

朝向层序地层学标准化:层序地层学研究的一个重要科学命题

吴和源^{1,2}

1. 中国石油新疆油田公司博士后工作站, 新疆克拉玛依 834000

2. 中国石油勘探开发科学研究院博士后流动站, 北京 100083

摘要 层序地层学后 Exxon 时代, 层序模式的多样化代表了科学家们对复杂地层记录及其响应机制的深入认识, 在赋予各种层序地层模式较强针对性的同时, 也引起了许多概念体系的不协调。因此, 以寻求概念术语一致性为目的的层序地层学标准化, 就成为当今层序地层学所面临的一个重要科学命题。层序地层学的发展历程中, 正常海退与强迫型海退的识别与区分为层序形成过程的系统描述奠定了重要基础, 由于这些过程可以独立于层序地层模式, 所以成为迈向标准化成功的第一步; 河流相层序模式中非常规体系域概念的引入, 即低和高可容纳空间体系域, 同样因其独立于层序模式存在的特性, 代表了层序地层学标准化又一次成功的尝试。鉴于地层堆积作用过程的旋回性和复杂性, 以及地层记录的非渐变性和不完整性, 追逐层序地层模式多样性所表征的变化性, 以及蕴含着变化性的标准化本质, 将为层序地层学的进一步发展提供更多的思考线索和途径。

关键词 层序地层学; 标准化; 层序模式; 体系域; 后 Exxon 时代

第一作者简介 吴和源, 男, 1986 年出生, 博士后, 沉积学, E-mail: wuheyuan0702@126.com

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1977 年《AAPG 26 号地震地层学》专辑^[1]将层序地层学带入地层学实践的主流, 1988 年 Wilgus *et al.*^[2] 专著的问世, 意味着层序地层学的概念体系和工作方法更加系统和完善^[3-5]。因此, 1977 年至 1988 年曾被誉为层序地层学的 Exxon 时代^[6-8]。之后, 将最大海泛面作为层序界面的 R-T 模式^[9]、对 Exxon 学派层序地层学概念体系不协调的认识及修正、T-R 层序^[10-11]及淹没不整合型层序^[12-14]等的相继提出, 以及国内学者对高分辨率层序地层学^[15-17]、层序边界^[18]、层序形成机制^[19]等理论的进一步发展, 成为科学家对复杂地层记录及其响应机制深入探索和研究所取得的重要成果, 表征着层序地层学进入了模式多样化的后 Exxon 时代。在模式多样化的后 Exxon 时代, 总是存在较多的概念混乱和概念体系的不协调, 因此, 寻求层序地层学的标准化就成为层序地层学研究的一个重要科学命题^[20]。所以说, 在复杂的地层序列及其响应机制中, 进一步追逐和深入理解层序地层学标准化的科学内涵和必要性, 以及在标准化进程中已经取得的成功尝试, 感受前期科学家艰辛努力的同时, 希望能够起到抛砖引玉的作用而有益于层序地层学的更进一步发展。

1 Exxon 层序模式概念体系不协调的认识与修正

从 Sloss^[21] 所定义的具有构造旋回涵义的“层序”到 Vail *et al.*^[22] 的“沉积层序”, 地震资料的分析 and 解释, 将浅水背景中的只“由不整合面限定的层序”向盆地方向追索, 产生了“不整合面及其可以对比的整合面所限定的沉积层序”的概念, 将“可以对比的整合面”引入到层序地层学范畴。在 Vail *et al.*^[22] 将沉积层序大胆的解释为海平面变化旋回产物的基础上, Exxon 学派提出两种类型的层序模式, 即类型 I 层序和类型 II 层序。然而却存在一些概念体系的不协调^[22-23], 主要表现在以下方面: 1) Exxon 层序模式将盆地侧翼基准面下降期间的沉积置于层序边界之下, 相反在靠近盆地方向的区域则置于层序边界之上; 2) 将“沉积层序”模式中的类型 I 层序的底界面定义于海平面下降的拐点(图 1), 类型 II 层序的底界面置于海平面变化的最低点, 形成两种类型的高水位体系域(HST); 3) 在运用时间为纵坐标建立海平面变化曲线时, Exxon 公司的科学家又不自觉地将层序界面置于海平面变化的最低点, 造成 Exxon 层序模

式概念体系的不协调的同时^[24-25],引起了海平面变化曲线中可对比整合面位置的激烈争论。

针对 Exxon 层序模式概念体系的不协调,层序地层学家所提出的修改方案中主要以 Hunt *et al.*^[26]以及 Posamentier *et al.*^[27]的提议最为引人注目(图1),然而,在描述沉积趋势变化时却具有质的区别。Hunt 和 Tucker 在强调 Exxon 层序模式存在概念体系不协调的同时,为避免 Exxon 科学家将海平面下降期的陆架沉积与深水沉积相区分,提出强迫型海退楔体系域(FRWST)的概念。定义 FRWST 为强迫型海退期基准面下降到最低点之间的沉积,并将海平面变化的最低点作为 C.C(可对比整合面^[28])(图1),使任何海平面变化最低点的沉积物都置于层序界面之上,形成对海平面变化曲线的四个部分的认识,也消除了对早期模式中相对海平面下降期和低位期的无休争论。

与 Hunt *et al.*^[26]的方案对比,1999 年 Posamentier *et al.*^[27]将基准面下降开始的时间面作为 C.C 的修订就显得比较冗余,上移 I 型层序界面至海平面下降的开始,取消 Exxon 层序模式的 I 型和 II 型之分,形

成 Exxon 层序模式的三分定义:LST+TST+HST。但是,当考虑 Haq *et al.*^[23]提出的中生代全球海平面变化曲线、Hallam^[29]的侏罗纪全球海平面变化曲线以及 Emery *et al.*^[30]的三叠纪全球海平面变化曲线时,Posamentier *et al.*^[27]将 C.C 置于基准面最高点的修订方式不仅未能解决概念体系的不协调,反而将其变得更加的突出。由此而体现出的 Hunt *et al.*^[26]将层序界面置于基准面变化最低点的四分体系域修订方案,其优越性得到多数层序地层学家的认可,为后续层序地层学标准化的提出奠定重要基础。

2 层序形成的海侵—海退过程描述——标准化富有智慧的第一次尝试

后 Exxon 时代,伴随层序地层学的深入发展以及多样层序模式的不断涌现,层序地层学中形成各式的体系域划分与不同的基准面变化曲线分析。从 Exxon I 型和 II 型层序界面位置在海平面变化曲线中的大胆假设,到后 Exxon 时代体系域的“三分”或“两分”以及各层序边界位置在基准面变化曲线中的精确定义,基准面变化曲线在解释沉积趋势变化时仍显

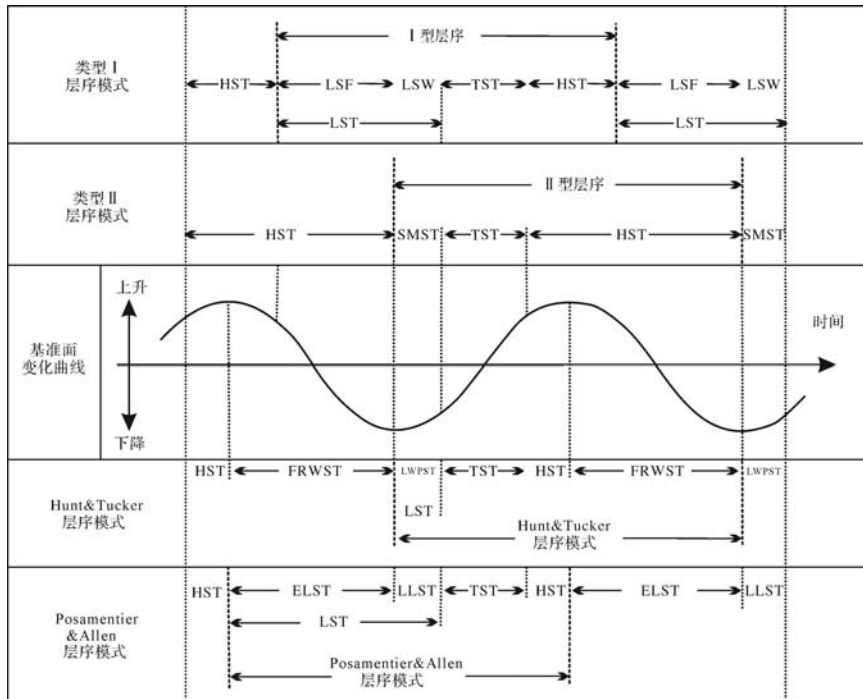


图1 对 Exxon 层序模式概念体系不协调的两种修订

I 型与 II 型 Exxon 层序模式中高水位体系域的两分与体系域边界的模糊限定受到层序地层学家的广泛讨论,针对其概念体系的不协调, Hunt *et al.*^[26]将可对比整合面置于基准面变化曲线最低点的同时,将层序形成的上升下降旋回过程分为四个组成部分,分别对应四个类型的体系域(LWPST+TST+HST+FRWST),而 Posamentier *et al.*^[27]的则将层序间置于基准面变化曲线的最高点,形成 Exxon 层序模式的三分体系域形式(LST+TST+HST)。LPWST.低水位进积楔体系域;FRWST.强迫型海退楔体系域;LST.低水位体系域;HST.高水位体系域;TST.海侵体系域;RST.海退体系域;ELST.早期低水位体系域;LLST.晚期低水位体系域;LSF.低水位扇;LSW.低水位楔。

Fig.1 Two kinds of revision to the inconsistencies in the conceptual system of the Exxon sequence models

无力,直到 Hunt *et al.*^[26] 另一种体系域类型—强迫型海退楔体系域(FRWST)出现,沉积趋势变化与基准面变化旋回才得以较好的对应(图1)。

Hunt *et al.*^[26] 针对 Exxon 概念体系不协调的修正受到 Helland-Hansen^[31] 的极力推崇,把层序界面置于基准面变化曲线最低点的同时,认为一个基准面变化的上升下降旋回应包含海侵和海退两个阶段,基准面变化与沉积物供给共同作用,形成地层序列中的四个体系域类型^[32](图2):1)沉积在相对海平面上升期间海平面最低位置到最大海退位置的低水位楔体系域;2)沉积在相对海平面上升期间从最大海退到最大海侵的海侵体系域;3)沉积在相对海平面上升期间从最大海侵到下一次相对海平面下降的高水位楔体系域;4)沉积在相对海平面下降的强迫型海退体

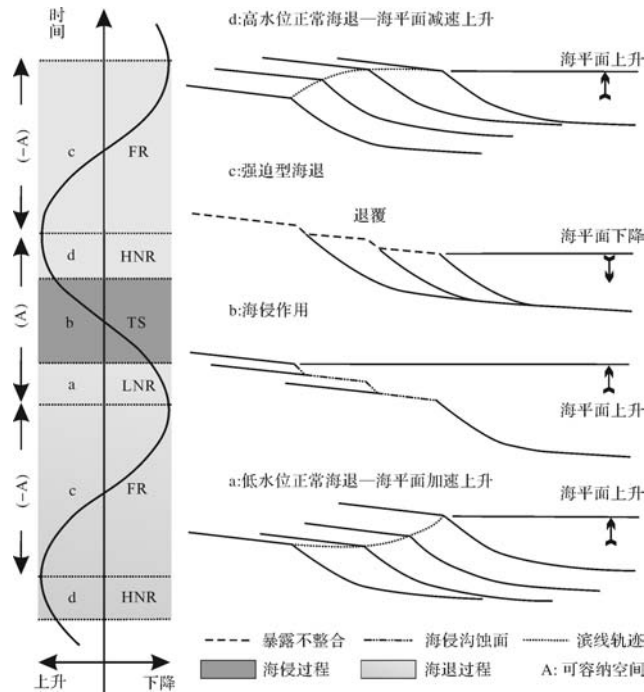


图2 一个基准面上升下降旋回中的主要沉积过程以及沉积趋势变化

一个基准面变化的上升下降旋回包括两个主要过程:海侵过程和海退过程。根据基准面变化速率与沉积作用速率的相对大小又将其划分为三个“海退”和一个“海侵”,即低水位正常海退(LNR)、海侵(TS)、高水位正常海退(HNR)、强迫型海退(FR)。其中,位于基准面上升加速阶段的LNR,由于进积作用向加积作用沉积趋势的变化,形成上凹型滨线轨迹;基准面上升减速阶段的HNR,由于加积作用向进积作用沉积趋势的变化,形成上凸型滨线轨迹。

Fig.2 Diagram showing the change of the main sedimentary processes and depositional trends within a rise and drop cycle of base level

系域(从相对海平面下降开始到下降结束),形成体系域的四分现状。

在此基础上,根据滨线沉积作用速率和基准面上升速率,进一步划分出3种类型的沉积^[33-35](图2):1)正常海退,表现为具有加积作用特点的进积作用过程,滨线沉积作用速率大于基准面上升速率的情况下,由沉积物供应驱动的进积过程。且根据其所在基准面变化曲线中的位置,可进一步将其划分为低水位正常海退(LNR)和高水位正常海退(HNR)^[36-38];2)海侵沉积,在基准面上升过程中,由基准面上升速率大于沉积作用速率所导致的一个持续性的退积作用过程;3)强迫型海退沉积^[39],由滨线处基准面下降驱动的进积作用过程,与沉积物供应速率的变化无关,滨线地区在基准面下降过程中被迫产生海退形成阶梯式进积作用过程。进而形成完整基准面变化旋回所对应的4个阶段:沉积物驱动的正常海退作用阶段(LNR和HNR)、海侵作用阶段(TS)、以及基准面下降驱动的强迫型海退作用阶段(FR),对应三个海退和一个海侵,共四种类型的体系域:低水位正常海退体系域、海侵体系域、高水位正常海退体系域、强迫型海退体系域。且每一种体系域的形成过程都独立于层序地层模式,是独立于层序模型的概念。

后 Exxon 时代,地层学家针对不同的沉积环境,组合不同的体系域形成多样的层序模式(图3):1)连接海平面变化曲线最低点两个可对比整合面之间的沉积物(与 Hunt *et al.*^[26] 的层序模式对应);2)连接两个最大海退面之间的沉积物(与 Johnson *et al.*^[40] 的“T-R”旋回、Embry *et al.*^[10] 的“T-R 层序”相对应);3)连接两个最大海泛面之间的沉积物(与 Gallo-way^[9] 的“成因地层层序”相对应);4)连接海平面变化曲线最高点可对比整合面之间的沉积物,(与 Posamentier *et al.*^[27] 的层序模式对应);5)连接两个相对海平面下降期间的陆上不整合面(及其可以对比的整合面)之间的沉积物(与 Vail *et al.*^[41] 的 I 型和 II 型“沉积层序”相对应);6)应用于碳酸盐岩环境的淹没不整合型层序(CS+HST)^[12-13,42]。每一种层序模式都涵盖了相应的沉积趋势变化特征,沉积环境控制因素的独特性所表现出来的地层界面以及体系域强烈变化性,赋予各种模式较强的针对性。但各模式之间并不是一成不变的,层序地层学变化性贯穿了地层序列形成的始终。

以最大海泛面^[9,24,43]为例:滨线从海侵作用向高水位正常海退作用的转换面,形成于基准面上升期

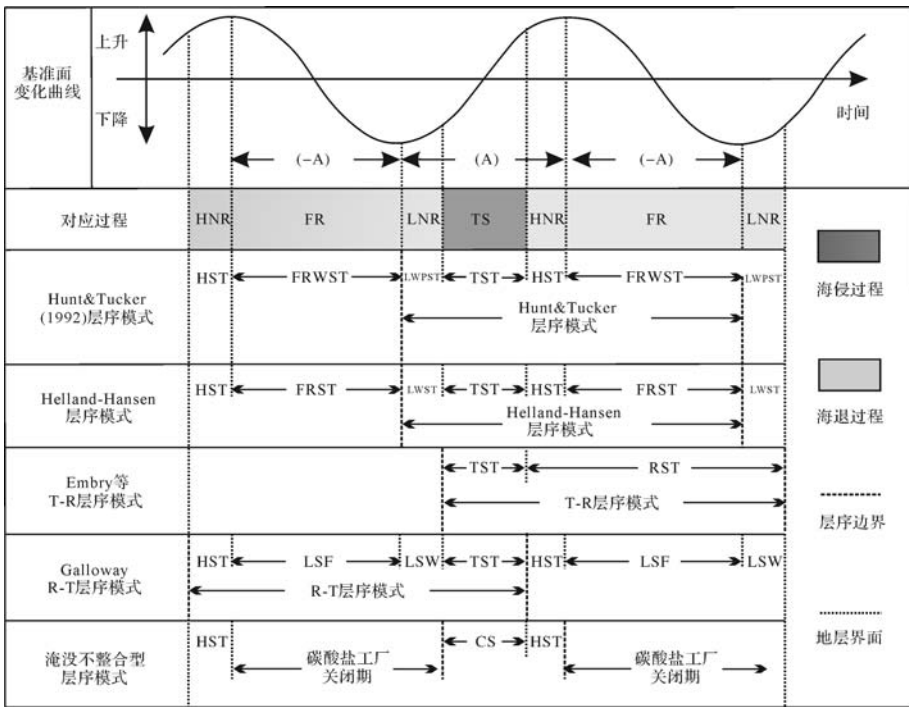


图 3 后 Exxon 时代主要层序模式对比

A. 可容纳空间; HNR. 高水位正常海退; LNR. 低水位正常海退; TS. 海侵; FR. 强迫型海退; LPWST. 低水位进积体系域; FRWST. 强迫型海退楔体系域; LST. 低水位体系域; HST. 高水位体系域; TST. 海侵体系域; RST. 海退体系域; ELST. 早期低水位体系域; LLST. 晚期低水位体系域; LSF. 低水位扇; LSW. 低水位楔; (1) 可对比整合面; (2) 海侵面或最大海退面; (3) 最大海泛面; (4) 强迫型海退底面

Fig.3 The main sequence models in post-Exxon Times

间, 滨线从退积向进积转变, 标志着海侵作用的结束。在碎屑岩沉积环境中, 最大海泛面可能伴随海侵浪蚀面的形成, 海侵作用期间, 滨线轨迹的向陆迁移可能导致对低水位正常海退、强迫型海退、甚至高水位正常海退沉积体系的改造剥蚀, 形成海侵体系域对前期各种类型沉积的直接覆盖。此时, 在如图 4 的旋回性堆积的地层序列中, 旋回 B 和 C 就应该通过最大海退面与海侵浪蚀面的综合运用才能得到合理的定义。而作为窥视层序地层学诞生的陆上不整合面^[44], 其保存潜力则主要由海侵滨面侵蚀作用的深度以及海侵作用期间的加积作用共同控制。另外, 这个面可能被低水位正常海退所覆盖(图 4)。如果部分被海侵浪蚀面替代的话^[45-47], 旋回 C 就可能被陆上不整合面(及其可以对比的整合面)和海侵浪蚀面综合刻画。并且, 当陆上不整合面的证据被完全破坏, 就难以从叠加的准层序中分辨出真正的不整合面所限定的沉积单元。并且, 当沉积物供给较充分时, 高水位正常海退体系域、强迫型海退体系域以及低水位正常海退体系域之间缺乏可以识别的标志, 此时, 体系域两分比体系域四分将更加合适, 即海侵体系域+海退

体系域, 对应“T-R 层序”^[10-11]。

地层界面与体系域形成过程中所表现出的层序地层学的变化性不仅解释了地层记录的复杂性, 还为“不可能存在单一的层序模式适用于所有沉积地层序列”这一论点提供了充实的论据。我们不可能寻找出一种涵盖所有层序模式的层序地层学方法, 但这并非意味着无法在多样化层序模式之间达成一致共识。因为, 就像 Catuneanu *et al.*^[48]所强调的那样, 各种层序模式中基本的构筑模块(体系域)是所有的地层序列所共有的, 对这些构筑模块的识别要比层序模式的选择更加重要, 也是层序地层学中达成一致共识的基本前提。

Helland-Hansen 四个过程的认识是对沉积趋势变化富有智慧性的理解, 他强调地层界面的识别、沉积相的变化, 以及地层几何形态的改变, 通过沉积作用速率与基准面变化速率的共同作用, 以地层进积作用、退积作用、加积作用以及下切作用来反映层序地层学特有的地层学与沉积学属性。基准面变化曲线中客观存在的四个过程所反映的沉积趋势变化以及地层界面的形成都是独立于多样化层序地层模式的

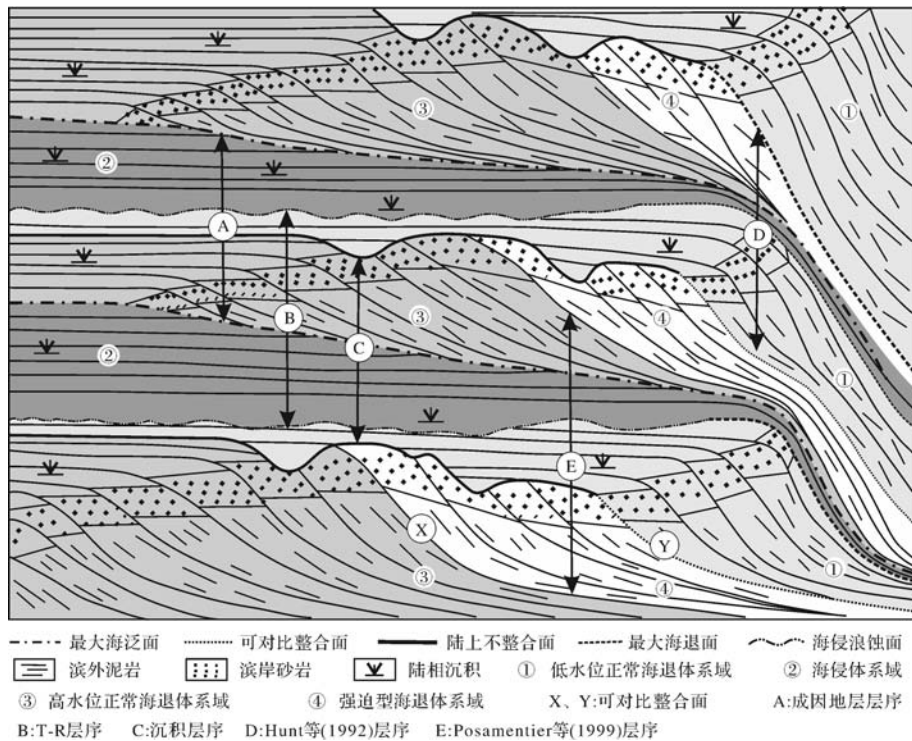


图4 层序形成的四个过程及其多样的体系域叠置关系(修改自 Helland-Hansen *et al.* [31])

结合不同的地层界面刻画完整的基准面变化旋回,在旋回性地层堆积序列中,选择不同的体系域组合方式形成多样的层序模式。在地层记录旋回性框架内,体系域在横向上呈现不同的展布形态,在垂向上依次叠置。由于海平面变化速率与沉积物供给速率的相互作用,低水位正常海退体系域与高水位正常海退体系域在相对海平面上升期间没有一个固定的位置,最大海泛面所伴随的海侵浪蚀面可能导致海侵体系域对前期各种类型体系域的直接覆盖,而伴随强迫型海退作用阶段的陆上不整合面,其向海的延伸范围与后期的保存程度都存在着强烈的变化性。

Fig.4 Diagram showing the four formation processes of sequence and the superimposed relationship of system tracts (modified from Helland-Hansen *et al.* [31])

核心概念,是层序地层学研究的主要内容,更是层序地层学“标准化”的基础。如果将 Helland-Hansen 的体系域四分作为对层序地层学标准化的初步探索,那么正常海退与强迫型海退区分所带来的海侵—海退过程的精细描述,则为理想的基准面变化旋回与体系域划分提交了最为满意的方案。因为,其概念的分割,不仅细化了沉积趋势在基准面变化曲线中的表现形式,也从特殊的角度向地质学家强调沉积趋势研究的重要性,是层序地层学标准化富有智慧性的第一次重要尝试。

3 河流相层序中非常规体系域概念的引入——标准化的第二次重要尝试

层序地层学的标准化要求在各层序模式之间达成一致性共识,即寻求概念术语的一致性。面对不同的沉积环境,Catuneanu *et al.* [49-50] 对层序定义的微调调整将注意力更多的放在可容纳空间或沉积物供给

变化的普遍旋回上,将层序地层学应用向所有的沉积环境扩展,即表现为河流相层序中非常规体系域概念的引入。

后 Exxon 时代,层序地层学不断走向成熟的同时,不整合面在河流冲积构架解释 [51-55] 中的应用将层序地层学概念体系带入了河流相沉积序列解释的舞台。针对被动大陆边缘近滨河流沉积环境中构造升降、海平面与气候变化的控制因素,强调河流沉积中海平面变化的直接控制作用,以及基准面与相对海平面变化的近似对等性 [56],科学家采用非对称定义的海相四分体系域(LST、TST、HST、RST)建立一系列河流相层序模式。其中,Wright [51] 和 Shanley [52] 两个研究团队所提出的河流相层序模式(图5),以及国内张周良等人的理论突破 [54-55,57],为河流沉积序列的解释提供了重要的方法途径。虽然他们所采用的河流相体系域边界的定义一直沿用 Exxon 时代的模糊限定,并未精确定义体系域或层序边界位置,但其共同强调的基准面下降期形成层序界面的概念却成为了

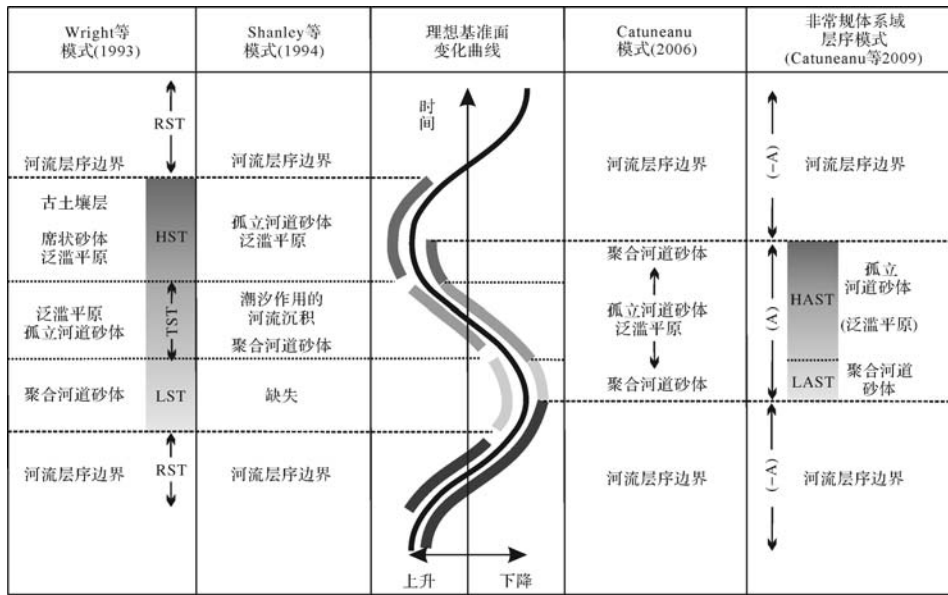


图5 主要河流层序模式对比图

后 Exxon 时代,河流层序模式中体系域边界多沿用 Exxon 时代的模糊限定,即将层序边界置于基准面下降拐点,直到 Catuneanu 等才将河流层序边界精确置于基准面变化的最低点,但以海相四分体系域(LST+TST+HST+RST)所构架的河流层序模式仅局限于近滨河流沉积环境,“非常规体系域”(LAST+HAST)组成的河流层序模式将层序地层学方法带入内陆河流沉积体系。LST.低水位体系域,TST.海侵体系域,HST.高水位体系域,RST.海退体系域,LAST.低可容纳空间体系域,HAST.高可容纳空间体系域。

Fig.5 A comparison chart of main river sequence models

河流相层序研究中的重要进步。

Catuneanu *et al.*^[49-50] 利用正常海退与强迫型海退的区分,将滨岸环境河流相层序限定在基准面上升过程,形成低水位正常海退期的聚合河道砂体、海侵期泛滥平原孤立河道向高水位正常海退期混合水道的充填序列(图5),作为滨岸河流层序研究的重要总结。然而,海相四分体系域所组成的“常规体系域”,其本质成因与滨线轨迹变化的紧密联系性,以及内陆环境中构造运动与气候变迁对沉积作用的主导性,将“常规体系域”仅仅局限在滨线附近。内陆河流生物化石的独特保存、地层较快的横向相变以及层序界面的不易识别,为独立于层序模型的“非常规体系域”概念的引入奠定了特殊的沉积背景。

“非常规体系域”,一种对内陆沉积环境中复杂地质记录较为客观的解释途径,泛指常规体系域之外,与特殊河流沉积环境相关的体系域类型^[58],按照在有关地层序列中不同沉积组分之间的比例描述为“低可容纳空间体系域”(LAST)和“高可容纳空间体系域”(HAST)(图5)。强调河流层序形成过程中可容纳空间与沉积物供给的共同控制^[59],并利用地层记录中垂向叠加的沉积物厚度来反映基准面变化过程。与常规体系域之间的重要差别在于,非常规体系

域认为在一个完整的河流沉积层序中,基准面上升期(正可容纳空间)沉积地层,基准面下降期(负可容纳空间)形成层序边界,通过河流地层格架单元的比例简单定义体系域,表现在:1)聚合的河道相砂岩代表低可容纳空间阶段的沉积;2)孤立的河道相砂岩发育的泛滥平原沉积代表高可容纳空间阶段的沉积,在该阶段沉积中发育湖泊和更多的煤层。在这些认识的基础上,将河流沉积及其相关沉积归为低、高可容纳空间体系域,这种基于过程沉积学的解释也是独立于模型存在的,其应用的灵活性受到地质学家的广泛接受^[60-61]。但与海相地层相比,河流相地层序列更加复杂的变化性,表明非常规体系域层序模式也并非能应用到所有的河流相地层序列。

以四川盆地上三叠统须家河组为例,其以一套含煤系地层中的6个特征岩性段而受到国内地层学家的广泛关注^[62-65]。其中,一、三、五段为高可容纳空间的含煤细粒碎屑岩河流地层,二、四、六段为砂质底荷载高能河流的低可容纳空间沉积^[65],根据岩石地层划分以及沉积序列所反映出来的旋回性,将须家河组划分为三个河流相沉积层序。然而,其反映的总体向上变粗的冲积构架却与现行的河流相层序模式形成巨大反差(对比图5)。地层序列所表现出来的变

化性很难用现行的层序模式进行描述分析,但客观存在的可容纳空间变化过程却是所有河流相地层序列所共有的,且独立于层序模式存在。因此,在寻求层序地层学标准化的今天,非常规体系域概念的引入打破了滨岸环境河流层序研究的局限性,将层序地层学概念方法扩展到内陆河流沉积背景的同时,也为内陆湖泊、沼泽,以及深海沉积体系的层序研究找到突破口,是层序地层学发展的重要跨越。更为突出的贡献在于,非常规体系域概念的引入为内陆各种沉积环境之间的层序地层标准化带来了一直性术语的端倪,是层序地层学标准化的又一次成功尝试。

4 讨论

作为局部和区域范围地层对比的一种有效工具,层序地层学虽已被地质工作者广泛应用,但仍未被纳入任何地层规范或指南。在模式多样化的后 Exxon 时代,层序地层学家力图寻求一个可以涵盖所有层序模式的概念及方法,但长时间来都未达成一致共识。2009年 Catunenau *et al.*^[49] 提出“朝向层序地层学标准化”的概念,掀起了对层序地层学“标准化”的激烈讨论,但就“标准化”定义的认识,以及“标准化”与标准化进程中“变化性”的相互关系,在许多层序地层学实践中仍显模糊。

面对不同构造和沉积背景堆积的地层序列,由于观察级别以及可使用数据类型不同,科学家可能采用不同的层序模式进行地层序列的描述分析,但无论地层序列之间存在何种差异,它们都是可容纳空间和沉积物供给共同作用的产物,都是由不同类型的体系域或成因单元组合构成。“层序地层学标准化”的提出将独立于模型的层序地层学工作流程带入地层学实践的舞台^[66],为地层学工作者提供一个在对相或地层叠置样式观察的基础上识别岩石记录中基本构筑模块(体系域)的工具,明确定义层序地层学“标准化”的目的是对各种模式共同基础的探索,即通过独立于模型的基本概念在多样化层序模式之间寻求概念术语的一致性^[48]。与此同时,长期的层序地层学实践认识到每一种层序模式都与其独特的地质背景紧密联系^[4,9,31,67-69],层序模式的多样化以及地层界面与体系域强烈的复杂化是层序地层学变化性的直接体现,因此,考虑到地层记录的复杂性以及沉积环境控制因素的多样性,每一种层序模式的运用都应该与实际地质背景相结合。因为,当我们还在为各种层序模式不断赞誉时,地层序列中总可以寻找出一些现

行层序模式不易解释的现象。层序地层学标准化是在“变化性”中寻找“一致性”的过程,看似矛盾的两者具有共同的目的,即在复杂的地层记录中研究沉积趋势的变化,寻找出更多的规律性。两者是矛盾的共同体,层序地层学不可能抛开“变化性”谈“一致性”,相反,层序地层学变化性在一定程度上检验了层序地层学标准化的进程,且“一致性”概念术语的探索也离不开地层“变化性”特征的参与。

Catunenau *et al.*^[49] 28位科学家对“标准化”的探讨具有里程碑式的作用,为层序地层学的深入发展指明了方向,其独立于模型的层序地层学工作流程,为标准化提供可能性的同时也拉开了独立于层序模式概念的识别。体系域“四分”与理想的基准面变化曲线,为解释形成所有类型地层叠置样式及成因单元提供详细对比的工具,为术语的标准化提供主要的载体,非常规体系域概念的引入为陆相河流层序的研究提供突破口。这些标准化的重要尝试是层序地层学进一步走向成熟的标志。然而,层序地层学标准化进程走到这里是否已经有了答案?很多学者还在幻想建立一个能够完全涵盖所有地层叠置样式的层序模式,这样的想法应该放弃,就像分析河流构型要素那样,更加注重层序的“构型要素”,即体系域、层序界面以及沉积趋势的识别,才是层序地层学研究的本质,而并非一定要建立一个完整的层序模式。独立于层序模式的体系域概念术语以及层序地层学工作流程的达成,或许离层序地层学标准化的目的已经不远。

5 结语

由于层序地层学的概念体系和工作方法还存在一些混乱和不一致,在地层规范和指南中要确认一个正式的层序地层单位还未成熟,因此,层序地层学的标准化进程总是存在若干阻碍和困难,同时也表现出标准化的必要性和紧迫性。基于层序形成的海侵—海退过程和对 Exxon 层序地层学概念体系不协调的修正,总结出层序形成的四个过程(海侵、低水位和高水位正常海退、强迫型海退)的认识,为层序地层学标准化迈出了艰难的一步;基于河流沉积中低和高可容纳空间沉积所具有各自特征性的沉积单元,总结出的“低和高可容纳空间体系域”的概念,代表了层序地层学走向标准化的又一次成功尝试。前期科学家们的这些富有智慧的成果,为层序地层学标准化奠定了重要基础,也为层序地层学的深入发展提供了更

多的思考线索和途径,因而具有深远的科学内涵和意义。

参考文献 (References)

- [1] Payton C. Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration[M]. Tulsa: AAPG, 1977: 1-516.
- [2] Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea level changes: an integrated approach[M]. Tulsa: SEPM, Special Publication, 1988: 407.
- [3] Brown L F, Fisher W L. Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull-apart basins [C]//Payton C E. Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 213-248.
- [4] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part I: seismic stratigraphy interpretation procedure[C]//Bally A W. Atlas of Seismic Stratigraphy. Tulsa: AAPG, 1987: 1-10.
- [5] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Posamentier H W, et al. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 2: key definitions of sequence stratigraphy[C]//Bally A W. Atlas of Seismic Stratigraphy. Tulsa: AAPG, 1987: 11-14.
- [6] 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. [Mei Mingxiang. Correlation of sequence boundaries according to discerning between normal and forced regressions; the first advance in sequence stratigraphy[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(5): 549-564.]
- [7] 梅冥相. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 37-54. [Mei Mingxiang. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences; the third advance in sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 37-54.]
- [8] 吴和源. 层序地层学研究现状及进展: 模式多样化[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 60-65. [Wu Heyuan. Review of sequence stratigraphy: diversification of models[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 60-65.]
- [9] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis: I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 125-142.
- [10] Embry A F, Johannessen E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada[C]//Vorren T, Bergsager E, Dahl-Stammes O A, et al. Arctic Geology and Petroleum Potential. Amsterdam: NPF Special Publication, 1992: 121-146.
- [11] 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.
- [12] Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonates[J]. The Geological Society of America Bulletin, 1990, 102(5): 535-562.
- [13] 梅冥相. 淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序——兼论碳酸盐台地的“凝缩作用”[J]. 岩相古地理, 1996, 16(6): 24-33. [Mei Mingxiang. The third-order carbonate cyclic sequences of drowned unconformity type with discussions on “condensation” of carbonate platforms[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(6): 24-33.]
- [14] 梅冥相, 张海, 孟晓庆, 等. 上扬子区下寒武统的层序地层划分和层序地层格架的建立[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1292-1304. [Mei Mingxiang, Zhang Hai, Meng Xiaoqing, et al. Sequence stratigraphic division and framework of the lower Cambrian in the upper Yangtze region[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1292-1304.]
- [15] 邓宏文, 王红亮, 宁宁. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 305-313. [Deng Hongwen, Wang Hongliang, Ning Ning. Sediment volume partition principle: theory basis for high-resolution sequence stratigraphy[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 305-313.]
- [16] 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. [Deng Hongwen. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U.S.A.: high-resolution sequence stratigraphy[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97.]
- [17] 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 等. 高精度层序地层学和储层预测[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 111-117. [Lin Changsong, Zhang Yanmei, Liu Jingyan, et al. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 111-117.]
- [18] 李绍虎. 浅议层序边界[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 20-31. [Li Shaohu. About sequence boundary [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 20-31.]
- [19] 梅冥相. 长周期层序形成机制的探索: 层序地层学进展之二[J]. 古地理学报, 2010, 12(6): 711-728. [Mei Mingxiang. Research on forming mechanism of long-term sequences; the second advance in sequence stratigraphy[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(6): 711-728.]
- [20] 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): 1-9. [Jiang Zaixing. Advances in sequence stratigraphy: a summary from international workshop on sequence stratigraphy[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 1-9.]
- [21] Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America[J]. The Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(2): 93-114.
- [22] Vail P R, Mitchum Jr R M, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap[C]//Payton C E. Seismic Stratigraphy: Appli-

- cations to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: AAPG, 1977: 63-81.
- [23] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [24] Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition. I—conceptual framework[C]//Wilgus C K, Hastings BS, Kendall C G S C, et al. *Sea Level Changes—An Integrated Approach*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 1988: 109-124.
- [25] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 1990: 55.
- [26] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level' fall[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [27] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy—concepts and applications[M]. Tulsa, Oklahoma: SEPM, 1999: 1-210.
- [28] Jervey M. Siliciclastic sequence development in foreland basins, with examples from the western Canada foreland basin[C]//Macqueen R, Leckie D. *Foreland Basins and Fold Belts*. Tulsa: AAPG, 1992: 47-80.
- [29] Hallam A. Interpreting sea level[C]//Doyle P, Bennett M R. *Unlocking the Stratigraphical Record: Advance in Modern Stratigraphy*. Chichester: John Wiley & Sons, 1998: 421-439.
- [30] Emery D, Myers K J. *Sequence stratigraphy*[M]. London: Blackwell, 1997: 1-297.
- [31] Helland-Hansen W, Gjølberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92(1/2): 31-52.
- [32] Helland-Hansen W. Sequence stratigraphy theory: remarks and recommendation[C]//Steel R J, Felt V L, Johannessen E P, et al. *Sequence Stratigraphy on the Northwest European Margin*. Amsterdam: Norwegian Petroleum Society (NPS), 1995: 13-21.
- [33] Posamentier H W, Morris W R. Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits[C]//Hunt D, Gawthorpe R L. *Sedimentary Responses to Forced Regressions*. London: Geological Society of London Special Publication, 2000: 19-46.
- [34] Helland-Hansen W, Hampson G J. Trajectory analysis: concepts and applications[J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 454-483.
- [35] Henriksen S, Hampson G J, Helland-Hansen W, et al. Shelf edge and shoreline trajectories, a dynamic approach to stratigraphic analysis[J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 445-453.
- [36] Catuneanu O, Martins-Neto M A, Eriksson P G. Precambrian sequence stratigraphy[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 176(1/2): 67-95.
- [37] Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 35(1): 1-43.
- [38] Catuneanu O, Martins-Neto M A, Eriksson P G. Sequence stratigraphic framework and application to the Precambrian[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 33(1): 26-33.
- [39] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework; concepts, examples, and exploration significance[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [40] Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica[J]. *The Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96: 567-587.
- [41] Vail P R, Hardenbol J, Todd R G. Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy[C]//Schlee J S. *Interregional Unconformities and Hydrocarbon Accumulation*. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1984: 129-144.
- [42] Schlager W. Type 3 sequence boundaries[C]//Harris P M, Saller A H, Simo J A. *Advances in Carbonate Sequence Stratigraphy: Application to Reservoirs, Outcrops and Models*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 1999: 35-46.
- [43] Frazier D E. Depositional episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin[D]. Austin, Texas: University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology Geological Circular, 1974, 4: 1-28.
- [44] 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. [Mei Mingxiang. Understanding the birth of sequence stratigraphy through the complex geological meanings of unconformity: the first important scientific problem in sequence stratigraphy[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(2): 179-192.]
- [45] Walker R G. Facies modeling and sequence stratigraphy[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1990, 60(5): 777-786.
- [46] Walker R G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts[C]//Walker R G, James N P. *Facies Models, Response to Sea-Level Change*. Geological Association of Canada, 1992: 1-14.
- [47] Embry A F. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals[C]//Steel R J, Felt V L, Johannessen E P, et al. *Sequence Stratigraphy on the Northwest European Margin*. Norwegian Petroleum Society Special Publication, 1995, 5: 1-11.
- [48] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Reply to the comments of W. Helland-Hansen on “Towards the standardization of sequence stratigraphy” by Catuneanu et al. [Earth-Sciences Review 92(2009)1 - 33][J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 94(1/2/3/4): 98-100.
- [49] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Review*, 2009, 92(1/2): 1-33.
- [50] Catuneanu O. *Principles of Sequence Stratigraphy*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-375.
- [51] 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.
- [52] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphic

- phy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
- [53] Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Berlin: Springer, 1996.
- [54] 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1): 188-193. [Zhang Zhouliang. Fluvial sequence stratigraphy and river types[J]. Geological Review, 1996, 42(Suppl.1): 188-193.]
- [55] Zhang Zhouliang, Sun Keqin, Yin Jarun. 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.
- [56] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: Concepts and applications[M]. Tulsa, OK: Society for Sedimentary Geology, 2000: 1-204.
- [57] 郭巍, 刘招君, 董清水, 等. 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. [Guo Wei, Liu Zhaojun, Dong Qingshui, et al. Oil and gas gathering rule in the sequence stratigraphic frame of fault depression lacustrine Basin—an example from Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2002, 32(3): 233-237.]
- [58] 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. [Wu Yinye, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 69-81.]
- [59] Olsen T, Steel R, Høgsøth 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.
- [60] 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 Statfjord Formation (Norwegian North Sea) [C]// Six International Conference on Fluvial Sedimentology. Cape Town, 1997: 47-48.
- [61] Fanti F, Catuneanu O. Fluvial sequence stratigraphy: the Wapiti Formation, west-central Alberta, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80(4): 320-338.
- [62] 朱如凯, 赵霞, 刘柳红, 等. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 46-55. [Zhu Rukai, Zhao Xia, Liu Lihong, et al. Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiache Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 46-55.]
- [63] 朱如凯, 白斌, 刘柳红, 等. 陆相层序地层学标准化研究和层序岩相古地理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 131-143. [Zhu Rukai, Bai Bin, Liu Lihong, et al. Research on standardization of continental sequence stratigraphy and palaeogeography: a case study from the Upper Triassic Xujiache Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 131-143.]
- [64] 林小兵, 田景春, 刘莉萍, 等. 等时格架及地震反演双重约束的精细砂体对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 417-423. [Lin Xiaobing, Tian Jingchun, Liu Liping, et al. Research on fine sandbody correlation method under the double constraints of isochronous framework and seismic inversion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 417-423.]
- [65] 梅冥相, 刘少峰. 基于陆生植被对河流沉积作用的影响论上三叠统须家河组的冲积构架: 以重庆永川普安剖面为例[J]. 古地理学报, 2013, 15(2): 143-154. [Mei Mingxiang, Liu Shaofeng. Discussion of alluvial architecture for the Upper Triassic Xujiache Formation in terms of sedimentological impact of terrestrial vegetation on fluvial sedimentation: a case study at Pu'an section in Yongchuan of Chongqing[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(2): 143-154.]
- [66] 郭荣涛, 陈留勤, 霍荣. 21世纪初期层序地层学发展的新方向[J]. 地层学杂志, 2012, 36(4): 747-754. [Guo Rongtao, Chen Liuqin, Huo Rong. New trends of sequence-stratigraphy in the early 21st century[J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(4): 747-754.]
- [67] Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II -sequence and systems tract models[C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S C, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa: SEPM Special Publication, 1988: 125-154.
- [68] Embry A F, Podruski J A. Third-order depositional sequences of the Mesozoic succession of Sverdrup Basin[C]//James D P, Leckie D A. Sequences, Stratigraphy and Sedimentology: Surface and Subsurface. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1988: 73-84.
- [69] Schlager W. Accommodation and supply—a dual control on stratigraphic sequences[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(1/2): 111-136.

Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy: An important scientific proposition of sequence stratigraphy

WU HeYuan^{1,2}

1. Postdoctoral Workstation, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China

2. Postdoctoral Program, PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract: In the Post-E Exxon times of sequence stratigraphy, scientists came up with various sequence models of the complex stratigraphic records as well as its response mechanism, and endowed all models with strong pertinence, which aroused inconsistencies in conceptual system. Therefore, the standardization of sequence stratigraphy aiming at seeking the consistency of terminology has become an important scientific proposition of today's sequence stratigraphy. During the development process of sequence stratigraphy, the identification and distinguishing between normal regression and forced regression has laid an important groundwork for the system description of the sequence development, and has become the first step towards the standardization as these processes are model-independent. The introduction of unconventional system tracts in fluvial sequence models, namely, low and high-accommodation system tract, turned to be another successful attempt of the standardization of sequence stratigraphy because of its model-independent feature. Considering the four particularities of the stratigraphic records—the complexity and the cyclicity in the stratigraphic accumulating process, the non-gradual change and the non-integrity of the stratigraphic records, chasing the variability represented by the diversity of sequence models and the nature of standardization containing variability will provide more clues and approaches for further development of sequence stratigraphy.

Key words: sequence stratigraphy; standardization; sequence models; system tract; the Post-E Exxon times