

文章编号:1000-0550(2011)04-0613-09

# 岷岷湖现代水下加积扇与东坳里三角洲 层序地层学意义比较

李绍虎<sup>1,2</sup> 周继兵<sup>3</sup> 贾丽春<sup>4</sup> 王昭辉<sup>3</sup> 李宝庆<sup>1</sup> 马风华<sup>1</sup> 王程<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学资源学院 武汉 430074; 2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;

3. 新疆地矿局第九地质大队 乌鲁木齐 830000; 4. 山西省第三地质工程勘察院 山西榆次 030600)

**摘要** 对比研究东坳里三角洲(East Coulee Delta)和岷岷湖现代水下加积扇的层序地层学意义,认为:(1)东坳里三角洲发育 LST—TST 组合、FSST 组合,其分属两个层序;(2)岷岷湖 SAF 发育 FSST—LST—TST 组合、FSST 组合,亦分属两个层序;(3)两个陆相实例证明最大水泛面之后均未有高位体系域出现,可能代表非海相与海相背景之间的差异。论文对复合层序边界等问题进行了讨论。

**关键词** 岷岷湖现代水下加积扇 东坳里三角洲 层序地层学 下降期体系域 避免高位正常海退

**第一作者简介** 李绍虎 男 1964 年出生 博士 教授 沉积学 三维可视化 E-mail: shaohuli@cug.edu.cn

**中图分类号** P539.2 **文献标识码** A

## 0 引言

层序地层学发展历经 30 多年,流派纷呈,划分方案不尽一致<sup>[1~5]</sup>。Catuneanu 等<sup>[2,3]</sup>力推层序地层学标准化工作,他们的基本出发点是“求同存异”,寻求各方能够接受的协调方案。鉴于层序地层学理论及其概念源自地震地层学,众多模式的建立多数基于古代地层露头、钻井测井、地震资料相结合,由于露头局限、钻井对比、地震剖面分辨率等因素影响,因此有必要通过现代露头对比研究,以期丰富和完善层序地层学模式。

1989 年 4 月,Posamentier 考察了加拿大阿尔伯特省东坳里三角洲,将其与受相对海平面波动控制的较大的沉积盆地边缘进行类比,由此得出层序地层学概念与时间长短和规模大小无关;而且认为东坳里三角洲层序地层学实例可以为沉积盆地边缘演化的研究提供可供参考的三维立体分析方法,其比较意义均源自露头尺度发育的等时性特征的精细描述和对比。然而由于沉积物结构疏松而未固化导致东坳里三角洲内部构型难以识别<sup>[1]</sup>,尤其是 Posamentier 将东坳里三角洲表面的冲沟(深切谷)解释为“微量”湖平面下降造成的,从而得出东坳里三角洲自下而上发育的单元 A、B、C + D 依次对应于高位体系域、海侵体系域和低位体系域,与当时流行的三分模式(低位体系

域—海侵体系域—高位体系域)难以吻合。但是至少 Posamentier 解释的东坳里三角洲的层序地层学意义,开创了层序地层学研究除了基于钻孔测井、露头、地震之外还可以借助现代露头加以类比的先例。Catuneanu<sup>[3]</sup>对此认为“东坳里三角洲证明层序地层学概念可以用于任意尺度”。

2007 年夏天,李绍虎在新疆准噶尔盆地岷岷湖地区考察了多个水坑中的多个平顶扇,通过野外揭露将其命名为岷岷湖现代水下加积扇(Jijihu modern subaqueous aggradational fan—SAF),沙漠地带干热风气候使得岷岷湖 SAF 得以完整保存。将其清晰的内部叠置构型以及附近发育的水下加积扇构型,与东坳里三角洲进行比较,有助于从自然实验角度了解层序发育全过程。

## 1 东坳里三角洲层序地层学解释

东坳里三角洲侧向宽约 2.3 m,纵向长约 1.8 m。物源补给水沟宽约 2.8 m,长约 30 m,沟中部最大深度 50 cm,最小深度约 10 cm。该三角洲实例主要由三个三角洲朵叶 A、C、D 构成,分别对应于单元 A + 单元 B、单元 C、单元 D(图 1、2、3)。由于难以弄清楚沉积中单元的内部地层型式,因而所描述的物理地层学是建立在外部地貌学基础上的<sup>[1]</sup>。

Posamentier 对于该三角洲层序地层学描述如下:

收稿日期:2010-11-05; 收修改稿日期:2011-01-15

(1) 单元 A 被认为与湖面较高水位有关,随着湖面上升三角洲是前积还是后退,取决于沉积物通常与湖水面上升有关的容纳空间的增大速率的比值, Posamentier 选择了类似于现在广为接受的低位正常海退的加积 + 前积作用解释(图 3(a))(注:正常海退——物源补给超过基准面上升速率时随着海平面上升而出现的岸线朝海推进的前积<sup>[1]</sup>,分为低位正常海退和高位正常海退两类<sup>[3]</sup>),并且将单元 A 解释为高位体系域;对此, Catuneanu 也认为东珂里三角洲高位体系域随后被下切切割。本文作者认为:这些都源自经典层序地层学就高位体系域之后出现不整合面作为层序边界的设定,为了满足这一设定, Posamentier 恰恰在高位体系域(单元 A)顶部解释出了不整合面——深切谷“x”,其理由是深切谷“x”消失于陡崖 2 的单元 B 之下,且在单元 A 光滑面之上(图 2)。



图 1 东珂里三角洲( Posamentier 等, 1992)

Fig. 1 East Coulee Delta ( Posamentier , et al. , 1992)

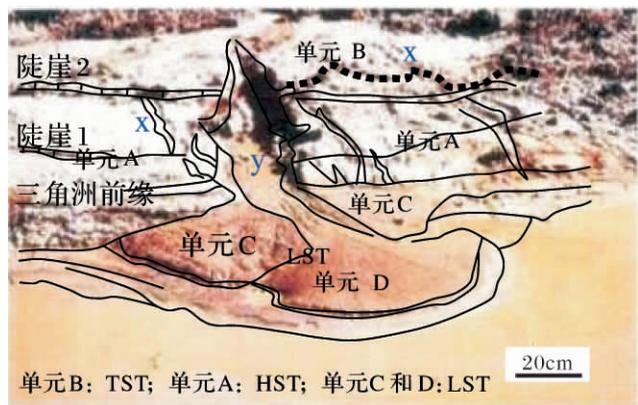


图 2 东珂里三角洲解释( Posamentier 等, 1992)

Fig. 2 Interpretation for East Coulee Delta

( Posamentier , et al. , 1992)

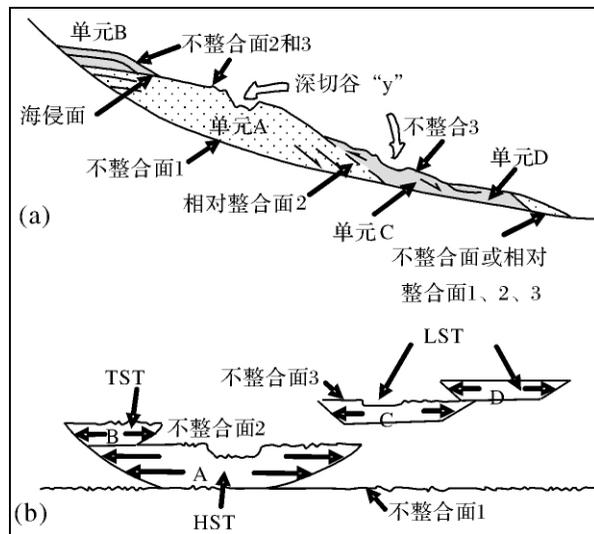


图 3 东珂里三角洲解释剖面与 Wheeler 图<sup>[1]</sup>

Fig. 3 The interpreting profile and Wheeler diagram of East Coulee Delta ( Posamentier , et al. , 1992)

(2) 由于湖水面上升速率的降低和湖水面逐渐停滞,造成海岸后退并导致单元 B 的推进作用<sup>[1]</sup>。因为深切谷“x”消失于陡崖 2 的单元 B 之下,而且在单元 B 顶部,其表面结构明显不同。单元 A 顶部表面结构较光滑,类似于海泛事件以后海水不断冲刷改造的结果,最终揭示了单元 B 并非海侵的产物<sup>[1]</sup>。然而, Posamentier 却将单元 B 解释为海侵体系域,其叠置构型(图 3a),表现为水面上升速率降低伴随的岸线推进式前积——现行高位正常海退。既非海侵产物而构型又为前积叠置,这类海侵体系域解释,表明 Posamentier 等对单元 B 的解释应该受到沉积物未固化而建立在地貌学的基础上描述的影响<sup>[1]</sup>。参照后面岷岷湖现代水下加积扇解释,东珂里三角洲 B 单元可以类比岷岷湖 SAF 的退积砂砾层 + 泛泥砂层,实属海侵体系域,而叠置构型属于退积而非前积。

(3) 单元 C 和单元 D。Posamentier 将单元 C 解释为类似于强迫海退成因,即为海岸向海不连续跳跃下降的产物;新的湖水面下降会造成新的强迫海退单元 D。两者均被解释为低位体系域。据 Plint 和 Nummedal<sup>[8]</sup>的观点,强迫海退(楔)体系域(FRW-ST—forced wedge regressive systems tract<sup>[4, 5]</sup>; FRST—forced regressive systems tract<sup>[6]</sup>、下降海平面体系域(FSST—sea-level falling systems tract<sup>[7]</sup>和下降期体系域(FSST—falling stage systems tract<sup>[8]</sup>; 强调一个类似的问题且达到类似的结果。Catuneanu 指出强迫海退体系域就是下降期体系域<sup>[2]</sup>。因此, Posamentier

解释的东坷里三角洲单元 C 和单元 D 实际上就是现行的下降期体系域( FSST )。

由此可见, Posamentier 等<sup>[1]</sup>解释东坷里三角洲划分的高位体系域、海侵体系域、低位体系域 相互间均以不整合面为界, 实为 HST—TST—FSST。然而这一组合 既不同于经典三分 LST—TST—HST, 有不同于现行四分 FSST—LST—TST—HST<sup>[7]</sup>。因此, 有必要选择内部结构发育和保存完整的炭炭湖现代水下加积扇作为补充和修正。正如 Posamentier 等指出: “是检验海侵海退格架正确性以及评价其年代等时性的时候了”<sup>[9]</sup> 而且以 Embry 为代表的 ISSC( 2007) 也强调露头实验证据支持的必要性 本次仅采用陆相现代露头实例类比, 暂不涉及海陆背景差异。

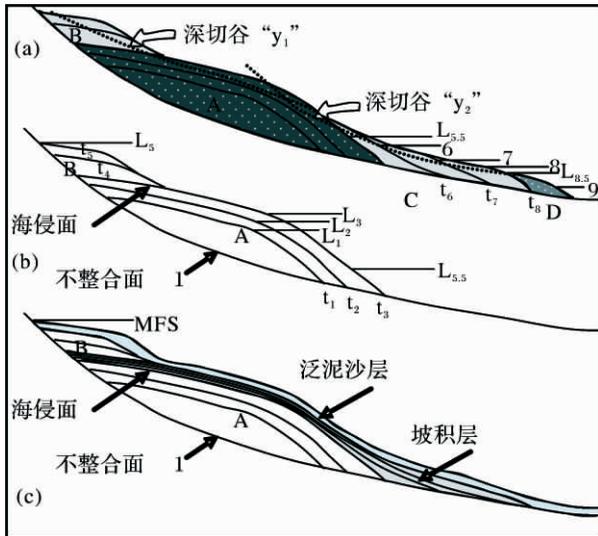


图 4 东坷里三角洲重新解释

Fig. 4 the reinterpretation for East Coulee Delta

## 2 炭炭湖 SAF 层序地层学解释

炭炭湖现代水下扇发育于 2007 年 7 月淮东( 淮噶尔盆地东部) 大洪水期间, 富含泥沙的洪水注入水体之后, 沙漠腹地干热风气候迅速将水层大部蒸发, 从而记录下低水位到最高水位全部自然机械搬运过程; 随后的洪水进一步冲刷改造, 恰似一个天然层序地层学实验室。考察区域发育至少 6 处构型类似的水下加积扇, 其中最大的水下加积扇( 图 5、6) 底部收敛角度 12°、扇角 148°、扇面坡角 0°、弧长 24 m、半径 10 m, 规模远大于东坷里三角洲露头。

与 Posamentier 等解释的东坷里三角洲相比, 炭炭湖现代水下加积扇发育有 A、B、C、D 四个单元( 图 5), 分别对应于加积扇、扇顶退积层 + 泛泥砂层、冲积扇 2、冲积扇 3; 此外, 还发育有加积扇下伏的冲积

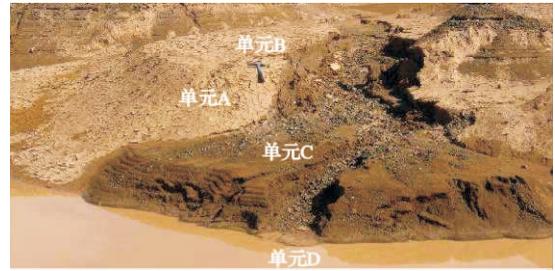


图 5 炭炭湖现代水下加积扇

Fig. 5 Jijihu modern subaqueous aggradational fan ( SAF)

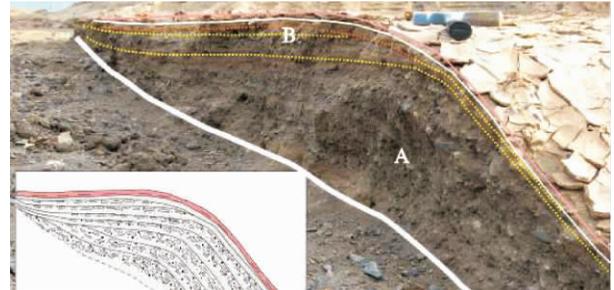


图 6 冲沟左侧剖面( 镜像)

Fig. 6 the enantiomorphic profile of SAF on the left side of ditch

扇 1、扇前坡积层( 图 7)。自下而上:

(1) 老的冲积扇 1, 位于加积扇之下, 开挖揭露表明两者之间夹有一层厚 2 mm 的纯红泥层, 代表最低水位, 可以类比现行的下降期体系域 FSST。

(2) 单元 A, 为水下加积扇主体, 主要由多个砂砾韵律层构成, 冲刷露头上表现为物源补给超过水面上升而形成的岸线向水体推进的前积, 按照现行层序地层学四分方案单元 A 可以类比为低位正常海退期( LNR—lowstand normal regression) 的低位体系域沉积。

(3) 扇前坡积层( B<sub>1</sub>)、扇顶退积层( B<sub>2</sub>)、全区泛泥沙层( B<sub>3</sub>) , 这三个亚单元只有扇顶退积层( B<sub>2</sub>) 可以与东坷里三角洲 B 单元类比, 但是 Posamentier 将其解释为前积( 应该是由由于沉积物结构疏松未固化难以弄清楚沉积中单元的内部地层型式所致), 划分为海侵体系域; 比较而言, 扇前坡积层( B<sub>1</sub>) 和全区泛泥沙层( B<sub>3</sub>) 在东坷里三角洲未见发育, 前者可能由于三角洲前缘不够陡峭所致, 而后者则源自东坷里三角洲泥沙含量较低, 且没有足够干热条件蒸发保留这部分泥质沉积。B<sub>1</sub> 亚单元发育于水体淹没加积扇平台近于 0° 的扇顶而物源补给以细粒为主阶段, 扇前回流将细粒沉积物带入扇前沉积下来, 形成独特的斜交扇坡的三角形层理( 图 8( a) ); 之后随着水位逐渐上升淹没加积扇扇面, 发育两层退积砂砾层 B<sub>2</sub>( 图

8(b));直至水位上升淹没整个,加积扇全部位于水面之下,补给通道与水体近于等深或淹没,物源补给停止或以泥质为主,发育泛泥沙层 $B_3$ (图(8c)),覆盖整个水体,得益于高含泥沙水体在沙漠干热风作用下的蒸发沉淀作用;甚至于包括补给水道亦见蒸发后沉淀的泥沙层,由此可见全区泛泥沙层在沙漠干热风气候条件下完整地记录下了最高水位沉积,这一点东

坳里三角洲无法媲美。因此,亚单元扇前坡积层( $B_1$ )、扇顶退积层( $B_2$ )、全区泛泥沙层( $B_3$ )可以同类比为海侵体系域。关于这方面的地下实例已经有很多报道,诸如 Vail 等<sup>[10]</sup>解释的德克萨斯 Woodbine 三角洲的伍德拜恩砂岩与伊葛福德组页岩、Borneo 西北部第四纪 Baram 三角洲上部楔形体<sup>[11]</sup>、东欧 Pannonian 盆底河流三角洲体系楔形

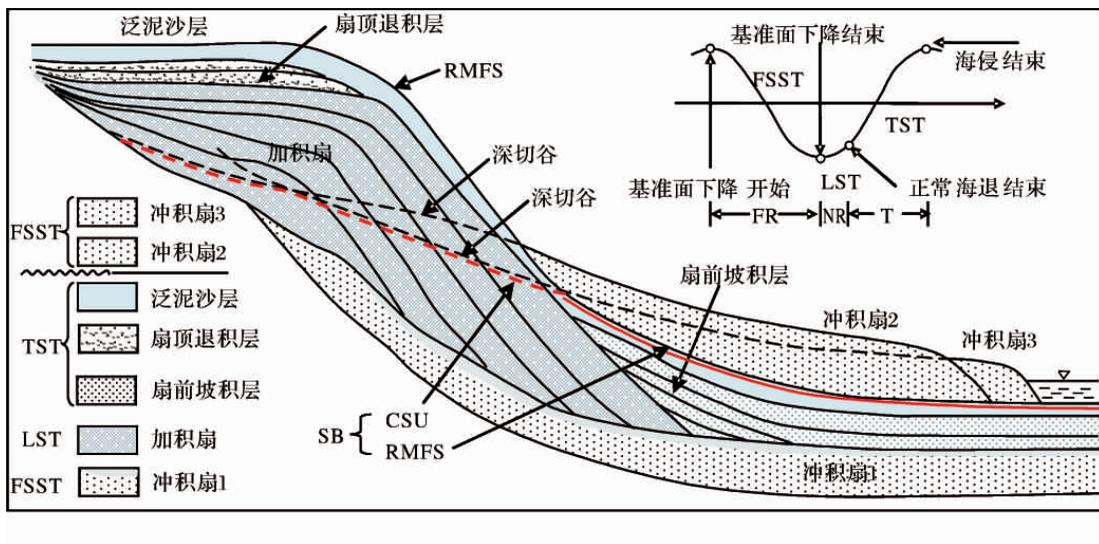


图7 岌岌湖现代水下加积扇内部叠置构型及其对应的基准面曲线(缩写:FSST—下降期体系域,LST—低位体系域;TST—海侵体系域;FR—强迫海退,NR—正常海退,T—海侵;RMFS—残留最大水泛面,CSU—相对应的不整合面)

Fig.7 The stacking patterns and its correlative base level curve of Jijihu modern subaqueous aggradational fan ( abbreviation: FSST—falling stage systems tract; LST—lowstand systems tract; TST—transgressive systems tract; FR—forced regression; NR—normal regression; T—transgression; RMFS—remnant maximum flooding surface; CSU—correlative subaerial unconformity)

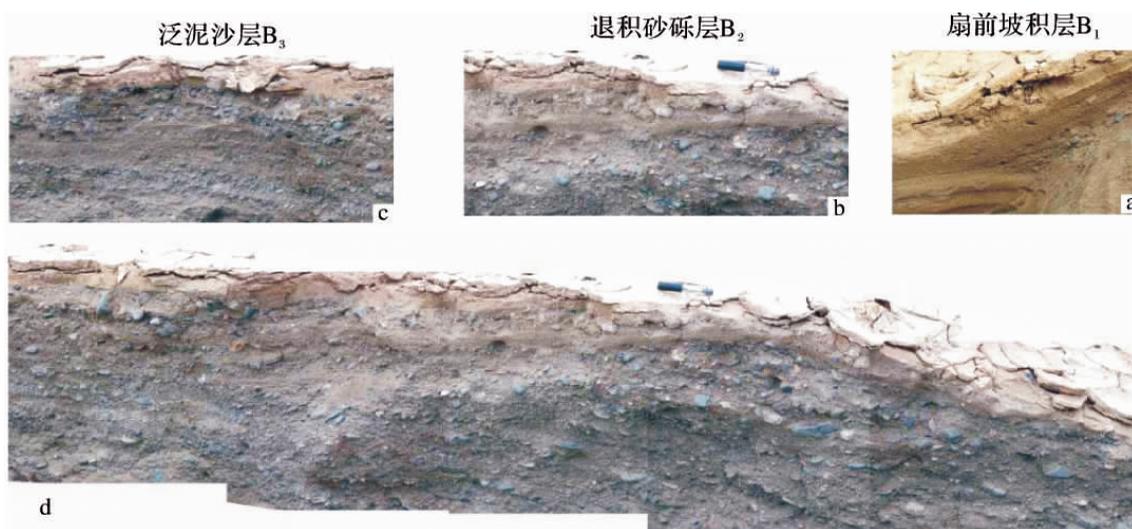


图8 岌岌湖现代水下加积扇发育的扇前坡积层(a)、退积砂砾层(b)、全区覆盖的泛泥沙层(c)及其冲刷剖面(d)。其中扇前坡积层揭露自该水下加积扇(图5)对面的加积扇。

Fig.8 The slope beds (a), retrogradational gravel-sand beds (b), flooding sand-mud beds (c) and cutting profile (d) of Jijihu modern subaqueous aggradational fan. The slope beds is dug from another SAF opposite to the SAF in Fig.5.

体<sup>[12]</sup>、墨西哥湾楔形体<sup>[3]</sup>、意大利亚得里亚海陆架更新世模型<sup>[13]</sup>、挪威西部海相冰碛层<sup>[14]</sup>、希腊科林斯湾 Vouraikos 吉尔伯特扇三角洲上的红泥盖层<sup>[15]</sup>等等; 这些实例都将有助于层序地层学模式的再认识。

(4) 冲积扇 2、冲积扇 3, 可以类比东珂里三角洲的单元 C、单元 D, 属于另一期洪水所致, 由于其规模较上一期要小, 但是依然对水下加积扇主体冲刷破坏, 这也使得我们有机会认识强迫海退形成机制。如同 Posamentier 解释的那样, 冲积扇 2、冲积扇 3( 它们的坡角远大于东珂里三角洲朵叶) 属于“海岸向海不连续跳跃的产物”, 也正是强迫海退期所特有的; 因此这两个单元可以类比现行的下降期体系域。

综上所述, 岌岌湖 SAF 自下而上可以类比为 FSST—LST—TST 组合( 冲积扇 1—加积扇—扇前坡积层 + 扇顶退积层 + 全区泛泥沙层), 以及一个独立的 FSST( 冲积扇 2 + 冲积扇 3), 分属两个层序。层序边界位于 FSST 之下, 亦即层序边界位于最大水泛面位置( 不整合面形成起始时间); 受到后期深切谷切割, 使得层序边界变成复合边界——水体( 盆地) 内部残留最大水泛面及其相对应的不整合面, 为深切谷下切破坏泛泥沙层顶部而形成或地面侵蚀而成( 图 5~7)。这是岌岌湖水下加积扇对层序地层学最为重要的启示——基于实验( empirically-based, ISSC, 2007) 的证据支持“残留最大水泛面及其相对应的地面不整合面作为沉积层序边界”<sup>[19]</sup>。

《Sedimentary Geology》主编 Weltje 教授在审稿意见中赞成最大水泛面放在水下加积扇顶部的解释, 而且他也认为岌岌湖现代水下加积扇显示的是一个尺度的 FSST—LST—TST 叠置实例( small-scale example of an FSST—LST—TST superposition)。

### 3 东坎里三角洲重新解释及其与岌岌湖 SAF 的比较

Posamentier 等<sup>[9]</sup>将东珂里三角洲层序地层学划

分为 HST—TST—LST( 实为 FSST) 组合, 沉积物未固结而难以识别内部结构进而采用外部地貌为基础推断; 岌岌湖现代水下加积扇内部叠置构型十分清晰, 露头及开挖揭露可以识别出 FSST—LST—TST、FSST 两个叠置组合, 分属两个层序。尽管东珂里三角洲单元 A、B、C、D 在岌岌湖 SAF 中均有发育, 但是后者还发育了加积扇下面的冲积扇 1、扇前坡积层 B<sub>1</sub>、全区泛泥沙层三个( 亚) 单元( 表 1)。

众所周知, 1992 年以前国际层序地层学界以经典三分模式为主, 即为 LST—TST—HST 组合; 之后随着 Hunt 和 Tucker 首次提出四分方案 FRST—LST—TST—HST<sup>[4]</sup>, Helland-Hansen 和 Gjølberg 正式采用 LST—TST—HST—FSST 方案<sup>[6]</sup>, 再到 Catuneanu<sup>[16]</sup>沿用 LST—TST—HST—FSST 分类, 而在 2005 年之后 Catuneanu 对比层序地层学五大流派开始将 FSST 类比为早期 LST、晚期 HST<sup>[17]</sup>, 形成将原来经典层序地层学三分方案中 LST 的两扇( 盆底扇 + 斜坡扇)、低位前积楔分别为解体 FSST、LST, 在原三分基础上构成 LST—TST—HST—FSST 方案, 至今五大方案无法统一。这也是 Catuneanu 等<sup>[3]</sup>最为倾向的层序地层学划分方案; 具体在基准面曲线上, FSST、LST、TST、HST 分别对应于 FR( forced regression 强迫海退)、LNR( lowstand normal regression 低位正常海退)、T( transgression 海侵)、HNR( highstand normal regression 高位正常海退)。

由于没有进行地下开挖揭露, Posamentier 不能确定东珂里三角洲单元 A 之下的发育情况; 从其三角洲描述看, 最为关键的陡崖 1 和陡崖 2 被其解释为浪蚀面侵蚀形成, 最为重要的“x”深切谷因其出现在单元 B 的底部而解释为“微量”的湖水面下降造成的, 据此解释出现不整合面将单元 A 与单元 B 分开<sup>[1]</sup>, 分别类比为高位体系域和海侵体系域。

其实不然, 证据如下: ( 1) 从 Posamentier 提供给 Catuneanu 的彩色照片可以清晰地看出, 深切谷“y”

表 1 岌岌湖 SAF 与东珂里三角洲层序地层单元比较

Tale 1 Sequence units comparison between Jijihu SAF and East Coulee Delta

东珂里三角洲	体系域	本文	层序	岌岌湖 SAF		体系域	层序
单元 D( 三角洲朵叶)	LST	FSST	?	冲积扇 3	单元 D	FSST	层序 2
单元 C( 三角洲朵叶)				冲积扇 2	单元 C		
				全区泛泥沙层	单元 B	TST	层序 1
单元 B( 推测前积结构)	TST	TST	?	扇顶退积砂砾层			
				扇前坡积层			
单元 A( 主体三角洲朵叶)	HST	LST	?	加积扇	单元 A	LST	
?		?		冲积扇 1		FSST	

的右侧单元 B 之下均有这种类似“x”深切谷的冲沟出现,甚至于延伸至单元 C 部分,说明“x”深切谷的形成可能为“微量”湖水面下降所致,但不排除湖水面加速下降过程中,如强迫海退机制下,饱和水的沉积物在水位急剧下降时可以自然排水形成冲沟。(2)在深切谷“y”右侧可以看出,“x”深切谷可以延伸至单元 B 顶部(图 1、2),也可能是单元 C、单元 D 洪水期在单元 A 顶部形成的雨水冲沟改造叠加。因此,正如岌岌湖 SAF 所揭示的那样,真正的层序边界在下切谷“y”而非陡坎上的“x”,后者不能类比为不整合面 2(图 3)将单元 A 和单元 B 分开,因此他们所解释的 HST 实际上等同于现在的物源补给充足条件下水位上升岸线超水体迁移的低位正常海退期沉积的 LST。

据以上分析,并且参考岌岌湖 SAF 发育过程,我们认为东坳里三角洲单元 A、B 应该属于水位上升阶段形成的产物。其中单元 A 类似于低位正常海退期间的加积+前积(图 3(a)),按照现行四分方案可以重新类比为低位体系域;单元 B 类似于海侵期间岸线朝陆迁移后退,其叠置构型应该为退积叠置,而非 Posamentier 等推断的前积(图 3(a)),可以类比为海侵体系域。换言之,单元 A 和单元 B 属于连续沉积,其间不存在不整合面(图 4(a)、(b)、(c)),即不存在图 3 所解释的不整合面 2。与岌岌湖 SAF 不同的是由于三角洲坡度不及岌岌湖现代水下加积扇而少有类似加积扇前的坡积层发育(图 4(c));最为遗憾的是泥沙含量低于岌岌湖地区,而未形成全区覆盖的泛泥沙层蒸发沉淀;如果有这些天然条件存在,相信覆盖层的风干泥裂(图 6)足以将单元 C 和单元 D 区分为两期洪水事件的产物,可以类比为跳跃式强迫海退期的下降期体系域 FSST。松散沉积物未有固化,连同泥沙含量低且无干旱蒸发条件,致使东坳里三角洲的层序地层学意义没能充分显现。

总之,东坳里三角洲可以看成两期洪水事件的产物,单元 A 和单元 B 组合为 LST-TST,单元 C 和单元 D 为另一层序的 FSST(表 1)。比较岌岌湖现代水下加积扇和东坳里三角洲叠置构型,不难发现两个现代陆相实例具有极高的相似性(图 4、图 4(c)和表 1)。

## 4 讨论——岌岌湖现代水下加积扇(SAF)的启示及相关问题

### 4.1 层序边界在哪里?

东坳里三角洲和岌岌湖现代水下加积扇最大的

贡献在于其解决了层序边界位置长期争论。

东坳里三角洲单元 A 的加积+前积构型到单元 B 的退积构型(可以参考岌岌湖 SAF)表明沉积物注入在最大水泛即已终止,层序结束;随着水位降低,在单元 B 和单元 A 形成溃岸崩塌成因的陡崖 2 和陡崖 1,过饱和水从未固化的沉积物中排泄出来,形成深切谷“x”,代表单元 A 和单元 B 的共同效应而非将其分割开来;随着新一轮洪水注入,两期深切谷“y”先后叠加改造(同样会改造深切谷“x”),以跳跃式强迫海退形成前积叠置单元 C 和单元 D;从而通过不整合面(图 3 中的“y”和图 4 中的“y1”、“y2”)将单元 A—单元 B 与单元 C—单元 D 分开为两个层序。

两个现代实例表明:不整合面空间上分开两个层序在倾向方向的效应远小于走向。如前所述,单元 B(TST)顶部的最大水泛面被深切谷“x”改造,又为两期深切谷“y”所改造,残留最大水泛面(单元 C 和单元 D 分别覆盖的最大水泛面盆地残留部分和 TST 顶部未被改造的残留部分)、深切谷“x”(边缘上)、深切谷“y”(斜坡上)三部分空间展开(图 2、7),才是真正的层序边界,即不整合面以“残留最大水泛面对应的不整合面”的形式参与层序边界,但是层序边界不全部以不整合面为界,还应包括残留最大水泛面部分。据此,李绍虎重新定义沉积层序边界“为残留最大水泛面及其相对应的不整合面”<sup>[18]</sup>。

岌岌湖水下加积扇则更为直接地基于实验支持:全区泛泥沙层所代表的最大水泛面,被后两期冲积扇 2 和冲积扇 3 的碎屑注入通道下切谷所切割,它们最终表现为一个复合层序边界——残留最大水泛面(冲积扇 2 和冲积扇 3 分别覆盖的最大水泛面盆地部分和 SAF 顶部残留最大水泛面)、相对应的地面不整合面(斜坡上的下切谷),进而将岌岌湖 SAF 分为两个层序,下伏 FSST—LST—TST,上覆 FSST(冲积扇 2 和 3)。

此外,层序真正的物理边界约束不是空间(不整合面)条件约束,而是时间条件约束,即为下伏层序结束的时间——最大水泛面所代表的时间,这个时间代表不整合面开始发育时间;不整合面伴随层序发育始终,老层序结束,新层序和不整合面即开始发育。传统意义上,之所以过于强调不整合面,是将其看成物理界面,而非看成“不整合体”;其形成具有开始时间下限(最老)和结束时间上限(最新),本该选择不整合体的开始时间下限作为层序边界,而我们长期以来却选择不整合体的时间上限——物理界面作为层

序边界 因此对于以等时性著称的层序地层学自然而然地引起了关于层序边界的长期争论。

#### 4.2 高位体系域问题

岌岌湖 SAF 是目前为止难得一见野外现代实体模型,其独特的自然条件完整地记录下了较之东坳里三角洲更为充分的层序发育证据信息。无论是岌岌湖 SAF 还是东坳里三角洲,都有一个共同的特点,它们的第一个层序分别为 FSST—LST—TST(岌岌湖 SAF)、LST—TST(东坳里三角洲),随后出现的均为另一层序的 FSST,而未发育高位体系域 HST。

按照现行四分模式对高位体系域的最新解释:海平面在海侵期后减速上升,前积速率随时间增加而加积速率随时间降低<sup>[3]</sup>,且要符合物源补给超过基准面上升的正常海退含义<sup>[2]</sup>。尽管 Posamentier、Catuneanu 认为层序地层学概念可以应用于任意尺度<sup>[1,17]</sup>,但是从岌岌湖 SAF 和东坳里三角洲天然露头发育情况看,确实未见 TST 之后前积 + 加积叠置的 HST。可能由于陆相背景下达到最高水位之后,物源注入通道的搬运能力下降导致碎屑无法进入水体所致;东坳里三角洲补给通道(水沟)长近 30 m,有无出现二次冲刷留下的痕迹,Posamentier 没有报道这方面的观察信息;岌岌湖 SAF 补给通道也有 15 m 长,除了冲积扇 2 和 3 形成期留下的红泥层之外,没有留下任何冲刷的痕迹。因此,两个现代陆相实体模型至少不能证实经典和现行层序地层学设定的海侵之后基准面减速上升出现朝海前积推进的高位体系域的存在。然而,对于海相环境 HST 确实存在,但是其解释机制并非高位正常海退,本文暂不涉及这方面的讨论,后续论文再作论述。

关于高位正常海退问题,李绍虎和贾丽春已经证明<sup>[19]</sup>:由于高位正常海退 HNR (highstand normal regression) 设定的不合理,导致现行四分模式 FSST—LST—TST—HST 中岸线迹线(shoreline trajectory)垂向变化(基准面曲线)1 周期,对应于岸线迹线侧向变化  $1 + 1/6$  周期(亦即 R—T 曲线),至少可以说明层序地层学三分、四分方案及其匹配的基准面曲线仅仅考虑到了岸线迁移的垂向分量,而忽视了侧向迁移分量约束。

现行层序地层学设定的高位体系域真正归属问题,有待深入研究<sup>[18,19]</sup>。国际上以 Catuneanu 为代表的 IWGSS 和 Embry 为代表的 ISSC 针对层序地层学标准化展开激烈地争论;Helland-Hansen 则撰文认为“层序地层学目前依然相对年轻,处于旺盛发展期,

被标准化的“冰封”概念原理将来非常有可能被改变”<sup>[20]</sup>。

#### 4.3 下降期体系域模式统一问题

下降期体系域 FSST,至今无统一模式:强迫海退(楔)体系域 FR(W) ST<sup>[4,5,6]</sup>、强迫海退沉积 FRD、下降海平面体系域 FSST (falling sea-level systems tract<sup>[7]</sup>)、下降期体系域 FSST<sup>[8]</sup> (Nummedal, 2000) 即便为同一问题的关注角度不同,尽管其被看成是经典三分模式中 LST 的两扇的分解成分<sup>[1]</sup>,但是上述体系域的模式构型之间存在较大歧义,有待进一步研究。

#### 4.4 沉积层序与成因层序、T—R 层序关系

层序地层学发展到四分方案并且被力荐层序地层学标准化,但是同为层序范畴却依然没能解决沉积层序与成因层序、T—R 层序边界对应关系问题。现实情况是:以沉积层序为准(即 FSST 开始),成因层序发育则要超前一个 HST(下伏层序的高位体系域),即成因层序跨越两个沉积层序;以沉积层序为准(即 FSST 开始),T—R 层序则要晚两个体系域(FSST 和 LST)发育 TST,且延至下一个层序的 LST 结束;这些都与高位正常海退 HNR 形成高位体系域 HST 这一设定有关,关键在于 HNR 而非 HST 本身。本文天然实体模型未见高位体系域,充分说明高位正常海退及其形成的高位体系域设置值得探讨;陆相现代实体模型未见 HST,不能将其推导至海相背景;李绍虎和贾丽春建议废除高位正常海退及其形成的高位体系域<sup>[19]</sup>,意在先废除或避免 HNR,再重新解释 HST 并配以相应的形成机制,相对而言,避免较废除语调更为合适。

## 5 结论

(1) 东坳里三角洲层序地层学单元分属两期洪水事件,分别可以类比为 LST(单元 A)—TST(单元 B)组合、FSST 组合(单元 C、D)。前者显示水位逐渐上升期物源补给超过水面上升的加积 + 前积,到最大水泛的退积,直至层序结束;后者显示类似强迫海退的跳跃式前积,新层序发育不完整。

(2) 岌岌湖 SAF 亦分属两起洪水事件,类比两个层序,分别为 FSST(冲积扇 1)—LST(加积扇)—TST(扇前斜坡层 + 扇顶退积砂砾层 + 全区泛泥沙层)组合、FSST 组合(冲积扇 2 和冲积扇 3)。前一组合完整地纪录了类似强迫海退直至水位最低的冲积扇 1——下降期体系域,到物源补给超过水位上升的

朝水体推进的前积+加积构型——低位体系域,再到扇前坡积、扇顶砂砾层楔形退积、最高水位时的全区泛泥砂层蒸发沉淀覆盖沉积——三者构成水(海)侵体系域;后一组合则为另一层序的类似强迫海退期的两个冲积扇2和3——下降期体系域。

(3) 两个陆相实例对比研究表明最大水泛之后均未高位体系域出现,可能代表非海相与海相背景之间的差异。

### 参考文献(References)

- Posamentier H W, Allen G P, James D P. High-resolution sequence stratigraphy—the East Coulee Delta, Alberta[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62(2): 310-317
- Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 35: 1-43
- Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92: 1-33
- Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81: 1-9
- Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall-reply [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 95: 147-160
- Helland-Hansen W, Gjelberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92: 31-52
- Nummedal D, Riley G W, Cole R D, et al. The falling sea level systems tract in ramp settings (Abstract) [C]//Mesozoic of the Western Interior. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Theme Meeting, Fort Collins, Colorado, August 17-19, 1992: 50
- Plint A G, Nummedal D. The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis[M]//Hunt D, Gawthorpe R L. Ed. *Sedimentary Responses to Forced Regressions*. Geological Society, London, Special Publications, 2000, 172: 1-17
- Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regression in a sequence stratigraphic framework: Concept, examples, and exploration Significance [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709
- Vail P R, Todd R G, Sangree J B. Seismic stratigraphy and Global Changes of sea level, Part 5: Chronostratigraphic significance of seismic reflections[M]//Payton C E. Ed. *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 1977, (26): 99-116
- Hiscott R N. Depositional sequences controlled by high rates of sediment supply, sea-level variations, and growth faulting: the Quaternary Baram Delta of northwestern Borneo [J]. *Marine Geology*, 2001, 175: 67-102
- Juh sz G, Pog cs s G, Magyar I, Vakarcs G. Tectonic versus climatic control on the evolution of fluvio-deltaic systems in a lake basin, Eastern Pannonian Basin [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(1-2): 72-95
- Ridente D, Trincardi F. Pleistocene “muddy” forced-regression deposits on the Adriatic shelf: A comparison with prodelta deposits of the late Holocene highstand mud wedge [J]. *Marine Geology*, 2005: 222-223, 213-233
- Helle S K. Sequence stratigraphy in a marine moraine at the head of Hardangerfjorden, western Norway: evidence for a high-frequency relative sea-level cycle [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164, 251-281
- Malartre F, Ford M, Williams E A. Preliminary biostratigraphy and 3D geometry of the Vouraikos Gilbert-type fan delta, Gulf of Corinth Greece C R [J]. *Geoscience*, 2004, 336, 269-280
- Catuneanu O, Willis A J, Miall A D. Temporal significance of sequence boundaries [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 121: 157-178
- Catuneanu O, Martins-Neto M A, Eriksson P G. Precambrian sequence stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 176: 67-95
- 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 [Li Shaohu. Thinking of international sequence stratigraphy development and L-H-T sequence stratigraphy [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 735-744]
- 李绍虎, 贾丽春. 层序地层学四分模型的非周期性性与层序边界调整 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 105-117 [Li Shaohu, Jia Lichun. Adjustment of non-periodicity and sequence boundary in four-divided model of sequence stratigraphy [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 105-117]
- Helland-Hansen W. Towards the standardization of sequence stratigraphy-Discussion [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.12.003, 1-3

## Comparison of Sequence Stratigraphic Significance between East Coulee Delta and Jijihu Modern Subaqueous Aggradational Fan ( SAF)

LI Shao-hu<sup>1 2</sup> ZHOU Ji-bin<sup>3</sup> JIA Li-chun<sup>4</sup> WANG Zhao-hui<sup>3</sup>

LI Bao-qing<sup>1</sup> MA Feng-hua<sup>1</sup> WANG Cheng<sup>1</sup>

( 1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources , Ministry of Education , Wuhan 430074;

2. Faculty of Earth Resources , China University of Geosciences , Wuhan 430074;

3. Ninth Geology Team of Xinjiang Geology and Mineral Exploration , Urumqi 838204;

4. Shanxi Third Geology Engineering Investigation Institute , Yuci , Shanxi 030600)

**Abstract** Jijihu modern subaqueous aggradational fan ( SAF) in Jungar Basin , Xinjiang Province , China , is 24m arch length and 10m radii. Jijihu SAF consists of alluvial fan 1 , unit A ( SAF) , unit B ( slop beds , retrogradational beds and flooding mud-sand beds) , unit C ( alluvial fan 2) and unit D ( alluvial fan 3) , which have been documented by Li by observing and digging during one week in the condition of 40 degree centigrade Junggar Basin after desert flood in 2007 summery time.

Field observation directs as followings: ( 1) Exception of alluvial fan 1 , Jijihu SAF has the similar stacking patterns with East Coulee Delta ( Posamentier *et al.* , 1992) . Especially , there is a 1cm red mud bed between alluvial fan 1 and SAF , directing that they belong to continuous sedimentation documented by digging. Although SAF covers alluvial fan 1 in the Northern side of pool , another isochronous unit opposite Jijihu SAF about 10m away in the Southern side directs the lowest alluvial fan clearly. Thereby , alluvial fan 1 becomes the lowest unit that may be interpreted as falling stage systems tract ( FSST) during forced regression associated with incision , showing that pond water reaches lowest level. ( 2) Subsequently , pond level begins to rise , sediments supply exceeds the rate of level rise , and SAF ( unit A) develops during normal regression , so that SAF may be interpreted as lowstand systems tract ( LST) according to present scenario of sequence stratigraphy. ( 3) Associated with level rise exceeds sediments supply , unit B develops as follows: Firstly , fine mud-sands begin to accumulate in front of SAF forming slope beds ( i. e. , healing phase wedge of Posamentiaer and Allen ( 1993) ) . Secondly , coarse sediments such as gravels deposits on the top of SAF , directing retrogression stacking patterns landward. Finely , level reaches to maximum , flooding mud-sand beds begin to precipitate under hot wind in the Junggar Desert. Therefore , three parts ( unit B) above may record as transgressive systems tract ( TST) during transgression. ( 4) The second desert flood forms alluvial fan 2 ( unit C) and 3 ( unit D) incising one by one , they may be interpreted as falling stage systems tract ( FSST) of another sequence during forced regression.

This article has compared the sequence stratigraphic significance between East Coulee Delta in Alberta and Jijihu subaqueous aggradational fan ( SAF) , and concluded as follows: ( 1) East Coulee Delta develops LST-TST superposition and FSST superposition that belong to two different depositional sequences; ( 2) Jijihu SAF develops FSST-LST-TST superposition and FSST superpositions that are attributed to two depositional sequences , too; ( 3) two outcrops has proved that no highstand systems tract develops after maximum flooding surface in modern small-scale pond , it is possible to represent difference between marine and non-marine settings due to transporting energy in non-marine setting not enough to carry sediments into pond. This paper has also discussed some key problems such as sequence boundary that is redefined as remnant maximum flooding surface ( RMFS) and its correlative subaerial unconformity ( CSU) . Furthermore , this paper suggests avoidance of highstand normal regression term. In subsequent thesis authors will suggest that stillstand normal regression replace highstand normal regression.

**Key words** Jijihu modern subaqueous aggradational fan ( SAF) ; East Coulee Delta; sequence stratigraphy; falling stage systems tract ( FSST) ; avoidance of highstand systems tract