

渭河盆地河流阶地演化及其构造—气候意义

王迎国^{1,2,3)}, 常宏¹⁾, 周卫健^{1,2)}



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

- 1) 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安, 710061;
- 2) 陕西省加速器质谱技术及应用重点实验室, 西安加速器质谱中心, 西安, 710061;
- 3) 中国科学院大学, 北京, 100049

内容提要: 渭河盆地渭河及其各支流演化历史与区域构造、气候变化密切相关, 因此盆地内各河流阶地的成因和演化是研究渭河盆地环境演变的重要科学问题。河流阶地之上黄土的磁性地层学被普遍用来获得盆地内河流阶地形成的年龄。尽管粉尘物质在第四纪以来覆盖了盆地大范围区域, 河流阶地形成与粉尘物质最终保存在阶地之间可能还存在一定的时间差异。所以, 尽管借鉴黄土—古土壤序列的区域对比, 能够推断河流阶段的年代范围, 仍需更多绝对年龄方法对其进行约束。本文通过渭河盆地内渭河不同支流河流阶地形成年代、拔河高度等的综合分析, 结合大范围区域隆升过程及第四纪气候演化序列对比, 发现并不是所有气候变化的重要节点就有相应的河流阶地形成, 河流阶地年龄空间分布也有一定的区域性特征, 提出渭河盆地河流演化与构造运动造成潜能及气候变化诱发这些潜能的释放密切相关。所以, 渭河盆地河流阶地主要是在大范围的构造隆升和气候变化共同作用下的构造—气候旋回阶地。渭河盆地水系演化史的重建对全面认识黄河中游水系早期的形成演化具有重要意义, 尤其是解决渭河、黄河贯通三门峡的争议, 但还需要更多可靠的河流地质证据和多种分析数据的印证和约束。

关键词: 渭河盆地; 河流阶地; 年代分布; 构造阶段; 气候演变

新生代以来, 青藏高原发生多期隆升, 它们本身及其远场效应对亚洲地貌和环境产生巨大的影响。这种阶段性的构造隆升导致了我国东西向地形的倒转和现代黄河、长江等大型水系的形成与发育 (Li Jijun, 1991; 安芷生等, 2006; Zheng Hongbo et al., 2013), 并进一步影响大气环流格局, 诱发并加强东亚季风环流 (施雅风, 1998; An Zhisheng et al., 2001; Guo et al., 2002), 甚至对全球气候变化产生深远影响 (Zachos et al., 2001; An Zhisheng et al., 2015)。青藏高原隆升造成的区域地貌形态改变和气候变化在黄土高原有很好的记录 (An Zhisheng et al., 2001; 孙有斌等, 2017)。这些事件同时影响着黄土高原及周缘水系与河谷地貌发育过程, 河流阶地就是在这样的背景下形成的地貌单元。因此高原周边河流阶地是推测青藏高原构造运动远程效应造成区域构造地貌形态改变和气候演变的重要证据。

黄河的形成演变是综合反映东亚构造地貌和自

然环境变迁的重大事件, 而渭河作为黄河最长的支流, 东出宝鸡峡后流经渭河盆地, 至潼关附近注入黄河, 因此可以认为黄河是渭河的局部侵蚀基准面 (图 1)。秦岭造山带北缘的渭河盆地是新构造运动非常活跃的地区, 属于渭河水系中下游地带, 围绕该区域水系虽已有大量的研究 (苏生瑞, 1991; 赵猛刚, 2003; Sun Jimin, 2005), 但针对同一区域或同一河段研究也存在较多的争议。以渭河形成演化为例, 渭河是否为古黄河的古河道, 其形成于始新世 (Lin Aiming et al., 2001), 还是早更新世 (Gao Hongshan et al., 2016); 以六盘山为界, 渭河上游河谷是否为渭河下游河谷不断扩展和溯源的结果 (刘小丰, 2007; 王营等, 2020) 等等。另外黄河穿过三门峡的时代意味着黄河现代水系的最终整合形成, 但是渭河、黄河切穿渭河盆地东部潼关、三门峡的时间还有一定争议, 一是早更新世晚期 (Pan Baotian et al., 2005a, 2005b), 一是晚更新世 (蒋复初, 2005)。

注: 本文为中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (编号: XDB40000000) 和国家自然科学基金重点项目 (编号: 41930321) 的成果。

收稿日期: 2021-01-05; 改回日期: 2021-04-30; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.305

作者简介: 王迎国, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事构造地貌及第四纪年代学研究; Email: wangyg@ieecas.cn。通讯作者: 常宏, 男, 1970 年生, 研究员, 主要从事新构造与古气候方面研究; Email: changh@loess.llqg.ac.cn。

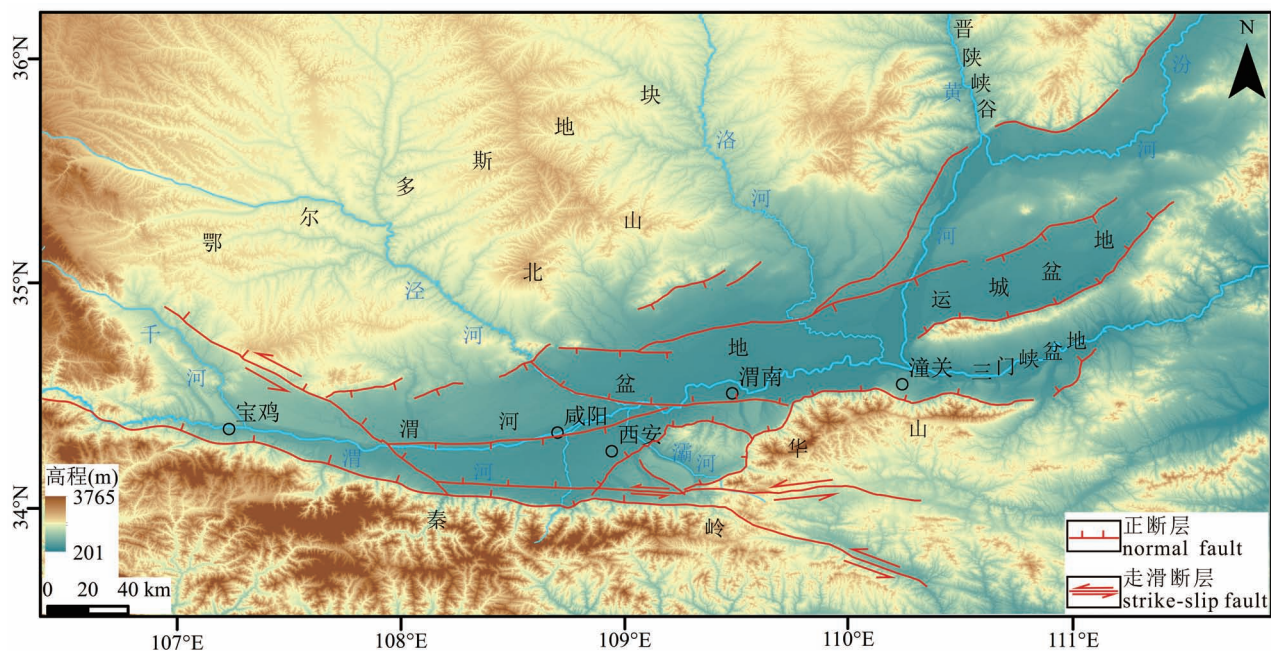


图 1 渭河盆地地貌及主要河流示意图

Fig. 1 Geomorphology and main rivers in the Weihe Basin

鉴于渭河盆地内发育了一系列第四纪河流阶地,河流阶地作为河谷发育的直接证据,它记录了在河流演变过程中旧河道废弃和新河道形成的历史,可以反映研究区古河流动态、地质构造活动及气候变化等重要信息 (Burbank et al., 2011; 杨景春等, 2012)。因此本文通过综合分析野外考察数据及渭河盆地内不同河流阶地的研究结果,对区域内河流演化历史及第四纪区域构造活动和气候演变特征进行探讨,进一步探索青藏高原东北缘构造变形的远程效应。

1 区域地质概况

渭河沿秦岭北侧东流,两岸发育有较多支流。自渭源至宝鸡峡流经山区,出宝鸡峡后经渭河盆地,河谷宽阔,比降平缓,水流弯曲,至潼关附近注入黄河。渭河流域属于暖温带半干旱、半湿润气候区,具有大陆性季风气候的特点。渭河流域黄土分布面积较广,植被覆盖较差,夏季多暴雨,因此水土流失严重,大量泥沙汇入使渭河成为一条多沙性河流 (安芷生等, 2006; Du Jun et al., 2012)。

渭河盆地位于渭河流域的中下游,是地处秦岭造山带和鄂尔多斯高原之间的古近纪开始发育的近 EW 向断陷盆地。盆地东部与运城盆地、三门峡盆地等盆地相连,共同构成一个三叉状形态。渭河盆

地内断裂构造纵横交错,现已发现断裂数百条,控制盆地形成与构造演化的主要断裂有秦岭北麓山前断裂、华山山前断裂、陇县—马召断裂、乾县—合阳断裂、渭河断裂、长安—临潼断裂和骊山山前断裂等 (图 2)。渭河盆地活动断裂主要表现为 EW 走向断裂系、NE 走向断裂系、NW 走向断裂系,除铁炉子断裂、陇县—马召断裂具有明显的左旋走滑性质外,其余断层均主要表现为正断层性质 (夏勇, 2007; 杜建军等, 2017)。

渭河盆地为典型的非对称陆内裂谷盆地,盆地北部为斜坡带,南部为坳陷区,具有南深北浅的半地堑形态特征 (刘林等, 2018)。同时渭河盆地东宽西窄,东段呈北东向,西段呈东西向,东部发育早,西部发育晚,这些特点可能反映了渭河盆地的形成过程受印度板块向北俯冲远程效应和太平洋板块向北西俯冲远程效应的双重影响 (Fan Shuanghu et al., 2018)。渭河盆地从始新世开始接受沉积 (鹿化煜等, 2018)。由于新生代以来长期处于不平衡沉降中,盆地周缘群山环绕,北南西三面山地为渭河盆地的物源供给区,泾河、洛河、千河、灞河等河流是盆地内沉积物主要搬运供给通道,因此周缘河流相、秦岭山前的冲积扇群、湖泊相及较高位置堆积的黄土—古土壤序列是盆地内主要沉积类型 (Wang Bin et al., 2014; 鹿化煜等, 2018)。盆地构造背景、沉积环

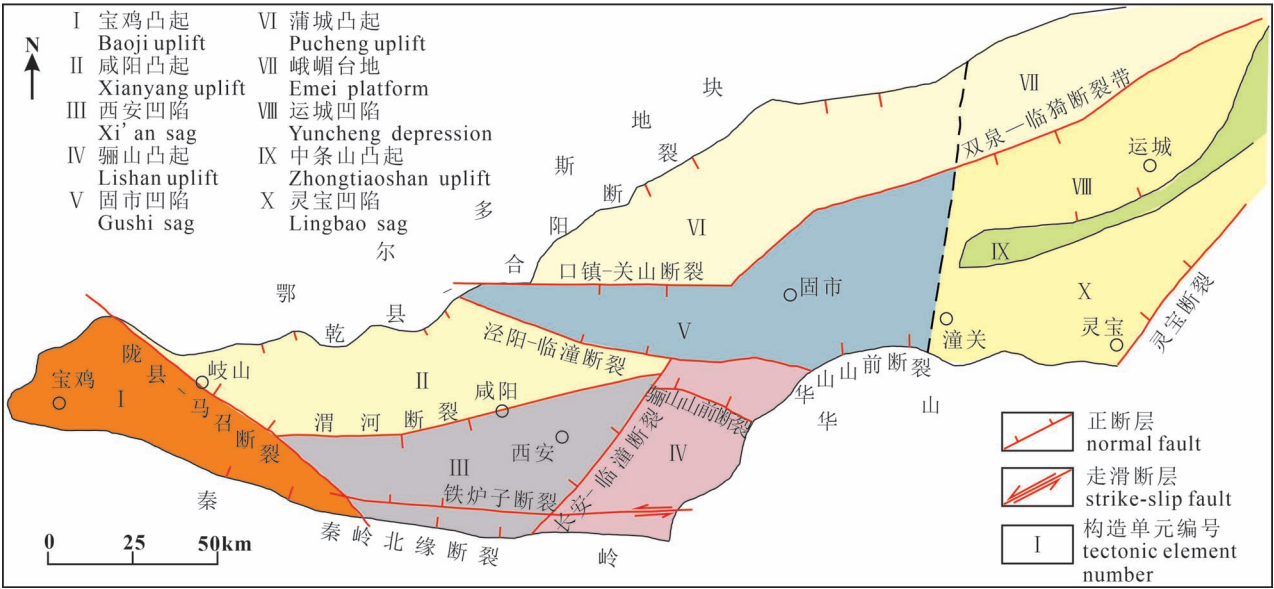


图 2 渭河盆地地区构造单元及断裂简图 (据任隽,2012)

Fig. 2 Regional tectonic units and faults map in the Weihe Basin (from Ren Jun,2012&)

境以及古地貌变化复杂,造成新生代地层沉积厚度空间差异较大。同时受构造掀斜影响,南北分异明显,新生代沉积厚度向北逐渐变薄 (Liu Jin et al., 2019),沉积发展演化受鄂尔多斯南缘及秦岭造山带影响显著 (彭建兵, 1992; 韩恒悦等, 2001; 刘护军, 2002; 邢作云等, 2005; Rao Gang et al., 2014)。第四纪以来秦岭山脉的快速隆升和渭河盆地的加速下沉使得盆地沉积中心向东偏移,该区域第四系地层连续且局部厚度达 1000 m 以上 (李智超等, 2015;Liu Jin et al., 2019)。盆地内绝大部分区域古近系—第四系未褶皱变形,显示盆地内新生代以来的构造运动以垂直运动为特点,地层极少发生扰动 (李智超等, 2015),因此渭河盆地是研究河流阶地演化的理想区域。

2 渭河盆地河流阶地分布特征及时代划分

2.1 阶地分布特征

渭河盆地西高东低,河流南短北长,渭河干流自西向东,汇聚大量来自秦岭山脉的支流。盆地内主要河流均发育有阶地,最多可达 5 级,多为基座阶地和堆积阶地。宝鸡段渭河阶地、千阳段千河阶地、彬州段泾河阶地、蓝田段灞河阶地、洛川段洛河阶地等,皆发育有 5 级阶地。盆地内河流阶地在渭河两岸不对称分布,北岸支流千河、泾河、洛河等阶地主

要分布在河流左岸,南岸河流阶地泾河、灞河等大都分布于右岸 (Sun Jimin, 2005; 苏生瑞, 1991)。除千河沿岸砂砾层厚度变化无明显规律性,且砾石层不具有标准的二元结构外 (Chen Shue et al., 2018),其他各河流阶地大部分发育有较为单一的二元结构:即底部一般为厚 2~6 m 砾石层,上部为 1~3 m 河漫滩相砂质泥岩等,之上覆盖有厚度不一的黄土—古土壤序列 (雷祥义, 2006)。而渭河下游南岸阶地发育的级数却相差较大:西安凹陷中发育 2 级阶地;在临潼的骊山凸起中发育 3 级阶地,但阶地面狭窄;渭南华阴的固市凹陷只发育第 1 级阶地,阶地面平坦,黄土台塬不存在;而潼关地区凹陷中又发育 3 级阶地 (韩恒悦等, 2001)。渭河干流越向下游其阶地数相对减少,可能与下游三门古湖的存在有关,渭河下游河流阶地形成可能代表河流最终贯通或三门古湖逐渐消亡。

渭河盆地东部边缘阶地级数与盆地内有较为显著的差异。潼关黄河阶地分布 4 级阶地, T_4 、 T_3 为基座阶地, T_2 、 T_1 为堆积阶地 (王均平, 2006); 峨嵋黄河台地,共发育 6 级河湖阶地, T_1 为河流阶地,其它为湖积台地 (武繁, 2016), 黄河最老阶地形成在峨嵋台地的西缘分布较连续,在潼关也有分布,它标志黄河当时已经形成,而东部晋陕峡谷内最高可发育 10 级黄河阶地 (Hu Zhenbo et al., 2012, 2016),可能说明盆地东部边缘河流演化可能较盆地内部更

为频繁。

2.2 阶地形成时代划分

河流阶地研究的难点之一就是阶地年龄的确定。年代的精确测定是地学研究的基础和前提,通过河流阶地年龄确定可进一步计算河流的侵蚀速率、堆积速率等,从而更好地理解流域地貌演化。阶地形成年龄就是河流下切导致河漫滩废弃、阶地形成的时间 (Lu Honghua et al., 2020)。在渭河盆地河流阶地一般覆盖有不同厚度的黄土—古土壤序列,由于黄土—古土壤序列发育基本不具有穿时性,可以标定不同地段河湖地貌沉积体的形成年代。所以一般认为每一级阶地上黄土—古土壤序列最底层的发育年龄即为该级阶地的形成时间,通过与典型剖面的磁性年代学进一步对比得其年龄 (郭桂红等, 2007)。

通过古土壤断代法进一步获得渭河盆地河流阶地形成年代,然而随标准磁性年表的修订等产生一定的变化,不同学者研究所得到的阶地形成年龄略有偏差。孙继敏等 (2007) 通过古土壤断代法确定渭南阎峪五级阶地年龄 $T_1 \sim T_5$ 分别为 0.15 Ma、0.65 Ma、0.90 Ma、1.20 Ma 和 2.60 Ma; 通过地层对比以及热释光法将宝鸡段渭河五级阶地 $T_1 \sim T_5$ 的形成年代依次定为 0.01 Ma、0.12 Ma、0.62 Ma、0.82 Ma、1.23 Ma (方甲炳等, 1993; 张猛刚, 2003); 千河五级阶地 $T_1 \sim T_5$ 的形成年代分别为 0.01 Ma、0.13 Ma、0.60 Ma、0.80 Ma、1.20 Ma (李三萍, 2018); 彬县段泾河 $T_1 \sim T_5$ 的形成年代依次定为 0.01 Ma、0.13 Ma、0.62 Ma、0.82 Ma、1.20 Ma (郭晓鸽, 2001); 灞河河流阶地五级阶地 $T_1 \sim T_5$ 的形成年代分别为 0.01 Ma、0.13 Ma、0.65 Ma、0.90 Ma、1.20 Ma (雷祥义等, 1992; 岳乐平等, 1997)。黄河峨嵋台地西段 $T_1 \sim T_6$ 形成年代分别为 0.052 Ma、0.15 Ma、0.205 Ma、0.62 Ma、0.85 Ma、1.118 Ma (武繁等, 2016)。晋陕峡谷黄河多次下切最高存在 10 级阶地, 最高阶地形成约 1.24 Ma (Hu Zhenbo et al., 2016)。表 1 中显示, 渭河盆地内河流阶地发育时代大致呈有规律的时段性, 在 0.01 Ma、0.15 Ma、0.6~0.5 Ma、0.9~0.8 Ma、1.2 Ma 等时间普遍有阶地的形成, 这种大范围同时性的地貌特征变化可能受显著的气候演变影响而形成 (常宏等, 2005)。

虽然整体上渭河盆地内的河流阶地研究表明盆地内各最高级阶地形成年代为 1.2 Ma 左右, 但盆地内最高级阶地的形成年代还存在一定的争议。Sun Jimin (2005) 认为盆地内渭河下游渭南阎峪最高级

阶地形成于 2.6 Ma, Kong Ping 等 (2013, 2014) 利用 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏定年所得渭南宋家北沟、沱河水库湖相—河流相沉积转换时间为 1.5 ± 0.5 Ma, 推测渭河溢过三门峡时间为 1.3~1.5 Ma, 而盆地内宝鸡段渭河最高级阶地仅形成于 1.2 Ma, 渭河上游三阳川盆地最高级阶地也仅形成于 1.19 Ma (Gao Hongshan et al., 2008), 渭河下游河谷的形成时代可能相对较老, 而渭河上游河谷形成的时代相对较晚, 这可能是渭河下游河谷不断扩展和溯源侵蚀的结果 (王营等, 2020), 因此, 宝鸡与潼关地区是研究渭河盆地内渭河中下游河流演化的重点区域 (傅建利, 2009)。但是渭河下游灞河与渭南阎峪同属北秦岭活跃构造山前地带, 构造背景相近, 且相距仅 20 km, 而现有研究表明灞河最高阶地形成仅为 1.2 Ma (雷祥义等, 1992), 之后也未见有报道记载渭河下游 2.6 Ma 左右的最高阶地年龄。这些不同可能是由于野外河流阶地的识别、采样及测年手段等不同产生的偏差, 因此渭南阎峪最高级阶地是否为早更新世渭河河流相沉积所遗留等问题的最终解决, 还有待于更多资料的确证。

现阶段在渭河盆地内使用物理方法测定绝对年龄的较少, 大多都是基于上覆黄土—古土壤序列判定阶地形成年龄的上限。但由于黄土沉降相对较慢, 且渭河盆地已属黄土高原边缘地带, 形成的黄土较薄。而且所得年代结果并不是阶地形成的真正年代而代表上覆风成黄土的堆积年龄, 难以对以砾石堆积为主的阶地本身进行准确的年代限定, 所以黄土—古土壤序列的底界年代可能并不代表阶地形成的确切年龄。需要进一步开展渭河盆地河流阶地新测年方法的应用 (如宇宙成因核素埋藏和暴露测年、光释光测年等), 以便进行阶地高精度年代的确定并开展区域对比。

3 渭河盆地阶地成因探讨

河流阶地的形成一般认为受构造抬升、气候变化及基准面升降等外因显著影响。由于基准面变化对河流系统的影响仅限于距河口有限距离的河段 (Schumm, 1993), 因此对于内陆地区的河流而言, 阶地的发育过程主要受控于构造运动和气候变化 (Bridgland et al., 2008, 2014)。比较经典的阶地发育理论有三种: 气候阶地发育模式、构造抬升阶地发育模式、气候—构造抬升阶地发育模式 (Maddy et al., 2001; 潘保田等, 2007; Pan Baotian et al., 2003, 2009; Bridgland et al., 2008)。不同的外部强迫因素

表 1 渭河盆地及周边各河流阶地参数
Table1 Terrace parameters of the Weihe Basin and surrounding rivers

地段	阶地级别	阶面拔高(m)	最底层古土壤	形成年代(Ma)	阶地类型	资料来源	地段	阶地级别	阶面拔高(m)	最底层古土壤	形成年代(Ma)	阶地类型	资料来源			
渭河宝鸡段	T ₅	250	S ₁₆	1.23	基座阶地	张猛刚,2013	渭河三阳川盆地 北山段	T ₁₀	315	S ₁₃	1.19	基座阶地	Gao Hongshan et al. ,2016			
	T ₄	100	S ₉	0.82	基座阶地			T ₉	255	S ₁₂	1.114	基座阶地				
	T ₃	80	S ₆	0.62	基座阶地			T ₈	215	S ₁₁	1.081	基座阶地				
	T ₂	40	S ₁	0.12	基座阶地			T ₇	149	S ₁₀	1.031	基座阶地				
	T ₁	25	S ₀	0.01	堆积阶地			T ₆	109	S ₉	0.982	基座阶地				
千河千阳段	T ₅	260	L ₁₅	1.18	基座阶地	李三萍,2018		T ₅	55	S ₈	0.866	基座阶地				
	T ₄	160	S ₈	0.79	基座阶地			T ₄	35	S ₇	0.79	基座阶地				
	T ₃	80	S ₅	0.60	基座阶地			T ₃	23	S ₆	0.712	基座阶地				
	T ₂	30	S ₁	0.13	基座阶地			T ₂	5	S ₅	0.621	基座阶地				
	T ₁	12	S ₀	0.01	堆积阶地			T ₁	/	/	0.01	堆积阶地				
泾河彬州段	T ₅	75	S ₁₆	1.20	基座阶地	郭晓鸽,2011	黄河晋陕峡谷段	T ₁₀	178	S ₁₃	1.20	基座阶地	Hu Zhenbo et al. ,2016			
	T ₄	55	S ₉ /S ₈	0.80	基座阶地			T ₉	/	S ₁₂	1.10	基座阶地				
	T ₃	20	S ₆	0.65	基座阶地			T ₆	129	S ₇	0.79	基座阶地				
	T ₂	7	S ₁	0.13	基座阶地			T ₅	113	S ₄	0.412	基座阶地				
	T ₁	5	S ₀	0.01	堆积阶地			T ₄	77	S ₂	0.245	基座阶地				
洛河洛川段	T ₅	55	S ₁₁	1.00	基座阶地	岳乐平等, 1997		T ₃	45	S ₁	0.128	基座阶地				
	T ₄	20	S ₈	0.80	基座阶地			T ₂	28	S _m	0.029	基座阶地				
	T ₃	10	S ₆	0.62	基座阶地			T ₁	13	S ₀	0.011	堆积阶地				
	T ₂	5	S ₁	0.12	基座阶地			三门峡 黄河	T ₄	115	S ₈	0.865			基座阶地	王均平,2006
	T ₁	3	S ₀	0.01	堆积阶地				T ₃	50	S ₅	0.621			基座阶地	
灞河蓝田段	T ₅	162	S ₁₆	1.20	基座阶地	雷祥义,2006			T ₂	20	S ₁	0.129	堆积阶地			
	T ₄	122	S ₉	0.90	基座阶地	黄河峨嵋台地段	T ₁	10	S _m	0.06	堆积阶地	武繁,2016				
	T ₃	60	S ₆	0.60	基座阶地		T ₆	360	S ₁₄	1.118	基座阶地					
	T ₂	19	S ₁	0.12	基座阶地		T ₅	240	L ₉	0.85	基座阶地					
	T ₁	3	S ₀	0.01	堆积阶地		T ₄	110	L ₆	0.62	基座阶地					
渭河阎峪、唐 家源段	T ₅	280	S ₃₂	2.60	基座阶地		Sun Jimin, 2005		T ₃	70	S ₂		0.205	基座阶地		
	T ₄	200	S ₁₄	1.20	基座阶地		T ₂	30	L ₂	0.15	基座阶地					
	T ₃	130	S ₈	0.90	基座阶地		T ₁	10	L _{1ss}	0.052	堆积阶地					
	T ₂	95	S ₅	0.65	基座阶地											
	T ₁	35	S ₁	0.15	堆积阶地											

往往同时作用,因此很难从河流记录中提取单个强迫因素的影响。然而,通过详细的地质、气候、生物地层学和土壤学重建,通常可以认识到一个主要的强迫因素,这种外部强迫因素的分离是区分每个强迫对河流动力和地形变化影响的必要条件(Woolderink et al. ,2019)。构造抬升区因其所处构造位置的特殊性,再叠加一些复杂因素(岩性、地形和气候)的影响,河流下切机制就更加复杂。现阶段气候—构造抬升阶地模式的观点逐渐被大多数学者所认同(Maddy et al. ,2000),意味着即使在一些活跃的造山带,气候变化在阶地形成过程中仍然发挥着十分重要的作用(Starkel,2003),只是不同构造和气候环境下阶地形成的主控因素有所不同。关于渭河盆地内河流阶地的成因也是有一定争议,比

如Porter等(1992)认为泾河、灞河阶地是气候成因的,而雷祥义等(1992)认为灞河阶地形成是受骊山掀斜运动影响,同时更多学者的研究认为渭河盆地各河流阶地形成可能是气候—构造共同影响的结果(张猛刚,2003;Chen Shue et al. ,2018),气候变化可能主要控制河流行为的转变(堆积或下切),而构造抬升则为河流持续下切提供能量来源(Vandenberghe,2003;Bridgland et al. ,2008)。

3.1 气候成因

气候变化被认为是控制地貌演化的基本因素之一。通常认为,支配地貌随时间变化的条件在一定程度上是恒定的,因此与河流地貌随时间变化的讨论基本无关(Kochel et al. ,1997)。由于更早期的地貌特征受构造、气候等因素影响而无法保存下来,

所以学者们更关心更新世以来与冰川作用有关的环境演化对河流地貌的影响 (Collinson, 1983; Perron, 2017)。

归因于青藏高原的剧烈抬升及全球变冷的总体趋势,第四纪以来气候呈现不稳定的剧烈波动特征 (Zachos et al., 2001)。青藏高原的不断抬升引起区域海陆热力差异增大,东亚冬、夏季风逐渐加强,青藏高原及其周边区域开始大幅度降温,在 0.8 Ma 左右最大冰期时青藏高原及周边大范围地区进入冰冻圈,同时一定程度上使得西北地区干旱化及主要沙漠进一步扩张,青藏高原周边地区产生新的风成黄土体系 (施雅风等, 1995; 李裕元等, 2001, 刘秀铭等, 2009)。典型的黄土高原的黄土—古土壤地层旋回完整地记录了东亚季风的冷干—暖湿气候变化,这对应冰期—间冰期尺度上冬、夏季风优势期交

替演变的历史。另外黄土记录 2.6~1.2 Ma 冰期气候波动较小、周期较短 (以 41 ka 为主导周期) 的阶段特征,1.2 Ma 以来则反映气候波动幅度变大、周期加长 (以 100 ka 为主导周期) 的特征,说明黄土高原黄土—古土壤序列受到地球轨道要素的控制 (谢远云等, 2003; Sun Youbin et al., 2006)。

冰期—间冰期气候转化期间,气候不稳定性的增强可能会导致强烈的季节性降水和洪水;气候变暖导致的植被覆盖增加会减少产沙量,水沙比增大进而促使河谷下切和阶地的形成 (Armitage et al., 2018; Malatesta et al., 2018)。渭河盆地位于黄土高原的南部边缘地带,黄土—古土壤地层显示了一个冷—暖 (干—湿) 循环的气候格局 (Ding Zhongli et al., 1998),河流阶地形成后由黄土层覆盖,因此可根据阶地面上覆黄土—古土壤序列最底层在一定程

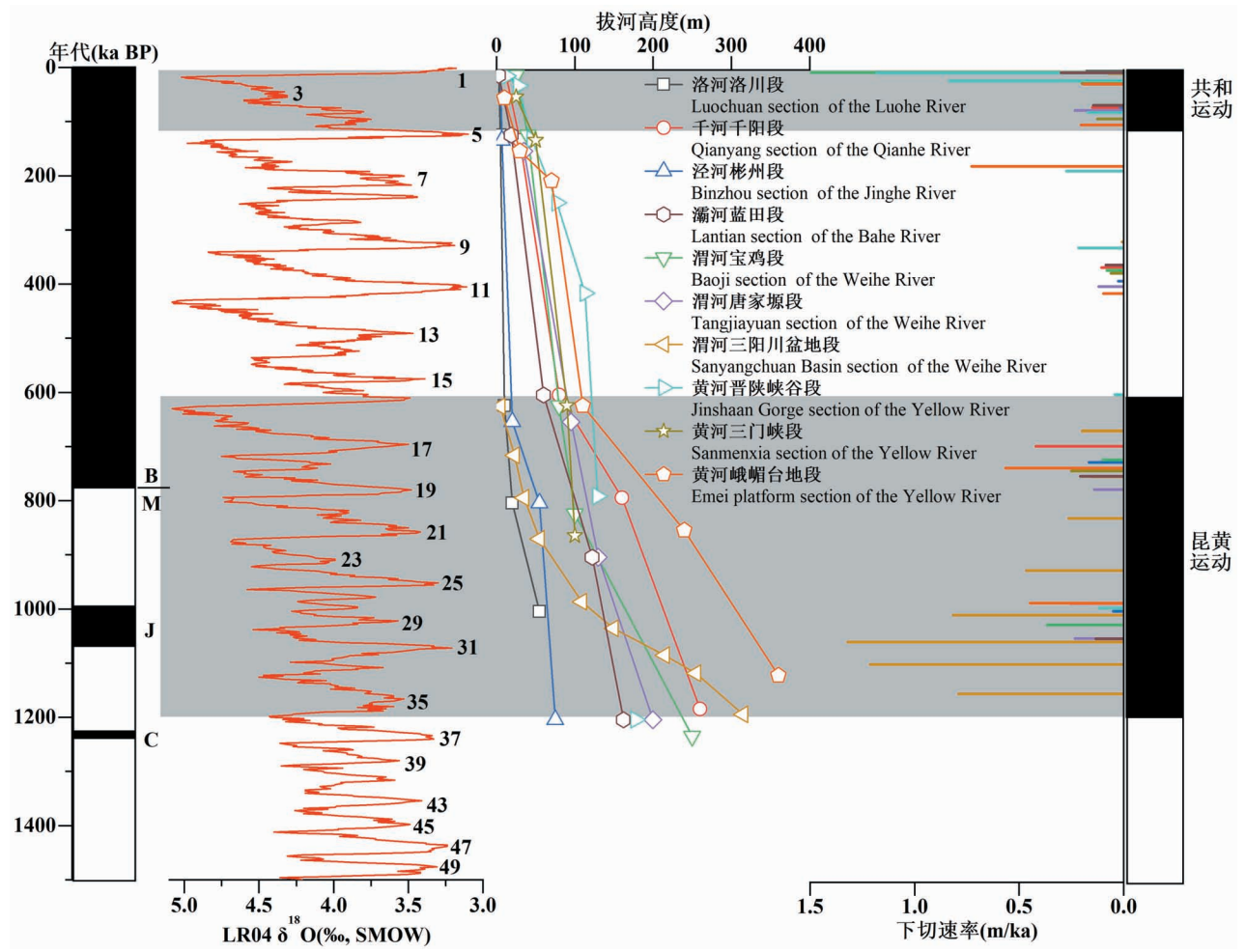


图 3 渭河盆地及周缘各河流阶地下切形成时代与深海氧同位素阶段对比 (其中标准极性柱来自 Gradstein et al., 2004; LR04 曲线据 Lisiecki et al., 2005)

Fig. 3 Comparison of the formation age of the Weihe Basin and surrounding river terraces and the marine isotope stages (Standard polarity chronological columny modified from Gradstein et al., 2004; LR04 curve is from Lisiecki et al., 2005)

度上推断之前河流阶地形成时的气候特征。由表1知阶地上覆黄土最底层大多数发育为古土壤层,对应气候温暖湿润时期,如果认为阶地砂砾是在古土壤堆积之前的冰期沉积,那么就可以认为河流可能在冰期—间冰期转变期开始下切 (Porter et al., 1992)。通过对比渭河盆地及周边各河流阶地与深海氧同位素阶段曲线 (图3),发现气候变化对于各阶地的发育具有较为广泛的一致性,每一级阶地的形成对应一次气候旋回,说明阶地的形成对气候演变是比较敏感的。但还有部分阶地上覆的黄土—古土壤序列最底层发育为黄土层,如 Sun Jimin (2005) 发现渭河阶地砂砾石层之上堆积的最底层黄土对应于 L_{15} 、 L_9 、 L_6 、 L_2 等,这说明部分河流阶地可能为间冰期—冰期的转变期形成。虽然阶地形成时间可能无法完全对应,但在这两种情况下,我们都可以合理地认为阶地沉积物的地层组成反映了气候的强迫作用,阶地可能是在气候转变期形成。因此,除了河流阶地形成的绝对时间需要进一步研究外,还需加强对上覆黄土与河漫滩相沉积的进一步深入识别,以加强对河流阶地形成时气候类型的认识。

阶地类型可在一定程度上指示阶地成因,一般认为气候阶地多为堆积阶地 (Starkel, 2003; 丁莹莹等, 2017)。Porter 等 (1992) 通过对泾河、灞河灞桥段阶地研究认为阶地主要为堆积阶地,这说明泾河、灞河各阶地的形成与气候因素有极大的关系。但是通过对前人划分的渭河盆地各级阶地类型进行总结,发现前人研究多认为渭河盆地多级阶地类型为基座阶地,一般只有形成年代较短的最低级阶地为堆积阶地,雷祥义等 (1992)、岳乐平等 (1997) 也认为灞河蓝田段阶地 $T_5 \sim T_2$ 为基座阶地,只有 T_1 为堆积阶地,这与 Porter 等 (1992) 对于灞河河流阶地分类并不相同。基座阶地之上的河流堆积物一般没有或者很少,但渭河盆地内的各阶地一般均可见较好的二元结构河流相堆积 (雷祥义, 2006), 因此,除千河阶地、晋陕峡谷黄河阶地可能是以基座阶地为主外,其它存在河流沉积物的阶地可能多是堆积阶地。

盆地内各阶地形成时间与重建的黄土高原降水峰值有较好的对应关系。通过对渭河及各支流 $T_3 \sim T_1$ 阶地的形成与利用 ^{10}Be 重建黄土高原 550 ka 以来降水量数据对比发现 (Beck et al., 2018), 二者之间有较好的相关性,基本每一级阶地的形成对应于一次降水量峰值 (图4),但并不是每次降水峰值都对应于一级阶地的形成。阶地年龄越年轻,与降水

量峰值的对应越密集,说明越年轻的阶地可能受气候演变影响越大。另外通过对洛河 T_1 堆积阶地研究认为其形成于 L_{155} 弱古土壤发育之时,洛河流域在 L_1 黄土堆积时期年降水量约为 300 mm,而在 S_0 、 L_{155} 发育时期降水量明显增多,分别为约 550 mm 和 450 mm,因此洛河 T_1 的形成主要是受气候变化的影响,是洛河对第四纪晚期气候变化的响应 (吕厚远等, 1994; 武繁, 2016)。同时盆地内各河段 T_1 阶地的拔河高度各不相同,变化较大,所得下切速率差异极大,且 T_1 阶地多为堆积阶地,可能指示渭河盆地内 T_1 阶地形成受气候演变影响较大。

尽管各阶地形成时间相对集中在某些已知的气候变化对应时段内,因此可以用气候因素来解释渭河盆地各河流阶地形成过程,但用单一气候因素解释渭河阶地成因还有较大的局限性:① 渭河盆地河流两岸阶地大多发育为不对称分布,只用气候变化很难给出合理解释;② 渭河盆地各阶地最多可见一个河床相砂砾石和河漫滩相沉积的二元结构,而完全气候成因阶地一般可见多个二元结构;③ 气候阶地多为堆积阶地,但并不是说堆积阶地就一定是气候成因的,而且渭河盆地较高级阶地中有基座阶地存在;④ 渭河盆地河流阶地发育级数与气候变化周期并不是一一对应的关系,盆地内各阶地形成时间也存在差异。因此,单一的气候变化因素无法驱动渭河盆地内多级且高差较大阶地的形成,气候变化可能是引发河流堆积—下切行为转换形成河流阶地的促发因素,还需要结合区域构造抬升等因素精细解读盆地内河流阶地形成过程。

3.2 构造成因

中国新生代最重大的构造事件有两个:一是西部始新世开始的印度板块与亚洲大陆的碰撞与持续挤压,二是东部太平洋板块向西俯冲于亚洲大陆板块之下 (Yin An, 2010; 潘桂棠等, 2016)。鄂尔多斯地块地处太平洋构造域和青藏高原构造域的过渡部位,新生代以来二者的综合效应使得鄂尔多斯地块岩石圈产生不同层次的活化特征,而活化的鄂尔多斯地块也为晚新生代以来青藏高原东北部向外的加速扩展提供了基础 (李煜航, 2017)。第四纪以来在青藏高原构造变形和北东向挤出的动力背景下 (图5),巨型的祁连山断裂带向东与秦岭北缘走滑断裂相接,秦岭造山带沿边界断裂强烈抬升,鄂尔多斯地块也处于垂直抬升状态,并继承渐新世开始的掀斜运动,自西北向东南俯倾,渭河盆地沉降的构造环境及其两侧正断层发育 (Peltzer et al., 1985),之后渭

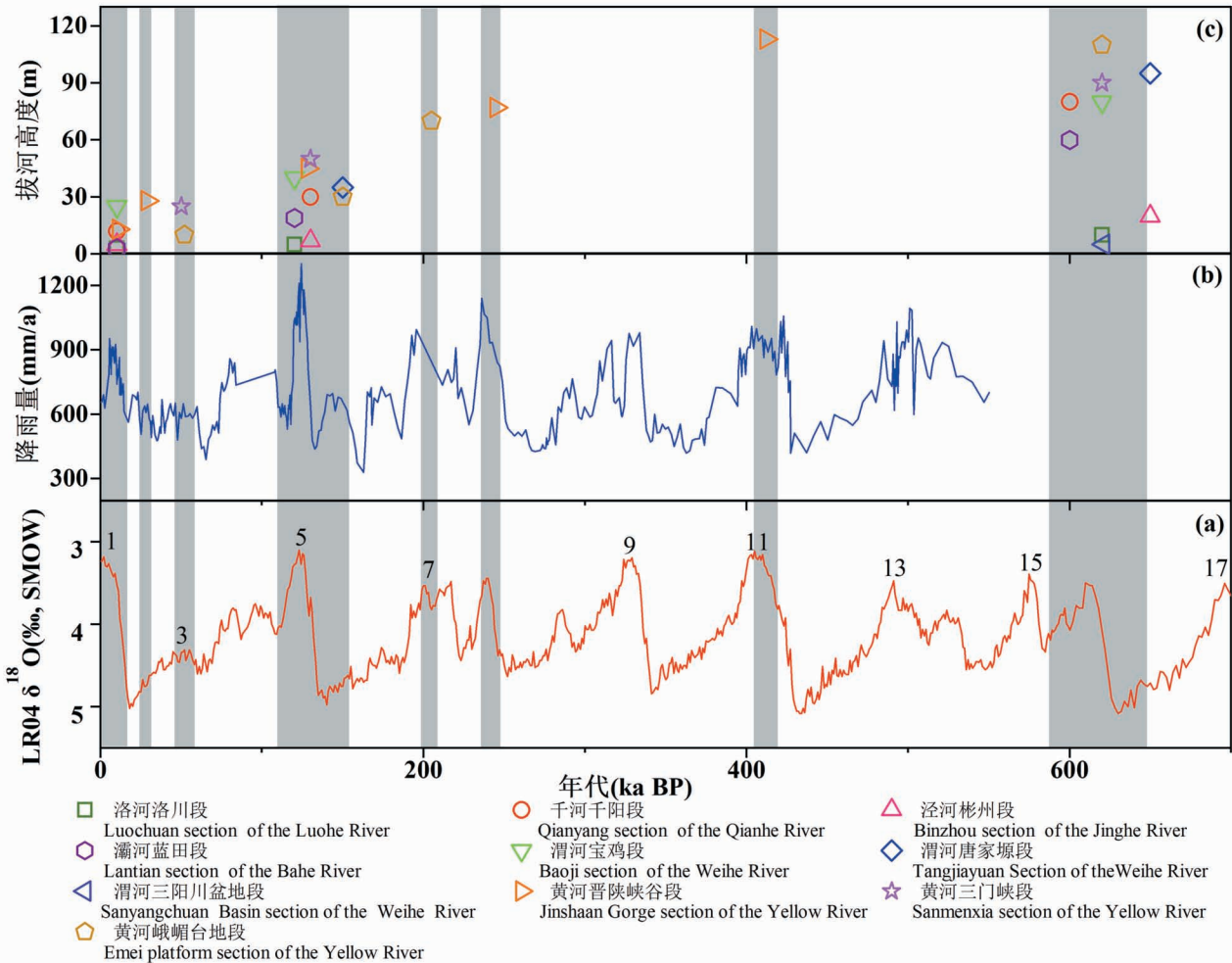


图 4 渭河盆地各河流阶地形成时代与黄土高原降水量对比：(a) LR04 曲线引自 Lisiecki et al. ,2005；
(b) 降水量数据来自 Beck et al. ,2018；(c) 各阶地形成时代

Fig. 4 Comparison between the formation age of river terraces in the Weihe Basin and the precipitation data of the Loess Plateau since 550 ka BP: (a) LR04 curve is from Lisiecki et al. , 2005; (b) the precipitation data modified from Beck et al. , 2018; (c) formation ages of fluvial terraces

河盆地的断陷作用不断扩展。因此在渭河盆地持续接受沉降的背景下,区域性的地表加速隆升可能是河流加速下切、现代河谷发育的重要原因,使得渭河及其支流保存一系列阶地。

晚新生代以来青藏高原的生长对周缘地貌的影响极为明显,渭河盆地内渭河及其支流各阶地的发育对昆仑—黄河运动(后简称“昆黄运动”)和共和运动有较好的响应,进一步反映构造旋回一定程度上控制阶地发育(Sun Jimin, 2005; 李吉均等, 2015)。在地貌时间尺度上(从百年到几十万年)进行数值模拟表明,阶地的形成和保存需要一个可量化的构造隆升速率(Viveen et al. , 2014)。河流下切速率虽然不能直接代表区域构造隆升速率,但可

以在一定程度上限定构造抬升的变化趋势(Pazzaglia et al. , 2003; Perrineau et al. , 2011; 李雪梅等, 2017; 张金玉等, 2018; 吴环环等, 2019)。各河流下切速率均呈现“快—慢—快”的趋势,尽管第四纪气候出现了若干次冰期—间冰期气候变化,但总体趋势是逐渐变干,如果 1.2 Ma 以来渭河的下切速率受气候变化控制,那么下切速率就应该表现出逐渐减小的趋势(Zachos et al. , 2001),而不应该出现转折变化(图 3)。1.2~0.6 Ma 及 0.15 Ma 以来两个阶段河流下切速率较快,且对应于昆黄运动与共和运动发生时期,可以大致指示区域构造抬升速率加快。0.6~0.15 Ma 之间阶地发育级数相对较少(图 3),且下切速率较低为构造相对平稳时期,指示

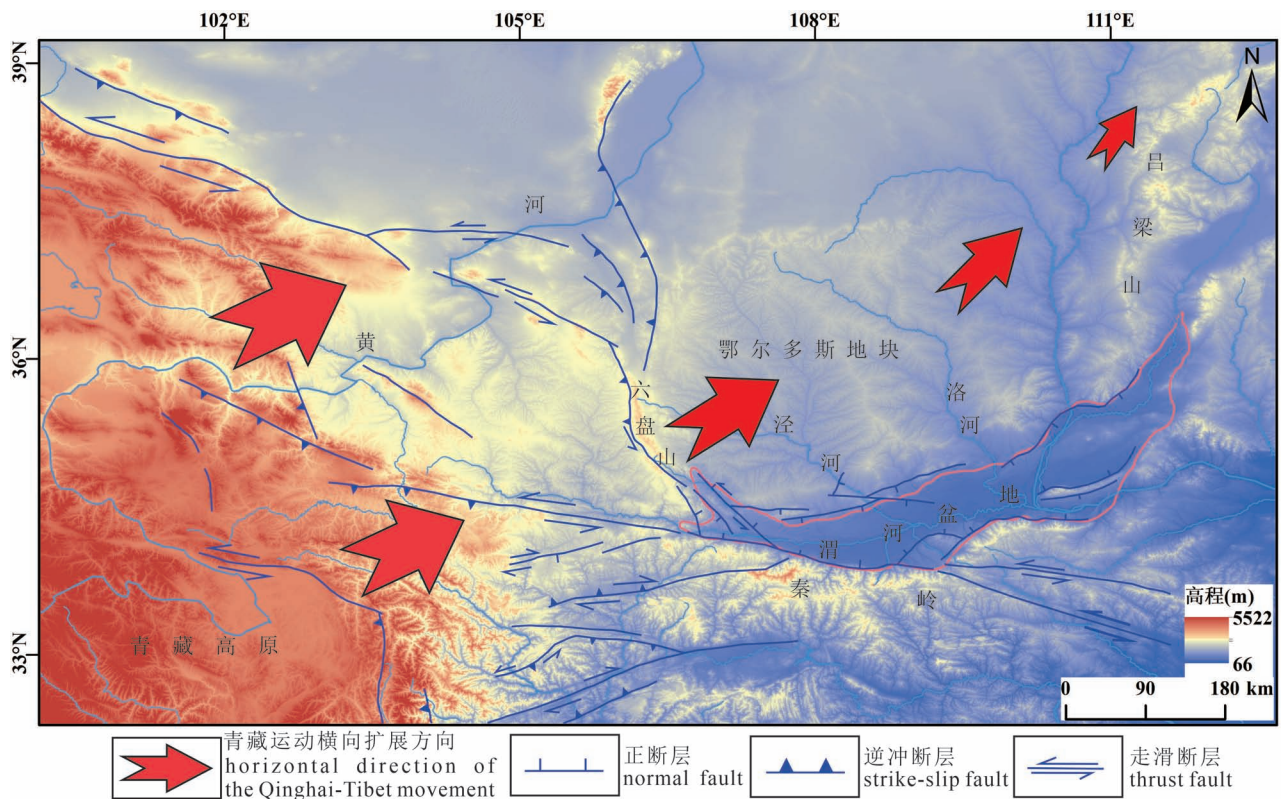


图 5 1.8 Ma 以来青藏高原东北部横向扩展空间演化示意图 (据李煜航,2017)
Fig. 5 The temporal and spatial evolution of the horizontal expansion of the northeastern Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau since 1.8 Ma (modified from Li Yuhang, 2017&)

区域构造抬升平稳,可以认为区域隆升控制着渭河盆地内绝大多数阶地的阶次、拔河高度,阶地层序就可以作为地表隆升过程的标志。同时渭河盆地西部河流阶地下切速率较东部快,这与渭河盆地西高东低的地貌特征和渭河盆地持续接受沉降相吻合,说明构造活动对盆地内阶地的形成有显著的影响。另外洛河阶地的发育与高原抬升时间虽然存在差异,这可能是青藏高原抬升应力向东北缘传递时存在时间滞后等造成 (胡春生等,2012;陈晓龙等,2013)。

渭河盆地内各河流虽整体下切趋势相同,但渭河盆地内新构造运动具有不均匀性,不同河段的下切速率差异明显可能反映了构造运动的区域差异。渭河盆地内部断裂发育,凸起凹陷相间。第四纪以来渭河盆地西缘由于受青藏高原 NE 向挤压响应形成弧形构造带,断裂密布,其中陇县—马召 NW 左旋活动正断裂显著影响着千河和渭河宝鸡段阶地发育 (胡小猛等,2012;李新男,2017)。千河两岸发育不对称河流阶地,北岸的河流阶地序列保存很好,而南岸则不完整,沿河砂砾层厚度没有明显规律性,同时砾石层不具有标准的二元结构等特征,其河道演化

过程中存在明显的顺时针旋转,揭示了鄂尔多斯地块西南缘晚新生代以来陇县—马召断裂的周期性活动,相应地,鄂尔多斯地块表现出中更新世至晚更新世周期性隆起和逆时针旋转的构造特征 (张岳桥等,2006;赵董崎,2019)。盆地西部下切速率较东部高,与渭河盆地第四纪以来西部隆升快,导致渭河盆地西高东低的地形变化相吻合。渭河盆地中下游南部支流灞河两岸发育不对称阶地,被认为是骊山凸起作掀斜式抬升运动导致,同时其下切速率相比东部其他河流要高,与渭河盆地接壤的北秦岭的隆升速率明显高于南秦岭近 2 mm/a 的“掀斜式”隆升模式吻合 (田勤俭等,2003;Mercier et al., 2013)。而泾河、洛河阶地形成也响应青藏高原阶段性隆升运动,但拔河高度、下切速率等较小,可能与泾河、洛河主要在稳定的鄂尔多斯地块有关。鄂尔多斯地块稳定抬升,断裂较少,因此泾河、洛河阶地的形成可能是响应青藏高原北东向应力传递的远场效应的地貌响应,指示了渭河盆地与鄂尔多斯地块南缘发生垂直差异运动。另外河流阶地受局部断裂影响被错断在渭河盆地内河流阶地中也普遍存在,野外识别阶

地的难度增加(郝凯,2008;黄丹青等,2018)。

对比渭河盆地周边地区河流最高级阶地的形成发育时间,渭河上游陇西段最高级阶地形成于约1.11 Ma,渭河三阳川盆地约为1.2 Ma,黄河兰州东盆地约为1.2 Ma(潘保田等,2007),黄河切开积石峡约为1.1 Ma(张智勇等,2003),黄河晋陕峡谷段约为1.2 Ma,黄河三门峡段约1.24 Ma(程绍平等,1998),黄河中卫约为1.59 Ma(韩非等,2016),西宁湟水约为1.55 Ma(鹿化煜等,2004)。虽然黄河上游阶地形成时间相对偏早,但渭河盆地周边最早河流阶地形成大多集中于1.2 Ma,在未考虑Sun Jimin(2005)认为渭河阎峪最高级阶地形成年代为2.6 Ma的情况下,这表明第四纪以来青藏高原东北地区河流阶地主要是早更新世晚期以来河流下切的结果且无法说明渭河下游河谷溯源侵蚀形成上游河谷。

总而言之,在早更新世晚期以来构造隆升的背景下,河流平均下切速率均提升。因此区域地势和坡度的增加可以被认为是渭河盆地内河流急剧下切的重要原因,各河流阶地的形成是对青藏高原构造运动应力向北东向传递的响应。而河流下切一般发生在气候转型时期,强降雨等是形成河流较大来水量的关键因素,气候演变影响不可忽视,河流对轨道尺度气候变化的响应是渭河阶地形成的次要因素。

4 渭河盆地东部边缘河湖演化争论

第四纪以来黄河的形成、演化是在新生代以来的构造—气候—地貌耦合体系中发生的重大地貌事件,黄河穿过三门峡的时代意味着黄河的最终整合形成,但是渭河、黄河最终切穿渭河盆地东部三门峡东流入海的时间还有一定争议(刘志杰等,2007;赵希涛等,2018)。主要存在两种观点:一方面部分学者认为黄河的形成与切穿三门峡东流似乎发生在早更新世晚期,时间较短,可能与构造隆升运动与全球气候变化有关(Kong Ping et al., 2014; Shi Wei et al., 2015; Hu Zhenbo et al., 2016)。Pan Baotian等(2005a)和Su Huai等(2008)对三门峡东侧扣马河流阶地研究提出黄河在1.2 Ma前流经三门峡。Kong Ping等(2014)利用宇宙成因核素埋藏测年法和锆石U-Pb年龄,获得了渭河盆地湖泊环境向河流环境过渡和三门峡河流阶地形成的年代分别为1.3~1.4 Ma和1.3~1.5 Ma。另一方面,一些学者认为黄河贯通三门峡是在晚更新世(傅建利等,2013;张信宝等,2018)。Wang Sumin等(2002)和

Jiang Fuchu等(2007)利用热释光法等对三门峡盆地内黄底沟剖面及T₃黄河阶地的上覆黄土层底部进行年代测定,认为三门古湖在0.15 Ma左右被排干,代表现代意义上黄河东流入海时间;张信宝等(2018)通过解释连通和贯通的概念不同之后认为黄河三门峡贯通时间为0.125 Ma左右;傅建利等(2013)选择了晋陕峡谷寺沟T₄阶地典型剖面进行了OSL年代测试及古土壤断代法,确定形成于0.13~0.08 Ma期间的T₄阶地发育代表晋陕黄河北段与鄂尔多斯地块周缘黄河得以沟通,黄河水系最终形成。

上述两种观点虽然都以河流阶地作为研究对象,但年龄结果却出入较大。究其原因可能是由于不同采样点的选择、测年方法、沉积相的识别和地质过程的解析等一系列问题可能增加了研究结果的不一致性。另外利用三门古湖消亡时间作为黄河东流的依据可能不妥,三门峡古湖的消失和渭河与黄河是否连通之间的关系还存在不同的认识(刘志杰等,2007)。2.8~2.6 Ma后古黄河切入潼关地区,渭河盆地与三门峡盆地相通,湖水由相对封闭的渭河盆地注入三门峡盆地,形成统一的三门古湖,之后随着三门峡盆地东部断裂持续延伸,黄河切穿三门峡盆地而向东流,三门峡古湖也逐渐消亡(Liu Jin et al., 2019; 刘瑾等,2020)。渭南卤阳湖钻孔LYH-1沉积地层和渭河盆地介形虫类研究显示渭河盆地三门峡古湖在1.0 Ma以前已经排干(袁凤钿,1986; Rits et al., 2017),而李肖杨等(2020)通过对运城盆地盐湖钻孔沉积研究认为约0.2 Ma前可能仍存在大面积的三门峡古湖。通过对汾渭地堑内不同区域三门组与风成黄土地层划分,进一步获取湖相沉积—河流相沉积的转换界限即三门峡古湖的消亡时间:渭南宋家北沟²⁶Al/¹⁰Be埋藏测年所得湖相—河流相沉积转换时间为1.5±0.5 Ma(Kong Ping et al., 2014),渭南宋家北沟古地磁测年结果为1.5 Ma(胡巍等,1993; Liu Jin et al., 2019),渭南阎村W7钻孔古地磁年龄为1.5 Ma(葛同明等,1991),华县武家堡古地磁年龄为1.85 Ma(孙建中等,1988),陕县三门峡东家沟古地磁年龄为0.78 Ma(曹照垣,1985),三门峡黄底沟剖面OSL年龄为0.15 Ma(王书兵,1999; Liu Jin et al., 2019),显示三门峡古湖消亡时间汾渭地堑内不同地点差异较大,但总体自渭河盆地一侧至三门峡盆地消亡时间变晚,这与汾渭地堑西高东低的地貌特征相符,与区域构造演化较为同步。可能是由于第四纪以来秦岭山脉的快速隆升和渭河

盆地的加速下沉使得盆地沉积中心向东逐渐偏移,导致湖盆范围向东逐渐缩小,最东部三门峡盆地湖盆最晚干涸,这就造成了汾渭地堑内三门古湖的结束时间具有穿时性,所以三门古湖的消失时间无法作为黄河贯通三门峡的直接证据,只能说明此时河流相代替湖相已经开始沉积。

现阶段可认为河流阶地研究仍是解决黄河贯通三门峡年代争议的最好方式之一。三门峡盆地扣马最高级阶地年龄为 1.2 Ma (Pan Baotian et al., 2005a) 与通过在三门峡盆地利用重矿物及地球化学分析岩石组分结果证明最晚 1.0 Ma 以来三门峡附近发生过构造运动,可能降低了基准面,为黄河最终穿越三门峡提供了先决条件 (Shi Wei et al., 2015; Liu Jin et al., 2018, 2019) 的时间相近,所以从现有河流阶地年代等证据来看,黄河贯通三门峡时间更倾向发生于早更新世晚期。但通过研究不同地段黄河最高级河流阶地所得的年龄争议还无法用概念理解错误来解释,渭河盆地东部边缘河流演化较为频繁,且区域性构造事件可能导致部分古河流阶地未能很好地保存下来,这些争议可能是由于使用测年方法、野外阶地的准确识别等一系列问题导致研究结果产生不一致性。因此通过研究不同段河流阶地仅仅可能提供大致的渭河、黄河发育史的部分河段年龄约束,需结合河流阶地砾石层物源分析、统一测年手段(如宇宙成因核素埋藏测年)等,再辅以连续的湖相沉积物研究,为渭河、黄河发育史各种假设的时空演化提供验证。

5 总结与展望

渭河盆地河流阶地作为废弃的古老河道,记录了晚新生代,尤其是更新世以来的河流演化过程。现阶段主要通过古土壤断代法得到渭河盆地各河流阶地的形成时间,说明目前盆地内水系格局主要形成于 1.2 Ma 以后,可能同时受构造隆升和气候变化的影响。盆地内各河流阶地演化主要原因可能是青藏高原构造运动应力向北东向的传递使得区域隆升,进而为阶地形成提供了构造潜能,而河流对轨道尺度气候变化的响应是渭河阶地形成的次要因素,气候变化可能限定了这些构造潜能快速释放的时代,后期不同河流阶地地貌形态的差异可能为局部构造活动控制与影响的结果。另外关于黄河贯通三门峡时间的问题,由于渭河—三门峡盆地三门组湖相沉积结束具有穿时性,且自西向东结束时间逐渐年轻,因此湖相沉积可能无法作为解决此问题的可

靠证据,从现有河流阶地年代等证据来看黄河贯通潼关时间更倾向发生于早更新世晚期,但无法解释不同地段黄河最高级阶地所得的年龄争议。因此寻求三门峡盆地最高级河流阶地并进行统一测年分析、物源分析等多种手段结合,可能是解决“贯通”之争最有效的办法。

虽然渭河盆地周边河流阶地研究已经做了很多工作,但仍存在很多问题:

(1) 缺乏对阶地年龄的精确控制。年龄是判定河流下切强迫因素的关键,而现在渭河盆地内的阶地年代判定大多用地层对比的断代法,缺少精确的年代控制;

(2) 同一河流不同河段上中下游阶地拔高可能不同,选取阶地拔河高度数据计算并进行河流下切速率计算时应考虑多种因素;

(3) 缺少评估气候对地貌影响的定量代用指标,单纯利用黄土—古土壤序列指示的干湿冷暖变化仅仅是定性描述,不清楚更新世以来区域降水量、峰值流量及沉积物供应量等的变化以及这些气候作用达到怎样强度才能形成河流阶地 (Perron, 2017)。现有的高分辨率古气候重建数据时代还较短,未能覆盖到最高级阶地的形成年代,需要更长时间尺度的古气候定量指标。

加强对渭河盆地周边山体隆升、盆地沉积、气候变化等各方面数据的集成分析,结合渭河盆地河流阶地演变可对区域地貌重建提供更为深入的分析。重建渭河、黄河等河流演化史,河流阶地等地貌单元可靠地质证据和精确年代数据的约束和验证是必不可少的。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 安芷生, 张培震, 王二七, 王苏民, 强小科, 李力, 宋友桂, 常宏, 刘晓东, 周卫健, 刘卫国, 曹军骥, 李小强, 沈吉, 刘禹, 艾莉. 2006. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长. 第四纪研究, 26(5): 678~693.
- 常宏, 安芷生, 强小科, 宋友桂, 符超峰. 2005. 河流阶地的形成及其对构造与气候的意义. 海洋地质动态, 21(2): 8~11.
- 陈晓龙, 范天来, 张复, 范育新. 2013. 鄂尔多斯高原周缘黄河阶地的形成与青藏高原隆升. 地理科学进展, 32(4): 595~605.
- 程绍平, 邓起东, 闵伟, 杨桂枝. 1998. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动. 第四纪研究, 18(3): 238~239.
- 丁莹莹, 张绪教, 何泽新, 胡道功, 王超群. 2017. 末次冰期河流下切行为对气候变化的响应模式. 现代地质, 31(2): 394~405.
- 杜建军, 马寅生, 黎敦朋. 2017. 渭河盆地东南缘主要断裂晚更新世以来的活动性及灾害效应. 地球学报, 38(S1): 55~58.

方甲炳, 李方周. 1993. 渭河宝鸡段阶地形成时代及地层对比. 陕西地质, 11(2): 33~38.

傅建利, 张珂, 马占武, 王书兵, 吴艳梅. 2013. 中更新世晚期以来高阶地发育与中游黄河贯通. 地质前缘, 20(4): 166~181.

傅建利. 2009. 黄河三门峡段地貌发育与环境演变. 导师: 蒋复初. 中国地质科学院博士学位论文: 1~137.

葛同明, 樊利民, 徐行, 李素珍, 郑洪瑞. 1991. 渭南阎村 W7 孔岩心样品的古地磁学研究. 海洋地质与第四纪地质, 11(4): 59~71.

郭桂红, 韩锋. 2007. 地质定年方法综述与地球物理定年. 地球物理学进展, 22(1): 87~94.

郭晓鸽. 2011. 陕西彬县段泾河河流阶地初步研究. 导师: 庞奖励. 陕西师范大学硕士学位论文: 1~75.

韩非, 顾兆炎, 尹功明, Fink D, 王骥. 2016. 宇宙成因核素 ^{26}Al / ^{10}Be 埋藏测年法在宁夏沙坡头黄河砾石阶地年代研究中的应用. 第四纪研究, 36(5): 1216~1223.

韩恒悦, 米丰收, 刘海云. 2001. 渭河盆地带地貌结构与新构造运动. 地震研究, 24(3): 251~257.

郝凯. 2008. 结合河流阶地变形探讨临潼—长安断裂的活动性. 导师: 田勤俭. 中国地震局地震预测研究所硕士学位论文: 1~70.

胡春生, 苏怀. 2012. 黄土高原 0.8 Ma 以来地面抬升的时空特征研究. 地理科学, 32(9): 1131~1135.

胡巍, 岳乐平, 田新红. 1993. 渭南沈河宋家北沟剖面磁性地层学研究. 陕西地质, 11(2): 26~32.

胡小猛, 陈美君, 王杜涛, 吴洁利, 胡海晨. 2012. 汾渭地堑系列湖泊第四纪中晚期地貌与沉积阶段性演化的时间序次差异及其构造指示意义. 第四纪研究, 32(5): 849~858.

黄丹青, 毛南赵. 2018. 关中盆地地貌类型及新构造运动分析. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 20(1): 1~5.

蒋复初, 傅建利, 王书兵, 赵志中. 2005. 关于黄河贯通三门峡的时代. 地质力学学报, 11(4): 293~301.

雷祥义, 屈红军. 1992. 灞河阶地黄土—古土壤系列及其年代意义. 西北大学学报, 22(2): 101~108.

雷祥义. 2006. 黄土高原河谷阶地黄土地层结构模式. 海洋地质与第四纪地质, 26(2): 117~126.

李吉均, 周尚哲, 赵志军, 张军. 2015. 论青藏运动主幕. 中国科学: 地球科学, 45(10): 1597~1608.

李三萍. 2018. 千河河流阶地的发育特征及其构造意义. 导师: 樊双虎. 长安大学硕士学位论文: 1~60.

李肖杨, 梁浩, 张珂, 李忠云, 公王斌, 傅建利. 2020. 侯马—运城盆地沉积特征及其对构造运动、气候变化及河流演化的响应. 沉积学报, 38(2): 306~318.

李新男. 2017. 鄂尔多斯西南缘活动构造几何图像、运动特征及构造变形模式. 导师: 张培震. 中国地震局地质研究所博士学位论文: 1~119.

李雪梅, 张会平. 2017. 河流瞬时地貌: 特征、过程及其构造—气候相互作用内涵. 第四纪研究, 37(2): 416~430.

李裕元, 石辉. 2001. 新构造运动对黄土高原环境变迁的影响. 水土保持研究, 8(1): 123~129.

李煜航. 2017. 青藏高原东北横向扩展运动研究. 导师: 王庆良. 中国地震局地质研究所博士学位论文: 1~111.

李智超, 李文厚, 李永项, 李玉宏, 韩伟, 闻金华, 陈萌, 秦智. 2015. 渭河盆地新生代沉积相研究. 古地理学报, 17(4): 529~540.

刘护军. 2002. 秦岭新生代构造隆升研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 30(1): 121~124.

刘瑾, 陈兴强, 王平, 李廷栋, 郑洪瑞. 2020. 渭河—三门峡盆地三门组沉积充填特征、物源区及其构造意义. 地球科学, 45(7): 2673~2683.

刘林, 芮会超. 2018. 渭河盆地结构特征及演化研究. 地质力学学报, 24(1): 60~69.

刘小丰. 2007. 渭河上游河流阶地的成因与地貌演化. 导师: 潘保田. 兰州大学博士学位论文: 1~110.

刘秀铭, 毛学刚, 丁仲礼, 吕镔, 郭雪莲, 陈渠, 陈家胜, 贾佳, 杨善林, Paul H, 陈发虎. 2009. 黄土古气候变化趋势与青藏高原隆升关系初探. 第四纪研究, 29(5): 988~999.

刘志杰, 孙永军. 2007. 青藏高原隆升与黄河形成演化. 地理与地理信息科学, 23(1): 79~82, 91.

鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 谭红兵, 朱日祥, 马海州, 李珍, 苗晓东, 王先彦. 2004. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. 中国科学: 地球科学, 34(9): 855~864.

鹿化煜, 张瀚之, 王逸超, 赵琳, 王翰林, 孙文峰, 张红艳. 2018. 渭河盆地新生代沉积序列与亚洲季风气候起源演化. 第四纪研究, 38(5): 1057~1067.

吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 郭正堂. 1994. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. 中国科学(B 辑), 24(12): 1290~1297.

潘保田, 苏怀, 刘小丰, 胡小飞, 周天, 胡春生, 李吉均. 2007. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因. 第四纪研究, 27(2): 172~180.

潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. 地质前缘, 23(6): 1~23.

彭建兵. 1992. 渭河断裂带的构造演化与地震活动. 地震地质, 14(2): 113~120.

任隽. 2012. 渭河盆地深部地壳结构探测与盆地构造研究. 导师: 彭建兵. 长安大学博士学位论文: 1~261.

施雅风, 郑本兴. 1995. 青藏高原中东部最大冰期时代高度与气候环境探讨. 冰川冻土, 17(2): 97~112.

施雅风. 1998. 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. 冰川冻土, 20(3): 3~5.

苏生瑞. 1991. 渭河盆地的水系与现代构造运动. 地球科学与环境学报, 013(1): 23~29.

孙继敏, 许立亮. 2007. 汾渭地堑的河流阶地对第四纪时期印度—欧亚板块碰撞带的构造响应. 第四纪研究, 27(1): 20~26.

孙建中, 赵景波, 魏明建, 葛同明, 文思郁, 樊利民, 耿和平. 1988. 武家堡剖面古地磁新资料. 水文地质工程地质, 5(13): 44~48, 36.

孙有斌, 郭飞. 2017. 中国黄土记录的季风快速变化. 第四纪研究, 37(5): 963~973.

田勤俭, 申旭辉, 冯希杰, 韦开波. 2003. 渭河盆地断层活动反映的第四纪构造事件初步研究. 地震地质, 25(1): 146~154.

王均平. 2006. 黄河中游晚新生代地貌演化与黄河发育. 导师: 潘保田. 兰州大学博士学位论文: 1~117.

王营, 高红山, 赵珂梓, 李宗盟, 刘芬良, 潘保田. 2020. 渭河三阳川盆地最高级阶地的年代厘定及其对河谷发育的指示意义. 山地学报, 38(1): 1~8.

武繁. 2016. 黄河峨嵋台地西段河湖阶地的年代学研究. 导师: 胡小猛. 上海师范大学硕士学位论文: 1~42.

吴环环, 吴学文, 李玥, 胡道功, 贾丽云, 颜建东, 王超群, 夏蒙蒙. 2019. 黄河共和—贵德段河流阶地对青藏高原东北缘晚期隆升的指示. 地质学报, 93(12): 3239~3248.

夏勇. 2007. 渭河盆地新生代沉积特征及与构造的关系. 导师: 许安东. 长安大学硕士学位论文: 1~73.

谢远云, 李长安, 张序强, 周嘉. 2003. 青藏高原东北缘黄土的气候演化与高原隆升的耦合. 中国地质, 30(4): 436~441.

邢作云, 赵斌, 涂美义, 邢集善. 2005. 汾渭裂谷系与造山带耦合关

- 系及其形成机制研究. 地学前缘, 12(2): 249~264.
- 杨景春, 李有利. 2012. 地貌学原理. 北京: 北京大学出版社: 1~229.
- 于学峰, 薛祥煦, 李永项. 2001. 洛河大荔人遗址段的地貌学研究. 西北地质, 34(3): 62~67.
- 袁凤钊. 1986. 三门峡地区三门系介形类化石的发现及其意义. 微体古生物学报, 3(2): 161~166, 231.
- 岳乐平, 雷祥义. 1997. 黄河中游水系的阶地发育时代. 地质论评, 43(2): 186~192.
- 张金玉, 刘静, 王伟, 唐茂云, 李占飞. 2018. 活动造山带地区河流阶地与下切速率及其时空分布样式. 第四纪研究, 38(1): 204~219.
- 张猛刚. 2003. 渭河中下游河流阶地的演化模式. 导师: 雷祥义. 西北大学硕士学位论文: 1~38.
- 张培震, 李传友, 毛凤英. 2008. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率. 地震地质, 30(1): 44~57.
- 张信宝, 刘彧, 王世杰, 刘维明, 薛雯轩. 2018. 黄河、长江的形成演化及贯通时间. 山地学报, 36(5): 661~668.
- 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 胡博. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景. 高校地质学报, 12(3): 285~297.
- 张智勇, 于庆文, 张克信, 顾延生, 向树元. 2003. 黄河上游第四纪河流地貌演化——兼论青藏高原1:25万新生代地质填图地貌演化调查. 地球科学, 28(6): 621~626.
- 赵董琦. 2019. 鄂尔多斯盆地西南缘新构造运动特征. 导师: 樊双虎. 长安大学硕士学位论文: 1~68.
- 赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 2018. 内蒙河套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义. 地质学报, 92(4): 845~886.
- An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya—Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411(6833): 62~66.
- An Zhisheng, Zhang Peizhe, Wang Erchie, Wang Sumin, Qiang Xiaoke, Li Li, Song Yougui, Chang Hong, Liu Xiaodong, Zhou Weijian, Liu Weiguo, Cao Junji, Li Xiaoqiang, Shen Ji, Liu Yu, Ai Li. 2006. Changes of the monsoon—arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene. *Quaternary Sciences*, 26(5): 678~693.
- An Zhisheng, Wu Gguoxiong, Li Jianping, Sun Youbin, Liu Yimin, Zhou Weijian, Cai Yanjun, Duan Anmin, Li Li, Mao Jiangyu, Cheng Hai, Shi Zhengguo, Tan Liangcheng, Yan Hong, Ao Hong, Chang Hong, Feng Juan. 2015. Global monsoon dynamics and climate change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 29~77.
- Armitage J J, Burgess P M, Hampson G J, Allen P A. 2018. Deciphering the origin of cyclical gravel front and shoreline progradation and retrogradation in the stratigraphic record. *Basin Research*, 30(1): 15~35.
- Beck J W, Zhou Weijian, Li Cheng, White L, Xian Feng, Kong Xianghui, An Zhisheng. 2018. A 550,000-year record of East Asian monsoon rainfall from ^{10}Be in loess. *Science*, 360(6391): 877~881.
- Bridgland D, Westaway R. 2008. Climatically controlled river terrace staircases: a worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98(3~4): 285~315.
- Bridgland D R, Westaway R, Daoud M, Yassminh R, Romieh M A. 2008. River Terraces of the Nahr el Kebir, NW Syria, and their Palaeolithic Record. *Bulletin for the Council for British Research in the Levant*, 3(1): 41~46.
- Bridgland D R, Westaway R. 2014. Quaternary fluvial archives and landscape evolution: a global synthesis. *Proceedings of the Geologists' Association*, 125(5): 600~629.
- Burbank D W, Anderson R S. 2011. *Tectonic Geomorphology*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1~454.
- Chang Hong, An Zhisheng, Qiang Xiaoke, Song Yougui, Fu Chaofeng. 2005. Formation of fluvial terrace and its tectonic and climate signification. *Marine Geology Letters*, 21(2): 8~11.
- Chen Shue, Fan Shuanghu, Wang Xiaozhao, Wang Renpeng, Liu Yiliang, Yang Liuchen, Ning Xiaohong, Li Rongxi. 2018. Neotectonic movement in the southern margin of the Ordos Block inferred from the Qianhe River terraces near the north of the Qinghai—Tibet Plateau. *Geological Journal*, 53(S1): 274~281.
- Chen Xiaolong, Fan Tianlai, Zhang Fu, Fan Yuxin. 2013. Formation of the Yellow River terraces around the Ordos Plateau and its relationship with uplift of Qinghai—Tibet Plateau. *Progress in Geography*, 32(4): 595~605.
- Cheng Shaoping, Deng Qidong, Min Wei, Yang Guizhi. 1998. Yellow River and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau. *Quaternary Sciences*, 18(3): 238~239.
- Collinson J D, Lewin J. 1983. *Modern and ancient fluvial systems*. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1~575.
- Ding Yingying, Zhang Xujiao, He Zexin, Hu Daogong, Wang Chaoqun. 2017. River incision behavior response to climate change during the Last Glacial Period. *Geoscience*, 31(2): 394~405.
- Ding Zhongli, Liu Dongsheng. 1998. Forcing mechanisms for East-Asia monsoonal variations during the late Pleistocene. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1497~1510.
- Du Jianjun, Ma Yinsheng, Li Dunceng. 2017. Activity of main faults since the late Pleistocene and related geohazard effects in southeast of Weihe Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(S1): 55~58.
- Du Jun, Shi Changxing. 2012. Effects of climatic factors and human activities on runoff of the Weihe River in recent decades. *Quaternary International*, 282: 58~65.
- Fan Shuanghu, Chen Shue, Li Rongxi. 2018. Combined effects of the subductions of the Pacific Plate and Indian Plate in central China in the Cenozoic: Recorded from the Wei River Basin. *Geological Journal*, 53(S1): 266~273.
- Fang Jiabing, Li Fangzhou. 1993. Formation age of the terrace in Baoji section and their stratigraphic contrast, Weihe. *Geology of Shaanxi*, 11(2): 33~38.
- Fu Jianli. 2009. The Fluvio—Lacustrine Landform Development and Environment Change in the Sanmenxia Section of the Yellow River. Tutor: Jiang Fuchu. Chinese Academy of Geological Sciences Doctoral Dissertation: 1~137.
- Fu Jianli, Zhang Ke, Ma Zhanwu, Wang Shubing, Wu Yanmei. 2013. The terrace (T5 and T4) formation since the late Middle Pleistocene and its implication in the through cutting of the middle reach of Yellow River. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 166~181.
- Gao Hongshan, Liu Xiaofeng, Pan Baotian, Wang Yong, Yu Yongtao, Li Jijun. 2008. Stream response to Quaternary tectonic and climatic change: Evidence from the upper Weihe River, central China. *Quaternary International*, 186(1): 123~131.
- Gao Hongshan, Li Zongmeng, Ji Yapeng, Pan Baotian, Liu Xiaofeng. 2016. Climatic and tectonic controls on strath terraces along the upper Weihe River in central China. *Quaternary Research*, 86(3): 326~334.
- Ge Tongming, Fan Limin, Xu Xing, Li Suzhen, Zheng Hongrui.

- 1991&. Magnetostratigraphic study for borehole W7 from Yancun, Weinan. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 11(4): 59~71.
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W, Lourens L J. 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27(2): 83~100.
- Guo Guihong, Han Feng. 2007&. The overview of dating methods and the geophysical dating. *Process in Geophysics*, 22(1): 87~94.
- Guo Xiaoge. 2011&. Preliminary Study on the Terraces of Jinghe River in Binxian, Shaanxi. Tutor: Pang Jiangli. Shaanxi Normal University Master Dissertation: 1~75.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159~163.
- Han Fei, Gu Zhaoyan, Yin Gongming, Fink D, Wang Duo. 2016&. Cosmogenic nuclides $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial dating of Yellow River gravel terraces around Yemingshan Hill, Ningxia, China. *Quaternary Sciences*, 36(5): 1216~1223.
- Han Hengyue, Mi Fengshou, Liu Haiyun. 2001&. Geomorphological structure in the Weihe Basin and neotectonic movement. *Journal of Seismological Research*, 24(3): 251~257.
- Hao Kai. 2008&. Using River Terrace Deformation to Study Lintong—Chang'an Fault. Tutor: Tian Qinjian. Master Dissertation of Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration: 1~70.
- Hu Chunsheng, Su Huai. 2012&. The spatial and temporal features of surface uplift in Loess Plateau since 0.8 Ma. *Scientia Geographica Sinica*, 32(9): 1131~1135.
- Hu Wei, Yue Leping, Tian Xinhong. 1993&. On the magnetostratigraphy of the Songjia—Beigou section, Youhe, Weinan. *Geology of Shaanxi*, 11(2): 26~32.
- Hu Zhenbo, Pan Baotian, Wang Junping, Cao Bo, Gao Hongshan. 2012. Fluvial terrace formation in the eastern Fenwei Basin, China, during the past 1.2 Ma as a combined archive of tectonics and climate change. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 235~245.
- Hu Xiaomeng, Chen Meijun, Wang Dutao, Wu Jieli, Hu Haichen. 2013&. The sequence difference in the times in the geomorphic—sedimentary evolution in the Fenwei Graben basins during the middle—late Quaternary and its tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 32(5): 849~858.
- Hu Zhenbo, Pan Baotian, Guo Lianyong, Vandenberghe J, Liu Xiaopeng, Wang Junping, Fan Yunlong, Mao Junwei, Gao Hongshan, Hu Xiaofei. 2016. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension. *Quaternary Science Reviews*, 133: 1~14.
- Huang Danqing, Mao Nanzhao. 2018&. Analysis of geomorphic type and Neotectonic movement of Guanzhong Basin. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 20(1): 1~5.
- Jiang Fuchu, Fu Jianli, Wang Shubing, Zhao Zhizhong. 2005&. The age of the Yellow River passing through the Sanmen Gorge. *Journal of Geomechanics*, 11(4): 293~301.
- Jiang Fuchu, Fu Jianli, Wang Shubing, Sun Donghuai, Zhao Zhizhong. 2007. Formation of the Yellow River, inferred from loess—paleosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China. *Quaternary International*, 175(1): 62~70.
- Kochel R C, Miller J R. 1997. Geomorphic responses to short-term climatic change; An introduction. *Geomorphology*, 19(3~4): 171~173.
- Kong Ping, Jia Jun, Zheng Yong. 2014. Time constraints for the Yellow River traversing the Sanmen Gorge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(2): 395~407.
- Lei Xiangyi, Qu Hongjun. 1992&. Loess—paleosol sequence at terrace of Bahe River and its significance of age. *Journal of Northwest University*, 22(2): 101~108.
- Lei Xiangyi. 2006&. Models of loess stratigraphical structure on the terraces in the Loess Plateau of China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 26(2): 117~126.
- Li Baofeng, Sun Donghuai, Xu Weihong, Liang Baiqing, Ma Zhiwei, Wang Xin, Li Zaijun, Chen Fahu. 2017. Paleomagnetic chronology and paleoenvironmental records from drill cores from the Hetao Basin and their implications for the formation of the Hobq Desert and the Yellow River. *Quaternary Science Reviews*, 156: 69~89.
- Li Jijun. 1991. The environmental effects of the uplift of the Qinghai—Xizang Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 10(6): 479~483.
- Li Jijun, Zhou Shangzhe, Zhao Zhijun, Zhang Jun. 2015&. The Qingzang movement; The major uplift of the Qinghai—Tibetan Plateau. *Science China: Earth Sciences*, 45(10): 1597~1608.
- Li Sanping. 2018&. Development Characteristics of the Qianhe River Terrace and Its Tectonic Significance. Tutor: Fan Shuanghu. Chang'an University Master Dissertation: 1~60.
- Li Xiaoyang, Liang Hao, Zhang Ke, Li Zhongyun, Gong Wangbin, Fu Jianli. 2020&. Depositional characteristics of the Houma—Yuncheng Basin and its response to tectonic activity, climate change, and river evolution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(2): 306~318.
- Li Xinnan. 2017&. Deformation Pattern Based on Geometry and Kinematics of Active Tectonics in the southwestern Ordos Block. Tutor: Zhang Peizhen. Institute of Geology, China Earthquake Administrator Doctoral Dissertation: 1~119.
- Li Xuemei, Zhang Huiping. 2017&. Transient fluvial landscape: features, processes and its implication for tectonic—climate interaction. *Quaternary Sciences*, 37(2): 416~430.
- Li Yuhang. 2017&. Study on the Lateral Motion of Northeastern Tibetan Plateau. Tutor: Wang Qingliang. Institute of Geology, China Earthquake Administrator Doctoral Dissertation: 1~111.
- Li Yuyuan, Shi Hui. 2001&. The impact of Neotectonics on the environmental evolution and soil erosion of Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 8(1): 123~129.
- Li Zhichao, Li Wenhou, Li Yongxiang, Li Yuhong, Han Wei, Wen Jinhua, Chen Meng, Qin Zhi. 2015&. Sedimentary facies of the Cenozoic in Weihe Basin. *Journal of Palaeogeography*, 17(4): 529~540.
- Lin Aiming, Yang Zhenyun, Sun Zhiming, Yang Tianshui. 2001. How and when did the Yellow River develop its square bend? *Geology*, 29(10): 951~954.
- Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene - Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20(1): PA1003.
- Liu Hujun. 2002&. Tectonic uplift of the Cenozoic era in the Qinling Range. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 30(1): 121~124.
- Liu Jin, Chen Xingqiang, Chi Zhenqing, Wang Yong, Min Longrui, Li Tingdong. 2018. Tectonically-controlled evolution of the Late Cenozoic Nihewan Basin, North China Craton: Constraints from

- stratigraphy, mineralogy, and geochemistry. *Acta Geologica Sinica* (English edition), 92(2): 769~785.
- Liu Jin, Chen Xingqiang, Shi Wei, Chen Peng, Zhang Yu, Hu Jianmin, Dong Shuwen, Li Tingdong. 2019. Tectonically controlled evolution of the Yellow River drainage system in the Weihe region, North China: Constraints from sedimentation, mineralogy and geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 179: 350~364.
- Liu Jin, Chen Xingqiang, Wang Ping, Li Tingdong. 2020. Sedimentary characteristics, provenance and tectonic significance of the Sanmen formation in Weihe—Sanmenxia Basin. *Earth Science*, 45(7): 2673~2683.
- Liu Lin, Rui Hluichao. 2018. Exploration on structural characteristics of the Weihe Basin and its evolution. *Journal of Geomechanics*, 24(1): 60~69.
- Liu Xiaofeng. 2007. The Genesis of the Upper Weihe River Terraces and Geomorphology Evolution. Tutor: Pan Baotian. Lanzhou University Doctoral Dissertation: 1~110.
- Liu Xiuming, Mao Xuegang, Ding Zhongli, Lü Bin, Guo Xuelian, Chen Jiasheng, Jia Jia, Yang Shanlin, Paul H, Chen Fahu. 2009. Study on the relation between loess paleoclimate trend and uplift of Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 29(5): 988~999.
- Liu Zhijie, Sun Yongjun. 2007. Uplift of the Qinghai—Tibet Plateau and formation, evolution of the Yellow River. *Geography and Geo-Information Science*, 23(1): 79~82, 91.
- Lu Honghua, Wu Dengyun, Zhang Huiping, Ma Yuanxu, Zheng Xiangmin, Li Youli. 2020. Spatial patterns of Late Quaternary river incision along the northern Tian Shan foreland. *Geomorphology*, 357: 107100.
- Lu Huayu, An Zhisheng, Wang Xiaoyong, Tan Hongbing, Zhu Rixiang, Ma Haizhou, Li Zhen, Miao Xiaodong, Wang Xianyan. 2004. Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai—Tibet Plateau since 14 million years ago. *Science in China: Earth sciences*, 34(9): 855~864.
- Lu Huayu, Zhang Hanzhi, Wang Yichao, Zhao Lin, Wang Hanlin, Sun Wenfeng, Zhang Hongyan. 2018. Cenozoic depositional sequence in the Weihe Basin (Central China): A long-term record of Asian monsoon precipitation from the greenhouse to icehouse Earth. *Quaternary Sciences*, 38(5): 1057~1067.
- Lü Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin, Guo Zhengtang. 1994. Analysis of soil magnetic susceptibility in modern China and its paleoclimatic significance. *Science in China (Series B)*, 24(12): 1290~1297.
- Maddy D, Bridgland D R. 2000. Accelerated uplift resulting from Anglian glacioisostatic rebound in the Middle Thames Valley, UK?: Evidence from the river terrace record. *Quaternary Science Reviews*, 19(16): 1581~1588.
- Maddy D, Bridgland D, Westaway R. 2001. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quaternary International*, 79: 23~36.
- Malatesta L C, Avouac J P, Brown N D, Breitenbach S F M, Pan Jiawei, Chevalier M L, Rhodes E, Carlier D S, Zhang Weijing, Charreau J, Lave J, Blard P H. 2018. Lag and mixing during sediment transfer across the Tian Shan piedmont caused by climate-driven aggradation-incision cycles. *Basin Research*, 30(4): 613~635.
- Mercier J L, Vergely P, Zhang Yueqiao, Hou Mingjin, Bellier O, Wang Yongming. 2013. Structural records of the late Cretaceous—Cenozoic extension in Eastern China and the kinematics of the Southern Tan-Lu and Qinling fault zone (Anhui and Shaanxi Provinces, PR China). *Tectonophysics*, 582: 50~75.
- Pan Baotian, Burbank D, Wang Yixiang, Wu Guangjian, Li Jijun, Guan Qingyu. 2003. A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial—interglacial transitions in northwest China. *Geology*, 31(11): 957~960.
- Pan Baotian, Wang Junping, Gao Hongshan, Chen Yingying, Li Jijun, Liu Xiaofeng. 2005a. Terrace dating as an archive of the run-through of the Sanmen Gorges. *Progress in Natural Science*, 15(12): 1096~1103.
- Pan Baotian, Wang Junping, Gao Hongshan, Guan Qingyu, Su Huai, Li Bingyuan, Li Jijun. 2005b. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 50(7): 657~664.
- Pan Baotian, Su Huai, Liu Xiaofeng, Hu Xiaofei, Zhou Tian, Hu Chunsheng, Li Jijun. 2007. River terraces of the Yellow River and their genesis in the eastern Lanzhou Basin During last 1.2 Ma. *Quaternary Sciences*, 27(2): 172~180.
- Pan Baotian, Su Huai, Hu Zhenbo, Hu Xiaofei, Gao Hongshan, Li Jijun, Kirby E. 2009. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China. *Quaternary Science Reviews*, 28(27): 3281~3290.
- Pan Guitang, Lu Songnian, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Hao Guojie, Luo Mansheng, Ren Fei, Yuan Sihua. 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1~23.
- Pazzaglia F J, Brandon M T. 2001. A fluvial record of long-term steady-state uplift and erosion across the Cascadia forearc high, western Washington State. *American Journal of Science*, 301(4~5): 385~431.
- Peltzer G, Tapponnier P, Zhang Zhitao, Xu Zhiqin. 1985. Neogene and Quaternary faulting in and along the Qinling Shan. *Nature*, 317(6037): 500~505.
- Peng Jianbing. 1992. Tectonic evolution and seismicity of Weihe fault zone. *Seismology and Geology*, 14(2): 113~120.
- Perrineau A, Van Der Woerd J, Gaudemer Y, Zeng Jingliu, Pik R, Tapponnier P, Thuizat R, Zhang Zhengrong. 2011. Incision rate of the Yellow River in Northeastern Tibet constrained by ^{10}Be and ^{26}Al cosmogenic isotope dating of fluvial terraces: Implications for catchment evolution and plateau building. *Geological Society, London, Special Publications*, 353(1): 189~219.
- Perron J T. 2017. Climate and the pace of erosional landscape evolution. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 45(1): 561~591.
- Porter S C, An Zhisheng, Zheng Hongbo. 1992. Cyclic Quaternary alluviation and terracing in a nonglaciated drainage basin on the north flank of the Qinling Shan, central China. *Quaternary Research*, 38(2): 157~169.
- Rao Gang, Lin Aiming, Yan Bing, Jia Dong, Wu Xiaojun. 2014. Tectonic activity and structural features of active intracontinental normal faults in the Weihe Graben, central China. *Tectonophysics*, 636: 270~285.
- Ren Jun. 2012. Probe on the Deep Crustal Structure in Weihe Basin and Tectonics Research of Basin. Tutor: Peng Jianbing. Chang'an University Doctoral Dissertation: 1~261.
- Rits D S, Beets C J, Prins M A, Van Balen R T, Troelstra S R, Luo Chao, Wang Bin, Li Xiaoqiang, Zheng Hongbo. 2017.

- Geochemical characterization of the middle and late Pleistocene alluvial fan-dominated infill of the northern part of the Weihe Basin, Central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 482: 57~69.
- Schumm S A. 1993. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. *Journal of Geology*, 101(2): 279~294.
- Shi Wei, Cen Min, Chen Long, Wang Yongchao, Chen Xingqiang, Li Jiangyu, Chen Peng. 2015. Evolution of the late Cenozoic tectonic stress regime in the Shanxi Rift, central North China Plate inferred from new fault kinematic analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(DEC. 15PT. 1): 54~72.
- Shi Yafeng, Zheng Benxing. 1995&. Studies on altitude climatic environment in the middle and east parts of Tibetan Plateau during Quaternary Maximum Glaciation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 17(2): 97~112.
- Shi Yafeng. 1998&. Evolution of the Cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relationship with the global change in the mid Quaternary. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 20(3): 3~5.
- Starkel L. 2003. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2189~2198.
- Su Huai, Wang Junping, Pan Baotian, Ming Qingzhong, Li Qiang. 2008. Sequences and genesis of Yellow River terrace from Sanmen Gorge to Kouma. *Acta Geographica Sinica*, 63(7): 744~750.
- Su Shengrui. 1991&. Drainage system and its implications of the modern tectonic movement in the Weihe Basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 013(1): 23~29.
- Sun Jianzhong, Zhao Jingbo, Wei Mingjian, Ge Tongming, Wen Siyu, Fan Limin, Geng Heping. 1988&. New paleomagnetic data of Wujiabao section. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (5): 44~48, 36.
- Sun Jimin, Xu Liliang. 2007&. River terraces in the Fenwei Graben, central China, and the relation with the tectonic history of the India—Asia collision system during the Quaternary. *Quaternary Sciences*, 27(1): 20~26.
- Sun Jimin. 2005. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India—Asia collision system during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 24(10~11): 1279~1286.
- Sun Youbin, Clemens S C, An Zhisheng, Yu Zhiwei. 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3. 6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 25(1~2): 33~48.
- Sun Youbin, Guo Fei. 2017&. Rapid monsoon changes recorded by Chinese loess deposits. *Quaternary Sciences*, 37(5): 963~973.
- Tian Qinjian, Shen Xuhui, Feng Xijie, Wei Kaibo. 2003&. Primary study on Quaternary tectonic events based on variation of fault activity in Weihe Basin. *Seismology and Geology*, 25(1): 146~154.
- Vandenbergh J. 2003. Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2053~2060.
- Viveen W, Schoorl J M, Veldkamp A, Van Balen R T. 2014. Modelling the impact of regional uplift and local tectonics on fluvial terrace preservation. *Geomorphology*, 210(APR. 1): 119~135.
- Wang Bin, Zheng Hongbo, He Zhong, Wang Ping, Kaakinen A, Zhou Xinying. 2014. Middle Miocene eolian sediments on the southern Chinese Loess Plateau dated by magnetostratigraphy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 411: 257~266.
- Wang Junping. 2006&. Formation and Evolution of the Middle Reaches of the Yellow River since Late Cenozoic. Tutor: Pan Baotian. Lanzhou University Doctoral Dissertation; 1~117.
- Wang Sumin, Wu Xihao, Zhang Zhenke, Jiang Fuchu, Xue Bin, Tong Guobang, Tian Guoqiang. 2002. Sedimentary records of environmental evolution in the Sanmen Lake Basin and the Yellow River running through the Sanmenxia Gorge eastward into the sea. *Science in China Series D: Earth Science*, 45(7): 595~608.
- Wang Ying, Gao Hongshan, Zhao Kezi, Li Zongmeng, Liu Fenliang, Pan Baotian. 2020&. Dating of the highest terrace of the Weihe River in the Sanyangchuan Basin and its implications to valley evolution. *Mountain Research*, 38(1): 1~8.
- Woolderink H A G, Kasse C, Cohen K M, Hoek W Z, Van Balen R T. 2019. Spatial and temporal variations in river terrace formation, preservation, and morphology in the Lower Meuse Valley, The Netherlands. *Quaternary Research*, 91(2): 548~569.
- Wu Fan. 2016&. Geochronology of River and Lake Terraces in the Western Yellow River Emei Platform. Tutor: Hu Xiaomeng. Shanghai Normal University Master Dissertation; 1~42.
- Wu Huanhuan, Wu Xuewen, Li Yue, Hu Daogong, Jia Liyun, Yan Jiandong, Wang Chaoqun, Xia Mengmeng. 2019&. River terraces in the Gonghe—Guide section of the Yellow River: Implications for the late uplift of the northeastern margin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3239~3248.
- Xia Yong. 2007&. The Sedimentary Characteristic of Cenozoic in Weihe Basin and Its Relationship with Tectonics. Tutor: Xu Andong. Chang'an University Master Dissertation; 1~73.
- Xie Yuanyun, Li Chang'an, Zhang Xuqiang, Zhou Jia. 2003&. Climatic evolution of loess on the northeastern margin of the Qinghai—Tibet Plateau and its coupling. *Geology in China*, 30(4): 436~441.
- Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, Xing Jishan. 2005&. The formation of the Fenwei rift valley. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 249~264.
- Yang Jingchun, Li Youli. 2012. The Principles of Geomorphology. Beijing: Peking University Press; 1~229.
- Yin An. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488(1~4): 293~325.
- Yu Xuefeng, Xue Xiangxu, Li Yongxiang. 2001&. The geomorphologic character in Dali Man site and the development of Luohe. *Northwestern Geology*, 34(3): 62~67.
- Yuan Fengdian. 1986&. Discovery of Ostracods from the Sanmen series and its significance. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 3(2): 161~166, 231.
- Yue Leping, Lei Xiangyi. 1997&. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River. *Geology Review*, 43(2): 186~192.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517): 686~693.
- Zhang Jinyu, Liu Jing, Wang Wei, Tang Maoyun, Li Zhanfei. 2018&. Fluvial terraces and river incision rates in active orogen and their spatial and temporal pattern. *Quaternary Sciences*, 38(1): 204~219.
- Zhang Menggang. 2003&. The Evolutionary Model of River Terraces in the Mid—Tail of Weihe River. Tutor: Lei Xiangyi. Northwest University Master Dissertation; 1~38.

Zhang Peizhen, Li Chuanyou, Mao Fengying. 2008&. Strath terrace formation and strike-slip faulting. *Seismology and Geology*, 30(1): 44~57.

Zhang Xinbao, Liu Yu, Wang Shijie, Liu Weiming, Xue Wenxuan. 2018&. On the chronology of the Yellow Rivers and the Yangtze Rivers. *Mountain Research*, 036(5): 661~668.

Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Hu Bo. 2006&. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos Basin and geodynamic setting. *Geological Journal of China Universities*, 12(3): 285~297.

Zhang Zhiyong, Yu Qingwen, Zhang Kexin, Gu Yansheng, Xiang Shuyuan. 2003&. Geomorphological evolution of Quaternary river from upper Yellow River and geomorphological evolution investigation for 1: 250000 scale mapping in Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 621~626.

Zhao Dongqi. 2019&. Neotectonic Movement Characteristics in Southwestern Margin of Ordos Basin. Tutor: Fan Shuanghu. Chang'an University Master Dissertation: 1~68.

Zhao Xitao, Jia Liyun, Hu Daogong. 2018&. Discoveries of fluvial terraces and Neogene gravels in the Hetao area, Inner Mongolia: Implications for the development of the Yellow River, antiquity of Chinese rivers, and coexistence theory of rivers and lakes. *Acta Geologica Sinica*, 92(4): 845~886.

Zheng Hongbo, Clift P D, Wang Ping, Tada R, Jia Juntao, He Mengying, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of sciences of the United States of America*, 110(19): 7556~7561.

Fluvial terrace evolution and its tectonic — climatic significance in the Weihe Basin

WANG Yingguo^{1, 2, 3)}, CHANG Hong¹⁾, ZHOU Weijian^{1, 2)}

1) *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710061;*

2) *Shaanxi Key Laboratory of Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Technology and Application, National Center for AMS in Xi'an, Xi'an, 710061;*

3) *University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049*

Abstract:The evolution history of the Weihe River and its tributaries is closely related to regional tectonic deformation and climate changes. Therefore, the genesis and temporal evolution of river terraces in the basin is an important scientific issue for studying the environmental evolution of the Weihe Basin. The loess magnetostratigraphy is generally used to obtain the relatively ages to terraces in the Weihe Basin. Although dust materials have covered a large area of the basin since the Quaternary, there may still be a certain time difference between the formation of river terraces and the final preservation of dust materials on the terraces. Although the regional comparison of loess—paleosol sequence can be used to infer the age range of fluvial stage, more absolute age methods are still needed to constrain it. Based on the comprehensive analysis of the formation ages and heights above river of the different tributary river terraces in the Weihe Basin, combined with the large-scale regional uplift and the Quaternary climate evolution sequence for comparison, it is found that not every important node of climate change corresponds to fluvial terraces, and the age spatial distribution of river terraces also has certain regional characteristics. Therefore, it is proposed that the evolution of rivers in the Weihe Basin is closely related to the potentials caused by tectonic movement and the release of these potentials induced by climate change. Above all, the river terraces in the Weihe Basin are mainly tectonic—climate cycle terraces under the combined action of large-scale tectonic uplift and climate change. Reconstruction of the evolution history of the fluvial system in the Weihe Basin is of great significance for a comprehensive understanding of the early formation and evolution of the fluvial system in the middle reaches of the Yellow River, especially for solving the dispute over the time when the Weihe River and the Yellow River run through the Sanmen Gorge. However, more reliable geological evidences and various analytical data of different rivers are needed to confirm and restrain them.

Keywords:the Weihe Basin; river terraces; age distribution; tectonic stage; climate change

Acknowledgements:This study was supported by the strategic priority research program of Chinese Academy of Sciences (No. XDB40000000) and the major project of National Natural Science Foundation of China (No. 41930321)

First author: WANG Yingguo, male, born in 1997, Master student. Research areas include fluvial geomorphology and geochronology. Email: wangyg@ieecas.cn

Corresponding author: CHANG Hong, male, born in 1970, professor. Research areas include paleoenvironment, paleoclimate and neotectonics. Email: changh@loess.llqg.ac.cn

Manuscript received on: 2021-01-05; Accepted on: 2021-04-30; Network published on: 2021-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.305 **Edited by:** ZHANG Yuxu

