

文章编号: 1000-0550(2010)04-0735-10

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

李绍虎^{1,2}

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

摘要 针对国际上层序地层学研究进展认为,层序地层学概念及其基础理论体系需要完善。表现为:(1)地震地层学的地震层序不同于层序地层学之沉积层序;(2)基于海陆相应用差异,1992年开始层序地层学由经典三分模式向现行四分模式转变,使得层序地层学发展更趋复杂化;(3)现行四分模式对应的基准面旋回实际上是非周期性的,与岸线迹线不相符;(4)简单介绍了基于经典三分和现行四分模式所修改的 L—H—T 层序地层学模式。重新定义层序为“一套成因相关的以残留最大水泛面及其相对应的不整合界面为界的相对整合的地层序列”。

关键词 L—H—T 层序地层学 岸线迹线 体系域 残留最大水泛面 相应的地面不整合面 疑似海侵

作者简介 李绍虎 男 1964 年出生 博士 副教授 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

层序地层学发展超过 30 年,流派纷呈,观点各异,难以统一,仅能“求同存异”(the coexistence of contrasting approaches)^[1]。30 多年后的 2009 年,加拿大阿尔伯达大学地球与大气科学系 Catuneanu 教授联手 27 位国际著名学者在 Earth Science Reviews 上发表“Towards the standardization of sequence stratigraphy”,认为可以给各个流派的模型一个公正的评判,以利于层序地层学标准化^[1]。对此,挪威卑尔根大学(UiB)地球科学系 Helland Hansen 教授提出“地层学思潮的这一分支(指层序地层学)依然处于相对年轻活跃地发展之中,就此由标准化而‘冻结’的概念基础,在未来极有可能发生变化。”^[2]

Helland Hansen 所言或许将会得以证实。追踪层序地层学发展历史不难看出,尽管其在 20 世纪 70 年代引发了地层学革命,但是层序地层学正在面临新的挑战。文章仅依据作者近年来对层序地层学关注谈点以下几点思考。

1 层序地层学之层序不能等同于地震地层学之层序

20 世纪 60 年代中期,Vail 在 Exxon 开发研究公司率领他的科研集体致力于世界大陆边缘获取的地震反射资料新的改进品质生成;该研究群体在 Vail

领导下,带领世界进入地层学与地震解释相结合,并且由此发展了地震地层学原创概念^[3]。Mitchum 等定义层序为“一套成因相关的以不整合面及其相对应的整合界面为界的相对整合的地层序列(a relatively conformable succession of genetically related strata bounded by unconformities and their correlative conformities)”^[4]。然而,层序地层学现代概念真正开始形成于 Wheeler^[5,6]、Sloss^[7,8]的研究工作^[9],后来才由 Sloss 的研究生 Vail 首次将区域地层学应用于区域地震反射资料解释中,并且对外宣称“地震反射相位代表年代线(time lines)”^[3]。这些应该归功于地震地球物理学家,是他们将地震解释与地层学相结合由此引发地层学革命。

十分有趣的是 Ross^[10]指出 20 世纪 60 年代早期其实已经形成了层序地层学所有基本观念,但是并没有引发地层学革命。他将其部分归因于当时沉积学家过分地热衷于过程响应(process response)模型,部分因为缺乏必要的区域性地层资料(类似地震剖面)。言外之意,沉积学家当时“注重细节而非把握格架”。

Catuneanu (2006) 总结的层序地层学流派中^[11,12],第一层次为层序^[7],第二层次地震地层学——沉积层序 I^[4];第三层次的沉积层序 II^[13~15]、沉积层序 III^[16~18]、沉积层序 IV^[19~21]、成因层序^[22,23]和 T—R 层序(图 1)。现在流行的这些众

收稿日期: 2009-09-28; 收修改稿日期: 2009-10-10

多层序地层学流派一个共同的特点 就是遵从不整合面及其相对应的整合界面为层序边界,也就是 Mitchum 等(1977) 的地震层序定义。地震地层学家们尽管创立了地震地层学,但是实际上却忽视了沉积学家注重的过程响应,由此将地震地层学中的层序概念全盘引入层序地层学中。一定程度上,形成“注重格架而弱化细节”。

层序格架于过程响应之间的关系如何,直接关系到沉积层序边界是否与地震层序的边界一样仅仅是一个物理界面。由此引发以下疑问:(1) 静态物理边界(地震层序) 能否等同动态剥蚀边界(沉积层序)? 地震层序的边界是现今界面上下地层物性差异的静态反映,可以看成是一个物理界面;而沉积层序边界表象上为物理界面,但是更包含了剥蚀过程,应该是一个剥蚀地质体表现的物理界面,静态地震层序边界套用在动态层序边界上显然是不合理的。(2) Mitchum 的层序定义是否全面? 边缘部位的不整合面上下地

层有无成因关系? 层序发育显而易见地表现为边缘侵蚀盆内沉积,随着时间推移而最终形成代表最晚时间的保存的不整合面,该界面之下存在的不整合面开始以来发育的地层与其上地层至少在盆地内部具有成因关系,为何要将这部分本该具有成因联系的下伏地层人为地割裂开来? 显然层序定义设计者们没有全面地考虑“成因相关”的范畴。(3) 层序地层学经典三分模式究竟是怎么建立的? 其顺序为何是低位、海侵、高位体系域? 自原低位体系域分解出的新的基座——下降期体系域,构成 FSST—LST—TST—HST 模式是否使得层序地层学发展复杂化? 层序地层学分类方案众多,边界差异甚大(图1),有无解决办法?

多年来层序地层学家们一直在不断地为层序地层学寻找使其模式继续合理化存在的理由,不断修补改进,从三分模式到四分模式,为强迫海退楔体系域到强迫海退体系域再到下降期体系域的演变设定的强迫海退,为低位体系域和高位体系域设定了正常海

层序模式 事件	沉积层序II	沉积层序III	沉积层序IV	成因层序	T-R层序	L-H-T层序 (本文)
海侵结束	HST	早期HST	HST	HST	RST	MFS
	TST	TST	TST	TST	TST	
海退结束	晚期LST (楔)	LST	LST	晚期LST (楔)	MRS	HST
	早期 LST (扇)	晚期HST	FSST	早期LST (扇)		RST
基准面下降 结束	cc*		cc**			① ②
基准面下降 开始	HST	早期HST	HST	HST		CSU EMFS



图1 现有层序地层学模式的体系域术语和层序边界时间(Catuneanu 2006)

LST - 低位体系域; HST - 高位体系域; TST - 海侵体系域; FSST - 充填体系域/FRST - 强迫海退体系域(Hunt 和 Tucker ,1995); RST - 海退体系域; MFS - 最大水泛面; MRS - 最大海退面; cc* - 相应整合面(Posamentier 和 Allen ,1999); cc** - 相应整合面(Hunt 和 Tucker ,1992)。本文: RMFS - 残留最大水泛面; CSU - 相应的不整合面; ①ESU - 残留不整合面; ②t. s. - 海侵面。

Fig. 1 Timing of systems tract and sequence boundaries for the sequence models currently in use (Catuneanu ,2006) .

Abbreviations: LST—lowstand systems tract; HST—highstand systems tract; TST—transgressive systems tract; FSST - falling stage systems tract/FRST - forced regressive systems tract (Hunt and Tucker ,1995); RST - regressive systems tract; MFS - maximum flooding surface; MRS - Maximum regressive surface; cc* - correlative conformity (Posamentier and Allen ,1999); cc** - correlative conformity (Hunt and Tucker ,1992) . EMFS - remnant maximum flooding surface; CSU - correlative subaerial unconformity; ESU - extension of subaerial unconformity; t. s. - transgressive surface.

退再后来又变为低位正常海退和高位正常海退,术语越来越多越来越细,甚至于岸线迹线“S”型非周期性都可以用于推荐层序地层学标准化。所有这些都与层序地层学基石——沉积层序的定义有着密切关系。表面上提倡“成因相关”而忽视真正的成因相关地层,用无数多个“与之相对应的整合界面”连同不整合面一起作为层序边界,长期得不到解决。如其说上个世纪沉积学家“热衷于过程响应”而没能带来地层学革命而后来由地震学家从宏观上把握格架而引发地层学革命,那么现如今应该是沉积学家再次“热衷于过程响应”而抓住机遇促进层序地层学革命的时候了。

2007 年夏天,李绍虎在准东岫湖地区发现岫湖现代水下加积扇,该平顶扇之顶部发育退积砂砾层及全区覆盖的泛泥沙层。由此引发对经典三分层序地层学和现有流行四分层序地层学模型思考,通过图解证明它们存在的问题,提出沉积层序为“一套成因相关的以残留最大水泛面及其相对应的不整合面延伸为界的相对整合的地层序列—a relatively conformable succession of genetically related strata bounded by remnant maximum flooding surfaces (RMFS) and their correlative subaerial unconformities (CSU)”。基本出发点就在于:静态地震层序边界不同于动态沉积层序边界,因此层序地层学之层序不能等同于地震地层学之层序;同时认为这也将是从理论上根本改变现有层序地层学流派纷呈难以统一的关键所在。

与岫湖现代水下加积扇有着类似的叠置构型的实例包括:加拿大 Alberta 的 East Coulee 三角洲顶部海侵体系域^[26]、Baram 三角洲顶部的退积楔^[27]、Eastern Pannonian 盆地楔形地震反射单元^[28]、墨西哥湾的强迫海退楔形体^[1]、意大利 Adriatic 陆架上的“泥质”强迫海退沉积^[29]、冰碛近端斜坡上的楔形序列^[30]、Vouraikos Gilbert 型扇三角洲上的红色披盖壤土^[31]和印度中部新元古代硅质碎屑陆架上强迫海退楔^[32]。

2 层序地层学从经典三分到现今四分模型的转变

从 1992 年开始,人们不断发现经典三分模型(LHT—TST—HST)在海相和非海相中应用存在差异。于是国际层序地层学界开始提出海相层序地层学四分模型,基于 Plint 提出强迫海退概念之后^[34],人们在原三分模型低位体系域分解出一个新的基座

(substrate)——强迫海退(楔)体系域(forced regressive wedge systems tract—FRWST^[19,33];后来将其改为 forced regressive systems tract—FRST^[20];现在流行称为 filling—stage systems tract—FSST^[35])加上原有的三分体系域,构成自下而上的 FSST 或 FRST、LST、TST 和 HST。这些体系域分别相应地被赋予基准面曲线对应的强迫海退(forced regression—FR)、低位正常海退(lowstand normal regression—LNR)、海侵(transgression—T)和高位正常海退(highstand normal regression—HNR)^[1]需要指出的是 FSST 最早是放在层序顶部^[2],经 Catuneanu 系列工作现放在层序最下部。

其中,对于正常海退(normal regression)的理解东西方存在明显差异,Catuneanu 和 Catuneanu 等将其定义为沉积物补给驱动的前积,即物源补给速率超过海平面上升速率,岸线朝海推进^[11,12]。他们认为只要是岸线朝海推进统归为海退,因此西方理解的正常海退是海平面上升期的岸线朝海推进式海退,有加速上升和减速上升之分,分别对应低位、高位正常海退^[1]。

3 1995 年层序地层学界关于层序边界位置的讨论奠定四分模型建立

1995 年,Kallo 和 Posamentier 等在 Sedimentary Geology 上就 Hunt 和 Tucker 的文章“Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall”围绕层序边界是放置在强迫海退体系域(沉积)之底部还是顶部展开讨论^[37,20]。Kallo 和 Posamentier 等坚持以“最大间断坡折”为准将层序边界放在强迫海退沉积底部^[38],而 Hunt 和 Tucker 则认为以“地面暴露面最大延伸”(subaerial exposure increases to reach its maximum extend)为诊断标志,将层序边界定位于强迫海退体系域顶部^[20]。据此,Hunt 和 Tucker^[19,20]将层序“一分为二”,而 Posamentier 等^[33]则将低位体系域“一分为二”为早、晚两部分。尽管如此,他们已经触及到“不整合面为界”这一底线,却无法解决。尽管大家较为赞同 Hunt 和 Tucker 的方案,且认为已经成功解决层序边界问题^[38],甚至于通过印度中部的 Chandarpur 群发育的强迫海退楔证明 Hunt 和 Tucker 的结论正确,直至成为 Catuneanu 等推荐标准化重要流派之一^[1]。但是无论 Posamentier 等还是 Hunt 和 Tucker,包括 Helland-Hansen 和 Gjelberg 等极力推荐层序地

层学四分模式^[21, 39], 都没能从根本上改变继承地震地层学静态层序边界^[4]这一理论观念的局面。

尽管如此, 他们的研究工作奠定了现在四分模型建立, 同时也为后续层序地层学研究标准化工作暴露了基准面曲线的非周期性。

4 四分模型匹配的基准面曲线的非周期性、岸线迹线周期性检验、废除高位正常海退

无论是三分还是四分层序模型, 其对应的基准面曲线均以正弦曲线形式表达, 相对整合面(c. c.)定义各异(图2), 其背后预示的控制层序发育的海平面变化、相对海平面变化或基准面变化难以统一; 同时也体现层序地层学模型匹配的所谓正弦曲线操作具有随意性。尽管 Catuneanu 等认为各种层序地层学流派有其特定背景下存在的理由^[1], 但是它们表示的层序边界位置差异非常大, 进而导致层序内部体系域划分存在显著不同(图1)。

主要层序地层学流派均没能在海平面曲线、相对海平面曲线、基准面曲线上标定具体的不整合面(图2), 仅仅标注了相对应的整合面(c. c.)。一方面强调剥蚀不整合面在层序划分识别中的作用, 另一方面却又采取相对应的整合面作为标注定位于海平面波动曲线上, 以至于 Exxon 公司都开始动摇, 主张层序地层学需要从全球海平面变化模式中分离出来^[7]。这也是 Van Wagoner 等在其硅质碎屑岩层序地层学一书中没有重点介绍海平面变化曲线的原因所在。相对而言, 1992 年以前层序地层学发展在有海平面变化方面显得无所事从、流派纷呈, 主要源自层序地层学在海相和非海相应过程中出现差异所致; 1992 年之后, Posamentier 等^[33]、Hunt 和 Tucker^[19, 20]、Kallo 等^[37]、Helland-Hansen 和 Gjelberg^[21]、Helland-Hansen 先后提出四分方案, 并且对层序边界类型提出质疑^[24], 建议废除 I、II 型层序边界。

此后, 关于海平面变化在层序地层学模型中的解释不仅没有弱化, 反而得到加强。随后用正常海退^[38]、低位正常海退和高位正常海退^[22], 加之原有的强迫海退^[19]和海侵, 逐渐将现在流行的四分方案的 FSST(FRST)、LST、TST 和 HST 分别对应解释为强迫海退、低位正常海退、海侵和高位正常海退, 逐渐为四分方案寻找匹配的成因解释理由。直到 2009 年, Catuneanu 等认为所有的匹配工作解决完成, 才推荐进行层序地层学标准化。然而经过 30 多年的发展,

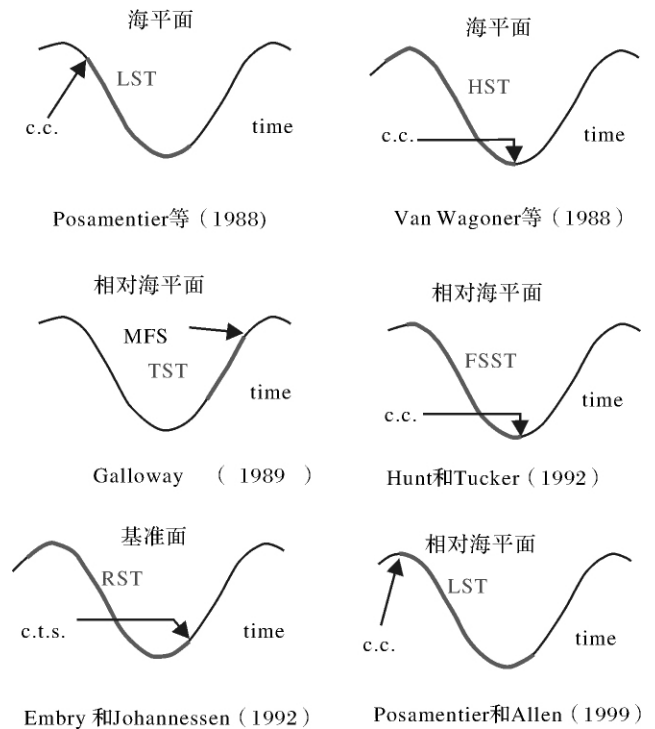


图2 不同层序地层学模式定义的相对整合界面 (Catuneanu 2006)

c. c. - 相对整合面; c. t. s. - 整合海侵面; LST - 低位体系域; HST - 高位体系域; TST - 海侵体系域; RST - 海退体系域; FSST - 充填体系域。

Fig. 2 Correlative conformities as defined by different sequence stratigraphic models (Catuneanu, 2006)

Abbreviations: c. c. - correlative surface; c. t. s. - conformable transgressive surface; LST - lowstand systems tract; HST - highstand systems tract; TST - transgressive systems tract; RST - regressive systems tract; FSST - filling-stage systems tract.

层序地层学流派众多、术语繁杂、难以取舍, 一经公布就受到 Helland Hansen 的质疑讨论^[2]。这期间, 李绍虎发现岷岷湖现代水下加积扇之后, 通过图解证明方法已经证明经典三分模式中体系域单元之间不协调弊端, 而且认为在三分模式基础上分解出新的基座(FSST 或 FRST)自然继承了原有的不协调性。对此, 在分析现有流行的四分模式后面, 发现三分模式不协调性弊端已经演变成四分模式的基准面变化曲线非周期性, 彻底暴露层序地层学存在的严重弊端。这种非周期性非常具有隐蔽性, 具体而言就是基准面曲线表现的是海平面垂向变化, 属于岸线迹线(shoreline Trajectory^[21])周期性的垂向分量, 对于岸线迹线侧向周期性(基准面侧向分量)人们并没有关注, 这就出现了 Catuneanu^[36]在其文章图 19 中的“S”型岸线迹线——侧向非周期性所致。现行四分模式中体现出

的“垂向周期性 + 侧向非周期性”, 暴露出现今模式中“基准面曲线的非周期性”。

基于上述非周期性建议废除现有四分模式中的高位正常海退 (highstand normal regression) 及其设定的高位体系域, 将剩下的 FRST、LST、TST 分别定义为 LST、HST、TST 即调换经典三分中高位体系域与海侵体系域的位置, 修改为 LST、HST、TST 顺序。对于四

分模式, 李绍虎认为既然高位正常海退废除, 就不存在低位、高位正常海退之分, 考虑到所保留的低位正常海退原有定义为物源补给速率超过海平面上升速率^[6], 而且可以继续与海侵位于基准面曲线上半半曲线上, 因此建议将 lowstand normal regression 改为 apparent transgression (疑似海侵)。这种修正可以回归到 1992 年以前的三分模式, 其理由在于“低位、高

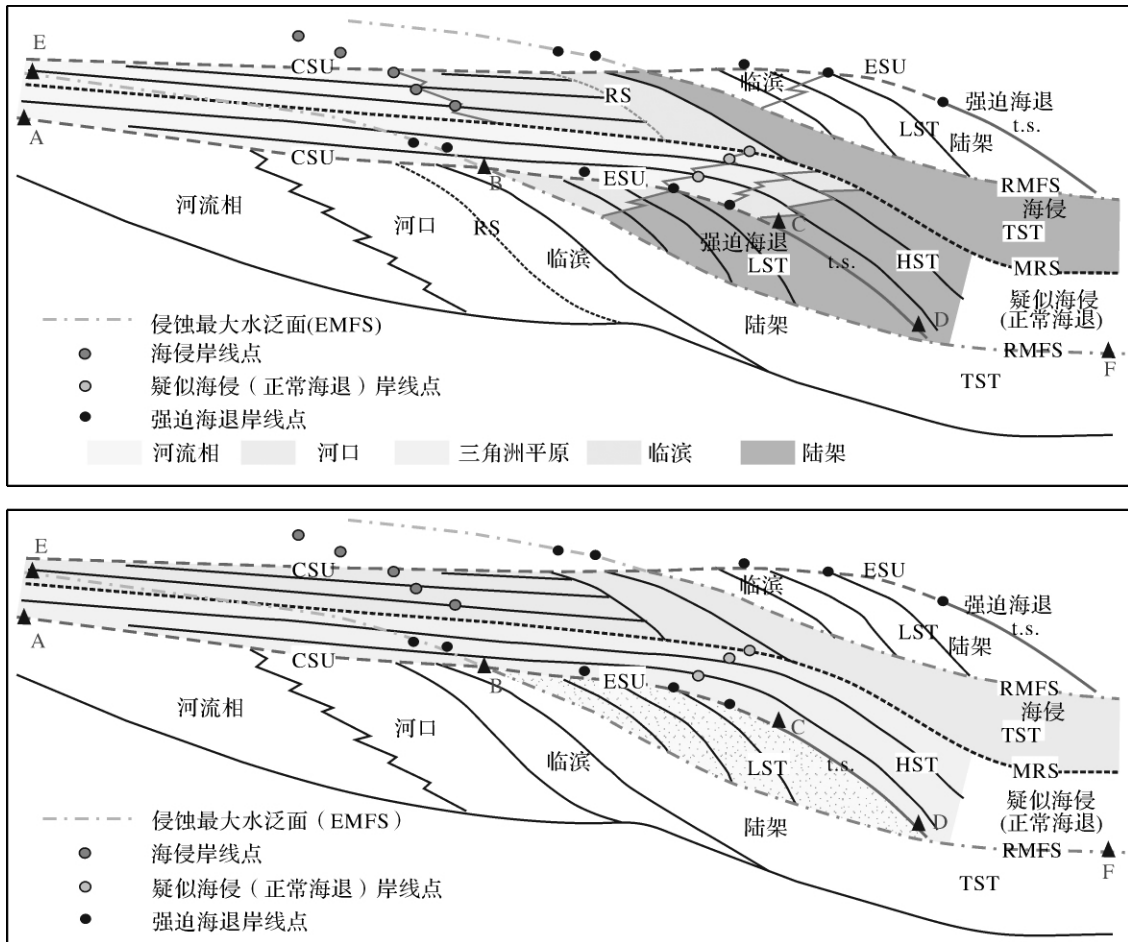


图 3 L-H-T 层序地层学模型(据 Catuneanu(2002) 修改)

层序边界由最大水泛面 (MFS/等时线 EBF) 与地面不整合面 (SU/等时线 ABCD) 相交而成, 残留最大水泛面 (RMFS/等时线 BF) 和相对应的地面不整合面 (CSU/等时线 AB) 构成复合层序边界。低位体系域形成于强迫海退期间的向前侵蚀, 表现为前积叠置构型; 高位体系域形成于物源补给超过海平面上升的疑似海侵期间的河流后退侵蚀, 以及前积 + 加积为主; 海侵体系域形成于海侵期的沿岸淹没侵蚀, 组成两扇 (斜坡扇和盆地扇) 、楔形、退积、披盖层构型。缩写: LST - 低位体系域; HST - 高位体系域; TST - 海侵体系域; MFS - 最大水泛面; MRS - 最大海退面; t. s. - 海侵面; RS - 海侵冲刷面。

Fig. 3 Model of L-H-T sequence stratigraphy (modified from Catuneanu , 2002)

Sequence boundary is composed of maximum flooding surface (MFS , i. e. , isochronous time line EBF) and subaerial unconformity (SU , i. e. , time line ABCD) intersected with the former. Therefore , remnant maximum flooding surface (RMFS/ isochronous time line BF) and its correlative subaerial unconformity (CSU/ time line AB) compose the compound sequence boundary. Lowstand systems tract formed under frontal erosion during forced regression and showed progradational stacking patterns; Highstand systems tract developed under fluvial back erosion during apparent transgression when sediment supply exceeded sea level rise , and is composed of progradational and aggradational stacking patterns; transgressive systems tract consists of basin floor fan , slope fan , wedge - shape retrogradational and draped stacking patterns that formed under coastal submerged erosion during transgression. Abbreviations: LST - lowstand systems tract; HST - highstand systems tract; TST - transgressive systems tract; MFS - maximum flooding surface; MRS - maximum regressive surface; t. s. - transgressive surface; RS - ravinement surface.

位用于表示体系域时指的是位置关系^[7],或者继续沿用 FSST-LST-TST 模式。无论如何,我们找不到理由解释 HST 设定造成的海平面变化垂向周期性与侧向非周期性并存的理由。

5 LHT 层序地层模型、等时格架、基准面曲线

5.1 LHT 层序地层模型

基于对经典三分和现行四分模式的改进,李绍虎提出 L-H-T 层序地层学,认为层序发育开始于边缘抬升背景下的下一个层序最大水泛面结束之时,一个完整层序发育可以分为三个盆内阶段及其对应的三个边缘过程:

(1) 盆内的强迫海退(forced regression)阶段与边缘的向前侵蚀(frontal erosion)过程。前者表现为基准面开始下降,岸线迹线向海推进直至基准面下降终止,后者形成低位体系域逐步阶梯状向海前积叠置构型。这一时期即使低位体系域形成期,又是层序边界形成期——三维空间里下伏层序顶部最大水泛面与上覆新层序低位体系域顶部的不整合面相,交于低位体系域最后一期岸线处(两线交点),最大水泛面在交点朝陆部分被剥蚀,称为剥蚀最大水泛面(Eroded Maximum Flooding Surface(EMFS)),在理论上其空间是存在的;交点朝海部分保留下来称为残留最大水泛面(Remnant Maximum Flooding Surface(RMFS))。而不整合面在交点朝陆部分被保留下来或被后期浪基面、海侵面改造(时间总会晚于其形成,这些后期改造面常会误解为层序边界成因),称之为残留最大水泛面对应的不整合面(correlative subaerial unconformity(CSU)),而低位体系域顶部的不整合面借鉴 Hunt 和 Tucker^[20]概念称之为不整合面延伸(Extension of Subaerial Unconformity(ESU)),该部分向水下延伸称为疑似海侵的海侵面(transgressive surface(t. s.))。残留最大水泛面(RMFS)和相对应的不整合面(CSU)即构成复合层序边界(compound sequence boundary)。L-H-T 层序定义详见 2 部分。

(2) 盆内疑似海侵(apparent regression)阶段与边缘河流后退侵蚀(fluvial back erosion)过程。盆内海平面逐渐上升,边缘则发生河流后退侵蚀,物源补给超过海平面上升,形成高位体系域前积+加积构型^[7]。

(3) 盆内海侵(transgression)阶段与边缘沿岸淹

没侵蚀(Coastal submerged erosion)过程。海侵体系域形成楔形、退积、披盖层构型,这一阶段构型最为复杂,不一定全部发育,可以从等时层序格架(chronosequence framework)上诊断时序先后(图 3)。

5.2 LHT 层序地层模型等时地层格架

LHT 层序地层模型等时地层格架建立,主要依据向前侵蚀、河流后退侵蚀和海岸淹没侵蚀规则(图 4(a)),按照层序地层学等时性特征作图(图 4(b))。该作图方法类似于 Wheeler 相图^[5],但更注重等时地层单元之间的协调性(harmonization)。层序地层学现有流派大都会配有相应的 Wheeler 相图解释。由于 Wheeler 相图采用板状、透镜状表示等时线,忽视了等时线封闭性、时序性,单元之间的时空关系过于示意,缺乏统一的作图规则。根据 Miall 教授的建议,笔者参阅了 Cant 关于垂向相序发育与局部不整合面形成的论文^[40],本文的图解方法与其 6 类岸线迁移图解有相似之处,但有差异。L-H-T 层序地层学在这方面作了改进,制定了三个侵蚀类型作用下的地层叠置构型规则,而且必须体现剥蚀过程和岸线迹线的轨迹变化的周期性。

图 5 为根据三个侵蚀规则所作的等时层序格架图。自下而上发育低位、高位和海(水)侵体系域;层序以残留最大水泛面 BF 和相对应的地面不整合面 AB 为界;最大水泛面等时线与地面不整合面等时线交点 B 两侧分别为朝陆的剥蚀区和朝海的沉积间断区。较之 Wheeler 相图而言, L-H-T 层序地层学严格按照等时线显示沉积-剥蚀过程的时空叠置关系。而且 L-H-T 层序地层学中,等时层序格架能够将向前侵蚀、河流后退侵蚀、岸线淹没侵蚀与所设定的强迫海退、疑似海退、海侵三个阶段进行匹配,使得疑似海侵、海侵对应于基准面曲线上半区间,改变了现行的四分模式中低位正常海退、海侵、高位正常海退术语差异,而一同位于基准面曲线上半区间的状况(图 7)。

5.3 LHT 层序地层模型基准面曲线

基准面变化创造或破坏沉积响应所需的可容纳空间^[41],即沉积作用消耗可容纳空间,实际上已经成为层序地层分析的核心^[8]。与此同时,基准面变化综合体现了构造、沉积、压实作用的联合效应,为了将其分离开来,需要借助设定的基准线,即基准线相对于地核向下运动代表构造沉降响应和沉积响应;向上运动则代表构造抬升^[8]。具体而言,海底在沉积物沉积期间相对于基准线向上运动;在海底侵蚀期间则

相对于基准线向下运动。从正常的海平面到基准线，

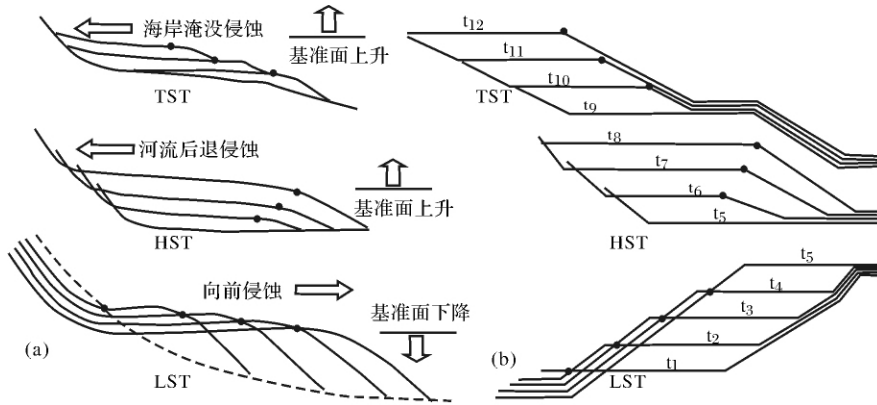


图 4 L-H-T 层序地层学三个侵蚀规则 (a) 和相应的等时线构型 (b) 圆点代表岸线迹线轨迹点。

Fig.4 Three eroded rules (a) and their correlative isochronous time line styles (b) of L-H-T sequence stratigraphy. Black dots are the points of shoreline trajectory.

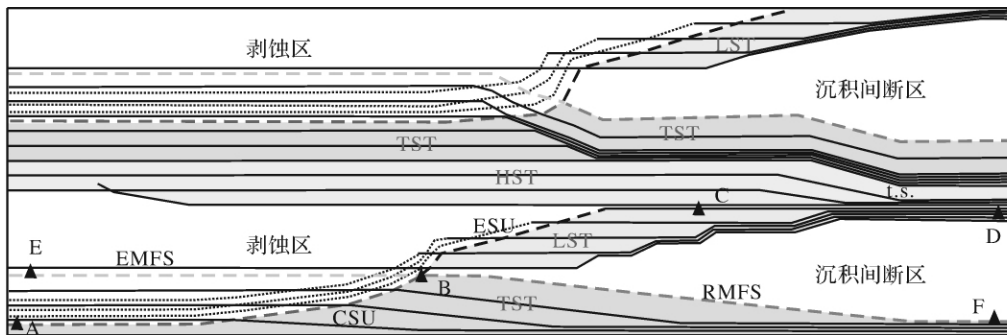


图 5 L-H-T 层序等时地层格架示意图。

缩写: LST—低位体系域; HST—高位体系域; TST—海(水)侵体系域; RMFS—残留最大水泛面 BF; EMFS—剥蚀最大水泛面 EB; CSU—相对应的地面不整合面 AB; ESU—地面不整合面延伸 BC; t. s.—海侵面 CD。

Fig. 5 The illustration within chrono-sequence framework of L-H-T sequence stratigraphy.

Abbreviations: LST—lowstand systems tract; HST—highstand systems tract; TST—transgressive systems tract; RMFS—remnant maximum flooding surface (Line BF); EMFS—eroded maximum flooding surface (Line EB); CSU—correlative subaerial unconformity (Line AB); ESU—extension of subaerial unconformity (Line BC); t. s.—transgressive surface (Line CD).

即为相对海平面变化;当忽略波浪和水流能量的影响,基准面升降基本等同于相对海平面变化,即“基准面变化”就可以简化为“海平面到海底的相对距离变化”——“相对海平面变化”^[88]。在层序地层学模式通常都采用海平面、相对海平面、基准面曲线示意海平面波动变化,现在流行采用基准面曲线, Catuneanu 对海平面、相对海平面、基准面相对于基准线进行了图解说明^[88](图 6)。

Catuneanu 认为“层序地层学从业者中常犯的一个错误是基准面变化与水深变化之间的混淆”^[88],同时认为水体加深或变浅可以出现在基准面上升期,其

实基准面上升期的水体加深应该属于海侵阶段描述范畴,而基准面上升期水体变浅严格意义上属于疑似海侵阶段。目前由于层序地层学四分模式中在海侵前后分出低位正常海退和高位正常海退——皆由物源补给超过上平面上升,致使从业者难以理解基准面上升期的水体加深和变浅机理,说明我们的理论还不完善。按照 L-H-T 层序地层学,强迫海退期(海平面下降速率 > 沉积速率)、疑似海侵(海平面上升速率 < (物源补给) 沉积速率)、海侵(海平面上升速率 > 沉积速率)三个阶段,疑似海侵处于基准面降、升转换过渡之间,这在经典三分、现行四分模式中都没

有体现,否则传统意义上的正弦曲线的数学含义与用于描述海平面波动变化的地质含义之间在周期性理论方面应该是脱离的。

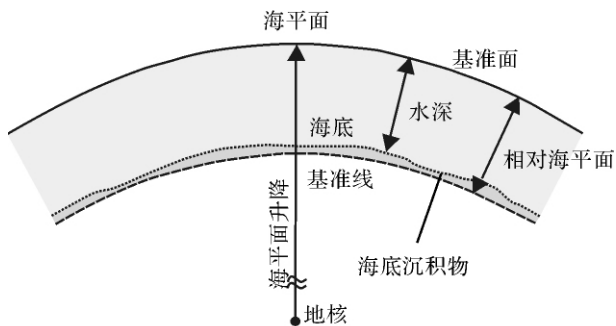


图6 海平面升降、相对海平面和水深作为海平面、海底和基准线参考面的函数 (Catuneanu(2002) 修改自 Posamentier 等(1988))

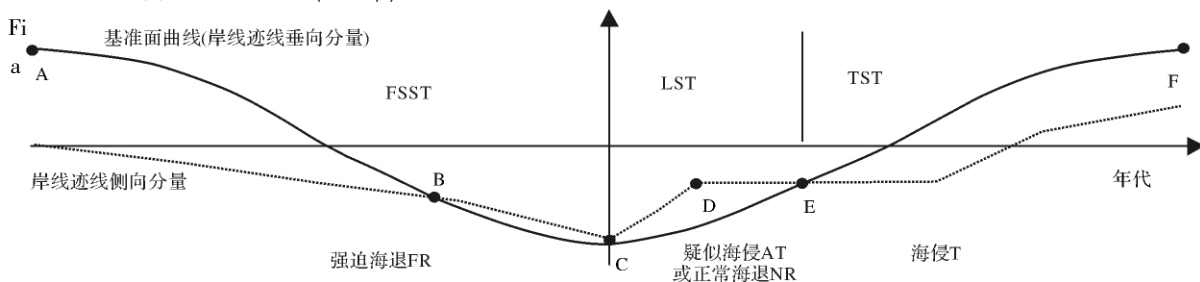


图7 L—H—T 层序对应的基准面曲线(相对于参考基准线之深度)和岸线垂向周期性变化曲线(时间间隔)。

Fig.7 The base level curve of L—H—T sequence stratigraphy presents relative depth to datum, and the periodical curve of L—H—T sequence stratigraphy shows time intervals.

6 结论

(1) 地震地层学中的层序不同于层序地层学之层序,地震层序边界属于地震反射界面的静态物性差异体现,而层序地层学的层序边界更应该动态地恢复层序发育过程中剥蚀—沉积—构造综合效应。因此静态地震层序与动态沉积层序之间有着本质区别,地震地层学向层序地层学转变过程中,层序概念不能照搬。

(2) 1992 年开始,经典三分模式向现行四分模式转变,以及 1995 年的激烈讨论,均没有涉及和解决层序概念,致使层序地层学发展更趋复杂化。这主要源自海相、非海相应用差异所致,根本在于经典三分模式顺序在创立之时体系域设定顺序问题。当初如若按照 L—H—T 三分顺序设定,或许没有后来的四分模式,更不会有海相、陆相应用上的差异。

(3) 现行四分模式最大的弊端在于其基准面貌似周期性,其实隐含着非周期性,高位正常海退使得其非周期性得以暴露显现。任何学科发展都会在不

断改进、完善过程中日趋发展,直至成熟。层序地层学模型建立忽视了重复性实验性这一原则,在创立之初未能及时纠正海平面升降变化非周期性问题;Posamentier 等解剖阿尔伯特东坳里三角洲时^[26]海侵体系域就位于最上部,鉴于当时的既定三分模式和“沉积前未固结”而错失开挖揭露内部叠置构型的良机。

基于等时层序格架(图5),采用岸线迹线垂向、侧向周期性分解方法,在岸线迹线垂向周期性基础上绘制出基准面曲线(图7)。其中,虚线部分为岸线迹线垂向周期性曲线,以时间间隔表示;实线为基准面垂向相对深度变化。图7显示三个阶段:(1)强迫海退期。基准面逐步下降,至B点基准面下降快于岸线处下降速率,物源补给超过基准面下降速率,这在经典三分和现行四分模式中没有体现;强迫海退下降至C点达到最低,标志这一时期结束;(2)疑似海侵期。随着基准面上升,物源补给超过基准面上升速率,岸线朝海推进,这一时期在空间上本该结束于D点,实则延迟至E点;(3)海侵期,基准面上升超过沉积速率,岸线后退,至F点达到理想最大水泛期,随着边缘构造抬升,层序发育终止。

(4) L—H—T 层序地层学吸取了前人研究成果,坚持重复实验、复合模型叠置验证,作了如下修改:(i) 提出向前侵蚀、河流后退、海岸淹没侵蚀作图规则构建等时层序格架;(ii) 建议修改 Vial 等经典三分模式和现行四分模式,废除高位正常海退及其形成的高位体系域这一经典设定,调整为低位、高位、海侵体系域发育顺序;对此, Van Wagoner 等已经为后来的层序地层学发展留下余地——低位、高位在用于表示体系域时,仅仅表示其在层序中的位置^[16];(iii) 建议重新定义 Mitchum 等的层序定义,以残留最大水泛面及其相应的地面不整合面为界。实践证

明,陆相盆地同样存在下降期体系域,已经为我国学者关注和证实^[42-45],也就是本文所指的 LHT 模式最下部体系域。

致谢 真诚地感谢外审专家及其提出的宝贵意见; 特别感谢中国地质大学(武汉)解习农教授、荷兰代尔夫特理工大学 Weltje G J 教授的指教和建议,感谢《Sedimentary Geology》前主编内布拉斯加林肯大学 Fielding C R 教授、中国地质大学(北京)邓宏文教授和吴因业教授的热情鼓励,感谢中国地质大学(武汉)吴冲龙教授、梅廉夫教授、庄新国教授、王华教授、焦养泉教授的热情帮助。

参考文献(References)

- 1 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, *et al.* Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92: 1-33
- 2 Helland-Hansen W. Towards the standardization of sequence stratigraphy Discussion [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, doi: 10.1016/j.earscirev.2008.12.003
- 3 Bonini W E, Varrin R D, Van Wagoner J. Sequence stratigraphy and the world sea-level curve: The 2005 Benjamin Franklin Medal in Earth and Environmental Science awarded to Peter R Vail [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2006, 343: 233-242
- 4 Mitchum Jr R M, Vail P R, Thompson III S, Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis [M]//Payton CE, Ed. *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration Memoir*. American Association of Petroleum Geologists, 1977, 26: 53-62
- 5 Wheeler H E. Time-stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 1958, 42: 1047-1063
- 6 Wheeler H E. Stratigraphic units in time and space [J]. *Ameria Journal of Science*, 1959, 257: 692-706
- 7 Sloss L L, Krumbein W C, Dapples E C. Integrated facies analysis [M]//Longwell C R (Chairman). *Sedimentary Facies in Geologic History*. Geol. Soc. Am. Mem., 1949, 39: 91-124
- 8 Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1963, 74: 93-113.
- 9 Mail A D. Whither stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 100: 5-20
- 10 Ross W C. Cyclic stratigraphy, sequence stratigraphy, and stratigraphic modeling from 1964 to 1989: twenty-five years of progress [M]//Fransen E K, Watney W L, CGSIC Kendall. *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition*. Kans. Geol. Surv. Bull. 1991, 233: 3-8
- 11 Catuneanu O, Khalifa M A, Wanas H A. Sequence stratigraphy of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert [J]. *Egypt Sedimentary Geology*, 2006, 190: 121-137
- 12 Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy [M]. Elsevier, Amsterdam, 2006, 375
- 13 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. *Science*, 1987, 235: 1156-1167
- 14 Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II Sequences and systems tract models [M]//Wilgus C K, Hastings B S, CGSIC Kendall, *et al.* *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ., 1988, 42: 125-154
- 15 Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I—Conceptual framework [M]//Wilgus C K, Hastings B S, CGSIC Kendall, *et al.* *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral Spec. Publ., 1988, 42: 109-124
- 16 Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, *et al.* An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions [M]//Wilgus C K, Hastings B S, CGSIC Kendall, *et al.* *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral Spec. Publ., 1988, 42: 394-45
- 17 Van Wagoner J C, Mitchum Jr R M, Campion K M, Rahmanian V D. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, core, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [M]. *American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series*, 1990, 7: 1-55
- 18 Christie-Blick N. Onlap, offlap, and the origin of unconformity-bounded depositional sequences [J]. *Marine Geology*, 1991, 97: 35-56
- 19 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
- 20 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
- 21 Helland-Hansen W, Gjelberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92: 31-52
- 22 Frazier D E. Depositional episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin University of Texas at Austin [J]. *Bureau of Economic Geology Geological Circular*, 1974, 4(1): 28
- 23 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
- 24 Johnson J G, Murphy M A, Time-rock model for Siluro-Devonian continental shelf, western United States [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95: 1349-1359
- 25 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 [M]//Vorren T O, Bergsager E, Dahl-Stamnes O A, *et al.* *Arctic Geology and Petroleum Potential Special Publication*. Norwegian Petroleum Society, 1992, 2: 121-146
- 26 Posamentier H W, Allen G P, James D P, High resolution sequence stratigraphy—the East Coulee delta [J]. *Alberta Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62 (2): 310-317
- 27 Hiscott R N. Depositional sequence controlled by high rate of sediment supply, sea-level variations, and growth faulting: the Quaternary Baram Delta of northwestern Borneo [J]. *Marine Geology*, 2001, 175: 67-102
- 28 Juhász Gy, Pogácsás Gy, Magyar I, *et al.* Tectonic versus climatic control on the evolution of fluvio-deltaic systems in a lake basin [J].

- Eastern Pannonian Basin Sedimentary Geology, 2007, 202: 72-95
- 29 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
- 30 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
- 31 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
- 32 Chakraborty P P, Paul S. Forced regressive wedges on a Neoproterozoic siliciclastic shelf: Chandrapur Group, central India [J]. Precambrian Research, 2008, 162: 227-247
- 33 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: 1687-1709
- 34 Plint A G. High frequency relative sea level oscillations in Upper Cretaceous shelf elastics of the Alberta foreland basin: possible evidence of a glacio-eustatic control? [C]//Macdonald D I M, ed. Sedimentation, tectonics and eustasy. International Association of Sedimentologists Special Publications, 1991, 12: 409-428
- 35 Plint A G, Nummedal D. The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis [M]. London, Geological Society Special Publications, 2000, 172: 1-17
- 36 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], Earth Science Reviews (2009), doi: 101016/j.ear-scirev.200902004
- 37 Kolla V, Posamentier H W, Eichenseer H. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall discussion [J]. Sedimentary Geology, 1995, 95: 139-145
- 38 Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35: 1-43
- 39 Helland-Hansen W. Sequence stratigraphy theory: remarks and recommendations [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 1995, 5: 13-21
- 40 Cant D J. Geometric modelling of facies migration: theoretical development of facies successions and local unconformities [J]. Basin Research, 1991, 3: 51-62
- 41 Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression [M]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall CGStC, et al. eds. Sea Level Changes—An Integrated Approach. SEPM Special Publication 42, 1988: 47-69
- 42 操应长. 断陷湖盆层序地层下降体系域的划分 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(1): 22-25 [Cao Yingchang. Distinguishment of falling stage systems tract of sequence strata in a continental rift-subsidence basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2000, 24(1): 22-25]
- 43 徐英霞, 高喜龙, 李兆炎, 等. 埕岛东斜坡下第三系层序地层与油气分布规律 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(4): 25-27 [Xu Yingxia, Gao Xilong, Li Zhaoyan, et al. Sequence stratigraphy and hydrocarbon distribution of the Eocene in the eastern slope of Chengdao area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(4): 25-27]
- 44 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 849-862 [Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 849-862]
- 45 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]

Thinking of International Sequence Stratigraphy Development and L-H-T Sequence Stratigraphy

LI Shao-hu^{1 2}

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences Wuhan), Ministry of Education, Wuhan 430074)

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

Abstract Based on the research development in international sequence stratigraphy, this paper puts some viewpoints forward as follows: (1) sequence of seismic stratigraphy is different from the depositional sequence of sequence stratigraphy; (2) after 1992 the transformation from three-divided to four-divided models, the difference between marine and continental depositional sequence makes sequence stratigraphy develop complicatedly; (3) the base level curve correlative to the four-divided model of current sequence stratigraphy is non-periodic and is not correlative to the periodicity of shoreline trajectory; (4) this paper introduces L-H-T sequence stratigraphy including conceptual model, diagrammatizing rules and approach of chronsequence framework, revamped base level curve correlative to systems tracts of L-H-T sequence stratigraphy. This paper redefines sequence as "a relatively conformable succession of genetically related strata bounded by remnant maximum flooding surfaces (RMFS) and their correlative subaerial unconformities (CSU)".

Key words L-H-T sequence stratigraphy; shoreline trajectory; systems tracts; remnant maximum flooding surface (RMFS); correlative subaerial unconformity (CSU); apparent transgression (AT)