

# 贵州落脚河峡谷景观特征及形成机制<sup>\*</sup>

罗书文<sup>1,2</sup>, 杨桃<sup>3</sup>, 潘晓东<sup>1,2</sup>, 陈伟海<sup>1,2</sup>, 邓亚东<sup>1,2</sup>, 覃星铭<sup>1,2</sup>, 黄保健<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;

2. 自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 贵阳市第十二中学, 贵阳 550002)

**摘要:**【目的】探讨以碳酸岩为基岩的贵州落脚河发育出庞大的河曲型岩溶峡谷景观的原因。【方法】根据落脚河峡谷系统的空间展布特征,通过分析区内地形地貌、地质构造和水文等自然条件,探讨落脚河峡谷群的景观特征及形成机制;同时,以区域新构造演进为主线,探讨落脚河峡谷群形成与演化。【结果】1) 落脚河峡谷群全长 61.33 km,共发育了 76 个河曲,其中“Ω”型有 6 个,是岩溶区乃至世界少有大密度的河曲深切型峡谷系统;2) 盆地地形和相对隔水层的存在,使区内形成一个相对封闭的古湖盆,从而为河曲的形成提供了孕育环境;3) 地壳抬升,六冲河溯源侵蚀,使封闭湖盆打开,落脚河形成并在湖盆内形成自由河曲;4) 区内平缓的岩层和极其发育北东、北西向的“X”节理,为自由河曲沿既有的方向溶蚀下切提供了水力通道;5) 来自周围非碳酸岩山区的外源水,对研究区内基岩具有较强的溶蚀能力,是加速河流下切的动力之一。【结论】岩溶区存在像落脚河峡谷这样的高密度河曲型峡谷极为稀有,具有较高的旅游观赏价值。落脚河河曲型峡谷因地壳抬升并由早期自由河曲继承性下切而形成,主要经历了湖盆期(孕育期)、自由河曲发育期、河谷深切期等 3 个时期。

**关键词:** 落脚河;峡谷景观特征;峡谷形成机制;岩溶峡谷

**中图分类号:** P642.25

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2019)04-0112-10

落脚河峡谷位于贵州省毕节市区东侧 11 km 的向斜内,它的规模和形态在岩溶区内较为稀有和独特。落脚河峡谷系统在 60 km<sup>2</sup> 范围内发育了 61.33 km 的岩溶峡谷。峡谷蜿蜒曲折,孕育了 76 个河曲,其中标准“Ω”型河曲共 6 个。毕节市新成立的碧海湖新区就建设在这一区域内,为此有关部门将落脚河峡谷系统规划建设成城市景观带。但目前有关落脚河峡谷群的研究甚少,对该峡谷的景观特征及构成、空间展布特征、形成机制,以及在岩溶区的斜坡地带为何能发育出如此庞大的河曲型深切峡谷等一系列核心地学问题,还未被深入地研究和探讨,从而极大地影响了对于该峡谷群旅游开发与保护措施的顺利实施。为此,本研究从落脚河峡谷群景观分布特征、发育地貌环境、区域地质构造特征、河曲形成条件等几个方面,对落脚河峡谷群的形成机制进行了探讨,客观地认识该峡谷的形成机制、地学价值和旅游价值,从而为该峡谷景区的合理规划和科学保护提供充分的地质学依据和参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

落脚河峡谷位于贵州省毕节市,地理坐标为北纬 27°14′16.35″、东经 105°28′39.90″,峡谷段长 61.33 km,由 3 条支流和 1 条干流构成。该峡谷属于云贵高原向四川盆地过渡的斜坡地带,系长江水系乌江流域上游;当地气候为亚热带季风气候,年平均降水量为 751.8~1 217.96 mm。研究区属于山间盆地(即落脚河盆地),盆地内部海拔高程为 1 400~1 460 m,而四周海拔高程大于 1 550 m,其中海拔最高点位于盆地南侧山地,达 1 867 m。落脚河盆地四周为非碳酸岩的中低山,盆地内部为三叠系嘉陵江组(T<sub>1-2j</sub>)碳酸岩地层发育的溶丘洼地。区内地质构造运动复杂,在早白垩世晚期到始新世主要以南北向左旋直扭作用为主,渐新世以来以近东西向挤压的构造

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-11-13 修回日期:2019-01-04 网络出版时间:2019-07-15 12:30

资助项目:国家自然科学基金(No. 41502257);中国地质大调查项目(No. DD20160285;No. DD20179313;No. DD20190022);中国地质科学院院长基金(No. YYWF201638);广西自然科学基金(No. 202018GXNSFBA138051);广西科技攻关计划(No. 14124004-4-6);毕节鸡鸣三省贵州地质公园申报项目

第一作者简介:罗书文,男,高级工程师,研究方向为岩溶水文地貌、洞穴等地质遗迹和岩溶环境;E-mail:luoshuwen6700167@126.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20190715.1230.022.html>

为主。多期构造运动交织在一起,从而使新华夏系构造、东西向构造、南北向、西北向构造、二次张性断裂等一系列复杂的构造体系在研究区内得以形成<sup>[1]</sup>,并使得研究区存在着二叠系、三叠系、侏罗系及第四系等出露地层(图 1)。

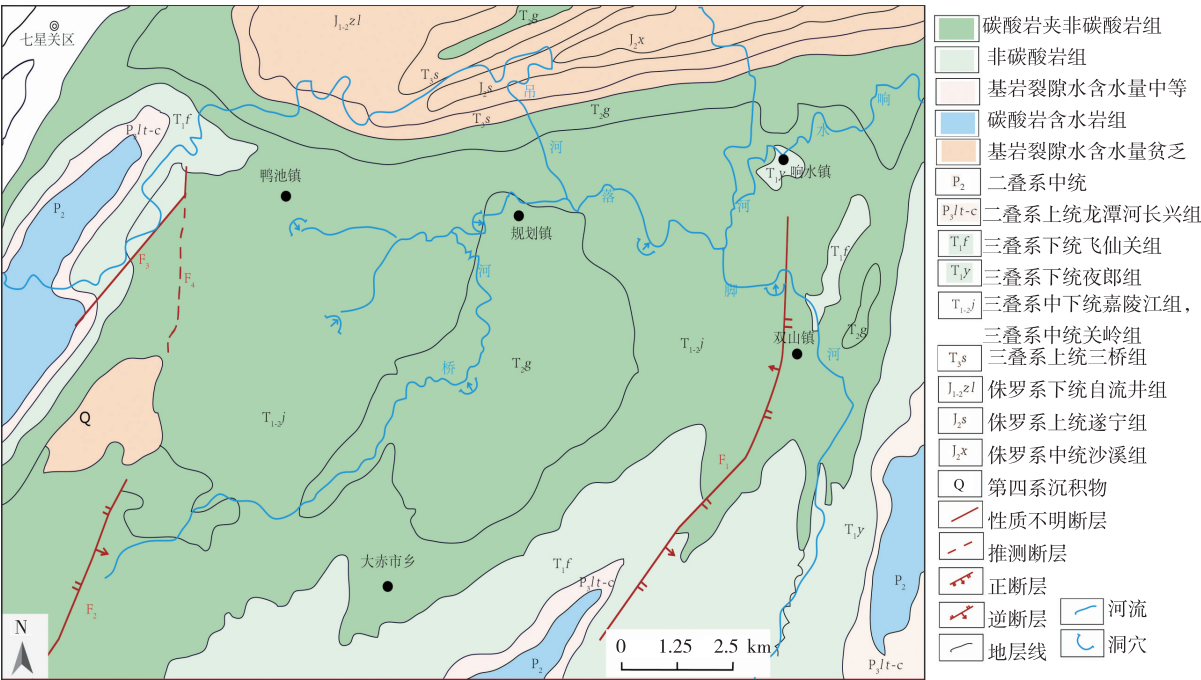


图 1 研究区水文地质情况

Fig. 1 The hydrogeology of the area in this study

1.2 研究方法

落脚河峡谷系统在形态上不仅具有岩溶深切峡谷特性,还具有平原河流弯曲特征,且河曲密度高达 1.2 个·km<sup>-1</sup>,这在在岩溶区较为少有。为此,本研究运用 Google Earth 软件,并实地测量了落脚河峡谷群河曲平面形态和峡谷纵向特征参数,然后从以下几方面来探讨落脚河峡谷形成机理:1) 结合峡谷群景观特征、空间展布、地质构造、区内地貌演化历程和水文条件分析落脚河峡谷群形成动力;2) 根据落脚河河曲形态特征,结合区内地形地貌和区内构造演化历史,以及河曲形成条件,分析落脚河河曲形成原因。最后,以上述研究结果为基础,提出落脚河峡谷系统演化模式。

2 结果与分析

2.1 峡谷景观构成

2.1.1 峡谷形态特征 研究结果显示:干流落脚河峡谷段从落脚河电站大坝至红菠萝村,全长 26.39 km;支流响水河峡谷段由河流出口至贺家寨,全长 14.70 km;支流吊南河峡谷段由河流出口至大田湾,全长 11.78 km;支流桥河峡谷段由河流出口至大田边,全长 8.46 km(表 1)。整个峡谷群发育

于落脚河盆地中心,河流蜿蜒曲折,沟谷深切,极为壮观;峡谷宽窄不一,形态各异,峡谷两岸时而绝壁万仞、时而郁郁葱葱(图 2)。落脚河峡谷系集山、水、石、洞为一体的岩溶地质遗迹景观,具有极高的科学美学价值。

2.1.2 河道形态特征 本研究中的河道形态主要指河流的平面形态。河道蜿蜒曲折的平面几何形态是天然河流中最常见的一种河型,而河道的平面形态是由一个个河曲(河湾)或顺直河道组成。河曲是弯曲河流不可稀缺的

表 1 落脚河峡谷群各形态特征统计

Tab. 1 The morphological feature statistics of Luojiang river gorge group

| 河段名称 | 级别 | 长/km  | 宽/m    | 高度差/m  | 横截面形态            |
|------|----|-------|--------|--------|------------------|
| 落脚河  | 干流 | 26.39 | 30~280 | 60~289 | 箱形与“U”形、“V”形与地缝式 |
| 响水河  | 支流 | 14.70 | 20~160 | 60~120 | 箱形、“U”形、地缝式      |
| 吊南河  | 支流 | 11.78 | 15~180 | 40~125 | 箱形、“U”形、地缝式      |
| 桥河   | 支流 | 8.46  | 30~90  | 40~70  | 箱形、“V”形与“U”形     |

地貌组成单元,它的发展演变直接影响弯曲河流的河床演变和地貌过程<sup>[2]</sup>。对河曲的演变和水动力过程进行研究不仅体现了河曲的科学价值,而且河曲的轮廓形态多变性和优美性也使得河曲本身具有较高的观赏价值。落脚河系统蜿蜒曲折(图 2e),发育了众多河曲(表 2)。

天然河曲是指从弯道进口位置算起,沿水流方向经过弯顶,直至出口位置的整个弯曲的流路。河曲形态集中体现在它具有曲折迂回的平面形态,它的类型一般包括“U”型、“V”型、“Ω”型及鹅头型;其中鹅头型和“V”型是天然河湾发育的前期阶段,“U”型和“Ω”型则分别为天然河湾发育的中间和晚期阶段。由表 2 可以看出,上述几种形态的河曲在落脚河峡谷群都有发育,其中“Ω”型是落脚河曲中最具特色型的形态(表 3)。从张斌等人<sup>[3]</sup>2007 年对中国嘉陵江河曲的形态与成因中所列举国内外的“Ω”河曲形态来看,在这么短距离河道中发育 6 个“Ω”河曲还是很少见。值得一提的是,在大河边村内发育了两个连续河曲(图 2e),其中 1 个封闭率为 0.98,说明这一河曲几乎切穿,通过测算可知它的离心率为 0.3,说明这一河曲非常接近圆形——这在岩溶或深切峡谷中十分稀有,故具有较高的科学和观赏价值。



e 大河边两个“Ω”型河曲

图 2 落脚河峡谷景观

Fig. 2 The landscape of Luojiao river valley

表 2 落脚河峡谷群河曲统计

Tab. 2 The statistics on the meander of Luojiao river gorge group

| 河段名称 | 河湾个数 | 类型 | 河曲带特征参数 |      |          |     |     | 河曲形态               |
|------|------|----|---------|------|----------|-----|-----|--------------------|
|      |      |    | L/km    | S/km | W/km     | λ   | c   |                    |
| 落脚河  | 34   | 深切 | 17.5    | 26.4 | 0.6~1.4  | 0.8 | 1.5 | “Ω”型、“U”型、鹅头型、“V”型 |
| 响水河  | 22   | 深切 | 9.3     | 14.7 | 0.4~1.3  | 0.7 | 1.6 | “Ω”型、“V”型、“U”型、鹅头型 |
| 吊南河  | 8    | 深切 | 7.5     | 11.8 | 0.26~0.8 | 1.5 | 1.6 | “Ω”型、“U”型、鹅头型、“V”型 |
| 桥河   | 12   | 深切 | 7.2     | 8.5  | 0.3~0.9  | 0.7 | 1.2 | “Ω”型、“U”型、鹅头型      |

注:L,S,W,λ,c 分别为河曲带轴长,河道长,河曲带振幅,河曲带波长和弯曲率,下同

2.2 落脚河峡谷景观形成机制

2.2.1 落脚河系统河曲形成条件 1) 断层及节理对河道形态延伸方向的影响。断层和节理是地质构造的薄弱地带,不仅为地下水运移提供天然通道,而且也是地表最容易风化地带。断裂、节理发育区在地表水侵蚀等外力作用下,通常形成沟谷或地表河等地貌形态,在水头差较小的平坦区域断裂、节理为地表水提供了天然通道,水

流沿着该通道逐渐溶蚀、侵蚀将通道扩大形成河道、河谷、峡谷等地貌景观。研究区系向核部,区内节理、断裂较为发育,裂隙达  $5\sim 8$  条  $\cdot \text{m}^{-1}$ 。为了清楚认识区内裂隙、节理与落脚河系统的径流关系,分别对研究区 4 条河流附近区域的节理、裂隙进行了统计(表 4,图 3);同时由上游至下游方向对各河段径流方向也进行了统计分析(图 3)。结果表明,区内节理发育方向主要为北东向和北西向两个方向节理为主(图 3b,d,f,h),4 条河流各段径流方向也主要是这两个方向(图 3a,c,e,g)。因此,可以认为区内节理、裂隙发育方向对河流径流方向具有一定的控制作用。另外,从径流趋势来看,落脚河、响水河、吊南河和桥河的总体流向分别为  $105^{\circ}$ 、 $232^{\circ}$ 、 $145^{\circ}$  和  $30^{\circ}$ ,因此各河流趋势也是沿着北东和北西发育。

表 3 落脚河峡谷“Ω”型河曲特征  
Tab. 3 The characteristics of the “Ω” type meander of Luojiao river gorge

| 名称    | 类别 | 地理坐标                                                  | 位置      | L/km | S/km | M/km | R/km | B/(°) | c     | e    |
|-------|----|-------------------------------------------------------|---------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 落脚河曲带 | 深切 | 北纬 $27^{\circ}13'44.98''$ 、东经 $105^{\circ}31'11.7''$  | 落脚河大河边村 | 0.04 | 1.60 | 0.43 | 0.23 | 33    | 40.00 | 0.98 |
| 落脚河曲带 | 深切 | 北纬 $27^{\circ}13'3.10''$ 、东经 $105^{\circ}31'18.6''$   | 落脚河大河边村 | 0.08 | 1.33 | 0.44 | 0.16 | 235   | 16.62 | 0.94 |
| 落脚河曲带 | 深切 | 北纬 $27^{\circ}14'57.35''$ 、东经 $105^{\circ}27'1.39''$  | 湖塘寨     | 0.24 | 0.78 | 0.31 | 0.14 | 180   | 3.25  | 0.76 |
| 落脚河曲带 | 深切 | 北纬 $27^{\circ}14'29.27''$ 、东经 $105^{\circ}24'42.22''$ | 者巴洞     | 0.16 | 1.14 | 0.27 | 0.13 | 334   | 7.13  | 0.88 |
| 桥河曲带  | 深切 | 北纬 $27^{\circ}14'10.48''$ 、东经 $105^{\circ}24'54.78''$ | 磨香车     | 0.11 | 0.82 | 0.31 | 0.13 | 41    | 7.45  | 0.88 |
| 响水河曲带 | 深切 | 北纬 $27^{\circ}15'35.40''$ 、东经 $105^{\circ}30'41.86''$ | 响水乡     | 0.41 | 1.40 | 0.47 | 0.22 | 292   | 3.41  | 0.77 |

注:表中  $M,R,B,e$  分别为河曲轴长、曲率半径、河曲轴方向和封闭率

表 4 研究区内断裂及节理调查状况  
Tab. 4 The investigation of fracture and joint in the study area

| 河段名称 | 地点  | 地理坐标                                                  | 岩层产状                   | 节理条数 |
|------|-----|-------------------------------------------------------|------------------------|------|
| 落脚河  | 大河边 | 北纬 $27^{\circ}13'34.02''$ 、东经 $105^{\circ}31'5.70''$  | $255\angle 6^{\circ}$  | 49   |
| 响水河  | 响水  | 北纬 $27^{\circ}15'59.13''$ 、东经 $105^{\circ}31'6.06''$  | $222\angle 19^{\circ}$ | 48   |
| 吊南河  | 河边  | 北纬 $27^{\circ}15'19.97''$ 、东经 $105^{\circ}27'4.41''$  | $222\angle 6^{\circ}$  | 58   |
| 桥河   | 羊场坝 | 北纬 $27^{\circ}12'58.42''$ 、东经 $105^{\circ}25'27.87''$ | $214\angle 7^{\circ}$  | 62   |

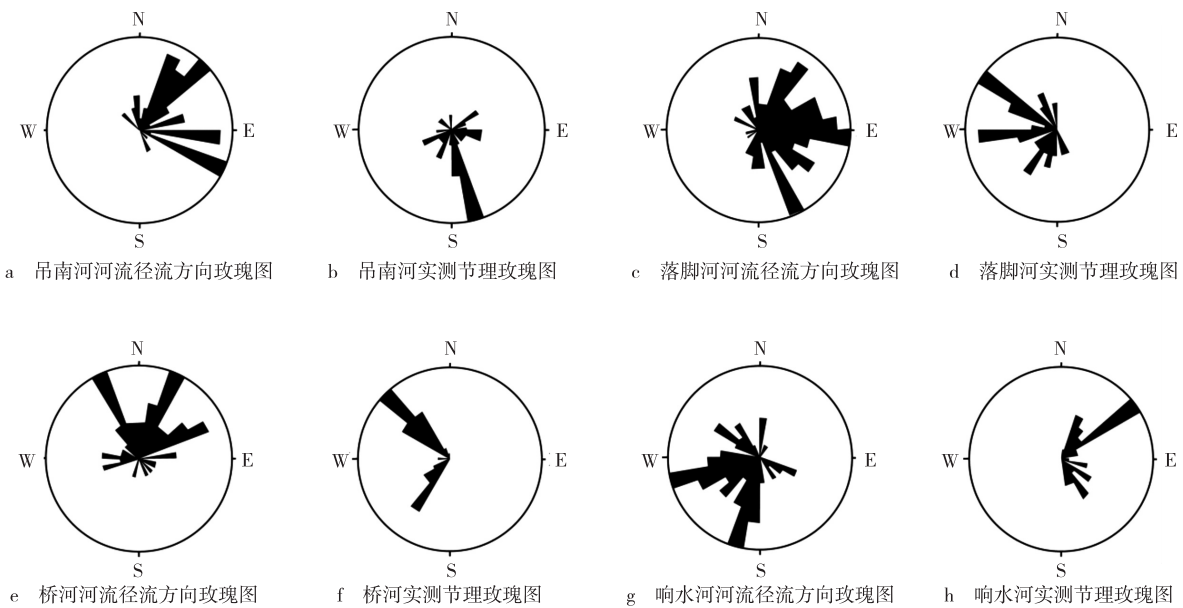


图 3 节理和河流系统各流段径流方向玫瑰图

Fig. 3 The rose map of runoff direction and joints direction

由以上调查分析可知,区内发育的北东向和北西向两组节理、裂隙组成了“X”形的网状结构。这种网状结构

在水平条件下,水流沿裂隙运用很容易到达任何一个方向<sup>[4]</sup>。如图 4 所示,如果河道为直线从节理的任何方向流入,通过该节理网时,水流能继续保持原方向流动(图 4a~c);同样水流通过节理区沿着既定的河流边界流动,也很容易实现变向到达任何方向(图 4d),且不会受到基岩阻力而改变原有的运动方向。

2) 地形条件对河曲形成的影响。Harden<sup>[5]</sup>在分析科罗拉多高原深切河曲分布区的弯曲度与地形坡度之间的关系时认为,河曲发育与地形坡度之间具有密切的负相关关系。有关学者对自由河曲方面的研究较多<sup>[2-3,6-9]</sup>,Yang<sup>[10]</sup>的最小能耗率理论和 Schumm 等人<sup>[11]</sup>的临界比降概念在关于河曲形成的研究中得到普遍认同——他们认为自由河曲的形成与河流比降有极大关系,特别是 Schumm 等人<sup>[11]</sup>认为河流比降在 0.2‰~1‰ 范围内有利于河曲的形成,而江华军等人<sup>[9]</sup>在分析前者理论时则认为在上述范围内自由河曲发育与河流纵比降呈正相关关系。

落脚河系统发育于渐新世形成的向斜盆地内(图 5),落脚河峡谷海拔高程为 1 210 m,但由于现在落脚河电站修后回水,因而河谷水面海拔高程大致保持在 1 260 m。落脚河盆地内地势较为平坦,以溶丘洼地为主,丘高 20~30 m,丘体边坡坡度较小,一般小于 15°,洼地呈碟型或漏斗状。由此可知,盆地内岩溶地貌是幼年期的岩溶地貌景观,系峡谷形成后区内地下水位下降、地表水作用的产物。因此可以认为,在峡谷形成之前,研究区是一个相对封闭的岩溶盆地或岩溶湖泊。因此,研究区内的地形地貌特点满足了落脚河系统中河曲形成所需的河流小比降条件。

2.2.2 落脚河峡谷形成动力条件 1) 新构造运动对峡谷形成的影响。新构造运动是始新世以来以地壳隆升为特点的喜马拉雅运动,运动形式以垂直断块运动为主。地壳抬升时,地下水位下降,排泄基准面下降,地表水水头差增加,溯源侵蚀能力增强导致河流下切形成峡谷。

因此,地壳抬升作用的强度直接关系着河流下切的深浅。研究区在中新世至早更新世时期是以大面积大幅度的间歇性隆升为主,曾经历中新世中至上新世末期和早更新世末期等强烈隆升阶段<sup>[1]</sup>。在此过程中,研究区内主要河流六冲河溯源侵蚀能力远大于其他河流,落脚河为适应区内排泄基面的下降而下切形成现在的河流深切型峡谷。

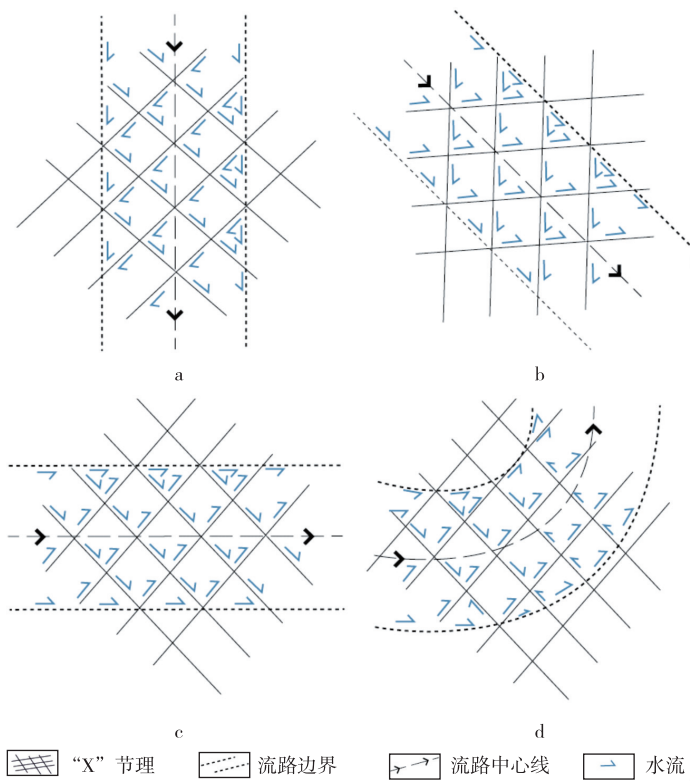


图 4 径流在“X”节理中不同方向的运动示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the runoff in different directions in the “X” joint

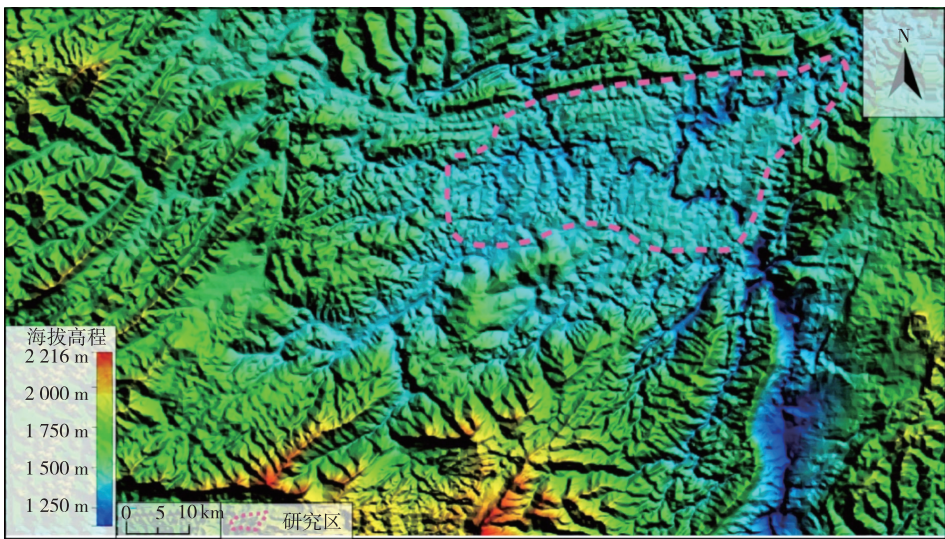


图 5 研究区域地势

Fig. 5 The chorography of the area in this study

2) 水化学对岩溶峡谷形成的影响。水对碳酸盐岩具有溶蚀作用是不争的事实,但水溶蚀能力的强弱与水化学性质相关。落脚河峡谷发育于落脚河向斜核部的三叠系中下统嘉陵江组( $T_{1-2}j$ )薄层灰岩及白云质灰岩地层之中,而盆地四周山地由三叠系下统飞仙关组( $T_1f$ )和侏罗系下统沙溪庙组( $J_1s$ )非碳酸岩地层构成(图1)。因此,落脚河系四周的外源水汇聚而成。朱学稳<sup>[12]</sup>在研究桂林地貌形成时认为:由于外源水的硬度和pH较低,因而它对碳酸盐岩具有更强的侵蚀性,这是桂林峰林形成的重要因素。外源水的这一特性也是岩溶研究界同行的普遍共识<sup>[12-14]</sup>。在岩溶峡谷形成过程中,肖鸿林等人<sup>[15]</sup>认为:溶蚀作用贯穿于岩溶峡谷发育与演化的始终,在峡谷形成的初期起着主导作用。水在碳酸盐岩裂隙运移过程中,最先发挥作用的是溶蚀作用<sup>[16]</sup>,从原始裂隙溶蚀成为岩溶管道这一过程是漫长的<sup>[17]</sup>,只有溶蚀作用通道打开到一定程度时,溶蚀作用才能很好地进行<sup>[16]</sup>;随着通道逐渐扩大,侵蚀作用才会逐渐加强或超过化学溶蚀作用<sup>[17]</sup>。由此可见,由于落脚河来自周围汇聚的外源水,因此沿着“X”节理或裂隙溶蚀扩大是落脚河峡谷形成原始动力之一,并贯穿峡谷形成与演化的整个过程。

3) 环流侧蚀与岩体崩塌作用对峡谷形成的影响。河水沿河曲运移过程中,在弯曲的河道边界作用下,水流在运用过程中因惯性离心力的存在,主流线会偏向河流的凹岸,从而产生横向比降,由此造成凹岸水位抬升而凸岸水位下降,这样便形成了一个呈螺旋状向下游方向移动的单向环流<sup>[8]</sup>。河流凹岸在这种表层单向环流的作用下,不断遭受冲刷、侵蚀作用。研究区内的水平岩层也被“X”节理、断裂切割呈方块状,当下层岩石受到落脚河环流的冲蚀、侵蚀和溶蚀作用,从而使上层岩体失去支撑,进而在重力作用下产生块体式沿节理面崩塌,使得峡谷后退加宽,谷坡面与节理构造面一致,最后形成陡峭峡谷,也使得河道愈加弯曲。

## 2.3 落脚河峡谷形成与地貌响应

由前面的分析可知,落脚河峡谷两侧是峰洼差较小的溶丘洼地。溶丘洼地形成的水动力作用,并不是一个简单的水流渗透溶蚀过程,而是在地表、地下水系耦合下的双重水文结构的强溶蚀、强侵蚀的动力过程,是地表水网解体转化过程中的高速流场下的岩溶水动力响应,是基面、径流、形态响应系统的阶段表现<sup>[18]</sup>。研究区内溶丘因地壳抬升而形成,研究区内的地下水位下降也因水平岩层棋盘状构造特征而有利于地表水向附近的裂隙汇聚,并通过竖直路径以能量最省方式排入峡谷内。在此过程中,地表水网解体为无数个向心汇流封闭的流域单元。在这些流域单元作用下,地表形成无数的洼地、漏斗和丘峰(图2c,图6)。随着地下水位不断下降,地表水下渗侵蚀、溶蚀能力也逐渐增强;洼地变深,峰洼差变大,地貌形态由溶丘洼地向峰丛洼地发育<sup>[19-20]</sup>。在野角乡茅坪、大银镇香椿坳等两处峰丛洼地(两地位于研究区附近分水岭地带),它们的峰洼差达100~200 m;而落脚峡谷切割深超过250 m,却位于两岸发育峰洼差为20~30 m的溶丘洼地。这充分说明落脚河盆地内的溶丘洼地与区域内附近的其他峰丛洼地非同时代发育,前者发育开始时间远远晚于后者。由图2a可知,在落脚河峡谷两侧海拔高程为1 320 m处和1 210~<1 320 m发育有两层洞穴。由此可以看出,溶丘洼地的形成晚于落脚河峡谷。毕竟,如果溶丘洼地与落脚河同时发育,那么汇入岩溶洼地水流需要通过洞穴排入河内,就会在1 320 m以上高程发育不同高度的洞穴,而据调查在该高程以上未发现洞穴发育。只有溶丘洼地发育晚于峡谷,才在小于或等于1 320 m的高程发育出洞穴。因此,唯一的解释就是峡谷形成时碳酸岩被盖住还未出露地表。

## 2.4 落脚河峡谷形成模式探讨

2.4.1 研究区内地貌演化历程 贵州地貌演化主要经历了大娄山期、山盆期、乌江期等3个地文时期<sup>[21]</sup>。在前人研究的基础上<sup>[1,22-25]</sup>,周德全等人<sup>[26]</sup>勾勒了贵州抬升与地貌演进过程:1) 白垩世晚期到渐新世的燕山运动不仅使贵州地壳抬升,而且地层发生强烈褶皱。燕山运动后,贵州曾长时期处于构造相对稳定阶段,侵蚀作用强于构造抬升速率,地表总体趋向于被夷平的发展态势,于渐新世或中新世早期形成整体起伏不大的地貌形态,并被称为大娄山期地面。2) 渐新世末到中新世中期,在喜马拉雅运动的影响下,区内地壳又开始隆升,大娄山地貌面破坏。进入中新世中期以后,贵州进入第二次构造宁静期,流水作用将依照新的侵蚀基准,破坏大娄山地貌面,并在该地貌面下部形成新的起伏较小的地貌,原地貌仅部分残留并形成山顶面,此过程被称为山盆期;3) 上新世末期至全更新世初期,青藏运动开始(在贵州体现为翁哨运动),将山盆期地貌面抬升,侵蚀基准相对降低,流水进行新一轮的剥蚀作用,此后,贵州进入多期间歇形态抬升,在河流溯源侵蚀作用下,形成宽谷、峡谷等地貌形态,此过程被称为峡谷期。

2.4.2 峡谷形成模式 对峡谷地貌形成模式的研究就是对峡谷形成过程及相关动力因素进行总结。在不同地质背景条件下,峡谷发育的主要动力机制也不同,由此塑造出的峡谷也形态各异。为此,很多学者也做了深入研究,并提出了不同演化模式,例如:张英骏<sup>[27]</sup>提出了“洞穴伏流向峡谷转化的模式”;杨明德<sup>[28]</sup>在岩溶峡谷成因及

演化模式的研究中,认为 W. M. 戴维斯和 W. 彭克峡谷演化模式在岩溶区并不适用,并提出了岩溶峡谷演化模式;韦跃龙等人<sup>[29]</sup>提出了“织金峡谷演化模式”;郭力宇等人<sup>[30]</sup>提出了“金丝峡谷模式”;罗书文等人<sup>[31]</sup>提出了“云贵川鸡鸣三省峡谷模式”;等等。在众多的演化模式研究中,学者们主要集中讨论峡谷动力条件及某一动力系统在不同时期塑造出峡谷不同的横截面形态。然而,除“云贵川鸡鸣三省峡谷模式”<sup>[31]</sup>外,其他研究对平面形态少有报道。

落脚河峡谷在纵向上与其他岩溶峡谷一样,均具备绝壁连绵、斧劈刀削、神秘深邃等雄、奇特征,然而它在横向上所表现出的蜿蜒曲折则是岩溶深切峡谷中少见的奇观。落脚河峡谷的形成可能有 3 种模式:1) 落脚河一开始就与基岩作用下切;2) 落脚河最初为地下河洞穴,后因洞顶崩塌形成;3) 继承性下切,即落脚河最初为自由河曲后沿着自然河曲形态下切。但通过进一步分析不难发现:1) 如果落脚河峡谷在诞生之初就随着研究区构造演化而演化,则由研究区构造演化历史可知研究区内岩溶作用从渐新世开始,而峡谷两肩上岩溶地貌为高差 20~30 m、坡度较缓的溶丘洼地。根据岩溶水文地貌系统论,在切割这么深的区域,周围地貌不可能发育出溶丘洼地,故研究区内的溶丘洼地形成远晚于峡谷的形成。因此,落脚河峡谷形成不可能是第 1 种模式。2) 岩溶区内洞顶崩塌形成峡谷虽然屡见不鲜,不过一般洞顶崩塌后会有残留形成天生桥,落脚河峡谷在总长度达 61.33 km 范围内却无一点上述残留;另外一方面,研究区在形成盆地之后,它的周围和盆地深部都是相对隔水的泥砂岩等非碳酸岩盐,从而形成了相对封闭的盆地,与外界水力联系小,很难形成如此庞大的洞穴系统。因此落脚河峡谷形成也不可能为第 2 种模式。

通过上述分析,可以认为落脚河峡谷是由自由河曲继承性下切形成(第 3 种模式)。Harden<sup>[5]</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也认为,具有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。因此,本研究提出了落脚河峡谷形成的具体模式,即该峡谷主要经历湖盆期(孕育期)、自由河曲形成期和深切期,具体分析如下。

1) 湖盆期或孕育期。晚三叠世晚期到始新世,贵州大陆性地壳处在太平洋板块朝北北西方向对亚洲大陆斜向俯冲作用影响下。到了晚三叠世晚期(二桥组与三桥组之间),一场上升运动(安源运动)发生,从此结束了贵州海相沉积历史。侏罗纪时,贵州境内大型内陆拗陷湖盆形成。而到早白垩世初期,由于南北向左旋直扭性质的断块构造活动日趋强烈,使贵州地层发生了强烈的褶皱(燕山运动)。早白垩世晚期到始新世,贵州大部地区在褶皱的基础上形成众多小型山间断陷谷地或山间盆地<sup>[1]</sup>,而这一时期也构建了落脚河盆地基本骨架。

渐新世以来,随着太平洋板块改变为向北西西方向俯冲及印度和亚洲大陆的碰撞,造成近东西向挤压的构造环境,与前期南北向左旋直扭作用下,使得研究区内形成一系列的东西向或北东向山脉(图 5)。该时期使落脚河盆地进入了一个全封闭状态,同时该盆地接受了渐新世末期较长时间停顿的风化物的湖相沉积(图 6a)。

2) 自由河曲形成期。在中新世至早更新世时期,贵州境内是以大面积大幅度的间歇性隆升为主,曾经历新中新世至上新世末期和早更新世末期等强烈隆升阶段。其中,早更新世末的隆升运动是地史上具有转折意义的构造运动。这次运动使贵州高原掀斜隆起,进而奠定了贵州省境现代的地貌基本轮廓和水系格局,并进入了乌江峡谷侵蚀阶段。随着地壳不断抬升,贵州境内六冲河(乌江上游)溯源侵蚀作用也逐渐加强,汇入六冲河的支流也同样如此。尽管六冲河与研究区形成较大的水头差,研究区内也不会与之有地下水力联系。因为研究区底部是具有隔水能力较强的飞仙关组( $T_1f$ )的泥砂岩(图 1,图 6),所以只能通过地表产生水力联系。只有附近山体被侵蚀、风化作用的不断削低,最后才与落脚河盆地内产生水流联系,形成了落脚河雏形。在溯源作用下,湖水逐渐输干变成了河流,此时河道还是相当平缓,对湖泊沉积物的侵蚀作用还很弱,并达到前文所述的自由河曲形成条件,此时落脚河系统的河曲开始形成(图 6b)。

3) 深切期。在六冲河强烈侵蚀下切作用下,落脚河侵蚀作用得以加强。当河流蚀穿湖相沉积物并进入三叠系的基岩时,落脚河峡谷的形成开始进入深切期(图 6c)。在此之前,落脚河形成了大量的河曲,形成了各河段径流的稳定方向。而“X”节理的岩层发育更加容易,如前文所述,它为保持原来的径流方向提供通道,加之来自四周非碳酸盐的地表水对碳酸岩具有较强的溶蚀能力,从而为河曲的继承性发育提供了保障。随着地壳进一步抬升,落脚河下切作用也逐渐加快,河流侧蚀边坡崩塌等作用加强了落脚河峡谷的发育。在此过程中,落脚河将区内湖相沉积侵蚀带走,使基岩全部裸露出地表。由于地势较为平坦且地层中“X”节理较为发育,两岸地表水为适应区内地下水迅速下降,两岸地表水通过地下裂隙直接汇入落脚河内,因而塑造了两岸的溶丘洼地和洼地内部的落水洞。落脚河峡谷在下切时经历了两个主要时期,在峡谷两边坡分别形成了海拔高程为 1 300 m 左右的洞

穴和当前因水库修建而被淹没的海拔高程为 1 220 m 左右的地下河出口。

### 3 结论

落脚河峡谷群不仅规模宏大,而且形态优美,并发育出众多河曲景观,河曲密度之大,为岩溶区内少有的河曲型深切峡谷,具有较大的科学研究价值和旅游观赏价值。本研究通过深入分析后认为,落脚河峡谷是通过自由河曲继承性下切形成,它的形成动力及条件有:1) 研究区的盆地地貌结构在一定时期内形成了湖相沉积,为落脚河形成自由河曲奠定了物质基础和动力条件;2) 来自四周非碳酸岩区域具有较强溶蚀能力的河水,为河流加速下切提供了动力;3) 水平岩层中发育的“X”节理,为自由河曲继承性下切提供很好水流通路,4) 地壳抬升是落脚河下切的直接动力,边坡崩塌是峡谷扩宽扩大的又一动力。

此外,本研究还认为,落脚河峡谷在形成与演化伴随着贵州高原地貌演化过程:1) 贵州高原地貌演化中的大娄山期为落脚河峡谷湖盆期(孕育期)形成提供地貌条件,并为该峡谷自由河曲形成提供了物质基础;2) 山盆期地壳抬升,大娄山期地貌格局破坏,为落脚河峡谷自由河曲形成提供了动力基础;3) 乌江期地壳间歇性抬升是落脚河继承性下切的直接动力。

### 参考文献:

[1] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1987.  
Guizhou Geology and Mineral Resources Bureau. Regional geology of Guizhou province[M]. Beijing: Geological Publishing House,1987.

[2] 李志威,方春明. 天然河湾极限弯曲度[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,9(3):176-182.  
LI Z W, FANG C M. Limit sinuosity for river bends[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research,2011,9(3):176-182.

[3] 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 B, AI N S, HUANG Z W, et al. The form and cause of the meander of Jialing river in China[J]. Chinese Science Bulletin,2007,52(22):2671-2682.

[4] 罗书文,邓亚东,黄保健. 广西田东棋盘滩地质奇观的形成机理[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2016,48(4):71-76.  
LUO S W, DENG Y D, HUANG B J. Formation mechanization of Chessboard river bed geological wonders in Tiandong county, Guangxi, China[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition),2016,48(4):

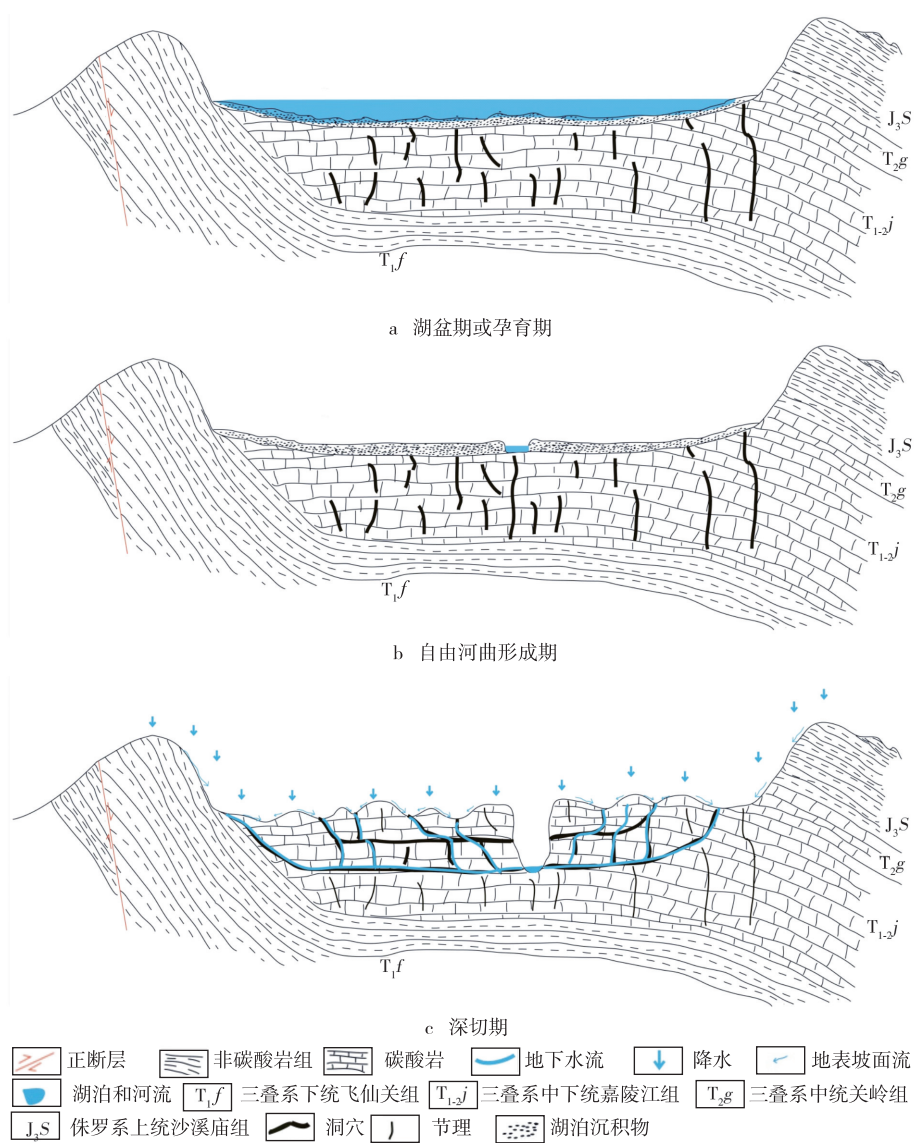


图 6 落脚河峡谷形成模式纵剖面示意  
Fig. 6 The longitudinal profile of the formation mode of LuoJiao river gorge

- 71-76.
- [5] 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(2): 233-242.
- [6] 汪富泉, 曹叔尤, 丁晶. 河湾形态演变的自组织及其稳定性[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 7-15.  
WANG F Q, CAO S Y, DING J. Self-organization and stability of form evolution of river bends[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(1): 7-15.
- [7] 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.  
BAI Y C, HUANG T, XU D. Fractal and statistic analysis of planar shape of meandering rivers[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9): 1052-1056.
- [8] 林承坤, 陈钦宝. 荆江河曲的成因与演变[J]. 南京大学学报(自然科学), 1965, 9(1): 97-122.  
LIN C K, CHENG Q L. The origin and evolution of Jingjiang river bend[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 1965, 9(1): 97-122.
- [9] 江华军, 李长安, 张玉芬, 等. 嘉陵江古河曲发育的古地理环境重建[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 460-468.  
JING H J, LI C A, ZHANG Y F, et al. The reconstruction of paleogeographic environment for the development of the Jialing river's ancient meander[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 460-468.
- [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]. Nature, 1971, 233(5319): 407-409.
- [12] 朱学稳. 桂林岩溶地貌[M]. 北京: 地质出版社, 1987.  
ZHU X W. Guilin karst landform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [13] 熊康宁. 关于锥状喀斯特与塔状喀斯特的水动力成因过程: 以黔中地区为例[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 237-246.  
XIONG K N. Hydrodynamic genetics of cone karst and tower karst: with special reference to the middle Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 1994, 13(3): 237-246.
- [14] 刘再华. 外源水对灰岩和白云岩的侵蚀速率野外试验研究: 以桂林尧山为例[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 1-4.  
LIU Z H. Field experimental research on the corrosion kinetics of limestone and dolomite in allogenic water: case from Yaoshan Mt., Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(1): 1-4.
- [15] 肖鸿林, 邹成杰. 喀斯特峡谷成因及数学模型研究: 以猫跳河、六冲河为例[J]. 中国岩溶, 1997, 16(2): 105-112.  
XIAO H L, ZOU C J. The genesis of karst canyon and its mathematical model: case study of Maotiao and Liuchong rivers [J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(2): 105-112.
- [16] 邹成杰. 岩溶管道水汇流理论研究. 中国岩溶, 1992, 11(2): 119-130.  
ZOU C J. Study on the confluence theory of karst pipe-flow[J]. Carsologica Sinica, 1992, 11(2): 119-130.
- [17] PALMERA N. Recent trends in karst geomorphology[J]. Journal of Geological Education, 1984, (32): 247-253.
- [18] 罗书文, 张远海, 陈伟海, 等. 基于流域水文地貌系统的清江流域地貌研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(3): 1646-1649.  
LUO S W, ZHANG Y H, CHENG W H, et al. Study on land from of Qingjiang river basin on the system of land-form hydrological of basin[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(3): 1646-1649.
- [19] 杨明德, 覃明, 梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京: 地震出版社, 1998.  
YANG M D, TAN M, LIANG H. Karst basin hydrological and geomorphologic system[M]. Beijing: Seismological Press, 1998.
- [20] 罗书文, 陈伟海, 黄保健, 等. 贵州喀斯特流域水文地貌系统演化[C]//全国第十五届洞穴学术会议暨乐业·凤山地质公园发展研讨会议论文选集. 北京: 地质出版社, 2012.  
LUO S W, ZHANG Y H, CHEN W H, et al. Evolution of hydrological and geomorphic systems in karst watershed of guizhou[C]//The 15th national cave academic conference & Leye-Fengshan geopark development seminar discussion collection. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [21] 杨怀仁. 贵州中部之地形发育[J]. 地理学报, 1944, 11: 6-12.  
YANG H R. Development terrain on middle plateau of Guizhou[J]. Journal of Geographical Sciences, 1944, 11: 6-12.
- [22] 杨明德, 何才华. 贵州地貌发育的基本特征[J]. 贵州地质科技情报, 1976(11): 1-8.  
YANG M D, HE C H. Basic characteristics of Guizhou landform[J]. Guizhou Geological Science And Technology Intelligence, 1976(11): 1-8.
- [23] 李兴中. 贵州高原喀斯特区地文期辨析[J]. 贵州地质, 2001, 18(3): 182-186.  
LI Z X. Analysis of physiographic stage in the karst region of Guizhou plateau[J]. Guizhou Geology, 2001, 18(3): 182-186.
- [24] 高道德, 张世丛, 毕坤, 等. 黔南岩溶研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986.  
GAO D D, ZHANG S C, BI K, et al. Study on karst of south Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1986.
- [25] 林树基, 周启永, 陈佩英. 贵州的上新生界[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.  
LIN S J, ZHOU Q Y, CHEN P Y. Upper new territories in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994.
- [26] 周德全, 刘秀明, 姜立君, 等. 贵州高原层状地貌与高原抬升[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 79-84.

- ZHOU D Q, LIU X M, JIANG L J, et al. Step-like land-forms uplift of Guizhou plateau[J]. Earth and Environment, 2005, 33(2): 79-84.
- [27] 张英骏. 喀斯特地区地下地形向地表地形的转变过程[M]//中国地理学会地貌专业委员会. 喀斯特地貌与洞穴研究. 北京: 科学出版社, 1990.
- ZHANG Y J. The transformation process from underground topography to surface topography in karst area [M]//Geomorphology committee of the Geographical Society of China. Study on karst geomorphology and cave. Beijing: Science Press, 1990.
- [28] 杨明德. 岩溶峡谷的成因及演化模式[C]//中国地质学会第四届岩溶学术会议论文选集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- YANG M D. The genesis and evolution mode of karst canyon[J]. Selected works of the 4th karst academic conference of China geological society. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1995.
- [29] 韦跃龙, 陈伟海, 罗幼侃, 等. 贵州织金洞世界地质公园喀斯特成景机制及模式研究[J]. 地质论评, 2018, 64(2): 459-475.
- WEI Y L, CHEN W H, LUO J K, et al. Study on the karst landscape formation mechanism and model of the Zhijindong cave global geopark, Guizhou province[J]. Geological review, 2018, 64(2): 459-475.
- [30] 郭力宇, 尤向治, 吴成基, 等. 陕西商南金丝峡地质公园岩溶峡谷演化模式研究[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 826-834.
- GUO L Y, YOU X Z, WU C J, et al. A study of the karst valley landscape and the evolution model of Shangnan Jin-sixia geopark in Shaanxi province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 826-834.
- [31] 罗书文, 杨桃, 邓亚东, 等. 云贵川鸡鸣三省大峡谷景观特征及形成机理研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 49-56.
- LUO S W, YANG T, DENG Y D, et al. On landscape characteristic and formation mechanism of Yunguichuan big valley[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2018, 43(2): 49-56.

## On Landscape Characteristic and Formation Mechanism of Luojiang River Gorge in Guizhou Province

LUO Shuwen<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>3</sup>, PAN Xiaodong<sup>1,2</sup>, CHEN Weihai<sup>1,2</sup>,  
DENG Yadong<sup>1,2</sup>, QIN Xingming<sup>1,2</sup>, HUANG Baojian<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin Guangxi 541004; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin Guangxi 541004; 3. Number Twelve Middle School of Guiyang, Guiyang 50002, China)

**Abstract:** [Purposes] To discuss why there are a large meandering river with carbonate rock as the bedrock in Luojiang river, Guizhou province. [Methods] According to the spatial distribution characteristics of the Luojiang river gorge system, by comprehensively analyzed the natural conditions such as topography, geological structure and hydrology in the area to explore the landscape characteristics and formation mechanism of the Luojiang river gorge group. At the same time, taking the evolution of regional neotectonics as the main line, the formation and evolution of the Luojiang river gorge group are discussed. [Findings] 1) The Luojiang river gorge group has a total length of 61.33 km and has 76 meanders, of which 6 are omega-shaped, which is a deep-seated canyon system with few high density in karst areas and even in the world; 2) The topography of the basin and the existence of the relative aquiclude make the area form a relatively closed ancient lake basin, which provides a breeding environment for the formation of meanders; 3) Earth's crust is uplifted and the six red River erodes to its source, opening the closed lake basin, forming a resting river and forming a free meander in the lake basin; 4) The gentle rock strata in the area and the extremely developed "X" joints in the north-east and north-west directions provide a hydraulic channel for the dissolution and undercutting of the free meander along the existing direction; 5) Exogenous water from surrounding non-carbonated rock mountain areas has strong dissolution ability to bedrock in the study area and is one of the driving forces to accelerate river undercutting. [Conclusions] Such a high-density meandering valley in karst area is extremely rare and has high tourism and ornamental value. The Luojiang meander canyon is a crustal uplift formed by the inherited undercutting of the early free meander, which mainly experienced three periods, namely, the lake basin period, the free meander development period and the valley depth period.

**Keywords:** Luojiang river; landscape characteristics of canyon; formation mechanism of valley; karst gorge

(责任编辑 方 兴)