

河流阶地研究进展综述

胡春生^{1,2}

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 芜湖 241000; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 芜湖 241000)

摘要: 河流阶地是地貌学研究的热点问题之一, 其在研究新构造运动、古气候变化、古水系演化以及侵蚀基准面变化等方面具有不可替代的优势。近年来, 随着宇生核素测年、计算机模拟等先进技术手段相继应用到河流阶地研究中, 河流阶地研究在年代学、发育模式、指示水系演化以及数值模拟等方面取得了显著进展, 并将在精确测年应用和数值模拟研究上进一步深入。

关键词: 河流阶地; 年代学; 发育模式; 数值模拟; 水系演化

中图分类号: P931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)05-0353-10

Progress in research on river terraces

HU Chun-sheng^{1,2}

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Preventing and Controlling, Wuhu 241000, China)

Abstract: River terrace, which is one of the hot issues of the study on river geomorphology, has irreplaceable advantages in the studies on neotectonic movement, paleoclimate change, evolution of palaeo-drainage system and erosion base level change. In recent years, along with cosmogenic radionuclide dating and computer simulation applied to the study of river terraces, the researches on river terraces have gained significant progresses in the chronology, development model, indicating evolution of drainage system and numerical simulation, and will strengthen the precise dating application and numerical simulation of the river terrace research in the future.

Key words: river terrace; chronology; development model; numerical simulation; evolution of drainage system

河流系统不但是陆地沉积循环的主要通道, 同时也是塑造地貌形态重要的外营力(杨景春和李有利, 2001), 它能够对外部因素变化, 如气候变化、构造抬升和基准面变化等做出积极而敏感响应(Schumm et al, 2000), 并将这些变化信息记录到河流形态、河流沉积物以及所塑造的地貌之中(Cohen et al, 2002)。而河流阶地作为河流系统演化的产物, 是这些河流档案中重要的组成部分(Bull, 1990), 在理解河流地貌对气候变化和构造抬升响应机制方面拥有不可替代的优势(Maddy et al, 2008; Pan et al, 2009), 因此, 河流阶地

研究对于揭示区域古环境变化信息有十分重要的意义。河流阶地自19世纪中叶被人们所认识以来, 伴随着先进测年技术的发展和计算机技术的广泛应用, 河流阶地研究在广度和深度上都得到了深入发展, 并在其年代学、发育模式、数值模拟以及指示水系演化等方面取得了重要进展。

1 测年技术的发展

河流阶地年代学是河流地貌学研究的重点之一, 因为阶地年代不但能构建河流地貌演化的时间序列, 而且还是阶地序列与气候记录和构造事件对

比的时间标尺,是探讨河流对驱动因素的响应机制和阶地形成原因的基本依据,地学工作者可以通过年代学研究重建相关河流长尺度发育和演化历史(Pan et al, 2005; Westaway et al, 2009)。但是确定河流阶地的年代,一般比较困难(Burbank, 2002),受到不同发展阶段技术手段的限制,河流阶地年代学研究先后经历了定性描述和定量研究两个发展阶段,发展出相对定年和绝对测年。

1.1 相对定年的深化

在绝对测年出现之前,相对定年在河流阶地研究中起到关键作用。通过相对定年法可以判定阶地发育的先后顺序,进而得出阶地序列,常用的方法主要有孢粉法、相对沉积法、构造—气候旋回法、黄土古土壤对比法、古生物法等。例如,贵德盆地黄河第五级阶地冲积物中孢粉组合的分析,确定了其形成年代(潘保田, 1994),而延怀盆地河流阶地的年代研究也采用了此方法(计凤菊等, 2000)。克里雅河中段地区宽谷河床上覆的玄武岩年龄,则约束了该区河流阶地的最老年龄为 1.09 Ma 前后(潘燕兵等, 2008)。而祁连山地区河流阶地的研究则表明构造—气候旋回法确定阶地年代基本可行(刘小凤和刘白簏, 2001)。河流阶地砾石表面生长的地衣厚度也可以用来推算阶地沉积物脱离水面的时间(Nicholas and Butler, 1996),近年来此方法得到了实际的应用(Astrade et al, 2011),但其测年范围一般仅能达到几百年,最多也不会超过二千年(Gob et al, 2003; Innes, 2006)。同时对欧洲的一些河流研究发现,在阶地沉积物中会经常埋藏有某些软体动物的壳体,通过壳体中的氨基酸也可以估算阶地上河流沉积物的年代(Bates, 1994)。值得一提的是,在黄土高原地区,堆积于阶地面上的风成黄土的底层年龄可以近似地认为是阶地形成的年龄(潘保田等, 2005; 胡春生等, 2009),而黄土古土壤调谐年龄的确定更为大区域的河流阶地年代确定提供了相对年代(Ding et al, 2002)。然而,相对定年毕竟不能提供比较精确的年代控制,因此绝对测年技术相继应用到阶地研究中。

1.2 绝对测年的运用

绝对测年是直接测定河流阶地面上堆积物的年代,常用的测年方法主要有 ^{14}C 测年法、释光测年法(TL, OSL),电子自旋共振测年法(ESR),宇宙核素测年法、古地磁测年法等方法(表1)。其中, ^{14}C 测年尤其是 ^{14}C AMS测年具有很高的精

度(Scott et al, 2004),全新世期间的样品测年精度普遍能达到 0.5% 左右(陈铁梅, 1995),能够达到年—十年际的分辨率(向荣等, 2006),但是这种测年技术的测年范围一般不能超过五万年,无法对整个第四纪期间的河流阶地序列进行年代测定,因此常用于测定低级河流阶地的年代(Wegmann and Pazzaglia, 2009; Erkens et al, 2011)。同时河流沉积物中富含大量的石英颗粒,它们所记录的释光信号可以用来计算阶地沉积物脱离水面的时间,即阶地形成的年代(Wang et al, 2010; Guo et al, 2012),其测年尽管精度较高,可达 1 ka(郑公望等, 2000),但是释光测年法在实际应用中也很难超过十五万年(Stokes, 1999),测年范围常局限于晚更新世。因此,测年范围广的电子自旋共振测年法被引入河流阶地年代学研究中,基于此测年方法,昆仑山鸭子泉河河流阶地的研究(王军等, 2013)以及川西高原河流下切速率的研究(赵志军等, 2013)都取得了较好的研究成果。当阶地表面上没有或很少堆积物时,确定河流下切年龄最有效的方法是宇生核素测年,宇宙成因生成核素测年技术由于具有很宽的可测年范围,可以涵盖第四纪期间大部分时间段内沉积物的测年要求(Gosse and Phillip, 2001),近年来此方法也被广泛地应用于测定河流阶地基座暴露年代和上覆河流沉积物埋藏年代,解决了阶地上无覆盖物质或少量物质时阶地的测年问题(Burbank, 2002; Balco and Shuster, 2009; Rixhon et al, 2011; 潘家伟等, 2013)。当阶地表面上覆有保存完好的堆积物,这样可以通过测定堆积物的堆积年龄来推断河流下切年龄。例如黄土高原地区河流阶地一般都上覆一定厚度的黄土,对此古地磁是一种行之有效的测年方法,李吉均等运用此方法确定了兰州地区最老黄河阶地的下切年龄为 1.7 Ma(Li et al, 1999)。潘保田也运用此方法测定扣马地区最高黄河阶地的年龄至少为 1.165 Ma(Pan et al, 2005)。在上述测年方法中,目前能普遍应用到河流阶地测年的主要有 ^{14}C 测年、OSL测年、ESR测年,古地磁测年,而宇生核素测年也正在得到逐步应用。

2 发育模式研究的评述

2.1 传统河流阶地发育模式

河流阶地的发育必须具备两个阶段,即堆积阶段和下切阶段(图1a),而引起河流下切的原因主要有地面升降、气候变化和侵蚀基准面下降等。

表 1 河流阶地测年方法适用范围及其优缺点
Table 1 Application scope, advantage and disadvantage of river terrace dating methods

方法	适用范围	优点	缺点
^{14}C , ^{14}C AMS	低级阶地	测年具有很高的精度, 可达年—十年际的分辨率	测年范围一般不能超过 50 ka
TL, OSL	低级阶地	测年精度比较高, 可达 1 ka 分辨率	测年范围很难超过 150 ka
ESR	低级、高级阶地	测年范围可涵盖整个第四纪, 特别是较年老阶地	测年精度不高
宇生核素测年	低级、高级阶地	可以测定阶地的暴露年龄, 测年精度较高, 测年范围广	采样要求高, 测试费用昂贵
古地磁测年	高级阶地	可以测定阶地上覆物质的堆积年龄, 测年范围广	测年精度不高

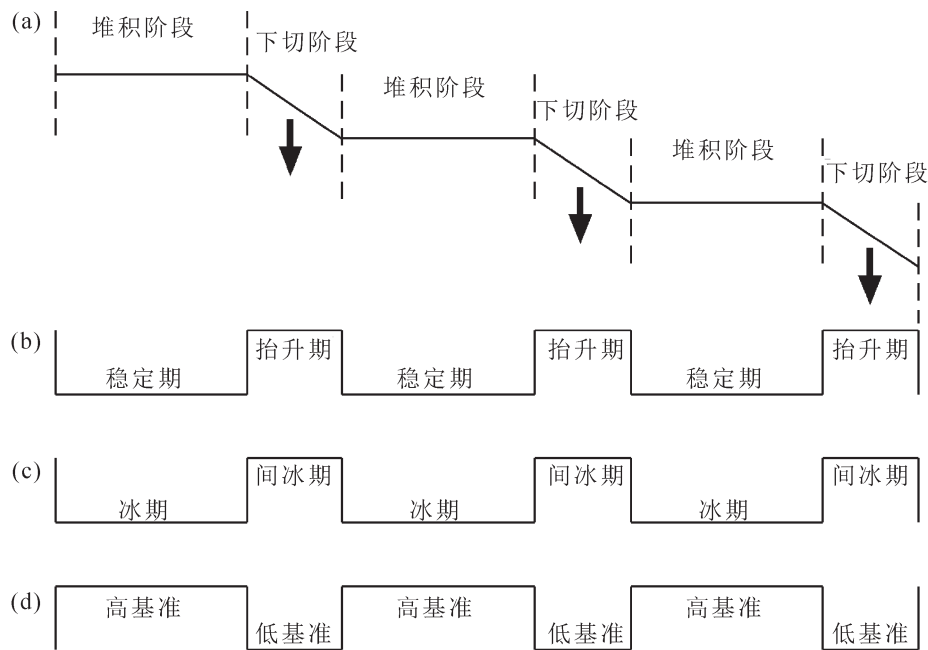


图 1 河流阶地发育模式
(a) 河流阶地发育阶段, (b) 地面上升驱动阶地发育模式, (c) 气候变化驱动阶地发育模式, (d) 基准面下降驱动阶地发育模式
Fig.1 Development model of river terrace
(a) stage of river terrace formation, (b) driven model of land uplift, (c) driven model of climate change, (d) driver model of base level fall

2.1.1 地面上升驱动阶地发育

河流阶地最易使人认为是由于地面上升引起河流下切形成的, 而沿河分布的河流阶地序列则反映了地面的间歇性上升(图 1b)。“兰州式阶地”即代表地盘稳定上升条件下阶地有规律地出现在不同高度, 蕴含着阶地与新构造运动的关系(黄汲清, 1957), 并进一步认为兰州黄河每一级阶地是一次构造抬升旋回的结果, 并由此得出青藏高原东北部更新世以来的阶段性抬升过程(Li, 1991), 同时在西宁和阿什库勒的阶地研究也表明阶地形成与构造抬升有直接关系(鹿化煜等, 2004; 潘家伟等, 2013)。渭河阶地研究亦认为, 河流阶地的形成完

全是受控于构造抬升, 是青藏高原向东扩展的结果(Sun, 2005)。伊比利亚半岛特茹河河流阶地的研究表明, 无论是气候变化还是海平面升降都不能解释该河流下切模式, 河流阶地发育是源于脉冲式的构造抬升(Cunha et al, 2008)。

2.1.2 气候变化驱动阶地发育

彭克首次将多瑙河发育的四级河流阶地与四次冰期对应起来, 认为四级河流阶地所代表的四次沉积—侵蚀旋回很可能与四次冰期—间冰期存在着极其密切的关系(Penck, 1910)。Büdel(1977)坚信冰期时河流发生沉积, 间冰期河流侵蚀下切, 冰期—间冰期气候变化与河流沉积—下切行为存

在着严格的对应关系(图1c)。与此相反,Dogan(2011)却发现齐兹立马克河在冰期发生下切,而间冰期发生堆积。可见,对于河流在何时下切,目前仍然没有形成比较一致的观点。对泰晤士河(Bridgland and Westaway, 2008)、莱茵河(Erkens et al, 2009)、盖迪兹河(Maddy et al, 2005)、密西西比河(Knox, 2006)、黄河、渭河、沙沟河与昆仑河(Pan et al, 2009; Gao et al, 2008; Pan et al, 2003; Wang et al, 2009)等河流的研究发现河流的下切和阶地的形成往往是发生在气候由冰期向间冰期的转型期。对塞纳河、约讷河、索姆河和摩泽尔河等河流的研究却发现河流下切形成阶地很可能发生在从间冰期向冰期过渡的气候转型阶段(Cordier et al, 2006; Antoine et al, 2007)。然而对索伦特河的研究又揭示了在一次冰期—间冰期旋回下可发育多级河流阶地,河流很可能在逐渐变暖和逐渐变冷的两个气候转型期都发生下切形成阶地(Vandenberghe, 2008),对波兰卡梅尼察等河谷的研究也得出了相似的结果(Olszak, 2011)。

2.1.3 基准面下降驱动阶地发育

海平面变化会驱动河流周期性的下切与堆积并形成阶地(Ballatyne and Harris, 1994)。对密西西比河的研究便认为第四纪海平面下降导致河流发生下切侵蚀并以裂点的形式向上游溯源侵蚀,进而形成阶地(Fisk, 1951)。河流沉积物的堆积被认为是间冰期海平面上升造成河流沉积所致,而河流下切则被归因于冰期时陆地冰盖的显著积累所造成的全球海平面下降(Blum and Rnqvist, 2000)(图1d)。对欧洲主要外流河的研究也证实全球海平面变化引发了靠近海岸的下游河段堆积和下切的河流行为,因而导致了相应阶地的形成(Bridgland and Westaway, 2008; Cunha et al, 2008; Demoulin and Hallot, 2009)。

2.2 传统河流阶地发育模式存在的问题

随着越来越多的学者开始接受地面上升可能是呈渐变的形式,而非幕次或者间歇性的上升(Maddy, 1997; Maddy et al, 2000; Maddy et al, 2001),河流单纯响应间歇式(或阶段性)地面上升而发育阶地的模式受到了挑战。尽管地面上升在河流阶地形成中的重要作用毋庸置疑(Bridgland et al, 2004),但是单纯从地面上升角度来解释河流阶地形成是不全面的。

第四纪期间并非只发生过四次冰期,而是存在多次冰期—间冰期旋回和千年—百年尺度的气候变化事件(Zochos et al, 2001),但是在一些地区河流在这段漫长的时间跨度里并没有或很少有河流阶地发育(Hey, 1997; Li et al, 1999)。因此,Bridgland et al(2004)认为在远离海岸的内陆地区,除了长尺度冰期—间冰期气候旋回以外,地面上升在河流阶地形成过程中可能是必不可少的。由此看来,河流对气候变化响应并发育阶地并非是一个简单的线性关系,而是相当复杂的非线性关系(Bridgland and Westaway, 2008; Vandenberghe, 2008),单纯从气候变化的角度来解释河流阶地形成也是不够充分的。

侵蚀基准面下降影响河流下切范围具有一定的局限性,在以海洋为侵蚀基准的河流中,侵蚀基准面下降所引起的河流下切仅发生在靠近海岸的下游河段,不会向上游传播很远,而且只有在大陆架相对较窄的近海岸才能引起河流明显的下切(Leopold and Bull, 1979; Takeshi et al, 2012)。而且水系规模越大对基准面变化引起的效应越有更大吸收和调整的余地,河流系统受基准面变化的影响越微乎其微(Schumm, 1993)。

可见,传统河流阶地发育模式并不能很好地解释河流阶地的形成,河流阶地的形成可能是多方面因素共同作用的结果。

2.3 构造—气候驱动阶地发育

上述传统河流阶地发育模式对于河流阶地成因的解释都存在一定的局限性,因此即便在构造活跃的山区,学者们也倾向于把河流阶地看成是气候变化和地面上升共同作用下河流响应的结果(Pan et al, 2003; Maddy et al, 2008; Wang et al, 2009)。对此,一些学者推测气候变化很可能控制着河流堆积—下切河流行为的转变(河流阶地的形成年代),而地面上升则很可能为河流持续下切提供驱动力,在河流阶地发育过程中二者同样重要(Maddy, 1997; Bridgland et al, 2004)。

根据兰州黄河阶地的研究结果(图2),枣树沟阶地和五一山阶地河漫滩相粉砂层顶(风成黄土底部)都发育了古土壤 S_8 。由于古土壤层一般反映了暖湿的间冰期环境(刘东生, 1985),那么可以推断得出上述阶地的下切(阶地的年代)是发生在冰期向间冰期的转型期,并最终形成于间冰期环境,这表明气候变化是阶地发育的重要

因素之一。同时, 枣树沟阶地和五一山阶地均为基座阶地, 基座拔河都超过 80 m, 阶地沉积学特征表明其具有典型的构造运动成因属性。因此, 我们认为枣树沟阶地和五一山阶地是构造运动和

气候变化共同作用的产物, 其中地面上升为河流下切提供了驱动力, 而气候变化则控制着河流下切的时间(河流阶地的形成年代), 构造运动和气候变化共同驱动了河流阶地的发育。

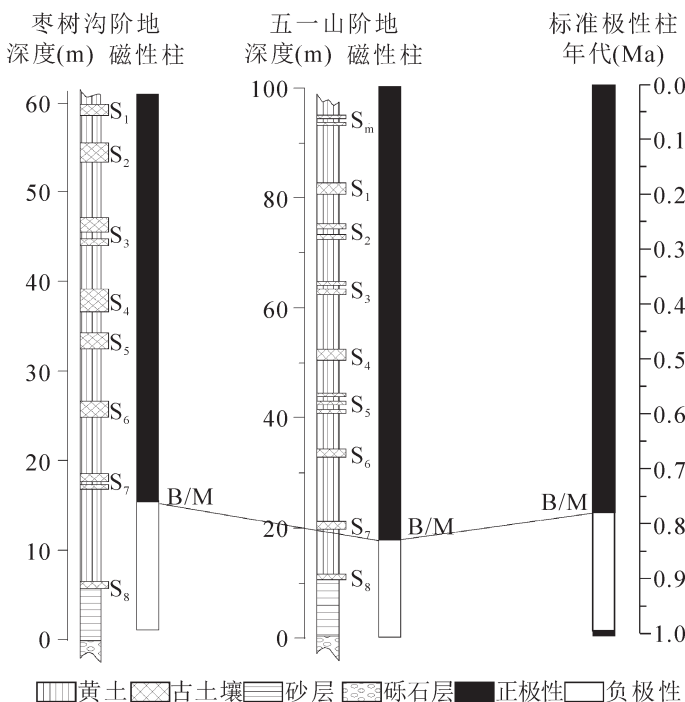


图 2 兰州枣树沟阶地和五一山阶地沉积学及年代学特征
Fig.2 Characteristics of sedimentology and chronology of Zaoshugou terrace and Wuyishan terrace in Lanzhou

3 指示水系演化研究进展

河流阶地是河流曾经古河道的所在地, 包含着丰富的古水文变迁和水系演化方面的信息, 因此研究河流阶地可以重建河流水系演化的历史。在英国, 根据对泰晤士河阶地的研究, 推断在早中更新世之交(约 870 ka), 其流域范围发生了重要改变, 泰晤士河废弃了自伦敦向北到诺福克的老河道, 而改道向东穿过艾塞克斯直接注入英吉利海峡(Maddy et al, 2000, 2001), 而欧洲大陆的莱茵河中上游地区自更新世以来经历了 4 次主要的水系格局改变, 并发育有 9 级河流阶地(Peters and Balen, 2007)。同时对黄河阶地的研究发现, 黄河上游水系是通过一级级河流袭夺相继贯通的, 其中共和盆地与贵德盆地间黄河古道始于中更新世末期, 龙羊峡河段始于 60 ka, 玛多与唐乃该间的峡谷河段是 20 ka 才得以贯通(杨达源等, 1996), 因此通过对黄河不同河段河流阶地的研究, 基本重建了黄河水系的发育历史(潘保田, 1991), 并揭示黄河东

流入海的格局最迟在 0.865 Ma 前就已形成(潘保田等, 2005)。渭河上游陇西段河流阶地的沉积特征分析及年代学研究则表明, 渭河在该地区出现的年代不晚于 0.87 Ma, 并在其后发生了 6 次水系格局的改变(潘保田等, 2007)。金沙江和川江高位阶地和低位阶地重矿物组合的研究揭示了长江上游水系的变迁, 金沙江下段以及川江在贯通前存在一些独立的水系, 当时形成的高位阶地重矿物成分有较大差异, 当金沙江下段以及川江贯通后汇流东流后, 形成现代长江上游水系, 其发育了重矿物成分比较相近的低阶地(任雪梅等, 2006), 并且金沙江水系贯通东流的时间约 0.73 Ma 前后(胥勤勉等, 2011)。而长江三峡段水系研究则比较复杂, 大体可以得出长江在此经历了 7 次水系变迁(Li et al, 2001; 杨达源, 2004; 向芳等, 2005), 并最迟于 0.8 Ma 切穿三峡东流(杨达源, 2004)。可见, 河流阶地是研究水系演化的直接证据, 如果能够应用更为精确的测年手段, 那么河流水系演化研究将

会取得更为丰富且可信的成果。

4 实验与数值模拟研究进展

河流阶地主要是由于气候变化、构造抬升等变化打破了河流平衡状态而下切形成的,因此模拟河流阶地的形成过程也是河流阶地研究的热点问题。当前河流阶地的模拟研究主要有实验模拟和计算机数值模拟。实验模拟主要是实验室水槽模拟,通过改变水槽的基准面、流沙量、来水量以及水槽高度来观察阶地的形成及河流的加积和侵蚀过程。而数值模拟主要是通过计算机重建现实系统,以建立理想状态下阶地的发育模式。自然系统非常复杂其发展需要经历很长时间,实验室模拟只能够揭示这些复杂系统的一个短期的函数关系 (Schumm et al, 1987), 而计算机模拟则可恢复长时间尺度的河流过程,迅速地成为研究者们理解地貌系统演化的重要途径。通过在模拟中输入不同的气候和构造作用的结果,就会产生特定的阶地河谷形式,所以完全可以确定气候和构造因素对河谷形成的影响 (Boll 和张祖陆, 1990)。Hancock and Anderson (2002) 基于一维河道演化模型并运用温德河的数据,揭示了第四纪气候变化所引起的流量与沉积物量变化对河流阶地形成之间的影响,其结果表明阶地的形成一般会滞后于气候变化数千年。

当在输入气候变化因子的基础上进一步输入构造抬升因子时,研究发现在不同的地面抬升背景下,河流对不同尺度的气候变化具有不同的响应 (Starkel, 2003)。当抬升速率为零时,河流沉积物能够记录气候变化信息,但是河流没有空间下切形成河流阶地;当抬升速率加大后,气候变化能够形成大量的河流阶地,河流沉积物同时能够反映出气候变化信息;当抬升速率进一步加大,河流也能够形成多级河流阶地,但是河流沉积物明显变薄,并且河流沉积物很难记录到次一级的气候变化信息 (Starkel, 2003)。Veldkamp and Vermeulen (1989) 认为当地面抬升速率达到 $0.1 \text{ m}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时,一些阶地能够很好地保存下来。因此, Veldkamp and Dijke (2000) 设置了不同的地面抬升速率背景,再输入 10 次冰期—间冰期旋回气候记录,模拟结果表明当抬升速率为 $0.02 \text{ m}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时不能形成河流阶地;当抬升速率为 $0.18 \text{ mm}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时只能形成少量的河流阶地;当抬升速率为 $0.11 \text{ m}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时,河流能够对气候变化做出全面的响应,形成多达 10 级河流阶地,

即每次气候变动导致一级河流阶地的形成。通过上述模拟研究可以得出,河流阶地的形成是在构造和气候共同作用下形成的,只有当构造抬升和气候变化达到一个合适的数值时,河流对外界的响应才最为敏感,进而形成多级的河流阶地。渭河阶地研究证实了构造抬升为河流的下切提供垂直空间,准 0.1 Ma 周期的气候变化控制着渭河阶地的发育,因此中更新世以来发育了多达 7 级河流阶地 (刘小丰等, 2010)。可见,河流阶地是在构造抬升和气候变化两种因素共同驱动下发育形成的,并且只有当构造抬升和气候变化达到一个适合的阈值,河流系统才能形成大量的河流阶地并保存下来。

5 结论与展望

综上所述,可以看出当前河流阶地研究在年代学、发育模式、指示水系演化以及数值模拟等方面都已经做了许多卓有成效的研究工作,并产生了大量的研究成果。根据对国内外河流阶地研究进展的分析,本文认为河流阶地研究未来发展的趋势将更关注以下两个方面:第一,河流阶地的精确定年仍是未来研究工作的重点。河流阶地的测年问题是河流阶地研究的重中之重,其决定着河流阶地发育模式的探讨,如果没有比较精确的年代控制,那么河流阶地发育机制探讨将失去可信度,由此可见未来研究重点之一就是进一步探索和发展河流阶地的精确定年,并将更多地应用宇生核素测年等先进测年技术于研究工作中。第二,河流阶地形成过程的模拟研究是另一个重要发展方向。当前国内外关于河流阶地的模拟研究相对比较薄弱,未来河流阶地研究将基于野外考察和实验数据,更多地开展河流阶地形成发育过程的数值模拟研究,进一步对河流阶地的影响因素进行量化。

参考文献

- Boll J, 张祖陆. 1990. 河流阶地发育的模拟 [J]. 地理译报, 9(3): 55–61. [Boll J, Zhang Z L. 1990. Simulation of river terraces development [J]. *Progress in Geography*, 9(3): 55–61.]
- 陈铁梅. 1995. 第四纪测年的进展与问题 [J]. 第四纪研究, (2): 182–191. [Chen T M. 1995. Progress and problems in Quaternary dating [J]. *Quaternary Sciences*, (2): 182–191.]

- 胡春生,潘保田,苏怀,等. 2009. 兰州盆地黄河 800 ka BP 阶地的发现及其古地磁年代 [J]. *地理科学*, 29(2): 278–282. [Hu C S, Pan B T, Su H, et al. 2009. Discovery and Paleomagnetic Dating of 800 ka BP terrace of the Yellow River in Lanzhou Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 278–282.]
- 黄汲清. 1957. 中国新构造运动的几个类型 [C]// 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社. [Huang J Q. 1957. Several types of neotectonic movement in China [C]// Record of the first neotectonic movement Forum, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press.]
- 计凤桔,郑荣章,李建平,等. 2000. 滇东、滇西地区主要河流低阶地地貌面的年代学研究 [J]. *地震地质*, 22(3): 265–276. [Ji F J, Zheng R Z, Li J P, et al. 2000. Chronological research of geomorphic surface of lower terraces along several major rivers in the East and West of Yunnan Province [J]. *Seismology and Geology*, 22(3): 265–276.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1985. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press.]
- 刘小丰,李明永,刘洪春,等. 2010. 渭河陇西段河流对构造—气候变化的响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 24(11): 68–72. [Liu X F, Li M Y, Liu H C, et al. 2010. Response of Weihe River to climatic change in Longxi zone [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24(11): 68–72.]
- 刘小凤,刘百簏. 2001. 应用“构造—气候旋回”年代学方法确定河流阶地形成年代的初步研究 [J]. *西北地震学报*, 23(4): 395–403. [Liu X F, Liu B C. 2001. A preliminary study on terraces formed ages with the chronology method of tectonic-climate circle [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 23(4): 395–403.]
- 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 [J]. *中国科学(D)*, 34(9): 855–864. [Lu H Y, An Z S, Wang X Y, et al. 2004. Geomorphic evidences of stage uplift at northeastern Qinghai-Tibetan Plateau since last 14 Ma [J]. *Science in China, Ser.D*, 34(9): 855–864.]
- 潘保田,刘小丰,高红山,等. 2007. 渭河上游陇西段河流阶地的形成时代及其成因 [J]. *自然科学进展*, 17(8): 1063–1068. [Pan B T, Liu X F, Gao H S, et al. 2007. Dating and genesis of the upper Weihe River terraces in Longxi basin, China [J]. *Progress in Natural Science*, 17(8): 1063–1068.]
- 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 [J]. *自然科学进展*, 15(6): 700–705. [Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. 2005. Terrace dating as an archive of the run-through of the Sanmen Gorges [J]. *Progress in Natural Science*, 15(6): 700–705.]
- 潘保田. 1991. 黄河发育与青藏高原隆升问题 [D]. 兰州: 兰州大学. [Pan B T. 1991. Development of the Yellow River and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 潘保田. 1994. 贵德盆地地貌演化与黄河上游发育研究 [J]. *干旱区地理*, 17(3): 43–50. [Pan B T. 1994. A study on the geomorphic evolution and development of the Upper reaches of Yellow River in Guide Basin [J]. *Arid Land Geography*, 17(3): 43–50.]
- 潘家伟,李海兵,孙知明,等. 2013. 青藏高原西北部晚第四纪以来的隆升作用——来自西昆仑阿什库勒多级河流阶地的证据 [J]. *岩石学报*, 29(6): 2199–2210. [Pan J W, Li H B, Sun Z M, et al. 2013. Late Quaternary uplift of the northwestern Tibetan Plateau: evidence from river terraces in the Ashikule area, West Kunlun Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2199–2210.]
- 潘燕兵,黎敦朋,郭芳芳,等. 2008. 克里雅河河谷地貌与塔里木盆地早—中更新世大湖环境 [J]. *地质通报*, 27(6): 814–822. [Pan Y B, Li D P, Guo F F, et al. 2008. Geomorphological features of the Keriya River valley and the early-middle Pleistocene great lake of the Tarim Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(6): 814–822.]
- 任雪梅,杨达源,韩志勇. 2006. 长江上游水系变迁的河流阶地证据 [J]. *第四纪研究*, 26(3): 413–420. [Ren X M, Yang D Y, Han Z Y. 2006. Terrace evidence of river system change in the upper reaches of Changjiang River [J]. *Quaternary Sciences*, 26(3): 413–420.]
- 王军,孙新春,潘保田,等. 2013. 鸭子泉河阶地的发育年代及其意义 [J]. *干旱区资源与环境*, 27(12): 106–111. [Wang J, Sun X C, Pan B T, et al. 2013. The significance of the Yaziquan River terraces development, North flank of the Kunlun Mountain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(12): 106–111.]
- 向芳,朱利东,王成善,等. 2005. 长江三峡阶地的年代

- 对比法及其意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 32: 162–166. [Xiang F, Zhu L D, Wang C S, et al. 2005. Terrace age correlation and its significance in research of Yangtze Three Gorges, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32: 162–166.]
- 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 2006. 济州岛西南泥质区近2300 a来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 36(7): 654–662. [Xiang R, Yang Z S, Saito Y, et al. 2006. Recent 2300 a records of the East Winter Monsoon from the grain-size component in the mud area Southwest off Cheju Islan, ECS [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(7): 654–662.]
- 胥勤勉, 杨达源, 葛兆帅. 2011. 金沙江雅砻江河口—金坪子河段贯通过程[J]. *地质力学学报*, 17(2): 185–199. [Xu Q M, Yang D Y, Ge Z S. 2011. Run-through along the estuary of the Yalong River-Jingpingzi reach of the Jinsha River [J]. *Journal of Geomechanics*, 17(2): 185–199.]
- 杨达源. 2004. 长江研究[M]. 南京: 河海大学出版社. [Yang D Y. 2004. Study of the changjiang river [M]. Nanjing: Hohai university press.]
- 杨达源, 吴胜光, 王云飞. 1996. 黄河上游的阶地与水系变迁[J]. *地理科学*, 16(2): 137–143. [Yang D Y, Wu S G, Wang Y F. 1996. On river terraces of the upper reaches of the Huanghe river and change of the river system [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 16(2): 137–143.]
- 杨景春, 李有利. 2001. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社. [Yang J C, Li Y L. 2001. Principle of geomorphology [M]. Beijing: Peking University Press.]
- 赵志军, 刘勇, 陈晔, 等. 2013. 基于ESR年代的川西高原河流下切速率[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 49(2): 160–165, 172. [Zhao Z J, Liu Y, Chen Y, et al. 2013. Quaternary fluvial incision rates of the Western Sichuan Plateau inferred from ESR chronology [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 49(2): 160–165, 172.]
- 郑公望, 朱忠礼, 任秀生, 等. 2000. 释光方法在地学研究中的应用[J]. *福建地理*, 15(3): 33–52. [Zheng G W, Zhu Z L, Ren X S, et al. 2000. Application of luminescence method on geological study [J]. *Fujian Geography*, 15(3): 33–52.]
- Antoine P, Lozouet L N, Chausse C, et al. 2007. Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme): synthesis, and new results from interglacial deposits [J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(22–24): 2701–2723.
- Astrade L, Jacob-Rousseau N, Bravard J, et al. 2011. Detailed chronology of mid-altitude fluvial system response to changing climate and societies at the end of the Little Age (Southwest Alps and Cevennes, France) [J]. *Geomorphology*, 133(1–2): 100–116.
- Balco G, Shuster L D. 2009. ^{26}Al - ^{10}Be - ^{21}Ne burial dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(3–4): 570–575.
- Ballantyne C K, Harris C. 1994. The Periglaciation of Great Britain [J]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bates M R. 1994. Quaternary aminostratigraphy in northwestern France [J]. *Quaternary Science Reviews*, 12(9): 793–809.
- Blum M, T Rnqvist T. 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward [J]. *Sedimentology*, 47(S1): 2–48.
- Bridgland R D, Maddy D, Bates M. 2004. River terrace sequences: templates for Quaternary geochronology and marine-terrestrial correlation [J]. *Journal of Quaternary Science*, 19(2): 203–218.
- Bridgland R D, Westaway R. 2008. Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon [J]. *Geomorphology*, 98(3–4): 285–315.
- Büdel J. 1977. Klima-Geomorphologie [M]. Berlin: Gebrüder Bomtrager.
- Bull B W. 1990. Stream-terrace genesis: implications for soil development [J]. *Geomorphology*, 3(3–4): 351–367.
- Burbank D W. 2002. Rates of erosion and their implications for exhumation [J]. *Mineralogical Magazine*, 66(1): 25–52.
- Cohen M K, Stouthamer E, Berendsen A J H. 2002. Fluvial deposits as a record for Late Quaternary neotectonic activity in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands [J]. *Netherlands Journal of Geosciences*, 81(3–4): 389–405.
- Cordier S, Harmand D, Frechen M, et al. 2006. Fluvial system response to Middle and Upper Pleistocene climate change in the Meurthe and Moselle valleys (Eastern Paris Basin and Rhenish Massif) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 25(13–14): 1460–1474.
- Cunha P P, Martins A A, Huot S, et al. 2008. Dating the Tejo river lower terraces in the Rodao area (Portugal) to assess the role of tectonics and uplift [J]. *Geomorphology*, 102(1): 43–54.
- Demoulin A, Hallot E. 2009. Shape and amount of the Quaternary uplift of the western Rhenish shield and the

- Ardennes (western Europe) [J]. *Tectonophysics*, 474(3–4): 696–708.
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2002. Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography*, 17(3): 501–521.
- Dogan U. 2011. Climate-controlled river terrace formation in the Kizilirmak Valley, Cappadocia section, Turkey: Inferred from Ar-Ar dating of Quaternary basalts and terraces stratigraphy [J]. *Geomorphology*, 126(1–2): 66–81.
- Erkens G, Dambeck R, Volleberg P K, et al. 2009. Fluvial terrace formation in the northern Upper Rhine Graben during the last 20000 years as a result of allogenic controls and autogenic evolution [J]. *Geomorphology*, 103(3): 476–495.
- Erkens G, Hoffmann T, Gerlach R, et al. 2011. Complex fluvial response to Lateglacial and Holocene allogenic forcing in the Lower Rhine Valley (Germany) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(5–6): 611–627.
- Fisk H N. 1951. Loess and Quaternary geology of the Lower Mississippi Valley [J]. *Journal of Geology*, 59: 333–356.
- Gao H S, Liu X F, Pan B T, et al. 2008. Stream response to Quaternary tectonic and climatic change: Evidence from the upper Weihe River, central China [J]. *Quaternary International*, 186(1): 123–131.
- Gob R, Petit F, Bravard P J, et al. 2003. Lichenometric application to historical and subrecent dynamics and sediment transport of a Corsican stream (Figarella River—France) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2111–2124.
- Gosse C J, Phillip M F. 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclide: theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 20(14): 1475–1560.
- Guo Y J, Zhang J F, Qiu W L, et al. 2012. Luminescence dating of the Yellow River terraces in the Houkou area, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 129–135.
- Hancock G S, Anderson R S. 2002. Numerical modeling of fluvial strath-terrace formation in response to oscillating climate [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(9): 1131–1142.
- Hey R W. 1997. The lower Wye valley: geomorphology and Pleistocene geology [M]// Lewins S G, Maddy D. The Quaternary of the South Midlands and the Welsh Marches. Field Guide, Quaternary Research Association, London, 61–62.
- Innes J L. 2006. Lichenometric dating of debris flow deposits in the Scottish Highlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8(6): 579–588.
- Knox J C. 2006. Floodplain sedimentation in the Upper Mississippi Valley: natural versus human accelerated [J]. *Geomorphology*, 79(3–4): 286–310.
- Leopold L B, Bull W B. 1979. Base level, aggradation and grade [J]. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 123(3): 168–202.
- Li J J, Xie S Y, Kuang M S. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation [J]. *Geomorphology*, 41: 125–135.
- Li J J. 1991. The environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 10(6): 479–483.
- Li J J, Zhang B, Zhu J J, et al. 1999. Magneto-and pedostratigraphy of paleosol-loess sequences in the Lanzhou Basin: evidence for evolution of Huang He [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(S1): 119–128.
- Maddy D, Bridgland R D, Green P C. 2000. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace records [J]. *Geomorphology*, 33(3–4): 167–181.
- Maddy D, Bridgland R D, Westaway R. 2001. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK [J]. *Quaternary International*, 79(1): 23–36.
- Maddy D, Demir T, Bridgland R D, et al. 2005. An obliquity-controlled Early Pleistocene river terrace record from Western Turkey? [J]. *Quaternary Research*, 63(3): 339–346.
- Maddy D, Demir T, Bridgland R D, et al. 2008. The Early Pleistocene development of the Gediz River, Western Turkey: An uplift-driven, climate-controlled system? [J]. *Quaternary International*, 189(1): 115–128.
- Maddy D. 1997. Uplift-driven valley incision and river terrace formation in southern England [J]. *Journal of Quaternary Science*, 12(6): 539–545.
- Nicholas J W, Butler D R. 1996. Application of relative-age dating technique on rock glaciers of the La Sal Mountains, Utah: an interpretation of Holocene palaeoclimates [J]. *Geography Annual*, 78: 1–18.

- Olszak J. 2011. Evolution of fluvial terrace in response to climate change and tectonic uplift during the Pleistocene: Evidence from Kamienica and Ochotnica River valleys (Polish Outer Carpathians) [J]. *Geomorphology*, 129(1–2): 71–78.
- Pan B T, Burbank D R, Wang Y, et al. 2003. A 900 ka record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China [J]. *Geology*, 31(11): 957–960.
- 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 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 28(27–28): 3281–3290.
- Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. 2005. Terrace dating as an archive of the run-through of the Sanmen Gorge [J]. *Progress in Natural Science*, 15(12): 1096–1103.
- Penck A. 1910. Versuch einer Klimaklassifikation auf Physiographische Grundlage, Preussische Akademie der Wissenschaften [J]. *Sitz der Phys Math, Kl*, 12: 236–246.
- Peters G, Van Balen R T. 2007. Pleistocene tectonics inferred from fluvial terraces of the northern Upper Rhine Graben, Germany [J]. *Tectonophysics*, 430(1–4): 41–65.
- Rixhon G, Braucher R, Bourles D, et al. 2011. Quaternary river incision in NE Ardennes (Belgium)-Insights from $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ dating of river terraces [J]. *Quaternary Geochronology*, 6(2): 273–284.
- Schumm S A, Dumont J F, Holbrook J M. 2000. Active Tectonics and Alluvial Rivers [M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Schumm S A, Mosley M P, Weaver W E. 1987. Experimental fluvial geomorphology [M]. New York: John Wiley.
- Schumm S A. 1993. River response to baselevel change: implications for sequence stratigraphy [J]. *Journal of Geology*, 101: 279–294.
- Scott M E, Bryant C, Carmi I, et al. 2004. Precision and accuracy in applied ^{14}C dating: some findings from the Fourth International Radiocarbon Inter-comparison [J]. *Journal of Archaeological Science*, 31(9): 1209–1213.
- Starkel L. 2003. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2189–2198.
- Stokes S. 1999. Luminescence dating applications in geomorphological research [J]. *Geomorphology*, 29(1–2): 153–171.
- 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 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 24(10): 1279–1286.
- Takeshi I, Toshihiko S, Shoichi H. 2012. Fluvial response to sea-level changes since the latest Pleistocene in the near-coastal lowland, central Kanto Plain, Japan [J]. *Geomorphology*, 147–148: 49–61.
- Vandenberghe J. 2008. The fluvial cycle at cold-warm-cold transitions in low land regions: A refinement of theory [J]. *Geomorphology*, 98(3–4): 275–284.
- Veldkamp A, van Dijke J. 2000. Simulating internal and external controls on fluvial terrace stratigraphy: a qualitative comparison with the Maas record [J]. *Geomorphology*, 33(3–4): 225–236.
- Veldkamp A, Vermeulen S E. 1989. River terrace formation, modeling, and 3D graphical simulation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 641–654.
- Wang A, Smith A J, Wang G, et al. 2009. Late Quaternary river terrace sequences in the eastern Kunlun Range, northern Tibet: A combined record of climatic change and surface uplift [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 34(4): 532–543.
- Wang P, Jiang 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 [J]. *Quaternary Geochronology*, 5(2–3): 181–186.
- Wegmann W K, Pazzaglia J F. 2009. Late Quaternary fluvial terraces of the Romagna and Marche Apennines, Italy: Climatic, lithologic, and tectonic controls on terrace genesis in an active orogen [J]. *Quaternary Science Reviews*, 28(1–2): 137–165.
- Westaway R, Bridgland R D, Sinha R, Demir T. 2009. Fluvial sequences as evidence for landscape and climatic evolution in the Late Cenozoic: A synthesis of data from IGCP 518 [J]. *Global and Planetary Change*, 68(4): 237–253.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 292(5517): 686–693.