

# 金沙江金江街段河流阶地年代及对河谷水系演化历史的启示

董 铭<sup>1</sup>, 苏 怀<sup>1</sup>, 史正涛<sup>1</sup>, 明庆忠<sup>2</sup>, 何回丽<sup>3</sup>

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500; 2. 云南财经大学旅游文化产业研究院, 昆明 650221;  
3. 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650201)

**摘要:** 100多年来,关于金沙江独特水系格局的形成历史一直是地学界争论的重要话题之一。多数学者认为,现代金沙江水系是古长江袭夺古红河上游发展过来的。红河海底扇5.5 Ma泥沙供给中断被认为与这一袭夺事件有关。然而,长期以来人们一直没有找到与这一时代相匹配的地貌证据。最近在金沙江金江街段找到了多达8级的河流阶地序列,ESR测年结果显示这些阶地的形成年代为1.07 Ma、0.70 Ma、0.65 Ma、0.51 Ma、0.47 Ma、0.44 Ma、0.30 Ma和0.18 Ma,结合GPS高程测量数据,推算最近1.0 Ma以来的河谷平均下切速率为147 mm/ka。以填充河谷地形为主要手段的古地形恢复结果(基于DEM数据)显示,古长江袭夺古红河上游形成现代金沙江水系发生在这一区域内海拔2000 m左右的古地形面解体之后,依照河谷平均下切速率外推,古地形面解体时代为5.5 Ma,即现代金沙江水系形成于5.5 Ma之后。我们的研究结果与红河海底扇的资料形成一个相互呼应的证据链,为重建现代金沙江水系格局形成历史提供重要依据。

**关键词:** 金沙江;金江街;阶地;水系演化

DOI: 10.11821/dlxb201809009

## 1 前言

金沙江河谷水系的演化历史是国内外地貌学和地质学界研究的热点问题之一<sup>[1-5]</sup>,河流阶地是目前学术界公认的研究河谷水系演化历史的重要信息载体<sup>[6-7]</sup>。通过对河谷两侧阶地年代学和沉积学研究,人们可以确定现代河谷水系的形成时代。然而,目前在金沙江中下游河段(石鼓至宜宾)河流阶地的研究还比较薄弱。主要体现在,以往的研究多集中在测定低阶地的年龄,时代一般不老于晚更新世,而对高阶地,即形成于中更新世、甚至早更新世的阶地研究较少<sup>[8-10]</sup>。究其原因,主要是高阶地在深切河谷区不易保存、而在容易保存的宽阔段落又被巨厚的坡积物覆盖。近年来通过长期野外考察,研究团队在金沙江金江街段找到了多达8级以上的河流阶地,保存如此完整的阶地序列在整个金沙江中下游干流河段都属罕见的。为此,本文对这些阶地进行了系统的年代学研究,以期为金沙江中下游的河谷水系演化历史研究提供重要线索。

收稿日期: 2017-09-18; 修订日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41762014, 41462007, 41362010, 41001010); 云南省应用基础研究计划项目(2013FZ047)  
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41762014, No.41462007, No.41362010, No.41001010; Applied Basic Research Project of Yunnan Province, No.2013FZ047]

作者简介: 董铭(1976-), 女, 吉林白山人, 硕士, 副教授, 主要从事第四纪环境演化与数字地貌研究。

E-mail: dongm2001@sina.com

通讯作者: 苏怀(1977-), 男, 云南保山人, 博士, 副教授, 主要从事河流地貌研究。E-mail: suhuai07@163.com

1728-1736 页

2 阶地序列及形成年代

2.1 阶地序列

金沙江金江街段位于金沙江中游（石鼓至攀枝花），北邻程海、南接宾川盆地，金沙江一级支流宾居河在此与之交汇（图1），是整个金沙江中游河谷谷底较为宽阔的地区。野外调查发现这一地区金沙江至少在河谷谷坡上发育8级以上阶地（图2），各级阶地由低到高描述如下：

T1堆积阶地。河床相砾石层可见厚度8 m以上，上覆2 m左右河漫滩相粉砂层。主

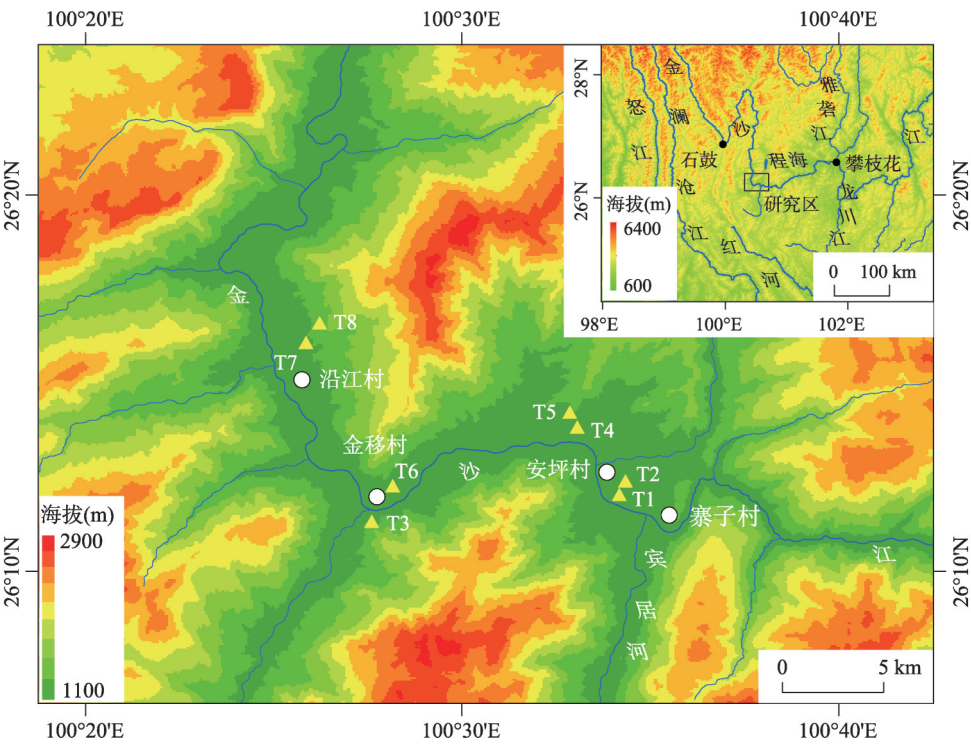


图1 研究区及其各级阶地代表性剖面位置  
Fig. 1 The location of the study area and representative sections of terraces

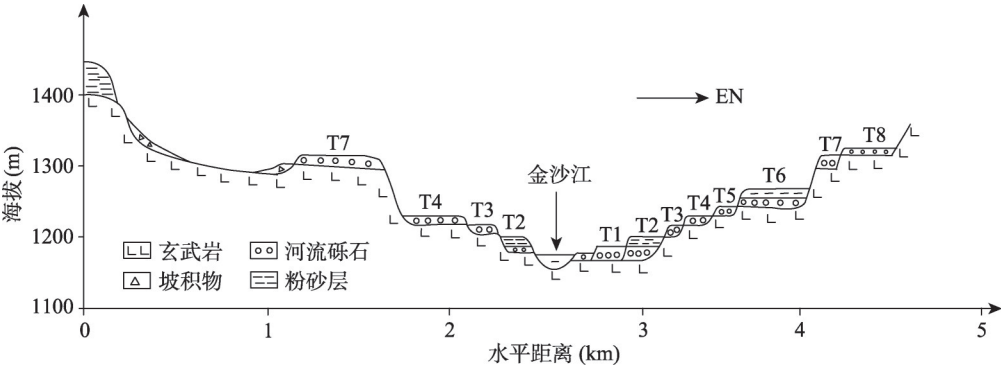


图2 金沙江金江街段阶地序列综合剖面  
Fig. 2 The terrace sequences in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River

要分布在沿江村、安坪村和寨子村等段落,差分GPS (cm级精度)测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔高度在1202.12~1199.37 m,拔河高度约10 m。

T2在金沙江左岸表现为堆积阶地,主要分布在沿江村、寨子村等河谷宽阔的地段,差分GPS测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔高度在1249.33~1231.25 m,拔河高度40~50 m。河床相砂砾石层可见厚度约10 m,上覆3 m左右含砾石透镜体河漫滩相粉砂,之上是10 m左右具有水平层理的亚黏土粉砂层,这套粉砂层在一些文献里被认为是堰塞湖沉积<sup>[11]</sup>。之上有薄层黄土覆盖。在金沙江右岸,该级阶地基座出露,基座为二叠系玄武岩。

T3基座阶地。基座为二叠系玄武岩,零星分布于金沙江两岸,河床相砂砾石层厚约2 m,之上是2 m左右河漫滩相粉砂层覆盖,差分GPS测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔高度在1259.87~1254.55 m,拔河高度约70 m。

T4基座阶地。基座为二叠系玄武岩,在金沙江两岸都有分布。河床相砂砾石层厚2 m左右,之上河漫滩相粉砂层厚2~3 m。差分GPS测量阶地面海拔高度在1270.37~1270.97 m,拔河高度约80 m。

T5基座阶地。基座为二叠系玄武岩,仅零星分布于金沙江左岸,河床相砂砾石层厚1.5 m左右,上覆河漫滩相粉砂层厚约2.5 m,差分GPS测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔高度在1274.97~1275.04 m左右,拔河高度约85 m。

T6基座阶地。基座为二叠系玄武岩,在金移村保存最为完整,河床相砂砾石层厚约3 m,上覆2 m左右的河漫滩粉砂,之上是厚达40 m含亚黏土的粉砂层,其底部依稀可见水平层理,结构与T2阶地上覆亚黏土粉砂层类似。差分GPS测量阶地砾石层顶面海拔1282.43~1282.55 m,拔河高度约92 m。

T7基座阶地。基座为二叠系玄武岩,右岸局部地区河床相砂砾石层下面有一层具水平层理粉砂层,河床相砂砾石层厚约2 m,顶部河漫滩相粉砂层厚约3 m,差分GPS测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔高度在1310.11~1309.87 m,拔河高度120 m。

T8基座阶地。基座为二叠系玄武岩,在金沙江左岸局部段落河流相砂砾石层之下粉砂层下伏。河流相砂砾石层厚2~3 m。差分GPS测量阶地面(河漫滩相粉砂层顶)海拔1335.31~1334.93 m,拔河高度140 m。

野外调查发现,各级阶地河流相砾石成分主要为玄武岩、辉长岩、闪长岩、砂岩、粉砂岩和少量石灰岩,磨圆度为次圆,与现代金沙江河滩砾石一致。

## 2.2 阶地形成年代及河谷下切速率

目前能够测定更新世以来轨道尺度河流阶地年代的最可靠方法是黄河流域普遍采用的黄土—古土壤断代法<sup>[12-13]</sup>,但是在金沙江中下游地区河流阶地上普遍缺乏黄土堆积,这种方法难以推广。近年来,人们尝试使用<sup>10</sup>Be、<sup>26</sup>Al等宇生核素测定金沙江流域的河流阶地暴露年龄和埋藏年龄<sup>[14-15]</sup>。尽管取得了一些重要进展,但还存在一些技术障碍。比如,对暴露年龄而言,由于很难准确估算出研究区的侵蚀状况,测年结果与真实值可能存在较大偏差<sup>[16]</sup>,而测定埋藏年龄则需要厚达8.5 m以上的沉积物覆盖在测年样品上才能有效屏蔽宇宙射线的干扰<sup>[17]</sup>,而在金沙江流域覆盖超过8 m以上沉积物河流阶地是比较少见的,多数阶地河流相砾石层加上上覆的盖层也只有2~3 m厚,很难满足测定要求。此外,宇生核素测年费用很高。因此,本文选用价格相对较低、对沉积物覆盖厚度要求不高、且在国内方便测试的电子自旋共振(ESR)测年技术来测定河流阶地的埋藏年龄。实践表明ESR测年技术仍然是目前河流阶地年代学研究的有效手段<sup>[18-19]</sup>。ESR测年技术最大的问题在于残留信号不能被阳光有效晒褪<sup>[20]</sup>,最近笔者通过对现代河漫滩样品测试发

现,在金沙江流域未晒褪的残留信号引起的误差仅有0.01 Ma左右(表1,河漫滩样品),对中更新世以前形成的阶地测年造成的误差(相对误差)还不算大。

ESR年代学样品采自各级阶地河床相砂砾石层上部的砂层,工作剖面多数为机械开挖的新鲜露头。采样点之上至少有2 m以上河漫滩相沉积物覆盖以确保样品自然埋藏后ESR信号不被日光晒褪。除T1和T3阶地外,其余阶地ESR测年材料为石英。T1和T3阶地测年材料为次生碳酸盐。与石英一样,碳酸盐晶胞内的[CO<sub>3</sub>]<sup>2-</sup>基团在射线轰击下也能形成空位,俘获自由电子变成顺磁中心。阶地中的次生碳酸盐ESR年龄代表河流下切,阶地形成,次生碳酸盐发育的年龄,也可以大致代表河流阶地的形成年龄。

样品制备与测量工作在成都理工大学应用核技术研究所进行,样品U、Th、K含量用CIT-3000F数字化全自动铀钍钾谱仪测定,经湿度修正计算得到年吸收量。古剂量则通过建立附加剂量曲线求出、附加剂量采用<sup>60</sup>Co照射,强度分别设为0、400 Gy、700 Gy、1000 Gy、1500 Gy、2000 Gy、3000 Gy、4000 Gy、6000 Gy。顺磁测定在德国ER-200D-SRC电子自旋共振仪中进行,微波频率为9.7652 GHz,功率0.21~0.30 mW,扫场范围3462.5~3550.0 G,中心场3500.0 G。选用E'信号进行拟合推算,附加剂量拟合曲线线性关系良好(图3),各级阶地年代的测试结果如表1所示。

推算河谷下切速率的河流阶地高程,主要采用精度到cm级的差分GPS测量,测点位置选在阶地河床相砂砾石层顶部。这里地层界线清晰便于识别,且与ESR年代学样品采集位置接近,有利于减小下切速率的计算误差。每级阶地的高程以5个平行测点的平均值代表。考虑到同级阶地砾石层顶面的高差变化范围都在1 m左右,推算河谷下切速率时,阶地高程值(单位:m)取整数值。初步推算发现,对于拔河高度超过100 m,时代超过1 Ma的阶地,1 m的高程误差造成的下切速率误差不到1%。

利用拟合手段,建立各级阶地年龄与高程的线性关系,结果表明,1 Ma以来金沙江金江街段河谷下切速率约为147 mm/ka(图4)。该下切速率是金沙江金江街段获取的首个跨度

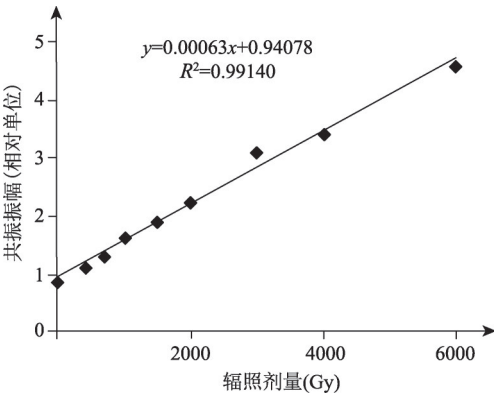


图3 代表性样品附加剂量与ESR信号强度关系

Fig. 3 The relationship between additional dose and ESR signal intensity of the representative sample

表1 金沙江金江街段各级阶地的ESR年龄  
Tab. 1 The ESR ages of terraces in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River

阶地序列	测年材料	U(μg/g)	Th(μg/g)	K(%)	年剂量(mGy)	古剂量(Gy)	年龄(Ma)
T1	次生碳酸盐	1.64±0.20	4.76±0.40	1.41±0.23	2.739	497.1	0.181±0.015
T2	石英砂	3.02±0.30	9.50±0.70	1.35±0.13	4.993	1500.0	0.300±0.030
T3	次生碳酸盐	1.62±0.16	4.87±0.50	1.30±0.08	3.160	1400.0	0.443±0.040
T4	石英砂	3.77±0.35	11.97±1.10	1.57±0.15	3.886	1845.56	0.475±0.045
T5	石英砂	1.50±0.15	4.55±0.40	1.35±0.13	2.905	1493.30	0.514±0.050
T6	石英砂	1.70±0.20	5.45±0.50	1.24±0.15	4.192	2717.9	0.648±0.064
T7	石英砂	1.68±0.15	5.50±0.50	1.10±0.20	3.208	2268.6	0.707±0.070
T8	石英砂	1.64±0.15	4.76±0.40	1.63±0.15	4.772	5106.67	1.070±0.100
河漫滩	石英砂	0.70±0.05	2.11±0.20	1.13±0.10	1.99	25.8	0.012±0.001



超过 1 Ma 年的有绝对测年数据标定的河谷平均下切速率。在金沙江流域,目前干流河谷的平均下切速率能由 8 级以上阶地年龄测算的也仅此一处。

### 3 古水系格局重建

在金沙江中游地区,河谷谷肩至分水岭高度广泛发育着一系列宽阔平坦的古地形面,先前的研究认为,金沙江现代深切河谷的地形就是在这些平坦地形面解体之后形成的<sup>[21-22]</sup>。也就是说,河谷侵蚀是塑造现代金沙江中游地形的最主要过程,而古地形面上的侵蚀是微不足道或次要的<sup>[23]</sup>。显然,如果逆向思考,将河谷中侵蚀掉的物质填回,侵蚀前的古地形就可以大致恢复出来,进而就能重建当时的古水系格局。

结合野外地形调查,设定海拔 1600 m、1800 m、2000 m 及 2200 m 为古地形填充高度以重建相应的古水系格局。模型所用的地形数据为 GDEM 数据,空间分辨率为 30 m×30 m,水系提取利用 ArcGIS 软件中的 ArcSWAT 模块实现。结果发现:填充海拔 1800 m 下的河谷,金沙江与周围水系格局与现代水系格局相差无几;而填充至海拔 2000 m 后,古水系格局开始发生明显变化,龙川江、普渡河等支流不再流向金沙江,而是汇入红河,在青藏高原东南面出现了一个流域面积比现在大得多的古红河水系。进一步将河谷填充至 2200 m 以上,南流的红河水系表现得更为明显(图 5)。该研究结果表明,过去普遍认为的古长江袭夺古红河水系形成现代金沙江水系<sup>[21, 24]</sup>的假说在仅考虑区域地貌主要受河谷侵蚀塑造的层面上是成立的。

根据本文测算的更新世以来的河谷平均下切速率外推,计算海拔 2000 m 地形面解体的时间,结果为 5.5 Ma,即金沙江现代水系格局形成于 5.5 Ma 之后。值得注意的是在我们的古水系重建模型中,长江第一弯附近的河流即使在 5.5 Ma 前也未出现明显改道和袭夺迹象,表明即使长江第一弯真是袭夺弯,它的形成应该早于上新世。这与最近在长江第一弯利用宇宙成因核素测年推算的第一弯袭夺不晚于 9 Ma 的结论<sup>[25]</sup>是一致的。

需要强调的是本文的古水系格局重建模型是在没有考虑区域大断层活动影响下建立的。因为目前很多资料表明金沙江流域的大型断层发生大规模活动的时期主要在渐新世至中新世<sup>[26-28]</sup>,而本文探讨的水系演化问题已经是中新世末到上新世初的事情了。

### 4 讨论

相比黄河流域,作为中国南方最大的河流长江的上游金沙江流域的河流阶地年代学研究是比较薄弱的。以往的研究多获取的是晚更新世以来的河流阶地年龄,而对于早、中更新世的阶地年龄涉及不多<sup>[8-10]</sup>。本文报道的金沙江金江街段河流阶地是迄今为止人们在金沙江干流获取的有年代标定的阶地级数最多的序列。这些有年代标定的阶地了解区域地壳活动历史<sup>[28]</sup>,验证青藏高原东南缘的大地构造学说<sup>[29]</sup>有重要意义。在先前的研究中,有学者以河流阶地高度估算过金沙江金江街段更新世以来的河谷下切速率,大概

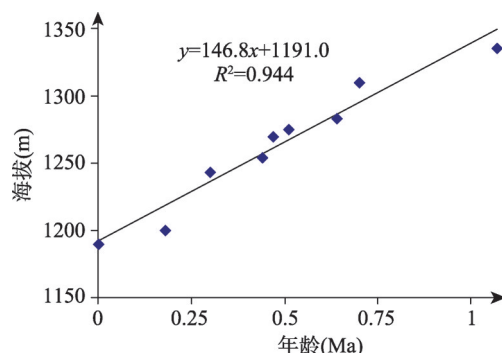


图 4 金沙江金江街段河流阶地高程与年代关系

Fig. 4 The relationship between height and age of river terraces in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River

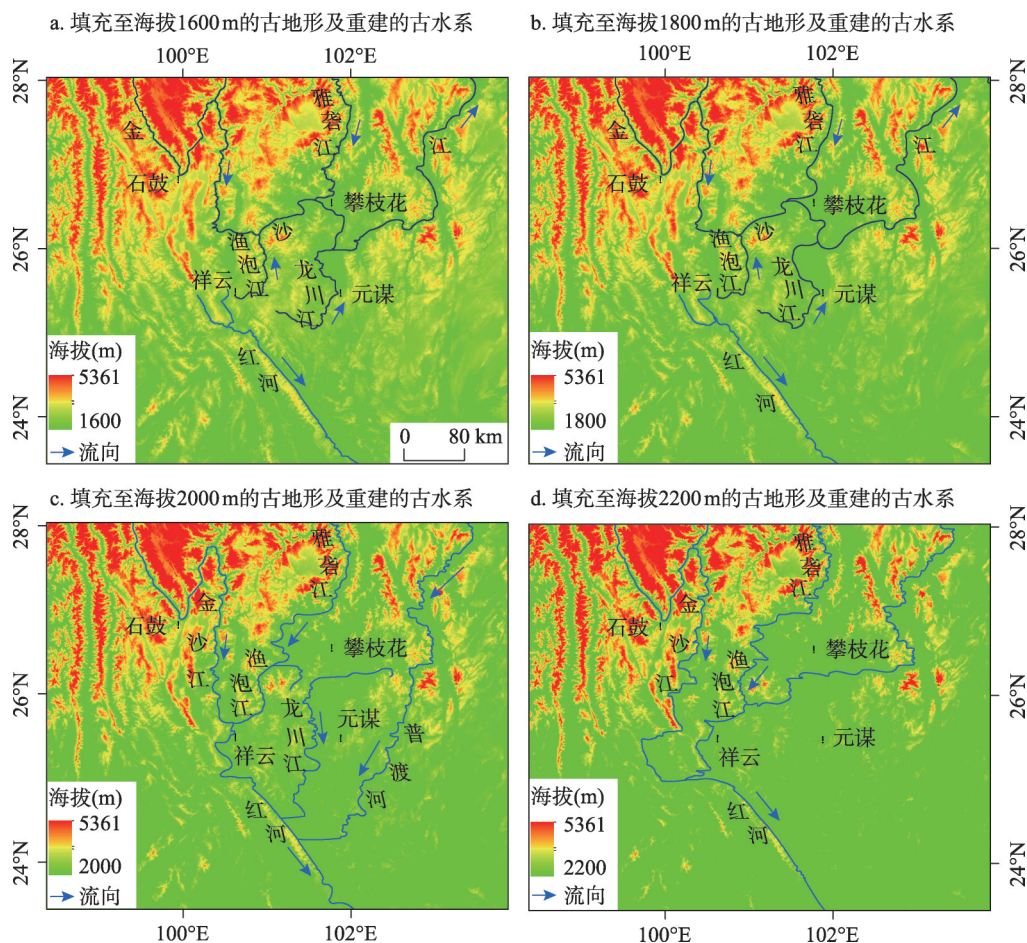


图5 填充至不同海拔高度河谷恢复的古水系场景

Fig. 5 Ancient drainage reconstruction scenarios created by filling the valley to different altitudes (a, b, c and d represent valleys filled to altitudes of 1600 m, 1800 m, 2000 m and 2200 m, respectively, to reconstruct ancient drainage)

在 450 mm/ka 左右, 并将此认为是更新世以来高原东南缘下地壳加速活动的证据<sup>[28]</sup>。然而这一估算缺少绝对测年数据支撑, 而本文通过绝对测年获得的河谷下切速率仅有 147 mm/ka, 比先前的认识要小的多。

多年来, 人们一直试图从河流阶地中直接找出金沙江水系袭夺演化的直接证据<sup>[3, 10, 30-32]</sup>, 但至今没有得到公认可信的结果。究其原因主要是河流阶地的证据与河口沉积学证据在时代上不相匹配。从公认的金沙江水系演化模型<sup>[21]</sup>来看, 如果现代金沙江是古长江向西袭夺古红河水系的结果, 那么在红河河口的沉积物(红河海底扇)就应该有所记录。红河海底扇在地质历史时期是发生过急剧萎缩事件, 只不过时间在 5.5 Ma<sup>[29]</sup>。然而, 迄今为止在金沙江流域所报道过的河流阶地年龄很少有老于更新世的<sup>[3, 8-10]</sup>, 在金江街段获得的最老阶地年龄也只有 1.07 Ma。因此, 利用河流阶地很难直接记录古长江袭夺古红河历史。但是如果结合古地形分析, 就可以利用河流阶地测年数据外推获得与红河海底扇记录年代相当的现代金沙江水系格局的形成年龄(5.5 Ma)。有必要指出的是, 古水系的演化是一个连续变化的过程<sup>[1]</sup>, 本文的研究结果只是将具有现代流向的金沙江水系出现的历史推到 5.5 Ma 以前, 并不意味着之前金沙江水系就没有发生过变化。

## 5 结论

(1) 金沙江金江街段至少发育 8 级以上阶地, 各级阶地的 ESR 年龄分别为: 1.07 Ma、0.70 Ma、0.65 Ma、0.51 Ma、0.47 Ma、0.44 Ma、0.30 Ma 和 0.18 Ma。以河流阶地年代推算的 1.0 Ma 以来河谷的平均下切速率为 147 mm/ka。

(2) 填充河谷恢复古地形结果显示, 现代金沙江水系格局诞生于海拔 2000 m 地形面解体之后, 按河谷下切速率外推时代为 5.5 Ma。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Rong, Willett Sean D, Goren Liran. In situ low-relief landscape formation as a result of river network disruption. *Nature*, 2015, 520: 526-529.
- [2] Devin McPhillips, Gregory D Hoke, Jing Liuzeng, et al. Dating the incision of the Yangtze River gorge at the First Bend using three-nuclide burial ages. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 101-110.
- [3] Kong Ping, Zheng Yong, Caffee Marc W. Provenance and time constraints on the formation of the first bend of the Yangtze River. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2012, 13(6): 1-15.
- [4] Wei Honghong, Wang Erchie, Wu Guoli, et al. No sedimentary records indicating southerly flow of the paleo-Upper Yangtze River from the First Bend in southeastern Tibet. *Gondwana Research*, 2016, 32: 93-104.
- [5] Su Huai, Ming Qingzhong, Pan Baotian, et al. The analysis and discussions on the chronological frame of Jinshajiang River valley-drainage. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(6): 685-692. [苏怀, 明庆忠, 潘保田, 等. 金沙江河谷—水系发育的年代学框架分析与探讨. *山地学报*, 2013, 31(6): 685-692.]
- [6] Hu Zhenbo, Pan Baotian, Guo Lianyong, et al. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 133: 1-14.
- [7] Westaway Rob, Bridgland David R, White Tom S, et al. The use of uplift modelling in the reconstruction of drainage development and landscape evolution in the repeatedly glaciated Trent catchment, English Midlands, UK. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2015, 126(4-5): 480-521.
- [8] Zhang Yechun, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Studies on development of Jinshajiang River during Late Cenozoic. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1998, 10(2): 43-48. [张叶春, 李吉均, 朱俊杰, 等. 晚新生代金沙江形成时代与过程研究. *云南地理环境研究*, 1998, 10(2): 43-48.]
- [9] Xu Qinmian, Yang Dayuan, Ge Zhaoshuai, et al. Terraces along Sanduizi-Wudongde section of Jinsha River. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(5): 609-615. [胥勤勉, 杨达源, 葛兆帅, 等. 金沙江三堆子—乌东德河段阶地研究. *地理科学*, 2006, 26(5): 609-615.]
- [10] Li Langping, Yang Dayuan, Huang Dian, et al. Drainage evolution of Qiaojia-Xinshizhen section of Jinsha River. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 327-333. [李郎平, 杨达源, 黄典, 等. 金沙江巧家—新市镇河段的水系变迁. 第四纪研究, 2009, 29(2): 327-333.]
- [11] Li Qiankun, Xu Zemin, Zhang Jiaming. The ancient landslide and dammed lake found in the Jinsha River near Zhaizicun, Yongsheng, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(6): 729-737. [李乾坤, 徐则民, 张家明. 永胜金沙江寨子村古滑坡和古堰塞湖的发现. *山地学报*, 2011, 29(6): 729-737.]
- [12] Zhu Zhaoyu. The formation of river terraces and evolution of drainage system in the middle Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(4): 429-440. [朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. *地理学报*, 1989, 44(4): 429-440.]
- [13] Pan Baotian, Su Huai, Hu Zhenbo, et al. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: Evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou China. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27/28): 3281-3290.
- [14] Kong Ping, Na Chunguang, Fink David, et al. Moraine dam related to late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, Southwest China, and impacts on the Jinsha River. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27-28): 3224-3235.
- [15] Kong Ping, Darryl E Granger, Wu Fuyuan, et al. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(1-2): 131-

- 141.
- [16] Jakob Heyman, Arjen P Stroeven, Jonathan M Harbor, et al. Too young or too old: Evaluating cosmogenic exposure dating based on an analysis of compiled boulder exposure ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1-2): 71-80.
- [17] Gosse John C, Phillips Fred M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(14): 1475-1560.
- [18] Gilles Rixhon, Rebecca M Briant, Stéphane Cordier, et al. Revealing the pace of river landscape evolution during the Quaternary: Recent developments in numerical dating methods. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 166: 91-113.
- [19] Hu Chunsheng, Xu Youpeng, Hu Chenqi, et al. Genesis of the Qingyijiang River on the northern fringe of Mt. Huangshan, China, based on a combined analysis of gravel fabrics and ESR dates. *Quaternary International*, 2016, 440: 137-146
- [20] Li Desheng, Zhao Xingtian, Ding Zhaozhong, et al. A study of the clock zero of sedimentary loess for ESR dating. *Applied Radiation and Isotopes*, 1993, 44(1-2): 203-206.
- [21] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 2004, 23: TC1006. doi: 10.1029/2002TC001402.
- [22] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao, Zhang Hucai. The evolution of the landform and environment in the region of the three parallel rivers. *Tropical Geography*, 2006, 26(2): 119-122. [明庆忠, 史正涛, 张虎才. 三江并流区地貌与环境演化研究. *热带地理*, 2006, 26(2): 119-122.]
- [23] Clark M K, Royden L H, Whipple K X, et al. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: F03002. doi: 10.1029/2005JF000294.
- [24] Barbour G B. Physiographic history of the Yangtze. *Geographical Journal*, 1936, 87: 17-32.
- [25] Devin McPhillips, Gregory D Hoke, Jing Liuzeng, et al. Dating the incision of the Yangtze River gorge at the First Bend using three-nuclide burial ages. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 101-110.
- [26] Anne Socquet, Manuel Pubellier. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(4): 495-515.
- [27] Tang Yuan, Liu Junlai, Tran My-Dung, et al. Timing of left-lateral shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from zircon U-Pb ages from granitic rocks in the shear zone along the Ailao Shan Range, western Yunnan, China. *International Journal of Earth Sciences*, 2013, 102(3): 605-626.
- [28] Westaway Rob. Active crustal deformation beyond the SE margin of the Tibetan Plateau: Constraints from the evolution of fluvial systems. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(4): 359-417.
- [29] Royden Leigh H, Burchfiel B Clark, King Robert W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, 276: 788-790.
- [30] Zeng Zhaoxuan. Geomorphological problems on river capture of Jinshajiang. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1991, 3(2): 44-48. [曾昭璇. 金沙江袭夺地形探讨. *云南地理环境研究*, 1991, 3(2): 44-48.]
- [31] Ren Xuemei, Yang Dayuan, Han Zhiyong. Terrace evidence of river system change in the upper reaches of Changjiang river. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 413-420. [任雪梅, 杨达源, 韩志勇. 长江上游水系变迁的河流阶地证据. 第四纪研究, 2006, 26(3): 413-420.]
- [32] Ren Meie, Bao Haosheng, Han Tongchun, et al. Geomorphology of the Jinshajiang River capture in northwestern Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 1959, 26(2): 135-155. [任美锒, 包浩生, 韩同春, 等. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题. *地理学报*, 1959, 25(2): 135-155.]
- [33] Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1488-1494.



## The age of river terraces in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River and its implications for valley and drainage evolution

DONG Ming<sup>1</sup>, SU Huai<sup>1</sup>, SHI Zhengtao<sup>1</sup>, MING Qingzhong<sup>2</sup>, HE Huili<sup>3</sup>

(1. College of Tourism and Geography Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Research Institute of Tourism and Culture Industry, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming

650221, China; 3. Kunming Institute of Botany, CAS, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The Jinsha River has attracted considerable attention for nearly a century due to its unusual drainage basin morphology. Most models describing its evolution suggest that the modern Jinsha River, draining the Tibetan Plateau margin, was once a tributary to a single, southward river system called "Paleo-Red River", which drained into the South China Sea and then its flow direction changed to east to join the Yangtze River due to river capture. The Red River submarine fan, considered to have been primarily fed by the Paleo-Red River system, suddenly disappeared at 5.5 Ma provides an important chronological constraint on this reorganization of drainage lines and reversal event. However, no geomorphic evidence has been found to agree with this hypothesized timeframe. Here, we present electron spin resonance (ESR) ages from eight terraces preserved in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River together with their GPS altimetry data. Their ages from old to young are 1.07 Ma, 0.70 Ma, 0.65 Ma, 0.51 Ma, 0.47 Ma, 0.44 Ma, 0.30 Ma and 0.18 Ma, with a calculated average river incision rate of 147 mm/ka since 1.0 Ma. The paleo-topography, reconstructed by filling the deeply incised river gorges with digital elevation model (DEM) data, shows that the upper reach of the Paleo-Red River was captured by the Yangtze River and changed its flow direction eastward at the time of disruption of the 2000 m asl paleo-topographic surface in the Jinsha River drainage basin. The age of the paleo-topographic surface formation would be approximately 5.5 Ma using the average river incision rate extrapolation, suggesting that the present Jinsha River system was born after 5.5 Ma. This data support the chronological constraint from the Red River submarine fan, and hypothesized evolution of the Jinsha River.

**Keywords:** Jinsha River; Jinjiangjie reach; terrace; drainage evolution