

文章编号: 1009-3850(2001)02-0001-15

构造事件的沉积响应

—建立青藏高原大陆碰撞、隆升过程时空坐标的设想和方法

伊海生, 王成善, 李亚林, 林金辉, 侯明才

(成都理工学院 沉积地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要: 沉积盆地的地层形态、岩相类型以及空间配置样式是构造事件的重要标识。沉积序列中特征岩石组分的出现标志着毗邻造山带隆升的初始启动时间, 与物源区地层单元垂向叠置序列相反或相同的岩屑组剖面分布则是幕式构造旋回的反映。在前陆盆地中砾石层的出现被认为是冲断岩席活动的记录, 而在断陷盆地和走滑拉分盆地中通常可识别出 100m 级的向上变粗和向上变细的旋回层, 它们被解释为构造高地重复隆升和溯源侵蚀的结果。最近的研究工作表明, 急剧的构造沉降主要是通过细粒级河湖相沉积补偿的, 广泛的砾岩进积发生在构造活动的平静期。构造驱动的山脉隆升表现为砾岩地层呈楔状体, 纵向河流水系发育; 重力均衡回返所导致的山系隆升则形成以横向河流水系为主的板状砾岩沉积。从青藏高原腹地、周缘和外延海洋盆地的沉积记录中可获取重大构造变革时期的信息, 也许是解决目前有关印度与亚洲大陆碰撞、高原隆升等时性或穿时性以及限定陆内变形调节机制的一个重要手段。

关键词: 构造事件; 沉积响应; 青藏高原; 大陆碰撞; 隆升过程

中图分类号: P 542

文献标识码: A

Sedimentary response to tectonic events: Reconstructed spatio-temporal scale of the Indo-Asian continental collision and Qinghai-Xizang Plateau uplift

YIN Hai-sheng, WANG Cheng-shan, LI Ya-lin, LIN Jin-hui, HOU Ming-cai

(*Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

收稿日期: 2001-01-19

Abstract: The stratal geometries and lithofacies patterns in sedimentary basins are thought to be potentially important sedimentary indicators of tectonic events and record the uplift history of the areas around orogenic belts or along active basin margins. The first occurrence of new clast types in the depositional sequences has been used to mark initial uplift. The normal or reverse distribution of clasts throughout a vertical section corresponding to a specific source may be expressed as episodic tectonism. The ages of conglomerate intervals in foreland basins are generally believed to represent the time of thrust sheet activity. Alternative coarsening- or fining-upward cyclothems 100 m thick in extensional basins are usually interpreted to be rejuvenated tectonic uplift and retrograded headward erosion. Recent research shows that the onset of fine-grained fluvial and lacustrine deposition is more consistent with rapid subsidence in rift, pull-apart and foreland basins. The coarse-grained beds within the basins record postorogenic denudation and progradation of gravel wedges during intervals of tectonic quiescence. If tectonic loading due to crustal compression and thickening drives both the uplift of the mountain summits and asymmetric subsidence, a wedge of sedimentary rocks thickens toward the mountain front and longitudinal river systems are dominant. When erosion unloading causes isostatic uplift of remaining peaks, a tabular depositional geometry of conglomerate strata in cross sections and transverse drainage patterns perpendicular to mountains are present. According to the theory of sedimentary response to tectonic events, we propose here that Cenozoic sedimentary basins on and around the Qinghai-Xizang Plateau may provide significant evidences of tectonic changes in different spatio-temporal scales. It may be an important approach to test and constrain present dispute in regard to initio Indo-Asian continental collision, synchronism and diachronism of the Qinghai-Xizang Plateau rising and growth, as well as deformation accommodation styles.

Key words: tectonic event; sedimentary response; Qinghai-Xizang Plateau; continental collision; uplifting

新生代以来的印度板块与欧亚板块碰撞,形成了当今世界上海拔最高和最年青的青藏高原,它是我们这个星球过去 100Ma 以来最伟大的事件^[1]。它使亚洲的海陆分布和地形地势发生了巨大的变化,对邻区、北半球乃至全球的气候产生了深刻的影响。有关大陆碰撞初始时限、高原隆升的启动时间、增生过程以及岩圈结构、巨厚地壳形成的深部动力学调节机制仍然没有取得一致的意见^[2,3],因此,寻求能标定重大地质事件等时性和穿时性并进行洲际对比的地质记录是一个重要环节。

笔者注意到,青藏高原及毗邻地区分布有一系列新生代陆相盆地群,它们展现出丰富多彩的沉积样式,是青藏高原在我国境内的一大地域特色。这些盆地形成的发展与大陆和海洋的重大地质事件相联系,又是青藏高原从海到陆并上升为“世界屋脊”的垂直运动在特定

地区的历史档案。因此,通过青藏高原新生代沉积盆地中标志不同时间尺度的沉积记录,识别地质事件的诊断性标志以及波动幅度和频率,即构造事件的沉积响应,可以为建立大陆碰撞、高原隆升的时空坐标提供一种新的途径。

为使这一研究构思变成切实可行的研究方案,务需有一种能够统领全局的理论指导,本文重点论述幕式构造旋回的沉积响应及判别标识,并参考典范地区的实例及近年来我们对可可西里盆地、囊谦盆地、滇西和羌塘盆地等小型陆相盆地探索和实践予以综合评述。文中不当之外,敬请指正。

1 构造事件的沉积标识及控制因素

1.1 砾岩沉积

将粗粒沉积物的出现作为构造活动标志的设想可追溯到19世纪Playfair(1802)对砾石沉积与地形高差关系的记述。有关盆地中粗粒沉积与幕式构造隆升相关性的描述最早见于Barrell(1917),他借鉴了Davis(1899)地貌旋回的理论解释构造旋回层的成因。美国西部落基山前陆盆地和喜马拉雅山前陆西瓦里克盆地是利用砾岩沉积时间确定造山带隆升启动时间和过程的典型范例^[4]。然而,将前陆盆地中砾石进积作为冲断活动的标识这一传统解释也受到挑战。Jordan(1988)^[5]认为,标定幕式冲断运动的时间序列需要精细的地层定年数据,而且砾岩相的进积可能是穿时的。Beck(1985)发现美国西部落基山山前的一些前陆盆地,除了紧邻冲断带前峰地带见有砾岩堆积,前陆盆地近端地区主要由细粒沉积组成,砾石进积滞后于构造活动时间,它出现在构造沉降和冲断事件减弱或停止阶段。Burbank(1988)^[6]根据巴基斯坦北部西瓦里克前陆盆地资料证实砾岩进积与喜马拉雅逆冲事件启动时间是一致的。在时间跨度为1.5Ma的冲断事件中,砾岩进积的距离达到70km,在冲断活动开始之后的3Ma间,砾岩向盆地推进110km。Burbank的解释是,冲断构造活动期或平静期沉积物侵蚀和搬运速率、冲断活动强度和沉降速率的相对大小控制着砾岩地层的几何形态。西瓦里克盆地具有极高的侵蚀的沉积物被古河流搬运进入前陆区,沉积物输入量超过它的容纳量,有相当的沉积物向盆外搬运,因而,冲断事件伴随着广泛的砾岩进积。而落基山侵蚀速率低,前陆盆地是欠补偿的或者是饥饿型盆地。

在断陷盆地和拉分盆地中,陆源碎屑大小和分布一般用构造隆升产生地形高差给予解释,现代实例如美国西部盆岭地区、东非裂谷盆地、死海裂谷。这些盆地通常呈狭长的形态,宽度为15~100km不等,长度可达数百公里。它们一般呈半地堑出现,构造上位于断块区,盆地两侧构造沉降的幅度明显不同。冲积扇通常位于高角度断裂控制的盆地边缘一侧,横向峡谷水道垂直于盆地长轴出现。其分布局限于断层控制的盆地边缘,从断层向外延伸的长度一般小于15km。河流沉积一般呈纵向水系,平行盆地边缘。湖泊发育在地形低地,呈长条形,平行于盆地长轴。

冲积扇出现在毗邻盆地边的构造隆升期,盆地相对沉降产生了地形高差,而物源区侵蚀、高差降低时细粒级的陆源物质叠覆在冲积扇之上。但是,在现代诸多的构造活动盆地中,如死谷盆地,河湖环境紧临构造断层崖,垂直高差达数千米。这说明在拉张盆地中构造沉降的沉积响应更复杂,而不能简单地认为粗粒沉积就是构造高差最大的时期。Blair和

Bilodeau(1988)^[7]进而提出,构造旋回层中细粒部分沉积与构造启动的时限可能更一致,河流和湖泊环境比冲积扇或冲积平原更快速的反映构造沉降。这是因为旋回层中细粒沉积周期性的出现在盆地活动边缘,垂向上海相、湖泊或纵向河流环境与横向辫状河平原或冲积扇交互更替,旋回周期近乎相等。如果认为细粒沉积是构造平静期堆积的,则这种解释要求的沉积盆地中最高地形面——冲积扇或辫状河平原沉积面之上的湖平面或海平面再上升数百米以容纳细粒沉积,这种地貌景观的出现是不可能的。因此,构造旋回层中从辫状河平原到湖泊、海洋或河流沉积的岩相变化所代表的沉积地形变迁的合理解释是,盆地边缘或冲积平原的构造沉降产生了地形低地。事实上许多古代盆地中残留有地貌高地,可以证实即使是在构造平静阶段也有一定的地形高差存在,它也可以产生粗粒沉积。最后,如果进入盆地的粗粒沉积伴随着物源区构造隆升,那么就意味着剥蚀速率应与构造隆升速率同步或更快。有资料表明,现代造山带平均隆升速率比剥蚀速率高达8倍,最高可达117倍。构造隆升速率远远大于侵蚀速率(沉积速率)以及毗邻盆地边缘沉积场所的构造加深无疑地严格限制了粗粒沉积向外进积,只有当盆地沉降急剧减小或停止时,物源区的侵蚀速率才能超过沉降速率,产生广泛分布的进积型砾岩楔状体。

盆缘断裂一侧出现湖泊、河流和海洋环境而缺失冲积平原的现代盆地并不罕见,著名的加利福尼亚死谷(Death Valley)、深泉谷(Deep Springs Valley)、红海和苏伊士湾就是实例。Blair和Bilodeau认为水文条件是控制沉积作用的一个重要因素。冲积扇沉积形成于一个特殊的背景,它需要在一个小型汇水区存在频度低但强度大的降雨来搬运粗粒沉积物。由于这种沉积事件持续时间短,无论构造高差有多大,则粗粒沉积总是少量的。河流沉积主要是来自汇水区流水携带的细粒级沉积的响应更快。湖泊相也比冲积扇能更快的开始沉积,因为湖泊主要是通过轴向河流或泉水的补给。Diguiseppi和Bartley(1991)^[8]考察了美国内华达州东南部盆岭地区新生代伸展型半地堑盆地,他们认为从此内流水系和外流水系的转换是控制伸展盆地地层格局的关键因素。在干旱地区,断陷盆地边缘的正断层延伸距离短,一般在50km以内,断距最大的部位在断层中间一段。这使盆地中部构造沉降最大,从而形成封闭的内流水系,因此,与断裂活动同时形成的是细粒的湖泊沉积,残存有断层崖的盆地几乎都是内流盆地。盆地冲填和主干河流的溯源侵蚀使内流水系并入外流水系,由于基准面下降出现广泛的冲积相粗粒沉积,冲积平原和河流阶地砾石层位于湖相地层之上,底部发育侵蚀面。

1.2 沉积旋回

陆相沉积盆地,包括断陷盆地、拉分盆地和前陆盆地三种类型,通常是由厚度几百米到上千米的旋回性沉积(cyclic sedimentation)组成,旋回层序中细粒的海相、湖泊沉积与砂质纵向河流沉积和砾石级的横向辫状河平原或冲积扇沉积在垂向地层序列中交替出现。根据以发表的现代实例和古代沉积盆地的研究资料,在几乎所有陆相盆地地层剖面中,从米级到千米级尺度上,一般都可以识别出向上变粗变厚或者向上变细变薄的两类层序。Steel(1977, 1975)^[9, 10]首先在挪威Homelen盆地和苏格兰North Minch盆地研究中引用沉积旋回(cycle)或旋回层(cyclothem)来描述巨厚的旋回,由一系列冲积扇体叠置而成;二级旋回为100m级扇旋回或称为旋回层,一个扇体由扇头沟水道砾岩,扇中碎屑流,扇面河道砾岩和扇端片

泛沉积组成, 扇体厚度为 50 ~ 80m, 最大厚度为 100 ~ 200m, 扇体直径为 1 ~ 5km, 一般具有向上变粗变厚的层序结构; 三级旋回厚度为 10 ~ 25m, 一般是扇体的次积单元, 每一个单元亦具有向上变粗变厚的沉积序列; 四级旋回单元是单个岩性层, 它们是碎屑流、泥石流和河流沉积的。Stell 认为 10 ~ 25m 厚度且向上变粗的三级层序是盆地底部构造沉降产生的沉积响应的基本单元, 它与周期性基准面的波动幅度相当, 6 ~ 10 个三级旋回构成一个旋回层。典型的 100m 级旋回或旋回层同时出现在盆地边缘冲积扇以及与其对应的中部、远端纵向河和湖泊相地层层序中, 它代表基准面下降幅度的累积, 沉降中心的递次迁移形成了内部不对称的垂向结构。Heward(1978) 对已发表的有关古代冲积扇和水上扇垂向层序的资料进行了评述, 他认为陆相盆地中一般可划分为三个等级的沉积序列: 层序(sequence)是最小的描述性沉积单元, 厚度为厘米级到 10m 级, 由单层或一系列相关层组成; 巨层序或大层序(megasequence)厚度为 10m 级到 100m 级, 由相关层和层序叠加而成; 最高一级为盆地的充填层序, 厚度为 100m 级到 1000m 级, 由层序和巨层序叠加而成。Heward(1988) 认为, 冲积扇是在具有高地和低地毗邻的地形背景下形成的, 它从山前延伸到谷底或低地边界, 距离大约为 5 ~ 20km。现代扇常与断层崖伴生, 断层为其提供初始地形。如果冲积扇发育只依赖于初始断层崖形成侵蚀地形, 则仅能形成分布有限的、粒度变细的薄层冲积扇层序; 如果断层连续运动, 那么就会形成地理上分布广、厚度巨大的冲积扇, 即层序和大层序多次叠加而产生盆地充填层序。源区地形降低、断层崖后退或盆缘断裂活动减弱形成巨厚的向上变细的大层序, 而断裂活动增强和扇叶状体的推进可形成向上变粗的巨层序。

一般认为断陷盆地、拉分盆地和前陆盆地中 100m 级到 1000m 级尺度的旋回层是构造成因或者受气候变化控制。向上变粗的层序记录构造隆升的时间和冲积扇的进积, 而向上变细的层序则由构造平静期溯源侵蚀产生, 物源区后退的结果造成远端细粒沉积依次叠置在近端粗粒沉积之上, 10m 级小级别的旋回受自旋回沉积机制的控制(图 1)。关于天文因素驱动沉积旋回的解释尚有争议, 例如 Heller(1988) 和 Sadler(1993)^[11, 12] 认为爱尔兰泥盆系陆相地层中 160 ~ 180m 厚度的沉积旋回是周期为 412ka 轨道偏心率波动的响应, 而厚度为 700m 的大旋回反映长周期盆地沉降。Tiercelin 发现, 埃塞俄比亚的 Afar 裂谷中 300m 厚的湖泊和河流沉积位于冲积扇之上, 而肯尼亚 Gregory 裂谷则与之相反, 下部可见 325m 厚的湖泊和河流沉积, 其上覆冲积扇砾岩, 两个盆地充填层序的沉积时限为距今 4.0Ma。4.0Ma 以来东非裂谷地区发生了剧裂的气候变化, 但同一气候区的两个盆地却可以形成相反的岩相序列, 这似乎又说明气候因素并非是裂谷盆地沉积层序中发育河湖相与冲积扇旋回的主要因素。同时, 有证据表明旋回层延续时间一般为 2.4 ~ 15Ma, 它与轨道参数波动所产生的气候旋回 23 ~ 400ka 周期相比要高 6 ~ 650 倍。可以认为气候变化主要体现在侵蚀速率或沉积速率的波动, 它与构造隆升/沉降速率之间的平衡或偏移决定着地层叠置样式和沉积体系的空间构型, 而旋回层的时空尺度以及受盆地边缘构造活动限制的特征主要与幕式构造活动有关。

2 构造事件的启动时间

2.1 初始隆升

造山带隆升的相对和绝对时间常常是通过对盆地地层记录的解释来确定的, Wiltschko

和 Dorr(1983)^[13] 详细论述了通过沉积响应来确定构造事件时限的方法, Heller(1986)^[14] 通过白垩纪 Green River 盆地砾岩对美国著名的 Sevier 造山带初始逆冲推覆事件的精确定年就是一个实例。Armstrong 和 Oriol(1965)^[15] 指出, 物源区来自冲断边界的砾岩相是构造逆冲事件的标志, 当冲断构造运动出现时, 前陆盆地中具有物源区的不同岩石类型的砂岩成分可以立即记录这种变化, 特别重要的是, 由冲断带提供的沉积物中那些首次出现的特殊岩石组分代表造山带初始隆升的时间。

孟加拉扇是世界上最大的海底扇, 它的沉积物主要来自喜马拉雅山, 根据 ODP 计划在印度中部孟加拉扇采集样品的重矿物组合分析及物源区对比, Amano 和 Taira(1992)^[16] 证实孟加拉扇矿物组合反映自 17Ma 以来喜马拉雅山有两个阶段的隆升。孟加拉扇远端的细砂级沉积物中重矿物组分可分为 6 个组合带(图 2), 根据 ODP 计划在印度洋中部孟加拉扇采集样品的重矿物组合分析及物

源区对比, 沉积时限为 7.1~15.2Ma 的最下部地层是粉砂、砂质浊流沉积, 矿物组合中白云石、钙质角闪石稀少, 轻矿物组分以石英为主, 钙质斜长石少见, 其它重矿物组分有锆石、氧化铁、石榴子石、钛铁矿、电气石、绿帘石等。它们来自以白云岩出现为特征的沉积岩区, 可与特提斯喜马拉雅和小喜马拉雅对比。沉积时段为 15.2~10.9Ma, 以及 10.9~7.5Ma 地层单元中蓝到绿褐色的角闪石矿物来自高喜马拉雅, 钙质角闪石的出现是高喜马拉雅标志性矿物, 来源于高喜马拉雅角闪岩和片麻岩。它的始现面在 15.2Ma, 而在 10.9Ma 突然消失, 反映高喜马拉雅初始隆升的高峰在 10.9~7.5Ma 之间。从 7.5 至 6.5Ma, 来自高喜马拉雅的组分急剧减少, 这是由于高喜马拉雅侵蚀导致高差降低, 物源区收缩、变小。6.5 至 0.9Ma 时段的地层包括两个地区的混合沉积, 其中之一的物源来自高喜马拉雅, 另一个来自印度次大陆和斯里兰卡。0.9Ma 之后, 又出现来自高喜马拉雅侵蚀的沉积组分, 即第二次隆升出现在 0.9Ma 之后。

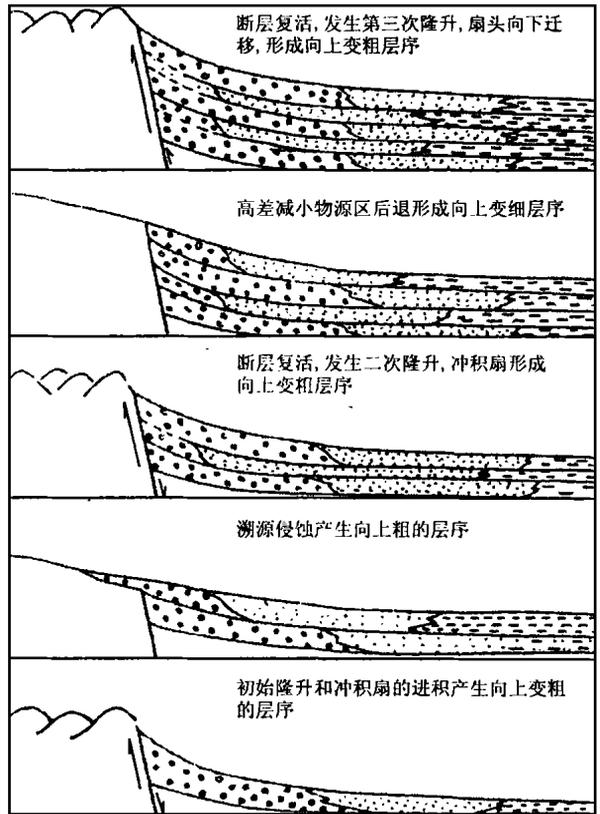


图 1 向上变粗和向上变细层回层的构造成因图解
Fig. 1 Tectonic genesis of coarsening- and fining-upward cyclothem

2.2 幕式隆升

当构造活动驱动造山带隆升时, 陆源区垂向叠置地层的岩石类型先后进入搬运系统, 盆地沉积地层中由下向上依次出现新的岩屑类型。随着侵蚀下切过程的进行, 沉积地层系统中最终出现与物源区地层序列垂向配置相反的岩屑类型分布。Colombo(1994)^[17]将物源区地层序列的反转称之为正向剥蚀层序(normal unroofing sequence), 这时沉积单元中碎屑的分布表现为老地层碎屑位于新地层之上(图3)。当断裂构造向盆地方向迁移时, 即隆升前缘扩大到盆地边缘, 初始沉积被侵蚀并成为新的物源供应区, 而初始沉积地层再旋回使原始的正向剥蚀层序反转, 在二次旋回的沉积单元中产生反向

剥蚀层序(reverse unroofing sequence), 这时碎屑成分的垂向分布则是一个与原始蚀源区地层序列相似的正向剖面序列。如果盆地前缘多次隆升, 在盆地充填地层中将出现碎屑成分分布的正向和反向序列的交替。同时, 当断层向盆地方向递进时, 蚀源区扩大, 不同时代地层的碎屑进入搬运系统, 隆升前缘供应盆地的碎屑组分不仅包括初始隆升物源区地层序列, 而且也含有先沉积层序的碎屑组分, 再搬运过程将会出现碎屑组分的进一步混合, 剥蚀层序的信号逐渐减弱。

正向侵蚀层序代表盆缘断层的初始活动时间, 而反向侵蚀层序则是新生断层出现的标识。因此, 多级次的碎屑成分正、反剖面的出现是幕式隆升的标志, 它反映断块隆升或冲断事件从山前向盆地中心方向的推进。详细标定垂向地层序列中碎屑组分的变化可以解释断层活动的时间和速率, 以及断层前缘迁移的时间序列^[18]。

Colombo 在西班牙 Ebro 盆地鉴别出四个正向和反向的侵蚀层序(图4, 5)。它的物源区位于东南侧 Catalan 海岸山脉, 盆地充填第三系冲积扇、河流相及湖泊沉积。渐新世 Serra de La Llana 砾岩是由厚达 1600m 的冲积扇相组成, 砾岩沉积由四个向上变厚并变粗的巨层序叠置而成。根据砾石成分的统计数据, 下部巨层序 M₁ 主要由晚白垩世土伦期—赛诺曼期的碎屑构成。它的上部含有巴列姆期地层的碎屑; 巨层序 M₂ 的局部碎屑成分与 M₁ 类似, 但上部则主要是古生代和三叠纪的碎屑成分, 底部薄层砾岩中局部出现古生代, 中生代和新生代碎屑成分的混合堆积; 巨厚层序 M₃ 下部含有丰富的古生代碎屑, 向上渐变为晚白垩世的砾石; 巨层序 M₄ 的砾石成分是下伏 M₁, M₂ 和 M₃ 的混合。Serra de La Llana 砾岩巨层序

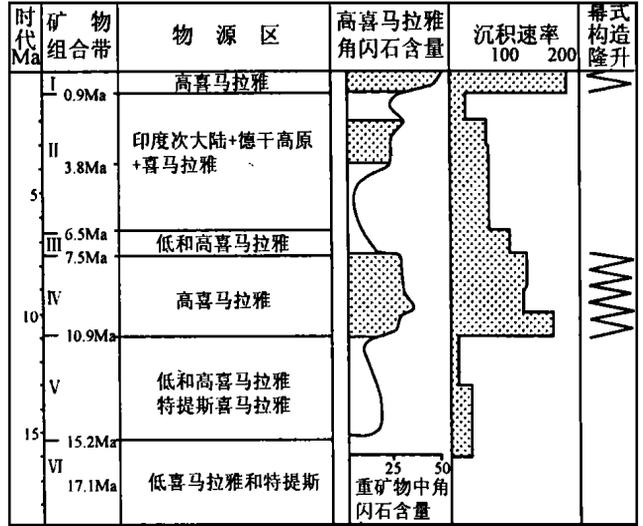


图2 孟加拉扇上新世—第四纪地层中重矿物组合带与对应的物源供应区

Fig.2 Heavy mineral assemblages in the Pliocene and Quaternary strata of the Bengal fan and their corresponding provenances

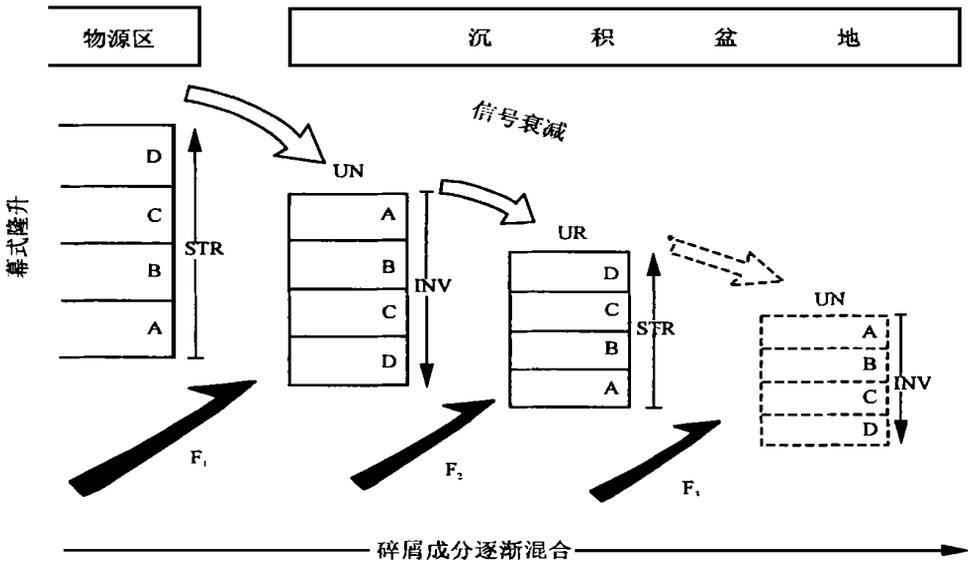


图3 正向和反向侵蚀层序示意图

物源区地层层序 (STR) 的单元标注为 A—D, 主断层用 F_1 、 F_2 和 F_3 表示。物源区地层由 A—D 单元构成, 断层 (F_1) 上升时来自该源区的初始砾岩层序具有正向侵蚀层序 (UN), 形成碎屑成分分布反向剖面 (INV)。而后, 向盆地方向递进的断层 (F_2) 使初始沉积单元抬升, 早期沉积地层的侵蚀产生具有正向碎屑成分分布 (STR) 的反向侵蚀层序 (UR)。当断层 (F_3) 向盆地方向进一步推进时, 早先沉积的砾石再旋回搬运, 垂向配置逆转, 出现正向或反向的侵蚀层序。随着侵蚀—搬运过程的重复进行, 原始地层序列的碎屑成分混合, 来自原始物源区地层序列的信号衰减, 则产生原始物源区地层序列岩石类型的混合分布序列

Fig. 3 Diagrammatic representation of normal and reverse unroofing sequences

The stratigraphic sequences (STR) in the source areas are indicated by A to D, and major faults by F_1 , F_2 and F_3 . When the fault (F_1) rises, the initial conglomerate sequences derived from the source areas cited above display the normal unroofing sequences (UN). Afterwards, the basinward prograded fault (F_2) forced the initial sedimentary units to uplift, giving rising to the reverse unroofing sequences (UR). When the basinward progradation of the fault (F_3) continued, the pre-existing gravels were removed to produce the normal or reverse unroofing sequences. Finally, the repetitive erosion-transport led to the random distribution of clastic compositions and rock types in the stratigraphic sequences of the source areas

的碎屑组成记录了沿山前断层带的初始隆升和物源区的剥蚀过程。沿断层 F_1 的初始侵位导致冲积扇砾岩向盆地推进和物源区地层反剖面分布。第二幕构造活动产生了巨层序 M_2 的进积, 它可能与山前断层的重新隆升及原始物源区深切割事件有关, 因而发育了正向侵蚀层序。第三幕构造活动肯定是沿新的断层进行的, 它比早先的断层位置更偏向盆地一侧, 新生的断层使冲积扇近端隆升, 从而出现了反向侵蚀层序 (M_3), 这时来自原始物源区的碎屑组成与盆缘再旋回的砾石混合。最后, 距盆缘更远的新生断层使早期沉积的砾石单元抬升, 再搬运最终进入盆地远端, 最顶部的砾石层比下伏巨层序表现出更广泛的混合。应该强调指出, 这一模式适用于单一点状物源的盆地, 对于具有多个沉积物的搬运水道, 尤其是盆地

中部或远端汇水区,不同物源碎屑组成混积,可能使判别盆缘构造隆升更趋复杂。

3 造山带隆升阶段的判别

前陆盆地是毗邻造山带的楔形构造拗陷,逆冲推覆带是盆地充填沉积的主要物源。研究证实前陆盆地的非对称形态主要是由冲断带构造载荷作用引起岩石圈挠曲形成的^{5,19]}。如果冲断带侵位之后被侵蚀,前陆盆地将因重力均衡回返以重建区域平衡状态,前陆盆地早先的沉积物随之隆升并开始剥蚀。剥蚀过程将进一步减小沉积负载数量,导致更强的均衡隆升(isostatic uplift),从而促使前陆盆地地层厚度不断减薄。如果冲断带是唯一的构造负载(tectonic load),盆地沉积地层可能剥蚀殆尽,仅残存区域性不整合面作为表征冲断活动存在的证据。Heller(1988)^[11]提出,前陆盆地一般经历两个阶段的发展历程:第一个阶段为造山期(synorogenic),伴随着相邻冲断带侵位负载的出现,盆地快速沉降。第二阶段为造山后期(postorogenic),冲断带以侵蚀作用为主,前陆盆地的近端因挠曲反弹而上升,导致盆地充填的沉积再分配。当造山过程构造加载和冲断带侵蚀卸载处于临界值时,前陆盆地的两个演化阶段可近于同时出现。由于冲断带侵位往往是幕式多级次的,因此,在一个造山过程中的临界状态可能多次再现。

3.1 造山期的沉积响应

根据前陆盆地的挠曲模式,构造沉降向冲断带方向呈指数增强,最大的沉降出现在逆冲岩席之下和近端,向外快速衰减,它直接控制盆地中砾岩体的横剖面形态。沉积地层厚度分布亦具有沉降带的几何形态,即最大沉积厚度在紧邻逆冲前缘,而且快速沉降将产生巨厚的但布局局限的砾岩体,原始地层厚度向外呈指数减薄(图6)。在陆相前陆盆地中,粗粒碎屑主要堆积在山前地带,而远离山前几公里则渐变为细粒沉积。冲积扇的进积受到盆地下部由冲断带向外的岩石圈向后翘起的抑制,湖泊和纵向河流的位置受控于沉降速率与冲积扇向盆地进积速度的平衡状态。在盆地挠曲波长之外的河流流向可能垂直于沉降的前陆地区,从而在盆地远端产生向冲断带进积的河流单元。

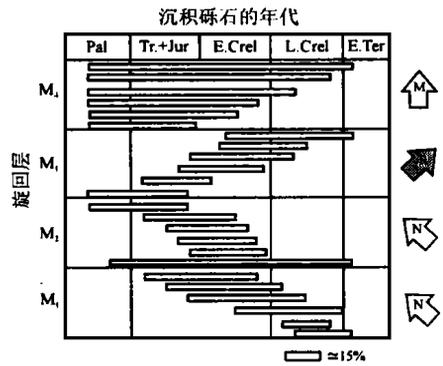


图4 西班牙 Ebro 盆地渐新世巨层序 M₁-M₄ 碎屑组分的地层分布

Pal 古生代; Tr.-Jur. 三叠纪和侏罗纪; E. Cret. 早白垩世; L. Cret. 晚白垩世; E. Tert. 古近纪。M₁-M₄ 巨层序编号; N. 正向侵蚀层序; R. 反向侵蚀层序; M. 混合层序; 水平方框长度表示一定地层间隔内原始碎屑组分年代分布范围

Fig. 4 Clastic distribution in the Oligocene megasequences (M₁-M₄) in the Ebro Basin, Spain

Pal = Palaeozoic; Tr.-Jur. = Triassic-Jurassic; E. Cret = Early Cretaceous; L. Cret = Late Cretaceous; E. Tert. = Early Tertiary. M₁-M₄ represent the megasequences; N = normal unroofing sequence; R = reverse unroofing sequence; M = mixed unroofing sequence. The bar indicates the age extend of the clastics in the given stratigraphic intervals

在冲断带构造活动并发生隆升期间,冲积扇粗粒沉积仅堆积在陆相前陆盆地的近源区,向盆地远端快速变细。粒级减小的速率主要取决于沉降速率和供应盆地沉积物的粒级大小的分布。在盆地远端主要由河流和湖泊沉积组成,而且河流系统可能垂直于冲断带流动,它们可能出现在前陆盆地远端十几公里以外的地区。这种毗邻冲断带并且与构造载荷侵位产生的沉降同时发育的沉积格架可以美国怀俄州西部中白垩世地层为例。Sevier造山带向东冲断侵位产生岩石圈挠曲在前陆区西部形成海湾,白垩纪阿普特期地层从爱德华-怀俄明地区向东延伸到Bighorn盆地,其沉积层序和地层厚度分布如图6所示。实测剖面的岩相包括湖泊相、辫状河及冲积扇沉积。剖面⑦~⑨为Bighorn盆地的Cloverly组的Greybull砂岩段。

Greybull砂岩段是向西和北西流动的河流沉积,它沿前陆盆地远端分布,其流向垂直于冲断带,向冲断带方向与其相对应的是湖泊相的细粒沉积单元,它向冲断带方向明显增厚,这与造山期冲断带侵位产生的前陆盆地快速沉降曲线相似。根据实测剖面厚度重建的盆地几何形态与弹性挠曲模型计算的沉降曲线的一致性说明沉积充填过程是受岩石圈挠曲控制的。

3.2 造山后的沉积响应

在冲断事侵位之后的第二个阶段,侵蚀作用占主导地位。伴随着冲断带的侵蚀将出现重力均衡回返,导致前陆盆地的近端隆升,远离冲断带隆升的幅度逐渐减小,来自冲断岩席及前陆盆地近端先期的沉积物将搬运到更远的部位沉积。因此,冲断带侵蚀期粗粒级碎屑将扩大到盆地远端初始细粒沉积之上,这些粗粒积对应前陆盆地近端及冲断带中侵蚀面(图7)。当前陆盆地继续隆升时,早期近端沉积的粗单元不断地被侵蚀并在前陆地区之外再沉积。前陆盆地近端隆升导致盆地形态更趋不对称,再沉积的粗粒单元呈席状产出,这与造山期沉积形成的楔状体明显不同。因此,造山后期沉积的典型标识是广泛分布的砾岩席,它的沉积时限与冲断带临近地区侵蚀不整合面相当。

造山后期沉积体制的一个实例是美国Great Plains西部的晚新生代地层记录。落基山南部在晚中新世和上新世的隆升产生了Ogallala组的河流相砂砾岩。在科罗拉多和新墨西哥,Ogallala组在落基山山前150km宽的范围内绝大部分被侵蚀,白垩纪和早新生代沉积地

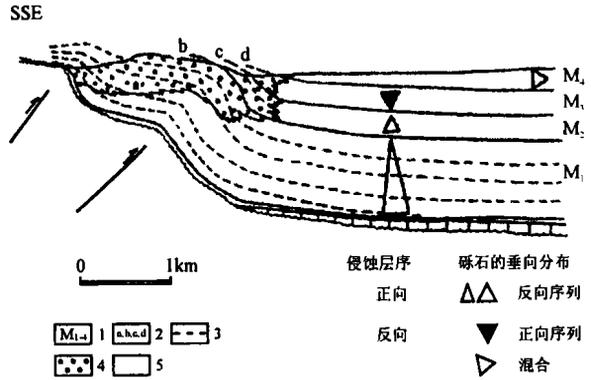


图5 渐新世冲积扇砾岩单元的横剖面图

M₁和M₂巨层序的垂向碎屑成分的分布表现为反向序列,M₃呈正向序列,M₄为混合分布。1.旋回层;2.间断面;3.时间线;4.砾岩;5.砂砾岩

Fig. 5 Cross section through the Oligocene alluvial fan conglomerates

The megasequences M₁ and M₂ exhibit a reverse sequence; M₃ exhibits a normal sequence, and M₄ a mixed sequence. 1= cyclothem; 2= hiatus 3= time line; 4= conglomerate; 5= sandstone and conglomerate

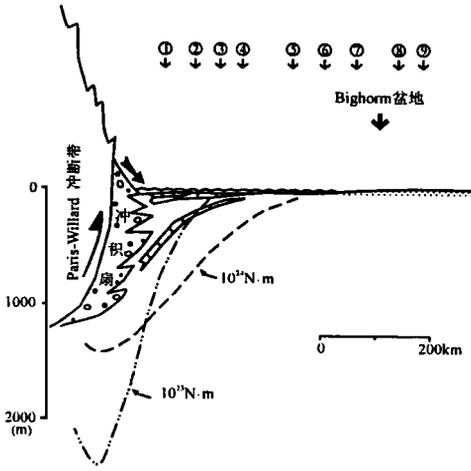


图6 Sevier造山带东侧前陆盆地中白垩纪地层横剖面图(据 Heller 等修改, 1988)

盆地充填形态是根据实测剖面①~⑨的厚度编制

Fig. 6 Diagrammatic cross section of the Middle Cretaceous strata in Wyoming foreland basin in the Sevier orogenic belt during emplacement of Paris-Willard thrust sheet (modified from Heller et al., 1988). Theoretical configurations of the sediment-filled basin are based on the thickness shown from measured sections ① to ⑨

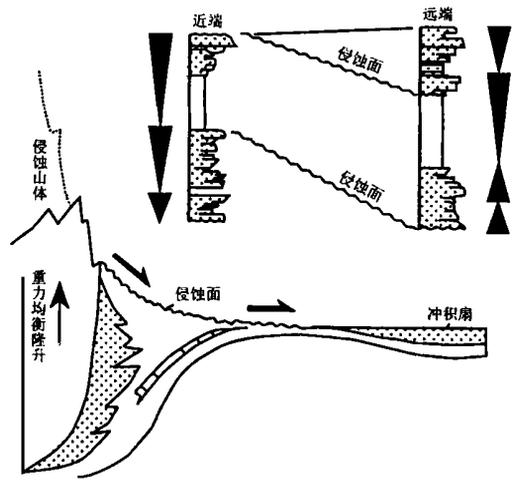


图7 落基山隆升促使前陆盆地近端上升侵蚀, 新近系 Ogallala 组河流相砂砾岩沉积在距山前 150km 的远端部位。上部插图表示近端和远端砾岩的层序对比关系

Fig. 7 The uplift of the Rocky Mountains in late Miocene and Pliocene time resulted in the deposition of fluvial sands and gravels of the Tertiary Ogallala Formation, within 150 km of the Rocky Mountain front. The upper figure shows the correlation and interpretation of coarsening-upward sequences from proximal and distal conglomeratic sequences

层暴露地表(Stanley 和 Wayne, 1972)。在堪萨斯和内布拉斯加更新世沉积物来自前寒武纪地层, 含有部分 Ogallala 组的再沉积砾石。Ogallala 组的隆升和沉积再分配并不仅仅是由落基山的侵蚀所产生的, 也可能与落基山和 Great Plains 西部岩石圈减薄有关。不过类似的地层记录也可以仅由侵蚀作用产生, 最终前陆盆地可能被侵蚀殆尽, 这可解释为什么近 Grenville 造山带前陆盆地的消失。

应该说明, 两种构造体制下的沉积响应所持续的时间和涉及的范围可能受诸多因素的影响, 但隆升和侵蚀速率直接控制着沉积响应的体制和速率。在一个造山过程中这两个阶段可能同步发生, 或者隆升速率大于/小于侵位速率, 平衡状态的临界点多次出现, 最终在盆地近端出现多个小型的侵蚀面, 而远端产生一系列进积型叠置的砾岩席。

4 造山带隆升机制的判别

山脉隆升由两种机制所驱动, 即构造缩短或重力均衡回返。前陆盆地沉积系统在逆冲增厚或者是侵蚀卸载和均衡回返过程产生的山系隆升具有不同的沉积响应, Burbank (1988)^[6] 提出可根据盆地沉积格局和水系形态来判别隆升机制的模式(图 8)。①如果逆冲

构造是山脉隆升的主要因素,则由此产生的地壳增厚在临近的前陆区引起不对称的沉降,在近端部位沉降幅度和沉积厚度最大,冲积扇向盆地横向进积受到抑制。横向河流(transverse rivers)局限于盆地近端地区,纵向或轴向河流(longitudinal 或 axial rivers)沿盆地中部冲积扇前缘分布。由于沉降速率超过沉积速率,盆地处于欠补偿状态,在盆地横断面上形成楔形的地层体。②侵蚀作为山脉隆升的主要驱动力,是因为侵蚀卸载导致山体质量损失,重力均衡回返使地壳根部减薄,整个前陆盆地将随之发生挠曲隆升。这时强烈的侵蚀导致注入盆地沉积物的剧增,发生溯源侵蚀,前陆盆地宽度增大。随着前陆盆地近端的隆升,以及沉积负载的出现,前陆盆地沉降的非对称几何形态减弱。前陆近端的沉降幅度减小和沉积物供应量的增加,造成横向扇的扩张,纵向河流位移到盆地远端。

根据这个模式,Burbank 利用西瓦里克前陆盆地的沉积几何形态来解释喜马拉雅山晚新生代的隆升机制。印度-恒河前陆盆地的沉积几何形态来解释喜马拉雅山前缘,盆地充填地层向南超覆在印度次大陆西部和北缘,孟加拉扇和印度河中堆积的巨厚沉积表明,过去 20Ma 来前陆盆地几乎不间断的被充填并向外溢流,即所有的有效的可容纳空间都被沉积物占据。假如印度次大陆的前寒武纪地壳是一个相对均一的流变体,则印度河和恒河前陆盆地的挠曲波长应是相似的,估算宽度约 300km。但是这两个盆地的现代水系格局形成明显的对比,印度河水系一旦进入巴基斯坦北部的前陆区,它距西侧苏莱曼和 Kirthar 山系前缘的距离一般小于 100km,河流平行山脉走向流动并局限于山前地域,而在范围广阔的前陆盆地中部和远端很少出现。这种水系形态的出现被认为是快速非常对称沉降或横向扇沉积物注入量低所产生。恒河前陆盆地与印度河前陆盆地形成强烈的对比,亚穆纳河和恒河中下游通常是纵向河水系,流动方向与山系走向平行,但距山前的距离可达 200~300km,这些河流大多分布于前陆盆地远端。恒河前陆盆地地层在山前增厚至 6km,但现代恒河和亚穆纳河之下的地层厚度一般小于 1km。大型横向扇主要位于前陆盆地的近端和中部。横向扇的进积将恒河推移到现在盆地远端的位置。晚新近纪恒河前陆盆地充填地层的横断面呈不对称形态,反映上新世之前喜马拉雅山逆冲负载长期控制着盆地沉降。上新世-全新世上西瓦里克地层横断面的几何形态和现代水系样式支持侵蚀卸载是促使喜马拉雅山和前陆盆地近端晚新生代隆升的驱动机制,沉积物注入量的增加导致席状横向扇的广泛进积。

5 建立青藏高原大陆碰撞与隆升过程时空坐标的设想和方法

借鉴世界上著名造山带如北美科迪勒拉山、阿尔卑斯、比利牛斯山和印度大陆北缘西瓦里克盆地构造事件和沉积响应研究的成功范例,选择典型盆地开展工作,预计对有关高原隆升过程和变形调节机制可以获得全新的认识。在青藏高原及毗邻地区,存在三个层次的新生代沉积盆地:海洋盆地(印度河扇、孟加拉扇、莺歌海)、周缘前陆盆地(塔里木盆地、四川盆地、西瓦里克盆地、河西走廊)和高原内部盆地(可可西里盆地、柴达木盆地),它们忠实地记录着新生代地质演化过程中的重大构造和气候变迁,可以将它们看作为青藏高原从海到陆并上升为“世界屋脊”这一过程的“实时监测站”。有关第四纪青藏高原的隆升历史和幅度通过黄土-古土壤序列的记录,已有一个基本清楚的认识^[20,21],侧重点应为第三纪地层发育完整的沉积序列。这一时段是特提斯洋——陆转换、大陆碰撞、地壳短缩与地壳增厚的关键变

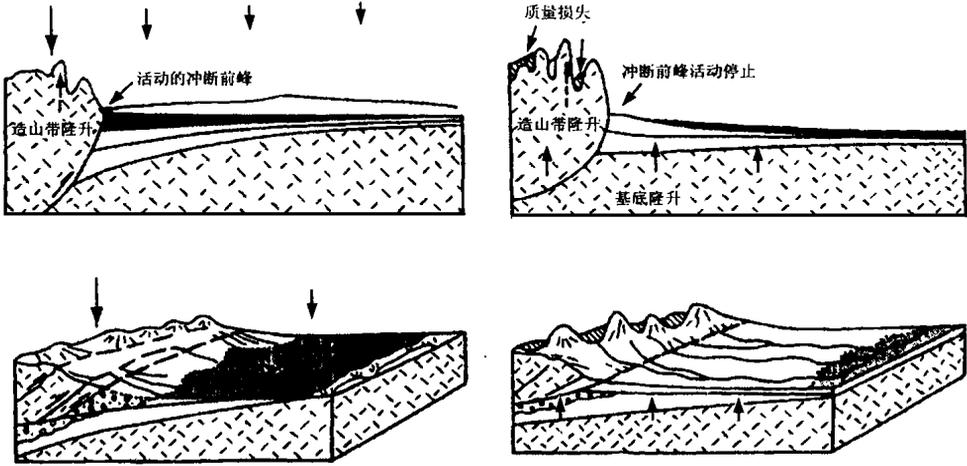


图8 驱动山脉隆升的构造负载和侵蚀卸载前陆盆地中产生的沉降和沉积格架示意图

A. 由于地壳挤压和增厚产生的构造负载驱动山顶部隆升, 前陆盆地中形成向冲断前缘增厚的楔形沉积单元; B. 在侵蚀卸载期, 由山脉总质量减少所引起残留山顶面的均衡隆升, 前陆盆地近端上升并被侵蚀, 沉积单元在横断面上呈板状形态; C. 在逆冲负载发生时沉积格架中横向河流流域短, 发育沿前陆盆地的中部和远端流动的纵向河; D. 在侵蚀卸载期, 山脉质量损失, 基底广泛隆升, 横向河流向盆地推进, 流域扩展, 纵向河局限于盆地远端

Fig. 8 Schematic diagrams showing the subsidence and deposition in a foreland basin caused by tectonic loading

A. The tectonic loading caused by the crustal compression and thickening gives rise to the uplift of the uppermost part of a mountain range, and the wedge-shaped units were deposited in the foreland basin. B. During the erosion of the thrust belt (load removal) the sediments previously deposited in the proximal part of the foreland basin are uplifted and eroded, transported more distally across the foreland region, and redeposited as tabular forms. Continued erosion will further reduce the size of the load, leading to more isostatic uplift, thereby reducing the thickness of the foreland-basin fill. C. The river basins tend to be shortened laterally during thrust loading, thus longitudinal streams are developed in the central and distal parts of the foreland basin. D. During the erosion of the thrust belt (load removal), the uplift of the basement resulted in the basinward progradation of transverse streams, while the longitudinal streams are only restricted to the distal part of the basin.

革时期, 目前有关初始碰撞时限及穿时性、高原隆升的启动时间、增生过程以及岩石圈结构、巨厚地壳形成的深部动力学调解机制, 已出现了向第三纪追踪的新态势^[22~25]。

构造事件沉积响应研究的关键是确定地层的层序和层位, 按有测年依据的统一时间标尺, 建立不同成因类型的地层序列, 并按地质时代进行不同时间尺度的地层划分和对比。在青藏高原三个层次的沉积盆地中, 共有的是冲积扇-河湖相沉积序列。对不连续的地层序列, 应详细研究以构造/侵蚀不整合为代表的间断界面; 对连续地层序列, 应重点研究古构造旋回的频率、幅度以及沉积响应参数的跃变或强峰。在此基础上, 分析间断面和强峰时段的构造地貌背景, 从而在青藏高原新生代构造隆升-剥蚀夷平的等时性或穿时性变化之间建起可对比的地层依据。

在印度与欧亚大陆碰撞的体制下, 青藏高原不但发生了平面上的缩短、旋转或向外流展和增生, 而且也发生了垂向的隆升、沉降及高度不等的变位, 所以沉积盆地中构造标识的地质记录和时空序列, 实际上是多级次隆升-剥蚀-沉积过程叠加作用的最终结果。只有确定了青藏高原各个构造部位(腹地、周缘、外延)不同时间段的相对或绝对升降幅度, 才能全方位地有效阐明它的时空演变。为此, 按位居不同构造地理部位的时间段, 逐个研究蕴含古构造信息的诸如沉积速率、构造沉降速率以及古地形、古地高程等替代性参数的突变和强峰, 据以进行区域乃至洲际对比, 才能有助于辨明青藏高原隆升与侵蚀夷平在不同构造位置上的响应与差异, 阐明高原隆升与沉降之间的调节机制。

参考文献:

- [1] HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F and AN YIN. Raising Tibet [J]. *Science*, 1992, 255(5052): 1663—1670.
- [2] FIELDING E J. Tibet uplift and erosion [J]. *Tectonophysics*, 1996, 260(1—3): 55—84.
- [3] LI TINGDONG. The process and mechanism of the rise of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Tectonophysics*, 1996, 260(1—3): 45—53.
- [4] DECELES P G, GRAY M B, RIDGWAY K D, COLE R B, PIVNIK D A, PEQUERA N and SRIVASTAVA P. Controls on synorogenic alluvial-fan architecture, Beartooth Conglomerate (Palaeocene), Wyoming and Montana [J]. *Sedimentology*, 1991, 38(4): 567—590.
- [5] JORDAN T E, FLEMINGS P B and BEER J A. Dating thrust-fault activity by use of foreland-basin strata [A]. Klein-spehn K L and Paola C. *New Perspectives in Basin Analysis* [C]. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1988, 307—330.
- [6] BURBANK D W, BECK R A, RAYNOLDS R G H, HOBBS R and TAHIRKHELI R A K. Thrusting and gravel progradation in foreland basins: A test of post-thrusting gravel dispersal [J]. *Geology*, 1988, 16(12): 1143—1146.
- [7] BLAIR T C and BILODEAU W L. Development of tectonic cyclothems in rift, pull-apart, and foreland basins: Sedimentary response to episodic tectonism [J]. *Geology*, 1988, 16(6): 517—520.
- [8] DIGUISEPPi W H and BARTLEY J M. Stratigraphic effects of change from internal to external drainage in an extending basin, southeast Nevada [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103(1): 48—55.
- [9] STEEL R J, MAEBLE S, NILSEN H, RØE S L and SPINNANGR A. Coarsening-upward cycles in the alluvium of Hornelen Basin (Devonian) Norway: Sedimentary response to tectonic events [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1977, 88(8): 1124—1134.
- [10] STEEL R J and WILSON A C. Sedimentation and tectonism (Permo-Triassic) on the margin of the North Minch Basin, Lewis [J]. *The Journal of the Geological Society of London*, 1975, 131(1): 183—202.
- [11] HELLER P L, ANGEVINE C L and WINSLOW N S. Two-phase stratigraphic model of foreland-basin sequences [J]. *Geology*, 1988, 16(6): 501—504.
- [12] SADLER S P and KELLY S B. Fluvial processes and cyclicity in terminal fan deposits: an example from the Late Devonian of southwest Ireland [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 85(1—4): 375—386.
- [13] WILTSCHKO D V and DORR J A JR. Timing of deformation in overthrust belt and foreland of Idaho, Wyoming, and Utah [J]. *A. A. P. G. Bulletin*, 1983, 67(8): 1304—1322.
- [14] HELLER P L, BOWDLER S S, CHAMBERS H P, COOGAN J C, HAGEN E S, SHUSTER M W and WINSLOW N S. Time of initial thrusting in the Sevier orogenic belt, Idaho-Wyoming and Utah [J]. *Geology*, 1986, 14(5): 388—391.

- [15] ARMSTRONG F C and ORIEL S S. Tectonic development of Idaho-Wyoming thrust belt [J] . A. A. P. G. Bulletin, 1965, 49(10): 1847—1866.
- [16] AMANO K and TAIRA A. Two-phase uplift of Higher Himalayas since 17 Ma [J] . Geology, 1992, 20(5): 391—394.
- [17] COLOMBO F. Normal and reverse unroofing sequences in syntectonic conglomerates as evidence of progressive basinward deformation [J] . Geology, 1994, 22(3): 235—238.
- [18] TANNER W F. Tectonically significant pebble types: sheared, pocked and second-cycle examples [J] . Sedimentary Geology, 1976, 16(1): 69—83.
- [19] JORDAN T E. Thrust loads and foreland basin evolution, Cretaceous, western United States [J] . A. A. P. G. Bulletin, 1981, 65(12): 2506—2520.
- [20] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [J] . 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1—10.
- [21] 施雅风, 李吉均, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化 [J] . 地理学报, 1999, 54(1): 10—21.
- [22] CRITELLI S and GARZANTI E. Provenance of the Lower Tertiary Muress redbeds (Hazara-Kashmir Syntaxis, Pakistan) and initial rising of the Himalayas [J] . Sedimentary Geology, 1994, 89(3—4): 265—284.
- [23] MOCK C, ARNAUD N O and CANTAGREL J M. An early unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qinghai, NW China) [J] . Earth and Planetary Science Letters, 1999, 171(1): 107—122.
- [24] MURPHY M A, AN YIN, HARRISON T M, DURR S B, CHEN Z, RYERSON F J, KIDD W S F, WANG X and ZHOU X. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan Plateau [J] ? Geology, 1997, 25(8): 719—722.
- [25] AN YIN, HARRISON T M, MURPHY M A, GROVE M, NIE S, RYERSON F J, WANG XIAOFENG and CHEN ZENGLE. Tertiary deformation history of southeastern and southwestern Tibet during the Indo-Asian collision [J] . Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(11): 1644—1664.