doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.007

长江流域宜宾至宜昌段深切河曲平面特征

王节涛1.2.3.4,王树丰1*,王 岑1,龚 冲1

WANG Jie-Tao^{1,2,3,4}, WANG Shu-Feng^{1*}, WANG Cen¹, GONG Chong¹

1.中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉430205;

2.中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北武汉430074;3.古生物与地质环境演化湖北省重点实验室,湖北武汉430205;
 4.意大利米兰比可卡大学地球与环境科学学院,意大利米兰20126

Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;
 Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
 Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China;
 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milan, Italy, 20126

摘要:长江流域内的四川盆地和三峡地区分布着大量深切河曲,记录了曲流河的原始形态,通过分析深切河曲的形态可以了解地 质历史时期古曲流河的相关信息。本文采用小波分析方法,利用软件MStaT从遥感影像中提取了深切河曲的干支流交汇角、小 波功率谱、弯曲度、弧波长和振幅等参数。与现代曲流河进行对比后发现:在深切河曲中,交汇角为钝角的情况较为常见,占比为 30.3%;在交汇点附近,干支流交汇作用对小波功率谱的影响较为显著,但是远离交汇点的小波功率谱则基本保持不变;大部分河 流的弯曲度、弧波长和振幅等参数呈现出从上游至下游逐渐升高的趋势。从河谷形态分析上也可知:以嘉陵江为代表的深切河 曲,其河谷形态以对称河谷为主,这表明河曲在下切形成深切河曲的过程中,河道的形态并没有发生大规模的变化。根据上述现 象可推测,河道交汇角为钝角的情况并不能作为古长江流向发生倒转的证据;长江流域宜宾至宜昌段曾经是地形起伏度很低的 准平原(或宽阔河谷),现今的深切河曲是古曲流河发生深切后而形成;长江在四川盆地和三峡地区应当为"叠置河"成因,长江在 现今河道上并没有发生过倒流。

关键词:长江演化;深切河曲;小波分析;四川盆地;三峡 中图分类号:P9
文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2024)01-0095-16

Wang J T, Wang S F, Wang C and Gong C. 2024. The Planform Geometry of the Incised Meanders from Yibin to Yichang in the Yangtze Catchment. *South China Geology*, 40(1): 95–110.

Abstract: Many incised meanders exist in the Yangtze catchment, because their shapes are a good indication of the morphological characteristics of them and the historial information can be obtained. In this paper, the MStaT was used to get the junction angles of main rivers and tributaries, wavelet spectra, sinuosity, arc-wavelengths, and amplitudes of incised meanders from remote sensing images, using based on wavelet analysis. Comparinged with the modern meanders, the appearances of obtuse junction angles are common, accounting for 30.3%. Near the junction points, the effects of main channel junction have a significant impact on the

收稿日期:2023-10-12;修回日期:2023-11-26

基金项目:国家重点研发计划课题(2020YFC1512402)、国家自然科学基金项目(41501004)、古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放课题(PEL-202111)

第一作者:王节涛(1983—),男,高级工程师,主要从事河流地貌学研究,E-mail:quaternary@163.com

通讯作者:王树丰(1981—),男,高级工程师,主要从事地质灾害和生态地质研究,E-mail:422530802@qq.com

wavelet energy spectrum, but the wavelet energy spectrum that away from the junction point is basically unchanged. Most rivers' curvature, arc wavelength and amplitude parameters have shown a trend of gradually rising from upstream to downstream. From the analysis of valley morphology, it can also be seen that the valley shape of the deep river curve represented by Jialing River is mainly symmetrical valley, which indicates that the river shape has not changed on a large scale in the process of forming the deep river curve. According to the above phenomenon, we speculate that the situation where the rivers' junction angle is obtuse cannot be used as evidence of reversing the flow of the ancient Yangtze River. The Yibin to Yichang section of the Yangtze River Basin was once a peneplain (or wide river valley) with low terrain. Incised meanders are formed by the ancient meanders in the process of deep curve. The Yangtze River should be the cause of the "superimposed" in the Sichuan Basin and the Three Gorges regions. The flow direction of incised meanders has not been reversed on the river channels today.

Key words: the evolution of Yangtze drainage systems; incised meanders; wavelet analysis; Sichuan Basin;

Three Gorges

深切河曲也称为基岩河曲,它是嵌入河的一种 类型。从形态上看,其与现今在滨海(湖)、冲洪积平 原上分布的曲流河极为相似。深切河曲这种地貌形 态很早就被包括 Davis、Winslow 等地貌学家所关 注(Davis, 1893; Winslow, 1893)。以 Davis 为代表的 学者认为深切河曲是一种地貌遗迹;深切河曲可能 是由叠置河或者先成河所形成的(Dury, 1954)。而 Winslow(1893)认为河曲可能是河流侵蚀到基岩 后,后期通过破坏河岸而逐渐形成的(Stark et al., 2010)。尽管对于深切河曲的形成机制目前仍然不 清楚,但是学界普遍认为深切河曲与曲流河具有大 量相同的特征(Kale, 2005)。

由于深切河曲记录了河流在地质历史时期的 形态,目前在深切河曲的研究中,地貌学家们普遍 借鉴了曲流河的研究方法。Leopold and Langbein (1966)最早提出河曲的形态可以用正弦曲线进行 拟合,之后的学者开始大量采用正弦曲线波谱分析 法来定量研究深切河曲的相关参数(Speight, 1965; Chang T P and Toebes, 1970; Ferguson, 1975; Dozier, 1976; Hooke, 1984, 1986; Howard and Hemberger, 1991; Marani et al., 2002)。

从卫星影像可知,在长江流域内的四川盆地及 三峡地区,水系常呈现为深切河曲的形态。这一地 貌很早就被地貌学家所关注(Ting, 1944;李承三, 1956)。长江干流从宜宾市新市镇即开始出现明显 的深切河曲形态。三峡地区的小江、大宁河、乐天溪 和黄柏河也呈现出典型的深切河曲形态。本文重点 研究了宜宾至宜昌段的长江干流以及主要支流在 主要交汇点附近的河流形态特征,该段也常被称为长 江中游地区(Clark et al., 2004; Wang P et al., 2013)。 本文通过对遥感影像中的深切河曲形态进行分析, 试图探讨河道交汇角、小波功率谱以及其它参数分 布情况与古长江水系演化模式的关系。

本文中所涉及的33个河道交汇点主要位于四 川盆地及三峡地区,分别为沱江、赤水河、綦江、涪 江、嘉陵江、渠江、小江、大宁河、乐天溪、黄柏河以 及长江干流共计11条河流的干支流交汇点(图1), 其对应的遥感影像如图2所示。

1研究区地质背景

研究区主要包括长江流域内的四川盆地和三 峡地区,该地区主要以沉积岩为主(图3)。其中,四川 盆地自西向东可分为成都平原、川中丘陵和川东平行 岭谷三部分,三者主要以龙泉山和华蓥山为界。成都 平原为岷江、沱江上游地区,深切河曲较为少见。四 川盆地的深切河曲主要分布于龙泉山以东的川中丘 陵和川东平行岭谷地区。川中丘陵西起龙泉山脉,东 止华蓥山,北起大巴山,南抵长江以南。川东平行岭谷 位于四川盆地东部,是世界上特征最显著的褶皱山 地带,与美洲的阿巴拉契亚、安第斯-落基山并称世 界3大褶皱山系。区内地层岩性主要为白垩系至侏





罗系紫红色长石砂岩、粉砂质泥岩、泥岩等,常称之 为"红层"。三峡地区主要以前寒武系至三叠系沉积岩 为主,长江依次切穿齐岳山背斜、横石溪背斜和黄陵 穹隆,分别形成瞿塘峡、巫峡和西陵峡。齐岳山背斜 和横石溪背斜核部出露灰岩和白云岩,而在向斜地 区分布有粉砂岩、页岩和泥岩等。在秭归盆地也分布 着与四川盆地同时期沉积的三叠系至侏罗系紫红色 砂岩、泥岩。黄陵背斜核部为新元古代花岗质岩体。

2 研究方法

目前在小波分析中,通过 Morlet 小波函数和 Torrence and Compo (1998)提供的小波函数工具 箱,可以得到河道弧波长(λ , arc-wavelength)、弯曲 度(sinuosity)、曲率(curvature)、振幅(amplitude)等 参数(Torrence and Compo, 1998; Gutierrez and Abad, 2014; Gutierrez et al., 2014; Addison, 2017)。

河道弧波长是指假定曲流河为正弦曲线形态,其波长即称之为河道弧波长(λ)。河道上两点之间的河道长度AB与河谷长度CD的比值称之为弯曲度(S);正弦曲线所对应的弧的弯曲程度即称之为曲率(C);正弦的振幅称之为河流的振

幅(图4)。

交汇角与交汇点上下游河道的平均河道宽度 存在一定的相关性,二者之间存在如下关系:

$$W_{\rm MT} = B_{\rm M} \left[1 + \beta^{1/\delta} \right]^{\delta} \tag{1}$$

其中, δ 值为通过大量研究所得到的经验值,位 于[0,1]区间(Osterkamp and Hedman, 1981; Church, 1992; Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997; Montgomery and Gran, 2001; Ferguson and Hoey, 2008; Hackney and Carling, 2011)。考虑到河道的宽度 (B_M)与河流的流量密切相关,学者们普遍引入 B_M 对不同的参数进行标准化。比如:标准化河道长度 S*(S*=S/B_M)),标准化曲率值C*(C*=C×B_M)。公式 中,常用M、T和MT分别代表干流、支流以及汇合 后的干流(图5)。

通过 Morlet 小波函数和 Torrence and Compo (1998)提供的小波函数工具箱,对M、T和MT河道 的曲率进行连续小波分析,曲率信号C(s)的连续一 维小波变换是通过将其与小波函数或母小波 $\psi(s)$ 进行卷积获得的,参见公式(2)。其中a是尺度参 数,b是位置参数, $\overline{\psi}_{ab}(s)$ 是 $\psi_{ab}(s)$ 的共轭复数,如公 式(3)所示。根据 Parseval定理,同样的小波变换可 以用公式(4)来表示。



图2 研究区河流交汇点的Landsat卫星影像 Fig. 2 The Landsat images of the confluences a. 沱江和赤水河交汇点;b.嘉陵江及其支流涪江、渠江及其各自与长江干流交汇点;c.小江、大宁河、乐天溪、 黄柏河交汇点及其各自与长江干流交汇点;黄色箭头为干流流向

a. Confluences of Tuojiang and Chishui River; b. The Jialing River and its tributaries, Fujiang River, Qujiang River and their respective confluences with the main stream of the Yangtze River; c. The confluences of Xiaojiang River, Daning River, Letian Creek and Huangbai River and their respective intersections with the main stream of the Yangtze River; the yellow arrow is

the flow direction of the main stream



图 3 长江流域宜宾一宜昌段地质简图 Fig. 3 The geological map of the Yangtze catchment from Yibin to Yichang



图 4 曲流河弯曲度(a)和地貌参数(b)示意图 Fig. 4 Diagram of the meander's sinuosity(a) and geomorphic variables(b)

$$T(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} C(s)\bar{\psi}_{a,b}(s)ds , a > 0$$
 (2)

$$\psi_{a,b}(s) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi(\frac{s-b}{a}) \tag{3}$$

$$T(a,b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{C}(f) \bar{\psi}_{a,b}(f) df \qquad (4)$$

其中 $\hat{C}(f)$ 和 $\hat{\psi}_{a,b}(f)$ 分别为C(s)和 $\psi_{a,b}(f)$ 傅里

叶变换后的值。 $|T(a,b)|^2$ 是小波功率谱,与公式(4) 相比,它具有更小的计算成本(Torrence and Compo, 1998)。

基于上述小波分析理论,利用 Ruben et al. (2021)开发的MStaT软件,可以得到曲流河河道平 面几何特征参数和曲流河信号的小波功率谱。为了 避免水坝蓄水对河道宽度测量造成困难,可在



Fig. 5 Variables characterizing a confluence of meandering rivers: main channel upstream of the confluence (M), tributary channel (T), and post-confluence main channel (MT).

汇合点上游的主河道(M)、支流河道(T)和汇合后的主河道(MT);M、T和MT河道的弧波长分别为 λ_{M} 、 λ_{T} 和 λ_{MT} ;干支流河道的交汇角为 ψ ,它们对应的平均宽度是 B_{M} 、 B_{T} 和 B_{MT} (据Gutierrez et al.,2014修改)

GoogleEarth上选择未建设水坝时的历史卫星影像。目前GoogleEarth所能查询到的最早影像时间可至1985年。由于不同地图的范围差异较大,本研究中共使用了三种不同精度的DEM数据。其中,交汇点分布图使用的DEM数据为SRTM 90 m分辨率高程数据;长江三峡地区的三维高程图所用数据为GDEM V2 30 米分辨率DEM数据;制作河道横截面的DEM数据分辨率为ALOS 12.5 m。深切河曲的小波分析所使用的软件为MStaT。所有图件最终在Adobe Illustrator上进行二次处理,添加经纬度、地名等信息。

数据处理步骤为:(1)从地理空间数据云(https: //www.gscloud.cn/)中下载研究区所对应的Landsat 8 OLI影像,将其导入ArcGIS,并设置投影方式为 UTM投影,投影坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_ 48N;(2)沿深切河曲河道中心线绘制曲线,并用 ArcGIS中的平滑线工具对其平滑;(3)通过"数据 管理工具-要素-要素折点转点"工具,得到河道中 心线点,为这些点赋X、Y坐标后,将河谷中心线坐 标点导出到Excel表格;(4)利用MStaT对导出的坐 标数据进行处理,最终得到河道平面几何参数及相关小波分析图件。软件下载地址及更为详细的操作流程参见Ruben et al.(2021)的附件。

为了查看长江水系在下切过程中是否发生过 大规模的形态调整,可以通过观察河道横截面所揭 示的河谷形态是否呈现出对称形态来推测河流的 侧向迁移情况。曲流河的拐点(inflection point)是 曲流河上河流曲率形态发生变化(一条连续曲线改 变凹凸性的点)的位置,其连线可以最大程度上横 切曲流河河道(图1)。本文选择嘉陵江干流段作为 代表性水系,将其拐点进行连线并制作河道横截面 (图6)。曲流河拐点位置坐标信息,可通过MStaT获 得。将坐标投影至ArcGIS中后,可以绘制横截面线, 并利用 Pérez-Peña et al. (2017)所开发的 SwathProfiler 工具制作河道横截面。

3分析结果

3.1 河道交汇角

在本研究的33个交汇点中,干支流交汇角为

锐角的有 23个, 钝角有 10个, 其中钝角的占比为 30.3%, 河道交汇角的平均值为 74.8°(表1, 图 2), 该值接近于 Hooshyar et al. (2017) 对美国境内提出 的 75°和 Devauchelle et al. (2012) 所提出的 72°河 道交汇角, 但是小于亚马逊河的河道交汇角 82° (Devauchelle et al., 2012; Gutierrez et al., 2014; Hooshyar et al., 2017)。前人对湄公河、亚马逊河等

现代曲流河河道交汇角测量结果表明,两条河流中 钝角占比分别为22%和30%(Hackney and Carling, 2011; Gutierrez et al., 2014),这表明在曲流河 中的河道交汇角为钝角较为常见,并不是偶然出现 的反常现象。本研究中的河道交汇角为钝角的占比 与亚马逊河相似。

长期以来,很多学者认为长江三峡中的某个地



图 6 嘉陵江干流拐点位置及连线 Fig. 6 The connecting lines of inflection points on the Jialingjiang River's trunk. 图中数字为拐点编号

方(齐岳山背斜、横石溪背斜或黄陵背斜)是古长江 与古川江水系的分水岭,分水岭东侧的古长江向东 流,而西侧的古川江流向西南方向,并汇入古红河 水系,最终流向南海(Lee and Chao, 1924;叶良辅 和谢家荣, 1925; Ting, 1944; 李承三, 1956; 田陵君 等, 1996; Clark et al., 2004; 杨达源, 2006; Clift et al., 2008; Kong P et al., 2009; 王平等, 2013; Zheng HBet al., 2013)(图7)。大多数学者都是基于"从源 到汇"的思路,从沉积物中寻找物源区发生变化的 证据,但是CaoLC et al. (2023)通过分析前人发表 的大量碎屑锆石和Nd同位素数据,认为现有数据 并不支持曾经存在一条向南流的古红河水系。也有 学者从河道交汇角出现钝角这一现象推测古川江 曾经流向西南方向(李承三, 1956;田陵君等, 1996; 廖喜林, 1999; 唐贵智, 2001)。李承三(1956) 也发现 古长江与古川江以云阳为界,以西发育有大量钝角

交汇角。赵诚(1996)发现在香溪镇至石鼓镇段存在 大量干支流交汇角为钝角的情况,并据此认为该段 河流曾经向西流,古长江在该段发生倒流。廖喜林 (1999)同样也认为倒插河的出现是"由于主干河流 掉向"而形成。

由图 5 和表 1 可知,长江支流汇入干流的交汇 点中,交汇点 27、28、29 和 32 为锐角;交汇点 30、 31、33 为钝角。如果钝角代表了向西流动,显然既 无法解释位于三峡最东端的黄柏河与长江干流交 汇角(交汇点 33)为钝角这一现象,也无法解释沱 江、赤水河、綦江、嘉陵江等交汇点(27、28、29 和 32)为锐角的成因。更不用说,四川盆地内可以见到 大量的交汇角为钝角的现象。

此外,河道交汇角的大小受多种因素影响,河 流倒转并不是形成钝角的唯一成因。Horton(1932, 1945)认为河床梯度、地表坡度与河道交汇角的关

华南地质

表1 长江流域(宜宾至宜昌段)深切河曲交汇点相关参数

 Table 4 parameters of the confluences in Yangtze catchments, from Yibin to Yichan.

拐点编号	干流	支流	经度	纬度	L _T (km)	L _M (km)	L _{MT} (km)	B _M (m)	<i>B</i> _T (m)	B _{MT} (m)) β	$\psi(^{\circ})$	影像时间(年/月/日)
1	沱江	绛溪河	104°32'54.18"	30°24'01.00"	7.807	29.939	23.932	173	32	237	0.18	83.8	2022/5/5
2	沱江	阳化江	104°41'37.15"	30°09'30.12"	6.969	0.495	0.209	135	54	204	0.40	46.2	2022/11/11
3	沱江	球溪河	104°39'03.14"	29°57'30.27"	0.158	0.002	0.005	180	60	204	0.33	70	2022/10/20
4	沱江	濛溪河	104°57'40.82"	29°43'28.53"	7.71	0.044	0.023	156	32	172	0.21	60.8	2019/2/7
5	沱江	釜溪河	104°57'26.62"	29°08'07.14"	2.613	0.003	0.024	179	88	237	0.49	22.3	2022/9/5
6	赤水河	习水河	105°50'05.75"	28°47'58.72"	0.8	10.848	5.499	149	64	161	0.43	122.2	2014/10/8
7	綦江	笋溪河	106°21'31.77"	29°12'51.85"	0.444	0.04	0.082	121	46	124	0.38	80.9	2020/8/29
8	涪江	凯江	105°05'48.35"	31°04'45.17"	5.396	0.171	0.167	170	146	188	0.86	40	1985/12/31
9	涪江	梓江	105°21'04.18"	30°56'06.15"	1.479	15.763	2.532	265	165	333	0.62	15.1	1985/12/31
10	涪江	棲江	105°26'48.57"	30°37'40.82"	10.199	0.136	0.181	318	72	363	0.23	87.2	1985/12/31
11	涪江	琼江	106°01'39.14"	29°59'40.73"	10.819	0.127	0.017	239	81	264	0.34	28.5	1985/12/31
12	嘉陵江	东河	106°00'52.47"	31°36'19.60"	0.808	16.622	27.668	283	102	300	0.36	42.1	1985/12/31
13	嘉陵江	西河	106°14'13.56"	31°08'59.15"	2.586	20.281	12.052	206	81	254	0.39	119.3	1985/12/31
14	嘉陵江	西溪河	106°05'27.90"	30°45'16.78"	6.755	82.872	36.011	509	63	620	0.12	111.8	2021/10/3
15	嘉陵江	长滩寺河	106°15'52.70"	30°16'20.11"	12.995	0.259	0.259	250	42	252	0.17	70.6	2014/12/22
16	嘉陵江	渠江	106°19'17.24"	30°02'06.56"	46.082	0.063	0.052	413	410	526	0.99	76	2021/9/26
17	嘉陵江	涪江	106°16'21.43"	29°59'21.13"	7.87	0.374	0.434	420	360	509	0.86	90.6	2021/9/26
18	渠江	巴河	107°06'22.11"	31°33'31.53"	1.765	0.013	0.005	198	148	279	0.75	70.4	2021/3/28
19	渠江	州河	107°09'13.62"	31°02'04.52"	4.894	0.032	0.012	248	222	298	0.90	110.8	2021/2/22
20	渠江	流江河	106°58'41.52"	30°51'02.19"	3.785	17.639	5.119	268	54	310	0.20	88	2021/2/22
21	渠江	西溪河	106°39'04.85"	30°28'15.34"	0.319	0.15	0.059	289	21	345	0.07	99.1	2019/7/26
22	小江	普里河	108°29'13.12"	31°08'11.79"	2.239	14.172	4.277	115	111	134	0.97	45.7	2006/3/16
23	大宁河	马渡河	109°51'35.14"	31°13'20.22"	0.772	0.002	0.005	51	17	58	0.33	40.1	2000/3/16
24	乐天溪	西河	111°04'15.74"	30°57'56.29"	0.188	0.262	1.609	22	15	28	0.68	51.9	2016/11/12
25	黄柏河	西河	111°21'31.51"	30°51'50.89"	1.837	0.002	0.027	46	40	55	0.87	118.7	2021/2/14
26	长江	沱江	105°27'21.32"	28°54'25.85"	0.524	0.15	0.268	471	240	591	0.51	47.7	2022/4/11
27	长江	赤水河	105°50'52.44"	28°48'19.96"	2.296	0.286	0.28	481	156	747	0.32	57.8	2021/3/28
28	长江	綦江	106°23'18.94"	29°17'44.38"	7.752	0.251	0.47	456	129	487	0.28	80.8	2021/3/27
29	长江	嘉陵江	106°35'06.55"	29°34'25.04"	12.671	0.307	0.113	579	272	608	0.47	86.3	2021/8/1
30	长江	小江	108°39'15.44"	30°56'51.09"	0.242	58.783	179.208	604	60	657	0.10	96	1985/12/31
31	长江	大宁河	109°52'47.36"	31°04'01.96"	1.571	4.059	11.367	300	91	309	0.30	147.4	1985/12/31
32	长江	乐天溪	111°05'28.91"	30°51'22.91"	3.897	0.684	0.732	711	68	736	0.10	88	1985/12/31
33	长江	黄柏河	111°16'20.62"	30°44'55.89"	4.055	0.122	0.034	402	51	656	0.13	112.7	2022/6/14

注:L_M、L_T和L_{MT}分别为干流M、支流T以及交汇后河道MT受影响的长度;B_M、B_T和B_{MT}分别为干流M、支流T以及交汇后河道MT的河 道宽度;β为支流T与干流M河道宽度的比值;ψ为河道交汇角.

系符合以下公式:

 $\cos z = \tan \theta_c / \tan \theta_g$

角, θ g是地表坡度。当地表坡度远大于河床梯度时, 河道交汇角 z 等于 90°。Lubowe(1964)认为河道交 岩陡坎的影响、砂坝影响、构造抬升、泛滥平原中的 汇角也与地形起伏度、水系级数有关。通过对湄公 微地貌影响(如天然堤等)。

河曲流河的研究, Hackney and Carling(2011)认为 (5) 现代曲流河中交汇角出现钝角的原因主要有:曲流 其中: z 是河道交汇角, θ 是干流水系的坡度 河的截弯取直、干流摆动对支流的侵占、曲流河自 身弯曲度发生调整、构造控制、支流冲积扇体和基



图7 长江三峡地区卫星影像 Fig. 7 Images of the Three Gorges's area a. 长江三峡与齐岳山复背斜、横石溪复背斜以及黄陵穹隆之间的位置关系;b.瞿塘峡;c. 巫峡; d.大宁河(大昌镇-巫山镇段),红色虚线为大宁河所穿过的5小型背斜的位置;白色箭头为河流流向

因此,在曲流河中,河道交汇角为钝角是正常 的形态特征,造成钝角的因素有很多,不能将其仅 归因于河流流向发生了倒转。长江宜宾至宜昌段出 现的多条支流与长江干流交汇角为钝角的现象,并 不是长江流向发生过倒转的证据。

3.2 河道宽度

通过公式(1)计算得到的河道宽度与实际测量 的河道宽度相比,二者之间呈现线性正相关关系, R²为0.88(图8)。这表明采用遥感影像测量得到的 河道宽度与计算后所得到的宽度较为接近,可以代 表原始曲流河河道宽度。

3.3 交汇点附近的深切河曲小波分析

河流交汇所导致的M、T、MT河道的过渡区域 和对曲率频谱的扰动程度与河道宽度比(β值)存在 一定相关性。由于沉积物组成、泥砂含量、流速等方 面存在差异,来自干、支流的河水在交汇点处不会 立刻融合在一起,而是会形成一个特殊的接触面, 且水流的冲击力会沿着接触面延伸并作用在河床 及河岸上,最终对河道的形态产生影响。它不仅会 影响到交汇后的河道MT,同时也会反作用影响到 上游的干流M和支流T。当支流宽度和干流宽度的 比值接近1时,支流T对干流M的河曲形态影响较



Fig. 8 The actual width (B_{MT}) and theoretical width (W_{MT}) of the downstream channel.

大;而接近0时,则干流M对支流T的河曲形态产 生很大的影响。

通过图 9、图 10 可以观察到:在交汇点附近干

流M以及支流T受影响的区域,小波功率谱也会消失,小波功率谱的高低反映了干、支流之间的干扰强度,其在大型河流中变化不大。



图9嘉陵江流域河道交汇点曲率及小波功率谱

Fig.9 Curvature and wavelet power spectrum in Jialing River basin

A.1为嘉陵江河道标准化曲率C*与标准化河道长度S*之间的关系,上部的红色数字12-17为干支流交汇点在嘉陵江干流的位置,并用红 色实线标记,黑色虚线为支流对干流的影响范围;A.2、B.1-B.6依次为嘉陵江干流和六个支流的小波功率谱. 黑色虚线为干流对支流的影响范围;所有图件自左至右均为河流从上游向下游方向

3.3.1 嘉陵江

在嘉陵江流域,河道交汇影响最大的支流为交

汇点15处的长滩寺河(β=0.17,ψ=70.6°)。此外,由 小波功率谱可知,在交汇点12、13和14处,嘉陵江



Fig. 10 Curvature and wavelet power spectrum at the intersection point of the Yangtze River

的标准化曲率值C^{*}变小,对应的小波功率谱也大量 消失(图9A.1、9A.2)。除上述情况外,嘉陵江的λ^{*}≈ 4 B_M~40B_M,总体上看变化不大。

3.3.2 长江干流

总体上看,小波功率谱中的标准化弧波长λ*自 上游至下游未发生较大的变化。在交汇点29的上 游方向,标准化弧波长λ*≈4B_M~40B_M;在交汇点29 后,降低为4B_M~32B_M(图10)。受影响最大的支流为 乐天溪(β=0.10,ψ=88°),受影响最小的为沱江(β= 0.51,ψ=47.7°)。二者在8条支流中,其β值分别为最 小值和最大值。

3.4 整个河段的弯曲度、弧波长、振幅

对研究区内河流的弯曲度、弧波长、振幅进行 绘图,可见这三个参数与河流长度均呈现正相关 (图11)。需要特别强调的是,表明深切河曲的弯曲 度、弧波长、振幅均随着河流长度的增加而逐渐变 大。其中与弧波长和振幅相比,弯曲度的斜率通常 小于0.01,这表明弯曲度从上游至下游变化并不明 显;与弯曲度相比,弧波长和振幅的变化较为显著。 Ferguson(1975)通过对 19条英国曲流河形态的研究表明,曲流河的波长与河道宽度和河流流量 基本上呈正相关的线性关系。Frasson et al.(2019) 对亚马逊河曲流河形态的研究也获得了类似结论, 同时也发现弯曲度与河道宽度成负幂指数关系。

4 讨论

4.1 对古长江演化研究的指示

本研究中共统计了179个河道横截面,其中对称河谷有158个,占比88%(图12)。这表明水系在下切过程中并没有发生大规模的侧向侵蚀,而是以向下侵蚀为主,现今通过遥感影像所观察到的水系形态特征与下切前的河曲特征近似。

根据褶皱与河流形成的时间先后顺序,关于 长江的形成主要有"先成河"和"叠置河"两种观点 (Willis et al., 1907; Lee and Chao, 1924; Barbour, 1936)。"先成河"观点认为,河流的形成年代早于褶 皱的年代,河流下切速率与褶皱抬升速率相差不



图 11 嘉陵江与长江河道振幅、弧波长和弯曲度(S)自上游至下游分布情况

Fig. 11 Distribution of arc wavelength, amplitude and curvature (S) of Jialing River and Yangtze River from upstream to downstream



图12 嘉陵江干流河谷横截面

Fig.12 Cross section of the Jialing River valley

三角形所指位置即为河谷位置,其中实心三角形为不对称河谷,空心三角形为对称河谷;数字为拐点编号

大,由于褶皱的隆升,地表水系形态会发生调整。 "叠置河"观点则认为,褶皱先于河流形成,在河流 下切基岩后,其原始形态还可以保留下来。

Ting(1944)认为嘉陵江的合川至重庆段应当

为古长江袭夺后所形成,合川以上为顺向河。根据 对嘉陵江深切河曲的研究,江华军等(2013)将深切 河曲的形成归因于长江溯源侵蚀后所引发的侵蚀 基准面下降造成河流整体下切而形成,并认为四川 盆地内部的嘉陵江为"叠置河"。早在1905年, Kniep(1905)最早提出长江为"叠置河"的观点,并 被 Willis et al. (1907)和 Barbour (1936)所支持。 Abendanon(1908)通过调查,最早发现三峡内部的 大宁河自北向南切穿了5个背斜,并且保留了完整 的曲流河形态(图7)。Barbour(1936)据此认为大宁 河的存在推翻了"长江在三峡地区是先成河"的学 说,甚至认为在三峡地区曾经存在一个夷平面。

Gardner(1975)通过室内试验对格林河、科罗 拉多河以及圣胡安河流域的深切河曲进行了研究, 认为深切河曲完全可以通过"叠置河"方式而形成, 即表层为松散的冲洪积砂层,随后下切形成深切河 曲;而如果增大水槽坡度,则会出现河岸快速侵蚀 破坏,曲流河形态快速变为笔直的河道。Dente et al. (2021)通过对死海周边深切河曲的坡度和形态进 行研究,也同样表明河道坡度大的深切河曲其弯曲 度更高、河谷更宽,表明河流对基岩河岸的侧蚀作 用明显加强。上述研究表明,无论是室内试验,还是 野外观察均表明深切河曲可以通过"叠置河"方式 形成,而且只有当河道坡度不大的时候才能最大程 度地保持曲流河的原始形态。

根据DEM图可见,长江干流在切穿齐岳山背 斜和横石溪背斜时,长江仍然保留了河曲的弧形形 态(图7b和7c),大宁河在切穿五个小型背斜时,保 留了曲流河的形态(图7d)。Yih and Xie(1925)发现 在黄陵背斜处,长江呈现为深切河曲状态。杨达源 (2006)也认为"长江三峡西陵峡下段早在长江贯 通之前就已存在,并发育了河曲,而后形成了深切 河曲"。

由于曲流河只能发育在坡度平缓的松散沉积 物之上,在基岩裸露的背斜上不可能发育曲流河, 而且发育曲流河的河谷宽度要至少是河道宽度的 50倍(Stølum, 1996)。因此,至少在形成深切河曲之 前的曲流河发育时代,古长江及其支流就已经发育 在宽广的河谷之内(或者准平原面上)了。古长江在 曲流河阶段,已经为一条贯穿四川盆地和三峡地区 的大型河流,河道的形态及位置已与现今长江水系 相同。古长江的流向并没有在现有河道上发生过倒 转;如果古长江发生过倒转,则倒转的时间应该在 曲流河状态之前。古长江的河床高程曾经高于(或 者接近于)现今齐岳山背斜和横石溪复背斜,在气 候或构造活动的影响下,古长江下切而形成了峡 谷,长江在四川盆地和三峡地区应当为"叠置河" 成因。

根据河道交汇角、小波分析,以及弯曲度、弧波 长和振幅等平面特征方面的研究,在形态参数上, 发现长江干流与其支流均呈现类似的特征。如果长 江曾经在现有河道上发生过倒转,则其形态参数必 然会出现异常。

4.2 不足之处

在"叠置河"的形成演化过程中,河曲的形态可 能发生了一定的改变,比如:河岸会发生侵蚀造成 河道的弯曲度增加,或者河流发生截弯取直,形成 废弃古河道(Tinkler, 1972)。然而,目前通过遥感影 像所观察到的深切河曲仅仅是曲流河演化过程中 被"瞬间"固定下来的形态。通过Google Earth可以 看到,在长江和沱江干流,以及嘉陵江的阆中至南 充段均分布着类似于牛轭湖的古河道(张斌等, 2007)。但是除此以外,无法确定是否还有其它被后 期侵蚀作用所破坏而消失的古河道。

在深切河曲形成过程中,由于流经地层的岩性 和构造差异,一些河岸可能发生了大面积的崩塌滑 坡,从而造成即使在很短的距离上,河道宽度也发 生了较大变化(Braun, 1983; Harden, 1990)。Braun (1983)对阿巴拉契亚山地区的深切河曲研究后也 发现,页岩分布区的深切河曲宽度是非页岩地区的 2~3倍。Harden(1990)通过对科罗拉多高原中部地 区的研究,发现在基岩抗侵蚀能力强的河段,大多 数深切河曲剖面形态均是对称的;而在抗侵蚀能力 弱的河段,河岸会被快速侵蚀。总体上看,对称河道 的深切河曲通常发育在抗蚀力较强的岩层上,非对 称河道的形态则发育在砂岩和抗蚀力较弱的岩层 上。此外,河流中所携带的沉积物种类也会对波长 产生影响(Schumm, 1967)。在流量相同的情况下, 含有大量砂砾石质的曲流河波长要大于携带砂质 沉积物的曲流河。Harvey(2007)对科罗拉多河的研 究表明河道梯度比岩性对河曲形态的控制更为 显著。

由于我们无法确定古长江为曲流河时的泥砂 成分及含量、河水流量、河流梯度等古水文信息,仅 能基于现今深切河曲所形成的河谷形态、现有河面 宽度等信息,来推测原始曲流河河道宽度,必然会 造成得到的河道宽度数据与古河曲的真实情况存 在一定差异。这可能是造成图8直线的拟合度R²值 为0.88的原因(通常认为R²大于0.9时,方程的拟 合度较好)。

5 结论

(1)交汇角为钝角的情况在现今曲流河中也十 分常见,而且造成交汇角为钝角的原因众多,古深 切河曲交汇角中存在钝角这一现象,并不能作为古 川江发生过倒流的证据。

(2)从上游到下游,长江和嘉陵江干流的标准 化曲率值 C*和标准化弧波长λ*明显降低。通过对 33 个交汇点的分析表明,小波功率谱显示的所有 深切河曲功率谱的变化,可能与干支流河道的交汇 密切相关,在远离交汇影响河段,小波功率谱变化 不大。几乎所有河流的弯曲度、弧波长和振幅均具 有随着河道延伸逐渐升高的趋势。这些参数结果与 现今亚马逊河极为相似,表明古川江并没有在现今 河道上发生过倒转,如果发生倒转也应当是在古河 曲形成之前的某个时期。

(3)在绘制古地理图件时,不能简单的套用现 今水系格局,而应重新寻找更多的证据对古水系图 进行佐证。

参考文献:

李承三.1956.长江发育史[J].人民长江,(12):3-6.

- 廖喜林.1999.逆插支流的演变与河流掉向的关系[J].地质灾 害与环境保护,10(2):14-17+23.
- 唐贵智.2001.长江三峡地区新构造地质灾害和第四纪冰川 作用与三峡形成图集[M].武汉:湖北科学技术出版社.
- 田陵君,李平忠,罗 雁.1996.长江三峡河谷发育史[M].成都: 西南交通大学出版社.
- 王 平,郑洪波,刘少峰.2013.长江中游反向过程——来自四 川盆地东部的构造地貌指示[J]第四纪研究, 33(4): 631-644.

杨达源.2006.长江地貌过程[M].北京:地质出版社.

叶良辅,谢家荣.1925.扬子江流域巫山以下之地质构造及地 文史[J].地质汇报,第7号:69-90.

- 张斌,艾南山,黄正文,易成波,覃发超.2007.中国嘉陵江河曲 的形态与成因[J].科学通报,52(22):2671-2682.
- 赵 诚.1996.长江三峡河流袭夺与河流起源[J].长春地质学院 学报,26(4):69-74.
- Abendanon E C. 1908. Structural geology of the middle Yang-Tzïkiang Gorges[J]. The Journal of Geology, 16 (7): 587-616.
- Addison P S. 2017. The illustrated wavelet transform handbook: Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance [M]. CRC press.
- Barbour G B. 1936. Physiographic history of the Yangtze[J]. Geographical Journal, 87(1): 17-32.
- Braun D D. 1983. Lithologic control of bedrock meander dimensions in the Appalachian Valley and Ridge Province[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 8(3): 223-237.
- Cao L C, Shao L, Xu D, Cui Y C. 2023. Provenance and evolution of East Asian large rivers recorded in the East and South China Seas: A review[J]. Geological Society of America Bulletin, 135(11-12):2723-2752.
- Chang T P, Toebes G H. 1970. A statistical comparison of meander planforms in the Wabash Basin [J]. Water Resources Research, 6(2): 557-578.
- Church M. 1992. Channel morphology and typology.//In: The Rivers Handbook [M]. Eds. P. Calow, P., Petts G., Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W, Wang E, Chen L. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. Tectonics, 23 (1): TC1006.
- Clift P D, Long H V, Hinton R, Ellam R M, Hannigan R, Tan M T, Blusztajn J, Duc N A. 2008. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 9(4):1-29.
- Davis W M. 1893. The Osage River and the Ozark Uplift [J]. Science, 22(563): 276-279.
- Dente E, Lensky N G, Morin E, Enzel Y. 2021. From straight to deeply incised meandering channels: Slope impact on sinuosity of confined streams [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 46(5): 1041-1054.
- Devauchelle O, Petroff A P, Seybold H F, Rothman D H.

2012. Ramification of stream networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(51): P20832.

- Dozier J. 1976. An examination of the variance minimization tendencies of a supraglacial stream [J]. Journal of Hydrology, 31(3-4): 359-380.
- Dury G H. 1954. Contribution to a general theory of meandering valleys [J]. American Journal of Science, 252 (4): 193-224.
- Ferguson R, Hoey T. 2008. Effects of tributaries on main-channel geomorphology [J]. River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network, 183-208.
- Ferguson R I.1975. Meander irregularity and wavelength estimation [J]. Journal of Hydrology, 26(3-4): 315-333.
- Frasson R P D M, Pavelsky T M, Fonstad M A, Durand M T, Allen G H, Schumann G, Yang X . 2019. Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge [J]. Geophysical Research Letters, 46(6): 3252-3262.
- Gardner T W. 1975. The history of Part of the Colorado River and Its tributaries: An Experimental Study [J].Four Corners Geological Society, 8:87-95.
- Gutierrez R R, Abad J D. 2014. On the analysis of the medium term planform dynamics of meandering rivers [J]. Water Resources Research, 50(5): 3714-3733.
- Gutierrez R R, Abad J D, Choi M, Montoro H. 2014. Characterization of confluences in free meandering rivers of the Amazon basin [J]. Geomorphology, 220: 1-14.
- Hackney C, Carling P. 2011. The occurrence of obtuse junction angles and changes in channel width below tributaries along the Mekong River, south-east Asia [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 36(12): 1563-1576.
- Harden D R. 1990. Controlling factors in the distribution and development of incised meanders in the central Colorado Plateau [J]. Geological Society of America Bulletin, 102 (2): 233-242.
- Harvey A M. 2007. High sinuosity bedrock channels: response to rapid incision—examples in SE Spain [J]. Revista C&G, 21(3-4): 21-47.
- Hooke J M. 1986. The significance of mid-channel bars in an active meandering river [J]. Sedimentology, 33 (6): 839-850.
- Hooke J M. 1984. Changes in river meanders: a review of techniques and results of analyses [J]. Progress in Physical Geography, 8(4): 473-508.

- Hooshyar M, Singh A, Wang D B. 2017. Hydrologic controls on junction angle of river networks [J]. Water Resources Research, 53(5): 4073-4083.
- Horton R E. 1932. Drainage-basin characteristics [J]. Transactions, American geophysical union, 13: 350-361.
- Horton R E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of America Bulletin, 56(3): 275-370.
- Howard A D, Hemberger A T. 1991. Multivariate characterization of meandering [J]. Geomorphology, 4 (3-4): 161-186.
- Kale V S. 2005. The sinuous bedrock channel of the Tapi River, Central India: Its form and processes [J]. Geomorphology, 70(3-4): 296-310.
- Kniep A. 1905. Der Yangtze als Weg zwischen den westlichen und ostlichen China [J]. Gerlands Beiträg. z. Geophysik, 7: 1-31.
- Kong P, Granger D E, Wu F Y, Caffee M W, Wang Y J, Zhao X T, Zheng Y. 2009. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River [J]. Earth and Planetary Science Letters, 278(1-2): 131-141.
- Lee J S, Chao Y T. 1924. Geology of the gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the gorges [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 3(3-4): 351-392.
- Leopold L B, Langbein W B. 1966. River meanders [J]. Scientific American, 214: 60-73.
- Lubowe J K. 1964. Stream junction angles in the dendritic drainage pattern [J]. American Journal of Science, 262 (2): 325-339.
- Marani M, Lanzoni S, Zandolin D. 2002. Tidal meanders [J]. Water Resources Research, 38(11): 1225.
- Montgomery D R, Gran K B. 2001. Downstream variations in the width of bedrock channels [J]. Water Resources Research, 37(6): 1841-1846.
- Osterkamp W R, Hedman E. 1981. Perennial-streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in the Missouri River basin [M]. US Government Printing Office.
- Pérez-Peña J V, Al-Awabdeh M, Azañón J M, Galve J P, Booth-Rea G, Notti D. 2017. SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extrac-

tion of swath and normalized river profiles [J]. Computers & Geosciences, 104(C): 135-150.

- Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo A. 1997. Fractal river basins: chance and self-organization [M]. Cambridge University Press.
- Ruben L D, Naito K, Gutierrez R R, Szupiany R, Abad J D. 2021. Meander Statistics Toolbox (MStaT): A toolbox for geometry characterization of bends in large meandering channels [J]. SoftwareX, 14: 100674.
- Schumm S A. 1967. Meander wavelength of alluvial rivers [J]. Science, 157(3796): 1549-1550.
- Speight J G. 1965. Meander spectra of the Angabunga River [J]. Journal of Hydrology, 3(1): 1-15.
- Stark C P, Barbour J R, Hayakawa Y S, Hattanji T, Hovius N, Chen H G, Lin C W , Horng M J , Xu K Q, Fukahata Y. 2010. The climatic signature of incised river meanders [J]. Science, 327(5972): 1497-1501.
- Stølum H-H. 1996. River meandering as a self-organization process[J]. Science, 271(5256): 1710-1713.
- Ting S. 1944. The Origin of the Water-Gaps on the Yangtze and Chialing Rivers[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 24(3-4): 245-258.

- Tinkler K J. 1972. The superimposition hypothesis for incised meanders: a general rejection and specific test [J]. Area,4 (2): 86-91.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 79(1): 61-78.
- Wang P, Zheng H B, Liu S F. 2013. Geomorphic constraints on middle Yangtze River reversal in eastern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 69 (6): 70-85.
- Willis B, Blackwelder E, Sargent R H, Hirth F, Walcott C D, Weller S, Girty G H. 1907. Research in China Vol. II: Systematic geology[M]. Carnegie Institution of Washington.
- Winslow A. 1893. The Osage River and its meanders[J]. Science, 22(546): 31-32.
- Yih L, Xie J. 1925. Geologic structure and physiographic history of the Yangtze valley below Wushan[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 5: 87-109.
- Zheng H B, Clift P D, Wang P, Tada R, Jian J T, He M Y, Jourdan F. 2013. Pre-miocene birth of the Yangtze River [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110 (19): 7556-7561.