

文章编号: 1008 - 2786 - (2018) 5 - 661 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000362

黄河、长江的形成演化及贯通时间

张信宝^{1*} 刘 彧² 王世杰² 刘维明^{1*} 薛雯轩³

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041; 2. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550081;

3. 西北师范大学 地理与环境科学学院,兰州 730070)

摘 要: 黄河、长江的形成演化是在新生代以来统一构造 - 气候 - 地貌体系中发生的重大地貌事件。印度板块与亚洲大陆碰撞和太平洋板块向亚洲大陆之下俯冲,造成了中国大陆地势从东高西低变为西高东低,和随之的东亚季风形成、强化,导致黄河、长江水系形成。中更新世以来的构造运动,导致青藏高原东缘山地的加速隆升,进入了冰冻圈,季节性冰川融水加大了河川径流,为两大河流的贯通奠定了水动力基础。末次间冰期的气候突然变暖,不但导致冰冻圈融水补给的河川径流陡增,可能给了长江、黄河贯通最后一击,而且加速了三峡一带碳酸盐岩地下化学溶蚀,促进地下河发育和瞿塘峡地表河袭夺的完成。黄河、长江在末次间冰期期间彻底贯通,现今的水系格局形成。黄河三门峡的贯通时间为 0. 125 Ma 左右,长江三峡可能在 0. 30 ~ 0. 12 Ma 期间完成贯通。

关键词: 黄河; 长江; 构造 - 气候 - 地貌; 连通; 贯通

中图分类号: P931. 1

文献标志码: B

源于青藏高原的黄河、长江是中华民族的母亲河(图 1),其贯通时间一直是地学研究者关注的热点问题,但未能形成共识。黄河三门峡的贯通,有 1. 2 Ma 前和 0. 125 Ma 前两种不同观点^[1-2]; 长江的贯通分歧与黄河相比更大,自 1907 年 Willis 等开展长江三峡地区的地质研究开始,中外科学家包括李四光、李春昱、任美镔、李吉均、杨达源、Clark、李长安、郑洪波等相继对长江演化问题开展过研究,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,有前第三纪、第三纪早期(古近纪)、第三纪晚期(新近纪)、更新世早期和更新世晚期等多种观点。对于长江东流水系形成和演化的方式也有袭夺说、先成

说等差异,成为地球科学领域的“世纪谜题”^[3-16]。

除连通与贯通概念的混淆,以及锆石 U - Pb 同位素年龄谱等物源示踪技术运用的不恰当外^[12,13,16],没有从新生代以来的构造 - 气候 - 地貌的统一耦合体系角度出发,来认识长江、黄河的形成演化,这也是贯通时间一直未能取得共识的重要原因。

上世纪 70 年代以来,两大流域及毗邻地区新生代以来的构造运动、冰川、黄土、地貌和气候变化与水系演化研究取得了一系列重要研究进展^[17-27],笔者在认真消化与综合这些领域研究成果的基础上^[1-36],从构造 - 气候 - 地貌体系的角度,认识黄河、长江的形成演化,在此基础上结合沉积物断代资料,确定黄河和长江的贯通时间。

收稿日期(Received date): 2018 - 09 - 20; 改回日期(Accepted date): 2018 - 10 - 18

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41401009, 41473055); 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所“一三五”方向性项目(SDS - 135 - 1701)。[National Nature Science Foundation of China (41401009, 41473055); The 135 Strategic Program of the Institute of Mountain Hazards and Environment of CAS (SDS - 135 - 1701)]

作者简介(Biography): 张信宝(1946 -),男,研究员,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。[ZHANG Xinbao(1946 -), male, professor, research on soil erosion, water and soil conservation.] E-mail: zxbao@imde. ac. cn.

* 通讯作者(Corresponding author): 1) 张信宝; 2) 刘维明(1982 -),男,副研究员,主要研究方向:古山地灾害。[LIU weiming(1982 -), male, associate professor, research on paleo-mountain hazard.] Liuwm@imde. ac. cn.

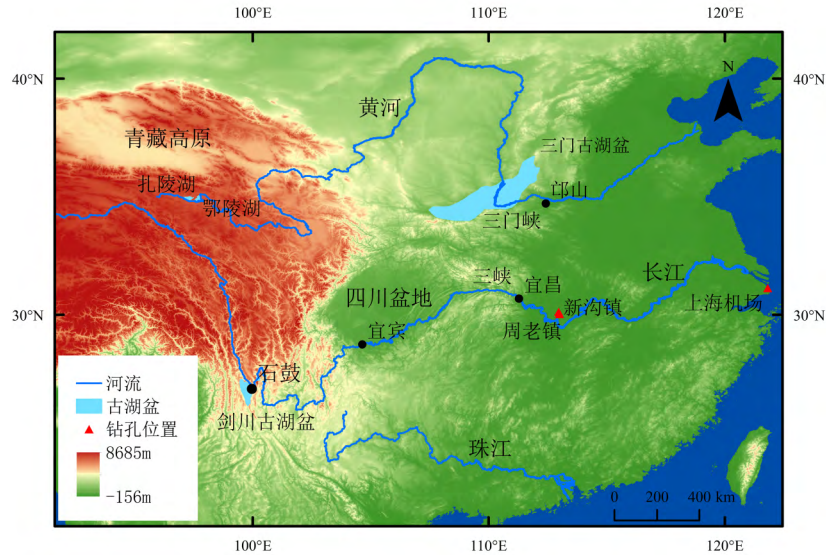


图1 黄河和长江地理位置图

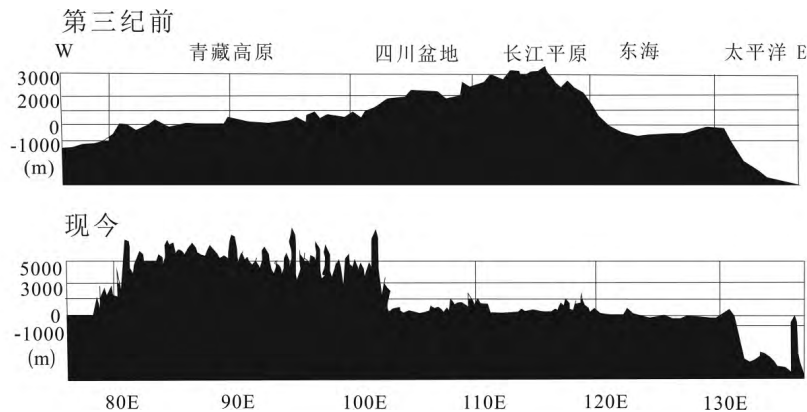
Fig. 1 Location of Yellow River and Yangtze River

1 中国新生代以来的构造活动及地势和气候变化

亚马逊河、恒河、尼日尔河等国外大河,均发育于长期稳定的巨大地台,都有一二千万年的历史,其中密西西比河可以上溯到古生代。中国没有长期稳定的地台,新生代以来构造活动强烈,黄河、长江可能远较这些大河年轻。中国新生代最重大的构造事件有两个:一是西部古新世-始新世印度板块与亚洲大陆的碰撞,二是东部太平洋板块向西俯冲于亚洲大陆板块之下^[17]。据李吉均、方小敏等人的研究^[23-24],青藏高原的隆升可分为以下几个主要阶段:8~7 Ma,开始逐步隆升;3.6 Ma,开始急剧隆升(青藏运动 A 幕);1.8 Ma,脉冲隆升(青藏运动 C

幕);1.1~0.8 Ma,脉冲隆升(昆黄运动);0.15 Ma,脉冲隆升(共和运动)。现今的青藏高原主要为3.6 Ma以来强烈隆升的结果,0.8 Ma以前青藏高原并不很高,只是昆黄运动才把多数山地推到冰冻圈中,整个青藏高原经过共和运动才达到现代高度^[22]。新生代以来,中国东部闽浙隆起带以北拉张性盆地持续沉降。江汉-洞庭拗陷、黄海-苏北拗陷、下辽河-渤海-华北拗陷和淮河拗陷的沉降幅度达1000 m以上。受浙闽隆起带阻挡,早中更新世海侵期海水未能大规模入侵黄渤海盆地,之后,隆起带下沉,黄渤海形成^[27]。青藏高原的隆升和东部拉张盆地的沉降,造成了中国地势由第三纪前的西低东高变为现今的西高东低(图2)^[15]。

中国在第三纪为西风盛行的纬向气候,青藏高原的隆升迫使西风环流分为南、北两支,促进了东亚

图2 中国地形变化图^[15]Fig. 2 The map of terrain changes of China^[15]

季风的形成和强化,西太平洋暖池的出现和黑潮的加强对亚洲季风的形成演化也有重要的影响。中国现今的气候分为东部季风气候,西部干旱气候和青藏高原的高寒气候^[20-21]。0.8 Ma 是中国气候的重要转型期,长江、黄河上游的青藏高原东部多数山地隆升到冰冻圈中,气候变得湿润,发生大规模的冰川作用,冰缘黄土出现,泥石流活动渐趋强烈^[22](图 3)。

2 黄河的形成演化与贯通

黄河流域第三纪时大小湖泊众多,后不断萎缩。至第四纪早、中更新世,尚保存的湖盆有:共和、银川、河套、汾渭及华北等^[28]。这些湖泊均为淡水湖,表明一直是连通外流的,后逐渐被填满、贯通。

潘保田等根据三门峡等地的阶地研究,认为黄

河在该区最迟在 0.865 Ma 就已形成,并贯穿三门峡东流入海,其后黄河多次下切,先后形成了 T3, T2, T1 阶地;而小浪底至堰师扣马的黄河阶地研究表明,三门峡于 1.2 Ma 就已切开、贯通^[1-29]。王苏民等认为,古三门峡湖在 0.25~0.125 Ma 阶段的沉积物变粗,为中细砂层与含泥砾的砂砾石层互层为主,沉积速率显著降低,据此,古三门峡应于距今 0.125 Ma 左右贯通,东流入海^[2]。显然,潘等认为的是连通,王等认为的是贯通。三门峡贯通后,黄河下游冲积扇迅速扩大,沉积速率由中更新世(0.73~0.15 Ma)的 125 mm/ka,陡增到更新世晚期(0.07~0.0012 Ma)的 350 mm/ka^[32](图 3)。

笔者认为,潘与王等的分歧在于连通与贯通概念的混淆。连通:河流-湖泊组成的河湖系统,上游来沙部分沉积于湖泊内,部分悬移质随径流进入湖泊下游河流(基本无推移质)。如现今的鄂陵湖、扎

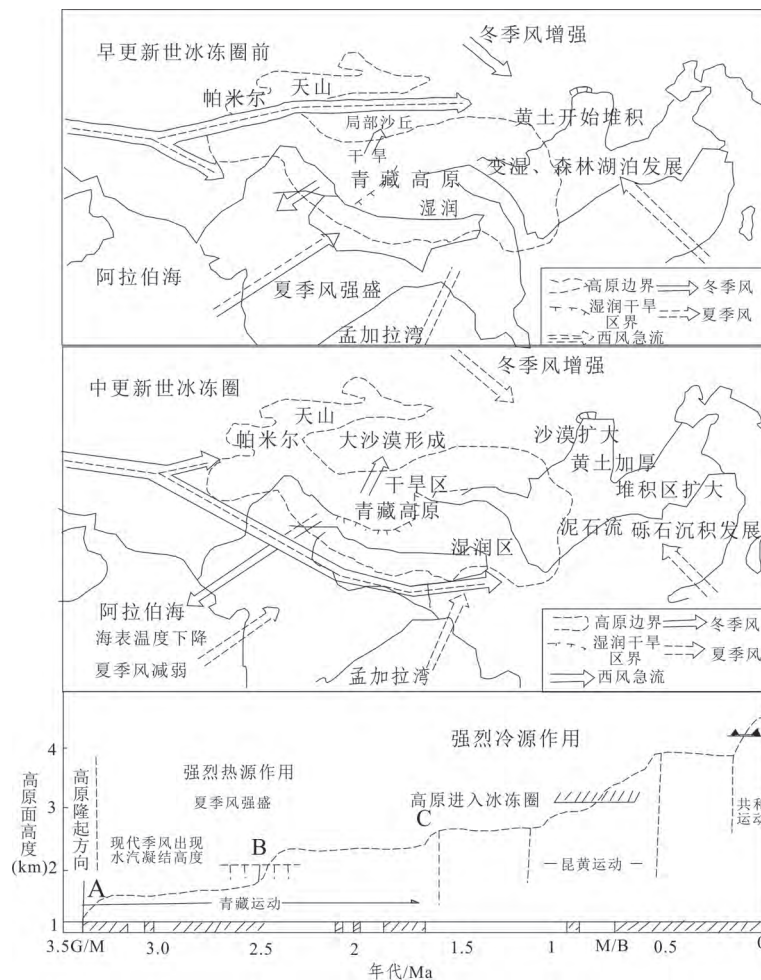


图 3 0.8~0.6 Ma BP 青藏高原进入冰冻圈或最大冰期对季风和环境的影响^[22]

Fig. 3 The cryosphere or the maximum glaciation in the Tibetan Plateau Impacted on the monsoon and environment dating 0.8~0.6 Ma BP^[22]

陵湖的黄河源头河湖连通系统,嫩江上游的克鲁伦河-呼伦湖河湖连通系统。黄河流域第四纪早、中更新世的共和、银川、河套、汾渭及华北等湖盆沉积物均为淡水湖沉积,表明这些古湖一直是连通外流的,后逐渐被填满、贯通。贯通:串珠状连通的河流-湖泊系统中的湖泊被泥沙填满,湖泊消亡,发育河道,推移质泥沙大量泻入下游河流。沉积物粒度变粗,推移质组分大量增加,甚至以推移质为主。如黄河中上游更新世河套、三门湖等湖泊的消亡与黄河的贯通。袭夺也可造成河流贯通,如长江三峡的贯通。

3 长江的形成演化与贯通

考虑到构造-地貌单元的统一性,将长江分为三段:上段,宜宾以上的金沙江;中段,宜宾-宜昌的川江;下段,宜昌以下的长江中下游。宜宾以上的上段,金沙江及雅砻江等主要支流,深切横断山地,河流走向以南北向为主,南北向的金沙江在云南石鼓附近折向东流,为著名的长江第一湾,主要受康滇菱形断块地质构造控制,雅砻江等主要支流走向均为南北向^[7,9]。长江上游新生代断陷盆地沉积分布广泛,早中更新世的昔格达组为粉砂质为主的湖相沉积,主要分布于金沙江、雅砻江、安宁河河谷内,徐则民等的研究表明,昔格达组多为堰塞湖成因^[31]。昔格达组为淡水湖沉积,表明金沙江当时已外流。宜宾-宜昌的中段,川江流经四川盆地,盆地内无新生代河湖相地层分布,主河及主要支流曲流发育,蜿蜒于产状水平的中生代红层组成的方山丘陵,西部成都平原为断陷盆地,第四纪砂砾沉积厚数百米^[32,33]。宜昌以下的下段,长江中下游分布有一系列断陷盆地,如江汉盆地、苏北-南黄海盆地、长江三角洲盆地等新生代河湖相沉积发育^[12,33]。

黄河从上游到下游,新生代断陷盆地基本连续,河湖相沉积发育,黄土-古土壤序列断代标志可靠,学界对黄河形成演化与贯通的认识比较一致。如前所述,三门湖贯通时间的分歧,是连通与贯通概念混淆的缘故。长江形成演化与贯通时间认识的分歧远大于黄河,笔者认为,主要原因是:1. 长江中段川江所在的四川盆地,缺失新生代湖相沉积^[32];2. 断代问题没有解决^[12-16];3. 锆石 U-Pb 同位素年龄谱等物源示踪技术运用的不恰当^[12,13,16]。十余年来,

多位学者从元素地球化学、同位素地球化学、矿物年代学、碎屑矿物组合与特征矿物及环境磁学等方面,对江汉盆地、苏北盆地及长江三角洲中、巨厚沉积连续的沉积物进行了物源示踪研究,以约束长江的贯通时限^[12,13,16]。郑洪波等对南京地区的“雨花台砾岩”开展了碎屑锆石 U-Pb 年龄谱分析,发现它们与现代长江的锆石年龄谱系非常相似,并认为“至少在渐新世/中新世之交(22 Ma),与现代长江类似的沉积物已经到达苏北盆地的西南缘。^[12,13]换句话说,贯通东流的长江水系在这个时期已经建立。笔者认为,测定年龄谱的锆石粒度 >0.25 mm,为推移质,该技术是否适用于湖泊众多的河湖体系的泥沙来源示踪,值得商榷。长江中下游流域及毗邻地区也有这些带谱年龄的火成岩分布,长江上游不是这些碎屑锆石的唯一来源区。

长江上游金沙江流域二叠纪玄武岩广泛发布,攀枝花、西昌等地钒钛磁铁矿闻名于世,中下游江汉平原和三角洲上海附近第四纪沉积物剖面的上部,均出现高磁化率层,表明金沙江物质下泄,三峡贯通。高磁化率层的底部年代存在争议:Zhang 等认为,江汉盆地新沟孔和周老孔的高磁化率层位底部的磁性倒转为布容/松山期(B/M)界限(0.78 Ma)^[14];陈静认为,上海浦东机场孔的为地磁漂移的 Blake 事件(0.125 Ma)^[15](图4)。

刘彧等对川江阶地砾石层和三峡出口宜昌砾石层开展了宇成核素断代研究(另文,待发表),初步结果表明,四川盆地内长江、岷江、沱江、嘉陵江的最高一级阶地样品埋藏年龄和暴露年龄均较年轻,为 0.15~0.3 Ma,在误差范围内一致;除底部个别样品外,宜昌砾石层不同海拔高度样品的埋藏年龄均较年轻,顶部(高程 208 m)剖面砾石埋藏年龄为 0.19±0.11 Ma。底部(高程 75 m)的三个砾石样品埋藏年龄分别为 0.19 Ma、0.83 Ma 和 4.87 Ma,差异较大,年龄老的砾石应为混入的“古老”砾石。刘彧的宇成核素断代研究的初步结果,支持陈静上海浦东机场钻孔古地磁断代的解释,也就是说,长江三峡的最后贯通发生于 0.125 Ma 左右。

长江三峡贯通最后发生于重庆奉节附近,著名的瞿塘峡是长江贯通的产物。奉节以西是四川盆地向斜,以东是鄂西香溪盆地向斜。两向斜的结合部奉节一带为产状水平的三叠纪厚层碳酸盐岩,两侧向斜内为缓倾的中生代红层。燕山运动结束的白垩

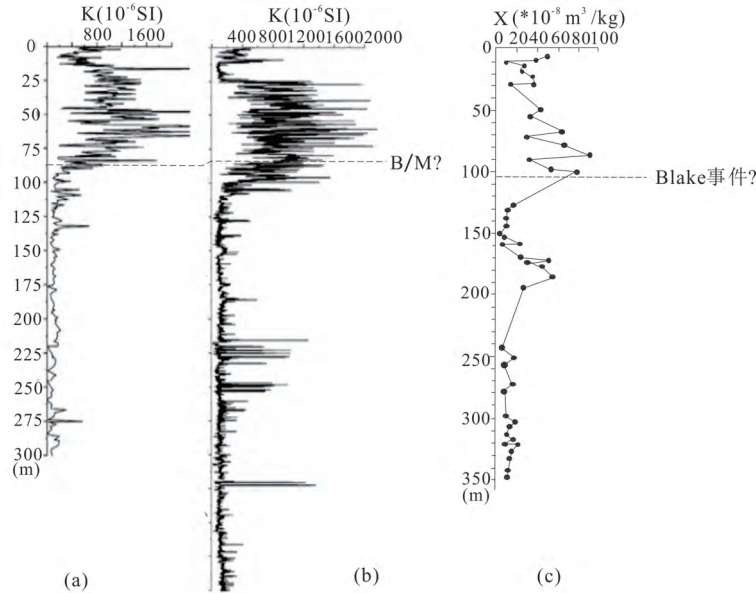


图 4 江汉盆地新沟孔、周老孔岩芯和上海浦东机场孔磁化率(体积磁化率)随深度变化曲线^[10]

(a) 周老孔 (b) 新沟孔 (c) 上海机场孔

Fig. 4 The curves of magnetic susceptibility (volume susceptibility) change of Xingou hole , Zhoulao hole core in Jianghan basin and Shanghai Pudong airport hole with depth^[10]

(a) Zhoulao hole (b) Xingou hole (c) Shanghai Pudong airport hole

纪末,奉节一带为分水岭,以西的四川盆地水系西流(川江);以东的香溪盆地水系东流(古长江)(图 5a)。奉节瞿塘峡以西和以东的长江河段均为北东走向,伸展于分属四川向斜和香溪向斜的北东向中生代红层级向斜内,瞿塘峡河段为北西走向,横穿两向斜之间的三叠纪碳酸盐岩背斜(图 5b)。奉节一带为天坑、地缝发育。著名的小寨天坑坑口直径 622 m,坑底直径 522 m,深 666.2 m;天井峡地缝长 14 km,底宽 3~30 m,地缝两壁陡峭如刀切,是典型的“一线天”^[36]。除干流的瞿塘峡外,碳酸盐岩区

的长江支流也多为峡谷,如错开峡等^[10]。湿润喀斯特地区的河流,往往是地下河先发育,顶板岩层局部坍塌形成天坑,全部坍塌贯通形成地缝或峡谷。瞿塘峡贯通前,是沿该河段三叠纪碳酸盐岩背斜的北西向构造线发育的地下河,将西流的川江和东流的古长江连通。部分川江水通过地下河流向古长江,持续的化学溶蚀和流水侵蚀,地下河不断扩大,顶板支撑不住坍塌,形成连通的地上河。由于西高东低的地势,东流的古长江最终袭夺了西流的川江,形成了“天下险”夔门,不尽长江从此滚滚东流。巨量泥

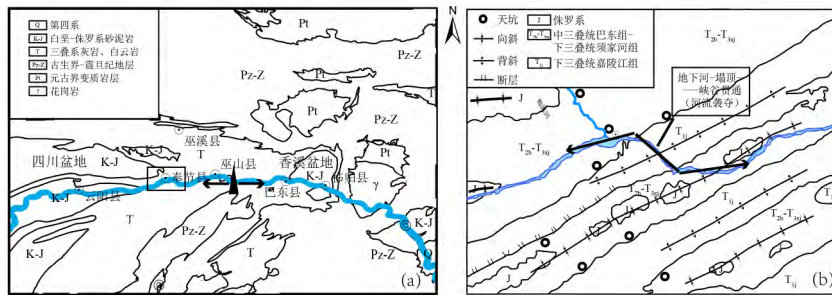


图 5 三峡贯通、川江东流略图。(a) 贯通前川江西流,古长江东流; (b) 奉节一带地下河贯通-塌顶-地表河袭夺示意图

Fig. 5 Three Gorges formation and Chuan River east-flowing.

(a) Before the Three gorge formation , Chuan River west-flowing , the ancient Yangtze east-flowing;

(b) Underground river ran through , ground collapsed , surface river capture in Fengjie area.

沙下泄,在宜昌一带形成了厚达百米以上的宜昌砾石层组成的巨大冲积扇。

第四纪前,四川地台为基础的川中丘陵区为平坦的夷平高地,三峡一带为古长江与川江的分水岭。第四纪以来,青藏高原东缘的横断山地不断隆升,0.8 Ma 后大面积山地进入冰冻圈,发生大规模的冰川作用。间冰期温暖湿润的气候,不但促进冰川消融,加大了河川径流,而且加速碳酸盐岩的地下化学溶蚀和地下河的形成演化。末次间冰期(0.13 Ma)的气候突然变暖,引起的川江径流剧增和三峡喀斯特地下河-地上河转化的加速,可能给了长江三峡贯通最后一击。三峡贯通应该是一个过程,我们初步认为贯通发生于0.30~0.12 Ma 的中更新世末期-晚更新世早期。宜宾金沙江汇口处,无第四纪巨型冲积扇发育,表明第四纪期间金沙江一直汇入川江。洞庭湖沅江汇口常德一带,中更新世古冲积扇发育,推测三峡贯通前,川江沿乌江南下,经思南-岑巩-铜仁,入沅江-洞庭湖。后由于三峡袭夺和梵净山隆升,川江改道经三峡流向江汉盆地。

4 结 语

长江、黄河的形成演化是在新生代以来统一的构造-气候-地貌体系中发生的重大地貌事件;印度板块与亚洲大陆碰撞和太平洋板块向亚洲大陆之下俯冲,造成了东高西低变为西高东低的地势变化;青藏高原的隆升和西太平洋暖池的出现,促进了东亚季风的形成和强化。

中更新世以来(昆黄运动、共和运动),西部山地隆升,冰冻圈形成,季节性冰川融水加大了河川径流,为长江、黄河的贯通奠定了水动力基础。末次间冰期的气候突然变暖,不但导致冰川消融加速,河川径流陡增,给了长江、黄河贯通最后一击;而且加速三峡一带碳酸盐岩地下化学溶蚀,促进了地下河发育和长江瞿塘峡地表河袭夺的完成。黄河三门峡和长江三峡的贯通时间分别为0.125 Ma 左右和0.30~0.12 Ma。

致谢:朱颖彦博士对本文英文摘要进行了校对与修改,特此致谢。

参考文献(References)

[1] 潘保田,王均平,高红山,等. 从三门峡黄河阶地的年代看黄河何时东流入海[J]. 自然科学进展, 2005, 5(6): 700-705 [PAN

Baotian, WANG Junping, GAO Hongshan, et al. From the age of the Yellow River terrace in Sanmenxia Gorge when the Yellow River eastward into the sea [J]. Progress in Natural Science, 2005, 5(6): 700-705]

[2] 王苏民,吴锡浩,张振克,等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究[J]. 中国科学, D 辑, 2001, 31(9): 760-768 [WANG Sunming, WU Xihao, ZHANG Zhengke, et al. Sedimentary records of environmental evolution in the Sanmen Lake Basin and the Yellow River running through the Sanmenxia Gorge eastward into the sea [J]. Science China Earth Sciences, 2002, 45(7): 595-608]

[3] WILLIS B, BLACKWELDER E, SARGENT R H, et al. Research in China. Washington: Press of Gibson Brothers, 1907, 278-339

[4] LEE J S. Geology of the gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the gorges [J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1924, 3(3-4): 351-392

[5] LEE C Y. The development of the upper Yangtze valley [J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1993, 3(2): 107-118.

[6] BARBOUR G B. Physiographic history of the Yangtze [J]. Geographical Survey of China, Memoirs, 1935, 14: 112

[7] 任美铎,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 [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]

[8] LI J J, XIE S, KUANG M. Geomorphic evolution of the Yangtze gorges and the time of their formation [J]. Geomorphology, 2001, 41(2): 125-135

[9] 沈文昌,杨逸畴. 滇西金沙江袭夺问题的新探讨[J]. 地理学报, 1963, 29(2): 87-107 [SHEN Wangchang, YANG Yichou. New research on the problem of river-capture of Ching-Sha-Chiang (the upper Yangtze), western Yunnan Chinsha-Chian, China [J]. Acta Geographica Sinica, 1963, 29(2): 87-107]

[10] 杨达源. 长江三峡的起源与演变[J]. 南京大学学报, 1988, 24(3): 466-474 [YANG Dayuan. The origin and evolution of the Three gorges of the Changjiang (Yangtze) River [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science edition), 1988, 24(3): 466-474]

[11] CLARK M K, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. Tectonics, 2004, 23: TC1006

[12] ZHENG Hongbo, CLIFT P D, WAN Ping, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J], PNAS, 2013, 110(19): 7556-7561

[13] 郑洪波,王平,何梦颖,等. 长江东流水系建立的时限及其构造地貌意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 621-630 [ZHENG Hongbo, WANG Ping, HE Mengying, et al. Timing of the establishment of the east-flowing Yangtze River and tectonic-

- geomorphic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(4): 621–630]
- [14] ZHANG Yufen, LI Changan, WANG Qiuliang, et al. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges [J]. *Chinese Science Bulletin*, vol. **53**(4): 584–590
- [15] 陈静. 长江河口区晚新生代沉积物中标志性地物源分析及其河流贯通入海意义[D]. 上海: 华东师范大学, 2006. [CHEN Jing. Diagnostic sediment indicators in the Late Cenozoic sediments, the Yangtze River coast, China, a special reference to river channelization to the sea [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006]
- [16] 范代读, 王扬扬, 吴伊婧. 长江沉积物源示踪研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(5): 515–528 [FAN Daidu, WANG Yangyang, WU Yijing. Advances in provenance studies of Yangtze Riverine sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(5): 515–528]
- [17] 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. *地学前缘*, 2016, **23**(6): 1–23 [PAN Guitang, LU Songnian, XIAO Qinghui, et al. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, **23**(6): 1–23]
- [18] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–412 [LIU Dongsheng. *Loess and Environment* [M]. Beijing: Science Press, 1985: 1–412]
- [19] AN Zisheng, KUTZBACH J E, PRELL W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, **411**: 62–66
- [20] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷—探索气候与构造的关系[J], *第四纪研究*, 1998, **18**(3): 213–221 [WANG Pingxian. Deformation of Asia and global cooling: searching links between climate and tectonics [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, **18**(3): 213–221]
- [21] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用[J]. *地球科学*, 2005, **30**(1): 1–18 [WANG Pingxian. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia [J]. *Earth Science*, 2005, **30**(1): 1–18]
- [22] 施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系[J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(3): 197–208 [SHI Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relationship with the global change in the Mid Quaternary [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3): 197–208]
- [23] 李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. *中国科学*, 1979, (6): 78–86 [LI Jijun, WEN Shixuan, ZHANG Qingsong, et al. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Science China*, 1979, (6): 78–86]
- [24] LI Jijun, FANG Xiaomin, SONG Chunhui, et al. Late Miocene – Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes [J]. *Quaternary Research*, 2014, **81**(3): 400–423
- [25] 陈富斌, 高生淮, 陈继良, 等. 甘孜黄土剖面磁性地层初步研究[J]. *科学通报*, 1990, **35**(20): 1600 [CHEN Fubing, GAO Shenghuai, CHEN Jiliang, et al. Preliminary study on magnetic strata of Garz loess profile [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, **35**(20): 1600]
- [26] 方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土与青藏高原冰冻圈演化[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(3): 193–200 [FANG Xiaoming, CHEN Fubing, SHI Yafeng, et al. Garz loess and the evolution of the cryosphere on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 1996, **18**(3): 193–200]
- [27] 张信宝, 周杰. 晚更新世以来黄渤海海侵与黄土高原地貌区域分异[J]. *中国沙漠*, 1996, **16**(4): 411–416 [ZHANG Xinbao, ZHOU Jie. Marine transgressions in the Huanghai Bohai sea basin and geomorphological evolution in the Loess Plateau since Late Pleistocene [J]. *Journal of Desert Research*, 1996, **16**(4): 411–416]
- [28] 戴英生. 黄河的形成与发育简史[J]. *人民黄河*, 1983, (2): 1–7 [DAI Yingsheng. Brief history of formation and evolution of Yellow River [J]. *Journal of People's Yellow River*, 1983, (2): 1–7]
- [29] 潘保田, 王均平, 高红山, 等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. *科学通报*, 2005, **5**(3): 255–261 [PAN Baotian, WANG Junping, GAO Hongshan, et al. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges [J]. *Chinese Science Bulletin* 2005, **5**(3): 255–261]
- [30] 刘书丹, 李广坤, 李玉信, 等. 从河南东部平原第四纪沉积物特征探讨黄河的形成与演变[J]. *河南地质*, 1988, **6**(2): 20–24 [LIU Shudan, LI Guangkun, LI Yuxin, et al. The formation and evolution of the Yellow River from Quaternary sediments in the eastern plain of Henan province [J]. *Henan Geological*, 1988, **6**(2): 20–24]
- [31] 徐则民, 刘文连. 昔格达组地层研究中需要注意的若干关键问题[J]. *地学前缘*, 2011, **18**(5): 256–270 [XU Zeming, LIU Wenlian. Some problems in the study of the genesis of Xigeda Formation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, **8**(5): 256–270]
- [32] 刘兴诗. 四川盆地的第四纪[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983, 33–35 [LIU Xingshi. *Quaternary period of Sichuan basin* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1983, 33–35]
- [33] 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, *中国地质*, 2013, **40**(2): 460–468 [JIANG Huajun, LI Changan, ZHANG Yufen, 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]
- [34] 柏道远, 李送文, 周柯军, 等. 1:25万常德市幅构造—沉积地貌类型划分及其对江汉—洞庭盆地第四纪地质与环境研究的启示[J]. *中国地质*, 2010, **37**(2): 280–297 [BAI Daoyuan, LI

- Songwen, ZHOU Kejun, et al. Tectonic-sedimentary landform classification of 1:250000 Changde Sheet and its implication for researches on Quaternary geology and environment of Jianghan-Dongting basin[J]. *Geology in China*, 2010, **37**(2): 280-297
- [35] 李庭 李长安 康春国 等. 宜昌砾石层的沉积环境及地貌意义[J]. *中国地质* 2010, **37**(2): 438-445 [LI Ting, LI Changan, KANG Chunguo, et al. Sedimentary environment and geomorphological significance of the gravel bed in Yichang[J]. *Geology in China*, 2010, **37**(2): 438-445]
- [36] 奉节天坑地缝, 百度百科. [Fengjie tiangkeng floor sewing, Baidu Encyclopedia] <https://baike.baidu.com/item/%E5%A5%89%E8%8A%82%E5%A4%A9%E5%9D%91%E5%9C%B0%E7%BC%9D/3487479?fr=aladdin>

On the Chronology of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers

ZHANG Xinbao^{1*}, LIU Yu², WANG Shijie², LIU Weiming^{1*}, XUE Wenxuan³

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China;*

3. *College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: The formation date and evolution of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers is an important geomorphological event in a united tectonics-climate-geomorphology system in Cenozoic era in China as well as in the world. Owing to collision between the Indian and Asian plates, and simultaneous subduction of the Pacific plate under Asia plate, the geomorphology in China mainland had involved from “east high, west low” to “west high, east low” during Cenozoic era. Consequently, the Eastern Asia monsoon was introduced and enhanced. The hydrological systems of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers were formed mostly due to the joint changes of regional terrains and the formation of the Eastern Asia monsoon. In the early Quaternary, there were fresh lakes sprinkled at the regions where the Yellow River would be and then it was gradually channelized with the disappearances of these lakes. Due to the problems of dating, provenance tracing and incomplete sedimentary records, the date of formation and channelization of the Yangtze River was highly controversial. The tectonic activities since middle Pleistocene induced an accelerating uplifting of mountains in the eastern margin of the Tibet Plateau and resulted in those mountains to be exposed to the cryosphere. Increasing runoff due to glacier melting was the hydrodynamic basis for the channelization of the two rivers. During the Last Interglacial period, fast warming up not only resulted in the rapid rise of runoff in rivers by glacier melting, but also promoted chemical corrosion of carbonate rocks in the Three Gorges. The chemical corrosion expedited the growth of underground streams and complement of the river-capture process in the Qutanxia Gorge. It is our understanding that the complete channelization and formation of the two rivers with the current hydrological patterns were finally finished during the Last Interglacial period. The formation of the Sanmengxia Gorge occurring at the age of the Sanmen lake’s disappearance in the Yellow River was about 0.125 Ma, while the transformation of the Three Gorges from complex underground rivers to a surface river in the Qutang Gorge of the Yangtze River was finished during the period of 0.30-0.12 Ma.

Key words: Yellow River; Yangtze River; tectonics-climate-geomorphology; connection; river channelization