

doi:10.3799/dqkx.2017.144

层序地层学:问题与讨论

李绍虎^{1,2}, 李树鹏³, 胡言焯¹, 吴维¹, 刘彪¹, 李遵亭¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 山东省地震局, 山东济南 250014

摘要: 论文回顾地震地层学对层序地层学的贡献与影响、层序地层学理论积淀, 指出沉积层序存在的诸如层序边界(不整合面及其可比的整合面)跨界系统阶等年代地层单位、沉积层序“T-R”水侵—水退建模理论基础与层序边界不断调整、基准面曲线滞后水侵—水退(R-T)曲线和纯几何学的相对整合面(可比的整合面)禁锢等4个问题。针对4个问题论文建议:(1)静止正常水退(SNR)取代高位正常水退(HNR), 解决层序地层学由高位正常水退不合理设定造成的非周期性问题;(2)鉴于残留最大水泛面(RMFS)潜在地接近或一致于年代地层单位界线或全球界线条型剖面点和(GSSP)阶的下界的特征, 层序地层学有可能建立残留最大水泛面与其相对应不整合面组成的复合层序边界, 其中的残留最大水泛面部分用于解决现行层序边界跨年地层单位界线的问题;(3)复合层序边界由盆朝陆的“一对一”追踪方式解决层序边界由陆朝盆“一对多”不断调整的问题;(4)降级“相对应整合面”为体系域边界, 解决双定义“相对应整合面”问题, 其中, Hunt and Tucker(1992)的“相对应整合面”被复合层序边界相对应不整合面部分向盆内延伸(ESU)取代而作为低位体系域底界(ESU亦兼有水侵体系域在不整合处的底界作用), Posamentier and Allen(1999)的“相对应整合面”被复合层序边界之上的恢复的强迫水退底界取代而作为下降期体系域底界。此外, 强迫水退底界同术语现在采用的海相侵蚀海退面(RSME)术语不能全部代表海相与非海相背景。

关键词: 层序地层学; 岸线迹线(滨线轨迹); 静止正常水退; 残留最大水泛面; 相对应不整合面; 不整合延伸; 沉积学。

中图分类号: P539.2

文章编号: 1000-2383(2017)12-2312-15

收稿日期: 2017-05-16

Sequence Stratigraphy: Problems and Discussion

Li Shaohu^{1,2}, Li Shupeng³, Hu Yanyao¹, Wu Wei¹, Liu Biao¹, Li Zunting¹

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

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

3. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

Abstract: This article reviews contributions and influences of seismic stratigraphy to sequence stratigraphy, and theoretical accumulations of sequence stratigraphy; and points four problems as followings: sequence boundaries (subaerial unconformities and their correlative conformities) spanning boundaries of Erathem, System, Series and Stage; “transgressive-regressive” cycles as base of original sequence stratigraphic models inducing to adjust sequence boundaries at least three times, base-level curve delaying transgressive-regressive (T-R) curve, and the purely geometric correlative conformity (c.c) obstructing theoretically sequence stratigraphy. Meanwhile this paper points four aspects as followings. (1) Stillstand normal regression (SNR) replacing highstand normal regression is used to avoid the non-periodicity hiding in sequence stratigraphy due to the unreasonable design of highstand normal regression. (2) Based on the character of remnant maximum flooding surfaces potentially closed to or in accord with the boundaries of chronostratigraphic units or even the lower boundaries of stage (GSSP), sequence stratigraphy is necessary to establish compound sequence boundary composed of remnant maximum flooding surfaces (RMFS) and their correlative unconformities (CSU), and to use the RMFS component to solve the problem that current sequence boundaries have been spanning the boundaries of chronostratigraphic units. (3) It may be applied the one-to-one tracing style (one RMFR to one

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.41372112, 41572109).

作者简介: 李绍虎(1964—), 男, 教授, 主要从事沉积学、煤及煤层气地质学研究. E-mail: ShaoHuLi@cug.edu.cn

引用格式: 李绍虎, 李树鹏, 胡言焯, 等, 2017. 层序地层学: 问题与讨论. 地球科学, 42(12): 2312-2326.

CSU) from basin to land in compound sequence boundary to the problem that current sequence boundaries have been adjusted many times, i.e., they were placed to base of T-R, base of lowstand systems tract in three-divided model or base surface of forced regression, and top of forced regressive wedge systems tract, due to one-to-many tracing style (one subarial unconformity to many potential correlative conformities) from basin to land in existing sequence stratigraphic models. (4) The term “correlative unconformity” should be reduced to a lower rank as boundary of systems tract so as to solve the problem about “doubly defined correlative conformities” in existing sequence stratigraphic models. Respectively, Hunt and Tucker (1992)’s correlative conformity is replaced by extension of subarial unconformity (ESU) from correlative subaerial unconformity component of compound sequence boundary, and is as base of lowstand systems tract and partially as subarial unconformable base of transgressive systems tract; whereas, Posamentier and Allen (1999)’s correlative conformity is replaced by the resumed term basal surface of forced regression (BSFR) above compound sequence boundary, and is as base of falling stage systems tract. Moreover, regressive surface of marine erosion (RSME) as the synonymous term for basal surface of forced regression does not completely represent marine and nonmarine settings.

Key words: sequence stratigraphy; shoreline trajectory; stillstand normal regression; remnant maximum flooding surface; correlative unconformity; extension of subarial unconformity; sedimentology.

0 引言

层序地层学是目前世界范围内应用广泛的地层学之一。尽管已经进入现行层序地层学四分模式阶段,但是各派间很难达成既含有不整合面界定层序的层序地层学原始的理念、又具备年代地层界线意义的统一层序边界,由此导致地层学分支层序地层学至今定义不了“层序地层单位(sequence stratigraphic units)”,致使层序地层学不能以自己独立的地层单位像岩石地层单位、生物地层单位、磁性地层单位、年代地层单位那样进入《国际地层指南》。层序地层学的层序地层单位在《指南》中没有名分,问题在自身。本文主要针对以沉积层序为主流代表的层序地层学 4 个主要问题(不涉及成因地层、T-R 层序流派),并开展讨论。

1 地震地层学对层序地层学的重要贡献与影响

地震地层学对于层序发育的动力学机制解释核心观点在于相对海平面升降,以 Vail 为代表的 Exxon 研究群体在《Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration》一书中除了地震层序学基本原理方法之外,更致力于区域代表性地震剖面上利用下伏层序最高上超点与上覆层序最低上超点(海平面下降期间沿岸上超向下迁移)量化标定海平面升降曲线;该书汇聚 Vail 等一代地震地层学家对于地层学发展的突出贡献。经历几代人的不懈努力,Vail 地震地层学群体的精华观点逐渐或

继承或拓展,值得后人回顾与反思,以利于层序地层学在继续发展的道路上去伪存真而成为真正的引领地层学革命的地层学理论之一:

(1)高位沉积、低位沉积. Vail *et al.* (1977) 的“Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap”一文中,介绍了海平面相对变化的上升、静止、下降 3 种形式,其中海平面相对下降期间发生的沿岸上超向下迁移形成下伏层序高位沉积、上覆层序低位沉积(即最早的沉积层序两种类型),二者顶底均以不整合面及其相对应整合面界定,为后续三分、四分层序地层学模式奠定基础。

(2)水退的拓展. Vail *et al.* (1977) 使用“marine transgression and regression”特指海侵海退(P67),水侵(transgression)、水退(regression)均可用于海相与非海相层序;更为重要的是其提出“海平面相对上升期间水侵或水退、海底变深或变浅都可以发生”(during a relative rise of sea level, a transgression or regression of shoreline, and a deepening or shallowing of sea bottom may take place; Vail *et al.*, 1977, P63). 同时文章批评了对水侵、水退的错误理解“水侵和变深与(海平面)相对上升等同,而水退和变浅与(海平面)相对下降等同(A common misconception is that transgression and deepening are synonymous with a relative rise, and that regression and shallowing are synonymous with a relative fall; Vail *et al.*, 1977, P63). 前述观点逐渐演变成 90 年代初期 Plint *et al.* (1991) 提出的强迫水退,之后 Hunt and Tuck (1992) 用强迫水退解体 Exxon 经典层序地层学模型(Haq *et al.*, 1987; Vail, 1987; Van

Wagoner *et al.*, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1988; Haq *et al.*, 1988; Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier and Vail, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990). 低位体系域的低位楔、斜坡扇+盆底扇分别为低位前积楔体系域、强迫水退楔体系域(Hunt and Tucker, 1992; 梅冥相和杨欣德, 2000)(现下降期体系域, Plint and Nummedal, 2000; 王剑等, 1996), 以及 Posamentier *et al.* (1992) 定义并区分强迫海退和正常水退和 Catuneanu *et al.* (2009) 拓展为低位正常水退、高位正常水退解释低位体系域和高位体系域. Vail *et al.* (1977) 的水退、水侵特指海平面侧向朝盆、朝陆的变化效应, 与海平面垂向变化(基准面)效应密不可分, 现行依然人为地割裂对立二者.

(3) 不整合面困扰. 层序地层学现行层序均为不整合相关层序, 3 类沉积层序均以不整合面及其相对应整合面为界; 成因层序 (Flooding Surface Bounded Depositional Units) 以海泛面期界定, 其原始概念明确表示不依赖不整合面定义成因层序边界 (Galloway, 1989, P125), 不整合面夹持在成因层序内部; T-R 层序由 T-R 旋回发展而来且以最大水退面为界, 逐渐修订为最大水退面对应不整合面界定 (ISSC 层序地层学工作组, 2007). Catuneanu *et al.* (2009) 纳入层序地层学标准化的前述与不整合相关的 5 大流派层序边界各异、“求同存异”, 没能彻底改变 Salvador (2001) 早就所言的实践者因术语和流派不一致而无所适从的状况.

层序地层学对沉积地层复杂性的认知, 一个概念或者一个图解甚者同物异名变更, 都折射出层序地层学前辈的不懈努力; Sangree and Mitchum III (1995) 指出“经历漫长的努力之后, 学生们会说‘我想知道为什么要花费那么长的时间来明了这些显而易见的概念?’”. 层序地层学现有的理论成果亟待系统化统一各个流派, 依然处于旺盛发展期 (Helland-Hansen, 2009); 作为地层学重要分支之一, 其层序地层单位在《国际地层指南》(Salvador, 1994) 没有一席之地, 漫长发展之路.

2 层序地层学理论问题

从北京大学教授 Grabau (1906) 的复合水退—水侵叠覆、Sloss *et al.* (1949) 和 Sloss (1963) 的巨层序到 Vail *et al.* (1977) 的震地地层学高位沉积型层序和低位沉积型层序, 再到经典三分层序地层学模型 (Vail, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1987; Haq *et al.*, 1987; Van

Wagoner *et al.*, 1988; Haq *et al.*, 1988; Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier and Vail, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990), 至今逐渐被接受的层序地层学四分模型 (Hunt and Tucker, 1992; Helland-Hansen and Gjølberg, 1994), 理论模型逐步被完善; 定义由“沉积层序为一套顶底以不整合面及其相对应的整合面为界的成因相关的相对整合地层序列 (Mitchum *et al.*, 1977), 完善为以残留最大水泛面及其相对应的不整合面界定层序 (李绍虎, 2010). 层序地层学发展过程中存在最为关键的 4 个问题:

问题 1: 层序边界 (SU+cc*) 跨界、系、统、阶等年代地层单位 (图 1). Haq *et al.* (1987) 在《Science》上发表三叠纪以来海平面波动年代表, 即著名的海平面升降 Haq 曲线; Haq 曲线基于被动大陆边缘地震反射剖面, 标定岸线处海平面波动变化引起的垂向升降和侧向水退—水侵 (basinward, landward), 即为岸线迹线的垂向基准面和侧向 R-T 两个分量的共同组成. 关于岸线迹线详见后面问题 4 部分介绍.

Haq 曲线作为层序地层学研究重要参考曲线的同时, 参与编制的 Hardenbol、Vail、Wright、Stover、Baum、Loutit、Gombos、Davies、Pflum、Romine、Posamentier、Jan Du Chene、Colin、Ioannides、Sarg 和 Mogan 也客观地显示出不整合面及其相对应整合面界定的层序, 其边界跨年代地层学、系、统、阶等基本地层单位界线 (图 1), 他们没有回避层序地层学与其它地层学界线差异性这一客观事实, 且非常慎重地没有使用层序地层单位术语.

层序边界跨年代地层单位界线以图 1 为例显示如下: (1) Tejas 巨层序边界 68 Ma 跨白垩系—古近系界线 (K/Pg) 年代地层界线 66.5 Ma, 而其内部三级层序 1.2 的最大水泛面 MFS (TST/HST) 66 Ma 接近 K/Pg 界线; (2) UZA-4 超层序边界 80 Ma 跨坎潘阶/马斯特里赫特阶年代地层界线 74 Ma, 其内部的三级层序 4.4 的最大水泛面 73.5 Ma 则更为接近坎潘阶/马斯特里赫特阶界线. (3) UZA-3 超层序边界 90 Ma 跨三冬阶/坎潘阶年代地层界线 84 Ma, 类似的其内部 3.4 三级层序的最大水泛面 83.75 Ma 极为接近 84 Ma.

Haq *et al.* (1987) 采用的年代学标定参考众多方案, 虽然将磁性地层、年代地层、生物地层、层序地层、海平面变化等 5 大范畴同置于海平面变化年代地层学和旋回图中, 但是幅面影响前三者与后二者分别排版在前后页 (注: Haq *et al.* (1987) 将朝盆—朝陆的侧向效应归属层序地层范畴而将垂向海平面

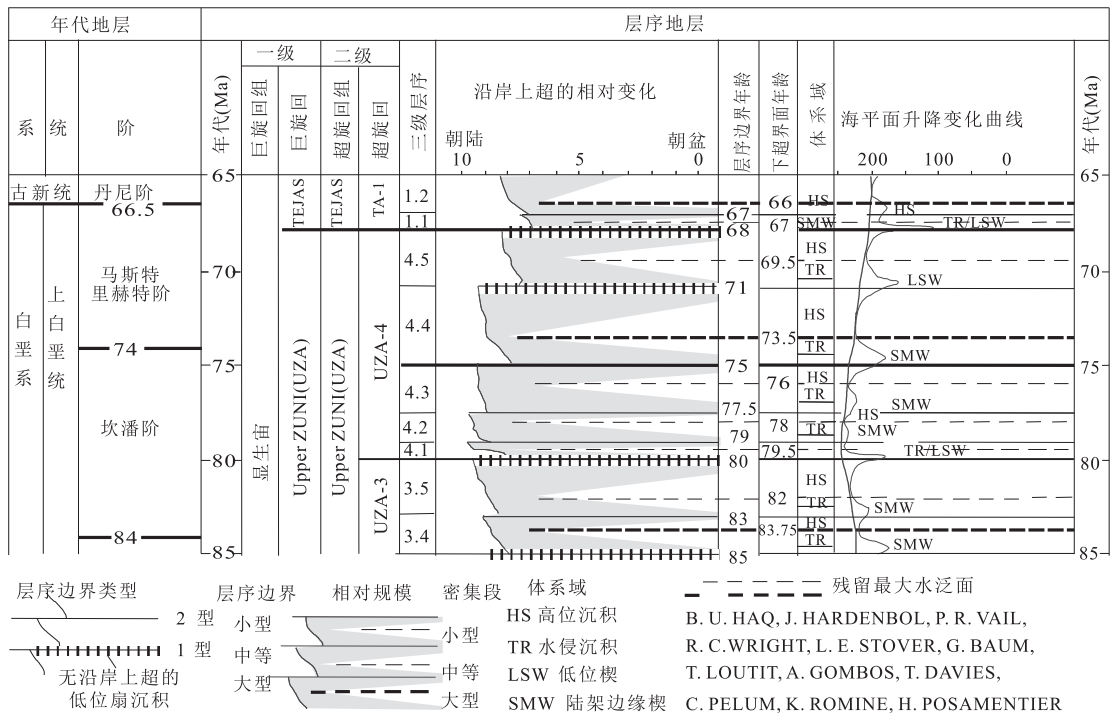


图 1 Haq 曲线中的层序边界与年代地层单位界线年龄不一致但接近于三级层序最大水泛面年龄(Haq *et al.*,1987)

Fig.1 Bottom times of 3rd sequences in Haq *et al.* (1987)'s curve are not consistent with that of chronostratigraphic units, but with that of maximum flooding surface

升降变化分开单列为独立范畴,或许直接影响到后续层序地层学各流派分别向侧向、垂向效应两个方向发展,致使侧向、垂向各自成派,即侧向效应的成因层序和 T-R 层序以及垂向效应的 3 类沉积层序)。作者据 Haq *et al.* (1987) 当时给出的年代地层学之界、系、统、阶等地层单位的年龄与其旋回图比对,得出前述结论——层序边界跨年代地层单位界线,而三级层序的最大水泛面年龄接近年代地层界线;尽管层序模式由三分向四分转变,幸运的是最大水泛面的概念一直没有改变,因此具有年代地层意义的最大水泛面有可能被用于层序边界组成部分而解决现行层序边界跨年代地层界线的问题。

问题 2:层序地层学“T-R”建模理论基础与(沉积)层序边界不断调整.Vail *et al.* (1977) 在“Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part3:Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap”一文中将海平面变化分为:海平面相对上升期的低陆缘碎屑注入式水侵、平衡陆缘碎屑注入式稳定岸线和高陆缘碎屑注入式水退(图 2b①②③),海平面相对静止期的顶超(图 2b④),海平面相对下降期的逐渐降、快速下降(图 2b⑤⑥)等,共计 3 种类型 6 种叠置样式,且突出标注相对海平面升降变化;不整合面之上这一“水侵—静止—水退”构成即

层序地层学“T-R”建模理论基础,可用岸线迹线点(亦即 Cant(1991)的沉积物界面与海平面交点或者 Vail(1991)的退覆点 offlap break)时间序列表达这一概念模型(图 2a)。

6 种叠置样式在层序地层模型演化过程中,除了稳定岸线、顶超 2 种之外均有相应的体系域,由此也开始了基于 Sloss *et al.* (1949) 大尺度构造不整合面界定层序而拓展的各派小尺度不整合面及其相对应整合面界定层序,以及相继进行了四次层序边界调整:

第一次(沉积)层序边界—不整合面及其相对应整合面(图 2b; Vail *et al.*, 1977; Mitchum *et al.*, 1977)。遵从传统的 T-R 旋回且以 T-R 旋回底部不整合面界定沉积层序(图 2a),但是在地震剖面上以不整合及其相对应整合面分别界定高位沉积(marine offlap)、低位沉积(coastal onlap)两种类型层序,不整合分开 T 部分与 R 部分,而且作为沉积层序 2 种类型(Vail *et al.*, 1977; 图 9b; P73);如加利福尼亚 San Joaquin 盆地上第三系划分 9 个沉积层序,由 4 个低位沉积和 5 个高位沉积构成(Vail *et al.*, 1977; 图 10; P27)。显然,其遵从 T-R 建模又割裂 T 与 R 两部分,导致过多的海平面升降变化形成的“不整合面”;对此坚持构造运动形成不整合面观点的 Sloss(1988)认为构造影响是否能够延伸至

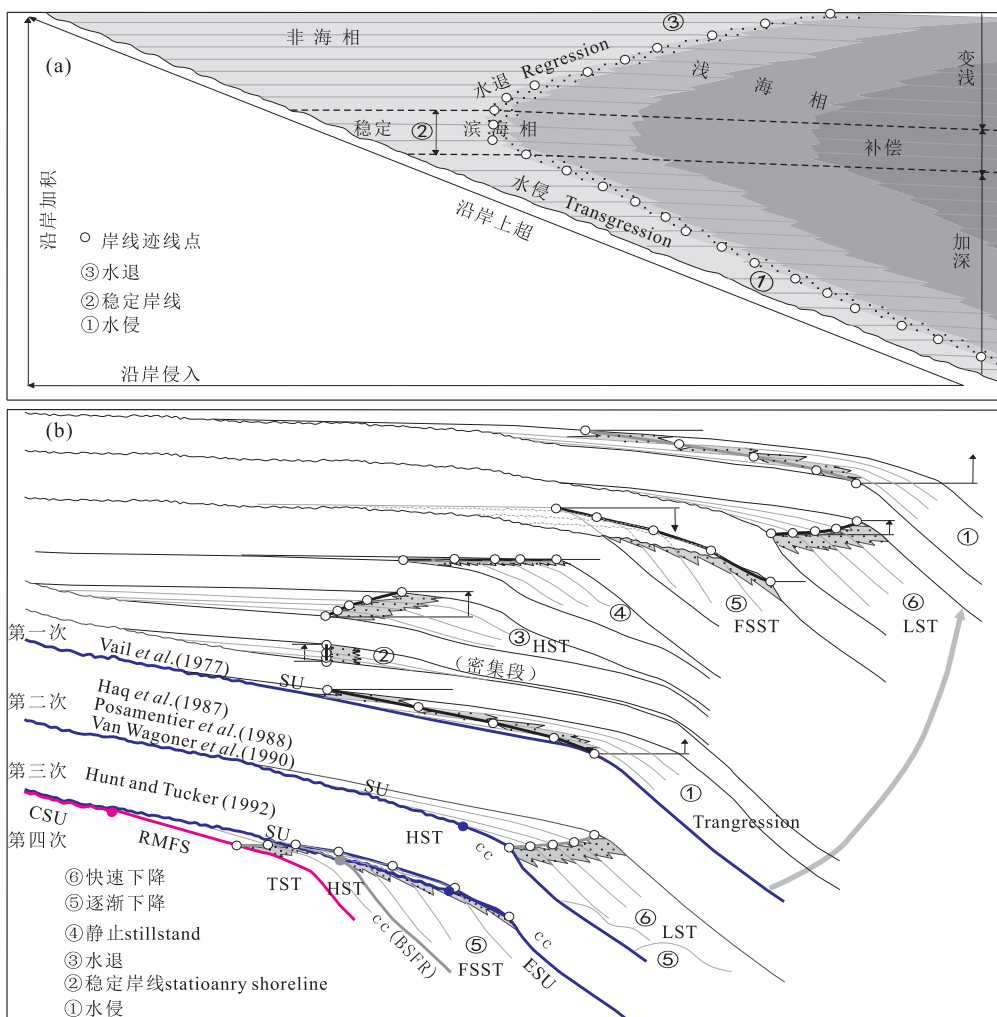


图 2 不整合面之上的传统 T-R 旋回相对海平面垂向升降变化(a,b)及层序边界调整(b)

Fig.2 The vertical fall and rise of relative sea level (a, b) and variation of sequence boundaries (b)

据 Vail *et al.* (1977) 的图 3、图 4、图 6、图 8 修改; P66-72; ⑥ 的原图解释为下伏最高上超点与上覆最低上超点的向下迁移而称为海平面相对下降, 但现解释为低位正常水退

Exxon 人的层序还需要证实。

第二次(沉积)层序边界调整—不整合面(LST/HST)及其相对应整合面(图 2b; Vail *et al.*, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1987, 1988, 1990; Haq *et al.*, 1987, 1988; Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier and Vail, 1988)。“层序细分为体系域成分首次是由 Vail (1987) 提出的, Posamentier and Vail (1988) 首次进行详细描述; Posamentier and Vail (1988) 将沉积层序化分为 4 个体系域: 海侵、高位、低位和陆架边缘体系域; 低位体系域和陆架边缘体系域被认为是同一类型的变种 (Plint and Nummedal, 2000; P1)”。随着低位楔 LSW (下切谷 ivf、前积复合体 pgc、水下越岸河道复合体)、LSF 低位扇 (或盆底扇, Van Wagoner *et al.*, 1990) 时序关系认识且同归

低位体系域, 层序边界置于低位体系域复合单元体底部 (Haq *et al.*, 1987), 开始摆脱不整合面之上为水侵的早期 T-R 旋回影响而专注不整合面定位和体系域成因解释。

第三次(沉积)层序边界调整—不整合面(LST/FRWST 或现 FSST)及其相对应整合面(图 2b; Hunt and Tucker, 1992)。Plint (1991) 提出强迫水退 FR (forced regression) 概念, Hunt and Tucker (1992) 六月认为 Exxon 流派经典三分层序地层学模式的低位体系域下部两扇(斜坡扇、盆底扇)上部低位楔分别形成于相对海平面下降期和低位期(注: 相当于现行的物源补给超过海平面上升速率而导致的岸线朝盆迁移的低位正常水退; Catuneanu *et al.*, 2009), 由此将老的低位体系域分别解体为强

迫水退楔体系域和低位前积楔体系域,层序边界位于强迫水退楔体系域顶部,并将其底部则称为强迫水退底界 BSFR(basal surface of forced regression; Hunt and Tucker,1992).Posamentier *et al.*(1992)十一月将基准面下降驱动的水退称为强迫水退、基准面上升引起的水退称为正常水退 NR(normal regression),且坚持层序边界定位于强迫水退底界(Kolla *et al.*,1995).强迫水退(楔)体系域与现下降期体系域同物异名(Catuneanu,2002),自此四分模式术语体系逐步完善—LST-TST-HST-FSST(Hunt and Tucker,1992;Helland-Hansen and Gjberg,1994),层序边界设置于下降期体系域顶部;经典三分模式也随之进行了调整,出现 Hunt and Tucker(1992)以及 Posamentier and Allen(1999)的双定义相对应整合面。

目前基于不整合面界定层序的第二次、第三次层序边界设置并存,同属沉积层序范畴(Catuneanu *et al.*,2009)。

第四次(沉积)层序边界调整—残留最大水泛面 RMFS(remnant maximum flooding surface)与其相对应不整合面 CSU(correlative subaerial unconformity)(图 2b;李绍虎,2010).基于四分模型的非周期性(李绍虎和贾丽春,2011)以及岷岷湖现代水下加积扇解剖(李绍虎等,2011),由此得出残留最大水泛面 RMFS 与其相对应不整合面 CSU 界定层序的结论(注:其属于不整合相关层序范畴,不整合无

关层序不在本次讨论之列)。

问题 3:岸线地带基准面曲线滞后 R-T 曲线?

首先关于岸线迹线的概念,Cant(1991)图示为倾向剖面沉积物界面与海平面交点的时序迁移路径,Helland-Hansen and Gelberg(1994)定义岸线迹线为沿沉积倾向的横向岸线迁移路径;岸线迹线代表古海岸线的迁移,用岸线迹线点表示(图 2 圆点所示),其与 Vail *et al.*(1991)定义的退覆坡折点位置相同,但是其关于低位前积复合体尖灭于先前高位风暴浪基面附近的解释并不代表 Cant(1991)沉积物界面与海平面的交点——岸线迹线点.Jervey(1988)在其图 8(P53)采用虚线标定海岸线(coastal line)明确表示海相、非海相分界;Catuneanu *et al.*(2009)采用岸线迹线(虚线)图示正常水退(高位正常水退和低位正常水退),而强迫水退、水侵并未匹配岸线迹线.岸线迹线这一概念术语及其表达,其对于层序地层学理论发展的作用正在为层序地层学界所重视。

Catuneanu(2002)在综述层序地层学优缺点时图示了体系域与水退(强迫水退、正常水退)、水侵的关系,清楚显示基准面曲线滞后 R-T 曲线(图 3);图解证实两者相差 1/6 周期,相当于现行“高位正常水退”所代表的时间,亦即层序地层学非周期性问题(李绍虎和贾丽春,2011).Catuneanu *et al.*(2011)尽管区分了岸线有关体系域(FSST、LST、TST、HST、RST)和岸线无关体系域(LAST、HAST),但是依

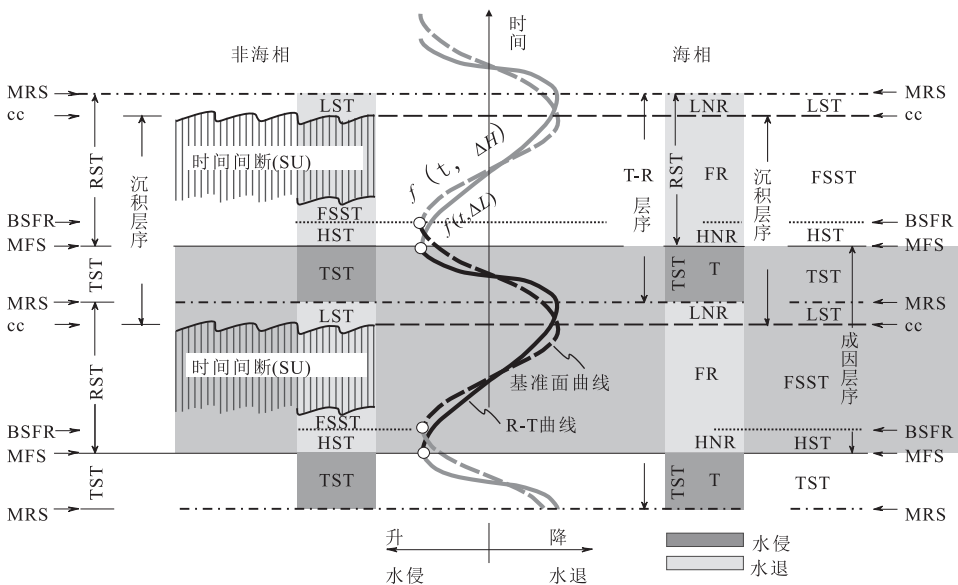


图 3 基准面曲线滞后 R-T 曲线,据 Catuneanu(2002)修改;非海相背景亦有下降期体系域

Fig.3 Base level curve delaying R-T curve is modified from Catuneanu (2002); non-marine setting may also develop falling stage systems tract

然没有重视古海岸线变化范畴的基准面曲线滞后 R-T 曲线问题。

基准面曲线滞后 R-T 曲线问题在 2002 年之后很少被提及,如 Catuneanu *et al.* (2009, 2010, 2011),并非其不重要而是现行的层序地层学理念依然在人为割裂二者,甚至引起 2007 年层序地层学界关于基准面、T-R 两个派别激烈争论。一定程度上基准面曲线、R-T 曲线在层序地层学关键概念定义中密不可分,如“强迫水退”即为发生在基准面下降期间的水退,而“正常水退”则为基准面上升期间的水退(Posamentier *et al.*, 1992);二者分别属于岸线迹线垂向升降、侧向盆陆两个分量,亦即岸线迹线可以矢量分解为垂向基准面曲线和侧向 R-T 曲线,即相邻 2 个岸线迹线点间岸线迹线含量 ΔS 、垂向分量 ΔH 、侧向水平分量 ΔL 三者满足 $\Delta S^2 = \Delta H^2 + \Delta L^2$,它们的时间函数岸线迹线 $f(t, \Delta S)$ 、基准面曲线 $f(t, \Delta H)$ 和 R-T 曲线 $f(t, \Delta L)$ 应该为同一周期。现有层序地层学理论中,不仅三者不在一周期,甚至于最基本的基准面曲线、R-T 曲线同在一周期都没能满足,而是“步调不一的”基准面曲线滞后 R-T 曲线(图 3),其正所谓层序地层学理论问题的总根源。

国际层序地层学界用岸线迹线垂向分量基准面曲线定义高位体系域、下降期体系域、低位体系域、水侵体系域(Catuneanu *et al.*, 2009;图 4;P4),而对于岸线迹线侧向分量 R-T 曲线的作用似乎有所回避,采用前积速率与加积速率变化定义低位正常水退、高位正常水退(Catuneanu *et al.*, 2009;图 18;P13)且两类正常水退均解释为岸线处物源补给超过海平面上升速率导致朝盆推进(Catuneanu *et al.*, 2009;图 2;P3)。岸线迹线侧向分量 R-T 曲线可以用于解释水退(高位正常水退、退强迫水退、低位正常水退)一水侵;倘若将二者联合定义,不难看出岸线迹线侧向分量 R-T 曲线上各阶段(高位正常水退、强迫水退、低位正常水退、水侵)与其垂向分量基准面曲线所代表的体系域(高位体系域、下降期体系域、低位体系域、水侵体系域)之间的一一相对应关系,然而现实中二者曲线的周期性的起始点却不对应(图 3)。症结在高位正常水退 HNR(highstand normal regression)设置不合理,其概念至今没能定型到一个合理的术语的地步(Catuneanu *et al.*, 2011);因为最大水泛期之后海平面继续减速上升的背景下,越过比最大水泛期还要大得多的水深而使得岸线朝盆推进,这类物源补给基本属于小概率突

发事件;唯有最大水泛期之后海平面相对静止(微波动升降)才可以满足物源补给导致岸线朝盆推进,即静止正常水退(李绍虎, 2012)。因此用静止正常水退取代高位正常水退,既能解决基准面曲线滞后 R-T 曲线这一层序地层学症结问题,也无须再为高位正常水退下定义而继续困扰;Exxon 公司的高位体系域的“上凸”相对海平面表达可以突破,可以尝试用水平直线取而代之,仍需很多基础工作做支撑。

对于图 3 需要辅助补充说明:限于当时的认识, Catuneanu(2002)原图在非海相地层没有下降期体系域;其实海相、非海相地层均有下降期体系域的存在,对此图 3 左侧补充了下降期体系域。如鄂尔多斯盆地东部河东煤田北部海相太原组内部桥头砂岩、陆相山西组底部北盆沟砂岩、下石盒子组底部骆驼脖子砂岩,以及准噶尔盆地八道湾组底部砂岩、库车坳陷塔里奇克组底部砂岩等均为下降期体系域;操应长(2000)在东营凹陷发现下降期体系域,而且越来越多的证据表明非海相地层中下降期体系域逐渐被我国学者所发现,王剑等(1996)、梅冥相和杨欣德(2000)、吴因业等(2010)对 FSST 均有论述,尤其吴因业等(2009)翻译出版了 Catuneanu《层序地层学原理》一书,集中体现了国际层序地层学最前沿成果,对我国开展四分层序地层学研究与应用很有参考价值。

问题 4:相对应整合面 cc 禁锢。与层序地层学方法广为应用形成鲜明对比的是相对应整合面 cc 术语备受质疑,包括下降期体系域底界(Posamentier and Allen, 1999)、下降期体系域顶界(Hunt 和 Tucker, 1992)两种类型的 cc 作为层序边界;原有不整合面 SU 与相对应整合面 cc 合并统归相对应不整合面 cc 且出现在层序地层学标准化趋向方案中(Catuneanu *et al.*, 2009),相对应整合面 cc 这一至今双重定义的术语,即高位正常水退叠置样式向强迫水退转变的地层界面(Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier and Allen, 1999; Catuneanu *et al.*, 2009)、强迫水退叠置样式向低位正常水退转变的地层界面(Hunt and Tucker, 1992; Catuneanu *et al.*, 2009),到了不得不改变的地步。

(1)纯几何学属性的相对应整合面 cc 不可取。该问题由来已久,地震地层学创立之前 Wheeler(1964)已经就此问题进行图解,其以不整合面为界划分层序 A 和层序 B,不整合面延伸至相对应的整合面 cc 所在区域划归层序 K,即层序 A+层序 B=层序 K(图 4),之间为“示意分割 arbitrary cut-off”。

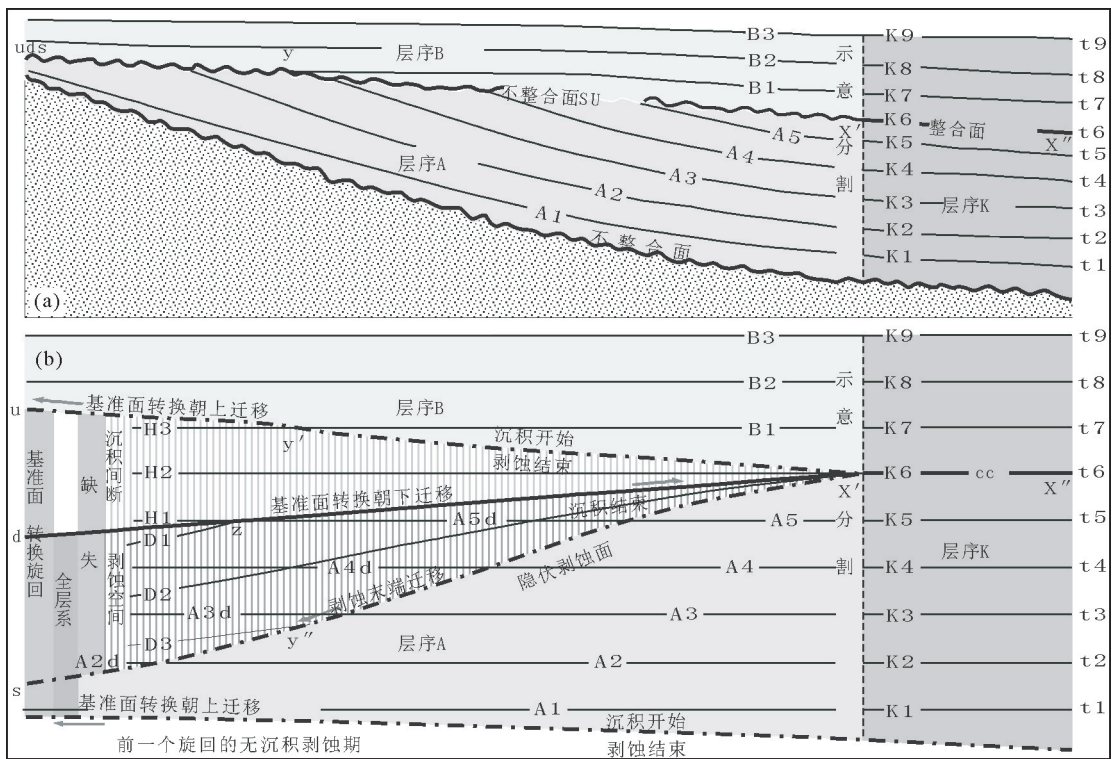


图 4 不整合界定层序(a)和年代地层格架(b)

Fig.4 Subaerial unconformity-bounded sequence (a) and time-stratigraphic (chronostratigraphic) framework (b)

据 Wheeler(1964)修改;层序严格由不整合面界定而使得年代地层时空保持层序 K=层序 A+层序 B

Mitchum *et al.*(1977)虽然以不整合面及其相对应整合面定义层序,其图解并未改变 Wheeler(1964)图解状况;参照 Wheeler 的方法可以将 Mitchum *et al.*(1977)的图解划分出 7 个层序,如此众多的层序也是不可接受的。

两相比较不难看出,Wheeler 图解、Mitchum 图解分别属于不整合面纵向、横向纯几何学分割,缺少沉积过程响应及其对应的年代等时线展布特征方面的表达;后来用地层叠置样式对其进行改进完善沉积响应表达(Van Wagoner *et al.*, 1987),又引发了关于相对应整合面的双重定义,再次困扰层序地层学界.从最初的纯几何学属性到现在的双重定义,相对应整合面 cc 似乎成为国际层序地层学界束手无策的难题;作者认为是时候转变层序界定追踪方向,选择盆内合适的其它层序地层特征界面(如残留最大水泛面,图 5 紫色线条示意)与盆缘不整合面(图 5 紫色不整合面)相结合界定层序(李绍虎,2010)。

(2)相对应整合 cc 面备受质疑且影响层序地层学标准化.1994 年《国际地层指南》出版之后,为了促进层序地层学在世界范围内接受与应用,1995 年底国际地层委员会指定国际地层委员会所属国际地层划分分会层序地层工作组(ISSC Working Group

on Sequence Stratigraphy)开始层序地层学正规化工作(Catuneanu *et al.*, 2009);至 1999 年公布首份报告,没能就层序地层学术语达成一致(Christie-Blick, 2007);2002 年 3 月工作组公布讨论结论称“层序地层学的概念和术语仍然处于发展中阶段.在试图修改它的概念和术语之前,应当有更多的时间允许这种地层方法去发展和成熟”(张守信,2005). ISSCWGSS 工作组(1995—2002)曾向国际地层委员会成员征询 5 个关于“相对应整合面”的问题(张守信,2005),包括相对整合面定义、追踪标准、出版物、制图及有无追踪等,结果都是否定的.Salvador(2001)也提出:(1)地震层序学和层序地层学关于层序定义中的相对应整合面足以证实属于独立术语吗?(2)地震地层学和层序地层学的层序以不整合面界定是客观的而相对应整合面界定是解释性的吗?地层学界不接受层序地层学界的相对应整合面这一术语。

相对应整合面不被地层学大家庭接受的同时,层序地层学界内部对其双定义直接影响层序地层标准化,至今不能统一地定义“层序地层单位(sequence stratigraphic units)”定义,进入《国际地层指南》之路还很漫长.与其亲缘的地层单位“异序地层

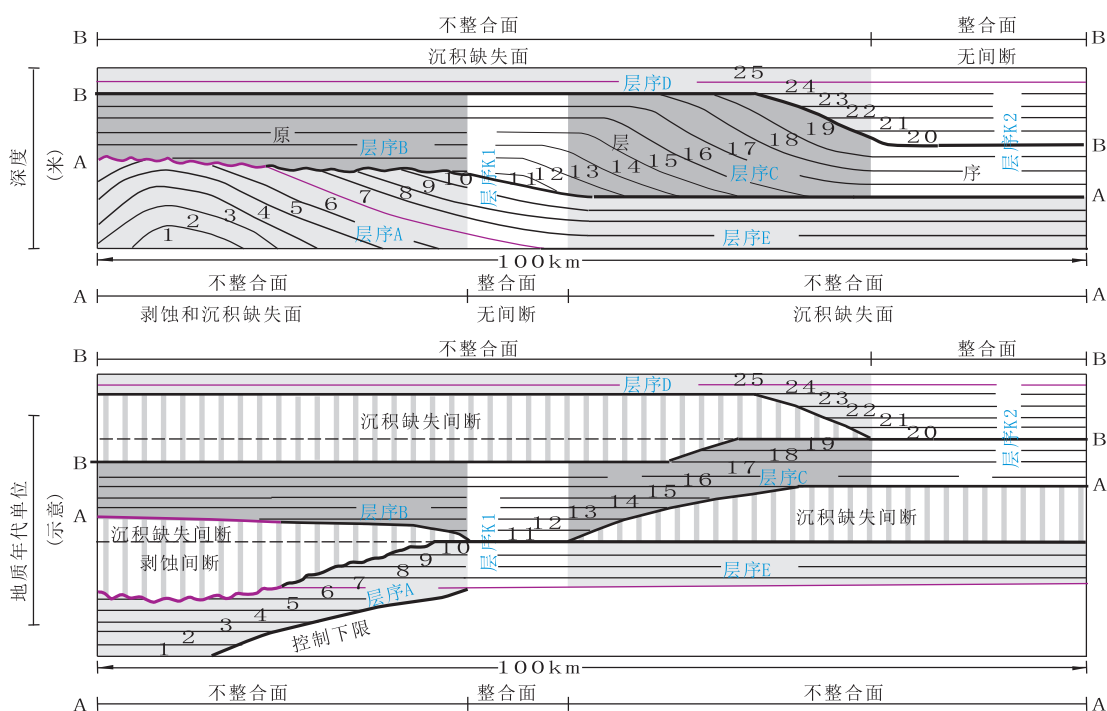


图 5 Wheeler(1964)不整合面界定层序(蓝色字体)和 Mitchum *et al.*(1977)不整合面及其相对应整合面界定的层序的理想地层剖面和年代地层剖面

Fig.5 Generalized stratigraphic and chronostratigraphic sections of sequence bounded by subaerial unconformities (Wheeler, 1964; blue fronts), and sequences bounded by subaerial unconformities and their correlative conformities (Mitchum *et al.*, 1977)

显示存在用层序地层学特征界面(如紫色线条图示的潜在的残留最大水泛面)取代相对应整合面而与不整合面(紫色)共同界定层序的可能性(据 Mitchum *et al.*(1977)并参照 Wheeler(1964)方法修改)

单位(allostratigraphic units)”、“不整合界定单位(unconformity-bounded units)”,前者于1983年进入《北美地层规范》,等级系列依次为“异序群(allogroup)”、“异序组(alloformation)”、“异序段(allomember)”;后者于1994年进入《国际地层指南》,等级系列依次为“超序(supersynthem)”、“序(synthem)”、“亚序(subsynthem)”.目前“层序地层单位”已经形成包括“超层序(supersequence)”、“层序(sequence)”、“亚层序(subsequence)”[体系域(systems tract)更为合适]在内的等级系列;如果达成统一的“层序地层单位”定义,未来有可能进入《国际地层指南》第三版;Catuneanu *et al.*(2011)为此做出巨大努力,在国际地层委员会 ISSC 官方刊登了关于层序地层学方法和术语的文章,依然双定义“相对应整合面”而至今仍定义不了统一的“层序地层单位”.另一个值得关注的动向,具有 ISSC 官方的《现代地层学技术应用》一书由2010年由 Ratcliffe 和 Zaitlin 编辑出版,其参照《国际地层指南》顺序编排“层序地层学方法”、“生物地层方法”、“化学地层学方法”、“磁性地层学方法”、“其它地层学方法”等;Donovan

(2010)将层序地层学 5 大流派的沉积层序处理为“小尺度不连续面界定的 T-R 旋回”,极力回避层序地层学主流派别沉积层序的强迫水退、正常水退…….沉积层序有问题但不致命,可以改进但不能否定,这也是作者在文中一致坚持用 R-T 曲线而不用 T-R 曲线的原因所在,因为只有 R-T 曲线与基准面曲线匹配才能有望解决层序地层学非周期性,统一层序地层 3 个沉积层序流派和成因层序(包括高分辨率层序地层学),T-R 层序则为 TST-RST(HST-FSST-LST)的模式.

3 以沉积层序为代表的层序地层学问题的本质讨论与建议

本文指出的 4 个问题,问题①、问题②和问题④均为层序边界问题,其中,层序边界(SU+cc)跨界、系、统、阶等年代地层单位是理论表象,层序地层学“T-R”建模理论基础与(沉积)层序边界不断调整是理论过程,相对应整合面cc禁铜是理论症结;问题

③岸线地带基准面曲线滞后 R-T 曲线,则是前述 3 个问题的源头——层序地层学隐含的非周期性(李绍虎和贾丽春,2011).归并可以统称为层序地层学非周期性、层序边界两大问题.

(1)静止正常水退 SNR(stillstand normal regression,图 7)取代高位正常水退 HNR(highstand normal regression)(李绍虎,2012),解决由高位正常水退造成的基准面曲线滞后 R-T 曲线这一层序地层学隐含非周期性问题.Catuneanu *et al.*(2009)关于层序地层学标准化趋向方案中列出 5 大流派 6 种由海平面、相对海平面、基准面曲线,相互间标注差异但一个共同特点——仅关注岸线处海平面垂向变化而忽视其侧向变化,因此仅仅采用岸线迹线垂向分量基准面曲线定义各流派层序及其内部体系域划分,岸线迹线侧向分量 R-T 曲线并未参与其中.如果将基准面曲线(升、降)和 R-T 曲线(朝陆、朝盆)一同按照时间序列检验前述 6 种曲线,且曲线最高点或者最低点界定周期,6 种曲线均为非周期.

例如,检验 Hunt and Tucker(1992)相对海平面曲线(Catuneanu *et al.*, 2009, 图 4, P4; 图 23, P16),结果显示基准面曲线滞后 R-T 曲线 1/6 周

期,指出层序地层学隐含非周期性问题(李绍虎和贾丽春,2011,图 4, P109).限于当时的认识,借鉴岌岌湖现代水下加积扇高位体系域不发育,而提出“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(李绍虎和贾丽春,2011; P115)”.非周期性是由高位正常水退设定不合理引起的,其对应的高位体系域需要重新解释;高位正常水退如何图解合理表达长期困扰作者,当时为了纠正高位正常水退而去掉高位体系域以求解决层序地层学隐含非周期性问题,是不妥的(李绍虎和贾丽春,2011).论文发表后的 2011 年 6 月北京国际层序地层学研讨会召开前夕,终于想出用静止正常水退取代高位正常水退,并在大会分会场宣读.会后受姜在兴教授邀请于《地学前缘》撰写“浅议层序边界”一文中并将静止正常水退取代高位正常水退写入(李绍虎,2012).

(2)残留最大水泛面与其相对应不整合面界定层序,有两大优势条件:①优势条件之一.残留最大水泛面与年代地层单位界线(一致)或接近.Haq *et al.*(1987)曲线客观地展示了三级层序边界跨年时代地层单位界线,而三级层序的最大水泛面年龄接

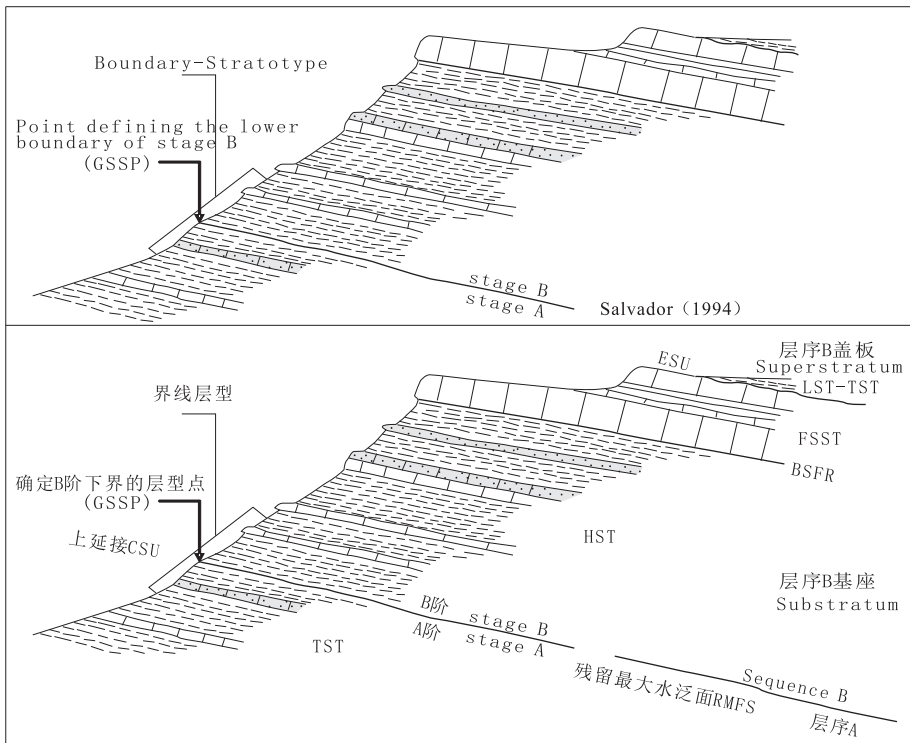


图 6 年代地层单位界线层型下界及与之潜在匹配的残留最大水泛面

Fig.6 Boundary of stratotype for a chronostratigraphic unit and its potentially matching remnant maximum flooding surface bounded sequence stratigraphic unit

据 Salvador(1994)修改;下部为作者进行的层序地层学术语标注

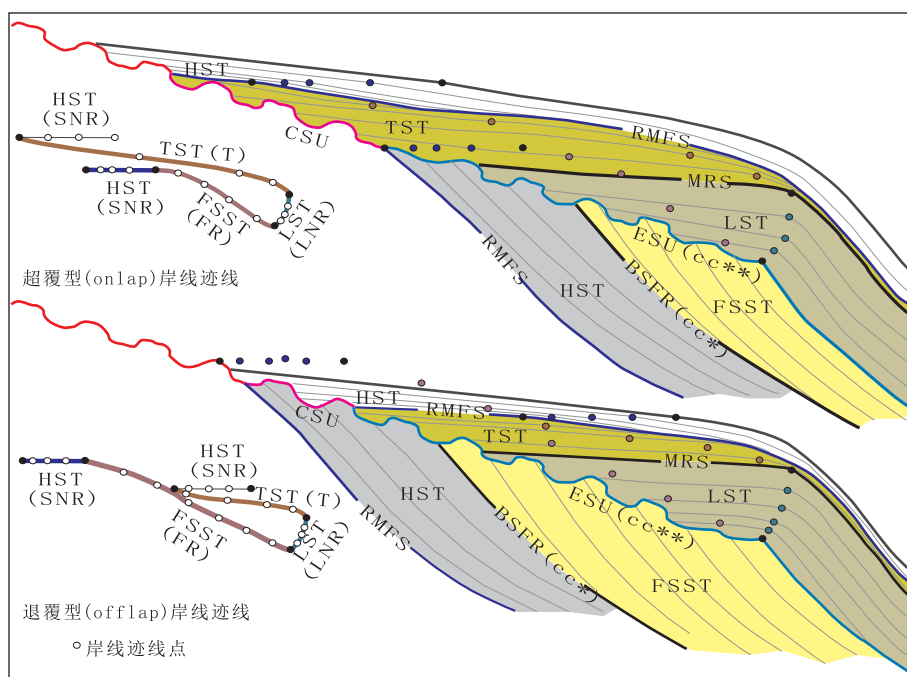


图 7 基于静止正常水退取代高位正常水退的岸线迹线周期性

Fig.7 Based on stillstand normal regression (SNR) replacing highstand normal regression (HNR)

用于定义残留最大水泛面 RMFS 与其相对应不整合面 CSU 界定层序 HST(SNR)-FSST(FR)-LST(LNR)-TST(T) 及其体系域、关键界面、水退、水侵时空关系 HST, 高位体系域; FSST, 下降期体系域; LST, 低位体系域; TST, 水侵体系域; SNR, 静止正常水退; FR, 强迫水退; LNR, 低位正常水退; T, 水侵; RMFS 和 CSU—残留最大水泛面及其相对应不整合面; BSFR, 强迫水退底界; ESU, 不整合面延伸; MRS, 最大水退面; cc*, 相对应整合面即 Posamentier and Allen(1999); cc**, 相对应整合面即 Hunt and Tucker(1992)

近年地层界线;至少表明层序地层学存在与年代地层单位界线接轨的关键界面,该界面可以用于给“层序地层单位”下定义,这也是 1995 年开始的层序地层学正规化及后来的标准化始终没能完成的终极目标;②优势条件之二.残留最大水泛面可潜在地与《国际地层指南》GSSP 界线(一致)或接近.Salvador (1994)主编的《国际地层指南》规定全球界线层型剖面点 GSSP 阶的确定(详见 Salvador, 1994;图 2; P27;金玉玕、戎嘉余等译,2000;图 2;P16),如按照层序地层学方法划分体系域,不难发现其图中的 GSSP 之 B 阶底界位于或者接近最大水泛面(图 6 下部);Geological TimeScale Foundation 网站列出的 GSSP 信息,相当数量的金钉子定位于最大水泛面及其附近,包括:土伦阶/赛诺曼阶 GSSP(K₂, 科罗拉多,美国)、普林斯巴阶/辛涅缪尔阶 GSSP(J₁, 约克郡,英国)、辛涅缪尔阶/赫塘阶 GSSP(J₁, 萨默塞特郡,英国)、拉丁阶/安尼阶 GSSP(T₂, 巴戈利诺,意大利)、宾夕法尼亚系(C₂)/密西西比系(C₁) GSSP(内华达,美国)、T/P 界线(长兴县,中国)、O₃/O₂ 界线(新疆柯坪大湾沟,中国)等,均位于残留最大水泛面及其附近.

(3)充分利用残留最大水泛面与其相对不应整合面界定层序的两大优势条件,有望解决现行层序边界主要问题.

残留最大水泛面前述优势条件,表明其具有关联层序地层单位与年代地层单位等其它地层单位的界线专属性.置于地层学大家庭,残留最大水泛面是未来层序地层单位进入《国际地层指南》的桥梁(残留最大水泛面潜在地一致于各级年代地层单位界线);置于层序地层学内部,残留最大水泛面与其相对应的不整合面相结合,亦能解决现行层序边界主要问题:

①残留最大水泛面与其相对不应整合面界定层序,其残留最大水泛面部分可以解决现行层序边界跨年代地层单位界线问题.层序地层学实践者针对岩石地层单位开展层序地层学研究过程中,窘于岩石地层单位的年代代号,而将岩石地层单位界线作为首选层序边界;实际上,很多岩石地层单位还达不到等同年地层单位的程度,因此将岩石地层单位界线作为层序边界的做法,一定程度上掩盖了层序边界跨年代地层单位界线问题.现实中,对同一地区的群、组、段等岩石地层单位,划分的层序数目、设定

的层序边界差异大,解释性(现行作为层序边界的相对整合面)多于客观性。至今,如同层序地层单位暂时进不了《国际地层指南》一样,现行的层序边界没有出现在任何官方认定的区域地层表中。

作为层序边界组成部分的残留最大水泛面,可以解决上述跨界问题。以下是露头实例方面证据:山西柳林县成家庄中学附近出露石炭—二叠系海陆交互相煤系地层,自下而上依次为太原组下部海相潮坪碎屑岩+碳酸盐岩(顶为富含生物化石的薄层灰岩—残留最大水泛面)(TST)、太原组上部陆相三角洲前缘泥岩(HST)、山西组北岔沟砂岩(FSST)。传统地层划分以北岔沟砂岩底界划分太原组/山西组界线,即强迫水退底界 BSFR (Hunt 和 Tucker, 1992)作为石炭纪/二叠纪界线,实际上是以岩石地层单位界线代替年代地层单位界线,由此造成具争议的现行层序边界(下降期体系域底界、顶界)与年代地层单位界线一致的假象。目前,国内地层学界已经将原岩石地层单位太原组归属 C_2-P_1t 年代地层单位;若以海相化石富集层残留最大水泛面为界,其下伏海相地层(TST)划归为 C_2t ,上覆陆相地层(HST)划归二叠系 P_1t (向北在保德桥头和扒楼沟剥蚀殆尽),新的太原组顶部残留最大水泛面就兼有岩石地层单位和年代地层单位意义,即成为年代地层单位系 C/P 界线。这一实例表明层序地层学残留最大水泛面作为层序边界组成部分,可以解决现行层序边界跨年代地层界线的问题;其年代地层学意义可以用于年代地层界线优化,其层序地层学意义则用于层序界定。

②残留最大水泛面与其相对不应整合面构成的复合层序边界,其相对不应整合面成分部分继承 Mitchum *et al.*(1977)的陆缘不整合面作为层序边界的原始概念,残留最大水泛面成分则为盆内层序边界(图7)。文中将这一复合层序边界称为第四次层序边界调整,与前三次调整的本质区别在于层序边界追踪方向截然相反,即由现行的陆缘不整合面朝盆内相对应整合面的追踪,调整为盆内残留最大水泛面朝陆缘相对应不整合面的追踪;也就是将由陆朝盆的一对多(“干线向支线的分叉”),转变为由盆朝陆的“支线向干线的合并”一对一。如此调整层序边界,最终避开了前三次层序边界调整出现的过多不整合面(Vail *et al.*, 1977)、双定义相对应整合面(Hunt and Tucker, 1992; Posamentier and Allen, 1999)。

再者,前三次层序边界调整是将 Sloss 层序——构造不整合面界定的大尺度“T-R”引进到地

震地层学建模而逐渐引发的修正调整过程。(1)第一次调整, Vail *et al.*(1977)采用不整合面之上的三级尺度“T-R”建模,但是序边界分别位于 T 成分(高位沉积)顶底、R 成分(低位沉积)顶底,亦即高位沉积型层序和低位沉积型层序。(2)第二次调整,层序边界位于 Exxon 三分模型低位体系域底部(HST/LST),相当于 Exxon 调整四分模型早期低位体系域底部(ELST/LLST)。(3)第三次调整,层序边界位于下降期体系域 FSST 顶界(FSST/LST)。这三次层序边界调整都与低位成分属性认识有关,涉及到经典的低位楔顶底、斜坡扇+盆底扇顶底,概括为陆缘朝盆内的3次“一对多”层序边界调整。

变由陆朝盆为由盆朝陆的层序边界追踪方向,残留最大水泛面与其相对应不整合面以其复合式“一对一”层序边界为特征,可以避免层序地层学发展经历的3次“一对多”层序边界问题。

③残留最大水泛面与其相对不应整合面构成的复合层序边界,其中的相对应不整合面成分在盆内的不整合延伸 ESU(extension of subaerial unconformity, 李绍虎, 2010; 图7),可以用于调整且避免现行的双定义2个“相对应整合面”。首先,将双定义“相对应整合面”从层序级界面降级为体系域级界面,进而有效避免这一备受争议且阻碍层序地层学理论发展的“禁锢”。其次,不整合延伸 ESU 客观上与 Hunt and Tucker(1992)的“相对应整合面”一致(图7;注:国际上将不整合面及其相对应整合面统归为相对应整合面; Catuneanu *et al.*, 2009),可沿用其定义“强迫水退叠置样式向低位正常水退转变的地层界面”(Catuneanu *et al.*, 2009),主体作为四分层序地层学模型的 FSST/LST 界线但亦有 TST 底界成分(图7)。而双定义的另一个“相对应整合面”(Posamentier and Allen, 1999),鉴于其在 Haq *et al.*(1987)曲线中已经表现出作为层序边界跨年代地层单位界线的缺陷,不再适合作为层序级界面,建议恢复其为 Hunt and Tucker 提出的强迫水退底界术语,静止正常水退取代高位正常水退而将“强迫水退底界”定义为“静止正常水退叠置样式向强迫水退叠置样式转变的地层界面”(图7);现行采用 Plint (1988)提出的海相侵蚀水退面 RSME(regressive surface of marine erosion)取代原有的 Hunt and Tucker(1992)提出的强迫水退底界不合适,其不是海相地层独有的界面,非海相地层也存在,因此建议恢复强迫水退底界术语作为下降期体系域底界。

4 结论

(1) 沉积层序问题表现为: 层序边界(SU+cc) 跨界、系、统、阶等年代地层单位是理论表象, 层序地层学“T-R”建模理论基础与沉积层序边界不断调整是理论发展过程, 相对应整合面 cc 禁锢是理论演变症结; 三者均与层序边界设定有关, 源头在基准面曲线滞后 R-T 曲线, 即层序地层学隐含的非周期性。归并统称为层序地层学非周期性、层序边界两大问题。

(2) 静止正常水退 SNR 取代高位正常水退 HNR, 解决层序地层学非周期性问题。

(3) 解决层序边界问题。① 残留最大水泛面 RMFS 与其相对应不整合面 CSU 作为复合层序边界, 其中接近或者一致于年代地层单位界线的 RMFS, 解决层序边界跨年代地层单位界线的问题。② 满足周期性的 RMFS 与 CSU 复合层序边界, 其由盆朝陆的“一对一”方式解决层序边界“一对多”不断调整问题。③ 降级“相对应整合面 cc”为体系域边界, 解决双定义“相对应整合面”禁锢问题。Hunt 和 Tucker(1992) 的“相对应整合面”用复合层序边界 CSU 成分向盆内的延伸部分 ESU 取代, Posamentier 和 Allen(1999) 的“相对应整合面”恢复为强迫水退底界 BSFR, 现行采用海相侵蚀水退面 RSME 不能代表非海相强迫水退底界。

致谢: 非常感谢审稿专家们的辛勤劳动, 他们为本文提出的修改意见和建议让作者受益匪浅。此外, 本文为作者多年关于层序地层学理论方面的思考, 能力所限难免有不妥之处, 敬请同行批评指正。

References

Cant, D. J., 1991. Geometric Modelling of Facies Migration: Theoretical Development of Facies Successions and Local Unconformities. *Basin Research*, 3(2): 51–62. doi: 10.1111/j.1365-2117.1991.tb00139.x

Cao, Y. C., 2000. Distinguishment of Falling Stage Systems Tract of Sequence Strata in a Continental Rift-Subsidence Basin. *Journal of the University of Petroleum, China*, 24(1): 22–25 (in Chinese with English abstract).

Catuneanu, O., 2002. Sequence Stratigraphy of Clastic Systems: Concepts, Merits, and Pitfalls. *Journal of African Earth Sciences*, 35(1): 1–43. doi: 10.1016/s0899-5362(02)00004-0

Catuneanu, O., 2009. Series Books of New Advances of Foreign Oil and Gas Exploration and Development 7th: Principles of Sequence Stratigraphy. Translated by Wu,

Y. Y., Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese with English abstract).

Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., et al., 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92: 1–33. doi: 10.1016/j.earsci-rev.2008.10.003

Catuneanu, O., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., et al., 2010. Sequence Stratigraphy: Common Ground after Three Decades of Development. *First Break*, 28: 21–34. doi: 10.3997/1365-2397.2010002

Catuneanu, O., Galloway, W. E., Kendall, C. G. S. C., et al., 2011. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44(3): 173–245. doi: 10.1127/0078-0421/2011/0011

Christie-Blick, N., Pekar, S. F., Madof, A. S., 2007. Is There a Role for Sequence Stratigraphy in Chronostratigraphy? *Stratigraphy*, 4(2/3): 217–229.

Donovan, A. D., 2010. The Sequence Stratigraphy Family Tree: Understanding the Portfolio of Sequence Methodologies. In: Ratcliffe, K., Zaitlin, B., eds., *Application of Modern Stratigraphic Techniques: Theory and Case History*. *Society for Sedimentary Geology (SEPM)*, 94: 5–33.

Embry, A. F., Johannessen, E. P., 1992. T-R Sequence Stratigraphy, Facies Analysis and Reservoir Distribution in the Uppermost Triassic-Lower Jurassic Succession, Western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: Vorren, T. O., Bergsager, E., Dahl-Stamnes, O. A., eds., *Arctic Geology and Petroleum Potential*. *Special Publication, Norwegian Petroleum Society*, 2: 121–146.

Galloway, W. E., 1989. Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis, I. Architecture and Genesis of Flooding-Surface Bounded Depositional Units. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73: 125–142.

Grabau, A. W., 1906. Types of Sedimentary Overlap. *Geological Society of America Bulletin*, 17(1): 567–636. doi: 10.1130/gsab-17-567

Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels since the Triassic. *Science*, 235(4793): 1156–1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156

Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1988. Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-Level Change. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. S. C., eds., *Sea Level Change: An Integrated Approach*. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42: 71–108.

Helland-Hansen, W., 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 94(1–4): 95–97. doi: 10.1016/j.earsci-rev.2008.12.003

- Helland-Hansen, W., Gjelberg, J. G., 1994. Conceptual Basis and Variability in Sequence Stratigraphy: A Different Perspective. *Sedimentary Geology*, 92 (1/2): 31—52. doi:10.1016/0037-0738(94)90053-1
- Hunt, D., Tucker, M. E., 1992. Stranded Parasequences and the Forced Regressive Wedge Systems Tract: Deposition during Base-Level Fall-Reply. *Sedimentary Geology*, 95 (1/2): 147—160. doi:10.1016/0037-0738(94)00123-c
- Jervey, M. T., 1988. Quantitative Geological Modeling of Siliciclastic Rock Sequences and Their Seismic Expression. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., eds., Sea Level Changes—An Integrated Approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM)*, 42:47—69.
- Kolla, V., Posamentier, H. W., Eichenseer, H., 1995. Stranded Parasequences and the Forced Regressive Wedge Systems Tract: Deposition during Base-Level Fall-Discussion. *Sedimentary Geology*, 95 (1/2): 139—145. doi:10.1016/0037-0738(94)00122-b
- Li, S. H., 2010. Thinking of International Sequence Stratigraphy Development and L-H-T Sequence Stratigraphy. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 735—744 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. H., 2011. About Sequence Boundary. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 20—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. H., Jia, L. C., 2010. Adjustment to Non-Periodicity and Sequence Boundary in Four-Divided Model of Sequence Stratigraphy. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29 (1): 105—117 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. H., Zhou, J. B., Jia, L. C., et al., 2011. Comparison of Sequence Stratigraphic Significance between East Coulee Delta and Jijihu Modern Subaqueous Aggradational Fan (SAF). *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(4): 613—621 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., Yang, X. D., 2000. Forced Regression and Forced Regressive Wedge System Tract: Revision on Traditional Exxon Model of Sequence Stratigraphy. *Geological Science and Technology Information*, 19(2): 17—21 (in Chinese with English abstract).
- Mitchum Jr., R. M., Vail, P. R., Thompson III, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea-Level. Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis. In: Payton, C. E., ed., Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. *American Association of Petroleum Geologists*, 26: 53—62.
- Plint, A. G., 1991. High Frequency Relative Sea Level Oscillations in Upper Cretaceous Shelf Elastics of the Alberta Foreland Basin: Possible Evidence of A Glacio-Eustatic Control? In: Macdonald, D. I. M., ed., Sedimentation, Tectonics and Eustasy. *International Association of Sedimentologists Special Publications*, 12: 409—428.
- Plint, A. G., Nummedal, D., 2000. The Falling Stage Systems Tract: Recognition and Importance in Sequence Stratigraphic Analysis. *Geological Society, London, Special Publications*, 172(1): 1—17. doi:10.1144/gsl.sp.2000.172.01.01
- Plint, A. G., Nummedal, D., 2000. The Falling Stage Systems Tract: Recognition and Importance in Sequence Stratigraphic Analysis. *Geological Society, London, Special Publications*, 172(1): 1—17. doi:10.1144/gsl.sp.2000.172.01.01
- Plint, A. G., 1988. Sharp-Based Shoreface Sequences and “Off-shore Bars” in the Cardium Formation of Alberta: Their Relationship to Relative Changes in Sea Level. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., eds., Sea Level Changes—An Integrated Approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM)*, 42: 357—370.
- Posamentier, H. W., Allen, G. E., James, D. E., et al., 1992. Forced Regressions in a Sequence Stratigraphic Framework: Concepts, Examples and Exploration Significance. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76: 1687—1709.
- Posamentier, H. W., Allen, G. P., 1999. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. Concepts in Sedimentology and Paleontology, Vol. 7. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), 210.
- Posamentier, H. W., Jervey, M. T., Vail, P. R., 1988. Eustatic Controls on Clastic Deposition I—Conceptual Framework. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., eds., Sea Level Changes — An Integrated Approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM)*, 42: 110—124.
- Posamentier, H. W., Vail, P. R., 1988. Eustatic Controls on Clastic Deposition II—Sequence and Systems Tract Models. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., eds., Sea Level Changes — An Integrated Approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM)*, 42: 125—154.
- Salvador, A., 1994. International Stratigraphic Guide—Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure, 2nd ed., The International Union of Geological Sciences and the Geological Society of America, Colorado.
- Salvador, A., 2000. International Stratigraphic Guide: Stratigraphic Classification, Terminology and Procedures. Jin, Y. G., Rong, J. Y., et al., Translators. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Salvador, A., 2001. Review of the Concept of and Recommen-

- ded Terminology for Unconformity-Related Units. Hedberg Research Conference (Sequence Stratigraphic and Allostratigraphic Principles and Concepts) Program and Abstracts Volume. American Association of Petroleum Geologists, Dallas, Texas, 46—47.
- Sangree, J. B., Mitchum III, R. M., 1995. Sequence Stratigraphy: A Personal History of Lows and Highs. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 14(1): 1519—1520.
- Sloss, L. L., 1963. Sequences in the Cratonic Interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 74(2): 93. doi: 10.1130/0016-7606(1963)74[93: sitcio]2.0.co;2
- Sloss, L. L., 1988. Forty Years of Sequence Stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11): 1661—1665. doi: 10.1130/0016-7606(1988)100<1661: fyoss>2.3.co;2
- Sloss, L. L., Krumbein, W. C., Dapples, E. C., 1949. Integrated Facies Analysis. In: Longwell, C. R., ed., *Sedimentary Facies in Geologic History*. *Geological Society of America*, 39: 91—124.
- Vail, P. R., 1987. Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure. In: Bally, A. W., ed., *Atlas of Seismic Stratigraphy*, Volume 1. *American Association of Petroleum Geologists*, 27: 11—14.
- Vail, P. R., Audemard, F., Bowman, S. A., et al., 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustasy and Sedimentology—An Overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A., eds., *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 617—659.
- Vail, P. R., Mitchum Jr., R. M., Thompson III, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. In: Payton, C. E., ed., *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. *American Association of Petroleum Geologists*, 26: 63—81.
- van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., et al., 1988. An Overview of Sequence Stratigraphy and Key Definitions. In: Wilgus, C. W., ed., *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42: 39—45.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum Jr., R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Core, and Outcrops: Concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies. *American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series*, 7: 1—55.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Posamentier, H. W., 1987. An Overview of Sequence Stratigraphy and Key Definitions. In: Bally, A. W., ed., *Atlas of Seismic Stratigraphy*, Volume 1. *American Association of Petroleum Geologists*, 27: 1—10.
- Wang, J., Zhao, Y. G., Li, Z. X., et al., 1996. An Outcrop Sequence Division Model: Examples from the Devonian Basin in Northern and Center Guangxi. *Journal of Palaeogeography*, 16(6): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wheeler, H. E., 1964. Baselevel, Lithosphere Surface, and Time-Stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 75(7): 599. doi: 10.1130/0016-7606(1964)75[599: blsat]2.0.co;2
- Wu, Y. Y., Zhu, R. K., Luo, P., et al., 2011. Advance on Sedimentology and Sequence Stratigraphy: A Summary from 18th International Sedimentology Congress. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 199—206 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., 2005. Chinese Code of Stratigraphic Nomenclature (Commendation). *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 22(5): 604—623 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 奥克塔文·卡图尼努, 2009. 国外油气勘探开发新进展丛书七: 层序地层学原理. 吴因业等, 译. 北京: 石油工业出版社.
- 操应长, 2000. 断陷湖盆层序地层下降体系域的划分. *石油大学学报: 自然科学版*, 24(1): 22—25.
- 李绍虎, 2010. 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. *沉积学报*, 28(4): 735—744.
- 李绍虎, 2012. 浅议层序边界. *地学前缘*, 19(1): 20—30.
- 李绍虎, 贾丽春, 2011. 层序地层学四分模型的非周期性 with 层序边界调整. *沉积学报*, 29(1): 105—117.
- 李绍虎, 周继兵, 贾丽春, 等, 2011. 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. *沉积学报*, 29(4): 613—621.
- 梅冥相, 杨欣德, 2000. 强迫型海退及强迫型海退楔体系域——对传统 Exxon 层序地层学模式的修正. *地质科技情报*, 19(2): 17—21.
- 萨尔瓦多, 2000. 国际地层指南: 地层分类、术语和程序 (第二版). 金玉玕, 戎嘉余, 等, 译. 北京: 地质出版社.
- 王剑, 赵玉光, 李忠雄, 等, 1996. 一个露头层序地层划分模型——以桂中北泥盆纪盆地为例. *岩相古地理*, 16(6): 1—13.
- 吴因业, 朱如凯, 罗平, 等, 2011. 沉积学与层序地层学研究进展——第 18 届国际沉积学大会综述. *沉积学报*, 29(1): 199—206.
- 张守信, 2005. 中国地层标准化的建议——中国地层命名法规的建议. *中国科学院研究生院学报*, 22(5): 604—623.