南秦岭大巴山北缘山间盆地水系演化

谢婉婷¹, 王先彦^{1*}, 张瀚之^{1†}, 刘全玉², 王社江^{3,4}, 鹿化煜¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

2. 安康学院旅游与资源环境学院, 安康 725000;

3. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;

4. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044

* 通讯作者, E-mail: xianyanwang@nju.edu.cn

† 通讯作者, E-mail: hanzhizhang@nju.edu.cn

收稿日期: 2020-08-06; 收修改稿日期: 2021-05-24; 接受日期: 2021-07-23; 网络版发表日期: 2021-10-12

国家自然科学基金项目(批准号: 41522101、41971005、41901004)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0205)和国家社科重大基金项目(编号: 19ZDA225)资助

摘要 河流袭夺对地貌发育以及人类迁徙等均有着重要的意义. 在秦巴山地区, 一直以来存在嘉陵江袭夺汉江的观点, 但有很大争议. 本文通过地貌指数和碎屑锆石U-Pb年龄谱相结合, 探讨了秦巴山间盆地水系格局的演化过程, 认为伴随着古长江的演化, 汉江自东向西逐步袭夺南北向嘉陵江流域. 在地貌证据上, 石泉-安康盆地内发育不匀称宽阔谷地和一系列风口; 河谷形态和河谷宽高比(V_f)显示可能存在两次快速下切过程. 流域高程积分(HI)反映地貌自西向东逐渐由老年期转向幼年阶段. χ 值显示分水岭向月河一侧迁移, 月河在逐渐萎缩. 沉积记录上, 锆石U-Pb年龄谱显示了物源的变化, 盆地内高海拔河流阶地沉积物显示了3个锆石年龄峰值(200~250、400~505、700~900 Ma), 并以印支期峰值(200~250 Ma)为主, 而近代水系沉积物锆石年龄仅显示晋宁期(700~900 Ma)的单峰值. 综合研究表明, 区域内水系发生了两次主要的河流袭夺: (1) 古汉江切穿区域挤压脊自东向西袭夺汉中盆地水系(古嘉陵江水系); (2) 随着石泉-安康盆地内分水岭隆起, 南侧支流袭夺干流, 形成现代汉江上游水系格局. 在这一过程中, 区域性走滑断裂及其伴生的挤压抬升起着控制作用, 上游次级流域的演化滞后于主河道对构造和袭夺的响应. 结合秦岭地区古人类研究, 河流袭夺造成宽阔谷地的沟通, 可能为古人类沿河谷深入秦巴山地提供了便利的地貌条件.

关键词 地貌指数, 锆石U-Pb年龄谱, 水系格局, 河流袭夺, 安康断裂, 山间盆地, 南秦岭

1 引言

河流是大多数区域地貌的骨架, 在整个地貌过程中扮演着关键角色(Whipple, 2004). 流域作为动态地貌系统的一部分, 河道纵剖面、水系平面展布等会不

断朝着构造抬升和侵蚀之间的平衡进行调整(Howard, 1965), 以响应构造和气候的变化(Cox, 1994; Bishop, 1995; Whittaker, 2012; Menier等, 2017). 然而, 大多数研究更多关注这一过程中河流垂向上的变化, 而假设水系格局不变(Pritchard等, 2009; Kirby和Whipple,

中文引用格式: 谢婉婷, 王先彦, 张瀚之, 刘全玉, 王社江, 鹿化煜. 2022. 南秦岭大巴山北缘山间盆地水系演化. 中国科学: 地球科学, 52(3): 497–516, doi: 10.1360/SSTe-2020-0206

英文引用格式: Xie W, Wang X, Zhang H, Liu Q, Wang S, Lu H. 2021. Drainage evolution in intermontane basins at the Qinling-Daba Mountains. Science China Earth Sciences, 64(11): 1949–1968, <https://doi.org/10.1007/S11430-020-9820-y>

2012). 事实上, 水系格局也是处于动态变化中的(Willett等, 2014; Whipple等, 2017), 包括流域间分水岭的缓慢移动和导致流域面积突变的河流袭夺事件, 甚至可能造成水系的完全重组(Willett等, 2001; Castelltort等, 2012; Perron等, 2012; Goren等, 2014; Bonnet, 2009).

河流袭夺在水系演化中发挥着重要作用, 在局部到次大陆的空间尺度上都存在(Clark等, 2004; Clift和Blusztajn, 2005; Hu等, 2017; Shugar等, 2017). 自然界中水系格局的变化对地貌发育以及人类与动物迁徙等均有着重要的意义. 河流袭夺发生后由于基准面、流量以及泥沙量的改变, 导致剥蚀速率的变化(Yanites等, 2013), 不仅对地貌演化具有显著影响(Prince等, 2011; Willett等, 2014; Yang等, 2015; Fan等, 2018), 加剧了构造-侵蚀-沉积物搬运之间相互作用的复杂程度, 而且反过来也能为区域构造历史提供独特的线索(Clark等, 2004; Zhang等, 2017). 除此之外, 河流袭夺还可能造成物种间的地理隔离等生态影响(Johnson, 1907; Craw等, 2016), 甚至影响到人类定居地的迁移

(Singh等, 2017).

秦岭-大巴山作为中国重要的南北过渡带, 同时也是连接青藏高原与东部平原的大尺度生态廊道(张百平, 2019)(图1). 长江重要的支流嘉陵江、汉江在此发育, 分别自北向南、自西向东注入长江. 几十年来, 人们一直认为嘉陵江在秦汉至六朝时期袭夺了汉江的源头(Shen, 1956; 周宏伟, 2010), 但定性的地貌证据和历史资料存在很多局限和争论(赵炳清和周运中, 2013; 杨霄, 2016), 且这些证据多聚焦于嘉陵江流域内及二者分水岭处.

然而, 秦巴山间整体的水系格局和汉江特殊的水系形态(图2)是否指示了另一种解释: 该地区存在自北向南注入嘉陵江的古水系(图2a), 伴随着古长江演化(图1), 汉江自东向西逐步袭夺古嘉陵江水系? 本文尝试从构造地貌和沉积示踪相结合的角度, 通过流域地貌形态分析(包括地貌指数的计算)和沉积物碎屑锆石U-Pb年龄谱, 来检验上述汉江自东向西袭夺嘉陵江水系的推测, 探讨秦巴山区山间盆地水系演化过程.

图1 秦岭-大巴山区现代和古代水系

古红河和长江水系演化数据引自Clark等(2004)和Zheng H等(2013), 红色箭头代表水系格局的改变, 数字代表先后顺序; 白色虚线框为以秦岭-大巴山脉为主体的中国南北过渡带区域(张百平, 2019)

图2 秦巴山间现代水系以及可能的古水系格局(a)和研究区现代水系特征(b)

(a) 黑色虚线为流域分水岭, 绿色箭头为嘉陵江西侧现今留存的树枝状水系, 红色箭头为东侧自北向南注入嘉陵江古水系的可能路径, 红色圆圈指示汉江自东向西袭夺过程中可能的袭夺点; (b) 白色箭头代表汉江干流整体流向, 红色箭头代表汉江大角度拐弯处流向, 蓝色箭头代表盆地内支流流向

2 研究区概况

2.1 地质地貌背景

秦岭造山带是华北陆块与扬子陆块经过晚元古代到三叠纪复杂碰撞拼合而形成的一个巨型纬向造山带, 又在晚中生代经历陆内走滑伸展变形(张国伟等, 1996; 孟庆任, 2017), 其内分布大量的岩浆岩和变质岩。南秦岭地区出露大量印支期(200~250Ma)碰撞型花岗岩, 以及部分燕山期(133~199Ma)花岗岩, 集中分布在汉中盆地北侧, 而南侧出露主要为元古代晋宁期(700~900Ma)岩体(图3)。在大巴山区域, 安康断裂两侧牛山变质杂岩体和北大巴山推覆带出露了部分晋宁期耀岭群和郧西群变质火山岩体(蔡志勇等, 2006; 凌文黎等, 2007), 以及少量加里东期(400~505Ma)变质岩体(Zheng Y F等, 2013)(参考国家地质图数据库(<http://www.ngac.org.cn/Map/List>)提供的1: 25万地质图和图3所引文献的测年数据)。晚白垩世以来沿大型断裂带发育了一系列断陷盆地, 大型断裂带的活动控制着该区域断陷盆地的产生和变形(滕志宏和王晓红, 1996; 李建华等, 2010), 图4显示了南秦岭-大巴山之间主要的断陷盆地。

本文主要的研究区域石泉-安康盆地(108°E~109.5°E, 32°N~34°N), 西起石泉, 往南东经汉阴, 止于安康东侧, 全长约120km(图5a)。盆地南侧为北西向弧形延伸的凤凰山山脉, 山势陡峻, 最大地形梯度达 700m km^{-1} 。盆地西段狭窄, 向东渐宽, 最大低凹洼地宽度15km, 由一系列近东西向次级洼地(石泉洼地、池河洼地、汉阴洼地、恒口洼地、安康洼地)和相间次级凸起(马岭关、高粱、关根子、长枪岭)构成(图5b)。盆地内堆积了3000m厚的河湖相沉积(甘家思等, 2002)。

研究区内主控断层为安康断裂(图5a), 是南秦岭构造带南部的一条区域性断裂, 总体走向为北西、北北西向, 属于大巴山构造带的边界断裂(李建华等, 2010; 张岳桥等, 2010; 陈虹等, 2014)。该断裂是一条中强地震活动带, 曾于788年发生竹山宝丰6.5级地震, 于1569年发生安康5级地震, 其他位置也发生过多次5~5.5级地震(甘家思等, 2002)。

在早第三纪时, 安康断裂呈左旋走滑运动, 在近东西向段形成单边拉分断陷盆地。恒口-安康段首先拉分, 然后依次为汉阴、池河、石泉地段, 形成相应的次级洼地, 宽度逐渐向西收敛(图5a)。而在安康断裂西

图3 汉江上游岩浆岩、变质岩分布图及本文采样位置

源区岩体锆石U-Pb年龄数据来自张宗清等(1996, 2001)、杨崇辉等(1999)、凌文黎等(2002, 2007)、齐文等(2002)、李怀坤等(2003)、胡健民等(2004)、闫全人等(2004)、赖绍聪等(2007)、Qin等(2007, 2008a, 2008b, 2009)、吴峰辉等(2009)、吴美玲等(2009)、李建华等(2012)、刘志慧等(2018, 2019)、Zhou等(2002)、Ling等(2003, 2006)、Zhao等(2006)、Zhao和Zhou(2008)、Xia等(2009)、Xu等(2009)、Cui等(2010)、Geng(2010)、Zhao等(2010)和Dong等(2011, 2012)

图4 秦巴山区汉江流域断陷盆地及旧石器时代古人类遗址

星标表示地震位置及年份和震级

端产生相应的推挤, 形成区域挤压脊, 例如石泉北西的饶峰河西侧. 这一中等尺度的条状脊岭走向北北西, 长

约30km, 海拔约1312m(图5a). 同样, 与次级拉分洼地相对应, 洼地之间分别发育着较小条状挤压脊岭或横

图 5 (a)安康盆地断裂拉分演化和(b)石泉-安康盆地地形剖面(各级洼地及其间的横向凸起)

断层数据引自甘家思等(2002), 图中条带剖面反映安康断裂10km范围内的地形起伏情况

向凸起(图5b)。这些挤压脊岭在历次盆地的演化进程中, 可能经受过多次挤压, 使其不断抬升、变形。现代地震台网监测表明, 自1970年以来研究区 $2 \leq M_L \leq 4.7$ 的地震主要分布于安康断裂西端、石泉-安康盆地西北端挤压脊部位和相邻地段, 恒口洼地、汉阴洼地(图5a、5b)是石泉-安康盆地的第四纪主要拉分松弛部位(甘家思等, 2002)。

2.2 水系特征

秦巴山地间, 长江最大的支流——汉江在此孕育, 自西向东串联起山间盆地, 在上游区域形成南北支流对冲、高角度汇流的格状水系(图2a)。在汉江源头以西, 嘉陵江自北向南注入长江, 形成深切曲流的树枝状水系(图2a)。东西相距不过30km的长江支流在此形成了截然不同的水系格局(Howard, 1967)。其中, 嘉陵江的东侧支流相较于西侧明显不发育; 而汉江上游区域, 南侧的支流相较于北侧明显更短、更少, 发育程度较低(图2a)。

汉江东西向自汉中盆地流出, 在金水处先往北、再折向东南方向近180°拐弯后, 穿过安康断裂和凤凰

山西端进入石泉洼地后, 再次大角度向南拐入山高谷深的大巴山地区, 流经北大巴山推覆带后, 又穿过凤凰山向东汇入安康洼地, 重新转为东西流向, 且汉江干流绕过石泉-安康盆地, 形成了一个向南的巨大拐弯(图2b)。石泉-安康盆地内主要支流有月河和池河, 二者以高粱凸起为分水岭; 月河沿盆地自北西向南东流, 在安康地区汇入汉江; 其西北侧的池河流入盆地后, 以大角度注入汉江(图2b)。

3 研究材料与方法

3.1 研究材料

本文采用MERIT DEM 90m分辨率的数字高程数据进行河流的提取与地貌指数的计算, MERIT DEM是通过现有的DEMs(SRTM3 V2.1和AW3D-30m V1)去除多种误差成分(绝对偏差、条纹噪声、斑点噪声和树高偏差)而开发的集成数据(<http://hydro.iis.u-to-kyo.ac.jp/~yamada/>)。

为了进行区域的物源分析, 我们分别采集了区域内汉江干流以及支流的现代河流沉积物和河流阶地样品(采样位置见图3)。其中, XZ和AK为现代汉江干流河道砂样, 分别位于汉江出汉中盆地河段和出安康盆地河段。在石泉-安康盆地内, YH样品位于汉江支流月河T2阶地(拔河13m)上, 该阶地由上部~3m的河流粉砂/砂层和其下~4m的河流粗砂/砾石层组成, 砾石磨圆和分选较好, 呈叠瓦状排列(图6a)。同时我们在该区域还采集了高海拔处的早期河流相沉积物ZJB、MCT以及MZG(图6b~6d), 分别采集自石泉洼地、月河洼地以及关根子风口上的红色砂砾层中(拔河115m以上; 位置见图3和图5b); 其中ZJB剖面为砾石夹砂层, 砾石粒径3~5cm, 磨圆状与棱角状混杂, MCT和MZG剖面被植被覆盖, 沉积结构不清晰, 沉积物有一定胶结, 砾石磨圆较好, 具有一定的排列方向, 粒径较大可达15cm(图6)。

3.2 研究方法

利用ArcGIS 10.2和Matlab 2019提取秦巴山区主要河流的地貌指数, 反映这一区域的地形和河流地貌特征; 同时结合锆石年龄谱对流域盆地内的沉积物进行物源分析, 还原这一地区的水系演化过程, 并验证水系袭夺的推测。

图6 铅石采样剖面沉积物组成

(a)现代月河阶地剖面YH, 拔河13m; (b)~(d)为早期河流相沉积, 分别对应ZJB、MCT、MZG(位置见图3)

3.2.1 地貌指数

本文利用TecDEM(Shahzad和Gloaguen, 2011a, 2011b)自动提取了汉江上游干流和43条主要支流; 选取河谷宽高比(Valley floor width-to-height ratio, Vf) (Bull和McFadden, 1977)、河流陡峭指数(Normalized steepness index, K_{sn}) (Wobus等, 2006)、面积-高程积分(Hypsometric Index, HI) (Strahler, 1952)等地貌指数进行了计算分析。

(i) 河谷宽高比. Vf 指数可以定量描述河谷的横剖面形态, 是区分宽阔河谷和深切峡谷的参数(Bull和McFadden, 1977), 计算公式为

$$Vf = 2Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)], \quad (1)$$

式中, Vfw 为谷底的宽度, Esc 为谷底的高程, Eld 为河谷左侧谷肩的高程值, Erd 为河谷右侧谷肩的高程值(面向下游方向)。

Vf 的相对高值($\gg 1$)指示宽而浅的河谷, 河谷侧向侵蚀发育, 地貌处于衰退过程(如谷底变宽和分水岭降低), 这通常反映了构造活动相对不活跃, 且局部侵蚀基准面趋于稳定; 相反, Vf 的相对低值($\ll 1$)指示深而窄的V型峡谷, 河流快速下切侵蚀, 这可能与区域构造活跃下的快速抬升相关(Seong等, 2008)。

本文沿汉江干流均匀选取了多条河谷横剖面, 并计算了其 Vf 比值。重点在河流形态转变区域和主要支流区域开展了高密度的分析, 具体包括汉江流经金水

和石泉区域的干流河谷, 以及石泉-安康盆地内的主要支流(池河、月河)河谷, 以对比分析沿主河道和支流的河谷形状变化。

(ii) 河流陡峭指数. 在构造活动强烈的地区, 主要发育基岩河道或基岩-冲积混合河道(Whipple, 2004)。河流侵蚀对于基岩河道是一种剪应力(Flint, 1974; Howard和Kerby, 1983), 在河流的水力侵蚀模型(Stream power incision model)中, 基岩侵蚀速率(E)为如下的幂函数:

$$E = KA^m S^n, \quad (2)$$

式中, E 为垂直向下的河流下切速率, K 为侵蚀系数, A 为上游流域盆地的面积, S 河段坡度, m 、 n 为经验参数。

当河流处于均衡状态(基岩河道的抬升速率 U 等于河流的下切速率 E)时, 可推导出:

$$\frac{dz}{dx} = S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}} = K_s A^{-\theta}, \quad (3)$$

式中, z 代表河道的高程; x 代表距源头的距离; $\theta = \frac{m}{n}$ 代表均衡河道纵剖面凹曲指数(concavity index);

$K_s = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}}$ 为均衡河道纵剖面陡峭指数(steepest index)。Wobus等(2006)提出用0.45作为凹度参考值 θ_{ref} , 得到归一化陡峭指数 K_{sn} , 使得不同河流之间可以相互

比较.

在坡度-面积的双对数坐标关系图中, 流域面积与河段坡度可拟合为一条倾斜的直线, 直线斜率的绝对值即为凹度, 截距是陡峭系数的对数值(Kirby等, 2003). 由于陡峭系数与基岩抬升速率成正比, 因此常被用来反映区域隆升速率的高低(Kirby等, 2003).

(iii) 面积高程积分. 基于Davis的地貌侵蚀循环理论, Strahler(1952)提出面积-高程积分曲线及积分值的定量描述, 即以流域盆地的相对高度比(h/H)为纵轴、以相对面积比(a/A)为横轴而得到的曲线, 面积高程曲线与坐标轴所围的面积就是面积高程积分值(HI).

Pike和Wilson(1971)研究表明高程起伏比近似等于面积-高程积分值, 故推导出简易计算公式如下:

$$HI = (H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}) / (H_{\text{max}} - H_{\text{mean}}), \quad (4)$$

式中, HI为流域高程积分, H_{mean} 为流域内高程的平均值, H_{min} 和 H_{max} 分别为流域内高程最小值和最大值.

面积-高程积分表示地貌侵蚀残余量, 能够反应流域盆地的地貌演化阶段(Strahler, 1952). 流域地形演化时间越长, 侵蚀程度越高, 面积高程曲线呈现凹形, 面积高程积分值越低, 表明地貌发育阶段为老年期; 反之, 面积高程曲线呈凸形, 面积高程积分值较高, 表明地貌发育阶段为幼年期; 介于两者之间呈现S形, 则为地貌发育的壮年期阶段(Strahler, 1952).

(iv) χ 值. 由于水力侵蚀方程在计算坡度时, 对高程微分会导致误差再次被引入, 同时高程取样间隔的问题, 都会加大计算结果的不确定性; 为了避免这种误差传播, 尽可能多地保存河道信息, Perron和Royden(2013)提出了另一种对方程直接积分求解的方法(χ -plot), 表述为

$$Z(x) = Z(x_0) + \left(\frac{U}{KA_0^m} \right)^{\frac{1}{n}} \int_{x_0}^x \left(\frac{A_0}{A(x)} \right)^{\frac{m}{n}} dx, \quad (5)$$

式中, 积分值即 $\chi = \int_{x_0}^x \left(\frac{A_0}{A(x)} \right)^{\frac{m}{n}} dx$, 参数 A_0 为参考面积, 当 $A_0=1$ 时, 积分系数便是陡峭指数. 通过 χ 变换, 以 χ 值为横坐标, 高程 Z 为纵坐标, χ -plot可以将稳态的河流剖面转换成直线, 其中斜率是陡峭指数 K_s .

Willett等(2014)认为可以利用公式中的 χ 值表示分水岭的迁移方向. 假设分水岭两侧的河流汇入同一高程基准面, 那么 χ 值大的流域则意味着较低的陡峭系

数, 或者低侵蚀速率. 数值模拟与野外证据均表明, 当分水岭两侧的侵蚀速率存在差异时, 分水岭一般向低侵蚀速率的一侧移动(Goren等, 2014). 因此, 流域 χ 值的高低可以指示分水岭的迁移方向, 即河流是获得还是失去流域面积. 本文主要使用Topotoolbox V2 (Schwanghart和Scherler, 2014)和ChiProfiler 1.0.0 (<https://github.com/sfgallen/ChiProfiler>), 以安康洼地海拔(220m)作为池河、月河和汉江干流 χ 值分析的起始点(基准面), 进行 χ 值计算.

3.2.2 碎屑锆石年龄测试

锆石广泛分布于各类岩石和沉积物中, 性质稳定, 在沉积循环中不易被破坏. 锆石中富含放射性元素U和Th, 封闭温度高($>900^\circ\text{C}$), 普通Pb含量低, 是理想的U-Pb定年矿物. 沉积物碎屑锆石U-Pb年龄记录了源岩的岩浆事件和变质事件的峰值年龄, 能有效地示踪源区(Zheng H等, 2013; Liu等, 2015; Zhang等, 2016; Han等, 2019; Laskowski等, 2019; Turzewski等, 2020).

将上述河流相样品经过淘洗、电磁选之后, 在双目镜下随机挑选锆石, 并制成环氧树脂锆石靶抛光. 锆石年龄测试在南京大学地貌过程与环境实验室完成. 利用New Wave 193nm激光仪进行烧蚀, 激光束直径为 $25\mu\text{m}$, 重复频率为10Hz, 能量为 $2\sim 3\text{J cm}^{-2}$, 结合Agilent 7700 $\times$ 电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP MS)进行测量. 测试过程中使用标准硅酸盐玻璃NIST 610计算元素含量(Pearce等, 1997), 用91500标准锆石作为外部校正(Wiedenbeck等, 1995), 用标样GJ-1来检测仪器稳定性(Jackson等, 2004). 普通Pb的校正采用Andersen方法(Andersen, 2002), 样品的同位素比值及元素含量计算采用Glitter4.4.2软件(Achterberg等, 2001), 年龄计算及年龄谱图的绘制采用Isoplot4.15程序完成. $<1000\text{Ma}$ 的锆石使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, $>1000\text{Ma}$ 的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 选取所有年龄协和度在90~130%的年龄进行碎屑锆石年龄谱分析.

4 结果

4.1 地貌指数

4.1.1 河谷形态与宽高比

区域内 V_f 变化范围在0.13~21.72, 河谷形态变化较

图7 研究区河谷宽高比(a)和形态变化(b)~(f)分布图

图中虚线表示残留的宽谷

大(图7b~7f), 岩性变化对其影响不大(图7a)。根据本区域的 Vf 值范围, 将其划分成4类(以0.5、1.5、5为间隔进行划分)。 Vf 在空间上的分布具有明显区域性(图7a), 据此划分为5个河段: (1) 汉江干流区域上游(洋县-石泉河段), Vf 值较高(1.78~3.61), 整体表现为较宽阔的谷地, 存在较小的宽谷嵌套在更为宽阔谷地中的现象(图7b); (2) 汉江大角度拐弯处(金水), Vf 值较低(0.31~1.38), 主要表现为稍宽谷地内嵌套V型峡谷(图7c); (3) 汉江大角度拐弯处(石泉), Vf 值最低(0.13~0.22), 主要表现为深切的V型峡谷(图7d), 但位于安康断裂东侧的河谷形态明显不同($Vf=1.05$), 呈现V型谷嵌套在宽谷中的现象(图7d中黑色曲线⑨); (4) 石泉-安康盆地内主要支流(池河、月河), Vf 值极高(15.14~21.72), 表现为平坦开阔谷地(图7e); (5) 汉江干流大巴山区域(石泉-安康河段), Vf 总体偏低(0.14~0.93), 山高谷深, 普遍存在V型谷嵌套在宽谷中的现象(图7f)。

4.1.2 河流陡峭指数

汉江干流 K_{Sn} 在汉中盆地内部表现为较平稳的低值, 进入大巴山区域后 K_{Sn} 波动很大, 其中有3处比较明显的高值, 分别对应金水、石泉两处大角度拐弯区域以及瀛湖大坝(图8)。区域内主要支流 K_{Sn} 分布范围为12~178, 高值($K_{Sn}>70$)主要分布在汉中盆地北侧(河谷2~7、11~15)和北大巴山推覆带(河谷31~33), 以及池河流域(河谷40); 低值($K_{Sn}<45$)则主要分布在汉中盆地南侧(河谷16~26)、北大巴山推覆带(河谷27~30)和安康以下河段区域(河谷35~38)(图8)。

区域内南秦岭一侧和北大巴山推覆带高 K_{Sn} 值可能反映该区域经历了较强的新构造活动(Shi等, 2020), 而汉中盆地南侧和安康下游低 K_{Sn} 值则反映了相对较弱的构造活动。北大巴山推覆带中部分 K_{Sn} 低值主要存在于河谷与断层平行河段(如河谷29、30), 可能并不反映垂直构造活动信息, 而是由于走滑断裂破裂面使

图 8 汉江干流及主要支流陡峭指数(K_{sn})和流域面积高程积分值(HI)

图中条带剖面反映沿汉江干流两岸10km距离内的地形起伏情况

得谷地更容易被侵蚀(Keller和Pinter, 2020). 在石泉-安康盆地内, 池河流域(河谷40) K_{sn} 值较高, 反映该区域构造抬升相对较强.

4.1.3 面积高程积分

根据区域内 HI 值分布在0.13~0.44(图8), 积分曲线

形态(图9)及该区域相关研究(Shi等, 2020), 将其划分为3类: (1) 低值(<0.26)主要分布在汉中盆地的南侧(河谷16~24)、北侧褒河和长滩河流域(河谷5、6和8)以及石泉-安康盆地饶峰河(河谷39)、月河(河谷41)和安康洼地南侧流域(河谷35~37)(图8); 积分曲线呈下凹趋势, 地貌演化处于老年期(图9a); (2) 中值

图9 汉江主要支流流域面积高程积分曲线

($0.26 < HI < 0.38$) (图8), 积分曲线呈“S”型展布, 处于河流发育的壮年期(图9b); (3) 高值(>0.38)分布在汶水河(河谷14)以及任河(河谷30)流域(图8), 其积分曲线呈现上凸趋势(图9c), 表明地貌演化处于幼年期。

4.1.4 χ 值分布

池河、月河以及汉江干流在上游区域交汇, 池河与月河以高粱隆起为分水岭, 二者与汉江干流以凤凰山为界(图10a、10b)。以安康洼地河道高度(220m)作为基准面, 三者分水岭处, 池河和汉江干流一侧的 χ 值低于月河一侧(图10b、10c), 表明分水岭有向东南方向迁移的趋势, 南侧汉江干流通过池河进一步夺取月河的流域面积, 月河将逐渐后退萎缩。

4.2 锆石年龄谱

研究区内的6个样点给出了该区域现代水系和高海拔河流相沉积的碎屑锆石U-Pb年龄(图11)。XZ位于现代汉江出汉中盆地后的干流上, 可以代表汉中盆地的物质组成(图3), 主要表现为印支期(200~250Ma)的峰值(图11)。AK位于现代汉江出安康盆地后的干流上, 代表了现代汉江安康上游的物质组成(图3), 表现为印支期(200~250Ma)和晋宁期(700~900Ma)的峰值组合(图11)。在石泉-安康盆地内, YH显示以晋宁期(700~900Ma)为主峰的特点, 可能代表了月河现代水系的物源组成(图3)。其余高海拔河流相沉积JJB、MCT、MZG都出现了印支期(200~250Ma)的主要峰值, 但在250~900Ma范围内存在一些差异。其中, MCT和MZG在加里东期(400~505Ma)显示出一个小峰, 在晋宁期(700~900Ma)内有少量颗粒, 二者锆石年龄谱基本一致(图11)。

5 南秦岭山间盆地水系演化过程

5.1 地貌证据

区域河网形态的类型与区域地形的起伏度密切相关, 因此独特的河网水系可以提供有关构造变形的信息(Howard, 1967)。在整个秦岭造山带, 晚中生代以来发育一系列平行造山带的走滑断裂, 其中尤以宁陕断裂和安康断裂最为明显(李建华等, 2010; 胡健民等, 2011)(图4)。区域内水系形态受这些大型走滑断裂限制, 河流通常沿着先存断裂所形成的断陷盆地流动。

在本文的研究区内, 汉江先在金水处大角度拐弯向东南, 后在石泉区域多次穿过安康断裂, 进入平行于断裂带的宽缓盆地(石泉-安康盆地)后, 大角度拐弯并横切向切穿凤凰山, 转而沿山高坡陡的北大巴山褶皱带流动(图12a)。大于90°拐弯的水系形态(图2)可能是河流袭夺所造成的袭夺湾(Bishop, 1995; Clark等, 2004)。同时, 与之对应的两处裂点(图12b)可能记录了两处河流袭夺过程。

石泉-安康盆地内月河和池河从秦岭南麓进入盆地后, 自谷地中局部鞍形分水岭向东西两侧相反方向流动(图2b和图12b), 其中池河在进入盆地后, 河道坡度明显变缓, 同时以倒勾状注入汉江, 这很可能是由于高粱凸起挤压抬升形成局部的分水岭和南侧现今汉江袭夺形成的倒流河(图12b)。

除了水系平面形态的变化, 追踪袭夺过程的地貌证据更多表现为风口和侵蚀过程对流量再分配的响应。沿安康断裂形成的多个横向地形凸起分布在盆地内(图12c~12f和图5b), 这些凸起都会记录下当时河谷的形态, 而在隆起到足够高度形成分水岭时, 就会成为风口。池河与月河间的分水岭(高粱)存在海拔约

图 10 研究区 χ 值分布(a), χ 值反映的池河、月河以及汉江干流分水岭迁移(b), 以及池河、月河以及汉江干流流域 χ 值的差异(c)
白色曲线为流域间分水岭, 蓝色箭头指示分水岭迁移方向

600m的风口(图12d), 与马岭关、关根子以及长枪岭的地形横剖面的风口相联系(图12c、12e、12f), 显示风口残留的河谷从上游至下游(从马岭关到高粱、关根子再到长枪岭)逐渐拓宽的变化, 也表明存在连接这些风口而连通的老河谷。同时, 我们在关根子风口处采集的早期河相沉积物, 其物源组成也证明了这一观点(具体分析见5.2)。这些脊岭在历次地形的演化进程中不断抬升, 隔断了石泉-安康盆地内西北-东南向宽阔河谷与风口显示的东流古河谷。

5.1.1 凤凰山南侧袭夺

袭夺可以导致流量的突然变化(袭夺河流量增加、被袭夺河流量减少), 从而引起侵蚀过程的变化, 这一过程也会被记录在河谷形态中(Antón等, 2014)。沿安康断裂发育的河谷形态都表现出明显的宽谷($V_f > 15$)(图7e), 与区域上游相对宽阔的谷地(图7b和7d中黑色曲线⑨)相连, 显现出自上游向下逐渐展宽的规

律。同时现今宽阔河谷内相对短小的支流水系(池河、月河)的流量也与其宽度并不匹配, 可能也指示了古河谷的存在以及河流被袭夺的历史。自石泉以下, 汉江干流河谷的 V_f 值由高值转为低值(图7a), 河谷形态由宽阔谷地(图7b)转变成深切峡谷(图7d、7f)。河流切穿凤凰山形成V型谷, 并向南拐入山高谷深的大巴山区, 符合袭夺河的特征, 并在凤凰山西端形成了河流裂点, 河流袭夺点即为石泉以南现代汉江穿过凤凰山的V型峡谷区域(图12b和7d)。

石泉附近的河谷在宽谷基础上叠加了V型峡谷(图7d), 也记录了一次老年期宽谷形成后河流快速下切的过程。安康断裂在石泉区域的活动并不强烈(Shi等, 2020), 说明构造抬升可能不是该局部地区下切过程的主要控制因素。同时, 大巴山区河段普遍发育宽谷中嵌套峡谷的谷中谷现象, 也记录了这一次河流快速下切过程, 符合凤凰山以南的河流袭夺引起的河流响应过程。宽谷下嵌套的V型谷是由于袭夺河获得被袭夺河

图 11 现代汉江及高海拔河流沉积物碎屑锆石年龄概率密度分布图

的流域面积,使得水量激增而导致的快速侵蚀形成。凤凰山以南大巴山区域汉江宽谷(图7f)和石泉-安康盆地内风口连接的宽谷(图12c~12f)可能是水系袭夺前同一时期的谷地(老年期宽阔谷地)。北大巴山推覆带 K_{SM} 高值(图8)表明了区域强烈的构造抬升,形成了较高的地形坡度和河流比降,可能是导致凤凰山南侧水系对石泉-安康盆地水系袭夺的诱因之一; χ 值显示这一过程仍在持续,区域河网演化过程还未达到平衡状态(图10)。

5.1.2 汉江上游自东向西袭夺过程

金水区域大角度的水系转折,指示南秦岭汉江流域可能存在不止上述一次袭夺事件。金水区域(图7c中曲线④)出现的峡谷,与岩性无明显关系。宁陕断裂作为汉中盆地北侧的区域性断裂(图4),仅在金水南侧出现了峡谷,说明构造可能也不是此处峡谷的成因。因此,我们有理由认为是袭夺过程形成了峡谷。同时,金水-石泉的上游河谷也发育了谷中谷,但是与大巴山区域和石泉嵌套的V型峡谷不同,此处为小宽谷嵌套在大宽谷中(图7b)。该区域显示出更宽的谷地,这进一步说明至少还存在另一次袭夺导致的快速下切过程。这

次袭夺沟通了金水和石泉之间的谷地,且时间早于凤凰山南侧袭夺,使得幼年期河谷已经经过侧向侵蚀过程而变得相对宽缓。此外,我们还在金水发现了袭夺事件对应的裂点(图12b),该裂点位于宁陕断裂(图4)的下游,不受断裂活动的直接影响,且裂点也不是发育在岩性变化的位置,不是岩性裂点(图7a)。因此,推测与凤凰山区域一样,该裂点可能是河流袭夺成因。

除上述金水区域可能指示的袭夺以外,在汉中盆地内部也显示了和袭夺相关的地貌特征。盆地内汉江源头与西侧的嘉陵江相距仅仅30km;嘉陵江东侧支流相较于西侧明显不发育,而汉江源头支流南北对冲、大角度汇入汉江,且北侧支流发育程度远高于南侧。这样的水系结构可能表明汉中盆地西侧古水系是沿现今汉江源头北-南支流河道注入嘉陵江(图2a),后期被东侧汉江袭夺,上部河段成为北侧支流,下部河段则因袭夺转而倒流入汉江成为南侧支流,发育时间明显较短。同时,盆地北侧以渭水河(河谷7)为界,西侧流水系河谷呈现北东-南西向延伸,东侧水系谷地呈现北西-南东向延伸,而中间的渭水河河谷上部河段与西侧走向一致,下部则与东侧一致(图8);盆地南侧谷地也出现了类似的两侧不同延伸方向和转折(图8)。这样的形态很可能记录了汉江经金水峡袭夺汉中盆地古水系后,向西溯源侵蚀,汉中盆地内东侧水系逐渐袭夺西侧古嘉陵江水系。此外,初步的地貌和沉积特征考察也显示了可能存在的更多线索: (1) 汉中盆地西部,汉江上游高海拔处发育北-南向宽阔风口(古谷地)(图13a); (2) 汉中盆地中部和东部,谷肩高海拔处发现有不同于汉江河床和阶地砾石成分的河道砾石,这些高处沉积中砾石叠瓦排列和河道形态等沉积结构的初步观察,显示了自北向南的古流向(图13b); (3) 汉中盆地西部,梁山有多条南北向古曲流河谷发育(图13c)。

袭夺事件往往是幼年期对老年期地貌的袭夺,构造活跃地区水系对构造相对稳定区水系的袭夺。汉江支流在金水以上河段 HI 整体偏低(图8),流域整体侵蚀程度很高,河流地貌处于老年期。金水以下河段流域 HI 明显变高,区域内地貌发育也明显指向相对年轻的阶段。因此,我们推测上述一系列袭夺是自东向西逐步推进,水系自大巴山区域向汉中盆地区域逐步连通。

其中,石泉-安康盆地内部分的 HI 低值区域(河谷39、41),可能是未被后期袭夺改造而保留的老地形(盆地古水系形成的宽谷)。此外,汉中盆地北侧显示有

图 12 研究区坡度图(a)、汉江和主要支流河流纵剖面(b)及石泉-安康盆地河谷横剖面与风口((c)~(f))

较大范围的低 HI 老年期地形,特别是较长的褒河流域(河谷4~6)(图8),但与此同时整个北侧支流河道都显示了较高的 K_{Sn} 值,指示着该区域相对较强的构造活动强度(可能与宁陕断裂(图4)活动有关).一般来说,较强的构造活动会使得区域内的 K_{Sn} 和 HI 都偏高.因此,仅仅考虑构造因素难以解释这种高 K_{Sn} 、低 HI 的地貌组合,而河流袭夺能够更好地解释这种地貌形态的组合和区域河流地貌演化过程:大巴山区域更早地响应了新的水系格局,改造了原先流域的地貌景观,而处于上游的汉中盆地还未完全响应下游的袭夺过程.特别是褒河主河道可能响应了北侧构造活动,但流域上游支流保留了当时注入嘉陵江的古河流所塑造的老年期地貌形态,形成了河道坡度增大导致的高 K_{Sn} ,但古流域盆地的低 HI 被局部保留的瞬时地貌.这也说明在这一过程中,主河道纵剖面最先响应河流袭夺和构造活动,并逐渐向上游和次级水系传递.但次级流域以及

区域河网形态的响应往往要滞后,距离越远、河道越长的支流流域响应年轻(新一期)的地貌过程的时间越久.

据此我们给出了汉江上游自东向西袭夺连通的可能过程:石泉-安康盆地早期谷地发育的古汉江切穿西侧区域挤压脊,逐步向西袭夺,最终在金水地区连通汉中盆地水系,在此形成裂点(图12b),并进一步向西发展袭夺汉中盆地西侧的古嘉陵江水系,这一过程发生时间要早于凤凰山南侧袭夺.不可否认的是这一过程仍需要更明确的沉积证据,但更久远的时间会使得相关证据难以保存,可能需要更多详细的物源工作加以验证.此外,汉江流域和秦岭山间盆地水系演化过程可能与中国东部和中部东西向河流袭夺青藏高原东缘南北向河流的古水系演化过程有关(Clark等, 2004; Zheng H等, 2013)(图1),但这一点仍需进一步深入探究.

图 13 地貌和沉积记录显示可能有南北向的古河流

(a) 汉江上游汉中盆地西部, 北-南向宽阔古谷地; (b) 汉中盆地中部, 汉江河谷高处古河流沉积, 砾石叠瓦状构造等沉积结构显示古流向为北-南向; (c) 汉中盆地西部梁山, 北-南向曲流古谷地(红色虚线)(图中具体位置见图2a)

5.2 沉积记录

盆地内的沉积记录表明该区域物源曾发生过改变, 也证实了袭夺事件的存在, 并指示了原先的水系格局。石泉-安康盆地内, 现代月河水系的物源组成与高海拔河流相沉积物明显不同(图11)。现代月河T2阶地沉积物锆石U-Pb年龄谱表现为700~900Ma的单峰, 可能来源于安康断裂两侧出露的耀岭群和郧西群变质火山岩体(图3)。而较高阶地(或地貌位置)古河谷河流沉积物(ZJB、MCT、MZG)锆石U-Pb年龄谱明显表现出200~250Ma的主要峰值, 与上游汉中盆地现代河流沉积物锆石组成相似, 主要来自南秦岭汉中盆地北侧的印支期花岗岩体(图3)。因此我们认为石泉-安康盆地原先可能是存在河流连通, 接受来自汉中盆地北侧的印支期花岗岩物质。另外, MCT和MZG锆石年龄谱还含有400~505Ma和700~900Ma两个峰, 可能分别来自大巴山区域的加里东期变质岩体以及汉中盆地南侧和安康断裂两侧

的耀岭群和郧西群变质火山岩体, 更为复杂的峰值组成说明这一阶段物质来源于更广泛的范围。相比较而言, 石泉-安康盆地现代物源组成变得简单, 可能说明了流域物源区域的缩小以及月河水系被袭夺的历史。

根据以上锆石年龄组成的差异, 在较高海拔(拔河115m以上)阶地与T2(拔河13m)发育之间的时期, 沉积物的物源和水系格局发生了改变: 此前, 石泉-安康连通的古水系带来了北侧印支期物源, 可能与汉中盆地连通。在进入石泉-安康盆地后, 加入了周围大巴山区域内的变质岩体物源, 在此显示出了200~250、400~505以及700~900Ma组合的锆石年龄谱。此后, 凤凰山南侧支流切穿凤凰山袭夺了古汉江主河道, 导致北侧印支期物质不再流经石泉-安康盆地, 而是通过大巴山区域内现代汉江主河道搬运到安康(图3)。这些物源变化所反映的水系变迁过程与水系和河谷地貌特征也能够相互印证。

5.3 山间盆地水系袭夺过程

综合以上地貌和沉积证据, 我们认为南秦岭汉江流域内, 特殊的水系形态和演化过程与区域水系袭夺有关. 结合区域构造活动背景, 推断秦巴山间盆地水系演化的具体过程如下.

第一阶段(图14a): 沿安康断裂左旋走滑, 向西逐步发育拉分断陷区(恒口-安康段洼地、汉阴洼地、池河洼地、石泉洼地), 随走滑量增大, 早期流域盆地成形(甘家思等, 2002). 此时, 古汉江水系受安康断裂限制, 干流沿着区域挤压脊(甘家思等, 2002)和凤凰山隆起东侧发育, 呈现北西-南东流向, 与汉中盆地一侧水系并不相通. 期间, 伴随着走滑运动, 洼地之间隆起了多条尺度较小的条状挤压脊岭或横向凸起(甘家思等, 2002), 但河流下切速度仍能平衡这一抬升速度, 河流

只是在流经这些凸起时出现了向南的小幅绕行. 其南侧发育一条支流, 向南西方向深入北大巴山逆冲推覆带, 平行于褶皱带发育.

第二阶段(图14b): 位于区域挤压脊东侧的古汉江上游西侧支流, 沿构造活动较弱的石泉洼地(李建华等, 2010)以西溯源侵蚀, 切穿西侧的分水岭, 袭夺了挤压脊西侧的水系. 这导致西侧水系侵蚀基准面下降, 溯源侵蚀加剧, 河流向北西方向快速发展, 最终在金水区域袭夺汉中盆地水系. 汉中盆地水系的注入, 导致水量短时间内快速增加, 主河道侵蚀加剧, 宽谷中下切形成V型峡谷; 局部侵蚀基准面下降, 也加剧了南侧支流的溯源侵蚀(图14b).

第三阶段(图14c): 汉阴洼地是盆地的第四纪主要拉分松弛部位(甘家思等, 2002), 同时伴随着池河洼地

图 14 秦巴山间盆地水系演化过程

(a) 古汉江受安康断裂的区域挤压脊所限, 不与汉中盆地水系连通; (b) 区域挤压脊被切穿, 古汉江连通汉中盆地水系; (c) 分水岭隆起, 南侧支流袭夺干流, 现代东流水系格局形成

与汉阴洼地之间的横向隆起不断抬升, 抬升速率超过河流下切能力, 最终形成局部分水岭。同时, 古汉江南侧支流由于大巴山弧形推覆的强烈抬升作用(Suhail等, 2020), 加快溯源侵蚀, 最终河流向北东方向切穿了凤凰山形成深切峡谷, 袭夺了石泉上游的汉江水系, 使得汉江干流在此向西南转弯。此处以下河段水量的突然增加, 使得早期古汉江宽谷中下切形成V型谷。池河原先自东北向西南直接注入古汉江, 从马岭关到池河镇的一段古汉江反向往西北方向流动, 注入现代汉江。最终, 形成了该区域汉江上游现代水系格局。

在这一过程中, 安康断裂的活动对该区域现代水系和地貌发育起着控制作用。上游次级水系格局和流域盆地的演化滞后于汉江干流河道对构造和水系袭夺的响应。

该地区的水系演化过程可能为认识中国早期古人类活动与地貌和水系演化之间的关系提供了重要的材料。秦岭山间盆地内发现了众多重要的古人类和旧石器考古遗存(黄慰文和祁国琴, 1987; 王社江和鹿化煜, 2014, 2016)(图4)。研究表明至少在~1.2Ma到0.05Ma期间(Sun等, 2017, 2018), 甚至可能更早至2.1Ma(Zhu等, 2018), 这一地区持续有古人类活动。该过渡地区很可能是中国南北方古人类和旧石器文化相互交流的重要区域(Sun等, 2017)(图1)。汉江流域东西向水系格局的建立沟通了相对宽阔、平缓的山间盆地, 可能为古人类沿河谷深入秦巴山地提供了便利的地貌条件(图4)。但目前还没有水系格局变迁过程的年代数据, 进一步的河流袭夺发育年代的研究将为认识河流水系变迁与古人类活动关系提供重要的数据支撑。

6 结论

通过对南秦岭-大巴山山间盆地水系地貌指数 V_f 、 K_{Sn} 、 HI 、 χ 值的计算和分析, 反映了这一区域的河流地貌特征; 同时结合锆石U-Pb年龄谱对流域盆地内的不同地貌位置(不同时期)河流沉积物的物源分析, 揭示了秦巴山间盆地的水系演化过程, 可以得到以下结论。

(1) 南秦岭汉江流域水系袭夺过程是自东向西逐步传递, 由大巴山区域逐步向汉中盆地连通。这一过程中, 上游次级流域盆地的演化响应滞后于汉江主河道。

(2) 区域性走滑断裂-安康断裂的活动, 包括断陷盆地和盆地挤压脊的发育, 对石泉—安康盆地现代水系和地貌发育起着控制作用。

(3) 虽然还没有具体的水系格局变迁的年代数据, 但结合地貌特征和部分沉积记录判断, 研究区内存在两次袭夺事件。古汉江受安康断裂的区域挤压脊所限, 与汉中盆地水系并不连通; 后期区域挤压脊被切穿, 古汉江连通汉中盆地水系; 随着石泉-安康盆地内分水岭隆起, 南侧支流袭夺干流, 现代汉江上游水系格局最终形成。

致谢 感谢Jef Vandenberghe和Ronald Balen的鼓励。感谢于洋、杨汛、高琳曼和苏琦在野外和实验室工作中的帮助。感谢两位匿名审稿人对稿件的建设性意见。

参考文献

- 蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 吴德宽, 吴贤亮, 孙三才, 杨军. 2006. 武当群上部变沉积岩组时代归属问题: 单锆石U-Pb年龄的制约. 地层学杂志, 30: 60–63
- 陈虹, 胡健民, 武国利, 田蜜. 2014. 南秦岭构造带中段晚中生代陆内变形特征与侧向挤出构造. 吉林大学学报(地球科学版), 44: 1906–1927
- 甘家思, 刘锁旺, 李愿军. 2002. 南秦岭安康月河拉分盆地的构造发育特征. 大地测量与地球动力学, 22: 101–105
- 胡健民, 孟庆任, 陈虹, 武国利, 渠洪杰, 高卫, 陈文. 2011. 秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义. 岩石学报, 27: 657–671
- 胡健民, 赵国春, 马国良, 张森琦, 高殿松. 2004. 秦岭造山带武当地区古生代伸展构造. 地质科学, 39: 305–319+457
- 黄慰文, 祁国琴. 1987. 梁山旧石器遗址的初步观察. 人类学学报, 6: 236–244
- 赖绍聪, 李永飞, 秦江锋. 2007. 碧口群西段董家河蛇绿岩地球化学及LA-ICP-MS锆石U-Pb定年. 中国科学: 地球科学, 37(增刊II): 262–270
- 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 相振群, 周红英, 郝国杰. 2003. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石U-Pb年代学. 地质通报, 22: 775–781
- 李建华, 张岳桥, 董树文, 施炜, 李海龙. 2010. 北大巴山凤凰山基底隆起晚中生代构造隆升历史——磷灰石裂变径迹测年约束. 地质科学, 45: 969–986
- 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 董树文, 李廷栋. 2012. 北大巴山凤凰山岩体锆石U-Pb LA-ICP-MS年龄及其构造意义. 地质论评, 58: 581–593
- 凌文黎, 高山, 欧阳建平, 张本仁, 李惠民. 2002. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约. 中国科学: 地球科学, 32:

- 101–112
- 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 柳小明, 毛新武, 彭练红, 刘早学, 程建萍, 杨红梅. 2007. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义. *科学通报*, 52: 1445–1456
- 刘志慧, 陈龙耀, 曲玮, 胡娟, 刘晓春. 2019. 南秦岭佛坪地区早中生代变质-深熔-变形作用的锆石 U-Pb 年代学制约. *地球学报*, 40: 545–571
- 刘志慧, 罗敏, 陈龙耀, 曲玮, 刘晓春. 2018. 南秦岭佛坪地区地层格架与物源分析: 变质沉积岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年提供的制约. *岩石学报*, 34: 1484–1502
- 孟庆任. 2017. 秦岭的由来. *中国科学: 地球科学*, 47: 412–420
- 齐文, 王向利, 王炜红, 王北颖, 白定邦, 张彪. 2002. 南秦岭凤凰山地区元古代构造基底特征. *陕西地质*, 20: 9–19
- 滕志宏, 王晓红. 1996. 秦岭造山带新生代构造隆升与区域环境效应研究. *陕西地质*, 14: 33–42
- 王社江, 鹿化煜. 2014. 秦岭南麓汉水上游旧石器考古研究现状与契机. *人类学学报*, 33: 315–328
- 王社江, 鹿化煜. 2016. 秦岭地区更新世黄土地层中的旧石器埋藏与环境. *中国科学: 地球科学*, 46: 881–890
- 吴峰辉, 刘树文, 李秋根, 王宗起, 苏犁, 杨恺, 张帆, 闫全人, 闫臻. 2009. 西秦岭光头山花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 45: 811–818
- 吴美玲, 郭永峰, 李学军. 2009. 陕西勉县地区关帝坪闪长岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *西北地质*, 42: 73–78
- 闫全人, Andrew D H, 王宗起, 闫臻, Peter A D, 王涛, 刘敦一, 宋彪, 姜春发. 2004. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境. *岩石矿物学杂志*, 23: 1–11
- 杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 李惠民, 万渝生, 李荣社. 1999. 南秦岭佛坪地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄. *地质论评*, 45: 173–179
- 杨霄. 2016. 汉初武都大地震与汉水上游的水系变迁之管见——与周宏伟先生商榷. *历史地理*, (2): 229–239
- 张百平. 2019. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 38: 305–311
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. *中国科学: 地球科学*, 26: 193–200
- 张岳桥, 施炜, 李建华, 王瑞瑞, 李海龙, 董树文. 2010. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析. *地质学报*, 84: 1300–1315
- 张宗清, 张国伟, 付国民, 唐索寒, 宋彪. 1996. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. *中国科学: 地球科学*, 26: 216–222
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 王进辉. 2001. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底. *地质学报*, 75: 198–204
- 赵炳清, 周运中. 2013. 《汉初武都大地震与汉水上游的水系变迁》之质疑——与周宏伟先生商榷. *历史地理*, (2): 349–357
- 周宏伟. 2010. 汉初武都大地震与汉水上游的水系变迁. *历史研究*, (4): 49–69
- Achterberg E, Ryan C, Jackson S, Griffin W. 2001. LA-ICP-MS in the Earth Sciences-Appendix 3, data reduction software for LA-ICP-MS. Short Course Ser, 29: 239–243
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 192: 59–79
- Antón L, De Vicente G, Muñoz-Martín A, Stokes M. 2014. Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia). *Geomorphology*, 206: 250–261
- Bishop P. 1995. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Prog Phys Geogr-Earth Environ*, 19: 449–473
- Bonnet S. 2009. Shrinking and splitting of drainage basins in orogenic landscapes from the migration of the main drainage divide. *Nat Geosci*, 2: 766–771
- Bull W B, McFadden L D. 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California. In: Morali A, Olive O, Vidailhet M, Benz-Lemoine E, eds. *Geomorphology in Arid Regions*. Routledge. 115–138
- Castelltort S, Goren L, Willett S D, Champagnac J D, Herman F, Braun J. 2012. River drainage patterns in the New Zealand Alps primarily controlled by plate tectonic strain. *Nat Geosci*, 5: 744–748
- 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. 2005. Reorganization of the western Himalayan river system after five million years ago. *Nature*, 438: 1001–1003
- Cui J, Han F, Zhang S, Wang G, Wang X, Peng H, Wang J, Guo Q, Peng A, Dui H. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating and the tectonic significance of the Xixiang Group in Southern Qinling. *Geol Shaanxi*, 28: 53–58
- Dong Y, Liu X, Santosh M, Zhang X, Chen Q, Yang C, Yang Z. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif. *Precambrian Res*, 189: 66–90
- Dong Y, Liu X, Santosh M, Chen Q, Zhang X, Li W, He D, Zhang G. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Precambrian Res*, 196–197: 247–274
- Fan N, Chu Z, Jiang L, Hassan M A, Lamb M P, Liu X. 2018. Abrupt drainage basin reorganization following a Pleistocene river capture. *Nat Commun*, 9: 1–6
- Cox R T. 1994. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. *Geol Soc*

- Am Bull*, 106: 571
- Craw D, Upton P, Burridge C P, Wallis G P, Waters J M. 2016. Rapid biological speciation driven by tectonic evolution in New Zealand. *Nat Geosci*, 9: 140–144
- Flint J J. 1974. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resour Res*, 10: 969–973
- Geng Y. 2010. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry study of Neoproterozoic granites in the northern margin of Yangtze continent. Dissertation for Master's Degree. Beijing: China University of Geosciences
- Goren L, Willett S D, Herman F, Braun J. 2014. Coupled numerical-analytical approach to landscape evolution modeling. *Earth Surf Proc Land*, 39: 522–545
- Han Z, Sinclair H D, Li Y, Wang C, Tao Z, Qian X, Ning Z, Zhang J, Wen Y, Lin J, Zhang B, Xu M, Dai J, Zhou A, Liang H, Cao S. 2019. Internal drainage has sustained low-relief Tibetan landscapes since the early Miocene. *Geophys Res Lett*, 46: 8741–8752
- Howard A D. 1965. Geomorphological systems—Equilibrium and dynamics. *Am J Sci*, 263: 302–312
- Howard A D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. *Bulletin*, 51: 2246–2259
- Howard A D, Kerby G. 1983. Channel changes in badlands. *Geol Soc Am Bull*, 94: 739–752
- Hu Z B, Pan B T, Bridgland D, Vandenberghe J, Guo L Y, Fan Y L, Westaway R. 2017. The linking of the upper-middle and lower reaches of the Yellow River as a result of fluvial entrenchment. *Quat Sci Rev*, 166: 324–338
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in situ* U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 211: 47–69
- Johnson D W. 1907. river capture in the tallulah district, georgia. *Science*, 25: 428–432
- Keller E A, Pinter N. 2002. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall. 362
- Kirby E, Whipple K X. 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *J Struct Geol*, 44: 54–75
- Kirby E, Whipple K X, Tang W, Chen Z. 2003. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *J Geophys Res*, 108: 2217
- Laskowski A K, Orme D A, Cai F, Ding L. 2019. The Ancestral Lhasa River: A Late Cretaceous trans-arc river that drained the proto-Tibetan Plateau. *Geology*, 47: 1029–1033
- Ling W, Gao S, Zhang B, Li H, Liu Y, Cheng J. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Res*, 122: 111–140
- Ling W, Gao S, Cheng J, Jiang L, Yuan H, Hu Z. 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes. *Acta Petrol Sinica*, 22: 387–396
- Liu S, Li J, Stockli D F, Song C, Nie J, Peng T, Wang X, He K, Hui Z, Zhang J. 2015. Late Tertiary reorganizations of deformation in northeastern Tibet constrained by stratigraphy and provenance data from eastern Longzhong Basin. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 5804–5821
- Menier D, Mathew M, Pubellier M, Sapin F, Delcaillau B, Siddiqui N, Ramkumar M, Santosh M. 2017. Landscape response to progressive tectonic and climatic forcing in NW Borneo: Implications for geological and geomorphic controls on flood hazard. *Sci Rep*, 7: 457
- Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, Gorton M P, Jackson S E, Neal C R, Chenery S P. 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials. *Geostand Geoanal Res*, 21: 115–144
- Perron J T, Royden L. 2013. An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surf Proc Land*, 38: 570–576
- Perron J T, Richardson P W, Ferrier K L, Lapôtre M. 2012. The root of branching river networks. *Nature*, 492: 100–103
- Pike R J, Wilson S E. 1971. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geol Soc Am Bull*, 82: 1079–1084
- Prince P S, Spotila J A, Henika W S. 2011. Stream capture as driver of transient landscape evolution in a tectonically quiescent setting. *Geology*, 39: 823–826
- Pritchard D, Roberts G G, White N J, Richardson C N. 2009. Uplift histories from river profiles. *Geophys Res Lett*, 36: L24301
- Qin J, Lai S, Grapes R, Diwu C, Ju Y, Li Y. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). *Lithos*, 112: 259–276
- Qin J F, Lai S C, Wang J, Li Y F. 2007. High-Mg[#] adakitic tonalite from the Xichahe Area, South Qinling Orogenic Belt (Central China): Petrogenesis and geological implications. *Int Geol Rev*, 49: 1145–1158
- Qin J, Lai S, Li Y. 2008a. Slab breakoff model for the Triassic Post-collisional adakitic granitoids in the Qinling Orogen, Central China: Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Int Geol Rev*, 50: 1080–1104
- Qin J, Lai S, Wang J, Li Y. 2008b. Zircon LA-ICPMS U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and geochemistry of the Triassic Post-

- collisional Wulong adakitic granodiorite in the South Qinling, Central China, and its petrogenesis. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 82: 425–437
- Schwanghart W, Scherler D. 2014. Short Communication: TopoToolbox 2—MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. *Earth Surf Dynam*, 2: 1–7
- Seong Y B, Owen L A, Bishop M P, Bush A, Clendon P, Copland L, Finkel R C, Kamp U, Shroder John F. J. 2008. Rates of fluvial bedrock incision within an actively uplifting orogen: Central Karakoram Mountains, northern Pakistan. *Geomorphology*, 97: 274–286
- Shahzad F, Gloaguen R. 2011a. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Comput Geosci*, 37: 250–260
- Shahzad F, Gloaguen R. 2011b. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. *Comput Geosci*, 37: 261–271
- Shen Y C. 1956. geomorphology of the hanhui valley. *Acta Geograph Sin*, 23: 296–323
- Shi X, Yang Z, Dong Y, Qu H, Zhou B, Cheng B. 2020. Geomorphic indices and longitudinal profile of the Daba Shan, northeastern Sichuan Basin: Evidence for the late Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 353: 107031
- Shugar D H, Clague J J, Best J L, Schoof C, Willis M J, Copland L, Roe G H. 2017. River piracy and drainage basin reorganization led by climate-driven glacier retreat. *Nat Geosci*, 10: 370–375
- Singh A, Thomsen K J, Sinha R, Buylaert J P, Carter A, Mark D F, Mason P J, Densmore A L, Murray A S, Jain M, Paul D, Gupta S. 2017. Counter-intuitive influence of Himalayan river morphodynamics on Indus Civilisation urban settlements. *Nat Commun*, 8: 1617
- Strahler A N. 1952. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Geol Soc Am Bull*, 63: 1117–1141
- Suhail H A, Yang R, Chen H, Rao G. 2020. The impact of river capture on the landscape development of the Dadu River drainage basin, eastern Tibetan plateau. *J Asian Earth Sci*, 198: 104377
- Sun X, Lu H, Wang S, Xu X, Zeng Q, Lu X, Lu C, Zhang W, Zhang X, Dennell R. 2018. Hominin distribution in glacial-interglacial environmental changes in the Qinling Mountains range, central China. *Quat Sci Rev*, 198: 37–55
- Sun X, Lu H, Wang S, Yi L, Li Y, Bahain J J, Voinchet P, Hu X, Zeng L, Zhang W, Zhuo H. 2017. Early human settlements in the southern Qinling Mountains, central China. *Quat Sci Rev*, 164: 168–186
- Turzewski M D, Huntington K W, Licht A, Lang K A. 2020. Provenance and erosional impact of Quaternary megafloods through the Yarlung-Tsangpo Gorge from zircon U-Pb geochronology of flood deposits, eastern Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 535: 116113
- Whipple K X, Forte A M, DiBiase R A, Gasparini N M, Ouimet W B. 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution. *J Geophys Res-Earth Surf*, 122: 248–273
- Whipple K X. 2004. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 32: 151–185
- Whittaker A C. 2012. How do landscapes record tectonics and climate? *Lithosphere*, 4: 160–164
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf trace element and REE analysis. *Geostand Geoanal Res*, 19: 1–23
- Willett S D, Slingerland R, Hovius N. 2001. Uplift, shortening, and steady state topography in active mountain belts. *Am J Sci*, 301: 455–485
- Willett S D, McCoy S W, Perron J T, Goren L, Chen C Y. 2014. Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 343: 1248765
- Wobus C, Whipple K X, Kirby E, Snyder N, Johnson J, Spyropoulos K, Crosby B, Sheehan D. 2006. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. *Geol Soc Am Bull Spec Paper*, 398: 55–74
- Xia L, Xia Z, Ma Z, Xu X, Li X. 2009. Petrogenesis of volcanic rocks from Xixiang Group in middle part of South Qinling Mountains. *Northwestern Geol*, 42: 1–37
- Xu X, Chen J, Li X, Ma Z, Wang H, Li P, Li T. 2009. Geochemical constrains on the petrogenesis and tectonic setting discrimination of volcanic rocks from the Baimianxia and the Sanwan Formations. *Acta Geol Sin*, 83: 1703–1718
- Yang R, Willett S D, Goren L. 2015. *In situ* low-relief landscape formation as a result of river network disruption. *Nature*, 520: 526–529
- Yanites B J, Ehlers T A, Becker J K, Schnellmann M, Heuberger S. 2013. High magnitude and rapid incision from river capture: Rhine River, Switzerland. *J Geophys Res-Earth Surf*, 118: 1060–1084
- Zhang H, Lu H, Xu X, Liu X, Yang T, Stevens T, Bird A, Xu Z, Zhang T, Lei F, Feng H. 2016. Quantitative estimation of the contribution of dust sources to Chinese loess using detrital zircon U-Pb age patterns. *J Geophys Res-Earth Surf*, 121: 2085–2099
- Zhang Z, Daly J S, Li C, Tyrrell S, Sun X, Yan Y. 2017. Sedimentary provenance constraints on drainage evolution models for SE Tibet: Evidence from detrital K-feldspar. *Geophys Res Lett*, 44: 4064–4073
- Zhao F, Zhao W, Zuo Y, Li Z, Xue K. 2006. U-Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shaanxi,

- China. *Geol Bull China*, 25: 383–388
- Zhao J, Zhou M. 2008. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution. *Lithos*, 104: 231–248
- Zhao J, Zhou M, Zheng J, Fang S. 2010. Neoproterozoic crustal growth and reworking of the Northwestern Yangtze Block: Constraints from the Xixiang dioritic intrusion, South China. *Lithos*, 120: 439–452
- 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 Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zhou M, Yan D, Kennedy A K, Li Y, Din J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth Planet Sci Lett*, 196: 51–67
- Zhu Z, Dennell R, Huang W, Wu Y, Qiu S, Yang S, Rao Z, Hou Y, Xie J, Han J, Ouyang T. 2018. Hominin occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 million years ago. *Nature*, 559: 608–612

(责任编辑: 陈建徽)