

从常规体系域到非常规体系域 ——河流相层序地层学研究的一个重要进展

章轩玮

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院)

摘要 在与海平面变化存在联系的近滨线河流相地层中,源于海岸碎屑沉积体系的层序地层学概念得到了较好的应用,从而在河流相地层中产生了低水位体系域(LST)、与海侵体系域类似的水进体系域(TST)及高水位体系域(HST)等常规体系域下的河流相层序地层划分方案。由于源于海岸沉积体系的早期体系域划分存在着概念体系的不协调,故常规体系域划分在河流相层序中的使用也就存在着概念体系的不协调。非常规体系域(低可容纳空间体系域, LAST; 高可容纳空间体系域, HAST)的提出可避免这种概念体系的不协调,并为研究复杂的河流沉积过程和提取地层记录规律提供重要的线索和思路。

关键词 河流相; 层序地层学; 体系域; 研究进展

中图分类号: TE111.3 **文献标识码**: A

层序地层学的出现是沉积地质学一系列主要革命中的第三次,也是最近的一次^[1]。最早 Sloss“只是以区域不整合面所限定的地层单元”定义为层序的概念,并赋予其构造旋回的含义^[2-4]。Vail 和他的同事们延续了 Sloss 的工作,将层序进一步扩展为“沉积层序”的概念,即“由不整合面及其可以对比的整合面所限定的地层单元”^[5]。这些重要概念首次出现在 1977 年出版的《AAPG 26 号专辑 地震地层学》^[6]之中。1988 年《SEPM 42 号专辑 海平面变化》^[7]的问世,进一步完善了层序地层学的概念、方法、体系,由此层序地层学真正成长为一门沉积地质学的分支学科,并在生产实践中被广泛应用^[8]。

在河流相地层之中,以不整合面为界限的地层单元早已被前人所识别^[9-11],但直到在河流相地层分析中应用了 Exxon 学派的低水位体系域、海侵体系域和高水位体系域等常规体系域来描述河流相层序,才算对河流相层序地层学有了一个阶段性的总结。20 世纪 90 年代,Exxon 学派的地质学家们将这种被不整合面所限定的向上变细的河流相沉积序列解释为河流冲积构架^[12-21],并基于此提出了一系列

的近滨岸河流相层序模式。在这些模式之中,他们强调河流层序的形成主要是受海平面变化的影响而堆积的,与海平面的变化存在联系。至此,层序地层学作为一种划分和对比地层的方法被引入至那些没有海相界面来进行对比的河流相地层之中。在这些研究的基础上,近年来又衍生出了受构造和气候影响因素控制的非常规体系域河流层序模式,从常规体系域河流层序模式到非常规体系域河流层序模式的变化代表了河流相层序地层学的发展方向。追溯这个重要的进展可为今后更加深入地研究河流相层序地层学提供重要的思考途径。

1 常规体系域河流相层序模式的起源

上个世纪 90 年代 Exxon 学派的地质学家们,在解释那些沉积在被动大陆边缘海岸冲积平原上的河流相地层与海平面变化的关系时,均强调海平面的变化直接控制着河流沉积层序的形成,相对海平面的变化近似等同于基准面的变化^[15]。在近海沉积区域,控制河流层序形成的影响因素包括:构造升降、海平面变化、气候变化。这些影响因素最终都会转化为基准

收稿日期: 2012-09-23; 改回日期: 2012-12-18

基金项目: 本文受国家自然科学基金(编号: 41030318, 40472065)资助

章轩玮: 1987 年生,中国地质大学(北京)在读硕士研究生,专业方向为沉积学及层序地层学。通讯地址: 100083 北京市学院路 29 号

面变化这个主控因素,基准面变化最终控制了河流层序的形成^[16]。在近海冲积平原处,河流层序内部可以划分为低水位体系域、海侵体系域和高水位体系域。

在此研究的基础上,Wright等^[17]提出了一个较为简单的河流相层序模式:低水位体系域(LST)是以充填在下切谷中的聚合河道砂体沉积为主,还包括河流阶地上沉积下来的高成熟度的古土壤层。海侵体系域(TST)基准面的上升速率由慢到快,开始沉积厚层的泛滥平原沉积并且包裹着孤立的高弯曲度的河道砂体。高水位体系域(HST)基准面的上升速率开始下降,从泛滥平原沉积向上逐步过渡到横向连通性较好、密度也较大的砂体沉积,并且沉积古土壤层。

Shanley等^[18]在经过对美国西部Kaiparowits高原河流相地层的研究后认为,河流相地层可以被追溯到同期的海相沉积地层中。层序边界(即不整合面)可以被侧向聚合的河流席状砂岩体所超覆,这种聚合的河流席状砂岩体有着非常高比例的连通性,并且都是相对较粗的砂岩沉积,它们被归为冲积海侵体系域(TST)的下半部分。但是在他们的模式中,冲积海侵体

系域底部的初始海侵面可能向陆方向上超,直接超覆于不整合面之上,因为真正的低水位体系域实际已经缺失。在冲积海侵体系域的上部,聚合的河道沉积转变为相对孤立并且与细粒泥质沉积互层的曲流河道沉积,这种沉积特征显示了受海洋潮汐的影响。这些受潮汐影响的沉积层位对等于海相沉积层序中最大海侵期凝缩段的位置^[18-19](图1)。在后来的研究中,关于聚合河道砂岩沉积的体系域归属问题依然是许多研究学者关注的重点。Catuneanu^[19]在2006年对Shanley和Wright这两种具有代表性的模式进行了总结。Catuneanu把Hunt等^[22]的四分体系域划分方案和基准面变化曲线引入了河流相层序地层学中。据此Catuneanu将河流相层序的层序边界放在了基准面变化曲线的最低点处。基准面下降期形成河流下切谷,基准面上升早期形成低水位体系域即聚合河道砂岩沉积,基准面快速上升期形成受潮汐作用影响的海侵体系域(TST)。在顶部是从泛滥平原沉积占优的早期高水位体系域(HST)过渡到聚合河道沉积占优的晚期高水位体系域(HST)(图1)。

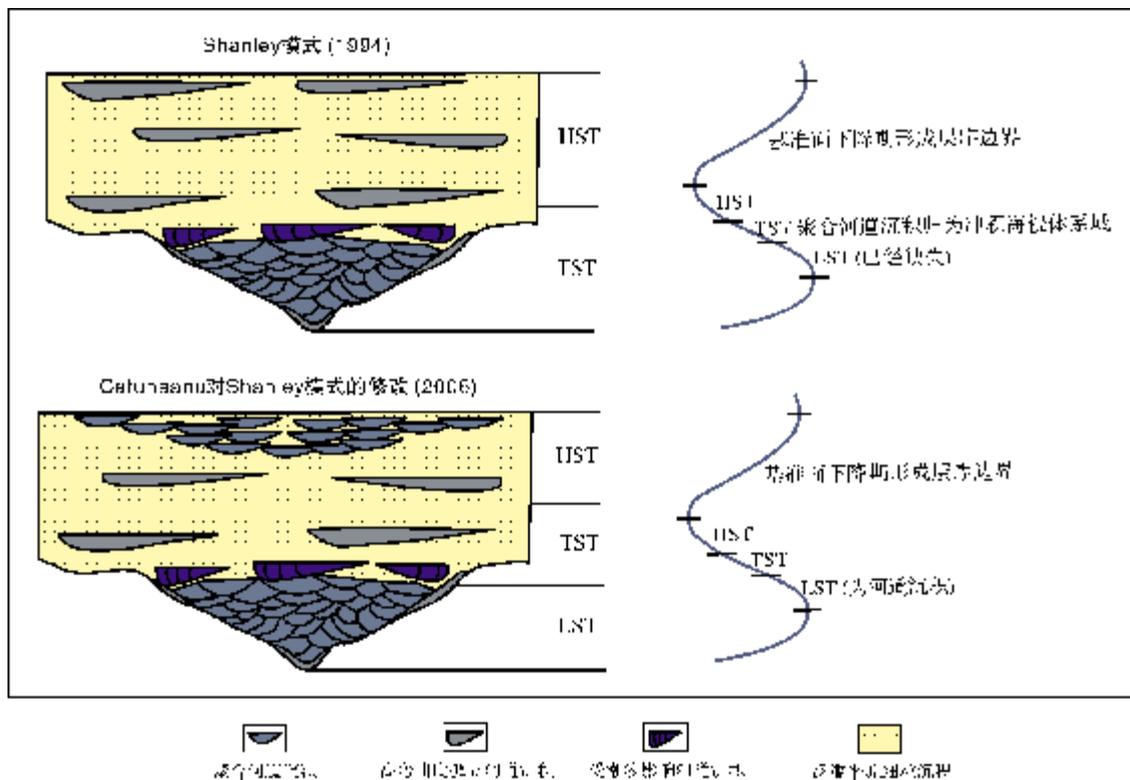


图1 近滨线常规体系域河流层序模式^[18-19]

受潮汐影响的孤立河道沉积对等于最大海侵期凝缩段的位置。
LST 低水位体系域; TST 海侵体系域; HST 高水位体系域

张周良等^[20-21]在经过对鄂尔多斯盆地山西组地层的研究后认为,基准面的上升和下降不仅会引起河流沉积趋势的改变,也会引起河流形式在不同体系域之间的改变。低水位体系域显示典型的辫状河沉积特征。海侵体系域形成于基准面快速上升期有利于形成多河道网状河流。高水位体系域基准面上升的速度降低,河道将逐步转变为侧向加积和侧向侵蚀为主的曲流河沉积体系。这是一个从下到上分别是辫状河(LST)—网状河(TST)—曲流河(HST)的变化序列,所以,张周良认为在河流层序内部不同体系域之间河流形式的转变是最显著的体系域区分标志。

刘招君等^[23-25]吸取了国外层序地层学四分体系域划分方案的优点,提出了河流相层序地层学的四分模式。低水位体系域主要包括河流下切谷和下切谷充填沉积。水进体系域沉积物已超出河流下切谷的范围,粒度总体向上变细。高水位体系域基准面的上升速率开始减缓并小于沉积物的供应速率,细粒沉积物较为发育。水退体系域(RST)基准面开始下降,河道横向摆动增大,岩性相对变粗。胡光明等^[26-27]在对苏里格地区下石盒子组8段的研究中,将露头资料与测井资料相结合,修改了Wright等的模式,并将体系域四分化。胡光明等将河流阶地沉积物视为水退体系域,并认为这是河流沉积体系在基准面下降期的产物。

在此需要强调的是前述的各种河流相层序地层学模式中,LST—TST—HST等体系域与海相层序地层学中的LST—TST—HST等体系域存在着概念上的差异。

此外,另有一批中国学者利用Cross的高分辨率层序地层学对河流相地层进行划分和对比也取得了优异的效果^[28-31]。利用高分辨率层序地层学建立层序地层格架首先需要对基准面转换位置即最大洪泛面位置进行识别,进而建立基准面旋回与沉积地层之间的对应。高分辨率层序地层学强调以基准面旋回为参照面分析在基准面演化的不同阶段河流相层序地层的构成单元^[32-33]。但Cross的高分辨率层序地层学与传统的Exxon学派层序地层理论也有一些明显的区别,比如,Exxon学派认为河道沉积与越岸沉积都是基准面上升期形成的,两者在纵向剖面上相互叠置,实际是同期异相的,而Cross认为越岸沉积是基准面下降期的产物,这是两者之间一个明显的区别。

2 从常规体系域到非常规体系域

在基本不受海平面变化影响的内陆环境中,河流相地层横向相变快,古生物化石保存少,且缺乏划分对比的标志性地层。虽然河流相沉积序列中不存在海侵沟蚀作用或强迫型海退侵蚀作用所形成的侵蚀界面,但是区域性的不整合面却广泛地存在着,它们可以作为划分河流相层序地层的界面。

在内陆环境中,河流相层序的形成更多地受控于盆地内改变河流物源区位置的构造运动以及改变环境能量的气候更替。河流层序格架的建立就不宜依据前述的常规体系域河流相层序模式来解释。因为不论是LST—TST—HST—RST这些常规体系域中的任何一种,在经典海相层序地层学内,这些常规体系域的原始命名都暗含了近海沉积物堆积期间滨线迁移转变的过程及其类型。滨线迁移类型决定了特定沉积趋势下地层单元的外形和堆积模式(体系域),比如,海退体系域的概念最早出现在Embry的T—R层序模式^[34]之中,海退体系域的命名就对应着海平面升降过程中的高水位正常海退、强迫型海退、低水位正常海退三种海退过程,所以叫海退体系域^[35-36]。但在内陆地区,河流基准面的发展演化显然与这三种过程无法对应,如果总是将概念无限延伸,就会出现逻辑上的混乱^[37]。Blum等^[38]对墨西哥湾更新世沉积记录的研究证明,冰川的形成期(即基准面的下降期)比冰川的消融期(即基准面的上升期)更长。Catuneanu等^[39]对加拿大西部前陆盆地的研究证明,造山带前渊挠曲沉降的时间比造山带抬升期更加短。这两种情况都属基准面变化曲线不对称的情况,这与使用对称正弦曲线定义的海平面变化无法对应。因此,常规体系域河流相层序模式较适用于河流序列能够与海相序列进行对比的近滨线地区,但在内陆地区则需酌情考虑。

在此背景上,低可容纳空间体系域(LAST)、高可容纳空间体系域(HAST)概念——非常规体系域的出现,就代表了一种对内陆沉积环境下复杂地层记录较为客观的解释。非常规体系域包含低—高可容纳空间体系域,泛指常规体系域之外与特定河流沉积环境相关的体系域类型^[40-41]。在河流相层序地层分析中,引入低—高可容纳空间体系域的概念,有利于识别研究层段基准面的演化过程,并通过纵向上叠置的沉积物厚度来反映基准面的变化^[32,42]。低—

高可容纳空间体系域强调的是不同体系域之间可容纳空间的改变,可容纳空间的改变与沉积物的供给共同驱动了河流层序的形成。在内陆地区构造旋回和气候旋回驱动形成的河流层序格架与海平面变化不存在成因上的联系。因此,在内陆沉积环境中,以可容纳空间的改变为切入点来定义河流层序内部的体系域就非常符合逻辑。Olsen等^[43]很早就意识到河流层序形成过程中可容纳空间变化的重要性,河道聚合作用的变化可能不需要伴随河流形式和地形坡度的变化,它可能仅仅是由于可容纳空间改变后河流流程和沉积作用的综合表现。这个概念随后又被Dahle和Catuneanu等抽象地提出^[44-45],他们均强调了低—高可容纳空间体系域在内陆河流层序分析中的灵活性。

非常规体系域河流层序模式与近滨线河流层序模式的另一差别,体现在基准面下降期是否继续沉积的问题上。在前述的各种近滨线河流相层序模式中,河流在基准面上半旋回中发育河流相沉积,在基准面下降半旋回中也发育河流相沉积,即在基准面升降两个阶段均沉积地层。这种认识并不被大多数地质学家所接受,Miall^[46]就曾对Shanley、Wright等的模式提出过质疑,他认为:在基准面的下降阶段河流依旧产生加积作用是值得商榷的^[46-47]。在基准面的下降阶段,河流处于整个生命周期之中地表环境改变最剧烈的阶段,不论是横向上的河流侧蚀作用,还是纵向上的河流下切作用都很盛行,河流将产生溯源侵蚀。在这种强烈改变地表环境的背景下,河流的倾斜程度和坡降高度不断增大,河水的流动能力被进一步激发,沉积物较难于保存。非常规体系域河流层序模式的理论进步,使得所有沉积物的堆积期都被限定在了基准面上升期,而基准面的下降期不形成沉积,只会侵蚀,从而产生不整合面^[48]。

低—高可容纳空间体系域的定义,是依据河流构架要素在河流层序格架中的相对比例来加以解释的,即在岩石分布中,用粗粒聚集在河道沉积、细粒泛滥在平原沉积的情况加以区分。多期聚集在河道充填沉积所组成的地层记录,代表了一个低可容纳空间的沉积背景,相对的,以泛滥平原沉积占主导的地层序列,则被解释为高可容纳空间沉积环境。低和高可容纳空间体系域,在垂向层序中彼此相邻,它们形成于可容纳空间增长速率不同的阶段,即基准面上升速率不同的阶段。低可容纳空间体系域形成在

陆上不整合面之上,一般是由河流沉积中最粗粒的沉积组分构成,并缺乏泛滥平原组分,反映了原始沉积环境的高能量。低可容纳空间体系域同时具有向上变粗的序列,这是一种“进积型”的沉积趋势,物源区提供的碎屑物质逐渐往盆地的更中心处溢流。高可容纳空间体系域包含了更多、更高比例的细粒越岸沉积物,河道充填沉积较少,可以在地层中较直观地区分出来。高可容纳空间体系域具有“加积型”的沉积趋势,沉积物向上变细,这都反映了低能量的高水位沉积特征(表1)。

表1 低—高可容纳空间体系域的识别特征与石油地质意义^[49]

体系域特征	低可容纳空间体系域	高可容纳空间体系域
层序边界	多,近距离复合	少
沉积趋势	早期进积	加积
沉积能量	早期高能,后期下降	随时间下降
粒度	粗	细
形态	规则,不连续	板状或楔状
砂/泥比	高	低
储层结构	聚合河道充填	孤立带状砂体
泛滥平原沉积物	薄,较为稀少	丰富,厚度较厚
厚度	薄	厚
煤层	稀少	发育
古土壤	发育	不发育
石油地质意义	连通性极好的河道砂体储层	也可以成为孤立储层
下伏地层	控制增强	弱控制

在河流层序格架中,河道和泛滥平原沉积的比率取决于基准面上升的速率。基准面上升的速率不同,造成了河道聚合程度和沙泥比的不同。基准面上升的早期,由于下切谷地形的影响往往发育多期辫状河道充填沉积。这种聚合式河道沉积,反映了沉积旋回早期基准面上升速率有限,可容纳空间受到限制,河流只能在横向和侧向上不断地冲击、决口。在地质记录中,低可容纳空间体系域的这种聚合式河道充填沉积,是由河道沉积的“聚合作用”产生的。所谓“聚合作用”,就是河岸缺乏植被有效的稳定保护,使得河道分化迅速,并且横向摆动剧烈,再加上河水从上游高处向下游低处的汇流过程中由于势能向动能的转化,使得河水流速不断加大,在河谷所限制的沉积范围内河道与河道之间不断冲击、决口,并撕裂、破坏原有的沉积。在河道间不断冲击、决口与互相叠置的过程中,逐步形成了彼此互相切割并且高度聚合的河道砂岩,

“聚合作用”就是冲击、决口导致的河道砂体的密集产出。高可容纳空间体系域的形成,是由于河流可容纳空间增长的高速率,造成河流沉积加积率的上升,沉积物主要以细粒泛滥平原沉积包裹高弯曲度孤立河道沉积为主。这种泛滥平原沉积发育,反映了沉积旋回晚期基准面上升的高速率以及高可容纳空间的背景。低和高可容纳空间体系域,共同组成了河流层序格架中正可容纳空间阶段(基准面上升期)的产物。

一个完整的河流沉积层序在正可容纳空间阶段沉积地层,在负可容纳空间阶段(基准面下降期)形成层序边界。每一个河流沉积旋回都被物源区的构造变化事件或气候的改变所结束。通常物源区的构

造抬升,会造成河流地貌的斜坡坡度变陡、河流能量加大、河流沉积体系的基准面开始下降并最终导致下切谷的形成;物源区的构造沉降,会造成河流地貌的斜坡坡度变缓、河流沉积体系基准面开始上升并最终导致河流的加积^[49-50]。气候的突然改变有可能增加环境能量,造成河流的流速加快,也可侵蚀形成下切谷。在此值得强调的是,低—高可容纳空间体系域可以用来解释基准面变化曲线不规则的情况。如果由于构造和气候旋回导致的基准面上升阶段持续的时间更久,那么就会沉积更厚的河流相地层;如果基准面下降阶段持续时间更久,就会导致更多的侵蚀,形成更广泛的陆上不整合面(图2)。

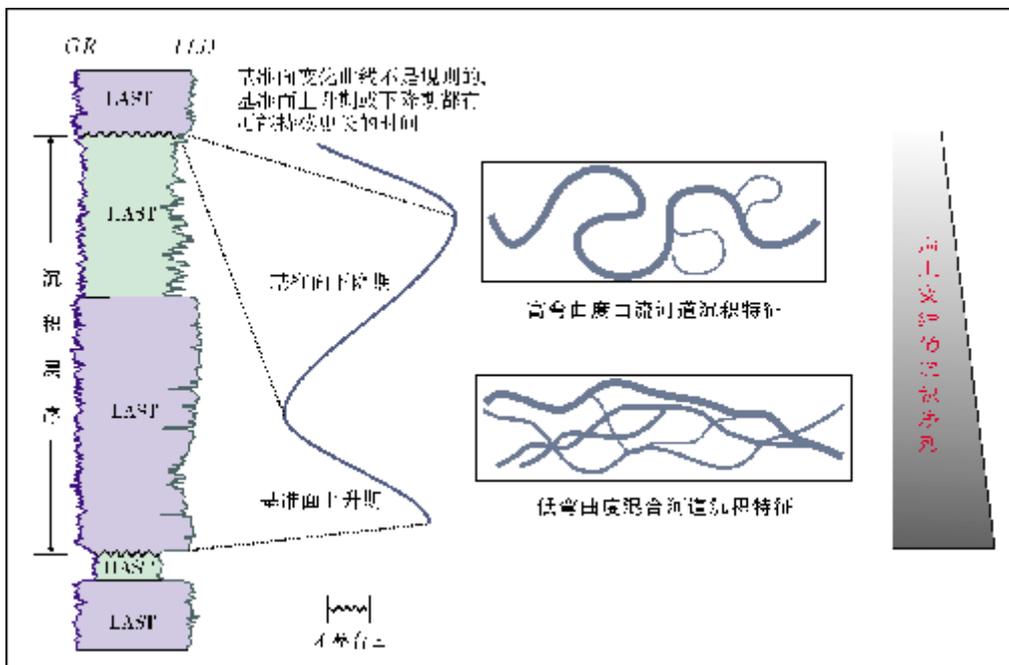


图2 在一个过度充填的前陆盆地中发育的完整的河流沉积层序
测井曲线来自于印度 Assam 盆地。LAST 低可容纳空间体系域; HAST 高可容纳空间体系域

3 河流相层序地层学研究展望

在近岸线区域,海平面的变化比其他的影响因素更能导致基准面的变化,所以常规体系域河流相层序模式在近滨线沉积环境中有其合理性。在不同的地质背景下,构造运动、气候交替及海平面升降等对内陆地区和近滨线附近有着不同的影响^[51]。海平面的变化或滨线的迁移,也许只能影响从滨线向河流上游有限范围内的河流沉积作用,Miall也得出近

似的结论,受海平面变化影响的河流流程距离向河流上游追溯,可从几十千米到两百千米不等^[11,46]。

构造运动和气候更替,可以影响沉积物供给、河流流量以及植被发育情况,从而产生特定的河流沉积类型^[52-53]。因此,根据研究区域的地质背景,应选择性地运用河流相层序模式。

河流的造谷阶段会生成河流阶地,幕式构造运动形成的河流阶地与气候周期性变化形成的河流阶地具有明显的区别,这可以作为识别河流层序形成

主控因素的一条线索。Bull^[54]将河流阶地大致分为三种类型:构造阶地、气候阶地和复合响应阶地。气候成因阶地的旋回性沉积变化,反映了气候变化的周期性。构造成因阶地的开始下切年龄,应该是构造运动的一幕。气候变化所形成的阶地以堆积阶地为主,一般情况下,阶地之间的高差比较小,阶地两侧对称分布。构造成因可产生基座阶地,这是由于地壳抬升、河流下切侵蚀的深度超过河流沉积物的厚度而直达基岩所形成的^[55-57]。这种以河流层序边界(河流下切谷)的成因为主要线索,判断河流层序形成的主要控制影响因素的方法,需要结合河流地貌学的知识来进行,这在内陆地区不失为一种判断河流层序模式是否适用的手段。很早就有中国学者意识到,以河流下切侵蚀谷和滞留砾岩为特征的河流回春作用面,是河流相层序底界面最主要的一种物质表现形式^[58]。

另外,河流沉积体系的运转特性,在大多数时候都被认为是一种难以预测的、甚至有可能是混乱的作用模式。众所周知,降雨量的变化,可以引起河道中河水的泛滥变化。但是河道中河水泛滥,对整个河流冲积体系的影响却是无法准确评价的,因为相等尺度规模的一次河水泛滥,有可能引发河道下切侵蚀作用,也有可能引发河道越岸沉积,或者干脆就不引发河流的任何变化。这些不同的结果,受温柔的降雨事件或激烈的风暴事件所左右,也受控于源头沉积物供应的波动性和不均一性,即使是排水流域或者是汇水流域在形态上轻微的变化都有可能改变河道形态的发育和展布。河流沉积体系的复杂程度,主要表现在两个方面:非线性与自组织临界性^[59-60]。非线性(nonlinearity),指在一个河流沉积体系中,整个河道的泥沙沉积物输入量及河道沉积记录的产出量,与沉积物输入量不成正比^[59]。自组织临界性(self-organised criticality),指河流沉积体系会在某一个时间点上处于一种准稳定(暂时稳定,但是平衡状态一经打破便进入破坏阶段而无法返回)的“危机状态”之中^[60]。这种准稳定的“危机状态”是河流自身组织产生的。围绕着这种危机状态,河流即使受到一些极其微小的扰动也会发生许多剧烈的波动与变化。河流的沉积过程本身,就是一个既受自旋回影响又受异旋回影响的过程,所以河流自身的运转特性,决定了河流沉积的难以预测。因此,我们应更多地考虑河流沉积的复杂性,从而指导我们去准确识别河流

沉积记录。并通过对河流沉积记录的正确识别来明确层序格架中沉积相的类型。

4 结 论

河流相层序地层学研究,是我国层序地层学家在国际上对层序地层学概念体系发展、生产实践运用、技术手段创新等方面贡献最大的研究领域,直到今天还在不断涌现着新的研究成果。

(1)早期的近滨线河流相层序模式,受Exxon学派的影响较深,沿用了经典海相层序地层学中“常规体系域”的名称及其术语,但是我们现在应该明确,在超越岸线的内陆地区,海平面变化并不是河流层序形成的主因,因而“常规体系域”就不能无限制地使用。河流层序的形成,由可容纳空间的变化所导致,因此,用可容纳空间定义的“非常规体系域”,即低—高可容纳空间体系域的出现,是河流相层序地层学最重要的进展之一。

(2)虽然众多学者已经在一些内陆盆地建立了特定的河流相层序地层模式,但由于同一研究区域构造活动复杂、相变频繁,致使不同学者所建立的层序格架不尽相同。这是河流层序模式选用混乱所造成的,所以未来河流相层序地层学最重要的发展方向应是特定沉积环境下特定河流层序模式的选用,融合河流沉积学、层序地层学、河流地貌学的知识,以控制河流基准面变化的主要影响因素为线索,来区分河流层序模式。

(3)河流的沉积过程本身,就是一个改变地表环境的过程,这是一个复杂的非线性过程,它同时具有河流的自组织临界性,这些决定了河流的地质记录更加复杂多变。在大量发育河流相地层的内陆沉积盆地中,差异构造作用导致层序界面、沉积微相组合、地层叠置方式等从造山带向克拉通发生明显的变化。至今河流相层序地层学在体系域划分、层序内相对等时对比、基准面识别等方面均存在着诸多问题与争议。在前人研究的基础上,探求一种受构造和气候影响因素控制的适用于我国内陆地区的非常规体系域河流层序模式,是河流相层序地层学的一个发展方向。

参 考 文 献

- [1] Miall A D. Whither stratigraphy?[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 100(1/4): 5-20.
- [2] Sloss L L, Krumbein W C, Dapples E C. *Integrated facies*

- analysis[C]// Longwell C R. Sedimentary facies in geologic history. United States: Geological Society of America Memoir 39, 1949: 91-124.
- [3] Sloss L L. Stratigraphic models in exploration[J]. AAPG Bulletin, 1962, 46(7): 1050-1057.
- [4] Sloss L L. Sequence in the cratonic interior of North America [J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(2): 93-114.
- [5] Mitchum R M Jr, Vail P R, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis[C]// Payton C E. Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir 26, 1977: 53-62.
- [6] Payton C E. Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration[M]. AAPG Memoir 26, 1977: 1-516.
- [7] Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. Sea level changes: An integrated approach[M]. SEPM Special Publication 42, 1988: 1-407.
- [8] 徐怀大, 魏魁生, 洪卫东, 等. 层序地层学原理——海平面变化综合分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [9] 纪有亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [10] 徐怀大. 陆相层序地层学研究中的某些问题[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 83-89.
- [11] Mailh A D. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correlation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(4): 497-505.
- [12] 梅冥相. 从不整合面复杂的地质涵义窥视层序地层学的诞生: 层序地层学重要的科学命题之一[J]. 地层学杂志, 2011, 35(2): 179-192.
- [13] 梅冥相, 杨欣德. 强迫型海退及强迫型海退楔体系域——对传统 Exxon 层序地层学模式的修正[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 17-21.
- [14] 梅冥相. 从正常海退与强迫型海退的辨别进行层序界面对比: 层序地层学进展之一[J]. 古地理学报, 2010, 12(5): 549-564.
- [15] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: Concepts and applications[M]. SPEM Series, Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 2000: 1-204.
- [16] Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [17] Wright V P, Marriott S B. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: The role of floodplain sediment storage[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(3/4): 203-210.
- [18] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
- [19] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [20] 张周良. 河流相地层的层序地层学与河流类型[J]. 地质论评, 1996, 42(增刊): 188-193.
- [21] Zhang Zhouliang, Sun Keqin, Yin Jiarun. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Shanxi Formation (Lower Permian) in the northwestern Ordos Basin, China: An alternative sequence model for fluvial strata [J]. Sedimentary Geology, 1997, 112(1/2): 123-136.
- [22] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level fall[J]. Sedimentary geology, 1992, 81(1): 1-9.
- [23] 程日辉, 刘招君, 王东坡, 等. 陆相盆地充填层序的类型——以辽西地区中生代盆地为例[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 166-170.
- [24] 董清水, 刘招君, 方石, 等. 论陆相层序地层学四分方案的可行性[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 324-327.
- [25] 郭巍, 刘招君, 董清水. 断陷湖盆层序地层格架中的油气聚集规律——以松辽盆地为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2002, 32(3): 233-237.
- [26] 胡光明, 王军, 纪有亮, 等. 河流相层序地层模式与地层等时对比[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 745-751.
- [27] 胡光明, 倪超, 王军, 等. 河流层序地层学研究现状与存在问题[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 55-59.
- [28] Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322-350.
- [29] 邓宏文, 王洪亮, 李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90-95.
- [30] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97.
- [31] 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地地下白垩统扶余油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 621-627.
- [32] 姜在兴. 层序地层学研究进展: 国际层序地层学研讨会综述[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 1-8.
- [33] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535-541.
- [34] Embry A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1993, 30(2): 301-320.
- [35] 李绍虎. 对国外层序地层学研究进展的几点思考及 L—H—T 层序地层学[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 735-744.
- [36] 李绍虎. 浅议层序边界[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 20-31.
- [37] 章雨旭. 地质学研究中常见逻辑方面的问题分析[J]. 高校地质学报, 2006, 12(1): 147-152.
- [38] Blum M D, Tornqvist T E. Fluvial response to climate and sea-level change: A review and look forward[J]. Sedimentology, 2000, 47(suppl.1): 2-48.
- [39] Catuneanu O, Beaumont C, Waschbusch P. Interplay of static loads and subduction dynamics in foreland basins: Reciprocal stratigraphies and the "missing" peripheral bulge [J]. Geology, 1997, 25(12): 1087-1090.
- [40] 吴因业, 朱如凯, 罗平, 等. 沉积学与层序地层学研究新进展——第 18 届国际沉积学大会综述[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 199-206.
- [41] 吴因业, 张天舒, 张志杰, 等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 69-81.
- [42] Jiang Zaixing, Lu Hongbo, Yu Wenquan, et al. Transformation of accommodation space of the Cretaceous Qingshankou Formation, the Songliao Basin, NE China[J]. Basin Research, 2005, 17(4): 569-580.
- [43] Olsen T, Steel R, Hogseth K, et al. Sequential architecture in a fluvial succession: Sequence stratigraphy in the upper

- Cretaceous Mesaverde Group, Price Canyon. Utah[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(2): 265-280.
- [44] Dahle K, Flesja K, Talbot M R, et al. Correlation of fluvial deposits by the use of Sm-Nd isotope analysis and mapping of sedimentary architecture in the Escamilla Formation (Ainsa Basin, Spain) and the Staffjord Formation (Norwegian North Sea) [C]// Six International Conference on Fluvial Sedimentology, Cape Town. 1997: 47-48.
- [45] Fanti F, Catuneanu O. Fluvial sequence stratigraphy: The Wapiti Formation, west-central Alberta, Canada[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(4): 320-338.
- [46] Miall A D. The geology of stratigraphic sequences [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 1-433.
- [47] Bridge J S. Fluvial facies models: Recent developments [C]// Posamentier H W, Walker R G. Facies models revised. SEPM Special Publication 84, 2006: 85-170.
- [48] Miall A D. Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(7): 1201-1216.
- [49] Catuneanu O, Elango H N. Tectonic control on fluvial styles: The Balfour Formation of the Karoo Basin, South Africa[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(3/4): 291-313.
- [50] 吴因业, 邹才能, 胡素云, 等. 全球前陆盆地层序沉积学新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 606-614.
- [51] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth Science Reviews*, 2009, 92(1/2): 1-33.
- [52] Arnott R W C, Zaitlin B A, Potocki D J. Stratigraphic response to sedimentation in a net-accommodation-limited setting, Lower Cretaceous basal quartz, South-Central Alberta [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2002, 50 (1): 92-104.
- [53] Zaitlin B A, Warren M J, Potocki D, et al. Depositional styles in a low accommodation foreland setting: An example from the basal quartz (Lower Cretaceous), Southern Alberta [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2002, 50 (1): 31-72.
- [54] Bull W B. Stream-terrace genesis: Implications for soil development[J]. *Geomorphology*, 1990, 74(3/4): 351-367.
- [55] Holbrook J M. Complex fluvial response to low gradients at maximum regression: A genetic link between smooth sequence-boundary morphology and architecture of overlying sheet sandstone [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(4): 713-722.
- [56] 国景星, 戴启德, 吴丽艳, 等. 冲积—河流相层序地层学研究[J]. *石油大学学报*, 2003, 27(4): 15-19.
- [57] Gibling M R, Tandon S K, Sinha R, et al. Discontinuity-bounded alluvial sequences of the southern Gangetic Plains, India: Aggradation and degradation in response to monsoonal strength [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(3): 369-385.
- [58] 田景春, 陈洪德, 覃建雄, 等. 层序底界面的物质表现形式——以中国南方海相震旦系—中三叠统为例[J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 675-682.
- [59] Coulthard T J, Van De Wiel M J. Quantifying fluvial non linearity and finding self organized criticality? Insights from simulations of river basin evolution [J]. *Geomorphology*, 2007, 91 (3/4): 216-235.
- [60] Van De Wiel M J, Coulthard T J. Self-organized criticality in river basins: Challenging sedimentary records of environmental change [J]. *Geology*, 2010, 38(1): 87-90.

编辑: 金顺爱

From Conventional Systems Tracts to Unconventional Systems Tracts: An Important Progress of Fluvial Sequence Stratigraphy Research

Zhang Xuanwei

Abstract: The sequence stratigraphy which originates from the shoreline siliciclastic sedimentary environment has been used in the fluvial strata which have a link with the sea level changes. It results in forming the conventional systems tracts models of fluvial sequence which include lowstand systems tract(LST) and transgressive systems tract(TST) and highstand systems tract(HST). With deep research in the inland sedimentary environments which have not correlated with the sea level changes, the early division of fluvial sequence that is used in the shoreline sedimentary systems tracts is inconsistent, so the concept of low- and high-accommodation systems tracts (LAST and HAST)(unconventional systems tracts) is raised, which represents the latest research progress in fluvial sequence stratigraphy. The concept convert from conventional systems tracts to unconventional systems tracts will provide important clues and ideas for studying complex fluvial deposition process and extracting stratigraphic record rules.

Key words: Fluvial facies; Sequence stratigraphy; Systems tract; Research progress

Zhang Xuanwei; male, M.S. degree in progress at China University of Geosciences (Beijing). Add: Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China