

文章编号: 1000-0550(2011)01-0105-13

层序地层学四分模型的非周期性与时序边界调整

李绍虎^{1,2} 贾丽春³

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院 武汉 430074; 2. 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;
3. 山西省第三地质工程勘察院 山西榆次 030600)

摘要 通过图解证明现行四分层序地层模式存在的岸线迹线非周期性问题,表现为垂向升降1周期对应侧向迁移1+1/6周期,是由于高位正常海退设定不合理所致,建议废除高位正常海退及其形成的高位体系域,重新解释高位体系域。沉积层序边界调整为残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的地面不整合面 CSU,由此构成沉积层序自下而上包括下降期体系域、低位体系域、海侵体系域,亦即 FSST—LST—TST 叠置。此外,此研究基于废除高位正常海退对沉积层序、成因层序、R—T 层序边界进行统一,避免成因层序和 T—R 层序跨越两个沉积层序。

关键词 层序地层学 残留最大水泛面 对应的不整合面 废除高位正常海退 R—T 层序

第一作者简介 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

2009 年《Earth-Science Reviews》发表了 Catuneanu 等 28 位国际知名层序地层学家共同撰写的“Towards the standardization of sequence stratigraphy”一文,该篇论文为 Catuneanu 等(1998)、Catuneanu 和 Eriksson(1999)、Catuneanu 和 Biddulph(2001)、Catuneanu(2002)、Catuneanu 等(2005)、Catuneanu 等(2006)等序列文章的综合^[1-6]。该文倾向于“求同存异”推荐层序地层学标准化,其中重点汇总了五大层序流派及其流派之间界面关系的比较,包括沉积层序 II^[7,8]、沉积层序 III^[9-11]、沉积层序 IV^[12-14]、成因层序^[15,16]、T—R 层序^[17]。

总体看来,从 Catuneanu 等^[18]及其系列文章可以得知,层序发育匹配的基准面曲线部分基本可以达成共识,即下降期体系域(FSST)、低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST),分别对应于强迫海退(FR)、低位正常海退(LNR)、海侵(T)、高位正常海退(HNR)(图1)。然而,沉积层序各个流派之间以及它们与成因层序、T—R 层序之间,在叠置概念模型方面至今依然存较大的差异。例如成因层序跨沉积层序问题^[14](图2; Catuneanu 等(2005)的图15; Catuneanu 等(2009)的图4)、T—R 层序合并三个体系域(下伏层序 HST + 本层序 FSST + LST)为 RST 等^[17]都是禁锢于地震层序地层学早期“一套以

不整合面及其相对应的整合界面为界的成因相关的层序序列”的层序定义^[19]。沉积层序流派之间可否统一,关键在于现行层序内部叠置构型表现出的非周期性(即岸线迹线垂向(分量)周期性——基准面变化通过垂向累加可以表现为正弦曲线,但是岸线迹线侧向(分量)周期性却是非周期性的,因此岸线迹线本身不具备周期性)的解决,以及修正层序定义从而改变层序边界不定论的局面,本文针对这两点提出相应的解决方案。

现行层序的岸线迹线非周期性源自海侵之后所设定的高位正常海退(HNR),即海侵之后的第二次朝海岸线迁移。表现在岸线迹线垂向分量(基准面曲线)“U”字型、侧向分量“S”字型,至今未能引起学术界重视。

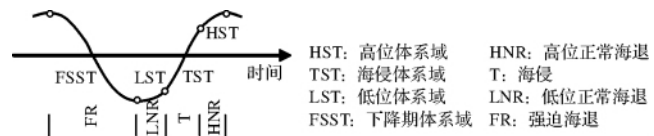


图1 四分层序地层学模型基准面变化曲线
(岸线迹线垂向周期性)^[18]

Fig. 1 Base level curve (vertical periodicity of shoreline trajectory) of four-divided model of sequence stratigraphy. Abbreviations: LST—lowstand systems tract; HST—highstand systems tract; TST—transgressive systems tract; FSST—falling stage systems tract; HNR—highstand normal regression; T—transgression; LNR—lowstand normal regression; FR—forced regression

1 沉积层序模式演变及其非周期性

1.1 三分到四分模式的演变概述

自从1992年开始,由于层序地层学在海陆应用差异,国际上开始由原有经典三分方案向四分方案演变。Hunt和Tucker^[12]将经典三分模式中的低位扇盆底部分和斜坡扇(注:分别相当于低位扇面河道+扇朵叶、决口河道复合体(Haq等^[7](1987),其图1, p. 1157))分别称为强迫海退楔体系域(FRWST)盆底成分和斜坡成分,将其原有经典的低位楔体系域称为低位前积楔体系域(LPWST);模型的核心变化在于:将经典层序地层学中盆底扇和斜坡扇从原低位体系域中分离开来,而且将朝陆退积叠置的先盆底扇后斜坡扇的时序关系,改变为盆底成分属于斜坡成分的同期相变(Hunt和Tucker,1992^[12];图2 p. 4),由此提出“不整合面最大延伸”作为层序边界识别的诊断原则。

这一看似合理的原则却在FRWST与LPWST之间划分出层序边界SB出来(Hunt和Tucker,1992;图2 p. 4; Hunt和Tucker,1995,图1 p. 150),实质上是将“层序一分为二”。对此Kolla等(1995)提出强烈质疑,并且以maximum hiatal break(最大超级坡折)为界坚持经典三分模式。实际上Kolla等^[20]误解了Hunt和Tucker的意思(Hunt和Tucker等,1995, p. 148)。Hunt和Tucker^[12]为了避免误解将FRWST、LPWST分别改为FRST、LST,再后来FRST改成了FSST(Plint和Nummedal^[21];演变过程见下段)。此外Helland-Hansen和Gjelberg^[14]的四分方案更趋直接,自下而上分别为低位楔体系域(LWST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)、强迫海退楔体系域(FRST),分别编号为①、②、③、④,显而易见他们主张将强迫海退楔体系域(FRWST)放在沉积层序顶部,严格遵循层序关于不整合面及其相对应的整合界面为界的概念。在Catuneanu系列论文推进下,现行FSST、LST、TST、HST方案逐步形成,其中值得一提的是2002年以前Catuneanu将LST和HST归因于正常海退,后来分为低位正常海退和高位正常海退。

关于下降期体系域(FSST),着实是一个具有戏剧性变化的术语。Plint等^[22-24]基于加拿大西部内陆Alberta省和British Columbia省交界的洛基山地区白垩系地下和露头研究工作,强调底界侵蚀的近滨相沉积的出现及其意义,并且将其解释为相对海平面下降期的缓坡型陆架上的沉积,这一过程被Plint^[24]命

名为“强迫海退(forced regression - FR)”过程,而他们则将此体系域命名为falling sea level systems tract^[25]——国内翻译为海退体系域(王剑等,1996; Nummedal(1993)成都的层序地层学讲座)随后被命名为falling stage systems tract^[26]。遗憾的是他们都是以摘要的形式发表,直到2000年Plint和Nummedal才在国际层序地层学界普遍接受FSST之后,对FSST进行系统的定义和正式术语命名。Plint^[24]的强迫海退术语影响了层序地层学四分模式的演变过程,在此期间出现了较多的同义术语,正如Plint和Nummedal^[21]指出的“尽管术语变化(强迫海退楔体系域^[12]、强迫海退体系域^[13,14]、下降海平面体系域^[25]或者下降期体系域(Plint和Mummedal,2000),这些研究都强调一个类似的问题,而且达到类似的结果^[21](Plint和Nummedal,2000; p. 3)”。Catuneanu^[4]更为直接地称“强迫海退体系域也就是下降期体系域(p. 21)”。由此可见,比较Hunt和Tucker^[12,13]、Helland-Hansen和Gjelberg^[14]和Plint和Nummedal^[21]模型,现行四分模式的FSST是个广为接受的术语,但是其地层叠置构型至今依然没有统一。

简而言之,从1992年之后经典三分模式中的LST分解出新的LST(低位楔)和FSST,开始时FSST曾经设定在层序顶部^[14],直到2005年Catuneanu开始将FSST与Haq等(1987)和Posamentier等(1988)的早期LST(扇)对应(Catuneanu等,2005;图15 p. 80),放在层序下部作为沉积层序最底部的体系域,从而完整地构成FSST—LST—TST—HST四分模式。

1.2 四分模式的非周期性——垂向1周期:侧向1 + 1/6周期

在目前四分模式中FSST叠置构型仍未达成一致的状况下,加之FSST—LST—TST—HST方案本身存在致命的非周期性问题,因此本文作者认为Catuneanu等^[18]推荐层序地层学标准化有待深入。正如Helland-Hansen^[27]指出的那样“还处于活跃期,不易‘冰封’……”;现在看来,Helland-Hansen应该是对的。

层序地层学研究中各个流派均匹配有基准面变化或海平面升降变化、相对海平面变化曲线,指的都是海平面垂向变化;而在层序分析中涉及到按照相组合的侧向迁移区分叠置样式,从而划分体系域,因此这些最终都体现在岸线迹线变化上面。岸线迹线定义为沿着沉积倾向的剖面岸线迁移轨迹(比较Swift^[28]; Davis和Clifton^[29]; Larue和Martinez^[30];

Cant^[31]), 是相对海平面变化、沉积物补给和盆地地形的函数^[14], 或者是沉积盆地充填时岸线或浅水陆架边缘相的位置变化之路径(Helland-Hansen 和 Martinsen, 1996)。遗憾的是截至目前为止, 所有层序地层学流派在其模型建立过程中并没有将基准面变化(垂向)、相迁移(侧向)统一到岸线迹线变化基础上进行综合考量, 也就是强调岸线迹线垂向变化(基准面变化)的周期性, 而忽略了岸线迹线侧向变化有无符合周期性问题。对于一个建立在全球海平面周期性变化基础上的地层学理论而言, 层序地层学各个流派模式成立的毋庸置疑的公理应该是岸线迹线垂向、侧向均具有周期性变化, 而非仅仅是岸线迹线垂向(基准面)变化具有周期性。

以下选择 Helland-Hansen 和 Gjelberg^[14] 模型证实四分模式的岸线迹线垂向、侧向变化的周期性。需要指出的是, 在所有四分模式中他们的模型最为完整, 易于表达; 一定程度上, 他们最为注重模型的整体性和重复性(图 2)。Hunt 和 Tucker^[12, 13] 模型只强调层序下部, 而 Plint 和 Nummedal(2000) 模型过于复杂, 两者模型均没有与成因层序、T—R 层序进行对比。

国际上趋于认为: 一个完整海相层序包含下降期体系域、低位体系域、海侵体系域和高位体系域; 其与成因层序、T—R 层序之间有着显著差异(图 2)^[14, 18]; 不仅如此, 层序地层学本身的各个流派之间也存在明显差异^[8, 9, 12, 16, 17], 这些直接影响了“引发地层学革命的”层序地层学的发展。李绍虎 2007 年夏天在新疆准东观察到岷岷湖现代水下加积扇叠置构型, 从开始怀疑经典层序地层学发育顺序, 发展到现今直指高位体系域的设置(无论是经典三分还是现行四分模式) 经历了一个不断反复否定调整的思考过程。受岷岷湖现代水下加积扇(Jijihu subaqueous aggradational fan, Jijihu SAF) 叠置构型启示, 采用不同于 Wheeler 相图^[32] 的作图方法, 按照等时性原理划分并拟定向前侵蚀、河流后退侵蚀、沿岸淹没侵蚀三种类型及其相应的等时图解规则^[33]。

本文采用上述图解规则, 并且基于图 2 格架概念模型, 构建等时地层格架(chronostratigraphy) 或年代层序格架(chrono-sequence framework)(图 3), 旨在建立并且直观地检验岸线迹线垂向、侧向变化的周期性。分述如下:

(1) 岸线迹线垂向周期性, 即为传统的基准面曲

线, 由图 3 中的系列 B 点所构成。这里采用相对于海平面下降最低点为参考点, t 时期对应的岸线升降幅度采用相对时间段与升降速率之积 $v_i \cdot \Delta t_i$ 表示。结果表明 $B_{01}-B_{05}$ 、 $B_{05}-B_{11}$ 、 $B_{11}-B_{17}$ 、 $B_{17}-B_{23}$ 分别对应于 FSST、LST、TST、HST; 如果沉积层序发育足够完整, 图 3 中岸线迹线完全可以用正弦曲线表达(注: 图中表达的是 Δt_i , 没有考虑 v_i), 因此 B 系列点构成的岸线迹线垂向变化可以满足周期性要求。(2) 岸线迹线侧向周期性, 由图 3 中的系列 C 点构成, 为了便于表述坐标原点依然选择海平面下降最低点。结果显示, $C_{01}-C_{05}$ 、 $C_{05}-C_{11}$ 、 $C_{11}-C_{17}$ 分别对应于 FSST、LST、TST, 一个周期已经形成; 而 $C_{17}-C_{23}$ 显然已经在数学上进入下一个周期。如果按照 FSST 与 LST—TST—HST 各占半个周期计算, LST—TST—HST 中多出的 HST 就近于 1/6 周期, 那么 C 系列点构成的岸线迹线侧向变化就可以理解为 $1 + 1/6$ 周期。

换言之, 图 3 中显示的岸线迹线垂向变化为 1 周期, 但是却要对应于岸线迹线侧向变化 $1 + 1/6$ 周期, 显然是不合理的。如果去掉三分和四分模式中设定的高位正常海退及其形成的高位体系域, 那么岸线迹线(A 点系列) 自 A_{01} 到 A_{17} 即可以构成一个周期, 因此, 本文作者建议废除 HRN 及其形成的 HST。值得强调的是, 图 3 中岸线迹线侧向变化为 A 点系列曲线“宽度”压缩而成, 旨在方便对比垂向变化和侧向变化在 B_{17} 点和 C_{17} 点出现的周期性差异(详见图 4), 也就是突出岸线迹线侧向表现的 $1 + 1/6$ 周期。

为了进一步阐述层序地层学现行四分模式中岸线迹线非周期性, 特此将图 3 中的 B、C 系列点所代表的垂向和侧向变化单独提取得到图 4。图 4(a) 为岸线迹线垂向变化, 纵横坐标分别为幅度 H 、年代 t , 其中振幅 $H = v_i \cdot \Delta t_i$ (升降幅度 \times 时间段), 此处采用常量 q 代替 v (注: 年代地层格架中信息量太多, 只能等时间隔替代 time-interval); 该图显示与 FSST—LST—TST—HST 层序地层叠置对应的 FR—LNR—T—HNR 为 1 周期。图 4(b) 为岸线迹线侧向变化, 纵横坐标分别为水平距离 S (相对于海平面最低点朝陆朝海水平迁移距离)、年代 t , 该图显示: 与 FSST—LST—TST 层序地层叠置对应的 FR—LNR—T 为 1 周期, 与 HST 对应的 HNR 为 1/6 周期, 也就是 FSST—LST—TST—HST 层序地层叠置对应的 FR—LNR—T—HNR 为 $1 + 1/6$ 周期。

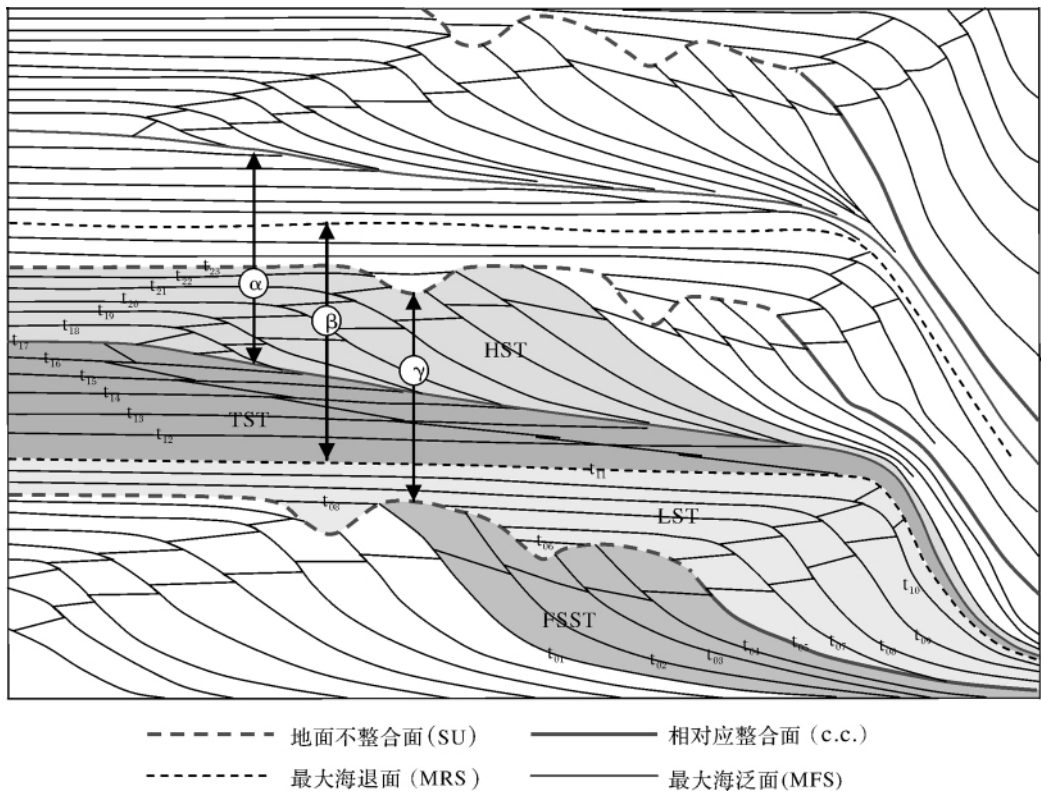


图 2 单元地层关系及关键界面和沉积作用旋回 α 、 β 、 γ (Helland-Hansen 和 Gjelberg, 1994)
 α 、 β 、 γ 分别代表成因层序 (Galloway, 1989)、T-R 层序 (Johnson 等, 1985)、沉积层序 (Vail 等, 1984)

Fig. 2 Stratigraphic relationships between units, key surfaces and cycles of deposition (α , β and γ). Symbols α , β and γ are genetic sequence (Galloway, 1989), T-R sequence (Johnson, et al., 1985) and depositional sequence (Vail, et al., 1984)

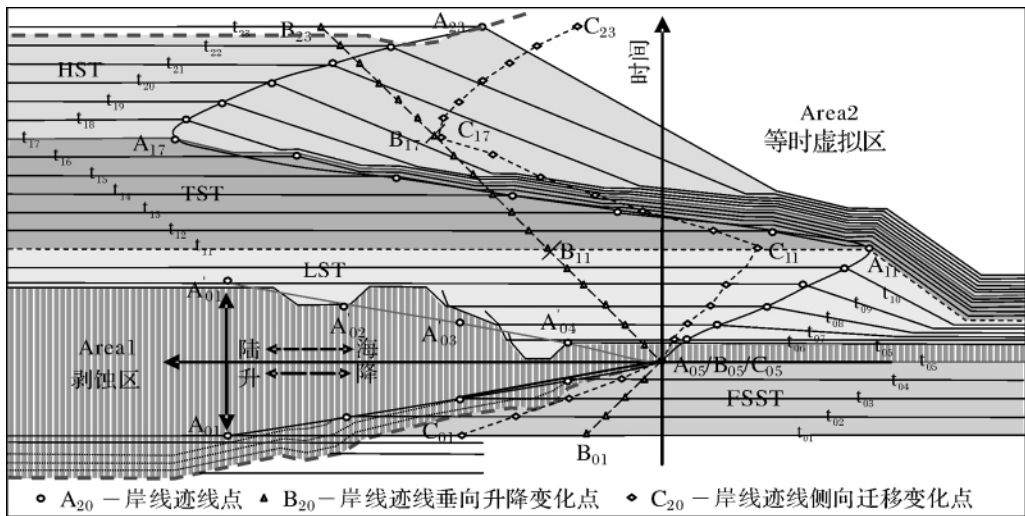


图 3 基于图 2 (阴影部分) 地层叠置构型的年代层序格架图。为了便于显示不整合面发育过程, 下降期体系域岸线迹线点采用旋转方式表示 (以 A_{05} 点为圆心逆时针旋转, 亦可理解为关于横坐标轴对称, 即可恢复原始理想岸线迹线点 (A 系列点)。A 系列点为侧向迁移周期性岸线迹线点, B 系列点为垂向升降周期性迹线点; Area 1、2 分别代表剥蚀区、等时虚拟区 (上下等时线等时)

Fig. 3 Chrono-sequence framework based on the shadow part of stacking patterns in Fig. 2. The points of shoreline trajectory of FSST are expressed by rotating some degree, ex., points A_{05} and A'_{05} are symmetrical again horizontal axis. Points of A and B series are respectively the lateral and vertical points on shoreline trajectory. Area 1 is the eroded area, whereas Area 2 represents isochronous time area that upper and lower time line are isochronous

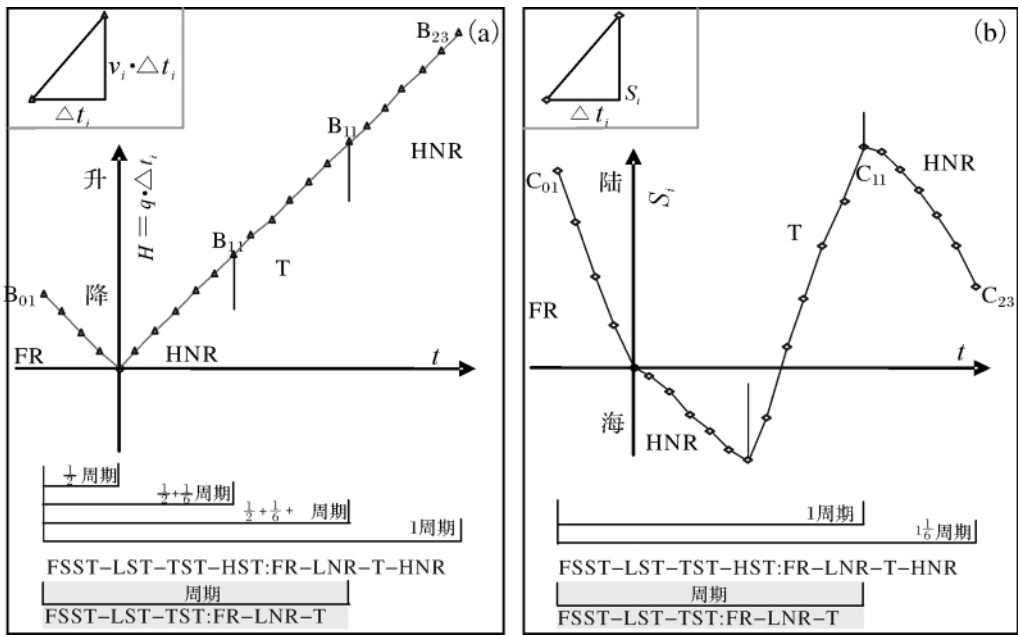


图 4 (a) 岸线迹线垂向变化(年代 t —幅度 H) 显示 1 周期; (b) 岸线迹线侧向变化(年代 t —水平距离 S) 显示 $1 + 1/6$ 周期。缩写: FR—强迫海退; LNR—低位正常海退; T—海侵; HNR—高位正常海退; FSST—下降期体系域; LST—低位体系域; TST—海侵体系域; HST—高位体系域

Fig. 4 (a) the vertical change of shoreline trajectory (time - amplitude) based on Fig. 3 directs one periodicity, (b) the lateral change of shoreline trajectory (t - S) based on Fig. 3 shows one and one-sixth periodicities. Abbreviation: FR—forced regression; LNR—lowstand normal regression; T—transgression; HNR—highstand normal regression; FSST—falling stage systems tract; LST—lowstand systems tract; TST—transgressive systems tract; HST—highstand systems tract

如果选择 FSST—LST—TST—HST 层序地层叠置对应 FR—LNR—T—HNR, 就等同于选择岸线迹线 1 周期的垂向变化对应于 $1 + 1/6$ 周期的侧向变化, 显然是不合理的; 如果废除 HRN 及其形成的 HST 而选择 FSST—LST—TST 层序地层叠置对应 FR—LNR—T, 就等同于选择岸线迹线 1 周期的垂向变化对应于 1 周期的侧向变化(图 4 下部)。

由此可见, 废除 HRN 之后, 岸线迹线垂向、侧向变化就会对应 1 周期, 即图 4(a) 中岸线迹线垂向变化(基准面)构成 FR—LNR—T 的 $1/2 + 1/4 + 1/4 = 1$ 周期; 图 4(b) 中岸线迹线侧向变化构成 FR—LNR—T 的 $1/4 + 1/4 + 1/2 = 1$ 周期。值得强调的是, LNR 特征表现为物源补给超过海平面上升^[18], 其本身就具有 FR 与 T 之间的过渡特征。无论中间过程如何, 从 FR 到 LNR 再到 T, 可以在垂向、侧向均实现 1 周期; 较之原有岸线迹线垂向变化(基准面) FR—LNR—T—HNR 的 1 周期对应于同期岸线迹线侧向变化 $1 + 1/6$ 周期, 要合理得多。

究其原因, 正如前面所述的那样, 现行四分模式中基准面曲线(岸线迹线垂向变化)显示的 FR—

LNR—T—HNR 的 1 周期, 恰好掩盖了岸线迹线侧向变化的 $1 + 1/6$ 周期。既然现行四分模式是由经典三分模式演变而来, 继承了 HNR 及其形成的 HST 的这一设定, 那么三分亦是如此, 因此本文建议废除高位正常海退(HNR)及其形成的高位体系域(HST)。

废除高位正常海退及其形成的高位体系域, 潜在的学术价值还在于可以解决层序地层学至今没有回答的构造控制问题(Miall, 1991)。至少海相盆地之盆山耦合研究中, 可以将 FSST—LST—TST 层序地层叠置顶部的最大水泛面 MFS 作为时间关联点。

另外, 限于篇幅的影响, 仅对图 3 中 Area 1(剥蚀区)包含的不整合时空体所具有的不整合面关联性进行强调: Area 1(剥蚀区)底界含地面不整合、水下不整合, 顶界为沟谷面(RS—ravinement surface, 亦称沟谷侵蚀面 RES—ravinement erosion surface)。

2 废除高位正常海退及年代层序格架中岸线迹线周期性检验

高位正常海退废除与否, 还需要从理论上检验新模型的等时地层格架是否具有垂向、侧向周期性, 同

时也有利于解决沉积层序与成因层序、T-R 层序之间的边界差异问题,进一步实现沉积层序边界调整。根据上述思路,本文在假设废除高位正常海退(形成原高位体系域)的前提下,对 Helland-Hansen 和 Gjelberg(1994)模型(图 2)进行重新构建,如图 5 所示。

其中,原模型相应的关键界面中最大海退面继续保留,原模型中相应的成因层序、T-R 层序、沉积层序依次相应保留,其相互关系详见后面的第四部分。

图 6 的年代层序格架图解结果表明,去掉高位正常海退(高位体系域)之后,既能保证岸线迹线垂向

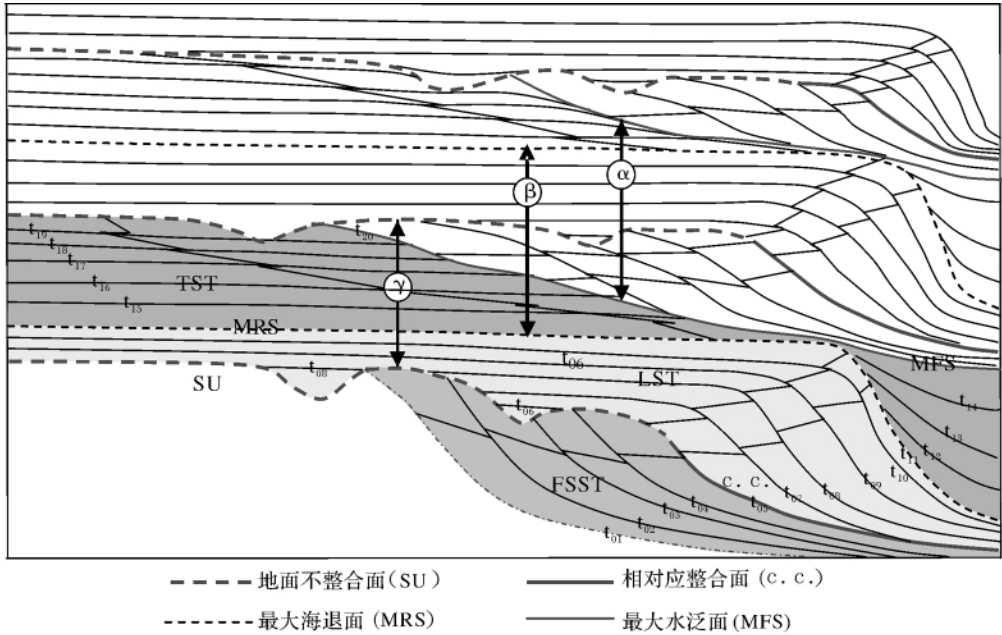


图 5 基于图 2 的废除高位正常海退后的地层叠置模型 FSST—LST—TST。海侵体系域朝盆超覆陡陆架坡折一侧添加盆底扇或斜坡扇(高位扇, Helland-Hansen 和 Gjelberg, 1994), 同属海侵体系域但早于陆架上的退积叠置地層。 Fig. 5 Based on Fig. 2, strata stacking model FSST—LST—TST that highstand normal regression is abolished. Slope fan/ basin fan has been added to the basinward side of shelf break of transgressive systems tract, i. e., highstand fan (Helland-Hansen and Gjelberg, 1994). Both highstand fan and retrogradational strata on shelf are attributed to transgressive systems tract, but the former is earlier than the latter. This is different from Helland-Hansen and Gjelberg (1994) 's opinion that both are isochronous

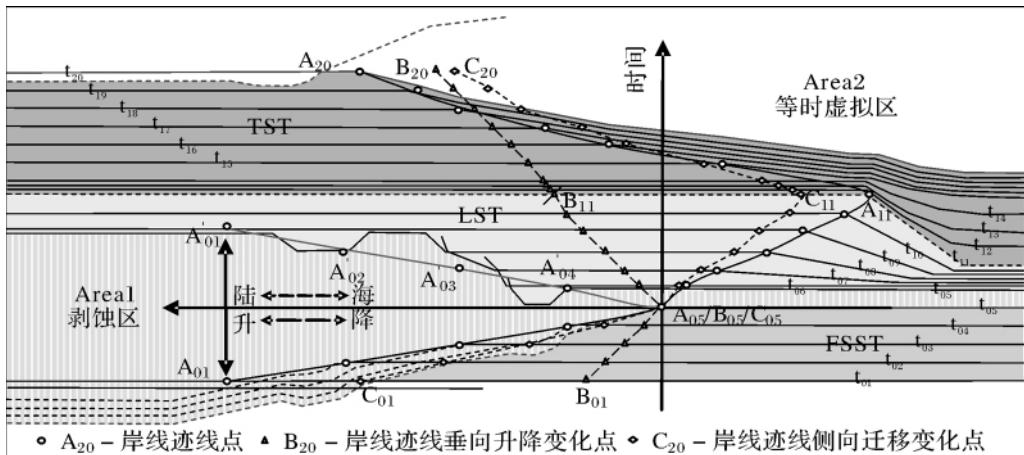


图 6 基于图 5(阴影部分)地层叠置构型的年代层序格架图。A 系列点为侧向迁移周期性岸线迹线点, B 系列点为垂向升降周期性迹线点; Area1、2 分别代表剥蚀区、等时虚拟区(上下等时线等时)

Fig. 6 Chrono-sequence framework based on the shadow part of stacking patterns in Fig. 4. Points of A and B series are respectively the lateral and vertical points on shoreline trajectory. Area 1 is the eroded area, whereas Area 2 represents

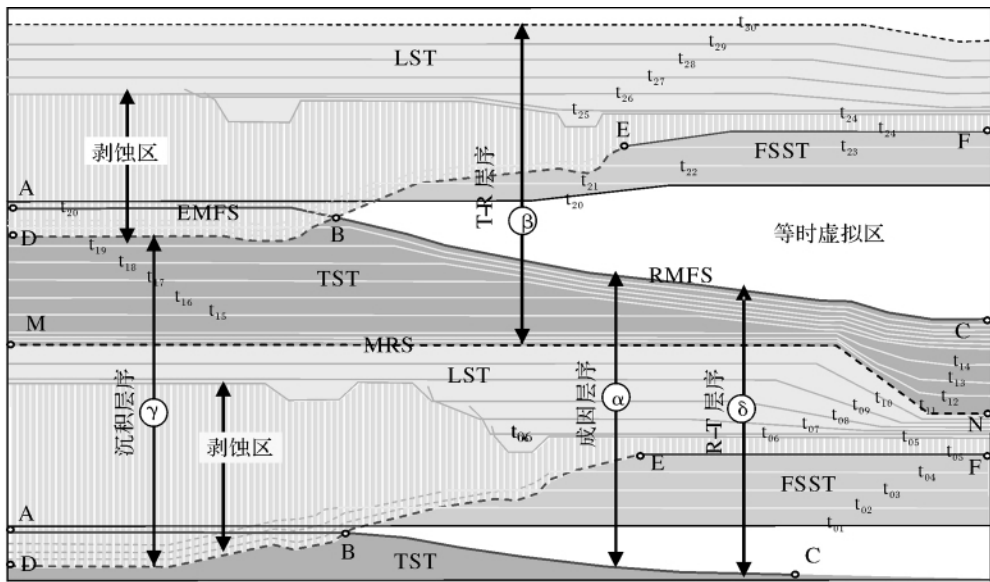


图 8 沉积层序(γ)、成因层序(α)、R-T 层序(δ) (改 T-R 层序(β)) 之间的年代格架关系。缩写: RMFS—残留最大水泛面(BC), CSU—残留最大水泛面对应的地面不整合面(BD), EMFS—剥蚀最大水泛面(AB), ESU—地面不整合面最大延伸(BE), t. s.—海侵面(EF), MRS—最大海退面(MN)。

Fig. 8 Chrono-framework relationships between depositional sequence γ , genetic sequence α and R-T sequence δ . T-R sequence β has been recommended to be revamped as R-T sequence δ . Abbreviations: RMFS—remnant maximum flooding surface (line BC); EMFS—eroded maximum flooding surface (line AB); CSU—correlative subaerial unconformity of remnant maximum flooding surface (line BD); ESU—extension of subaerial unconformity (line BE); t. s.—transgressive surface (line EF); MRS—maximum regressive surface (line MN).

为层序边界,有望解决不整合面位置的多方长期争论(Hunt 和 Tucker, 1992, 1995; Kolla 等, 1995; Helland-Hansen 和 Gjelberg, 1994; Helland-Hansen, 1995; Catuneanu, 2002)。Embry (2002) 认为最大水泛面可以通过客观科学分析确定; 较之不整合面对应的整合面 c. c. (correlative conformity) 更易于识别。

层序边界调整之后, 本文拟将沉积层序与成因层序、T-R 层序一致性对应关系一并改进:

3.1 沉积层序 γ (FSST—LST—TST) 与成因层序 α 一致性比较

按照 Galloway (1989) 提出采用最大海泛 (Maximum Marine Flooding, 相当于最大水泛面 Maximum Flooding Surface; 见其图 6, P. 133) 为层序边界, 并且命名为成因层序^[16], 自下而上依次为 HST、LST、TST, 其中 HST 属于下伏沉积层序, 而 LST 和 TST 属于上覆沉积层序, 也就是成因层序是跨沉积层序的, 详见 Catuneanu 等 (2009) 的图 4 和 23。Embry (2002) 指出成因层序由于地面不整合面位于层序内部, 而使得其在盆地边缘缺乏成因一致性^[34]。本文作者不完全认

同这一点, 详见讨论部分。

层序发育真正的起始时间点当属边缘构造抬升, 理想的完整层序当为最大水泛面结束即为下一新的层序开始, 这是本文核心出发点; 但是不同于 Galloway (1989) 将最大海泛面为界的成因地层学, 其套用对比到经典三分模式而构建, 并未触及成因层序边界为不整合面及其相对应的不整合面这一经典定义。实际上 Galloway (1989) 以最大海泛面为界化分的层序自下而上依次为 HST—LST—TST, 其中 HST 属于下伏层序, LST*—TST 归属上覆层序 (Galloway, 1989; 图 6, p. 133); 本文建议废除 HST 之后, 即变为同一层序的 LST*—TST, 其中的 LST* 现在细分为 FSST—LST, 也就形成本文的 FSST—LST—TST 层序地层叠置。

本文尝试将成因层序(α)与沉积层序(γ)一致对应起来, 上下边界并不等时。如图 7、8 所示, 层序边界为残留最大水泛面 EMFS (BC) 及其对应的不整合面 CSU (DB)。FSST—LST—TST 层序地层叠置均属于同一沉积层序, 就可以解决了成因层序原来跨沉积层序的弊端。

3.2 沉积层序 γ (FSST—LST—TST) 与 T—R 层序 β (或 R—T 层序 δ) 一致性比较

T—R 层序^[17]是以包括不整合面和或海侵沟谷面(RS—ravinement surface)和它们相对应的最大海退面组成的“合成面”为界^[4]。而层序边界海相部分(最大海退面)和非海相部分(地面不整合面)潜在穿时,而且也与海侵沟谷面合并^[4]。Helland-Hansen 和 Gjelberg(1994)、Catuneanu 等(1998)、Catneanu 和 Eriksson(1999)、Catneanu(2002)先后将沉积层序与 T—R 层序进行边界对比,结果一致为:T—R 层序的 TST、RST 分别等位于沉积层序的 TST(下伏层序)、HST(下伏层序)—FSST(上覆层序)—LST(上覆层序)(图2),亦即 T—R 层序跨沉积层序。

基于岸线迹线非周期性,本文建议废除 HNR 及其形成的 HST,沉积层序 γ 与成因层序 α 即可实现同层序内的一致性调整(图7),而 T—R 层序 β 以最大海退面为界,即 T、R 分别对应 TST(下伏层序)和 FSST(上覆层序)—LST(上覆层序),依然为跨层序。如果改成 R—T 层序 δ ,那么 R、T 就可以分别对应 FSST(同一层序)—LST(同一层序)和 TST(同一层序)。实际上,Galloway 的成因层序有时也被当作 R—T 层序(Embry 2002; p. 164),因此上述一致性调整结果应该是同一问题两种角度,结论是一致的。

自此 R—T 层序 δ 、沉积层序 γ 、成因层序 α 三种层序大类就可以有完全统一的层序界面(图7),即以残留最大水泛面 RMFS 及其对应的地面不整合面 CSU 为界。层序边界在几类重要的地层学之间的如此统一,也将有利于层序地层学吸收其它地层学方面的研究,促进层序地层学发展。此外,沉积层序、成因层序、R—T 层序一致性调整模型的年代层序格架等时性检验如图8所示,三者存在应有的一致性等时线分布特征,时序关系清楚,表明它们之间的边界统一方案可行。

4 讨论

4.1 等时线分布讨论

鉴于目前层序地层学目前的流派纷呈,层序边界争议较大,诸如不整合面最大延伸^[12,13]、海侵侵蚀沟谷面^[21]、下切谷^[7,9,10]、最大水泛面^[16]、以及退覆—超覆几何形态^[11]等等。所有这些表现为对等时线时序关系的认识角度差异,诸如:(i)不整合面最大延伸不只是一个面,而是朝盆内发散对应多个等时线,如图3、6、8中的最终形成 t_{05} 定型而逐步朝海对应于

t_{01} 、 t_{02} 、 t_{03} 、 t_{04} 等时线;(ii)海侵侵蚀沟谷面则表现为海平面上升期(LNR和T)朝陆抬升的多个等时线的收敛,如图3、6、8的 t_{06} 、 t_{07} 、 t_{08} 朝陆抬升收敛;(iii)下切谷形成与充填等时线分属不同时期。这些在 Wheeler 图体现较少。只有将层序发育各个阶段及其伴随的不整合体(现为一个物理界面)中的等时线,按照向前侵蚀、河流后退侵蚀、沿岸淹没侵蚀等成因类型区分开来^[33],才能真正地显示不整合体内部等时线分布(图3、6、8),在此基础上图解解释岸线迹线非周期性问题。选择残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的地面不整合面 CSU 也是基于这种等时线分布图解中时序关系得出的。

需要说明的是,Winter 和 Brink^[35] 和 Embry^[36] 将作为层序边界的不整合面当作“时间障碍”,假设时间线不穿过不整合面,Posamentier 等^[8] 图解中也是这么设定的,Catuneanu^[4] 补充解释为不整合面之下的地层早于之上的地层。严格意义上,应该是代表不整合面最后定型的晚期等时线在剥蚀区可以下切穿过早期等时线,如图3、6、8中 t_{05} 下切穿过了 t_{01} 、 t_{02} 、 t_{03} 、 t_{04} ,它们曾经属于过不整合面,因此“时间线不穿过不整合面”不完全正确。也正因如此,Kolla 和 Posamentier 等^[20] 在与 Hunt 和 Tucker^[13] 讨论层序边界时,如果采用晚期等时线在剥蚀区可以下切穿过早期等时线的图解方法,他们就能表达出现在看来确实正确的观点——强迫海退沉积 FRD(forced regressive depositions) 底界为层序边界(见 Kolla 等 1995 年的图 1, p. 141)。

4.2 岸线迹线周期性

层序地层学各个流派在建立自己的模式时,均匹配有海平面升降曲线或相对海平面变化曲线或基准面变化曲线,实际上指的是岸线处海平面垂向升降变化,对岸线迹线侧向海陆迁移并未考虑在内,以至于经典三分模式和在其基础上改进的四分模式出现“S”型岸线迹线。有两点需要解释:(1)基准面变化曲线(岸线迹线垂向分量)可以采用正弦曲线表示,是由于 LNR—T—HNR 区间内设定海平面上升,如果不考虑岸线迹线侧向海陆迁移,那么在 LNR—T—HNR 还可以根据海平面上升设定新的体系域,依然可以包括在正弦曲线上半区间内,因为只要累加上升幅度自然可以绘制这部分垂向上升曲线,所不同的是在 HNR 之后需要标定新的体系域而已。例如,LNR—T—HNR 之后重复一次或多个 LNR—T—HNR (不同于次级旋回叠加)均能与 FSST 一起构成正弦

曲线。这就是经典层序地层学和现行层序地层学在设定基准面曲线与体系域匹配之间不周之处。(2) 岸线迹线侧向海陆迁移, 尽管与垂向升降(基准面)变化方向正交, 但是反映在岸线迹线整体周期性上应该是一致的, 也就是岸线迹线垂向与侧向变化一周期, 在起点和终点位置上是一致的, 并且最终合成为岸线迹线一周期。因此, 在层序设定时, 不能仅仅考虑岸线迹线垂向升降周期性而忽略岸线迹线侧向海陆迁移周期性, 两者属于基线总量的垂向、侧向分量, 密不可分。正是基于此项考虑, 本文从岸线迹线侧向海陆迁移非周期性, 推导出有基准面曲线实际上也表现为非周期性。一定程度上讲, 现有的基准面曲线通过垂向幅度累加的方法显示的周期性正弦曲线, 掩盖了侧向海陆迁移的非周期性。

4.3 层序边界调整 残留最大水泛面作为层序边界一部分与不整合面可以出现在层序内部

Galloway^[16] 提出用最大海泛面为界定义成因层序, Embry^[34] 认为层序内部出现不整合面, 似乎违背了经典层序定义。本文也涉及到这个问题, 需要作如下说明: 尽管 Galloway 最早提出最大海泛面作为层序边界, 受到经典层序地层学关于不整合面为界的层序定义禁锢, 他当时没有办法解决这一问题。类似地, Hunt 和 Tucker^[12, 43] 首次正式提出将经典层序地层学三分模式的低位体系域分解出强迫海退楔体系域(FRWST), 也不得不遵照不整合面为界的限制, 而将层序边界 SB 设定在 FRWST 与 LPWST(低位楔体系域, 相当于新的 LST) 之间, 他们匹配的相对海平面变化曲线上赫然在最低海平面处设置层序边界, 用 SB 将“层序一分为二”; 如出一辙地, Helland-Hansen 和 Gjelberg^[14] 也将下降期体系域(FSST, FRWST 同义, 前述) 放在不整合面之下; Plint 和 Nummedal^[21] 正式定义 FSST 也是如此。所有这些都说明, 与 LST “成因相关”的 FSST 或 FRWST(FRST), 由于其顶部具有不整合面, 而受经典定义限制却不能与 LST 归为同一层序, 只能放在下一个层序的顶部进行“成因相关”, 实属无奈之举。

到了 2005 年, Catuneanu 对比层序地层学各个流派时, 将 FSST 对比为早期低位体系域(扇)(early LST(fan)), 意为层序最下部体系域。Catuneanu 等^[18] 正式推出 Catuneanu^[5] 的观点推荐层序地层学标准化, 已经既定不整合面位于四分模式层序内部的事实, 没有明确指出, 而是采用 c. c. (相对应的整合面) 表述位于层序内部。直到这时, FSST 们才“找

到”自己的位置。

从 1992 年四分模式盛行而回避不整合面不能在层序内部, 到 2005 年综合对比权衡既定不整合面可以出现在层序内部这一事实, 国际层序地层学界实际上已经对层序的定义有所松动, 即不再坚守不整合面不能出现在层序内部的禁锢。客观上, Mitchum 等(1977) 的经典层序定义中“成因相关”就已经提供这方面的理论依据, 可以理解为: 层序虽然以不整合面为界, 但是其上下地层不一定就绝对不“成因相关”。实践证明, 上述 FSST 相关术语在建模分析过程中, 都与上覆低位体系域“成因相关”。本文第二、第三部分图解过程中, 充分证明了这一点。而且在去掉 HST 之后, 层序边界很明显可以以残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的地面不整合面 CSU 为界。

某种程度上讲, 至少如果不废除 HNR 这一设定, 现行四分模式内部出现不整合面(即便含蓄地表达为 c. c.) 这种局面, 只能永远是似是而非——强调不整合面为界而又在层序内部出现不整合面, 却又给不出充分的理由。本文认为: 不整合面既可以作为层序边界又可以出现在层序内部, 应该理解为不整合面 CSU 部分——残留最大水泛面对应的不整合面才有资格作为层序边界, 而不整合面的 ESU 部分——FSST 之上的最大不整合面延伸可以存在于层序内部。换言之, (a) 层序内部出现不整合面应该理解为不整合面最大延伸 ESU 出现在层序内部; (b) 而层序内部不能出现不整合面指的是残留最大水泛面对应的不整合面 CSU 部分, 这部分绝对不能出现在层序内部。ESU 为体系域边界, CSU 为层序边界, 两者属于同一不整合面, 但是由于上下地层“成因相关”不同而具有不同的属性, 即 ESU 上下为 LST 和 FSST, 而 CSU 之上为上覆层序的 LST(或 TST) 而之下为下伏层序 TST(或更下部层位)。

上述是对国际上经典层序定义而又既定不整合面出现在层序内部现状的一种诠释, 前提是: (a) 纠正四分模式中岸线迹线的非周期性, 建议废除高位正常海退及其形成的高位体系域或重新解释高位体系域; (b) 重新定义沉积层序为“一套成因相关的以残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的不整合界面 CSU 为界的相对整合的地层序列”^[33]。由此看来, 对于层序边界的理解, 既要尊重原有层序定义中不整合面的作用, 更要尊重不整合面 ESU 上下地层“成因相关”这一事实。转换层序分析过程中层序边界识别追踪的方向, 不难看出: 盆缘朝盆内追踪, 边缘不整合面

(层序边界) 对应盆内无数个整合面(c. c.); 而本文主张从盆内向盆缘追踪, 残留最大水泛面只能对应一个边缘不整合面(能够区分时序关系的)。前者恰似“干线”朝“支线”追踪, “发散”易于出错; 后者则是既定“支线”朝“干线”前行, “收敛”而不出错。

由此可见, 如果以最大水泛面与不整合面交点(文中所有图中 ABC 线与 DBE 线交点 B) 为界, 典层序定义仅能规范交点朝陆一侧, 新的层序定义均能定义交点朝海、朝陆两侧。后者内涵包括前者内涵, 也就是“一套成因相关的以残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的不整合界面 CSU 为界的相对整合的地层序列^[33]”包含“一套成因相关的以不整合面及其相对应的整合面为界的相对整合的地层序列^[19]”。如前所述, 其前提是必须解决岸线迹线非周期性, 且废除高位正常海退及其形成的高位体系域这一经典设定或重新解释高位体系域。

4.4 沉积层序与成因层序、R—T(或 T—R) 层序边界统一

在目前层序地层学各个流派划分方案基础上, 成因层序只能按照最大水泛面将下伏层序的 HST + 上覆层序的 FSST—LST—TST 跨沉积层序而划分, T—R 层序则按照海侵海退旋回将 TST(下伏沉积层序) 和 HST(下伏沉积层序)—FSST(上覆层序)—LST(上覆层序) 分别归为 T、R 部分, 也只能跨沉积层序。沉积层序与成因层序、T—R 层序之间的边界差异, 如果维持现状, 显得层序地层学与众不同。本文研究表明, 去掉 HNR 及其形成的 HST 这一设定之后, 成因层序可以按照最大水泛面将一个层序的 FSST—LST—TST 全部归为一个成因层序(所不同的是以残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的地面不整合面 CSU 为界); 改 T—R 层序为 R—T 层序, 同一层序的 FSST—LST 和 TST 分别对应 R、T 半旋回。从而使得沉积层序、成因层序、R—T(或 T—R) 层序具有统一的层序边界, 在同一层序内部进行三类层序对比借鉴研究, 有利于层序地层学进一步发展。

可以预见的将来, 层序地层学仍然有很大的拓展空间。本文作者相信 Helland-Hansen^[27] 不易过早“冰封”层序地层学术语的预言。

5 结论

(1) 证明现行四分层序地层模式存在岸线迹线非周期性, 具体表现为岸线处侧向海陆迁移不具有周期性, 是由于高位正常海退设定不合理造成的。具体

表现为岸线基线垂向升降(基准面变化) 1 周期对应岸线迹线侧向迁移 $1 + 1/6$ 周期, 因此建议废除高位正常海退其形成的高位体系域或重新解释高位体系域, 以便解决岸线迹线非周期性问题。

(2) 废除高位正常海退之后, 沉积层序自下而上包括下降期体系域(FSST)、低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)。

(3) 调整后的沉积层序与成因层序、R—T 层序具有统一的层序边界——以残留最大水泛面 RMFS 及其相对应的地面不整合面 CSU 为界, 它们的单元对应关系实现在同一沉积层序内部达到一致, 而非原先的跨越两个沉积层序。

说明: 这句话也是为进一步研究留下余地。

致谢 本文作者真诚地感谢外审专家及其提出的宝贵意见; 特别感谢《Sedimentary Geology》前主编 C. R. Fielding 教授、《Earth-Science Reviews》主编 A. D. Miall 教授、《Sedimentary Geology》现主编 G. J. Weltje 教授在论文观点形成过程中给予的讨论和帮助; 感谢邓宏文、吴冲龙、解习农、吴因业、梅廉夫、庄新国、王华、焦养泉等教授和张夏林博士给予的帮助和关照。

参考文献(References)

- 1 Catuneanu O, Willis A J, Miall A D. Temporal significance of sequence boundaries [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 121: 157-178
- 2 Catuneanu O, Eriksson, P G. The sequence stratigraphic concept and the Precambrian rock record: an example from the 2.7 ~ 2.1 Ga Transvaal Supergroup, Kaapvaal craton [J]. *Precambrian Research*, 1999, 97: 215-251
- 3 Catuneanu O, Biddulph, M N. Sequence stratigraphy of the Vaal Reef facies associations in the Witwatersrand foredeep [J]. *South Africa Sedimentary Geology*, 2001, 141-142: 113-130
- 4 Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 35: 1-43
- 5 Catuneanu O, Martins-Neto M A, Eriksson P G. Precambrian sequence stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 176: 67-95
- 6 Catuneanu O, Khalifa M A, Wanas H A. Sequence stratigraphy of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190: 121-137
- 7 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since Triassic [J]. *Science*, 1987, 235: 1156-1166
- 8 Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I—conceptual framework [M] // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. *Sea Level Changes—An Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Special Publication, 1988, 42: 110-124

- 9 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 , Kendall C G St C , *et al.* Sea Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) , Special Publication , 1988 , 42: 394-45
- 10 Van Wagoner J C , Mitchum Jr R M , Campion K M , *et al.* Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs , core , and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series , 1990 , 7: 1-55
- 11 Christie-Blick N. Onlap , offlap , and the origin of unconformity-bounded depositional sequences [J]. Marine Geology , 1991 , 97: 35-56
- 12 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
- 13 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
- 14 Helland-Hansen W , Gjølberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective [J]. Sedimentary Geology , 1994 , 92: 31-52
- 15 Frazier D E. Depositional episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin [J]. University of Texas at Austin , Bureau of Economic Geology , Geological Circular , 1974 , 4(1) : 28
- 16 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
- 17 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
- 18 Catuneanu O , Abreu V , Bhattacharya J P , *et al.* Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews , 2009 , 92: 1-33
- 19 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 C E , ed. Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. Memoir American Association of Petroleum Geologists , 1977 , 26: 53-62
- 20 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
- 21 Plint A G , Nummedal D. The falling stage systems tract: recognition and importance in sequence stratigraphic analysis [J]. Geological Society , London , Special Publications , 2000 , 172: 1-17
- 22 Plint A G. Sharp-based shoreface sequences and offshore bars in the Cardium Formation of Alberta: their relationship to relative changes in sea level [M] // Wilgus C K , Hastings B S , Kendall C G St C , *et al.* Sea-level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications , 1988 , 42: 357-370
- 23 Plint A G. High frequency relative sea level oscillations in Upper Cretaceous shelf clastics of the Alberta foreland basin: possible evidence of a glacio-eustatic control? [M] // Macdonald D I M , ed. Sedimentation , Tectonics and Eustasy. International Association of Sedimentologists Special Publications , 1991 , 12: 409-428
- 24 Plint A G , Norris B. Anatomy of a ramp margin sequence: facies successions , paleogeography and sediment dispersal patterns in the Muskiki and Marshybank formations , Alberta foreland basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology , 1991 , 39: 18-42
- 25 Nummedal D , Riley G W , Cole R D , Trevena A S. The falling sea level systems tract in ramp settings (Abstract) . In: Mesozoic of the Western Interior [C]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists , Theme Meeting , Fort Collins , Colorado , August 17-19 , 1992 , p. 50.
- 26 Nummedal D , Gupta S , Plint A G , *et al.* The falling stage systems tract: definition , character and expression in several examples from the Cretaceous from the U. S. Western Interior [M] // Hunt D , Gawthorpe R , Docherty M. (convenors) Sedimentary Responses to Forced Regressions. Geological Society of London , Abstract Volume , 1995: 45-48
- 27 Helland-Hansen W. Towards the standardization of sequence stratigraphy-Discussion [J]. Earth-Science Reviews , 2009 , doi: 10.1016/j.earscirev.2008.12.003
- 28 Swift D J P. Barrier-island genesis: evidence from the central Atlantic shelf , Eastern U. S. A [J]. Sedimentary Geology , 1975 , 14: 1-43
- 29 Davis R A. Clifton H E. Sea-level change and the preservation potential of wave-dominated and tide-dominated coastal sequences [M] // Nummedal D , Plikey O H , Howard J D. Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution. SEPM Special Publication , 1987 , 41: 167-178
- 30 Larue D K , Martinez P A. Use of bed-form climb models to analyze geometry and preservation potential of clastic facies and erosional surfaces [J]. AAPG Bulletin , 1989 , 73: 40-53.
- 31 Cant D J. geometric modeling of facies migration: theoretical development of facies successions and local unconformities [J]. Basin Research , 1991 , 3: 51-62
- 32 Wheeler H E. Stratigraphic Units in Time and Space [J]. American Journal of Science , 1959 , 257: 692-706
- 33 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]
- 34 Embry A F. Transgressive-Regressive (T-R) sequence stratigraphy [C] // 22nd Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation Bob F. Perkins Research Conference-2002: 151-172
- 35 Winter H de la , Brink M C. Chronostratigraphic subdivision of the Witwatersrand Basin based on a Western Transvaal composite column [J]. South African Journal of Geology , 1991 , 94: 191-203

36 Embry A F. The six surfaces of sequence stratigraphy [C] // AAPG. Hedberg Research Conference on Sequence Stratigraphic and Allos-

trigraphic Principles and Concepts , Dallas , August 26 - 29 , Program and Abstracts Volume , 2001 , 26-27

Adjustment to Non-Periodicity and Sequence Boundary in Four-Divided Model of Sequence Stratigraphy

LI Shao-hu^{1 2} JIA Li-chun³

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

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

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

Abstract Based on illustrating chrono-sequence framework , this article has proved the existence of non-periodicity of shoreline trajectory within four-divided model in current sequence stratigraphy , presenting one vertical periodicity corresponding to one and one-sixth of lateral periodicities due to the unreasonably assigned highstand normal regression. Authors of this article suggest that the terms of highstand normal regression (HNR) and previous highstand systems tract HST formed during HNR should be abolished or re-interpreted. Depositional sequence has been adjusted as bounded by remnant maximum flooding surfaces (RMFS) and their correlative subaerial unconformities (CSU) , and is composed of falling stage , lowstand , transgressive systems tracts upwards , i. e. , FSST-LST-TST superposition. At the same time , this paper has united the boundaries between depositional sequence , genetic sequence and R-T sequence on the basis of abolishing highstand normal regression and previously assigned highstand systems tract to avoid that genetic sequence and T-R sequence span two depositional sequences.

Key words sequence stratigraphy; remnant maximum flooding surface; correlative subaerial unconformity; abolishing the previous highstand normal regression; R-T sequence