中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 4 期: 385 ~ 393
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 华夏山水的由来专题

长江的前世今生

郑洪波[1,2*], 魏晓椿[3], 王平[4], 何梦颖[4], 罗超[4], 杨青[1]

1. 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650091;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

* E-mail: zhenghb_yu@163.com

收稿日期: 2017-02-13; 接受日期: 2017-03-01; 网络版发表日期: 2017-03-23
中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDB03020301)和中国地质调查局大陆架科学钻探项目(编号: GZH201100202)资助

摘要 长江是中华民族的母亲河, 在中华文明历史进程和当代国计民生中占据独特的地位. 长江是世界第三、亚洲第一大河, 在区域宏观地理环境演化中具有标志性意义. 长江的年龄(或者起源与演化历史)作为地球科学界和大众关注的热点, 长期存在重大争议, 从45百万年(始新世)到数万年(更新世晚期)不等, 成为科学界一个著名的"世纪谜题". 对青藏高原东南缘新生代盆地开展年代学与沉积学研究, 揭示出在始新世时期区内存在大型的南流水系, 在渐新世期间(或渐新世末期)南流水系转向东流, 形成长江第一湾(也有写作"弯"). 长江中下游新生代盆地的沉积记录也显示, 长江上游物质在渐新世晚期(或者最晚在渐新世/中新世之交)就已经能够到达下游, 表明贯通东流的长江水系从此诞生. 长江是超大型河系, 其地质演化主要受到区域构造地貌控制. 在新生代, 青藏高原地区岩石圈加厚, 地表隆升; 亚洲东部岩石圈持续伸展减薄, 西太平洋边缘海扩张, 导致中国西高东低的宏观地形格局逐渐建立, 长江的发育与演化正是孕育在这样的宏观构造地貌背景之下.

关键词 长江, 诞生, 构造地貌, 青藏高原, 新生代

1 引言

长江是中华民族的母亲河, 孕育了璀璨的中华文明. 长江是中华名族的命脉, 在当今社会经济发展和生态环境建设中具有举足轻重的战略位置.

长江发源于"世界屋脊"——青藏高原的唐古拉山, 流经11个省、自治区、直辖市, 在上海市崇明岛以东注入东海, 全长6280km, 长度居世界第三、亚洲第一.

长江连接了地球上最大的大陆/高原和最大的海洋, 流域面积约180万平方公里, 在亚洲季风气候控制下, 产生并携带巨量的水沙, 对流域生态环境和边缘海的海洋环境产生重大影响, 在全球变化中扮演了重要角色, 是众多重大国际研究计划的靶区(MARGINS Office, 2003; 郑洪波等, 2003, 2008).

长江的诞生和地质演化备受学术界和大众关注, 它不仅是地理学的核心课题, 也是开展青藏高原构造隆升及其环境效应研究的重要的切入点, 是认识新生代亚洲地区重大构造和古气候事件相互作用的纽带.

中文引用格式: 郑洪波, 魏晓椿, 王平, 何梦颖, 罗超, 杨青. 2017. 长江的前世今生. 中国科学: 地球科学, 47: 385–393, doi: 10.1360/N072017-00003
英文引用格式: Zheng H B, Wei X C, Wang P, He M Y, Luo C, Yang Q. 2017. Geological evolution of the Yangtze River (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 47: 385–393, doi: 10.1360/N072017-00003

© 2017 《中国科学》杂志社

本文在回顾过去一个世纪关于长江历史研究的基础上, 发现过去的研究往往将长江的发育与演化视为长江的沟谷地貌演化, 这在指导思想和技术方法上有其局限性. 本研究认为, 长江是一个超大水系, 其发育与演化主要受板块构造驱动下的宏观构造地貌控制, 因此应在地球系统科学思想指导下, 视长江流域为一个系统并置其于亚洲新生代构造地貌演化的框架中, 将区域构造、盆地演化、地貌演化和气候演化有机结合, 采用区域地质学方法、构造地貌学方法、沉积物示踪方法、古环境分析方法、海陆结合的方法综合集成, 才能更准确地揭示长江的发育与演化过程, 理解其地球动力学机制, 解译其赋含的构造地貌和古环境意义(郑洪波等, 2014; He等, 2014).

2 百年谜题——《溯江纪源》到“长江年龄”

中国第一篇区域地理著作《尚书·禹贡》中有“岷山导江”一说, 后人将其理解为“岷江为长江之源”(《汉书·地理志》, 《山海经》, 《水经注》), 这一观点长期被视为亘古经典. 明代杰出地理学家徐霞客穷其一生, 探江溯源. 他不仅遍考古籍, 而且开展实地科学考证, 完成了地理科学上的伟大著作《溯江纪源》, 提出“推江源者, 当以金沙为首”的科学论断, 否定了“岷江为长江之源”的错误认识, 开启了长江地理科学研究的新纪元(《徐霞客游记》).

现代地球科学意义上的长江历史演化研究肇始于Willis(1907). 之后的百余年, 众多中外科学家对长江演化历史进行过专门研究, 取得了丰硕的成果, 但对于“长江东流水系形成于何时”这一关键科学问题却一直存在重大争议, 即有前第三纪(陈丕基, 1979)、第三纪早期(Richardson等, 2010)、中新世(Clark等, 2004; Clift等, 2006)、更新世(任美锷等, 1959; 杨怀仁等, 1997; 杨达源等, 2006; Li等, 2001, 张玉芬等, 2008)等多种观点, 成为地球科学领域的“世纪谜题”.

3 长江“诞生”的定义

纵观百年来的长江历史研究, 从理念思路, 到技术方法, 再到结论认识, 着实各不相同. 地理学家更多视长江为河谷, 关注河谷的地貌演化(沈玉昌, 1965; Li等, 2001), 尤其是通过某一段河谷的地貌演化推断整个长江的历史. 地质学家更多关注长江流域的地质历史, 通过某一区域的构造演化(Lee, 1924; 叶良辅和谢家荣, 1925; Lee, 1934; Barbour, 1935), 推断长江的发育史. 可以看出, 学界在对待“长江诞生”这一基本概念上, 也多有混淆(李承三, 1956).

长江发源于唐古拉山, 其源头沱沱河和通天河流域, 地势平缓, 曲流发育. 到青藏高原的东南缘金沙江流域, 地势陡降, 高山峡谷. 到达川江段, 地势坡降急剧减小. 长江东出三峡进入江汉平原, 从宜昌到入海口千余公里, 海拔高度下降仅百米, 因此流速较低, 河道宽阔.

从板块构造角度观之, 长江跨越多个构造单元. 源头及上游流经昌都地块和松潘-甘孜褶皱带. 流域主体为扬子克拉通, 包括次级构造单元四川盆地、黄陵背斜、江汉-洞庭盆地、苏北-南黄海盆地和东海陆架盆地. 中游的北界为秦岭-大别造山带, 中游的南部流域为华夏地块(华南褶皱系). 这些构造单元都有各自复杂的地质演化历史(张国伟等, 2004). 关键是进入新生代以后, 在欧亚-印澳-太平洋板块相互作用构成的地球动力背景下, 这些构造单元进入了全新的地质演化阶段, 表现出强烈的差异隆升与沉降: 例如西部岩石圈挤压增厚隆升, 东部岩石圈在中生代基础上持续伸展减薄, 形成断陷盆地和西太平洋边缘海盆地, 造就了现今的亚洲(东部)构造地貌格局(汪品先, 1998), 为贯通东流的长江提供了必要的地貌条件.

所谓长江的“诞生”, 是指发源于青藏高原, 流经(贯通)上述构造和地貌单元, 最终注入东海, 形成统一的东流水系的构造-沉积-地貌演化过程(图1)(Zheng等, 2013, 2015). 从这个意义上说, 所谓长江的“诞生”, 是一系列区域尺度的重大构造-地貌事件, 有别于经典地貌学上特指的河谷地貌的发育或者变迁.

长江在诞生之前, 区域的河系格局模式可以借助广为熟知的《中国古地理图集》(王鸿祯, 1985)来加以描述: (1) 位于青藏高原东南缘的上游水系(古金沙江水系)与长江下游水系没有联通, 上游水系没有转向东流, 而是可能南流入海; (2) 中下游的江汉盆地和苏北盆地各自发育了规模较小的局部河系, 盆地之间没有联通或者有限连通; (3) 按照这个模式, 直到更新世, 贯通东流的长江才逐渐形成. 从上述模式可以看出, 长江贯通东流形成统一水系有两个关键的节点——云南石鼓的长江“第一湾”和长江三峡, 这两个节点正是百年长江历史研究的关注点(Lee, 1924; 任美锷等,

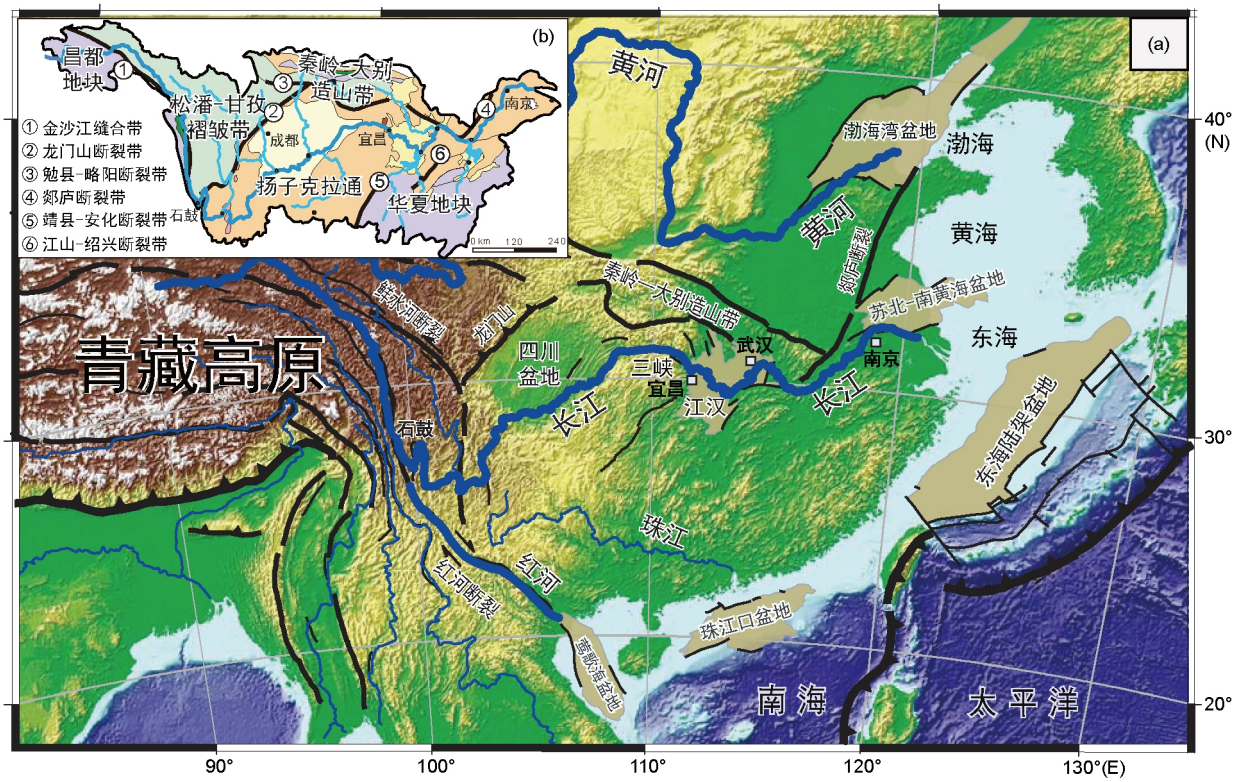


图 1　亚洲东部地形与水系分布图(a)和长江流域构造单元(b)

(a)显示长江发源于青藏高原, 流经一系列构造和地貌单元, 包括青藏高原、四川盆地、江汉盆地、苏北-南黄海盆地、三角洲盆地和东海陆架盆地. (b)长江流域构造单元, 自西向东依次为昌都地块、松潘-甘孜褶皱带、扬子克拉通、秦岭-大别造山带和华夏地块

1959; Li等, 2001). 根据上述模式, 现代长江在更新世才诞生或者贯通东流, 这正是学术界普遍持有的长江年龄为更新世的观点. 尽管学界对于这一年龄其实也存在巨大争议, 但对于长江“诞生”之前的河系格局模式基本比较认同(图2).

4　金沙南流

4.1　丁文江与金沙江“南流与袭夺说”

整整一个世纪前, 中国现代地质学的奠基者丁文江循徐霞客当年的滇游路线考察金沙江(图3). 他怀揣《徐霞客游记》, 每日“倦甚则取游记读之, 并证以所见闻”(丁文江, 1933). 在元谋的环洲乡, 他登高望远, 俯看龙川江和金沙江之汇(图3), 发现“现在的龙川河的水量很小, 不能冲出如苴宁平川这样的宽谷. 足见得在地质史上苴宁平川不是龙川河所独有的谷. 我的意见是从川边来的鸦砻江, 与龙川河、红河本来是从北向南的一条大江. 以后鸦砻江的水被自东向西推进的扬子江抢了去了. 于是鸦砻(就是如今的雅砻江)、龙川、红河就变成了三条不相通的江”. 这段笔记的核心科学思想是, 丁文江认为金沙江曾经沿龙川江和红河南流入海. 这个论断貌似粗浅甚至不乏臆测, 但却道出了长江演化过程的一个关键——也就是一个世纪以来广为学界研究和争论的金沙江“南流与袭夺说”的雏形, 可谓是百年长江历史研究之开山之作.

4.2　长江“第一湾”的形成: “袭夺”与“非袭夺”之争

金沙江从青藏高原奔流南下, 至云南丽江的石鼓镇, 流向突然转为北北东, 形成著名的长江“第一湾”. 长江贯通东流的第一个关键节点就是长江“第一湾”的形成, 导致金沙江(以及整个长江)的东流. 对于“第一湾”的成因, 广为学界熟知的是“袭夺说”——即下游金沙江袭夺了上游河谷(任美锷等, 1959).

石鼓以南的白汉场-剑川一线, 地貌上表现为一个宽阔谷地, 海拔略高于现今的石鼓河床(图4A). “袭夺说”认为, 剑川谷地中现今发育的小规模内流河系, 没

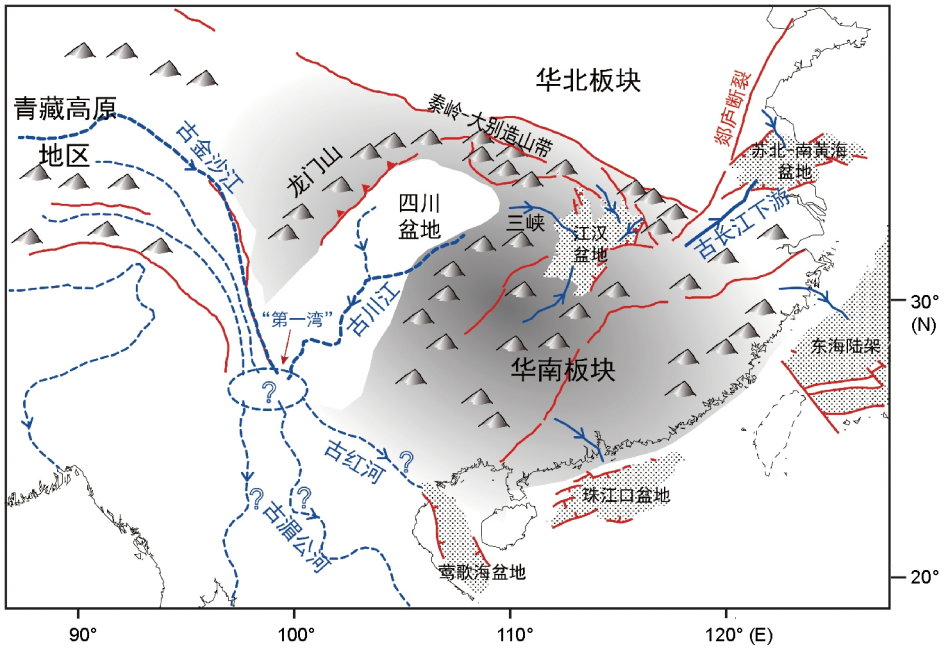


图 2　长江水系演化模式图

表现长江贯通东流之前的水系格局. 中下游的江汉盆地、苏北盆地为断陷盆地, 各自发育内流水系, 盆地之间没有连通. 川江段西流, 与古金沙江在石鼓汇合后, 南流入海. 青藏高原地区尚没有形成统一高原, 但已有明显盆-岭结构. 修改自Zheng等(2013)、王鸿祯等(1985)

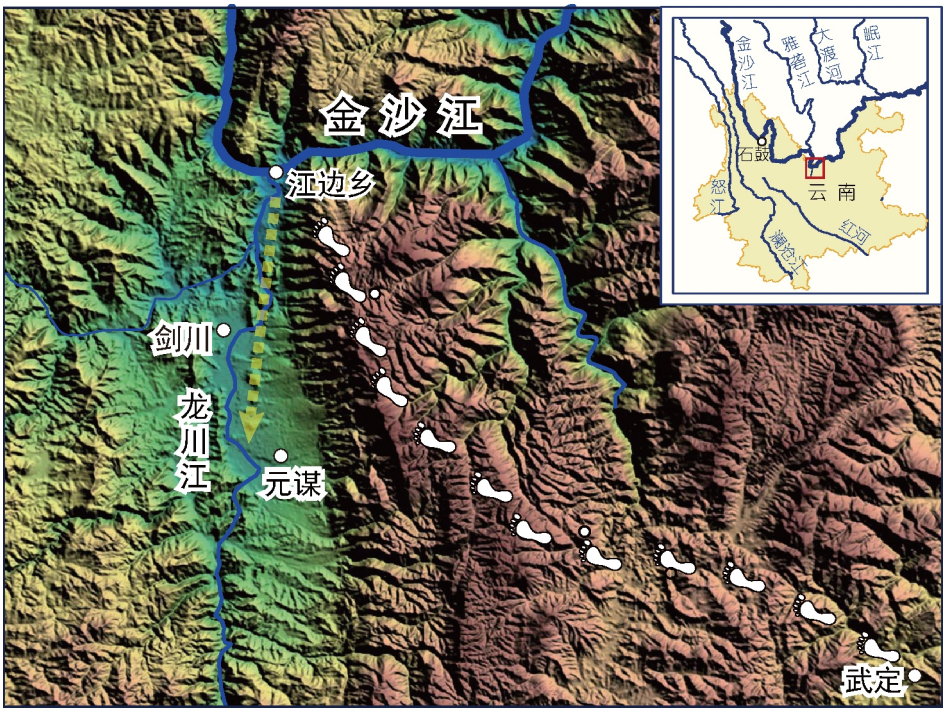


图 3　云南武定-元谋地区DEM图

图中的白色脚印标示了丁文江1914年5月考察金沙江的路线. 可以看出, 龙川江为一小型支流, 河谷宽阔; 而金沙江河谷狭窄但水深流急. 丁文江推测古金沙江曾沿龙川江河谷南流(虚线箭头所示), 后被袭夺, 形成金沙江东流之势, 乃"袭夺说"的雏形

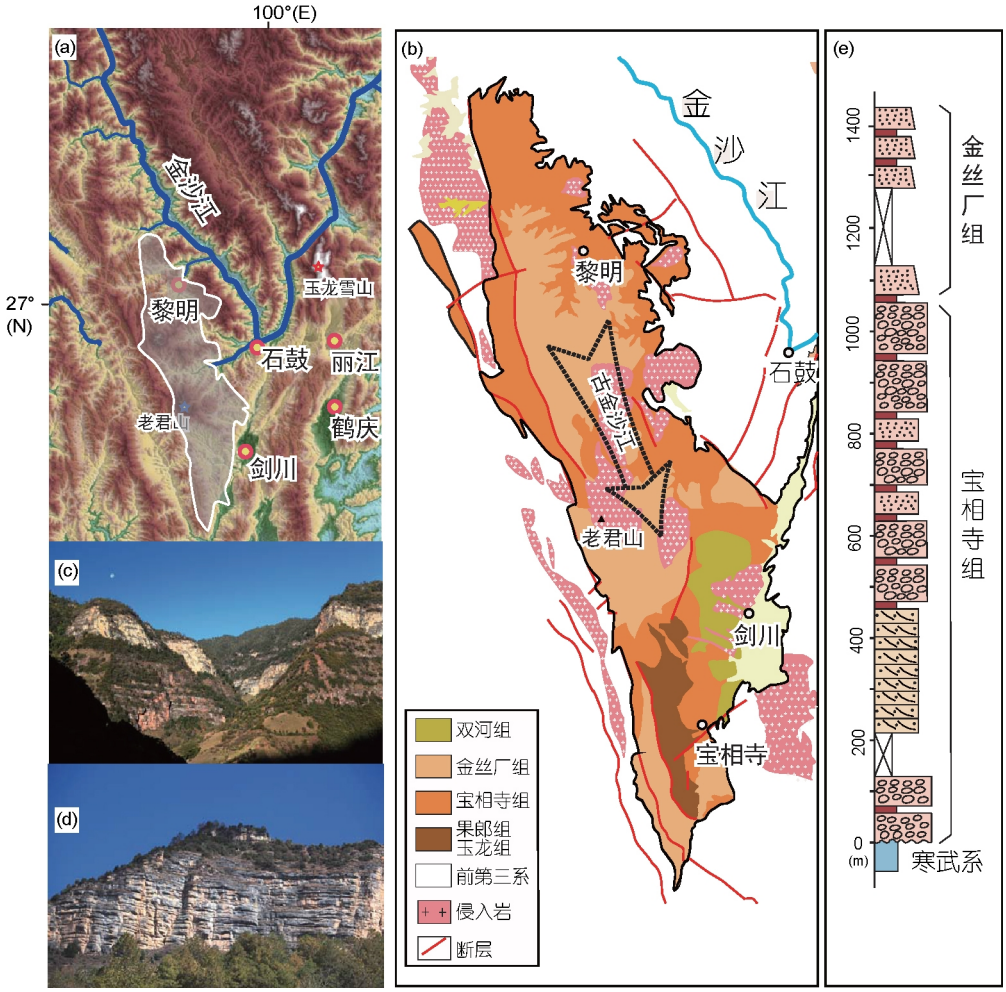


图 4　云南丽江石鼓地区DEM图(a)、古剑川盆地新生代地质图(b)、晚始新统宝相寺组和金丝厂组地层照片(c)、金丝厂组地层照片(d)和新生代地层柱(e)

(a)“袭夺说”认为古金沙江曾经沿剑川谷地(石鼓-剑川之间的谷地)南流. 图中白色阴影标示出新生代古剑川盆地的范围; (b)可以看出, 新生代沉积(含河流沉积)成带状展布于石鼓南北两侧

有能力塑造如此高深宽大的谷地, 因此剑川谷地是古河流遗留的河谷——即曾经南流的古金沙江河谷. “袭夺说”还进一步推测认为, 古金沙江的川江段曾经西流, 在石鼓与南下的古金沙江汇合, 取道剑川谷地, 再通过红河河谷注入南海. 后来——即更新世时期, 古金沙江被长江中下游袭夺, 于是形成风口和袭夺弯(任美锷等, 1959). 当然, “袭夺说”也认为, 石鼓不是金沙江唯一的袭夺弯, 雅砻江也可能取道龙川江南流入海(杨达源, 2006).

何浩生等(1989)对金沙江袭夺观点提出了强烈的质疑, 指出在鸿文-白汉场-剑川谷地中的所谓古金沙江阶地, 实际是盆地断陷造成的阶地状断块台地, 其上的沉积物多为近源坡积, 与大型河流无关. 这一结论被最近在剑川盆地的钻探和地层研究进一步证实(Wei 等, 2016). 综合以上可以断定, 现今的剑川盆地的确是一个小型的山间断陷盆地, 不曾有大型的外流河系发育, 长江“第一湾”也不是传统地貌意思上的“袭夺弯”, 其形成时代更不在更新世时期.

4.3　剑川盆地: “古金沙江”南流的地质证据

否定了长江“第一湾”形成的“袭夺”成因, 并不意味着本区不曾存在古河流系统, 也不意味着古河流系统没有发生过改变或者改组. 分布于青藏高原东南缘的新近纪盆地, 恰恰就记录了本区内广泛发育的古河

流系统以及它们复杂的演变历史.

本研究对石鼓及周边地区开展了系统的区域地质调查工作, 发现新生代沉积地层广泛分布, 这些沉积基本勾勒出古剑川盆地(以有别于现今地貌上的剑川盆地)的轮廓(图4a, b). 新生代沉积厚达千米, 岩相上可分为两个主要体系: 下部宝相寺组, 主要由暗红色调砾岩和砂岩构成. 砾岩磨圆度差, 成份以灰岩为主, 分布于盆地边缘, 是盆地发育初期的近源冲洪积堆积, 没有大型贯通型河流发育; 上部金丝厂组, 厚度可达数百米, 为大型板状长石石英砂岩, 黄白色, 发育斜层理, 分选和磨圆较好, 成熟度高, 代表了大型远源河流沉积体系(图4c, d). 古流向研究表明, 该河流系统流向南或者南东, 暗示其发源于西北方向, 也就是青藏高原东南缘, 可称之为"古金沙江"河系. 根据生物地层和火山灰年代测年约束, 宝相寺组的年代为始新始中期, 金丝厂组的沉积年代为始新始末期(Zheng, 2015).

如果认为古剑川盆地记录的"古金沙江"河系为大型远源河流, 就意味着其源头不应局限于剑川盆地, 而是应该继续上溯到青藏高原. 在青藏高原东南缘发育的一系列沿断裂带呈线状分布的新生代盆地, 恰恰就记录了水系演化的历史(图5). 对贡觉盆地的地层学与沉积学研究发现, 始新统贡觉组为一套大型河流沉积体系, 进一步的物源工作将揭示贡觉盆地与剑川盆地的联系.

如图4a显示, 在古剑川盆地, 古近纪河流沉积体系如今分布于2500~3000m的海拔高度, 呈水平状展布, 变形微弱, 构成了云南高原面的盖层. 这意味着古金沙江河流沉积体系在沉积之后, 即从始新世末期到渐新世期间, 随着青藏高原东南缘(云南高原)的隆升发生了整体抬升. 在这个过程中, 古金沙江水系不再南流, 而是在构造控制下沿着青藏高原和云南高原的边界带转向东流, 形成现今的长江"第一湾"(Zheng, 2015)(图5). 需要特别强调的是, 长江"第一湾"的形成, 是区域构造与盆地演化的地貌表现而已, 与传统地貌学上的由河流袭夺河谷形成的袭夺弯有本质的区别.

5 大江东去——长江中下游盆地的沉积响应

5.1 长江三峡的贯通

长江贯通东流, 必定在中下游流域留下地质证据

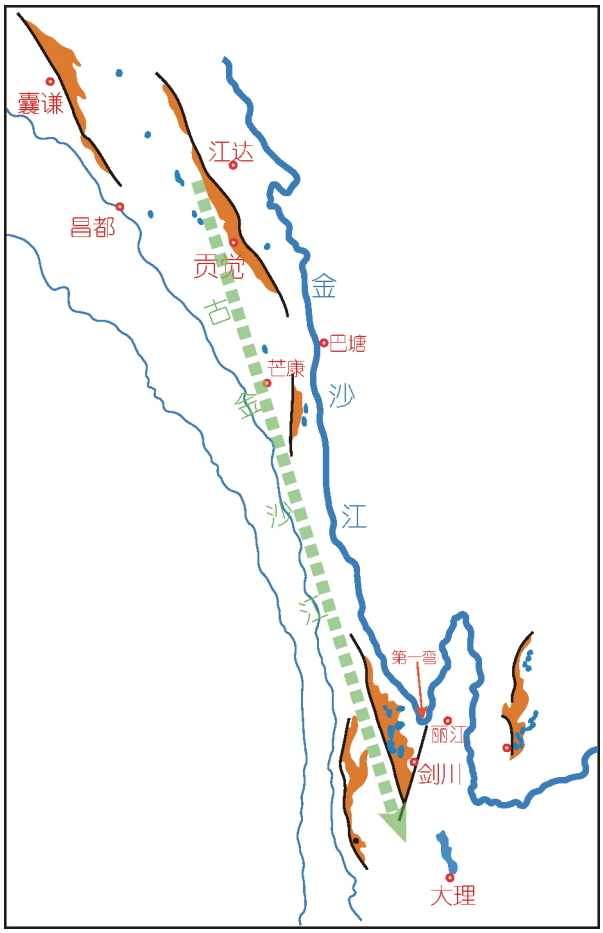


图 5　青藏高原东南缘的水系与新生代盆地(褐色)略图
新生代盆地沿断裂带呈线状分布. 图中绿色箭头指示这些新生代盆地可能曾经联通, 路径就是古金沙江的位置. 修改自Wei等(2016)

链, 这其中关键的是中下游盆地的沉积响应与沉积记录.

长江三峡的切穿, 被认为是长江贯通东流的一个关键节点. 也正是如此, 百余年来对长江演化历史的研究多集中于三峡地区(Lee, 1924; Barbour, 1935; Li等, 2001; Wang等, 2014). 例如, Li等(2001)对三峡地区的阶地进行了调查, 对阶地上保存的沉积物进行了热释光/光释光和ESR测年. 基于测年结果, 他们认为三峡地区最老的阶地年龄为~2Ma, 据此推断三峡的初始下切(也就是三峡贯通, 或者长江的贯通东流)开始于更新世早期.

Richardson等(2010)等研究了四川盆地和三峡地区的低温热年代学, 发现在40~45Ma三峡地区有一次明显的冷却事件, 认为是三峡被切穿的结果. 他们还

认为, 这个下切时间与四川盆地的大规模侵蚀作用(自始新世以来有数公里的沉积物被侵蚀)开始的时间相吻合. 如果三峡被切穿, 四川盆地被强烈侵蚀, 这些沉积物首先会被输送到江汉盆地形成碎屑沉积. 所以, 江汉盆地应该是最忠实记录这些侵蚀和沉积事件的场所. 江汉盆地自晚白垩纪开始发育断陷型盆地, 在古近纪时期沉积了数千米的蒸发岩, 这些蒸发岩与玄武岩互层, 因此有可靠的年龄约束(戴世昭, 1997). 大规模蒸发岩的沉积表明当时江汉盆地属于内陆咸化盆地, 不可能存在大型的贯穿型河流. 古近纪末期(渐新世), 江汉盆地的构造类型发生了根本性转换, 从原来的断陷型转变为凹陷性. 在盆地凹陷阶段, 也就是新近纪时期, 沉积相以大型河流砂砾为主并呈盖层状分布, 覆盖整个江汉-苏北盆地, 这进一步表明长江中下游盆地在新近纪被大河流系联通, 这便是贯通东流的现代长江水系(Zheng等, 2011).

5.2　长江砾石层: 沉积年代与物质来源

在长江中下游地区沿江两岸的狭长地带, 广泛分布着一套砂砾石层, 呈半固结状, 分选和磨圆良好, 成份单一, 砾石以燧石和花岗岩居多, 为典型河流相沉积体系. 这套砾石层, 在不同的地区尽管各有其名, 例如“宜昌砾岩”, “阳逻砾岩”, “安庆砾岩”, “雨花台砾岩”等等, 但它们的性质非常相似, 成因类型单一(图6). 杨怀仁等(1997)指出, 长江中下游广泛发育的这套砾石层, 指示了长江历史演化中的一个重要事件, 因此形象地称之为“长江的成砺时代”, 其沉积时代为更新世.

南京地区的“长江砾石层”, 就是著名的“雨花台组”, 分布广泛, 露头良好, 生物化石丰富, 盛产著名的雨花石, 因此研究程度相对较高. 但学术界对于其年代地层划分一直存在争论, 认为其沉积时代可能跨越中新世到更新世, 也有认为是更新世(李立文, 1979; 张祥云等, 2004).

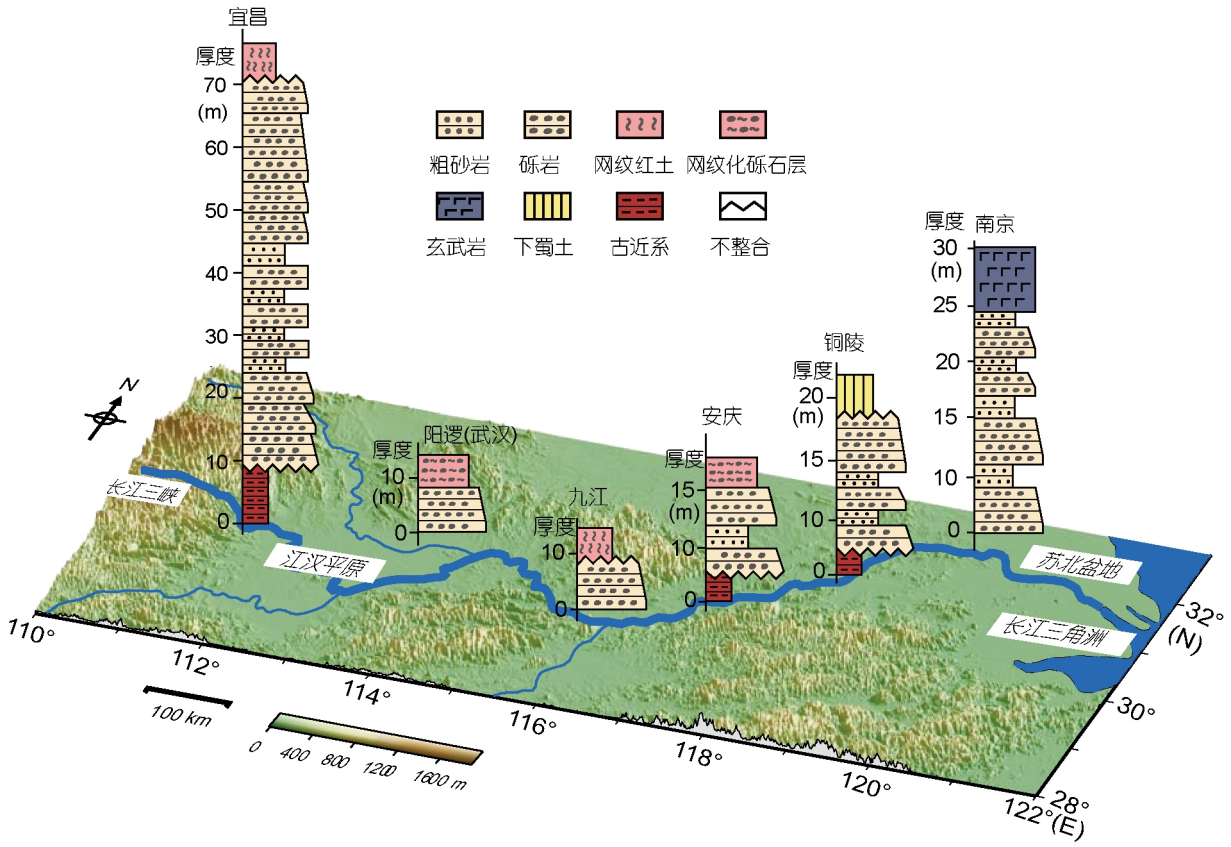


图 6　“长江砾石层”分布图

长江砾石层在各地名称不同但沉积相类似, 在南京地区统称为“雨花台砾石层”. 玄武岩盖层或者夹层提供了关键的年龄约束. 修改自郑洪波等(2012)

本研究对南京地区的“长江砾石层”开展了系统的年代学与细颗粒沉积物物源分析. 由于“雨花台组”砾石层常常被玄武岩覆盖, 或者含有玄武岩夹层, 为约束砾石层的沉积时代提供了重要的机遇. 对玄武岩开展$^{40}Ar/^{39}Ar$测年, 确定其沉积时代为早中新世甚至更老. 对其中的碎屑锆石开展基于U-Pb年龄谱的物源分析, 并与现代长江沉积尤其是上游特征锆石年龄谱进行对比, 发现在渐新世或者最晚在渐新世/中新世之交, 长江上游的沉积物就已经到达南京地区(即苏北盆地的西南缘)(Zheng等, 2013). 换句话说, 贯通东流的长江水系在这个时期已经建立, 这与上游金沙江改道东流的时间相吻合, 也与江汉盆地的沉积记录一致.

6 结论——长江诞生的构造地貌意义

研究表明, 在大河的长期地质演化中, 构造运动是最重要的控制因素(Brookfield, 1998; Potter, 2006; 郑洪波等, 2009). 板块构造运动可以塑造大陆规模的(大陆尺度的)地貌地形格局, 并因此控制着大河的发育、走向、大小以及生命周期, 而这种大陆尺度的构造地貌过程必定有地球深部的地球动力过程的驱动. 当然, “突发”地质和气候事件例如大陆干旱化、大陆冰川作用、断层活动等也可改变甚至完全破坏一条大河, 但相对于在地质历史中起主导作用的构造运动来说, 这些“突发”事件往往是较短暂的和不持续的, 在河流的地质演化中不可能占据主导的角色.

在亚洲宏观地形地貌格局的演化中, 青藏高原的隆升无疑是扮演了最重要的角色. 尽管对于“青藏高原何时隆升到现在的高度”这一关键科学问题, 学术界依然存在重大的争议, 但越来越多的研究认为, 青藏高原的局部地区(相对于整体高原而言)在渐新世已经达到了相当的高度(Tapponnier等, 2001; Wang等, 2008). 青藏高原的新生代盆地记录也表明当时的隆升区和剥蚀区已经明显分化, 盆-岭结构非常明显, 这种盆-岭结构无疑指示了青藏高原地区在始新世到渐新世时期河系已经相当发育(张克信等, 2010), 这些河系就可能就是古金沙江(也包括古澜沧江、古怒江)的上游.

新生代时期的另一个重要构造地貌过程是亚洲东部岩石圈板块在中生代基础上继续减薄, 江汉盆地、苏北盆地和东海陆架盆地从古近纪的断陷演化到新近纪的整体凹陷, 边缘海扩张形成. 断陷阶段的长江中下游盆地, 盆地之间可能没有联通, 各自发育自己的内流水系; 凹陷阶段的区域整体沉降, 使得大型贯通型水系发育, 联通中下游盆地, 形成以河流沉积为特征的沉积盖层.

长江贯通东流水系在渐新世(或者最晚在渐新世/中新世之交)形成, 表明中国(亚洲)与现在类似的宏观地貌地形格局逐渐建立, 中国的宏观地理环境演化历史从此进入了新的篇章.

参考文献

陈丕基. 1979. 中国侏罗、白垩纪古地理轮廓——兼论长江的起源. 北京大学学报, 3: 90–109

戴世昭. 1997. 江汉盐湖盆地石油地质. 北京: 石油工业出版社. 57–93

丁文江. 1928. 徐霞客游记. 北京: 商务印书馆

丁文江. 1933. 金沙江的南岸——武定、元谋. 独立论评

高山. 2015. 山海经. 北京: 光明日报出版社. 670

何浩生, 何科昭, 朱祥民, 朱照宇. 1989. 滇西北金沙江河流袭夺的研究-兼与任美鄂先生商榷. 现代地质, 3: 319–330

李承三. 1956. 扬子江水系发育史. 地理, 4: 3–14

李立文. 1979. 南京附近古砾石层的两个问题. 南京师范学院学报(自然科学版), 1: 23–30

任美锷, 包浩生, 韩同春, 王飞燕, 黄培华. 1959. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题. 地理学报, 25: 135–155

沈玉昌. 1965. 长江上游河谷地貌. 北京: 科学出版社. 1–183

王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社

汪品先. 1998. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系. 第四纪研究, 3: 213–221

徐弘祖. 1982. 徐霞客游记. 上海: 上海古籍出版社. 660

杨达源. 2006. 长江地貌过程. 北京: 地质出版社. 219

杨怀仁, 徐馨, 杨达源, 黄家柱. 1997. 长江中下游环境变迁与地生态系统. 南京: 河海大学出版社. 193

叶良辅, 谢家荣. 1925. 扬子江流域巫山以下地质构造与地文发育史. 地质汇报, 7: 69–70

张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23: 846–853

张克信, 王国灿, 季军良, 骆满生, 寇晓虎, 王岳明, 徐亚东, 陈奋宁, 陈锐明, 宋博文, 张健钰, 梁银平. 2010. 青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应. 中国科学: 地球科学, 40: 1632–1654

张祥云, 刘志平, 范迪富, 蒋梦林, 邵家骥. 2004. 南京-仪征地区新近纪地层层序及时代讨论. 中国地质, 31: 180–185

张玉芬, 李长安, 王秋良. 2008. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示. 科学通报, 53: 577–582

郑洪波. 2003. IODP中的海陆对比和海陆相互作用. 地球科学进展,

18: 722–729
郑洪波, 汪品先, 刘志飞, 杨守业, 王家林, 李前裕, 周祖翼, 贾军涛, 李上卿, 贾健宜, John C, Yoshiki S, Takahiro I. 2008. 东亚东倾地形格局的形成与季风系统演化历史寻踪——综合大洋钻探计划683号航次建议书简介. 地球科学进展, 23: 1150–1160
郑洪波, 贾军涛. 2009. 大河的地质演化与构造控制. 第四纪研究, 29: 268–275
郑洪波, 郭正堂, 邓涛. 2014. 新生代东亚地形、水系与生物地理演变——第三届地球系统科学大会拾粹. 地球科学进展, 29: 1280–1286
Barbour G B. 1935. Physiographic history of the Yangtze: Geographical survey of China. Memoirs, 14: 112
Brookfield M E. 1998. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: Rivers draining southwards. Geomorphology, 22: 285–312
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. Tectonics, 23: TC1006
Clift P D, Blusztajn J, Nguyen A D. 2006. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. Geophys Res Lett, 33: L19403
He M, Zheng H, Bookhagen B, Clift P D. 2014. Controls on erosion intensity in the Yangtze River basin tracked by U-Pb detrital zircon dating. Earth-Sci Rev, 136: 121–140
Jia J T, Zheng H B, Huang X T, Wu F Y, Yang S Y, Wang K, He M Y. 2010. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River. Chin Sci Bull, 55: 1520–1528
Lee J S. 1924. Geology of the gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the gorges. Bull Geol Soc China, 3: 351–391
Lee C Y. 1934. The development of the upper Yangtze valley. Bull Geol Soc China, 3: 107– 118
Li J, Xie S, Kuang M. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. Geomorphology, 41: 125–135
M ARGINS Office. 2003. NSF MARGINS Program Science Plans. New York: Columbia University
Potter P E, Hamblin W K. 2006. Big rivers worldwide–Part I Origins. Brigham Young Univ Geolog Stud, 48: 1–43
Richardson N J, Densmore A L, Seward D, Wipf M, Li Y. 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? Geology, 38: 551–554
Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Jingsui Y. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. Science, 294: 1671–1677
Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H S, Zhu L D, Liu S, Li Y. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 105: 4987–4992
Wang P, Zheng H B, Chen L, Chen J, Xu Y, Wei X, Yao X. 2014. Cenozoic exhumation of the Huangling anticline in Three Gorges region: Sedimentary record from the western Jianghan Basin, China. Basin Res, 26: 505–522
Wei H H, Wang E, Wu G L, Meng K. 2016. No sedimentary records indicating southerly flow of the paleo-Upper Yangtze River from the First Bend in southeastern Tibet. Gondwana Res, 32: 93–104
Willis B, Blackwelder E, Sargent R H. 1907. Research in China. Washington: Press of Gibson Brothers. 278–339
Zheng H, Jia D, Chen J, Wang P. 2011. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? Comment. Geology, 39: e244–e244
Zheng H, Clift P D, Wang P, Tada R, Jia J, He M, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. Proc Natl Acad Sci USA, 110: 7556–7561
Zheng H. 2015. Birth of the Yangtze River: Age and tectonic-geomorphic implications. Nat Sci Rev, 2: 438–453