

鄂尔多斯高原周缘黄河阶地的形成与青藏高原隆升

陈晓龙¹, 范天来², 张 复¹, 范育新^{1,2}

(1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:构造运动和气候变化是河流阶地形成的两个重要因素。学术界对于构造运动与气候变化中哪个因素是河流阶地形成的控制因素尚未形成一致观点。本文选择位于鄂尔多斯高原周缘的河流阶地, 综述了前人在兰州段、中卫段和晋陕峡谷段3个河段的黄河阶地上的研究成果, 结合2万年以来的古洪水记录与古地震活动等证据, 对比了河流阶地形成、气候变化以及青藏高原的幕式隆升的时间。对比结果显示, 鄂尔多斯高原周缘多级河流阶地的形成时间与青藏高原阶段性隆升的时间比较一致, 而与气候冰期—间冰期变化之间没有明显规律, 这一结果支持构造运动是鄂尔多斯高原周缘的河流阶地形成的控制因素。

关 键 词:河流阶地; 构造隆升; 气候变化; 鄂尔多斯高原

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.012

1 引言

河流阶地形成有两种主要原因: ① 气候变化引起海平面升降, 冰期时山岳冰川地区大量碎屑滞留堆积, 间冰期时河流动能增大切入沉积物形成阶地; ② 间歇性构造运动引起的侵蚀基准面变动, 导致河流下切形成阶地。此外, 曲流从上游向下游摆动、河流袭夺和地方性侵蚀基准面的变化也能导致局部阶地的形成(曹伯勋, 1995)。在地壳比较稳定、地面抬升较缓慢的区域, 气候变化在河流阶地的发育过程中起主导作用(Meindert, 2001; Mol, 2000)。但在地面抬升较快、构造运动活跃的地区, 河流阶地发育的主要驱动力没有一个明确的结论, 并成为学术界争论的焦点。总而言之, 尽管存在争论, 河流阶地的形成不外乎气候变化控制(Bridgland et al, 2008, 2010; Maddy et al, 2005; Pan et al, 2007, 2009; 潘保田等, 2007; Perrineau et al, 2011; Wang et al, 2010)和构造隆升控制(Demir et al, 2004; 胡春生等, 2012; 孙继敏等, 2007; Westaway et al, 2002)两种观点。本文选择鄂尔多斯高原周缘黄河阶地, 试图在综述前人研究成果的基础上, 对比气候变化、构造运动与河流阶地发育之间的时间关系, 探

讨气候变化与构造运动在这一特定地区河流阶地发育过程中的作用。

鄂尔多斯高原在构造上是以鄂尔多斯地块为主体的地貌单元, 其东、西及北为黄河所限, 南部与黄土高原相接。黄河自青藏高原东北缘流出, 经兰州、中卫、银川北流进入河套盆地, 先后环绕鄂尔多斯高原北缘及东缘并向南切穿晋陕峡谷(图1), 形成“几”字形大拐弯, 并在兰州段、中卫段及晋陕峡谷段都形成了一系列阶地(图1中小方块所示)。在地质历史时期, 受青藏高原隆起所形成的NE向的侧向挤压, 鄂尔多斯地块发生了逆时针旋转(陈小斌等, 2005, 2005; 邓起东, 1999; 范俊喜, 2002; 苏刚, 1984; 徐伟进等, 2008; 张岳桥等, 1999)。因而, 鄂尔多斯高原周缘是检验构造运动活跃区河流阶地主要控制因素的理想场所。

2 鄂尔多斯周缘黄河阶地研究现状

黄河在中上游地区不同河段都发育有阶地, 如化隆(潘保田等, 1996)、同德(Craddock et al, 2010)、西宁(鹿化煜等, 2004)、兰州(胡春生等, 2009; 潘保田等, 1991, 2006, 2007; 朱俊杰等, 1994)、靖远(朱照

收稿日期: 2012-07; 修订日期: 2012-12.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB950202); 国家自然科学基金项目(41172163)。

作者简介: 陈晓龙, 男, 硕士研究生, 研究方向为新构造运动与地球表层系统。E-mail: chenxiaolong11@lzu.edu.cn

通讯作者: 范育新, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光释光年代学和湖泊—沙漠环境演化。E-mail: yxfan@lzu.edu.cn

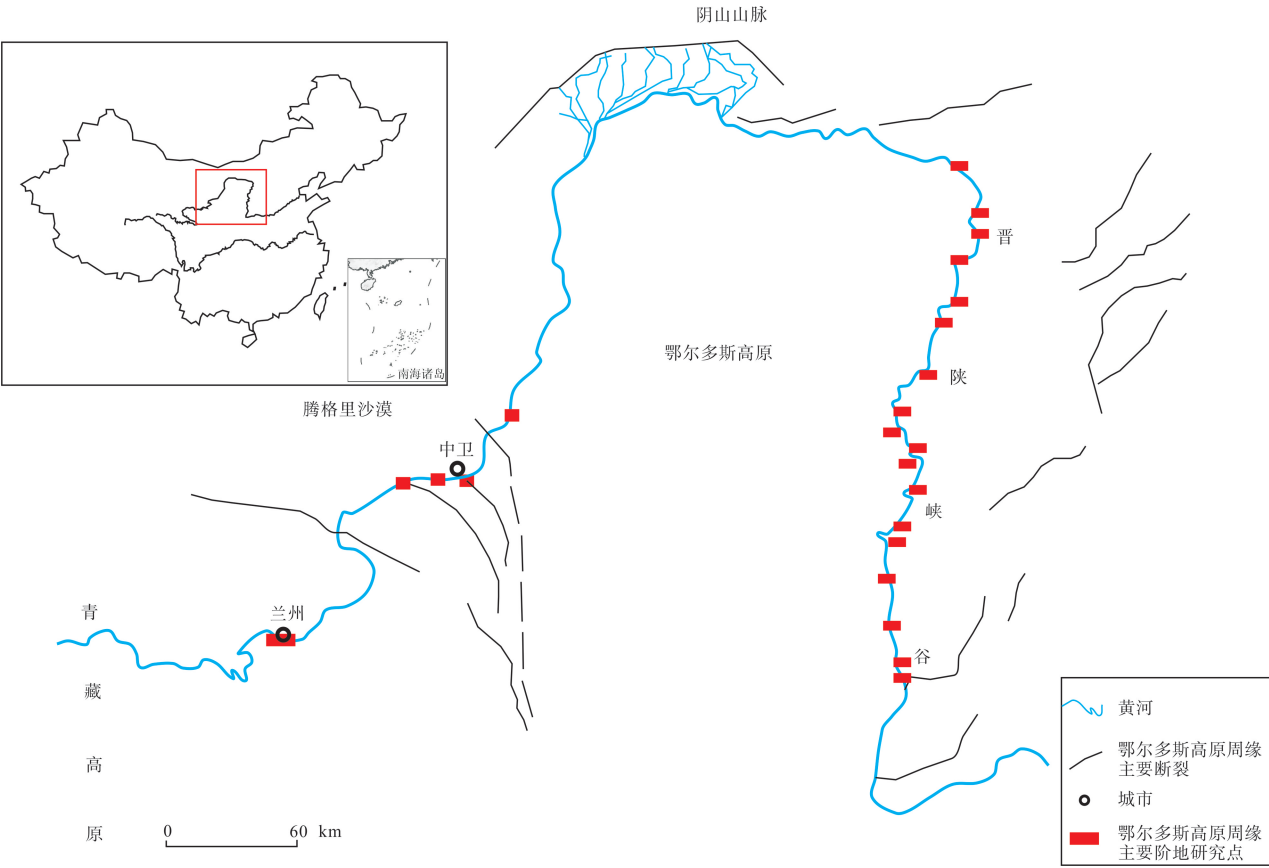


图 1 鄂尔多斯高原及其周边地区概况(据范俊喜, 2002 修改)

Fig. 1 The geographic settings of the Ordos Plateau and its surrounding areas

宇, 1989)、中卫(邢成起等, 2001, 2002; 闫满存等, 1997; 张珂, 2006)、晋陕峡谷(程绍平等, 1998; 邱维理等, 2008; 王均平等, 2006)、三门峡至扣马(潘保田等, 2005; 苏怀等, 2008)、平陆(季军良等, 2006)都发育有级数不等的阶地。此外在黄河的多级支流, 如渭河(Gao et al, 2007)、湟水河、大夏河(鹿化煜等, 2004)、萨拉乌苏河(Liu et al, 2012)、汾河、洮河、洛河、无定河、藉水、清水河、仙姑河、沮河、泾河支流马莲河、环江等(朱照宇, 1989)也有阶地发育。本文仅选取位于鄂尔多斯西缘的兰州段和中卫段以及东缘的晋陕峡谷段 3 个地段的河流阶地进行比较。

2.1 兰州段

在兰州地区至少发育了 9 级阶地, 保存较好, 以基座阶地为主, 典型特征是在每级阶地的漫滩亚相之上都发育有古土壤。早期研究主要依据黄土—古土壤层序(潘保田等, 1991; 朱俊杰等, 1994)推断阶地形成的年代, 新近的研究将古地磁年代法及光释光测年手段(胡春生等, 2009; 潘保田等 2006, 2007)运用到了阶地形成年代的确定中。这些研究

成果显示, 兰州地区最高一级阶地(拔河高度 330 m)形成于距今约 1.6 Ma, 之后分别在 1.5 Ma、1.24 Ma、1.05 Ma、0.96 Ma、0.86 Ma、0.13 Ma、0.05 Ma 和 0.01 Ma 形成了 8 级阶地(表 1)。这些阶地的年代比较可信, 通常被认为是河流阶地研究可资对比的年代标尺。根据阶地面砾石层之上发育古土壤层的事实, 兰州地区黄河阶地被认为形成于冰期向间冰期过渡的时段(潘保田等, 2007)。

2.2 中卫段

黄河在中卫段发育了 4~21 级不等的阶地(表 2)。前人分析认为, 代表 1.6 Ma 以来青藏高原阶段性隆起次数的阶地共有 6 级, 指示 1.6 Ma 以来该构造区域独自抬升的阶地共有 5 级, 代表 1.6 Ma 以来海原构造山地独自隆升幅度和次数的阶地共有 10 级(邢成起等, 2001)。本区阶地多为发育于暗红色砂岩和砾岩之上的基座阶地或侵蚀阶地。在保存较好的阶地面的砾石表面发育有钙膜, 其厚度随阶地级数增大而变厚。邢成起等(2001, 2002)依据钙膜的厚度、结合电子自旋共振(ESR)测年方法, 在该

表 1 鄂尔多斯周缘不同地段河流阶地与邻区黄河阶地对比
Tab. 1 Comparison of river terraces at different sites around the Ordos Plateau and its adjacent area

西宁—互助地区湟水阶地 ^①			兰州地区黄河阶地 ^②			中卫地区黄河阶地 ^③			晋陕峡谷黄河阶地 ^④			三门峡—扣马、平陆阶地 ^⑤		
级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma
T8	465	1.55	T9	330	1.6	T11	212	1.57						
			T8	230	1.5									
T7	432	1.21	T7	216	1.24				T10	151	1.24	T6	10	1.24
T6	245	未测	T6	128	1.05	T10	170	1.07						
T5	203	未测	T5	108	0.96									
T4	164	未测	T4	100	0.86	T9	136	0.74	T9	130	0.78	T5	55	0.86
						T8	111	0.5	T8	110	0.41	T4	30	0.62
						T7	86	0.36						
						T6	82	0.29	T7	86	0.24	T3	9	0.25
						T5	74	0.22						
T3	107	0.15	T3	77	0.13	T4	64	0.14	T6	30	0.128	T2	20	0.13
T2	20	0.07				T3	48	0.094	T5	86	0.076			
			T2	30	0.05				T4	10	0.06	T1	25	0.05
									T3	60	0.044			
						T2	27	0.018	T2	29	0.018			
T1	5	0.01	T1	15	0.01									
						T1	13	0.005	T1	5	0.005			

注：① 据鹿化煜等, 2004; ② 据胡春生等, 2009; 潘保田等, 1991, 2006, 2007; 朱俊杰等, 1994; ③ 据邢成起等, 2001, 2002; 闫满存等, 1997; 张珂, 2006; ④ 据程绍平等, 1998; 邱维理等, 2008; 王均平等, 2006; ⑤ 据季军良等, 2006; 潘保田等, 2005; 苏怀等, 2008

表 2 中卫段不同地点河流阶地对比表
Tab. 2 Comparison of river terraces near Zhongwei

米家山东坡 ^①			车木峡 ^②			黑山峡 ^③			沙坡头 ^④		
级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma	级序	拔河/m	年代/Ma
T21	401	1.5	T11	151	未测	T11	215	1.57	T4	200	未测
T20	375	未测	T10	147	未测				T3	70	未测
T19	350	1.31							T2	30	未测
T18	327	未测				T10	170	1.07	T1	8	未测
T17	315	未测									
T16	305	0.712				T9	140	0.74			
T15	295	未测									
T14	272	未测									
T13	256	未测									
T12	231	0.467	T9	143	0.52	T8	120	0.5			
T11	206	0.39				T7	95	0.36			
T10	168	未测									
T9	160	未测									
T8	148	0.25				T6	85	0.29			
T7	132	未测	T8	118	未测						
T6	118	0.2	T7	98	未测	T5	80	0.22			
T5	106	0.146	T6	88	未测	T4	73	0.14			
T4	76	0.11	T5	76	未测						
			T4	55	0.087	T3	55	0.094			
T3	56	0.02	T3	36	0.02	T2	30	0.018			
T2	31	未测	T2	16	未测						
T1	10	未测	T1	3	未测	T1	13	0.005			

注：①、②和③据邢成起等, 2001; 2002; ④据闫满存等, 1997

地区测量了11级阶地的年代数据(表1),最老一级阶地年代为1.57 Ma。张珂等(2006)在黑山峡用宇宙核素方法测得该地段最老阶地形成于2.4 Ma。在采用多种方法交叉检验该级阶地年代的情况下,本文不排除存在老于1.57 Ma的河流阶地的可能性。

2.3 晋陕峡谷段

黄河流出河套盆地之后经由喇嘛湾进入位于鄂尔多斯高原东缘的晋陕峡谷向南流动,并经禹门口进入渭河盆地,长度约700 km。在晋陕峡谷段黄河阶地分布较为分散,从峡谷最北端的喇嘛湾到最南端的禹门口都有分布。运用热释光及ESR测年法对散布于峡谷中21个研究点的阶地序列进行测量和对比的结果(程绍平等, 1998)显示,晋陕峡谷段至少发育6级黄河阶地,最高一级阶地年代为1.41 Ma。近年对晋陕峡谷段18个研究点的黄河阶地序列的对比结果显示,晋陕峡谷段至少发育了10级阶地,释光、ESR测年、黄土—古土壤层序及古地磁综合定年的结果表明,位于鄂尔多斯东缘地区的晋陕峡谷段最高一级阶地形成于1.24 Ma(王均平, 2006),较低的4级阶地则形成于最近10万年以来(邱维理等, 2008)。位于黄河中下游地区的山西平陆、三门峡—扣马段河流阶地的研究结果表明(季军良等, 2006; 潘保田等, 2005; 苏怀等, 2008),尽管晋陕峡谷不同地点河流阶地的级数存在差异,但总体上晋陕峡谷段至少发育了10级阶地(表1)。

3 河流阶地形成的主驱动因素分析

前人的大量研究已经基本厘清了鄂尔多斯高原周缘不同地段河流阶地的级数和形成年代,但目前对于这一地区河流阶地形成的主要驱动/控制因素是气候变化还是构造运动尚没有统一的认识。因此,有必要对气候变化及构造运动两个因素在鄂尔多斯周缘河流阶地中的作用进行分析对比。

3.1 阶地形成与冰期—间冰期转换

有研究显示,在地面快速抬升的地区,气候变化仍可能控制着河流阶地的形成(高红山等, 2005; Pan et al, 2003)。首先,通过对比鄂尔多斯周缘河流阶地发育时间与气候变化曲线(Lisiecki et al, 2005; 刘东升等, 1985)(图2)发现,并非在每一次冰期—间冰期的旋回中都形成了阶地。特别是

0.86-0.13 Ma之间,尽管发生了数次气候旋回,但在黄河兰州段却没有发育与之相对应的阶地。反过来,从现有研究结果看,在兰州、中卫及晋陕峡谷3个地段的河流阶地中,部分阶地形成于冰期—间冰期的交替时期,部分形成于冰期时段,河流阶地的形成与冰期—间冰期转换在时间上对应关系不明显。特别是在距今20-18 ka的末次冰盛期时段,全球气候极其不稳定,冷暖变动快速且幅度大(Bond et al, 1993; Dansgaard et al, 1993; Fang et al, 1999; Porter et al, 1995),仅黄河上游兰州—银川段就发生了106次大洪水事件,且有18次为多次洪峰叠加的复合型大洪水(李长安等, 2002)。按照河流侵蚀能力增强—发育阶地的模式推断,20-18 ka时段理应有阶地形成,但在黄河兰州—银川段迄今却并没有发现20-18 ka时段的河流阶地。尽管不能完全排除这级阶地存在的可能,但如果通过较深入的地质工作仍发现不了20-18 ka时段的河流阶地,那么气候变化就难以被认为是控制鄂尔多斯周缘河流阶地的主要因素。

其次,河流阶地研究成果显示,鄂尔多斯周缘黄河不同河段在最近200 ka以来,不仅阶地发育频率显著加快、而且下切速率也明显加大(图2、图3),然而在气候的冰期—间冰期变化周期中无法找到这一特征。

此外,鄂尔多斯高原其他一些阶地的形成也无法用气候变化解释,如位于萨拉乌苏河在1.7 ka以来下切了60 m(Liu et al, 2012)。如此级阶地是气候变化主导的,那么仅从阶地的拔河高度来看,鄂尔多斯高原及周缘地区在距今1.7 ka以来应表现为降雨量的激增,其结果必然导致周边或下游大面积地区出现湖泊,然而至今未见相关的报道。另外一个例子是位于鄂尔多斯高原西北缘的“吉兰泰—河套”古大湖,该湖位于晋陕峡谷上游的河套盆地,曾在末次冰期中经历一个显著的高湖面时期,并于距今5-6万年前后发生退缩(陈发虎等, 2008a, 2008b)。高湖面退缩的时间正好对应于末次冰期中亚洲季风减弱的时段(Wang et al, 2008),但此时却在晋陕峡谷中形成了阶地(王均平, 2006)。由此可见,晋陕峡谷6万年前后形成的这级阶地无法借助气候主导论来得到合理解释。

综上所述,气候变化难以圆满地独立解释鄂尔多斯周缘河流阶地的形成问题。因此气候变化并非鄂尔多斯周缘河流阶地形成的主导控制因素。

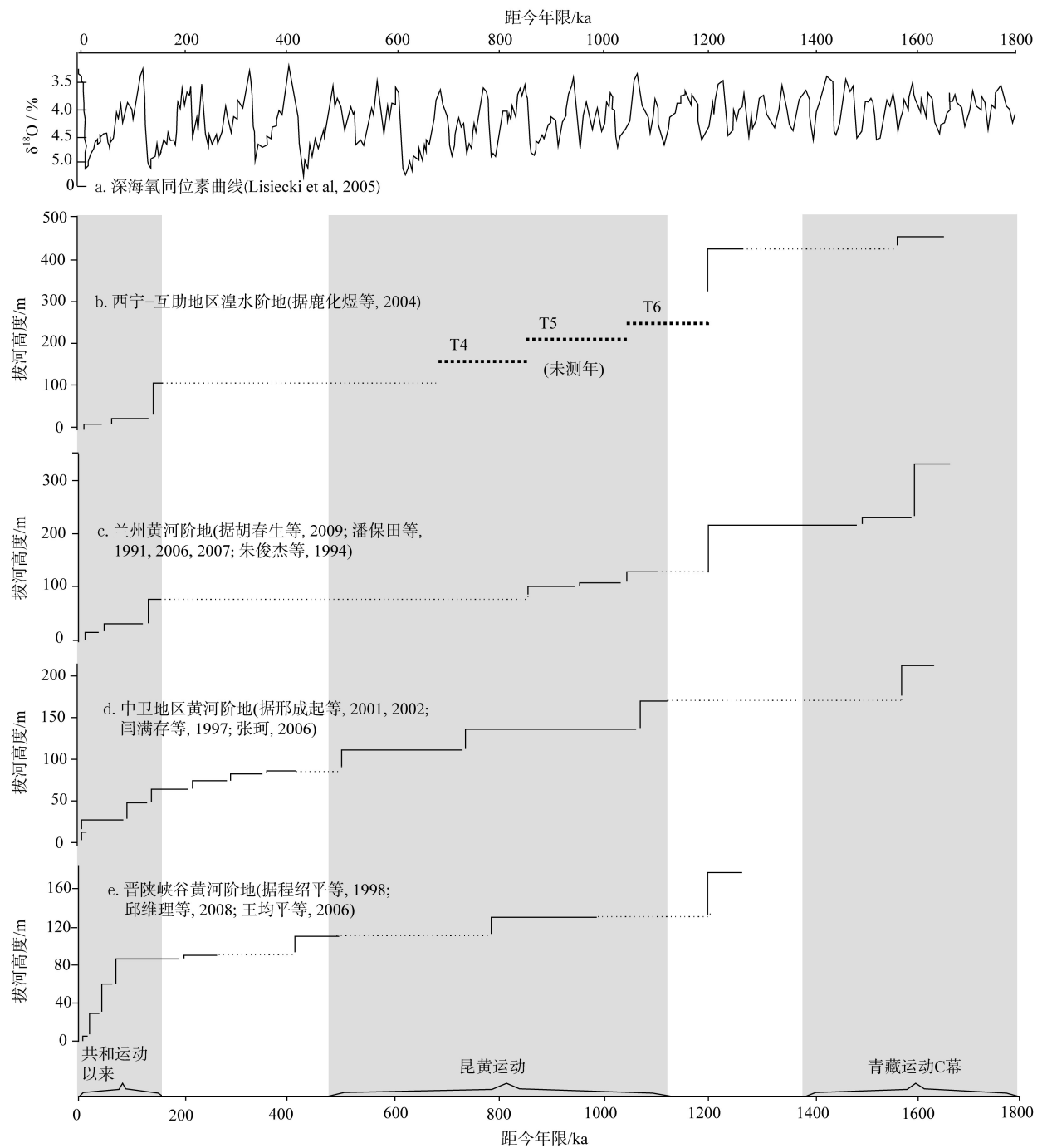


图2 鄂尔多斯高原周边阶地发育与青藏高原隆升及深海氧同位素指示的气候变化阶段对应图

Fig. 2 Comparison of ages between which of formation of the Yellow River terraces around the Ordos Plateau, uplift of the Qinghai-Tibet Plateau, and $\delta^{18}\text{O}$ records of deep sea sediments

3.2 阶地形成与高原隆升

青藏高原在第四纪以来先后经历了15个隆升幕,才达到现在的高度(李吉均, 1999; 李吉均等, 1979; 马润勇等, 2005; 彭建兵; 2004)。精密的水准测量、磷灰石裂变径迹测年及青藏高原周缘湖泊沉积和地貌方面的证据(丁林等, 1995; 张青松等,

1991; 朱大岗等, 2005),支持青藏高原的阶段性幕式隆升特征,并显示出其强烈的隆升具有逐步加速的趋势,尤其是近十几万年以来进入了高速隆升期。本文将自青藏运动C幕以来的1.7-1.5 Ma、1.2-1.1 Ma、0.9-0.8 Ma、0.6-0.5 Ma、0.15 Ma、0.05 Ma和0.01 Ma 7个隆升幕,与黄河兰州段、中卫段

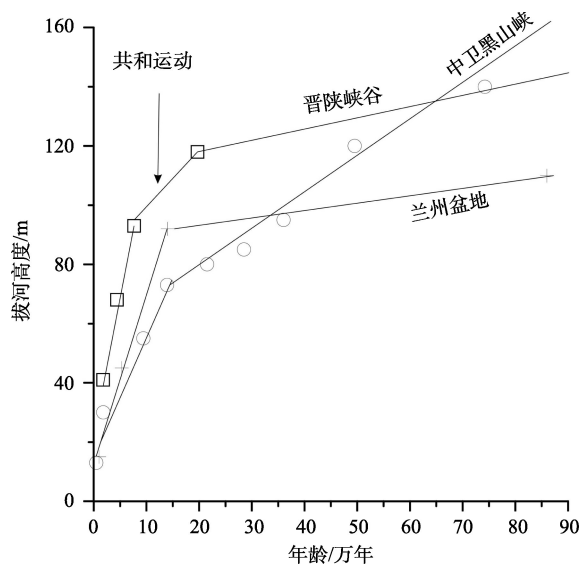


图3 距今90万年以来鄂尔多斯周缘不同地段河流阶地对比(据陈发虎等, 2008b)
Fig. 3 Comparison of terraces around Ordos Plateau since 900 kaBP

和晋陕峡谷段的阶地的年代进行对比(图2)。结果显示,从大框架上看,近十几万年来以来多级阶地发育的时间对应于青藏运动C幕以来的几次构造隆升,尤其是高原加速隆升阶段,河流阶地集中发育。但也有部分阶地的发育时间与青藏高原隆升的时间不一致。本文认为部分河流阶地的发育与高原隆升在时间上的差异,可能是青藏高原隆起应力发生NE向传递时存在时间滞后的结果。

为了进一步揭示阶地形成与区域构造活动之间的时间关系,本文对比了鄂尔多斯高原北缘20 ka 以来的古地震活动(曹刚等, 2001; 陈立春等, 2003a, 2003b; 冉永康等, 2002, 2003)与其周缘阶地的形成时间(图4),结果显示,一方面在地震活动频发的时段,鄂尔多斯高原西缘、东缘及西南缘的众多研究点都形成了阶地;另一方面,即便在季风强度没有明显变化的时段(如10-8 kaBP),也有河流阶地发育。可见,构造活动最有可能是鄂尔多斯高原

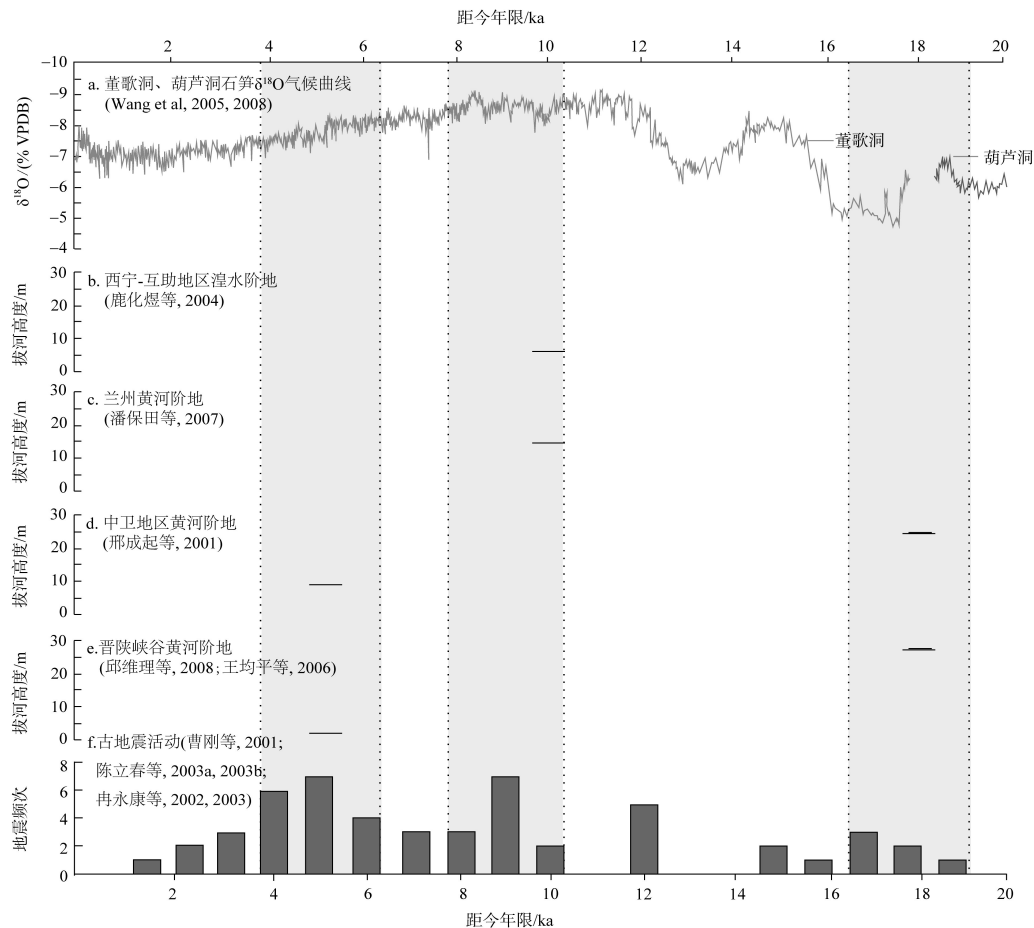


图4 鄂尔多斯高原周缘河流阶地的形成与同期高原北缘古地震活动及石笋氧同位素指示的气候变化在时间上的对比
Fig. 4 Chronological comparison between the formation of the Yellow River terraces around the Ordos Plateau, paleo-earthquake, and stalagmite records of Dongge cave and Hulu cave

周缘河流阶地形成的主要控制因素。

鄂尔多斯周缘不同河段阶地的级数存在差异,如中卫段最多发育了21级阶地,有近10级阶地在相邻的兰州段及晋陕峡谷段河段找不到同时期的对应阶地。这种现象表明,鄂尔多斯高原的河流阶地除对青藏高原的阶段性的隆升响应比较敏感外,鄂尔多斯高原内部也存在小范围的差异性构造活动。

总之,本文的对比显示鄂尔多斯高原周缘多级河流阶地形成的时间与构造运动,特别是青藏高原隆升的时间具有较好的一致性,而冰期—间冰期变化的时间与河流阶地形成的时间之间没有明显的规律,表明构造运动是鄂尔多斯高原周缘地区河流阶地形成的控制因素。但是从河流阶地形成的条件来看,强降雨以及高原地区的高温仍然是形成河流较大来水量的关键因素,因此并不能排除气候变化在河流阶地形成中的贡献。

4 结论

本文选择构造运动较为活跃的鄂尔多斯高原周缘的河流阶地,在综述前人研究成果的基础上,对比了深海氧同位素曲线所显示的气候变化、青藏高原隆升与河流阶地发育之间的时间关系,以期揭示鄂尔多斯高原周缘的河流阶地形成的控制因素。尽管从河流阶地形成的机理看,不能否认气候变化在河流阶地形成中的贡献,但本文的对比结果显示,气候变化难以圆满地解释鄂尔多斯周缘河流阶地的形成,不应该是鄂尔多斯周缘河流阶地形成的控制因素;相反,鄂尔多斯高原周缘多级河流阶地的形成时间与青藏高原幕式隆升阶段的时间比较一致,这一结论也得到了古地震活动和前人研究的证实,总体支持构造运动是鄂尔多斯高原周缘的河流阶地形成的控制因素。

致谢:感谢赖忠平研究员给出的中肯意见,使本文能够完善;与兰州大学西部环境变化研究院胡振波老师的讨论过程中受益匪浅,谨致谢意。

参考文献(References)

- Bond G, Broecker W, Johnsen S, et al. 1993. Correlation between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365: 143-147.
- Bridgland D R, Westaway R, Howard A J, et al. 2010. The role of glacio-isostasy in the formation of post-glacial river terraces in relation to the MIS 2 ice limit: Evidence from Northern England. *Proceedings of the Geologists' Association*, 121(2): 113-127.
- Bridgland D R, Westaway R. 2008. Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98 (3-4): 285-315.
- Cao B X. 1995. *Geomorphology and quaternary geology*. Beijing, China: China University of Geosciences Press. [曹伯勋. 1995. 地貌学及第四纪地质学. 北京: 中国地质大学出版社.]
- Cao G. 2001. *Seism of Inner Mongolia*. Beijing, China: Seism Press. [曹刚. 2001. 内蒙古地震研究. 北京: 地震出版社.]
- Chen F H, Fan Y X, Chun X, et al. 2008a. A preliminary study of the "Jilantai-Hetao" megalake at late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1207-1219. [陈发虎, 范育新, 春喜, 等. 2008a. 晚第四纪“吉兰泰—河套”古大湖的初步研究. *科学通报*, 53(10): 1207-1219.]
- Chen F H, Fan Y X, Madsen D B, et al. 2008b. Preliminary study on the formation mechanism of the "Jilantai-Hetao" megalake and the lake evolutionary history in Hetao Region. *Quaternary Sciences*, 28(5): 866-873. [陈发虎, 范育新, Madsen D B, 等. 2008b. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰—河套”古大湖形成机制的初步研究. *第四纪研究*, 28(5): 866-873.]
- Chen L C, Ran Y K, Chang Z P. 2003a. Characteristics of Late Quaternary faulting and paleoseismic events on the east of Delingshan segment of the Sertengshan Piedmont Fault. *Seismology and Geology*, 25(4): 555-564. [陈立春, 冉永康, 常增沛. 2003a. 色尔腾山山前断裂得令山以东段晚第四纪活动特征与古地震事件. *地震地质*, 25(4): 555-564.]
- Chen L C, Ran Y K, Yang X P. 2003b. Late Quaternary activity and segmentation model of the Sertengshan Piedmont Fault. *Earthquake Research in China*, 19(3): 255-263. [陈立春, 冉永康, 杨小平. 2003b. 色尔腾山山前断裂晚第四纪活动与破裂分段模型. *中国地震*, 19(3): 255-263.]
- Chen X B, Zang S X, Liu Y G, et al. 2005. Horizontal movement of Ordos Block and the interaction of Ordos Block and adjacent blocks. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 22(3): 309-314. [陈小斌, 臧绍先, 刘永刚, 等. 2005. 鄂尔多斯地块现今运动水平状态及其周原地块的相互作用. *中国科学院研究生院学报*, 22(3): 309-314.]
- Cheng S P, Deng Q D, Min W, et al. 1998. Yellow River and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau. *Quaternary Sciences*, 18(3), 238-248. [程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 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): 238-248.]
- Craddock W H, Kirby E, Harkins N W, et al. 2010. Rapid fluvial incision along the Yellow River during headward basin integration. *Nature Geoscience*, 3(3): 209-213.
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice-core record. *Nature*, 364: 218-220.
- Demir T, Yeşilnacar İ, Westaway R. 2004. River terrace sequences in Turkey: Sources of evidence for lateral variations in regional uplift. *Proceedings of the Geologists' Association*, 115(4): 289-311.
- Deng Q D, Cheng S P, Min W, et al. 1999. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos Block. *Journal of Geomechanics*, 5(3): 13-21. [邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论. *地质力学学报*, 5(3): 13-21.]
- Ding L, Zhong D L, Pan Y S, et al. 1995. The fission track evidences of the rapid uplift of East Himalayan Tectonic since Pliocene. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1497-1500. [丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497-1500.]
- Fan J X. 2002. Motions of the Ordos Block [D]. Beijing, China: Institute of Geology, China Earthquake Administration. [范俊喜. 2002. 鄂尔多斯地块运动特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.]
- Fang X M, Pan B T, Guan D H, et al. 1999. A 60000-year loess-paleosol record of millennial-scale summer monsoon instability from Lanzhou, China. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2264-2267.
- Gao H S, Liu X F, Pan B T, et al. 2007. Stream response to Quaternary tectonic and climatic change: Evidence from the Upper Weihe River, Central China. *Quaternary International*, 186(1): 123-131.
- Gao H S, Pan B T, Wu G J, et al. 2005. Age and genesis of alluvial terraces in East Qilian Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 25(2): 197-202. [高红山, 潘保田, 邬光剑, 等. 2005. 祁连山东段河流阶地的形成时代与机制探讨. *地理科学*, 25(2): 197-202.]
- Hu C S, Pan B T, Su H, et al. 2009. Discovery and paleomagnetic dating of 800 ka B.P. terrace of the Yellow River in Lanzhou Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 278-292. [胡春生, 潘保田, 苏怀, 等. 2009. 兰州盆地黄河 800 ka B.P. 阶地的发现及其古地磁年代. *地理科学*, 29(2): 278-292.]
- Hu C S, Pan B T, Su H, et al. 2012. The spatial and temporal features of surface uplift in Loess Plateau since 0.88 Ma. *Scientia Geographica Sinica*, 32(9): 1131-1135. [胡春生, 潘保田, 苏怀, 等. 2012. 黄土高原 0.88 Ma 以来地面抬升的时空特征研究. *地理科学*, 32(9): 1131-1135.]
- Ji J L, Zheng H B, Li S H, et al. 2006. The terraces of the Yellow River in Pinglu County, Shanxi Province and their relationship with the disappearance of the Sanmen palaeolake and the formation of the Huanghe River. *Quaternary Sciences*, 26(4): 665-672. [季军良, 郑洪波, 李盛华, 等. 2006. 山西平陆黄河阶地与古三门峡湖消亡、黄河贯通三门峡时代问题的讨论. *第四纪研究*, 26(4): 665-672.]
- Li C A, Huang J H, Zhang Y F, et al. 2002. Preliminary study of paleoflood of Last Glacial Maximum in upper reaches of the Yellow River. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 456-458. [李长安, 黄俊华, 张玉芬, 等. 2002. 黄河上游末次冰盛期古洪水事件的初步研究. *地球科学: 中国地质大学学报*, 27(4): 456-458.]
- Li J J. 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang(Tibetan) Plateau and Asian Monsoon. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 19(2): 1-11. [李吉均. 1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风. *海洋地质与第四纪地质*, 19(2): 1-11.]
- Li J J, Wen S X, Zhang Q S, et al. 1979. Study of the era, amplitude and formation of the Qinghai-Tibet Plateau promontory. *Scientia Sinica Mathematica*, 22(6): 608-616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. *中国科学: 数学*, 22(6): 608-616.]
- Lisiecki L E, Ryamo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20: PA1003.
- Liu D S. 1985. Loess and environment. Beijing, China: Science Press: 44-106. [刘东升. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社: 44-106.]
- Liu K, Lai Z P. 2012. Chronology of Holocene sediments from the archaeological Salawusu site in the Mu Us Desert in China and its palaeoenvironmental implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45(2): 247-255.
- Lu H Y, An Z S, Wang X Y, et al. 2004. Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 million years ago. *Science in China: Series D*, 34(9): 855-864. [鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 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: D 辑*, 34(9): 855-864.]
- Ma R Y, Peng J B, Liu L N, et al. 2005. Climatic and environmental effect of Qinghai-Tibet Plateau uplift on tectonic erosion of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 25(5): 5-11. [马润勇, 彭建兵, 刘利年, 等. 2005. 青藏高原隆升的气候环境效应与黄土高原构造侵蚀. *水土保持通报*, 25(5): 5-11.]

- Maddy D, Demir T, Bridgland D R, et al. 2005. An obliquity-controlled Early Pleistocene river terrace record from Western Turkey. *Quaternary Research*, 63(3): 339-346.
- Meindert W, van Den B, van Hoof T, et al. 2001. The mass terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: Evidence for 200 m of Late Neogene and Quaternary surface Quaternary uplift//Maddy D, Macklin M G, Woodward J C. River basin sediment systems: Archives of environmental change Rotterdam. Rotterdam: Balkema Press: 45-86.
- Mol J, Vandenbergh J, Kasse C. 2000. River response to variations of periglacial climate in mid-latitude Europe. *Geomorphology*, 33(3-4): 131-148.
- Pan B T, Burbank D, Wang Y X, et al. 2003. A 900 ky record of strath terrace form during glacial-interglacial transitions in Northwest China. *Geology*, 31(11): 957-960.
- Pan B T, Gao H S, Wu G J, et al. 2007. Dating of erosion surface and terraces in the Eastern Qilian Shan, Northwest China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1): 143-154.
- Pan B T, Li J J, Cao J X, et al. 1996. Study on the geomorphic evolution and development of the Yellow River in the Hualong Basin. *Mountain Research*, 14(3): 153-158. [潘保田, 李吉均, 曹继秀, 等. 1996. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究. *山地研究*, 14(3): 153-158.]
- Pan B T, Li J J, Zhu J J, et al. 1991. The Yellow River terrace development in Lanzhou and geomorphic evolution//Centre of the Quaternary Glaciation Research China, Chinese Quaternary Research Committee. Quaternary glacier and environment in West China. Beijing, China: Science Press: 271-277. [潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 等. 1991. 兰州地区黄河阶地发育与地貌演化//第四纪冰川与研究中心, 中国第四纪研究委员会. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社: 271-277.]
- Pan B T, Su H, Hu C S, et al. 2006. Lanzhou area 1.0 Ma Yellow River terrace findings and 0.8 Ma terrace formation age determined again. *Progress in Natural Science*, 16(11): 1411-1418. [潘保田, 苏怀, 胡春生, 等. 2006. 兰州地区 1.0 Ma 黄河阶地的发现和 0.8 Ma 阶地形成时代的重新厘定. *自然科学进展*, 16(11): 1411-1418.]
- Pan B T, Su H, Hu Z B, et al. 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(27-28): 3281-3290.
- Pan B T, Su H, Liu X F, et al. 2007. River terraces of the Yellow River and their genesis in Eastern Lanzhou Basin during last 1.2 Ma. *Quaternary Sciences*, 27(2): 173-180. [潘保田, 苏怀, 刘小丰, 等. 2007. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与成因. *第四纪研究*, 27(2): 173-180.]
- Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. 2005. Conjecture when the Yellow River flows into the sea from the Yellow River Sanmenxia terraced. *Progress in Natural Science*, 15(6): 700-705. [潘保田, 王均平, 高红山, 等. 2005. 从三门峡黄河阶地的年代看黄河何时东流入海. *自然科学进展*, 15(6): 700-705.]
- Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, et al. 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 457-466. [彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应. *地球科学进展*, 19(3): 457-466.]
- Perrineau A, van der Woerd J, Gaudemer Y, et al. 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: 189-219.
- Porter S C, An Z S. 1995. Correlation between climate event in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375: 305-308.
- Qiu W L, Zhang J F, Zhou L P, et al. 2008. Preliminary study of the terrace sequence of the Huanghe River in Hequ area, Shanxi, China. *Quaternary Sciences*, 28(4): 544-552. [邱维理, 张家富, 周力平, 等. 2008. 山西河曲黄河阶地序列初步研究. *第四纪研究*, 28(4): 544-552.]
- Ran Y K, Chen L C, Yang X P, et al. 2003. Strong earthquake recurrence characteristics of main active faults of Ordos Basin north edge in late Quaternary. *Science in China: Series D*, 33(S1): 136-141. [冉永康, 陈立春, 杨小平, 等. 2003. 鄂尔多斯地块北缘主要活动断裂晚第四纪强震复发特征. *中国科学: D辑*, 33(S1): 136-141.]
- Ran Y K, Zhang P Z, Hu B, et al. 2002. Paleoseismic activity on the Hohhot Segment of Daqingshan Piedmont Fault in the Late Quaternary history. *Earthquake Research in China*, 28(1): 15-27. [冉永康, 张培震, 胡博, 等. 2002. 大青山山前断裂呼和浩特段晚第四纪古地震活动历史. *中国地震*, 28(1): 15-27.]
- Su G. 1984. The research of regional seismicity using the moving-block as an unit: The Ordouce Block and its seismicity. *North Western Seismological Journal*, 6(2): 1-10. [苏刚. 1984. 以运动地块为单元的区域地震活动研究: 鄂尔多斯地块地震活动. *西北地震学报*, 6(2): 1-10.]
- Su H, Wang J P, Pan B T, et al. 2008. Sequences and Genesis of Yellow River terrace from Sanmen Gorge to Kouma. *Acta Geographica Sinica*, 63(7): 744-750. [苏怀, 王均平, 潘保田, 等. 2008. 黄河三门峡至扣马段的阶地序列及

- 形成原因. 地理学报, 63(7): 744-750.]
- Sun J M, Xu L L. 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. [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.]
- Wang J P. 2006. Formation and evolution of the middle reaches of the Yellow River since the Late Cenozoic [D]. Lanzhou, China: Lanzhou University. [王均平. 2006. 黄河中游晚新生代地貌演化与黄河发育 [D]. 兰州: 兰州大学.]
- Wang P, Jing H C, Yuan D Y, et al. 2010. Optically stimulated luminescence dating of sediments from the Yellow River terraces in Lanzhou: Tectonic and climatic implications. *Quaternary Geochronology*, 5(2-3): 181-186.
- Wang Y J, Chen H, Edwards R L, et al. 2005. The Holocene Asian Monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308: 854-857.
- Wang Y J, Chen H, Edwards R L, et al. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 451: 1090-1093.
- Westaway R, Maddy D, Bridgland D. 2002. Flow in the lower continental crust as a mechanism for the Quaternary uplift of South-East England: Constraints from the Thames terrace record. *Quaternary Science Reviews*, 21(4-6): 559-603.
- Xing C Q, Ding G Y, Lu Y C, et al. 2001. Comparison of river terraces in the middle reach valleys of the Yellow River and analysis on the multi-gradational features of tectonic action in the formation of terrace series. *Earth Quake Research in China*, 17(2): 187-201. [邢成起, 丁国瑜, 卢演涛, 等. 2001. 黄河中游河流阶地的对比及阶地系列形成中构造作用的多层次性分析. 中国地震, 17(2): 187-201.]
- Xing C Q, Yin G M, Ding G Y, et al. 2002. Thickness measurement of the gravel Ca film and dating of the coarse clastic sedimentary landform surface formation at the Heishanxia terrace of the Yellow River. *Chinese Science Bulletin*, 47(3): 167-172. [邢成起, 尹功明, 丁国瑜, 等. 2002. 黄河黑山峡阶地的砾石 Ca 膜厚度与粗碎屑沉积地貌面形成年代的测定. 科学通报, 47(3): 167-172.]
- Xu W J, Gao M T, Ren X M, et al. 2008. Study on seismic activity characteristics in the Ordos Block. *Earth Quake Research in China*, 24(4): 388-398. [徐伟进, 高孟谭, 任雪梅, 等. 2008. 鄂尔多斯地块内地震特征的初步研究. 中国地震, 24(4): 388-398.]
- Yan M C, Dong G R, Li B S. 1997. Terrace development of Yellow River and geomorphic evolution in Shapotou area. *Journal of Desert Research*, 17(4): 369-376. [闫满存, 董光荣, 李保生. 1997. 沙坡头地区黄河阶地发育与地貌演化. 中国沙漠, 17(4): 369-376.]
- Zhang K, Cai J B. 2006. Preliminary result of the dating by TCN technique of the highest terrace of the Heishanxia Gorge Mouth, Northeast margin of Tibetan Plateau and its expression of neotectonic movement in that area. *Quaternary Sciences*, 26(1): 85-91. [张珂, 蔡剑波. 2006. 黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动. 第四纪研究, 26(1): 85-91.]
- Zhang Q S, Zhou Y F, Lu S X, et al. 1991. Discussion of the rising velocity of the modern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 36(7): 529-531. [张青松, 周耀飞, 陆顺祥, 等. 1991. 现代青藏高原上升速度问题. 科学通报, 36(7): 529-531.]
- Zhang Y Q, Vergely P, Mercier J L. 1999. Pliocene-Quaternary faulting pattern and left-slip propagation tectonics in North China. *Journal of Geomechanics*, 5(3): 40-46. [张岳桥, Vergely P, Mercier J L. 1999. 华北地区上新世至第四纪断裂作用模式与左旋扩展. 地质力学学报, 5(3): 40-46.]
- Zhu D G, Meng X G, Zhao X T, et al. 2005. Sedimentary evolution of the Namco Basin, Tibet, since 116 ka B.P. and Qinghai-Tibet Plateau uplift. *Journal of Geomechanics*, 11(2): 172-180. [朱大岗, 孟宪刚, 赵希涛, 等. 2005. 西藏纳木错盆地 116 ka 以来沉积演化与青藏高原隆升. 地质力学学报, 11(2): 172-180.]
- Zhu J J, Cao J X, Zhong W, et al. 1994. The highest Yellow River terrace in Lanzhou and most old loess deposition discovery and its paleomagnetic study of dating//The Qinghai-Tibet project committee of experts. The Qinghai-Tibet Plateau form evolution, environmental change and ecological system research. Beijing, China: Science Press: 77- 90. [朱俊杰, 曹继秀, 钟巍, 等. 1994. 兰州地区黄河最高阶地与最老黄土沉积的发现及其古地磁测年研究//青藏项目专家委员会. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社: 77-90.]
- Zhu Z Y. 1989. The formation of river terraces and evolution of drainage system in the middle Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 44(4): 429-440. [朱照宇. 1989. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. 地理学报, 44(4): 429-440.]

Formation of the Yellow River terraces around the Ordos Plateau and its relationship with uplift of Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Xiaolong¹, FAN Tianlai², ZHANG Fu¹, FAN Yuxin^{1,2}

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: Tectonic movement and climatic change are two fundamental factors for the formation of river terraces. However no consistent point of view was reached at present to end the argument between climatic change and tectonic movement which was considered to be the dominant factor controlling the formation of river terraces. By focusing on the river terraces flowing along the Yellow River around the Ordos Plateau, this paper attempts to figure out the controlling factor to the formation of the Yellow River terraces through chronological comparison among which of river terraces formation, uplift of Qinghai-Tibet Plateau and transition period from glacial to interglacial. The comparison indicates a fact that most of terraces along the present Yellow River channel around the Ordos Plateau were formed synchronously with tectonic movements around the Qinghai-Tibet Plateau. However, no clear relations can be found between the transitional time span from glacial to interglacial period and formation of the Yellow River terraces. Such a comparison supports the idea that the driving force for the formation of river terraces around the Ordos Plateau was tectonic movements instead of climatic change.

Key words: river terraces; uplift; climatic change; Ordos Plateau