江流域属典型的亚热带湿润季风气候,夏热多雨;径流主要由降雨补给;洪水历时短、洪峰高^[18,19]。



图1 嘉陵江区位图

图中实线矩形框为研究区位置。比例尺:1:65000000。资料来源:国家基础地理信息中心

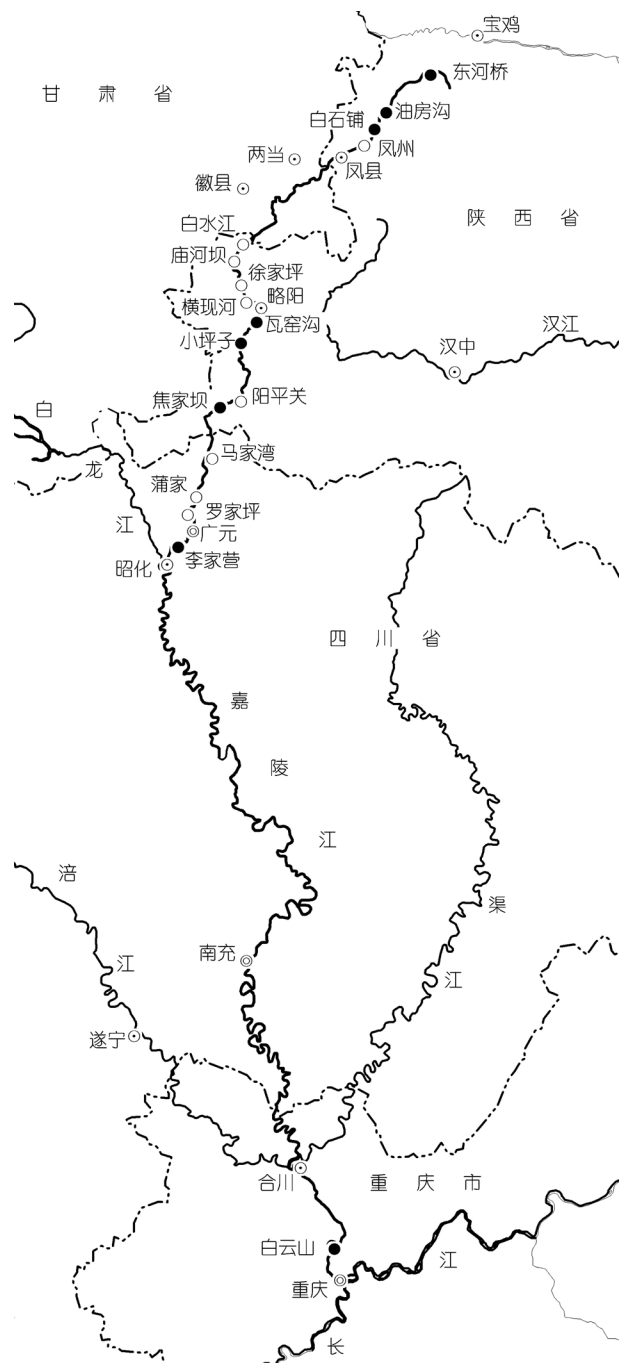


图 2 嘉陵江略图

比例尺: 1:4500000. 资料来源: 国家基础地理信息中心

嘉陵江河曲与离堆山早已受到关注. 早在 762 年, 唐代大书法家颜真卿被贬蓬州(今四川仪陇县大寅镇)时, 他发现苍溪县城北白鹤山与仪陇新政镇的锅头山, 因不与周围众山相连而称其为“离堆山”^[20]. 嘉陵江河曲因作为深切河曲或“先成河”的典型代表而颇为知名^[21~23].

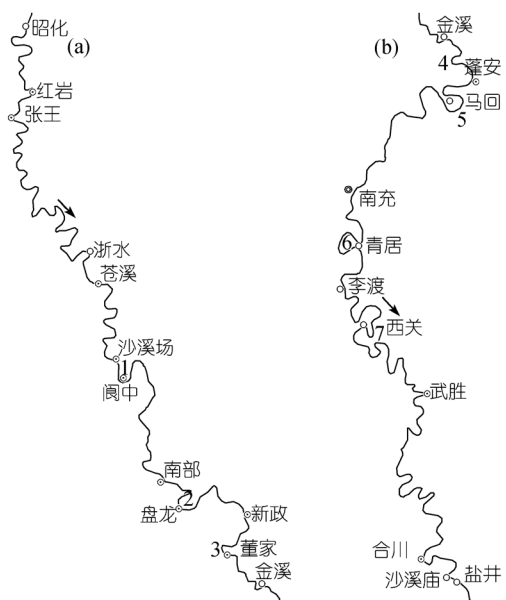


图 3 嘉陵江中游的河曲分布

图中箭头指示流向. (a) 北段; (b) 南段. 比例尺: 1:1100000

2 研究方法

2.1 资料收集

广泛收集国内外有关河曲的文献资料, 尤其是各类纸介质和电子地图, 然后筛选出河曲较发育的河段.

2.2 河曲参数定义

河曲形态的定量参数涵盖了平面和垂向特征两方面^[9]. 对于不同类型的河曲, 其参数也基本上差不多. 一些水文学或水力学参数与河曲形态参数具有密切的联系, 它们之间的丰富关系已经得以建立^[9,11~13,24~28].

() 单一河曲的形态. 很多文献已对河曲的形

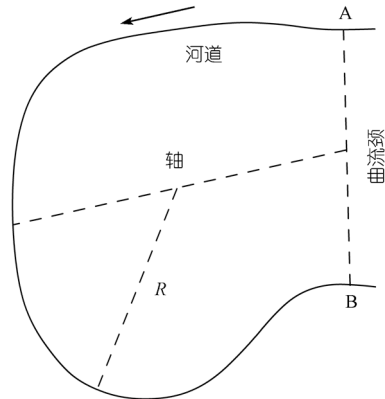


图 4 河曲

图中实线代表河道中线. 箭头指标流向

态学分类进行过探讨^[29]。从平面几何形态上河曲可直观地简化为V、U和 Ω 型3种基本类型。当一条线段垂直于曲流轴从曲流顶向曲流颈移动时,如果线段一直趋于变长,则为V型河曲;如果线段先变长而后几乎保持不变,则为U型;如果线段先变长而后显著变短,则为 Ω 型。V型河曲最常见,U型较少,而 Ω 型更少。本文侧重于研究U型和 Ω 型河曲。

() 河曲参数。其形态特征参数包括 L (曲流颈长)、 S (河道长)、 c (弯曲率)、 R (曲率半径)、 M 、 β 和 e (图4)。

M 为河曲轴长,可以反映河曲侧向摆动的幅度。它是岩性、水文条件和新构造运动综合作用的结果。当曲流颈长度不变时, M 越大则河曲越弯曲。

β 为河曲轴方位角,即从曲流颈中点至河曲顶的方位,表征河曲的摆动或弯曲方向,有助于河曲的定位。它受地质结构、岩性、水文和边界条件的影响。

e 为封闭率,可用下式计算。

$$e = S/(S + L) = c/(c + 1), \quad (1)$$

式中 S 是河道长, L 是曲流颈长, c 是弯曲率。当 $c \geq 1$, $e \geq 0.5$; 当 $c \rightarrow \infty$, $e \rightarrow 1$, 因而 $e \in [0.5, 1)$ 。 e 值越大则河曲越趋封闭,其流向越趋反转。当 $e \rightarrow 1$ 时,曲流颈因受侵蚀将被切穿,河道将变直, $e=0.5$ 。尽管 c 和 e 是相关的,但 e 比 c 能更科学准确地度量弯曲程度,特别是对于 Ω 型河曲。

() 河曲带参数。参数包括 L (轴长)、 S (河道长)、 c (弯曲率)、 λ 、 W 和 D (图5)。

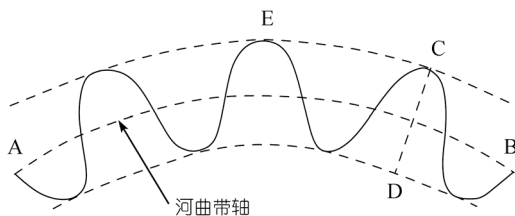


图5 河曲带
图中实线代表河道中线

λ 为河曲带波长,E和C点的平均长度,即2个连续波峰之间的距离。可由下式近似地计算。

$$\lambda = L/n, \quad (2)$$

式中 n 代表波峰数, L 代表河曲带轴长度。

W 为河曲带振幅,或河曲带宽,即C点到D点的距离。它表征了弯曲的幅度。如果 λ 一定而 W 变大,或 W 一定而 λ 变小,则 c 增大而河流更趋弯曲。

D 为分形维数。分形的概念被用于描述河流平面形态^[30],已有研究表明河曲具有分形的特征^[31]。

Snow^[32]对12条河流平面形态的分析表明,河道在一定尺度下表现出分形弯曲。分形维数是河曲展布和弯曲率的一种量度,用于描述其不规则性和复杂性^[31]。 D 值不仅取决于河流的平面形态,还受图形比例尺和计算方法的影响。河曲带越复杂越不规则,则 D 值越大。本研究中 D 值用盒维数方法求解。

() 命名。河曲带的命名规则为“河流名称+地名+河曲带”,简称“地名+河曲带”;单一河曲的命名规则为“河流名称+地名+河曲”,简称“地名+河曲”。

2.3 数据获取

本研究数据主要源于Google Earth,客户端软件可从其官方网站下载安装运行。感兴趣的区域(AOI),即国内外的河曲和河曲带,以适当的分辨率和尺寸显示在计算机屏幕。用“Tools”菜单下的“Measure”工具可量测直线和多线段的长度。对河道量测时,以其中线为准。参数 L 、 S 、 M 、 W 、 R 的值直接利用客户端软件量测,从而可据上述公式计算出 c 和 e 。AOI可在全屏模式下用“File”菜单下的“Save Image”命令保存为JPG格式图像,然后用Photoshop软件组合并用ARCGIS分析。通过对河道中心线的矢量化,河曲和河曲带的几何形状确定后, β 和 λ 就可被量算。河曲带图像在1:100000比例尺下保存为bmp格式。当用边长为 r 的格子量测河曲时,可得到测量次数 N 。当 r 从8变动到100像素时(步长为1),可获得一系列 (r, N) 值,然后用以下的对数模型去模拟,从而可计算出 D 值(这个过程借助于FractalFox软件容易实现)。

$$D = \ln N / \ln(1/r). \quad (3)$$

2.4 精度检验

受Google Earth图像分辨率的影响,量算的参数值是近似的。事实上,很难精确测量河流的长度,使在不同文献中同一河流长度数据可能不一致。本研究中量算数据与官方数据比较并无太大的差异,如嘉陵江昭化至重庆朝天门Google Earth长度是714 km,而易瑜等人^[33]所提供的数据是707 km^[33],两者仅7 km之差。

2.5 数据分析

将获得的数据进行分析,研究嘉陵江曲流的分布与形态特征,阐明其特色。

3 结果

3.1 嘉陵江河曲的分布

嘉陵江上游地质构造复杂,受构造运动和岩性

的控制,河曲总体不发育,分布较零星^[34].陕西凤县东河桥至白石铺段,多宽谷和坝子,河谷两侧发育比较成熟的晚壮年期地貌,坝子的形成受到岩性的支配和构造运动的影响,仅在凤县凤州村和油房沟一带形成明显的河曲带,振幅在 0.5~1.2 km 之间.从白石铺至白水江段,河流横切构造线,峡谷发育,以石灰岩为主,在甘肃徽县与两当县交界处形成了一个较大的 W 型河曲,曲流颈长 1.2 km,弯曲率 4.92.陕西省略阳县白水江至横现河镇,河流穿行于结晶石灰岩地带,强烈侵蚀形成峡谷.从庙河坝村至徐家坪镇深切河曲带发育,轴长 14.7 km,弯曲率 1.96.从横现河至略阳县城,河谷宽广,河道平直.从略阳到广元罗家坪,河谷形态以深切峡谷为主,迂回曲折,发育了 4 个较大的 U 型河曲(略阳瓦窑沟,弯曲率 2.46;略阳小坪子,弯曲率 3.17;宁强中坝,弯曲率 4.22;广元马家湾,弯曲率 3.38)和 1 个 Ω 型河曲(广元蒲家乡,曲流颈长 0.2 km,弯曲率 12.0,封闭率 0.92).从罗家坪至昭化镇,河道两岸岩性以侏罗系蓬莱镇组(J_{3p})和遂宁组(J_{3s})的砂岩、泥岩为主,易侵蚀,在李家营形成了 3 个连环相套的河曲(弯曲率 2.42).

嘉陵江中游岩性松软,河道多沿构造迂回于宽广的向斜盆地中,河曲发育^[35].岩性成为中游河段河曲发育的控制性因素.从昭化至红岩出露地层主要为侏罗系蓬莱镇组(J_{3p});红岩镇至阆中沙溪场地层为白垩系苍溪组(K_{1c})、白龙组(K_{1b})和七曲寺组(K_{1q});沙溪场至蓬安县金溪镇地层复为侏罗系蓬莱镇组(J_{3p}),岩性以砂岩为主.昭化镇至苍溪浙水乡河曲带典型,河谷深切,两岸基本对称,河漫滩不发育,河道迂回曲折,为典型的正常深切河曲.北段发育了阆中城(图 3(a)中 1 所示,弯曲率 3.91,轴长 4.3 km)、南部县盘龙镇(图 3(a)中 2 所示,弯曲率 5.30,轴长 6.65 km)和南部董家乡(图 3(a)中 3 所示,弯曲率 5.71,轴长 3.1 km)3 个较大的河曲.从金溪至合川城主要出露地层以侏罗系遂宁组(J_{3s}),岩性以较软弱易风化的红色页岩、间夹泥质砂岩为主,极易侵蚀,侧蚀剧烈,河漫滩发育,凸岸堆积,凹岸侵蚀,河岸弯曲,河曲规模大,为典型的变形深切河曲,素有“九曲回肠”之称. Ω 型河曲非常典型,尤为壮观,堪称完美,如蓬安马回(图 3(b)中 5 所示)、高坪青居(图 3(b)中 6 所示)和武胜西关(图 3(b)中 7 所示)大河曲.

嘉陵江下游地质构造复杂,河曲不发育.合川城至盐井地层为侏罗系蓬莱镇组(J_{3p});盐井以下河流

切穿川东平行岭谷形成著名的“小三峡”,地层主要包括侏罗系下沙溪庙组(J_{2xs})、上沙溪庙组(J_{2s})、三叠系嘉陵江组(T_{1j})、须家河组(T_{3xj})等,河谷深切,河曲不发育.仅在北碚区白云山形成一个较大的 U 型河曲(弯曲率 2.01,河曲轴 2.3 km).

3.2 嘉陵江河曲带及其比较

通过对嘉陵江及国内外河曲带资料的收集与整理,并初步计算其弯曲率,筛选出比较典型的河曲带.其筛选原则:河曲带的波峰数大于 5;弯曲率大于 1.90;分布地具有代表性.共筛选出 11 条河曲带,其中国内 5 条(嘉陵江 2 条)、美国 2 条、德国、法国、刚果、巴西各 1 条(表 1,图 6).巴西 Itacoatiara 城以上的亚马孙河各支流的河曲带都非常发育,如 Madeira, Negro, Purus, Japura 和 Juruá 等河,弯曲率在 2.0 以上,且振幅较大,此处仅选出其中最典型的 Juruá 河.而我国著名的长江荆江河曲带(枝城至城陵矶),尤以下荆江(藕池口至城陵矶)最为弯曲,但弯曲率仅 1.83,故未能入选.另外,土耳其的大门德雷斯河弯曲率大约在 2.40 左右,但流量不大,故未列入.

从几何形态角度,受北西向断裂带控制的美国 Virginia 州 Shenandoah 河南北两支河曲带非常规则^[37],尤其是北支,河曲带中单个河曲的轴向相互平行,河曲带轴呈直线,波长短,振幅小,排列规则;而 Juruá 河 Itamarati 河曲带却显零乱不堪,毫不规则.从弯曲率来看,无论是自由河曲还是深切河曲,嘉陵江河曲带都是世界上最弯曲的河段之一.嘉陵江武胜河曲带的弯曲程度仅次于美国 Shenandoah 河北支(弯曲率 3.25)和科特迪瓦 White Bandama 河 Pkontara 河曲带(弯曲率 3.05),弯曲率接近 3.0;而嘉陵江苍溪河曲带弯曲率为 2.40,亦属于典型的弯曲型河段.

分形维数 D 值的排位与 c 总体上一致(表 2).Shenandoah 河北支河曲带的分形维数值最大,是表 2 中所列河曲带中最复杂的.至于嘉陵江,苍溪河曲带与 Koch 曲线的分形一样复杂.

3.3 嘉陵江 Ω 型河曲及其比较

选择国内外 Ω 型河曲的原则包括平面形态上必须呈典型的 Ω 型,河曲河道长度大于 8.0 km,并考虑其分布代表性.筛选结果共 22 处:国内河曲 10 处(嘉陵江 4 处)、巴西 3 处、德国 2 处、巴基斯坦、伊拉克、法国、乌克兰、立陶宛、秘鲁、埃及各 1 处(图 7,表 3).

从 Ω 型河曲的分布来看,亚马孙河上游及支流与

表 1 国内外典型河曲带的参数

名称	类型	Google Earth 起止点坐标	位置描述	<i>L</i> /km	<i>S</i> /km	<i>W</i> /km	λ /km	<i>c</i>
嘉陵江苍溪河曲带	深切	32°08'56"N, 105°40'42"E 31°50'48"N, 105°52'57"E	嘉陵江中游, 四川省剑阁县张王乡和苍溪县浙水乡之间	38.6	92.6	2.4~5.7	4.8	2.40
嘉陵江武胜河曲带	深切	30°44'27"N, 106°04'12"E 30°25'49"N, 106°12'43"E	嘉陵江中游, 四川省高坪区青居镇和武胜龙女乡之间	38.8	115.9	3.0~7.8	4.8	2.99
渠江广安河曲带	深切	30°27'12"N, 106°40'56"E 30°13'24"N, 106°34'01"E	嘉陵江支流渠江下游, 四川省广安区官盛镇至重庆合川市小沔镇之间	31.6	84.5	3.1~7.3	3.9	2.67
白河若尔盖河曲带	自由	33°19'52"N, 102°27'26"E 33°10'30"N, 102°35'03"E	黄河上游支流白河, 四川红原县瓦切乡至若尔盖县唐克乡之间	21.0	52.1	1.4~2.4	1.9	2.48
Shenandoah 河北支河曲带	深切	38°49'51"N, 78°32'53"W	美国 Virginia 州 Shenandoah 河, Front Royal 镇上游的南北支流	23.7	77.0	1.2~4.0	1.3	3.25
Shenandoah 河南支河曲带		38°40'28"N, 78°31'45"W 38°54'11"N, 78°15'08"W		34.6	68.6	1.0~3.2	2.3	1.98
Moselle 河 Zell 河曲带	深切	49°49'15"N, 6°42'42"E 50°10'05"N, 7°13'53"E	德国西南部 Rhine 河支流 Moselle 河, Schweich 至 Treis 两城之间	53.3	135.4	3.8~9.0	6.0	2.54
White Bandama 河 Pkontara 河曲带	深切	8°58'56"N, 5°24'57"W 8°26'45"N, 5°37'52"W	科特迪瓦 Katiola 省西部 White Bandama 河, Longo 城下游	64.2	196.5	3.4~12.9	5.3	3.05
贺江封开河曲带	深切	23°33'34"N, 111°40'35"E 23°27'58"N, 111°30'17"E	西江支流贺江上, 广东封开县白垢镇至县城入河口处	20.1	58.8	2.3~5.0	2.0	2.93
Seine 河 Rouen 河曲带	自由	48°51'25"N, 2°20'45"E 49°29'04"N, 0°30'04"E	Seine 河下游, 法国巴黎至入海口	152.7	333.8	9.2~15.7	15.2	2.19
Juruá 河 Itamarati 河曲带	自由	6°32'03"S, 69°03'59"W 6°28'45"S, 68°16'40"W	巴西西部亚马逊河的支流 Juruá 河, Espírito Santo 至 Itamarati 城间	108.4	319.5	4.3~10.2	5.4	2.95

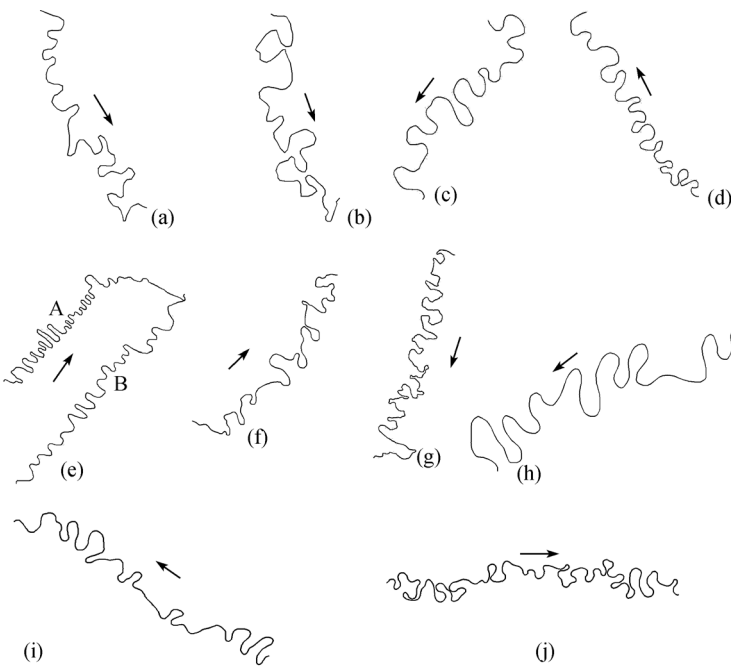


图 6 国内外典型河曲带的平面形态

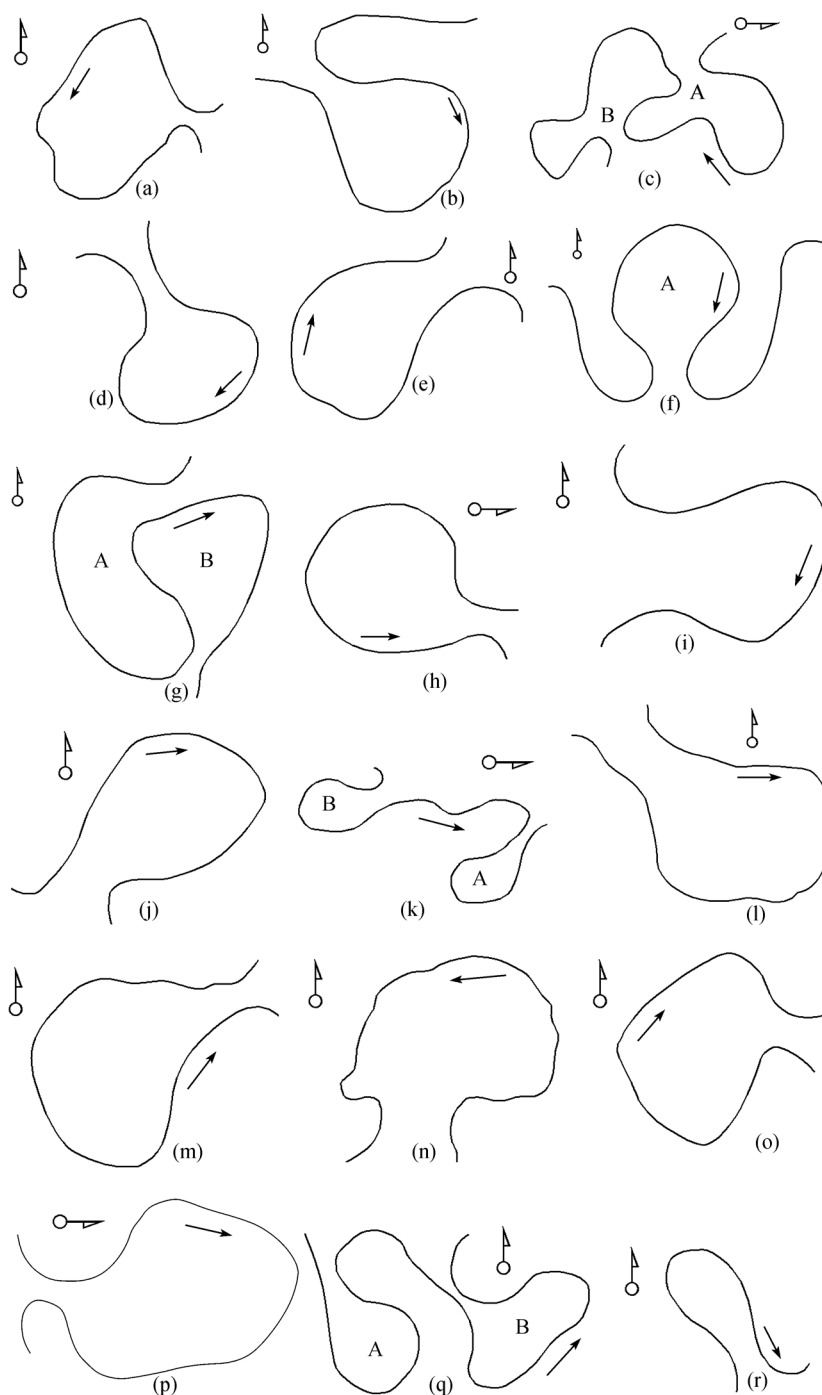
箭头指示流向. (a) 苍溪河曲带(中国嘉陵江; 1:730000); (b) 武胜河曲带(中国嘉陵江; 1:840000); (c) 广安河曲带(中国渠江; 1:630000); (d) 若尔盖河曲带(中国白河; 1:360000); (e) Shenandoah 河曲带(美国 Shenandoah 河; 1:700000); (f) Zell 河曲带(德国 Moselle 河; 1:860000); (g) Pkontara 河曲带(科特迪瓦 White Bandama 河; 1:130000); (h) 封开河曲带(中国贺江; 1:210000); (i) Rouen 河曲带(法国 Seine 河; 1:2100000); (j) Itamarati 河曲带(巴西 Juruá 河; 1:1200000)

表 2 世界上典型河曲带的分形维数

名称	类型	图像尺寸(像素)	理论值	D	相关系数
Line			1.000	0.960	0.915
Koch curve			1.262	1.261	0.915
嘉陵江苍溪河曲带	深切	324×635		1.244	0.925
嘉陵江武胜河曲带	深切	492×1212		1.131	0.947
渠江广安河曲带	深切	648×937		1.093	0.945
白河若尔盖河曲带	自由	408×600		1.259	0.927
Shenandoah 河北支河曲带	深切	572×557		1.332	0.923
Shenandoah 河南支河曲带	深切	748×859		1.162	0.936
Moselle 河 Zell 河曲带	深切	1124×1372		1.106	0.950
White Bandama 河 Pkontara 河曲带	深切	764×2032		1.127	0.952
贺江封开河曲带	深切	596×335		1.244	0.927
Seine 河 Rouen 河曲带	自由	4524×2673		1.007	0.961
Juruá 河 Itamarati 河曲带	自由	3512×1075		1.098	0.957

表 3 嘉陵江和国内外Ω型河曲的比较

名称	类型	Google Earth 坐标	位置	L/km	S/km	M/km	R/km	$B/(^{\circ})$	c	e
嘉陵江青居河曲	深切	30°40'44"N, 106°04'21"E	嘉陵江中游, 四川省南充市青居镇	0.4	17.1	4.6	1.7	281	42.75	0.98
嘉陵江马回河曲	深切	30°59'13"N, 106°21'00"E	嘉陵江中游, 四川省蓬安县马回乡	0.9	14.4	5.1	2.4	125	16.00	0.94
嘉陵江西关河曲	深切	30°29'08"N, 106°07'29"E	嘉陵江中游, 四川省武胜县西关乡	1.2	21.9	5.9	1.9	69	18.25	0.95
渠江锡溪河曲	深切	30°49'57"N, 107°00'37"E	嘉陵江支流渠江, 四川省渠县锡溪镇	0.5	9.4	2.9	1.1	154	18.80	0.95
黄河辖曼河曲	自由	33°43'39"N, 102°17'58"E	黄河上游, 四川省若尔盖县辖曼镇附近	0.9	10.7	3.9	1.4	234	11.89	0.92
黑龙江红旗岭河曲	深切	53°32'01"N, 123°30'55"E	黑龙江上游, 黑龙江省漠河县红旗岭下游	1.2	15.6	5.8	2.3	3	13.00	0.93
黑龙江江弯河曲	深切	51°17'49"N, 126°53'28"E	黑龙江上游, 黑龙江省呼玛县江湾农场上游	1.6	32.5	7.4	2.7	222	20.31	0.95
蓟运河宁河河曲	自由	39°24'47"N, 117°46'43"E	蓟运河, 天津市宁河县宁河镇下游	1.0	27.0	8.5	3.4	0	27.00	0.96
印度河 Larkana 河曲	自由	27°30'58"N, 68°20'59"E	印度河下游, 巴基斯坦 Larkana 城附近	0.4	8.7	3.0	1.2	205	21.75	0.96
底格里斯河	自由	32°52'55"N, 45°03'04"E	底格里斯河, 伊拉克巴格达南 90 km 的 Al Aziziyah 城附近	4.1	20.0	7.2	2.7	93	4.88	0.83
Aziziyah 河曲	自由	32°52'55"N, 45°03'04"E	底格里斯河, 伊拉克巴格达南 90 km 的 Al Aziziyah 城附近	1.6	15.3	7.2	2.0	45	9.56	0.91
Moselle 河 Zell 河曲	深切	50°00'29"N, 7°07'15"E	莱茵河的支流 Moselle 河, 德国西南部的 Zell 城上游	0.5	11.2	4.7	1.3	135	22.40	0.96
Marne 河 Saint 河曲	自由	48°47'52"N, 2°29'51"E	莱茵河的支流 Moselle 河, 德国西南部的 Zell 城上游	0.9	9.7	3.9	1.2	170	10.78	0.92
Dnister 河 Obertyn 河曲	深切	48°48'21"N, 25°16'21"E	Marne 河汇入莱茵河处, Saint Maur des Fosses 城位于河曲半岛上	1.2	13.7	5.4	1.5	125	11.42	0.92
Nemuna 河 Punia 河曲	深切	54°31'52"N, 24°03'03"E	Dnister 河, 乌克兰 Khmelnytsky 省东北部的 Obertyn 城附近	0.8	17.0	5.7	2.3	239	21.25	0.96
Huallaga 河 Yurimaguas 河曲	深切	5°48'26"S, 76°08'56"W	Nemunas 河, 立陶宛南部的 Alytus 和 Birštonas 两城之间	2.2	20.0	5.8	2.6	23	9.09	0.90
Juruá 河 Arujá 河曲	自由	5°02'01"S, 66°52'42"W	Rio Marañón 河的支流 Huallaga 河, 秘鲁 Yurimaguas 城下游	1.6	28.2	9.0	4.0	265	17.63	0.95
Juruá 河 Petrópolis 河曲	自由	6°33'26"S, 68°54'18"W	亚马孙河支流 Juruá 河, 巴西西部 Carapanã 和 Arujá 两城之间	0.5	18.7	7.3	2.0	5	37.40	0.97
尼罗河 Biltan 河曲	自由	30°24'50"N, 31°06'14"E	亚马孙河支流 Juruá 河, 巴西西部 Petrópolis 和 Espírito Santo 两城之间	0.6	11.5	4.8	1.5	146	19.17	0.95
			罗尼河下游东支 Damietta 河, 埃及 Benha 城上游	0.3	14.3	3.7	1.0	122	47.67	0.98
				0.8	7.5	3.2	0.7	327	9.38	0.90

图7 国内外典型 Ω 型河曲的平面形态

符号 $\circ$ 为指北针; 河曲名称与表3对应。(a) 青居河曲(中国嘉陵江; 1:130000); (b) 马回河曲(中国嘉陵江; 1:180000); (c) 西关河曲(中国嘉陵江; 1:250000); (d) 锡溪河曲(中国渠江; 1:130000); (e) 辖曼河曲(中国黄河; 1:100000); (f) 红旗岭河曲(中国黑龙江; 1:200000); (g) 江湾河曲(中国黑龙江; 1:330000); (h) 宁河河曲(中国蓟运河; 1:57000); (i) Larkana 河曲(巴基斯坦印度河; 1:240000); (j) Aziziyah 河曲(伊位克底格里斯河; 1:140000); (k) Zell 河曲(德国 Moselle 河; 1:250000); (l) Saint 河曲(法国 Marne 河; 1:120000); (m) Obertyn 河曲(乌克兰 Dniester 河; 1:160000); (n) Punia 河曲(立陶宛 Nemunas 河; 1:170000); (o) Yurimaguas 河曲(秘鲁 Huallaga 河; 1:230000); (p) Arujá 河曲(巴西 Juruá 河; 1:130000); (q) Petrópolis 河曲(巴西 Juruá 河; 1:200000); (r) Biltan 河曲(埃及尼罗河; 1:110000)

嘉陵江该形态河曲均较发育。在平面几何形态上,嘉陵江马回河曲、黑龙江红旗岭河曲、渠江锡溪河曲最为规则,以河曲轴为对称轴,对称性非常显著;嘉陵江青居河曲与秘鲁 Huallaga 河 Yurimaguas 河曲形态极为相似;嘉陵江西关河曲呈大曲中套小曲、曲曲连环相套的格局,极为罕见和复杂。从弯曲程度与封闭率来看, Juruá 河 Petrópolis-B 河曲、嘉陵江青居河曲和 Juruá 河 Arujá 河曲分列前三位,嘉陵江西关-B 河曲居第五位;而在深切河曲中,嘉陵江青居河曲则位居第一。从河曲的规模来看,以河道长计,除了 Huallaga 河 Yurimaguas 河曲占据第二位外,第一、三位属于黑龙江,而第四、五位则位于嘉陵江。总体上,从全世界来看,深切河曲的规模比自由河曲大,从表3中居前六位河道最长的均属深切河曲可以验证这一点。

4 原因分析

4.1 嘉陵江河曲的形成与演化

印支运动以来四川盆地周边地壳抬升,从而在四川盆地所在的区域形成一个巨大的古湖泊。经过漫长的地质历史时期形成了巨厚的红色岩层;古近纪时期四川盆地形成。白垩纪时,古湖已被蚀通外流,湖水排干,湖底出现河床,即今天大河河道的前身;流行在古代湖底的河流,由于地势平坦,河川易于侵蚀河岸形成河曲。今天的蛇形河曲即为古代河曲地形的遗迹。因为古湖底的弯曲河道随着地壳的上升,河流下切,河谷渐渐被侵蚀嵌入,成为峡谷;河曲地貌就被固定下来。以后地壳不断上升,蛇形河曲地形不断下切入红层丘陵之中,再难变形。这种由古代地面遗传下来的河流,叫做“先成河”。川江及其支流下切后,两岸形成了第四纪早更新世阶地。因为当时四川江河侵蚀基准面稳定时间较久,到中更新世时,河谷甚为宽广,河曲十分发育,现今面貌的嘉陵江深切河曲在那时已经形成^[36,37]。

4.2 河曲发育的因素

关于河曲尤其是自由河曲的成因,地貌学家已进行了有益的探索并提出了许多假说,有些理论则为实验室模拟和证实。大部分理论都是基于最小能量消耗原理,只是对原理解释略有差别而已^[14],如Yang等人^[38]应用最小能耗率原理从动力学的角度解释河曲的成因。但这些假说往往存在诸多局限性,甚至自相矛盾,因而研究河曲必须从实际出发,不能

单凭理论上的推导^[39]。在河曲发育的因素中,洪峰变差系数(C_v),河道上游来的含沙量(ρ_o)/河道实际水沙挟沙能力(ρ_p)与河曲形成有关:当 $\rho_o/\rho_p \geq 1$, $C_v < 0.4$ 才发生弯曲河道;随着 $\rho_o/\rho_p > 1$ 的程度增加弯曲河道将发展成为蛇曲河道^[40]。洪笑天^[41]通过试验研究指出河曲形成的内在外在条件,包括原始河谷形态、流量变幅和频率变化、河床中泥沙运动特性及侵蚀基准面的变化等。金德生^[42]建立了过程响应模型,并认为河床的边界条件,特别是河漫滩的物质结构和组成对河曲的发育有极大的影响。这些基于自由河曲的研究对于深切河曲成因的解释具有比较意义。Harden^[43]对科罗拉多高原中部深切河曲分布与发展的控制性因素研究,对嘉陵江河曲成因研究具有重要参考价值。嘉陵江深切河曲之所以十分发育,其主要因素包括河流比降、地质构造、岩层、岩性、特殊地形的顶托效应。

() 河流比降。比降是决定下切河道是顺直还是弯曲的最重要变量。深切河曲的规模也在一定程度受到河流比降的影响。与北美科罗拉多中部高原一样,比降对嘉陵江深切河曲的分布具有非常重要的影响。比降愈小,河曲愈易发育,而河曲的发育又削减河流比降,两者互为因果。一般地,嘉陵江陡峭河段较顺直,而低缓河段的弯曲率较大。因为比降大的河床往往是耐蚀的基岩,而比降小的河段有更多的机会侧向侵蚀而使弯曲率增大^[43]。嘉陵江中游河床比降,昭化至南充市李渡镇从 0.70‰ 逐渐降至 0.26‰,而李渡至武胜为 0.59‰;前一河段渐渐增宽趋弯,后者的弯曲率比前者略小。但在嘉陵江上游,河流比降为 4.62‰,河道相对顺直。

() 岩层。中游河段位于川北缓倾角穹窿区,侏罗系地层受到挤压而褶皱变形,形成平均倾角约 1° 的宽缓背斜和向斜构造,使形成深切河曲边界的地层能在大范围内连续分布,有利于深切河曲的形成与发展。而同属四川盆地的涪江和沱江由于位于川南穹窿区,侏罗系地层平均倾角 6.5°,其深切河曲就不如嘉陵江发育。本区的新构造运动缓慢抬升,使深切河曲在形成过程中,既能逐渐侧蚀,又能不断下切,从而使嘉陵江深切河曲最为典型。而嘉陵江下游的沙溪庙至重庆段,位于川东断褶带,河床与河谷的边界主要由三叠系灰岩与下侏罗系砂岩组成,河曲不发育^[44]。然而,下荆江由于处于下沉掀斜的新构造运动方向与下荆江流向成垂直相交,使得河流在

江汉平原中南移构成宽广的自由河曲带^[39]。嘉陵江普遍分布四级阶地,其中早更新世阶地相对高度只有80~100 m,表明更新世新构造运动缓慢抬升,有利于深切河曲的发育^[43]。

() 构造运动和岩性。深切河曲的形态特征,一般视地壳上升速度和岩性的强度而定。在河流下蚀过程中如果地壳迅速上升,则河流强烈下蚀,旁蚀占很次要的地位,河道移动很少,河曲仍然保持其原来的形式,河谷两侧谷坡比较对称,形成正常深切河曲。如果上升较缓慢,则河流下蚀慢,旁蚀作用明显,凹岸侵蚀,凸岸堆积,河道移动较大,于是形成变形深切河曲。岩性抵抗力的强弱,对深切河曲的形状亦有重要影响。在河床岩性坚硬区域,河流下蚀较慢,旁蚀作用较强,河道移动比较显著,常形成变形深切河曲;反之则形成正常深切河曲^[14]。盆地嘉陵江中游深切河曲的河谷与河床边界由抗侵蚀较弱的侏罗系泥岩、页岩与粉砂岩组成,使河床易侧向侵蚀,加之新构造运动上升缓慢从而形成典型的变形深切河曲;嘉陵江上游褶皱带隆升速度快而形成正常深切河曲。相比较而言,江汉平原由于长期沉降,下荆江河曲带为滨河床相沙与河漫滩相的黏土互层的沉积层,这种二元结构松散沉积层极易受流水的侵蚀,因而自由河曲发育^[39]。

() 顶托效应。嘉陵江河曲正好发育在地势低平、坡度平缓的盆地中心。合川以下的川东平行岭谷和长江使得嘉陵江河水下泄不畅,抬高了水位,形成顶托,由此形成马回至西关河段具备了较小的水流速度和水力梯度,发育了以青居河曲为典型代表的嘉陵江河曲^[45]。这可与下荆江的自由河曲作对比,正如洞庭湖的顶托效应一样。

嘉陵江深切河曲之所以能够长期保存,且难以发生裁弯取直,一方面是因为它嵌入基岩后,较硬的砂岩保护了河道,使水系变迁及河流改道不能顺利进行,同时构成曲流颈部的砂页岩,又阻止地下水的潜蚀和暗流的沟通,尤其是曲流颈部之间的凸起地面,是由近水平产状的砂页岩组成,不像单斜构造有顺逆倾坡及差异侵蚀之分,这在一定程度上延缓了河曲的减数过程^[46]。

5 结论与讨论

() 从早期Powell侵蚀基准面概念, Davis侵蚀循环理论, 后来Horton河系结构定律以及Fargue六条

定律, 都是把河流形态学的统计特征与河流动力学某层次的均衡状态相联系, 以解释特定均衡下河流形态学所表达的动力学过程^[47~50]。现代河流形态学和动力学的研究需要针对更普遍条件下的非均衡状态和动态过程, 可以基于河流地貌系统能量耗散的耗散结构原理。河流动力过程的能量耗散有3种观点: 以Yang等人^[38]为代表的极小能耗率原理, 以黄万里^[53]为代表的最大能耗率原理, 以Gu等人^[52]为代表的能耗极大-极小值原理。河流系统(包括河曲)具有自组织性的耗散结构, 当系统处于远离非均衡的不稳定状态时, 任何使系统偏离目前状态的波动(涨落)可能会使系统的有序性降低, 也可能形成新的更有序的状态。河流系统的演化就是其耗散结构的演化。对于流体系统, 力和流之间的关系是非线性的, 流体系统的状态方程一般都有多解, 其中一些是稳定的, 其他则是不稳定的, 从而使流体的演化过程既不完全满足能耗率, 既非总是极大也非极小, 而是在某种情况下服从极大-极小能耗原理, 存在客观过程可以用能耗极小→极大→极小描述河流的能量耗散^[52]。这一耗散过程与河曲的演化是一致的。当河流近直线型时, 也就是封闭率接近0.5时, 河流能耗极小; 当河曲发育, 封闭率变大, 水流要克服更多的阻力做功而转变为热能, 搬运能力下降, 能耗趋向最大化; 而当封闭率无限趋近1.0时(临界点), 河曲截弯取直, 能耗从极大值突变为极小值, 河流进入新一轮的耗散结构演化周期。嘉陵江深切河曲, 曲流颈不易被切穿, 使能耗从极大值突变为极小值的周期极长; 而对于泛滥平原的自由河曲而言, 曲流颈常被切穿, 河曲的耗散结构演化周期可以年计, 如下荆江沙滩子河弯1970年汛后颈部最窄处仅1.5 km宽, 狭颈于1972年7月19日被水冲开, 发生自然裁弯(<http://www.mwr.gov.cn>)。对封闭率考虑时间因素(t)即从河曲演化的角度, 深切河曲和自由河曲之间存在如下对比关系:

$$\frac{de_i}{dt} \ll \frac{de_f}{dt}, \quad (4)$$

其中, e_i 为深切河曲的封闭率, 而 e_f 为自由河曲的封闭率。上式反映了深切河曲与自由河曲在演化、能量耗散的速度和周期方面存在很大差异。运用能量耗散结构对河曲的动力学与形态学进行研究, 还有待将来更进一步的深入, 河流形态学的研究可为将来动力学以及耗散结构的研究开辟道路。把能耗率极值假说引入河型研究是一种很有前途的方法^[17]。

() 传统地貌学在形态描述上已经取得了很大成就,是地貌学研究的特色之一;但在遥感技术运用以前,要对区域或全球范围内宏观尺度的地貌现象进行比较研究是极其困难的.现代科学技术的发展和遥感数据的易得性使从宏观上对地貌形态作区域性或世界性的比较成为可能,从而有可能探究其形成原因的差异.以 Google Earth 为代表的遥感数据源为地貌学的宏观或中观形态研究提供了契机.通过 Google Earth 客户端软件提取的研究对象的相关参数,尽管存在一定的误差,但对于宏观地貌形态研究的影响可以忽略,可为区域地貌过程的演化提供定量化的依据.

() 不同的河曲形态特征反映了形成的动力学差异.嘉陵江深切河曲与泛滥平原上的自由河曲具有某种可比性,在形态上具有自由河曲的特点,如西关河曲(图 5(c))呈现出泛滥平原上自由河曲任意摆动的特点.这显示嘉陵江深切河曲在形成前就已呈现出如今亚马逊河平原上的自由河曲,在河流的演化过程中较好地保存了古老的自由河曲的原有形态,从形态学上为嘉陵江河曲为“先成河”提供了证明,反映了河流的下切或地壳的抬升.嘉陵江非常规则、对称的 Ω 型河曲(如马回河曲)使在理论上诸多假设条件下的研究结论在大自然中得到验证.

() 嘉陵江因深切河曲被切穿而形成的离堆山,其高度几乎可与阶地作对比,两者共同反映了嘉陵江所在区域的演化过程.河流地貌学术语“离堆山”,为李承三等人^[20]在翻译英文 meander core 时,借用颜真卿对嘉陵江沿岸之孤山地形的称谓;从另一角度反映出中国古代在河流地貌认识上的深度.

() 从景观的角度,深切河曲的河岸可能存在一高点以窥河曲之全貌,而自由河曲则因地势低平而缺乏制高点,从而使深切河曲的可观赏性高于自由河曲.因而在旅游开发方面嘉陵江深切河曲具有更高的美学价值.嘉陵江的梯级开发受惠于诸 Ω 型河曲,它改变了其天然河道的本性,对河曲地貌过程的影响是将来值得深入探讨的课题.作为地质遗迹地,嘉陵江河曲景观正面临着破坏的威胁,因而其保护亟需得到重视.

致谢 衷心感谢特邀编辑和两位审稿人对论文提出的建设性修改意见.

参 考 文 献

- 1 Dury G H. Discharge prediction, present and former, from channel dimensions. *J Hydrol*, 1976, 30: 219—245

- 2 “Meander.” *Encyclopedia Britannica Ultimate Reference Suite*. Chicago: Encyclopedia Britannica, 2007
- 3 Pickett J P. *The American Heritage Dictionary of the English Language*. 4th ed. Boston: Houghton Mifflin Company, 2000
- 4 Matthes G H. Basic aspects of stream meanders. *Trans Am Geophys Union*, 1941, 22: 632—636
- 5 Schumm S A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geol Soc Am Bull*, 1963, 74(9): 1089—1100
- 6 Brice J C. Evolution of meander loops. *Bull Geol Soc Am*, 1974, 85: 581—586
- 7 Chitale S V. River channel patterns. *Proc Amer Soc Civ Engrs, J Hydrol Div*, 1970, 96(HY1): 201—222
- 8 Frothingham K M, Rhoads B L. Three-dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarras River, Illinois. *Earth Surf Proc Land*, 2003, 28(6): 625—644[DOI]
- 9 Hasfurther V R. The use of meander parameters in restoring hydrologic balance to reclaimed stream beds. In: Gore J A, ed. *The Restoration of Rivers and Streams: Theories and Experience*. Boston: Butterworth Publishers, 1985. 21—40
- 10 Leopold L B, Wolman M G. River channel patterns-braided, meandering and straight. *US Geol Surv Prof Pap* 282-B, 1957
- 11 Dury G H. Principles of underfit streams. *US Geol Surv Prof Pap* 452-A, 1964
- 12 Dury G H. Subsurface exploration and chronology of underfit streams. *US Geol Surv Prof Pap* 452-B, 1964
- 13 Dury G H. Theoretical Implications of Underfit Streams. *US Geol Surv Prof Pap* 452-C, 1965
- 14 沈玉昌, 龚国元. *河流地貌学概论*. 北京: 科学出版社, 1986. 153—182
- 15 陈宝冲. 河型分类. *泥沙研究*, 1992, (1): 100—104
- 16 林承坤. 河型的成因与分类. *泥沙研究*, 1985, (2): 1—11
- 17 倪晋仁, 马蔼乃. *河流动力地貌学*. 北京: 北京大学出版社, 1998. 8
- 18 蒲孝荣. *中华人民共和国地名词典(四川省)*. 北京: 商务印书馆, 1993. 952—953
- 19 李铁松, 张桥英. 嘉陵江的起源及流域自然环境研究. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 1999, 20(2): 105—108
- 20 李承三, 周廷儒. 离堆与离堆山考. *地理*, 1943, 3(1): 239—242
- 21 左大康. *现代地理学辞典*. 北京: 商务印书馆, 1990. 195
- 22 曾昭璇. *中国的地形*. 广州: 广东科学技术出版社, 1985. 251—252
- 23 Louis H, Fischer K. *Allgemeine Geomorphologie*. 4 Aufl ed Walter de Gruyter, 1979. 45—60
- 24 Lane E W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Am Soc Civ Engin Pro*, 1955, 81(745): 1—17
- 25 Leopold L B, Maddock T J. Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *US Geol Surv Prof Paper* 252, 1953
- 26 Santos-Cayudo J, Simons D B. River response. In: Shen H W, ed. *Environmental Impact of Rivers*. Fort Collins, CO: Water Resources Publish, 1973
- 27 Schumm S A. Fluvial geomorphology: The historical perspective. In: Shen H W, ed. *River Mechanics*. Fort Collins, CO: Water Resources Publish, 1971

- 28 Rechard R P, Hasfurther V R. The Use of Meander Parameters in the Restoration of Mined Stream Beds in the Eastern Powder River Basin. Laramie, WY: Rocky Mtn Inst Energy and Environ, University of Wyoming, 1980
- 29 Gautier E, Brunstein D, Vauchel P, et al. Temporal relations between meander deformation, water discharge and sediment fluxes in the floodplain of the Rio Beni (Bolivian Amazonia). *Earth Surf Proc Land*, 2007, 32 (2): 230—248[DOI]
- 30 Nikora V. Fractal structures of river plan forms. *Water Resour Res*, 1991, 27(6): 1327—1333[DOI]
- 31 Schuller D J, Rao A R, Jeong G D. Fractal characteristics of dense stream networks. *J Hydrol*, 2001, 243(1): 1—16[DOI]
- 32 Snow R S. Fractal sinuosity of stream channels. *Pure Appl Geophys*, 1989, 131(1/2): 99—109[DOI]
- 33 易瑜, 易哲文. 嘉陵江源流在何处. *人民长江*, 2001, 32(4): 32—33
- 34 刘胤汉. 秦岭水文地理. 西安: 陕西人民出版社, 1983. 28—30
- 35 高泳源. 深切河曲及河曲与人生. *地理*, 1943, 3(3): 43—50
- 36 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社, 1996. 1—200
- 37 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 38 Yang C T, Song C C S. The Theory of Minimum Rate of Energy Dissipation. *J Hydraul Eng-Asce*, 1979, 105(HY7): 769—784
- 39 林承坤, 陈钦奎. 下荆江自由河曲形成与演变探讨. *地理学报*, 1959, 25(2): 156—169
- 40 方宗岱. 河型分析及其在河道整治上的应用. *水利学报*, 1964, (1): 1—12
- 41 洪笑天. 弯曲河流形成条件的实验研究. *地理科学*, 1987, 7(1): 35—43
- 42 金德生. 边界条件对曲流发育影响的过程响应模型实验研究. *地理研究*, 1986, 5(3): 12—21
- 43 Harden D R. Controlling factors in the distribution and development of incised meanders in the Central Colorado Plateau. *Geol Soc Am Bull*, 1990, 102: 233—242[DOI]
- 44 林承坤. 泥沙与河流地貌学. 南京: 南京大学出版社, 1992. 175—176
- 45 施雅风. 缅怀李承三教授: 重读《嘉陵江流域地理考察报告上卷·地形》. *成都理工学院学报*, 1998, 25(6): 119—223
- 46 穆桂春. 沱江中游的河曲与阶地. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1983, (4): 52—58
- 47 Powell J W. Exploration of the Colorado River of the West and Its Tributaries. Washington, DC: Government Printing Office, 1875
- 48 Davis W M. The geographical cycle. *Geogr J*, 1899, 14(A): 481—504
- 49 Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Am Bull*, 1945, 56(3): 275—370
- 50 Fargue L. La forme du Lit des Rivières a Fond Mobile (in French). Gauthier-Villars, Paris, 1908
- 51 黄万里. 水动力-热动力学的极值定律. *应用数学和力学*, 1981, 4(4): 499—510
- 52 Gu H, Chen S, Qian X, et al. River-geomorphologic processes and dissipative structure. In: Gardiner V, ed. *International Geomorphology 1986*. UK: John Wiley, 1986. 211—224