

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 6 - 685 - 08

# 金沙江河谷 - 水系发育的年代学框架分析与探讨

苏 怀<sup>1</sup> 明庆忠<sup>1\*</sup> 潘保田<sup>2</sup> 高红山<sup>2</sup> 张文翔<sup>1</sup> 董 铭<sup>1</sup> 史正涛<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学 高原地理过程与环境变化云南省重点实验室, 云南 昆明 650092;  
2. 兰州大学 西部环境变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 通过对近年来金沙江云南段考察研究获得的地貌、湖盆和环境效应记录的总结和梳理, 并结合前人研究成果, 建立了金沙江河谷 - 水系形成演化的年代框架, 认为金沙江河谷 - 水系的演化历史可以分为 3 个阶段, 即上新世 - 早更新世初的孕育阶段、早更新世末 - 中更新世的发展阶段和晚更新世的定型阶段。现代金沙江河谷 - 水系的地貌格局以及干热河谷的景观雏形都形成于早更新世末。

**关键词:** 金沙江; 河谷 - 水系; 年代框架

中图分类号: P931

文献标志码: A

金沙江作为我国第一大河和世界第三长河——长江的上游, 其形成演化不仅关涉到本区域的生态环境、水电站和公路铁路等的建设及安全, 而且影响到长江中下游的环境与社会经济发展。有关金沙江河谷 - 水系的形成时代问题, 争论了近一个世纪, 直到目前还没有一个清晰的轮廓<sup>[1-8]</sup>。其主要原因是不同的研究者拘泥于各自的研究段落和研究手段, 而对流域的整体情况缺乏系统研究。论文在总结近年来本团队最新研究成果的基础上, 结合前人资料, 从河谷水系演化的地貌记录、湖盆沉积记录以及环境效应记录等多个方面, 探讨金沙江河谷 - 水系的形成时代问题, 以期建立一个合理的年代框架。

## 1 地貌记录

野外考察和前人研究资料<sup>[9]</sup>显示, 金沙江河谷

广泛发育了多级层状地貌面。这些地貌面按其分布位置和沉积特征可以分为上部剥(夷)面(包括: 夷平面、剥蚀面或宽谷面)和下部河流阶地两类。通常剥(夷)面上河流沉积物保存极少, 且岩性特征与现代金沙江河流沉积物大相径庭, 是现代金沙江形成前的古水系地貌记录, 而河流阶地由于其有与现代金沙江一致的沉积物通常被认为是现代金沙江河谷演化的直接记录。因此, 可以通过河流阶地、剥(夷)面的年代学研究来确定金沙江河谷 - 水系的形成时代。

以石鼓和攀枝花为界, 金沙江可以分为上游、中游和下游三段。金沙江上游层状地貌面可划分为 1 级夷平面、2 级剥蚀面和 7 级河流阶地。通过年界法和相关沉积法推测夷平面形成于始新世晚期至中新世晚期, 而最低一级剥蚀面(表 1 中 P1)解体于 1.6 Ma<sup>[9]</sup>。河流阶地在剥蚀面解体之后形成, 其中

收稿日期(Received date): 2013 - 07 - 01; 改回日期(Accepted): 2013 - 09 - 20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(U0933604, 40872118, 41001010), 云南省科技发展计划 2009 年重点项目, 教育部科学技术研究重点项目(207102)和云南省中青年学术带头人培养基金。[National Natural Sciences Foundation of China(U0933604, 40872118, 41001010) 2009 Key Program of Yunnan Science and Technology Development Funds and Key Project of the Ministry of Education of China(207102) and Young and Middle-aged Academic Leader Training Foundation of Yunnan Province.]

作者简介(Biography): 苏怀(1977 -), 男, 云南保山人, 副教授, 主要从事河流地貌研究。[Su Huai(1977 -), male, born in Baoshan of Yunnan Province, associate professor, major in research on fluvial landforms.]

\* 通信作者(Corresponding author): 明庆忠(1963 -), 男, 湖北黄冈市人, 教授, 主要从事地理环境演化及旅游规划研究。[Ming Qingzhong(1963 -), male, born in Huanggang of Hubei Province, professor, major in research on geographic environmental evolution and Tourism Planning.] E-mail: mingqz2513@sina.com

最高级阶地汪布顶动物群骨骼化石的 ESR(电子自旋共振) 年龄为  $1.54 \pm 0.178 \text{ Ma}^{[10]}$  ,表明此段金沙江河谷诞生于早更新世早期。

石鼓至攀枝花的中游河段,在以往的研究中层状地貌面年代学数据较为缺乏。近年来本研究组通过对地貌面保存较为完整的金江街段进行了系统考察和年代测定,结果发现:金沙江金江街段层状地貌面至少可以划分 7 级河流阶地、2 级剥蚀面(P1, P2) 和 1 级夷平面(P3) (图 1)。其中第一级阶地(T1) 形成时代为晚更新世,光释光(OSL) 年龄为  $76.3 \pm$

$3.2 \text{ ka}$ ; 第二至第六级阶地(T2 - T6) 形成时代为中更新世, T5 砾石层宇生核素  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$  埋藏年龄为  $614.3 \text{ ka}$ 。按照中、晚更新世的河流下切速率推测第七级阶地年代应为  $1.2 \text{ Ma}$  ,第一级剥蚀面(P1) 年代约为  $2.4 \text{ Ma}$ 。这些测算结果表明现代金沙江中游河谷 - 水系也形成于早更新世。

攀枝花至宜宾的下游河段,层状地貌面年代学研究资料较多,其中鱼鲊至凹嘎河段有测年资料的层状地貌面主要为中、晚更新世河流阶地<sup>[11]</sup>。而早更新世的河流阶地数据主要在巧家及以下河段报道

表 1 金沙江河流阶地序列与年代

[T 代表阶地, P 代表剥(夷)面]

Table 1 The age of Jinshajiang River terrace

河段	晚更新世 - 全新世阶地			中更新世阶地			早更新世阶地, 剥(夷)面				
地貌面级序	T1	T2	T3	T4			T5	T6	T7		
石鼓以上	年代/ka	$7.680 \pm 0.10$	$15.670 \pm 0.50$	$149.65 \pm 11.97$	S5			Q <sub>1</sub> 晚期	Q <sub>1</sub> 中期	$1\,540 \pm 178$	
	测年技术	<sup>14</sup> C	<sup>14</sup> C	TL	地层对比			地貌对比	地貌对比	ESR	
	数据来源	文献[9]	文献[9]	文献[9]	文献[9]			文献[9]	文献[9]	文献[9, 10]	
	地貌面级序	T1			T2 - T4	T5	T6	T7		P1	
金江街	年代/ka	$76.3 \pm 3.2$			中更新世	614.3	710	1 200		2 400	
	测年技术	OSL			地貌外推	<sup>10</sup> Be/ <sup>26</sup> Al	地貌外推	地貌外推		地貌外推	
	数据来源	本文			本文	本文	本文	本文		本文	
	地貌面级序	T2			T3						
鱼鲊	年代/ka	$94.83 \pm 8.06$			$192.07 \pm 11.63$						
	测年技术	TL			TL						
	数据来源	文献[11]			文献[11]						
	地貌面级序	T1	T2	T3	T4			T5	T6	P1	
龙街	年代/ka	$44.52 \pm 3.78$	$52.02 \pm 4.42$	S1	S5			Q <sub>1</sub> 晚期	$1\,540 \pm 178$	$3\,400 - 1\,870$	
	测年技术	TL	TL	地层对比	地层对比			地层对比	地层对比	地层对比	
	数据来源	文献[11]	文献[11]	文献[9]	文献[9]			文献[9]	文献[12]	文献[12]	
	地貌面级序	T2	T3	T4							
凹嘎	年代/ka	$41.89 \pm 3.56$	$115.85 \pm 9.84$	$114.50 \pm 9.73$							
	测年技术	TL	TL	TL							
	数据来源	文献[11]	文献[11]	文献[11]							
	地貌面级序	T1	T2	T3	T4			T5	T6	P1	
巧家	年代/ka	Q <sub>4</sub>	Q <sub>3</sub> 晚期	Q <sub>3</sub> 早期	$960 \pm 100$			1 130	1 200	$1\,871 \pm 180$	
	测年技术	地貌外推	地貌外推	地貌外推	ESR			ESR	ESR	ESR	
	数据来源	本文	本文	本文	文献[13]			本文	本文	本文	
	地貌面级序							T 楼东	T 马坝	T 绥江	T 石龙
巧家 - 宜宾	年代/ka							$1\,022 \pm 100$	$1\,046 \pm 100$	$1\,176 \pm 120$	$1\,195 \pm 120$
	测年技术							ESR	ESR	ESR	ESR
	数据来源							文献[13]	文献[13]	文献[13]	文献[13]

较多。考虑到巧家段不仅是金沙江下游层状地貌面发育较完整的段落(图 2),而且也是金沙江流域少有的剥蚀面上能够保留有一定厚度可供测年的沉积物的地段,研究组利用 ESR 测年技术系统的测定了巧家段最高级阶地(T6)、最低级剥蚀面(P1 红土地剥蚀面)的年龄为 1.20 Ma 和 1.87 Ma。金沙江次高级阶地(T4)的年龄为 1.13 Ma,表明金沙江下游河谷-水系同样形成于早更新世,不过有略晚于上、中游河谷的可能。

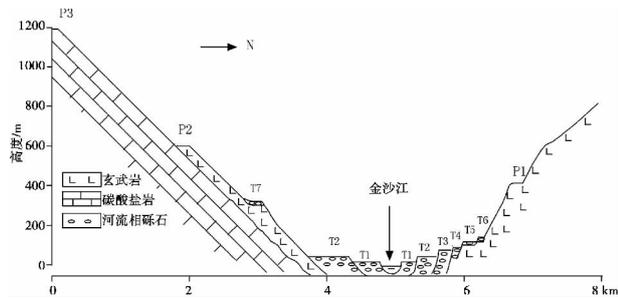


图 1 金沙江金江街段层状地貌面综合剖面

Fig. 1 Layered landform surfaces in Jinjianjie reach of Jinsha River

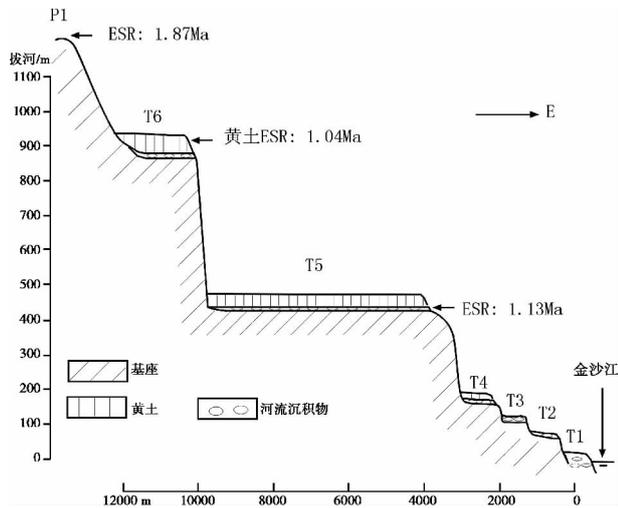


图 2 金沙江巧家段层状地貌面综合剖面

Fig. 2 Layered landform surfaces in Qiaojia reach of Jinsha River

## 2 湖盆沉积记录

金沙江流域新生代以来广泛发育了一系列断陷湖盆和谷地,长期以来人们普遍认为堆积在这些湖盆和谷地中的河流相、湖相沉积物是研究金沙江河谷-水系演化历史的重要线索。目前有可靠年代学研究成果的沉积记录主要有 3 套,即虎跳峡下游的大具湖盆沉积、金沙江中游的昔格达湖盆沉积和元

谋湖盆沉积。大具湖盆的河流相、湖相(含少量冰碛物)沉积可见厚度约 150 m,底部为一套磨圆度较高、岩性复杂的砾石层,从岩石成份和组构特征来看,应为金沙江搬运而来的沉积物。该砾石层钙质胶结层和钙质砂层的 ESR 年龄分别为  $1.95 \pm 0.23$  Ma 和  $1.77 \pm 0.16$  Ma<sup>[14]</sup>,表明石鼓段金沙江河谷-水系的形成时代不晚于早更新世。金沙江中游昔格达湖盆沉积底部也存在一套砾石层。在早先的研究中它被指认为“金沙江冰期”的冰碛物<sup>[15]</sup>,后来人们从砾石磨圆度、岩性特征和组构特征几个方面对比分析发现这套砾石层实为河流相砾石层,而且有可能是金沙江砾石层<sup>[16]</sup>。按此推论金沙江中游河谷-水系的形成时代应该不晚于昔格达组下伏砾石层的沉积时代。从已有的目前还处于争论的昔格达组磁性地层年龄<sup>[17]</sup>外推,这套砾石层年龄应该为 4.2~5 Ma。然而,近年来金江街-攀枝花段 U-Pb 年龄谱、常量元素、微量元素示踪研究证实,这套砾石层并不是金沙江沉积物,而是金沙江形成前西流古水系的产物,昔格达组湖相地层才是现代金沙江形成之初的相关沉积物,它的形成时代也不是上新世,而是早更新世,<sup>10</sup>Be/<sup>26</sup>Al 埋藏年龄为 1.34~1.58 Ma<sup>[18]</sup>。表明金江街-攀枝花现代东流水系形成于早更新世。元谋湖盆上新世开始接受沉积,之后经历过多次湖水的扩张与收缩。一般认为元谋组第三段湖相沉积结束的时代代表了金沙江贯通、湖水外泄、元谋古湖消亡的时代<sup>[12]</sup>。根据磁性地层对比测年外推元谋组第三段结束年龄为 1.87 Ma<sup>[19]</sup>,因此,可以认为元谋段金沙江河谷-水系的形成年代也是早更新世。

除大型断陷湖盆沉积外,金沙江流域沿金沙江河谷还广泛分布着一系列由堵江事件造成的堰塞湖沉积。在汶川地震之前,这些堰塞湖沉积并没有得到广泛关注,仅有奔子栏古堰塞湖做过 U 系测年研究,最老年龄为  $122.0 \pm 12.4$  ka<sup>[20]</sup>,表明堰塞湖形成于晚更新世。汶川地震之后,人们相继开展了金沙江上游金江-其宗古堰塞湖、中游寨子村古堰塞湖以及下游金塘古堰塞湖的调研工作。初步结果显示,金江-其宗古堰塞湖沉积平均厚度 20.9 m,沿河展布 70 km,ESR 年龄为 38 ka<sup>[21]</sup>;寨子村古堰塞湖最大厚度 320 m,沿河展布 46 km<sup>[22]</sup>;金塘古堰塞湖沉积最大厚度超过 200 m,沿河展布 70 km,沉积年龄推测为 20 ka<sup>[23]</sup>。寨子村古堰塞湖沉积由于缺乏测年数据,在前两年的文献报道中常被划分成昔

格达组,但最近本工作组通过 OSL 测年发现,这套沉积物中下部的年龄为  $110.5 \pm 4.7$  ka,远不是传统认为的早更新世或上新世的昔格达组年龄。总体而言,寨子村古堰塞湖沉积的年代与上述的两套堰塞湖沉积年代是大致相当的,都为晚更新世。金沙江河谷在晚更新世大规模出现堰塞湖沉积表明,此时金沙江流域深切河谷的地貌体系已经基本定型,地形起伏同现在相差无几。

### 3 环境效应记录

金沙江河谷一个显著的自然地理特征就是气候干旱,形成以稀树灌草丛为主的干旱河谷景观<sup>[24]</sup>。这种景观形成的主要原因是河谷深切导致翻山气流下沉诱发焚风效应<sup>[25]</sup>。因此,金沙江河谷-水系演化的历史也可以从干热河谷景观的形成历史来推断。多年来有关金沙江干热河谷景观形成历史的众多结论,主要是从古文献查阅和植被现状调查中推测得到的,大致存在两种观点:一种认为干旱河谷形成于历史时期甚至是近一二百年<sup>[26-27]</sup>,另一种观点认为形成于地质历史时期<sup>[28-29]</sup>。近年来本工作组通过广泛考察发现,金沙江河谷广泛分布的黄土沉积和元谋土林的铁板层,可以作为指示金沙江干热河谷景观的重要地质证据。

金沙江河谷的黄土地层研究始于 20 世纪 80 年代<sup>[30]</sup>,但此后一直进展不大<sup>[31]</sup>,尤其是很少有学者将其同干热河谷景观联系起来研究。在北方,黄土主要沉积在半干旱草原地带,黄土的出现常被看作是北方干旱化和荒漠化的重要标志<sup>[32]</sup>。在金沙江流域,我们考察发现,黄土的分布范围与干热河谷的植被分布范围基本重合,都在海拔 1 600 m 以下,说明金沙江河谷中的黄土堆积同北方的黄土堆积一样,也是河谷干旱化的产物。从地层结构特征来看,金沙江流域的黄土也存在深色的古土壤层(图 3)以及古土壤底部的钙质结核(“砂姜”)(图 4)。粒度频率曲线也与北方黄土有相似的形态特征(图 5)。比北方黄土较粗的中值粒径说明金沙江黄土的物源可能是近源,推测为金沙江河滩。在金沙江中、下河谷中,黄土地层出露较好的有长江第一弯、金江街、元谋和巧家几段,其中巧家黄土出露最厚,达 90 m 以上,其次为元谋黄土,厚约 50 m。我们在巧家黄土剖面深 78 m 和 80 m 处测得 ESR 埋藏年龄为 1.01 Ma 和 1.04 Ma,据沉积速率推算底部年龄约为

1.2 Ma。元谋黄土地层覆盖在元谋组之上,从元谋组顶部年龄 1.33 Ma<sup>[19]</sup>推测时代也为早更新世晚期。长江第一弯和金江街的黄土年龄较小,可能为中更新世或晚更新世。长江第一弯黄土剖面中可识别出 2~3 条古土壤,金江街黄土剖面中下部 OSL 年龄为  $93.4 \pm 3.9$  Ma,之下还有同河流相砂层互层的黄土。从金沙江不同段落黄土堆积的时代来看,金沙江在早更新世有部分段落就开始有干热河谷景观形成,而到了中更新世晚期则几乎整个金沙江河谷都成干热河谷。



图 3 金沙江河谷黄土-古土壤

Fig. 3 Paleosol sequence of the loess in Jinshajiang valley



图 4 金沙江河谷古土壤底部钙结核(“砂姜”)

Fig. 4 Calcareous nodule beneath paleosol of the loess in Jinshajiang valley

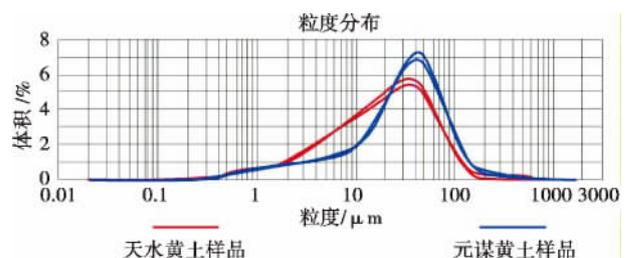


图 5 元谋黄土与西北天水黄土粒度对比

Fig. 5 Comparison of loess grain size between Tianshui and Yuanmou

在元谋干热河谷的土林地层中经常可见多层暗红色的铁质胶结层(图6)。过去人们只注意到了这种铁质胶结层对土林景观有一定保护作用<sup>[33]</sup>,而没有去剖析其环境指示意义。近年来我们研究发现,这种铁质胶结层在反映亚热带森林环境的早更新统元谋组地层中比较少见,而在记录环境已经变干的中更新统地层却十分常见,甚至在局部地区还可以看到现代铁质胶结层正在形成。联想荒漠地区“岩漆”和铁质胶结层的形成过程,我们认为土林地层中铁质胶结的大量出现可能指示元谋河谷干旱化已经到了相当程度。采自物茂土林河湖相地层底部铁质胶结层的石英样品 ESR 埋藏年龄测定结果为  $0.303 \pm 0.030$  Ma,表明金沙江元谋段达到现代程度的干热河谷时代不晚于中更新世中晚期。



图6 元谋土林河湖相地层中的铁质胶结层

Fig. 6 Ferruginous cementation layers in Earth Forest fluvial and lacustrine facies stratum in Yuanmou

除了地貌记录、湖盆沉积记录和环境效应记录外,植物地理分异也反映了金沙江河谷-水系的演化历史。近年来中科院植物所通过对滇橄榄叶绿体

NDA 单倍型的地理空间分布研究发现,金沙江上游的植被(滇橄榄)曾和红河流域的植被有过基因交流,金沙江中下游的滇橄榄也曾和南盘江的滇橄榄有过基因交流。按照最慢或最快的 DNA 突变替代速率( $1.0 \times 10^{-9}$  s/s/y 或  $3.1 \times 10^{-9}$  s/s/y)推算,滇橄榄基因产生隔离突变的时间为 1.16 Ma 或 0.4 Ma<sup>[34]</sup>,表明现代金沙江河谷-水系深切产生生物物种隔离演化的历史可以追溯到早更新世晚期或中更新世。此外,古生物化石记录显示在 1 Ma 前后的中甸盆地还是亚热带森林-草原环境,而不是现在的高山草甸环境,高寒植物没有出现,哺乳动物仍然与华南地区的物种有很大的相似性<sup>[35]</sup>,同样证明能够导致物种隔离的深切河谷出现在早更新世以后。

#### 4 金沙江河谷-水系发育的年代框架

通过上述地貌、湖盆和环境效应记录,我们可以大致勾勒出金沙江河谷-水系发育的年代框架。该框架可以分为3个阶段,即上新世末-早更新世初的河谷-水系孕育阶段、早更新世末-中更新世的河谷-水系发展阶段和晚更新世的河谷-水系定型阶段(图7)。

##### 4.1 上新世末-早更新世初金沙江河谷-水系孕育阶段

尽管经历了中新世以来喜马拉雅运动影响,到上新世末金沙江流域所处地区仍然还是一片地形起伏较小、断陷湖盆和沼泽发育的宽谷平原景观,形成最低一级宽谷面(剥蚀面)P1。从三趾马动物群推算宽谷面的平均海拔在 1 000 m 左右<sup>[36]</sup>。此时现代金沙江河谷-水系体系尚未建立,覆盖在宽谷面上的河流相砾石层岩性单一,完全不同于现代金沙江

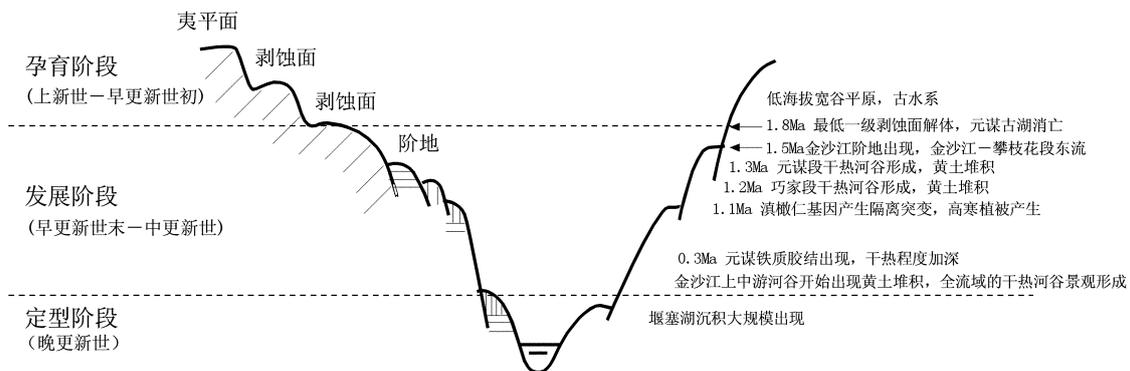


图7 金沙江河谷-水系演化年代框架

Fig. 7 Chronological framework of the evolution of Jinshajiang valley-drainage

砾石。早更新世初,河流下切,剥蚀面解体,1.8 Ma 元谋组单一湖相沉积结束,古湖外泄,水系重组,大具盆地出现最早的金沙江砾石层,金沙江上游河谷形成。从时间上看这一阶段可以同青藏运动 C 幕相对应<sup>[37]</sup>。

#### 4.2 早更新世末—中更新世金沙江河谷—水系发展阶段

1.5~1.3 Ma 金沙江上游和中游出现最老的阶地,金江街—攀枝花段河流流向由西转东,1.2 Ma 金沙江下游巧家段出现阶地,金沙江全面贯通。受深切河谷地形的影响,1.3~1.2 Ma 焚风效应产生,元谋、巧家相继形成干旱河谷,黄土开始堆积。之后滇橄榄仁等亚热带植被跨流域基因交流停止,高寒植被出现并产生分异。联系三峡贯通事件<sup>[38]</sup>,我们认为促成现代金沙江河谷—水系形成的主要动力是“昆仑—黄河运动”<sup>[39]</sup>,它不仅奠定了黄河流域的水系演化格局,而且深刻地影响到了长江流域。到中更新世中晚期,金沙江河谷继续深切,干旱程度加剧,热量增高,0.3 Ma 元谋土林出现铁质胶结层,在此前后长江第一弯、金江街等多个段落出现黄土堆积,金沙江河谷变为干旱河谷,中下游河段甚至演化为干热河谷。

#### 4.3 晚更新世的河谷—水系定型阶段

晚更新世,金沙江峡谷继续深切,按晚更新世阶地的拔河高度判断,下切深度已经接近现代,大规模的堰塞湖事件在全流域频繁出现,现代金沙江河谷—水系流域地貌系统基本定型。

对比黄河流域的水系演化历史<sup>[37]</sup>不难发现,金沙江流域的演化历史与其有很大的相似之处,金沙江、黄河都诞生于早更新世,在早更新世末—中更新世初各自的水系格局基本确定。从长江、黄河都发源于青藏高原,其演化都受青藏高原阶段性隆升控制的观点来看,金沙江应当与黄河演化历史相似,这进一步说明了我们建立的年代框架的可靠性。近年来部分研究者通过对长江中下游和红河入海口的沉积物研究认为,现代金沙江或长江诞生于上新世<sup>[40]</sup>甚至是渐新世末<sup>[41]</sup>。诚然,流域下游的盆地和三角洲地区的确能够保存比上游侵蚀区更完整的水系演化记录,但是这些记录和所有的地层记录一样都存在多解性。比如,同样研究长江中下游沉积物,范代读认为长江贯通三峡是 2.58 Ma<sup>[42]</sup>前,贾军涛、郑洪波却认为是 3.2 Ma<sup>[40]</sup>前,后来郑洪波又将其推到 23 Ma<sup>[41]</sup>前。还有对北部湾红河海底沉积记录

的解读,Clift 结论是金沙江在 24 Ma 前袭夺红河<sup>[43]</sup>,而王英民则认为是在 5.5 Ma<sup>[44]</sup>前。因此,仅依靠单个研究对象不参考其他记录,是很难准确获取金沙江河谷—水系的演化历史。尽管我们开展的地貌记录、湖盆记录和环境效应记录的研究工作还比较粗糙,但其结论符合目前大多数的研究结果。

#### 参考文献(References)

- [1] Barbour G B. Physiographic history of the Yangtze [J]. *Geographical Journal*, 1936, 87: 17–34
- [2] Yuan Fuli. A complementary study of evolution history of the Yangtze river [J]. *Yangtze River*, 1957, (2): 1–9 [袁复礼. 长江河流发育史的补充研究 [J]. *人民长江*, 1957, (2): 1–9]
- [3] Ren Meie, Bao Haosheng, Han Tongchun, et al. Geomorphology of the Jinsha River valley and its river capture in northwestern Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1959, 25(2): 135–155 [任美锷, 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 [J]. *地理学报*, 1959, 25(2): 135–155]
- [4] He Haosheng, He Kezhao, Zhu Xiangmin, et al. A discussion on the problem of river-capturing of the Jinshajiang River in northwest Yunnan [J]. *Geoscience*, 1989, 3(3): 319–330 [何浩生, 何科昭, 朱祥民, 等. 滇西北金沙江河流袭夺的研究——兼与任美锷先生商榷 [J]. *现代地质*, 1989, 3(3): 319–330]
- [5] Wang Kaiyuan. Structural–Geomorphologic Features of the Jinsha River Sector in the Sichuan–Yunnan boundary region [J]. *Yunnan Geology*, 1989, (1): 1–9 [王铠元. 金沙江川滇交界段构造—地貌特征 [J]. *云南地质*, 1989, (1): 1–9]
- [6] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23: TC1006, doi: 10.1029/2002TC001402
- [7] Yang Dayuan, Han Zhiyong, Ge Zhaoshuai, et al. Geomorphic process of the formation and incision of the section from Shigu to Yibin of the Jinshajiang River [J]. *Quaternary sciences*, 2008, 28(4): 564–568 [杨达源, 韩志勇, 葛兆帅, 等. 金沙江石鼓—宜宾河段的贯通与深切地貌过程的研究 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 564–568]
- [8] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao, Su Huai, et al. A discussion on the formation of the Hutiaoxia Gorge on the Jinsha River [J]. *Tropical Geography*, 2007, 27(5): 400–404 [明庆忠, 史正涛, 苏怀, 等. 金沙江虎跳峡成因及形成时代探讨 [J]. *热带地理*, 2007, 27(5): 400–404]
- [9] Zhang Yechun, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Studies on development of Jinshajiang River during late Cenozoic [J]. *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 [J]. *云南地理环境研究*, 1998, 10(2): 43–48]
- [10] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao. The tentative inquiry on the formation time in the Region of Three Parallel Rivers [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2006, 18(4): 1–4 [明庆忠, 史

- 正涛. 三江并流形成时代的初步探讨[J]. 云南地理环境研究, 2006, 18(4): 1-4
- [11] Xu Qinnian, Yang Dayuan, Ge Zhaoshuai, et al. Terraces along Sanduizi - Wudongde section of Jinsha Rive [J]. 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[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 609-615]
- [12] Zhang Yechun, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Studies on development of Yuanmou Basin and Valleys during Late Cenozoic [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1999, 35(1): 199-205 [张叶春, 李吉均, 朱俊杰等. 晚新生代元谋盆地演化与河谷发育研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1999, 35(1): 199-205]
- [13] Li Langping, Yang Dayuan, Huang Dian, et al. Drainage evolution of Qiaojia - Xinchizhen section of Jinshan River [J]. Quaternary Science, 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[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 327-333]
- [14] Zhao Xitao, Zhang Yongshuang, Hu daogong, et al. Discovery of early Pleistocene gravels of the Jinsha River in the Daju Basin, Yunnan, China, and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12): 1381-1386 [赵希涛, 张永双, 胡道功等. 云南丽江地区大具盆地早更新世金沙江砾石层的发现及其意义[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1381-1386]
- [15] Quaternary Glacier Survey Group. Preliminary research on Jinsha Glaciations of Quaternary in Dukou area, Sichuan [G] // Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences eds. Collection on Quaternary Glacial Geology of China. Beijing: Geological Publishing House, 1977: 44-54 [第四纪冰川考察队. 四川渡口地区第四纪金沙冰期的初步探讨[G] // 中国地质科学院地质力学研究所编. 中国第四纪冰川地质文集. 北京: 地质出版社, 1977: 44-54]
- [16] Zhao Xitao, Hu daogong, Zhang Yongshuang. Genesis and age of the gravels underlying the Xigeda Formation of Panzhuhua, Sichuan, China, and Valley Development of the Ancient Jinsha River [J]. ACTA Geoscientia Sinica, 2008, 29(1): 1-12 [赵希涛, 胡道功, 张永双. 四川攀枝花昔格达组下伏砾石层成因和时代探讨与古金沙江河谷发育[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 1-12]
- [17] Qian Fang, Xu Shujin, Chen Fubin, et al. Study on the paleomagnetism of the Xigeda Formation [J]. Mountain Research, 1984, 2(4): 275-281 [钱方, 徐树金, 陈富斌等. 昔格达组磁性地层的研究[J]. 山地研究(现山地学报), 1984, 2(4): 275-281]
- [18] 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 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 278: 131-141
- [19] Qian Fang, Zhou Guoxing. Quaternary Geology and Palaeoanthropology of Yuanmou Yunnan, China [M]. Beijing: Science Press, 1991: 42 [钱方, 周国兴. 元谋第四纪地质与古人类[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 42]
- [20] Zhang Yongshuang, Zhao Xitao, Hu Daogong. An ancient landslide-dammed lake found in the Jinsha River valley near Benzilan - Dêqên, Yunnan, China and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(8): 970-975 [张永双, 赵希涛, 胡道功. 滇西北德钦地区金沙江奔子栏古堰塞湖的发现及意义[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 970-975]
- [21] Wang Qiguo, Ma Guisheng, Yang Qigui. Impact of large-scale ancient landslide lake in Hutiao Gorge river section of Jinsha River on hydropower development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 41(11): 1310-1317 [王启国, 马贵生, 杨启贵. 金沙江虎跳峡上游大型古堰塞湖对河段水电开发的影响[J]. 水利学报, 41(11): 1310-1317]
- [22] Xu Zemin. Deposits of Zhaizicun Landslide-dammed Lake along Jinsha River and its implication for the genesis of Xigeda Formation [J]. Geological Review, 2011, 57(5): 675-684 [徐则民. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. 地质论评, 2011, 57(5): 675-684]
- [23] Zhang Xinbao, David Higgitt, Liu Weiming, et al. Terraces of Ancient Giant Jintang Landslide-dammed Lake in Jinsha River [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(1): 127-128 [张信宝, David Higgitt, 刘维明等. 金沙江下游金塘古滑坡堰塞湖阶地[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 127-128]
- [24] Zhang Rongzu. The dry valleys of the Hengduan Mountains Region [M]. Beijing: Science Press, 1992, 1-9 [张荣祖. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-9]
- [25] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao. New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 99-104 [明庆忠, 史正涛. 三江并流区干旱河谷成因新探析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 99-104]
- [26] Ma Guojun, Li Hongxian. Brief study on historical causes and countermeasures of Dry-hot Valley catastrophes of Jinsha River in Yunnan - on the ecological value of the traditional means of livelihood of the Diand Qiang Nationalities [J]. Guizhou Ethnic Studies, 2012, 33(2): 85-91 [马国君, 李红香. 云南金沙江流域干旱河谷灾变的历史成因及治理对策探究——兼论氏羌族系各民族传统生计方式的生态价值[J]. 贵州民族研究, 2012, 33(2): 85-91]
- [27] Li Jin. Ecological changes of Jinshajiang River drainage [J]. Forum on Chinese Culture, 2003, (1): 40-43 [李锦. 金沙江流域的生态变迁[J]. 中华文化论坛, 2003, (1): 40-43]
- [28] He Yongbin, Lu Peize, Zhu Tong. Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain - Yunnan Plateau [J]. Resources Science, 2000, 22(5): 69-72 [何永彬, 卢培泽, 朱彤. 横断山-云南高原干旱河谷形成原因研究[J]. 资源科学, 2000, 22(5): 69-72]
- [29] Zhou Lin. Vegetation evolution in Yuanmou Dry-hot Valley since Quaternary period [J]. Mountain Research, 1996, 14(4): 239-243 [周麟. 云南省元谋干旱河谷的第四纪植被演化[J]. 山地研究(现山地学报), 1996, 14(4): 239-243]
- [30] Luo Guangzhao, Shenglin. The collapsibility and genesis of loess in Taoyuan, Yunnan, China [J]. Journal of Geotechnical Investiga-

- tion and Surveying, 1984, (5): 14–16 [罗光照, 沈林. 云南涛源黄土的成因及湿陷性[J]. 工程勘察, 1984, (5): 14–16]
- [31] Jiang Fuchu, Wu Xihao, Wang Shubing et al. On the age of loess-al sediment around Qiaojia in the Jinshajiang River valley [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5: 35–40 [蒋复初, 吴锡浩, 王书兵, 等. 金沙江巧家段河谷黄土状堆积的时代问题[J]. 地质力学学报, 1999, 5: 35–40]
- [32] Guo Zhengtang, Ruddiman W F, Hao Qingzheng et al. Onset of Asian Desertification by 22 Ma ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416: 159–163
- [33] Qian Fang, Ling Xiaohui. Formation and pattern of Yuanmou Earth Forest [J]. Science in China: series B, 1989, 19(4): 412–418 [钱方, 凌小惠. 元谋土林成因及类型的初步研究[J]. 中国科学: B 辑, 1989, 19(4): 412–418]
- [34] Zhang Ticao, Hans Peter Comes, Sun Hang. Chloroplast phylogeography of Terminalia franchetii (Combretaceae) from the eastern Sino-Himalayan region and its correlation with historical river capture events [J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2011, 60(1): 1–12
- [35] Ma Xueping, Li Gang, Gao Feng et al. New early Pleistocene mammalian materials from Zhongdian, Yunnan Province, China [J]. Vertebrata Palasiatica, 2004, 42(3): 246–258 [马学平, 李刚, 高峰, 等. 云南中甸新发现的早更新世哺乳动物[J]. 古脊椎动物学报, 2004, 42(3): 246–258]
- [36] Cheng Jie, Liu Xueqing, Gao Zhenji et al. Effect of the Tibetan plateau uplifting on geological environment of the Yunnan Plateau [J]. Geoscience, 2001, 15(3): 290–296 [程捷, 刘学清, 高振纪, 等. 青藏高原隆升对云南高原环境的影响[J]. 现代地质, 2001, 15(3): 290–296]
- [37] Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the late Cenozoic [J]. Science China: Earth Sciences, 1996, 39(4): 380–390
- [38] Li Jijun, Xie Shiyu, Kuang Mingsheng. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation [J]. Geomorphology, 2001, 41(2–3): 125–135
- [39] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian. Discovery and character of the Kunlun–Yellow River Movement [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(10): 833–836
- [40] Jia Juntao, Zheng Hongbo, Huan Xiangtong et al. Detrital zircon U–Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1520–1528
- [41] Zheng Hongbo, Clift Peter D, Wang Ping et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. PNAS, 2013, 110(19): 7556–7561
- [42] Fan Daidu, Li Congxian, Yazumi K et al. Monazite age spectra in the late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run through time [J]. Science in China: Series D, 2005, 48(10): 1718–1727
- [43] Clift Peter D, Blusztajn Jerzy, Nguyen Anh Duc. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet–SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(19): 1–5
- [44] Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1488–1494

## The Analysis and Discussions on the Chronological Frame of Jinshajiang River Valley-drainage

SU Huai<sup>1</sup>, MING Qingzhong<sup>1</sup>, PAN Baotian<sup>2</sup>, GAO Hongshang<sup>2</sup>, ZHANG Wengxiang<sup>1</sup>,  
DONG Ming<sup>1</sup>, SHI Zhengtao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Plateau Geographic Process and Environment Changes, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** On the basis of our new geomorphologic, lacustrine and environmental feedback records and a reassessment of published date, the chronological framework of the evolution of Jinsha River valley drainage is reconstructed. We suggest that the history of the Jinsha River valley drainage formation can be divided into 3 stages, namely embryonic stage (from the Pliocene to Early Pleistocene), initial development stage (from the end of Early Pleistocene to Middle Pleistocene) and shaping stage (later Pleistocene), and also propose the landforms pattern of Jinsha River including Dry-hot Valley should appear around the end of Early Pleistocene.

**Key words:** Jinshajiang River, valley-drainage, chronological frame