

# 嘉陵江古河曲发育的古地理环境重建

江华军<sup>1</sup> 李长安<sup>1,2</sup> 张玉芬<sup>3</sup> 王节涛<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 嘉陵江古河道的遥感影像轮廓反映了自由河曲的河流形态信息, 分析嘉陵江古河曲的发育条件对其区域古地理环境的重建和恢复具有重要的地貌学研究意义。本文在综合前人关于自由河曲的理论与实际案例研究成果的基础上, 总结了自由河曲的发育条件。据此, 结合野外调查资料, 认为嘉陵江古河曲形成时, 该区应为平坦开阔的冲积平原, 河流纵比降较现在更小; 河流两岸为具有“二元结构”的松散沉积物。与长江下荆江河段的地理环境类似。且“三水汇流”(嘉陵江与渠江、涪江)格局已经存在。嘉陵江由自由河曲转为深切河曲是由于区域地质环境(或地质事件)的改变所引起的。

**关键词:** 嘉陵江; 古河曲; 自由河曲; 发育条件; 古地理重建

**中图分类号:** P512.31      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2013)02-0460-08

嘉陵江深切河曲发育于嘉陵江中下游, 尤以阆中—南充段最为典型, 是中国典型的深切河曲。其河曲分布段的弯曲程度及长度在国内外的河曲河流形态中较为少见, 整个弯曲河段所恢复的古河曲的曲折率达 2.75, 与长江中下游平原下荆江自由河曲(曲折率达 2.80)相当, 而弯曲长度近达 750 km, 是下荆江自由河曲长度的 3 倍。现今的嘉陵江河曲深切嵌入基岩之中, 是早期自由河曲快速下切作用的结果, 即在早期的自由河曲形成后, 可能是由于河流侵蚀基准面快速下降, 河曲保持其原来的弯曲型式逐步下切至基岩之中所形成的。因此, 通过对嘉陵江早期自由河曲发育条件的分析, 对于恢复古地理和地质环境的演化具有重要的意义。关于嘉陵江古河曲的发育条件, 李承三<sup>[1]</sup>认为河流坡度、流量、岩性、干支流的关系及河流携带物质是其发育的重要条件, 但李先生并没有具体给出这些条件。关于自由河曲的发育条件, 中外学者进行了大量的探索并取得了丰硕的成果, 很多理论被数学模型和室内造床实验所

证实。Tiffany, Nelson<sup>[2]</sup>和 Friedkin<sup>[3]</sup>利用室内模拟实验对曲流河的形成模式开始了系统的研究; 随后许多学者从不同角度, 运用不同手段相继对自由河曲的发育条件进行分析与探索<sup>[4-22]</sup>。笔者在综合前人研究成果的基础上, 以全球典型的反映嘉陵江古河曲形成时的地理环境的长江下荆江自由河曲作为类比案例和美国科罗拉多高原深切河曲形成前的自由河曲为类比案例, 并基于嘉陵江野外调查资料, 通过对嘉陵江古河曲发育条件的分析, 探讨和重建嘉陵江中游自由河曲发育时的古地理环境。

## 1 嘉陵江中游古河道特征

嘉陵江发源于秦岭南麓, 向南依次流经川中丘陵区 and 盆东平行岭谷区, 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)。基于遥感影像和野外调查显示, 嘉陵江中游段古河道蜿蜒曲折, 尤以阆中—南充段最为典型, 经初步研究定义其为自由河曲(图 2)。在此基础上, 笔者在前文

收稿日期: 2012-05-07; 改回日期: 2012-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971008 和 40771213)和中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(Grant SKLLQG0908)资助。

作者简介: 江华军, 男, 1987 年生, 硕士生, 主要从事河流地貌学与第四纪地质学研究; E-mail: junhjiang1987@163.com。

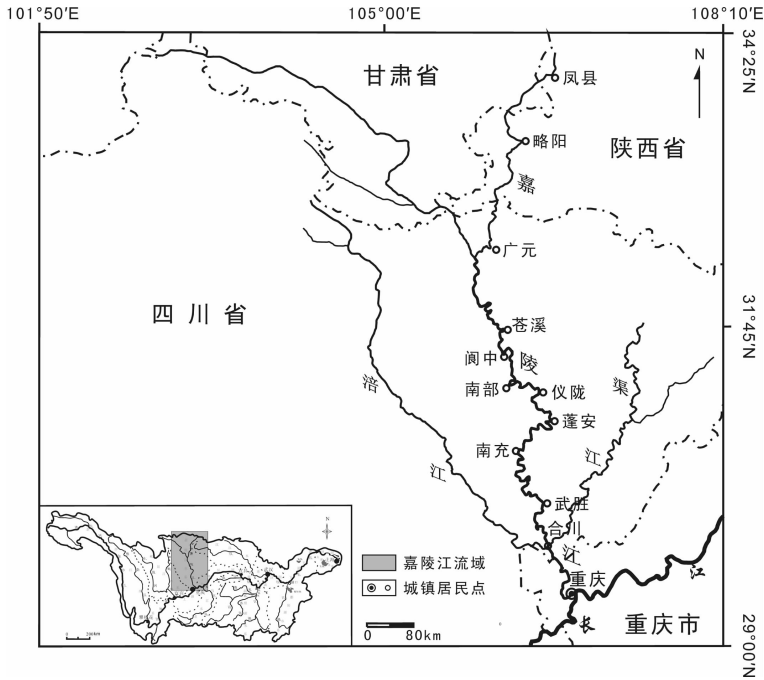


图 1 嘉陵江流域区位图  
Fig.1 Location of Jialing River basin

中<sup>[23]</sup>分别对解译出的 13 处典型古河道的单个河曲及 4 段河曲带做了河曲参数统计,并进一步对比了整个中游河段的古今河曲参数。河曲参数特征表明:无论是单个河曲参数值还是河曲带参数值,都体现出自由河曲的特征,其整个中游河段的古河道曲折率达到 2.75,远远高于自由河曲定义临界值的 1.50,与下荆江自由河曲相当,是国内外最为典型的自由河曲之一。此外,古今河道的曲折率对比显示,古河曲要比现代深切河曲弯曲。

## 2 自由河曲发育条件的理论分析

自由河曲是河流发展到晚期阶段的产物,大都发育在河流中下游的冲积平原,地势平缓,河流纵比降较小,河岸边界为二元结构的松散层。在环流的侧蚀作用下,凹岸不断遭受侵蚀,凸岸不断接受沉积,当凹岸的侵蚀与凸岸的沉积二者达到平衡以后,河曲便不断发育与迁移,直至形成自由河曲。基于河流发展规律,自由河曲的发育一般要求具备以下几个方面的基本条件:(1)河岸的边界条件;(2)河流的纵比降;(3)横向环流侧蚀作用的水动力条件。

### 2.1 河岸的边界条件

关于边界条件对自由河曲发育的影响,国内外学者大多采用室内实验的方法去模拟,并先后都较

成功的塑造出了自由河曲的河流形态。一致认为河流二元结构(上部为河漫滩粘土质层,下部为边滩砂质层)的边界条件是自由河曲发育的一个重要条件。唐日长<sup>[7]</sup>通过在边滩种草的方法,尹学良<sup>[8]</sup>在第 V 组实验的中砂质上部的高漫滩加淤泥质粘土的方法,都成功地塑造出了自由河曲;Schumm 和 Jin<sup>[11-12,14]</sup>采用底层为砂质、顶层为高岭土和细砂质组成的冲积平原的实验,成为自由河曲发育的一个重要模式,并在研究美国中部平原河流的下游时,得到了曲折率  $r$  与粘土含量  $M$  的关系式: $r=0.94M^{0.25}$ ,这可能是在高蜿蜒度自由河曲试验中模拟最为成功的;金德生<sup>[13]</sup>采用紧密粘土河岸、细砂质河床的边界条件,模拟出了对称发育、曲折率向下游逐渐减小的河曲,并在第 3、4 组实验中,采用二元结构相河漫滩、中砂河床模式,成功地塑造出了自由河曲形态;Smith C E<sup>[17]</sup>运用在河岸加钙质高岭土及硅藻土的方法,在自由河曲的模拟上也是较成功的。

河岸边界对自由河曲的发育主要体现在两个方面:一是下层应为松散的砂质沉积,以使环流的侧向侵蚀成为可能,从而容易造成凹岸冲刷、凸岸堆积的河流变形;二是上层为具有一定抗蚀性的紧密淤泥、粘土质物质,从而使河岸的可动性被约束,稳定性得到提高,以致原有的河曲得以维持。

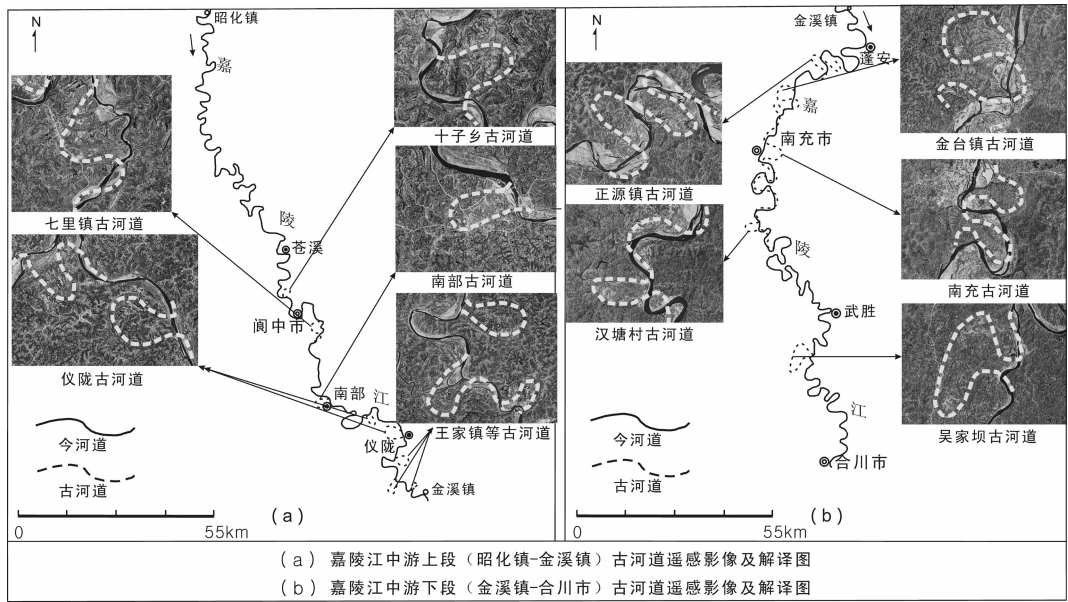


图 2 嘉陵江中游古河道遥感影像及解译图(黄色虚线为古蜿蜒河道遗迹)

Fig.2 Remote sensing image and interpretation graph of the old channel in the middle reaches of the Jialing River (yellow dashed lines indicating remains of old meanders)

(a) Remote sensing image and interpretation graph of the upper segment in the middle reaches of the Jialing River (from Zhaohua Town to Jinxi Town), (b) Remote sensing image and interpretation graph of the lower segment in the middle reaches of the Jialing River (from Jinxi Town to Hechuan City)

### 2.2 河流的纵比降

在解释河型发育、发展与转化的地貌临界条件的应用中, Schumm(1972)<sup>[11]</sup>认为在给定的流量输沙平衡时,无论在何种边界条件下,都存在两个临界比降  $J_1$ 、 $J_2$ ,且当河谷比降  $J$  小于  $J_1$  时,将维持单一顺直河道,当  $J > J_2$  时,河型由弯曲转化成游荡分汉性河流,处于  $J_1$ 、 $J_2$  之间,则形成自由河曲(图 3)。Yang C.T.<sup>[10]</sup>运用熵概念并联解水流连续方程、曼宁公式和最小能耗率表达式,得出如下关系式:  $(VJ)_{\min} = (n^{-0.6} B^{-0.4} Q^{0.4} J^{1.3})_{\min}$ ,  $V$  为流速,  $J$  为比降,  $n$  为粗糙率,  $B$  为河宽,  $Q$  为流量。从式中可以看出,要使  $VJ$  达到最小,则可采取增大  $n$  值或  $B$  值或减小  $J$  值 3 种方式。而若在  $n$ 、 $B$  不变的情况下,则只有通过减小比降  $J$  增加单位距离河道长度的方式,来提高河流的曲折率,使河流向自由河曲形态发展。

综上所述,无论是 Schumm<sup>[11]</sup>所提出的临界比降概念,还是 Yang C. T.<sup>[10]</sup>的最小能耗率理论,都表达了河流纵比降与自由河曲发育之间的密切关系。Schumm<sup>[11]</sup>分析曲折率  $C$  与河谷比降  $J$  的相关性表明,当河谷比降  $J$  大致在区间(0.2, 1.0)时,是满足自由河曲发育的最佳区间范围。可见,自由河曲的发育

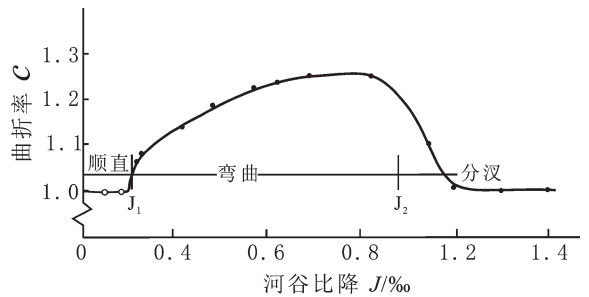


图 3 曲折率与河谷比降的关系图(据 Schumm 与 Khan, 1972)<sup>[11]</sup>

Fig.3 The relationship between the meander ratio and the valley slope (after Schumm and Khan, 1972)<sup>[11]</sup>

是与较小的河流纵比降呈正相关的。

### 2.3 横向环流的侧蚀作用

自由河曲是在河流发展过程中因主流线弯曲与水流总的向前运动及横向环流三者共同作用下形成的。横向环流的水动力条件主要体现水力线方向的改变,河流在发展过程中会促使主流线方向的不断自我调整和改变。弯曲河道的水流在惯性离心力的作用下,主流线会偏向河流的凹岸,从而产生横向比降,造成凹岸水位抬升,凸岸水位下降,这样便形成

了一个呈螺旋状向下游方向移动的单向环流。在表层单向环流的作用下,凹岸不断遭受冲刷、侵蚀;凸岸在底层单向环流作用下不断淤积,使得河道愈来愈弯曲。

Meakin P<sup>[16]</sup>根据 Ikeda<sup>[24]</sup>等,利用数学模型及实验的方法建立了自由河曲的水流运动方程式:

$$\zeta = E\tilde{u}_{sb} \quad (1)$$

式中, $\zeta$  表示河道侧向侵蚀速率, $E$  为河岸的侵蚀系数, $\tilde{u}_{sb}$  为近岸水流流速相对于平均水流流速的增量,Ikeda 等提出决定  $\zeta$  的该流速增量  $\tilde{u}_{sb}$  可以由下面等式计算:

$$u_{s0} \frac{\partial \tilde{u}_{sb}}{\partial s} + 2 \frac{u_{s0}}{h_0} C_f \tilde{u}_{sb} = b \left[ -u_{s0}^2 \frac{\partial \kappa}{\partial S} + C_f \kappa \left( \frac{u_{s0}^4}{gh_0^2} + A' \frac{u_{s0}^2}{h_0} \right) \right] \quad (2)$$

这里, $h_0$  是河道的平均深度, $b$  为河宽的一半宽度, $K$  为河流中心线的局部曲率, $g$  为重力加速度, $A'$  为冲刷系数, $C_f$  为摩擦系数(图 3)。基于以上两个公式及图 2 可知,在河岸沉积物侵蚀系数  $E$  一定的情况下,水流条件对河道的侧向侵蚀速率起着重要作用。凹岸相对于水流平均流速  $u_{s0}$  表现一个正的流速增量  $\tilde{u}_{sb}$ ,即凹岸水流速度为  $u_{s0} + \tilde{u}_{sb}$ ;相反,凸岸相对于水流平均流速表现一个负的流速增量,即  $u_{s0} - \tilde{u}_{sb}$ 。这样,凹岸由于流速大,表现为侵蚀作用,凸岸相对平均流速来说流速要慢,表现为沉积作用。因此,在整个河道水流流速不一的情况下,河道不断发生侧向迁移,河曲逐渐发育(图 4)。

综上,根据 Meakin P.<sup>[16]</sup>的环流公式表明,环流对河道的侧向侵蚀起着重要的作用。它通过其运动形式及水力参数的变化,促使河道逐渐产生横向弯曲变形,最终发展成自由河曲。

### 3 自由河曲发育条件的案例分析

笔者选取古今两种不同时期形成的河曲来进行实际的案例分析。一是通过分析现代下荆江自由河曲的形成条件,来反演当时嘉陵江古河曲的发育条件,并推断其古地理地质环境应该具有与现代下荆江自由河曲相同的地理地质环境特征,这可以为嘉陵江古河曲的发育条件提供一个参照;二是选取与

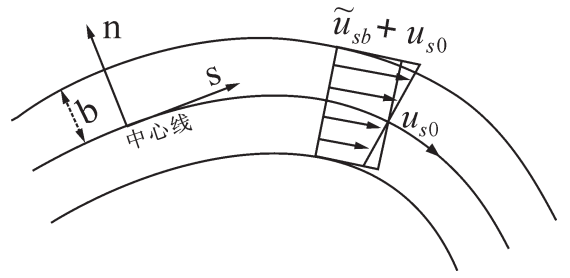


图 4 河流弯道水力参数图(据 Meakin P., 1996)[16]  
Fig.4 Hydraulic parameters chart of the river curve (after Meakin P., 1996) [16]

现代嘉陵江深切河曲具有同样典型性和代表性的美国西部科罗拉多高原深切河曲作为讨论对象,反推其古河曲形成时的发育环境,并试图去查明嘉陵江古河曲与科罗拉多河古河曲具有发育环境的相似性,这一案例将为嘉陵江古河曲的发育条件提供一个良好参考。

#### 3.1 下荆江自由河曲的发育条件

基于前人<sup>[5,7,25]</sup>的研究和我们的观察,现将下荆江自由河曲的形成条件概述如下:

(1)河岸边界条件:前人均认为沉积物二元结构是下荆江自由河曲形成的边界条件。林承坤<sup>[5]</sup>等认为河流曲折率  $C$  与河岸粘性土层相对厚度  $h_c/h_b$  (河岸粘土层厚度与滩面至河槽的高差之比)呈正相关,即河岸的粘土层相对厚度越大,越有利于河流弯曲(图 5)。

笔者基于自由河曲发育条件的理论,对下荆江自由河曲发育的河岸边界条件、河流纵比降等进行了分析,对某些条件甚至进行了定量化,这也是为了提高研究的可信度。引自林承坤<sup>[26]</sup>对下荆江自由河曲发育条件研究中所获取的部分水文资料显示:①下荆江监利段小于 0.005 mm 粒径的悬沙重量百分比高达 36.5,D50 为 0.008 mm,其河床边界组成为上层粘土层、下层砂层的二元结构,河床弯曲;下荆江中洲子段河岸物质组成中,粘粒含量占到所有物质组成的 40.0%,属弯曲河床,根据 Schumm<sup>[11]</sup>的粘粒含量与曲折率  $r$  的公式计算得到两段河床的曲折率  $r$  分别高达 2.30 和 2.35,与该河段的实际曲折率 2.40 相近。相反,粘粒含量相对较少的其他河段和其他河流则表现为分汊、散乱或弯曲程度低的河型。可见,下荆江自由河曲的发育程度与二元结构边界粘

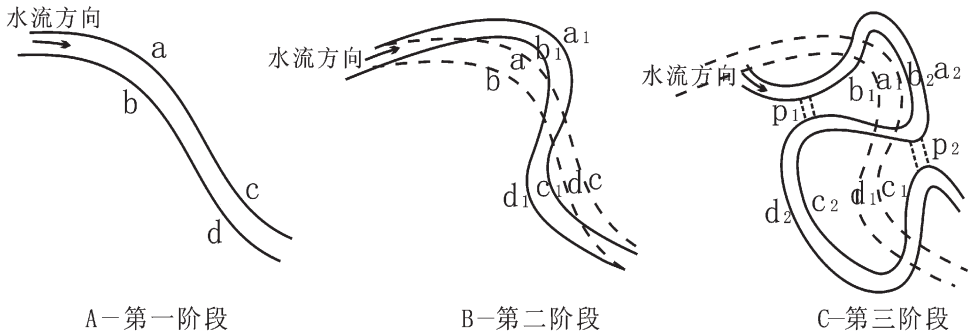
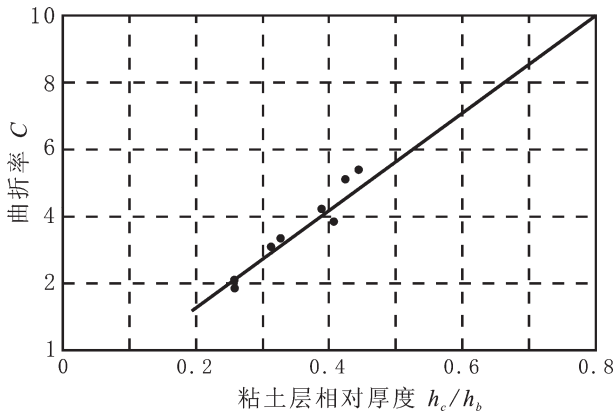


图5 自由河曲的发展过程示意图

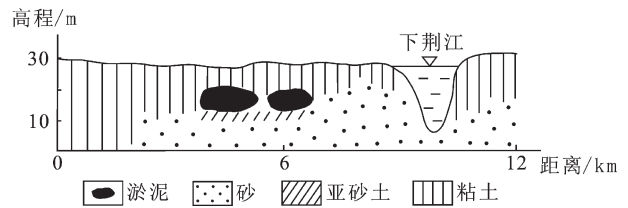
Fig.5 Schematic diagram of the development process of the free meander

图6 下荆江弯道粘土层相对厚度  $h_c/h_b$  与曲折率  $C$  的关系  
(据林承坤修改, 1985)<sup>[26]</sup>Fig.6 The relationship between relative thickness  $h_c/h_b$  of the clay layer and the meander ratio  $C$  in the lower Jingjiang River bend (modified after Lin Chengkun, 1985)<sup>[26]</sup>

土层含量的多少有着密切的关系。②下荆江上车湾段凹、凸岸的粘土层厚度分别为 10 m、19 m(图 7), 滩面至河床的深度约为 20 m, 粘土层相对厚度在 0.50~0.95, 而河床曲折率达到 13.3, 较好地与林承坤<sup>[26]</sup>所得图 6 的成果相呼应。

(2)地形地貌条件:平坦开阔的江汉平原和较小的河流纵比降是下荆江自由河曲形成的地形地貌条件。引自尹学良<sup>[27]</sup>对下荆江研究中获取的河流纵比降资料显示, 下荆江河流纵比降为 0.037‰, 满足 Schumm 所得图 3 成果中自由河曲发育的河流纵比降区间范围。

(3)水文条件:早年,林承坤<sup>[26]</sup>在对下荆江自由河曲形成条件的讨论中,提及了洞庭湖水位对下荆江

图7 下荆江上车湾河床边界条件(据林承坤(1985)修改, 图中河道为 1969 年河道)<sup>[26]</sup>Fig.7 The riverbed boundary condition of Shangchewan bend in lower Jingjiang River (modified after Lin Chengkun, 1985; the channel was the channel in 1969)<sup>[26]</sup>

自由河曲发育的顶托效应。洞庭湖常年接受上游湘、资、沅、澧“四水汇流”的来水后,在城陵矶出口分流不畅的情况下,水位得以快速抬升,势必会对下荆江形成顶托效应,产生的间歇性回流间接地减小了河流纵比降,从而促使下荆江自由河曲不断发育。

综上所述,下荆江自由河曲的河岸边界条件、河流纵比降都较好的满足了自由河曲发育理论。经分析表明:①下荆江自由河曲的弯曲程度与二元结构边界条件粘土层中粘土的百分含量及相对厚度呈正相关;②0.037‰的河流纵比降满足了下荆江自由河曲发育的地貌区间;③洞庭湖水位的顶托效应是其发育的重要水文条件。

### 3.2 美国科罗拉多高原深切河曲形成前其自由河曲的发育条件

Harden D R<sup>[28]</sup>在研究美国西部的科罗拉多高原深切河曲分布与发育的控制因素时,认为具现代面貌特征的深切河曲是对原自由河曲的一种继承,是原自由河曲快速下切作用的结果。他通过对 San

Juan 河、Colorado 河及 Green 河这 3 条河流多个河段的弯曲度和地貌坡度进行测量显示, 现在弯曲度高的河段与地貌坡度较小的地段相对应; 现在弯曲度低的河段, 与地貌坡度较大的地段相对应。以此, 他推断原自由河曲的弯曲度应与具现代面貌特征的深切河曲的蜿蜒度具有分布规律的相似性, 即较高的河曲弯曲度对应较小的地貌坡度, 较低的河曲弯曲度对应较大的地貌坡度。基于对这些河段地貌坡度的测量, 绘制出了河曲弯曲度与地貌坡度的关系图 (图 8)。从图中可见, 自由河曲的曲折率临界值 1.50 处所对应的地貌坡度大致为 1.2‰, 而这个值往上, 所对应的地貌坡度愈来愈小, 弯曲度与地貌坡度二者呈负相关。

下荆江自由河曲发育条件的研究已经比较深入, 以它作为嘉陵江古河曲发育条件的现代案例在理论上是可行的。Harden D. R. [28]通过分析科罗拉多高原深切河曲分布区的弯曲度与地貌坡度之间的关系来反演原自由河曲发育时的条件, 虽然并不能完全恢复当时的古地理地质环境, 但却得到了河曲发育与地貌坡度之间具有密切的正相关关系。结合以上两种实际案例中自由河曲发育条件的分析, 可见自由河曲的发育与河岸的边界条件、地貌条件是具有重要关系的, 而且这也被理论所证实。

因此, 基于以上自由河曲发育条件的理论分析和作为嘉陵江古河曲发育条件的两种类型案例, 便为嘉陵江古河曲发育条件的讨论提供了理论支撑与实际参考。

## 4 嘉陵江古河曲的发育条件及古地理重建

目前的嘉陵江为深切河曲, 河曲深深嵌入至侏罗系砂页岩互层组成的基岩中, 第四纪松散层几乎被剥蚀殆尽, 中游段流域内表现为低缓的剥蚀丘陵地貌景观。显然, 现今嘉陵江的地理特征不符合自由河曲发育的条件。然而, 嘉陵江古河曲形成的结果却表明, 当时的嘉陵江应该满足自由河曲所发育的河岸边界、地貌等条件。现基于自由河曲的发育条件对嘉陵江古河曲发育时的古地理进行重建。

### 4.1 地貌条件

由上述自由河曲发育的地貌条件来看, 嘉陵江古河曲最初形成于平坦开阔的平原地形之上 (图 9(1)), 地貌面的纵比降  $J$  值约为 0.36‰。这一点从现

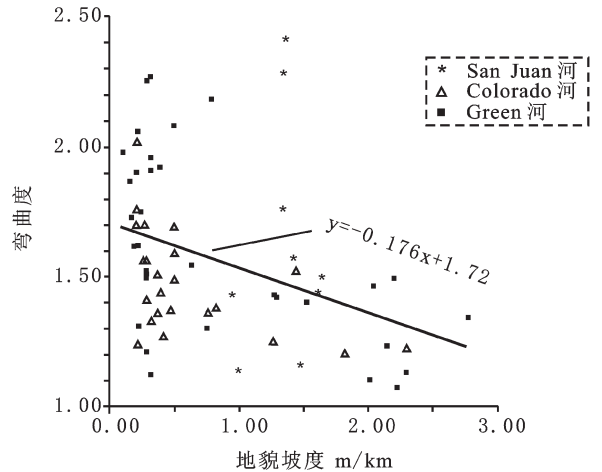


图 8 弯曲度与地貌坡度的关系图(据 Harden D. R., 1990)<sup>[28]</sup>

Fig.8 The relationship between sinuosity and gradient (after Harden D. R., 1990)<sup>[28]</sup>

今嘉陵江中游深切河曲段的地貌特征也可看出 (图 9(2))。据研究, 早更新世初期, 四川盆地构造相对稳定, 地表水系强烈侧蚀作用将地表夷平, 形成了现今嘉陵江中游的剥蚀丘陵顶面<sup>[29]</sup>。侯德封、王现珩<sup>[30]</sup>将这一丘陵顶面称为盆地期; 李承三<sup>[31]</sup>称之为云门山期。其过程是在嘉陵江河曲发育初期, 侏罗纪砂页岩互层上覆松散第四纪冲积层; 随着河流侧蚀作用的加强, 河曲开始强烈侧蚀冲积层, 将侏罗纪砂页岩互层侵蚀出地表并夷平, 即上述的盆地期夷平面或云门山期夷平面; 最后, 因河曲的强烈下切, 导致夷平面呈现千沟万壑、残留丘陵顶面的地貌特征。笔者在野外调查发现, 这些丘陵顶面高于河床 200 m 左右, 顶面之间的相对高差较小, 大多在同一平面上。经计算, 该地貌面的纵比降  $J$  值约为 0.36‰, 满足自由河曲发育的地貌条件。

### 4.2 边界条件

自由河曲发育的河岸边界条件表明, 嘉陵江古河曲表现为与现代下荆江自由河曲相同的河岸边界特征, 即二元结构边界。虽然现今嘉陵江中游深切河曲的边界属侏罗—白垩纪的砂页岩互层, 但从 4.1 中已重建广阔平坦的平原地貌特征可以推断, 古河曲发育初期, 丘陵顶面上部由一层具有一定厚度的河流二元结构的松散沉积物覆盖 (图 9(1)), 满足嘉陵江古河曲发育的边界条件。

现今河曲边界条件的改变, 是由重大区域地质环境变化引发的, 即在某种地质事件的触发下, 丘陵

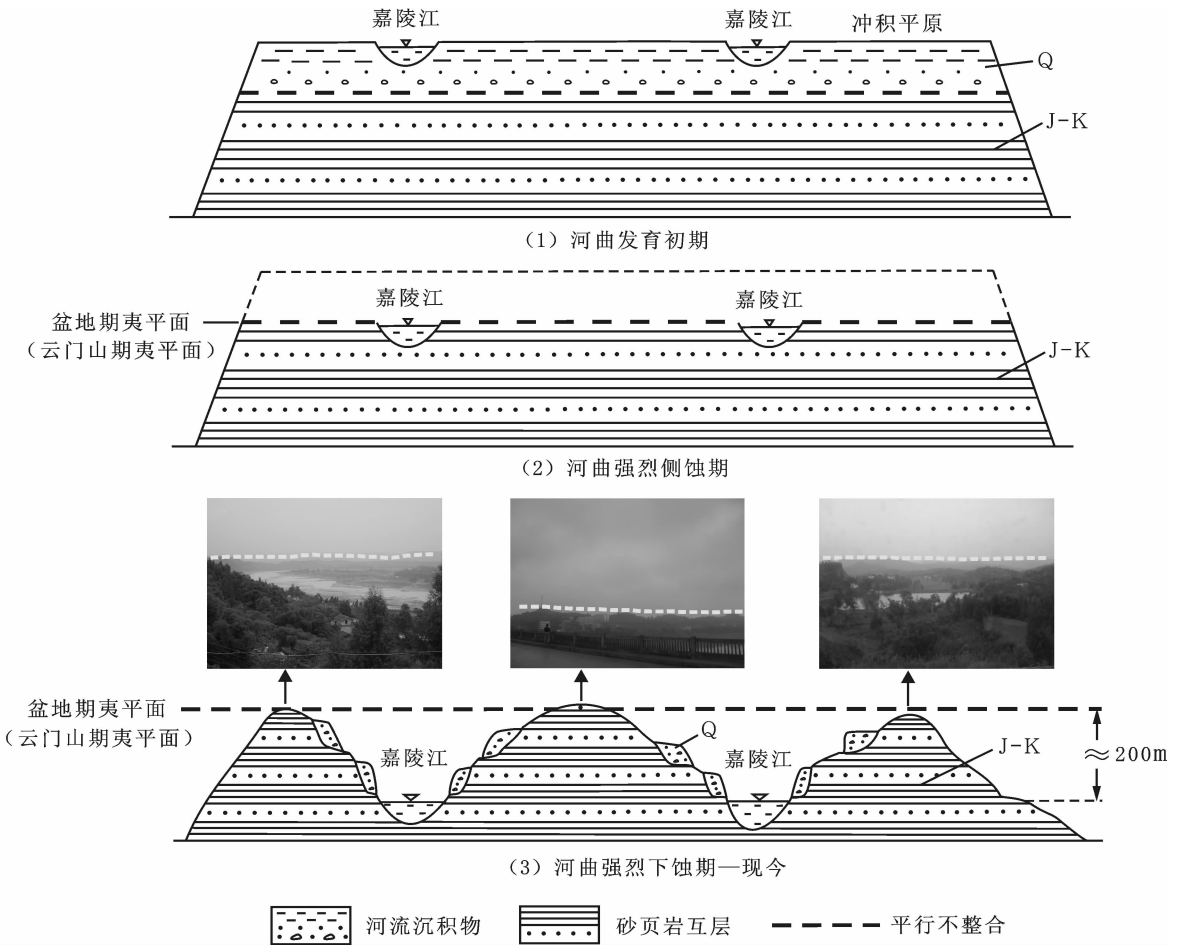


图9 嘉陵江中游段河流地貌演化阶段示意图

Fig.9 Sketch map showing the evolution of fluvial geomorphology in the middle reaches of the Jialing River

顶面的松散层被快速剥蚀殆尽，古河曲的二元结构边界迅速转化为现代深切河曲的基岩边界。

### 4.3 水文条件

根据自由河曲形成的水文环境条件，可以推测嘉陵江干流及其两条支流(渠江和涪江)构成的“三水汇流”格局早在嘉陵江古河曲最初形成时就已经存在。三江在合川汇集所形成的“三水汇流”对嘉陵江干流中游段起着顶托作用，即产生向上游顶托的间歇性回流，从而造成侵蚀基准面的间接抬升或地貌纵比降的间接减少，这便为嘉陵江古河曲的发育提供了重要条件。这点与张斌<sup>[6]</sup>分析现代嘉陵江深切河曲受下游水位顶托作用和林承坤<sup>[9]</sup>研究下荆江自由河曲受洞庭湖水位顶托效应的结论相呼应。

## 5 结论及讨论

(1) 遥感影像和野外调查显示，嘉陵江中游段

古河道蜿蜒曲折，经初步研究定义其为自由河曲。整个中游河段的古河道曲折率达到2.75，远远高于自由河曲定义临界值的1.50，与现代下荆江自由河曲相当，是国内外最为典型的自由河曲之一。

(2) 基于自由河曲的发育条件，并以下荆江自由河曲和美国科罗拉多高原深切河曲两种案例作为参照和参考，分析了嘉陵江古河曲的发育条件并以此重建了其古地理环境，经讨论得到如下结论：嘉陵江古自由河曲最初形成于广阔平坦的平原地形和具有一定厚度河流二元结构边界松散层上。此时，嘉陵江干流及其支流(渠江和涪江)的“三水汇流”水文格局已经存在。

(3) 嘉陵江中游河曲段古地理条件的巨大变化和现代地理环境的形成，特别是由古河曲河流松散层二元结构边界向现代深切河曲基岩边界的转变，是由重大区域地质环境变化引发的，至于是何种地

质事件,将在另文讨论。

### 参考文献(References):

- [1] 李承三,周廷儒,郭令智,等.嘉陵江流域地理考察报告(上卷:地形)[J].地理专刊,1946,(1):68-72.  
Li Chengsan, Zhou Tingru, Guo Lingzhi, et al. Geographical investigation report of Jialing River Basin (The first volume: Landform) [J]. Geographic Special Issue, 1946, (1):68-72 (in Chinese).
- [2] Tiffany J. B., Nelson G.A. Studies of meandering of model streams [J]. Transactions of American Geophysical Union, Part IV, 1939: 644-649.
- [3] Friedkin J F. A laboratory study of the meandering of alluvial rivers [J]. United States Waterways Experiment Station, 1945:225-271.
- [4] Leopold L.B. Wolman M.G. River channel patterns:braided, meandering and straight [J]. US Geological Survey Professional Paper, 1957, 282:39-85.
- [5] 林承坤,陈钦鑫.下荆江自由河曲形成与演变的探讨 [J].地理学报, 1959, 2:156-169.  
Lin Chengkun, Chen Qinlun. Exploration on formation and evolution of the Lower Sing River free meander [J]. Acta Geographica Sinica, 1959, 2:156-169(in Chinese).
- [6] 方宗岱.河型分析及其在河道整治中的应用 [J].水利学报, 1964 (1):1-12.  
Fang Zongdai. Application in analysis of river patterns and river regulations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964 (1):1-12 (in Chinese).
- [7] 唐日长.蜿蜒性河段成因的初步分析和造床试验研究 [J].人民长江, 1964, (2):13-21.  
Tang Richang. Preliminary analysis and study of made bend experiment on cause of the serpentine reach [J]. Yangtze River, 1964, (2):13-21(in Chinese).
- [8] 尹学良.弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J].地理学报, 1965, 31(4):287-303.  
Yin Xueliang. Cause on the bend of the river and Preliminary study of made bend experiment [J]. Acta Geographica Sinica, 1965, 31(4): 287-303 (in Chinese).
- [9] Langbein W B, Leopold L B. River meanders—theory of minimum variance [J]. US Geological Survey Professional Paper, 1966, 42(2): H1-H15.
- [10] Yang C T. Potential energy and stream morphology [J]. Water Resources Research, 1971, 7(2), 311-322.
- [11] Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel patterns [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1972, 83(6):1755-1770.
- [12] Schumm S A. The Fluvial System [M]. Publ. by:Wiley - Interscience, 1977.
- [13] 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[J].地理研究, 1986, 5(3):12-21.  
Jin Desheng. An experimental study of the influence of boundary conditions on meandering development with process response model [J]. Geographical Research, 1986, 5(3):12-21 (in Chinese with English abstract).
- [14] Jin D, Schumm S A. A new technique for modelling river morphology [J]. International Geomorphology, Part, 1987, 1, 681-690.
- [15] Hasegawa K. Universal bank erosion coefficient for meandering rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 15(6):744-765.
- [16] Meakin P, Tao Sun, Jqssang T, et al. A simulation model for meandering rivers and their associated sedimentary environments [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1996, 233(2/4):606-618.
- [17] Smith C E. Modeling high sinuosity meanders in a small flume [J]. Geomorphology, 1998, 25(1-2):19-30.
- [18] 齐璞,梁国宁.冲积河型形成条件的探讨 [J].泥沙研究, 2002, 3: 39-43.  
Qi Pu, Liang Guoning. Discussion on forming conditions of the alluvial river patterns [J]. Journal of Sediment Research, 2002, 3: 39-43 (in Chinese with English abstract ).
- [19] Pittaluga M B, Nobile G, Seminara G. A nonlinear model for river meandering [J]. Water Resources Research, 2009, 45, W04432, 1-22.
- [20] Duan J G, Julien P Y. Numerical Simulation of Meandering Evolution [J]. Journal of Hydrology, 2010, 91(1/2): 34-46.
- [21] Dulal K P, Shimizu Y. Experimental simulation of meandering in clay mixed sediments [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2010, 4(4):329-243.
- [22] Wenhong Dai, Hongwu Tang. A mathematical model of migration and expansion of meander loops [J]. Journal of Hydrodynamics, (Ser. B), 2010, 22(2):214-220.
- [23] 江华军,李长安,张玉芬,等.嘉陵江古河道的河曲特征 [J].地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(2):417-422.  
Jiang Huajun, Li Chang'an, Zhang Yufen, et al. Meander characteristic of the Jialing River's Old Channels [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2013, 38 (2):417-422(in Chinese with English abstract).
- [24] Ikeda S, Parker G, Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 112, 363-377.
- [25] 余文畴.长江中游下荆江蜿蜒型河道成因初步研究 [J].长江科学院院报, 2006, 23(6):9-13.  
Yu Wenchou. Preliminary Study on Forming Condition of Lower Jingjiang Meandering Channels of Middle Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23 (6):9-13 (in Chinese with English abstract).
- [26] 林承坤.河型的成因与分类 [J].泥沙研究, 1985(2):1-11.  
Lin Chengkun. Cause of formation and classification of river pattern [J]. Journal of Sediment Research, 1985(2):1-11(in Chinese with English abstract ).
- [27] 尹学良.河型成因研究 [J].水利学报, 1993, (4):1-11.



- Yin Xueliang. Formation of river patterns [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (4):1-11(in Chinese with English abstract).
- [28] Harden D R. Controlling factors in the distribution and development of incised meanders in the central Colorado Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 1990, 102:233-242.
- [29] 四川省水利电力厅. 嘉陵江志[M]. 成都:四川省水利电力厅, 1991. Sichuan Provincial Department of Hydraulic and Electrical Engineering. The Jialing River Record [M]. Chengdu:Sichuan Provincial Department of Hydraulic and Electrical Engineering, 1991 (in Chinese).
- [30] 侯德封, 王现珩. 广元南江间地质矿产[J]. 四川省地质调查所丛刊, 1939, (2):1-64.
- Hou Defeng, Wang Xianheng. Geology and mineral resources of Nanjiangjian, Guangxi [J]. Collection of Sichuan Institute of Geological Survey, 1939, (2):1-64(in Chinese).
- [31] 张斌, 艾南山, 黄正文, 等. 中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. 科学通报, 2007, 52(22):2671-2682.
- Zhang Bin, Ai Nanshan, Huang Zhengwen, et al. Meanders of the Jialing River in China:Morphology and formation [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22):2671-2682(in Chinese).

## The reconstruction of paleogeographic environment for the development of the Jialing River's ancient meander

JIANG Hua-jun<sup>1</sup>, LI Chang-an<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-fen<sup>3</sup>, WANG Jie-tao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environment Geology, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** Remote sensing images of the Jialing River's old channel reflect the river pattern information of the free meanders. The analysis of the development condition of the old meanders of the Jialing River has important geomorphological significance in the reconstruction and restoration of the regional paleogeographic environment. On the basis of previous researches and practical cases on the free meanders, this paper summarized development conditions of the free meander. On such a basis, in combination with field investigation data, the authors hold that, when the ancient meander started its formation, the area was a flat and wide plain landform, and the channel gradient ratio was smaller than the present value. Materials of banks on both sides of the river were composed of unconsolidated sediments characterized by "dualistic structure". This geographical environment was similar to the that of the lower part of the Jingjiang River that belonged to the Yangtze River. Moreover, the pattern of "three confluence rivers" composed of the main stream of the Jialing River and its tributary (Qujiang River and Fujiang River) had already existed at that time. The transformation of the free meander to the incised meander of the Jialing River was caused by change of the regional geological environment or the geological events.

**Key words:** Jialing River, ancient meanders; free meanders; development conditions; reconstruction of paleogeographic environment

**About the first authors:** JIANG Hua-jun, male, born in 1987, master candidate, engages in the study of fluvial geomorphology and Quaternary geology; E-mail: junhjiang1987@163.com.