

现行层序模型及其标准化

李宝庆

(中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 基于对先前研究成果的分析, 归纳了现行层序模型(沉积层序、成因层序和 T-R 层序)和层序地层标准化流程, 对比分析了各层序模型的优点和不足, 认为各层序模型均为不同地质背景下地层记录的理论提炼, 具有各自的优点与不足, 适用于各自的地质背景; 模型构成(体系域)的出现受控于可容纳空间与物源供给的相互作用, 具体归因于构造、海平面、物源和气候等的变化; 层序地层的标准化就是独立于模型与依赖于模型 2 个方面和方法的结合, 标准化的关键在于层序地层格架基石或建造块(成因类型)的识别。

关键词: 层序模型; 沉积层序; T-R 层序; 成因地层层序; 成因类型

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Current models and standardization of sequence stratigraphy

Li Baoqing

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

Abstract: Based on previous research, the paper summarized several sequence stratigraphic models (depositional sequence, genetic stratigraphic sequence and transgressive-regressive sequence) and standardized the workflow of sequence stratigraphy, and analyzed the merits and pitfalls of different sequence models. Sequence models representing stratigraphic records in different geological settings were applied to corresponding settings. The occurrence of system tracts was controlled by the interplay between accommodation and sediment supply, and was ascribed to changes such as tectonics, sea-level, sediment supply, climate and so on. The standardized workflow of sequence stratigraphy was based on the model-independent approach and model-dependent approach. Differentiating genetic types was essential for the standardization of sequence stratigraphy.

Key words: sequence models; depositional sequence; T-R sequence; genetic stratigraphic sequence; genetic types of deposit

层序地层学作为一种新的基于成因、过程分析的地层分析方法, 被认为是沉积地质学的第三次概念革命^[1], 其不仅有助于理解沉积地层的沉积机制, 且对沉积矿产具有强大的预测功能^[2-3]。基于此, 层序地层学在沉积矿产勘探领域得以广泛推广和普遍应用, 并且伴随着一系列层序模型的诞生^[4-16], 呈现出“百花齐放, 百家争鸣”的局面。然而, 层序地层模型的持续争议和相关术语的混乱, 给学科发展及学术交流造成了诸多不便, 故 Catuneanu 等^[4]推荐进行层序地层标准化工作, 以期进一步完善学科的发展。

1 层序地层模型

1.1 Sloss 层序

层序地层学通常被认为源自于 20 世纪 70 年

代的地震地层学。事实上, 与层序地层学有关的沉积、不整合与基准面变化关系的研究要早于地震地层学^[17]。Sloss 等^[18]在北美地质学会年会上就提出过层序的概念, 认为层序为一套级别重大的、跨越大多数北美地台的区域不整合所限定的地层单元。Krumbein 等^[19]详述了层序概念, 认为层序代表重大的构造旋回。Sloss 等^[20]应用层序概念于北美地台, 将区域构造不整合面界定的北美克拉通前寒武纪晚期—全新世地层划分为 6 个超层序。值得一提的是, Sloss 等^[18, 20]提出的层序为比群或超群更高级别的地层单元(构造层序), 此限制层序只能应用于区域尺度的地层研究。同时, 此层序概念仅涉及以陆上不整合面界定的层序, 而不整合面局限于盆地边缘且沿沉积倾向逐渐消失, 故难以建立整个盆地的等时格架(图 1)^[17]。

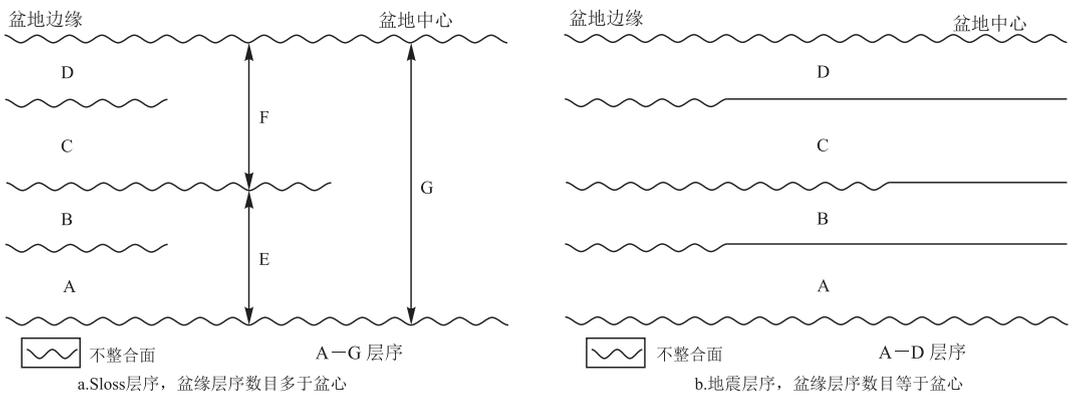


图1 Sloss 层序和地震层序的层序数目^[17]

Fig.1 Sequence number of Sloss's and seismic sequences

1.2 地震地层学层序

基于对大量地震模型的分析, Mitchum 等^[21]引进了相对应的整合面的概念, 从而将层序定义为由盆缘不整合面及其盆内相对应的整合面所限定的一套相对整齐的、成因上有联系的地层单元。此层序术语的提出, 一方面使层序界面延伸于整个盆地, 建立了全盆范围的地层格架(图1)^[17]; 另一方面使得层序术语独立于空间和时间尺度, 可应用于不同尺度的地层研究。为区别 Sloss 等^[18,20]的超层序概念, Mitchum 等^[21]的层序被认为是沉积层序^[17]; 自提出之日起, 因相对应的整合面形成时间、性质等受到诸多学者的争议, 进而导致一系列沉积层序模型的提出。

1.3 沉积层序

1.3.1 I 和 II 型层序模型

为区分不同构造背景, Vail 等^[22]首次提出了 I 型和 II 型层序边界定义。I 型层序边界形成于快速的绝对海平面下降阶段, 此时陆架边缘处的海平面下降速率高于构造沉降速率, 进而引起广泛的陆上暴露和重要的下切侵蚀。II 型层序边界形成于缓慢的绝对海平面下降阶段, 此时陆架边缘处的海平面下降速率低于构造沉降速率, 进而引起较小的陆上暴露和下切侵蚀。I 型和 II 型层序边界的主要不同在于暴露和下切侵蚀程度的不同。

Posamentier 等^[5]重新修订了 I 型和 II 型层序边界的定义, 认为 I 型和 II 型层序边界的出现取决于沉积滨线坡折处的海平面下降速率与构造沉降速率, 由此造成更多的概念混淆^[17]。

I 型层序边界形成于沉积滨线坡折处的绝对海平面下降速率高于构造沉降速率期, 引起了广泛的陆上暴露和重要的下切侵蚀。I 型层序模型可细分为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST), 其除在海平面曲线上标定体系域

分布区间之外, 重点标定了“相对应的整合面”的位置, 为海平面从最高点下降至近于 1/8 周期位置(图2)^[3,5-9,12-15]。因海平面下降至最低点时, 陆上不整合面向盆内延伸达最大, 故陆上不整合面不可能同海平面下降至近于 1/8 周期处的时间面相连接, 故 I 型层序边界在理论上是不可能的^[23]。意识到将相对应的整合面(cc)标定于海平面下降至近于 1/8 周期位置处的不恰当性, Posamentier 等将 cc 移至相对海平面开始下降时间点(图2)^[3,5-9,12-15]。故认为现行 Posamentier 和 Allen^[6]的层序模型为 Posamentier 和 Vail^[5]的 I 型层序的演变。

II 型层序边界形成于沉积滨线坡折处的海平面下降速率低于构造沉降速率期, 据此推理 II 型层序边界形成于相对海平面上升期(通常认为陆上不整合面形成于相对海平面下降阶段)。II 型层序模型可细分为陆架边缘体系域(SMST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST), 相对应的整合面(cc)位置放置于海平面下降结束时间点(图2)^[3,5-9,12-15]。理论上, 相对海平面上升期, 在远离沉积滨线坡折带的陆上位置不整合面持续发育, 但在滨岸地带不会有暴露不整合面的产生。

理论上, 绝对海平面变化和构造沉降速率极难区分; 实践中, 不整合面的发育程度极难确定。有鉴于此, Posamentier 等^[6]提出废除 I 型和 II 型层序及其边界, 以便形成单一的沉积层序及其边界。随着 I 型、II 型层序边界术语的弃用, II 型层序模型随之废弃, I 型层序模型演变为 Posamentier 等的层序模型(图2)^[3,5-9,12-15]。

1.3.2 Van Wagoner 层序模型

Van Wagoner 等^[7-8]将层序划分为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)^[7-8], 除在海平面曲线上标定体系域分布区

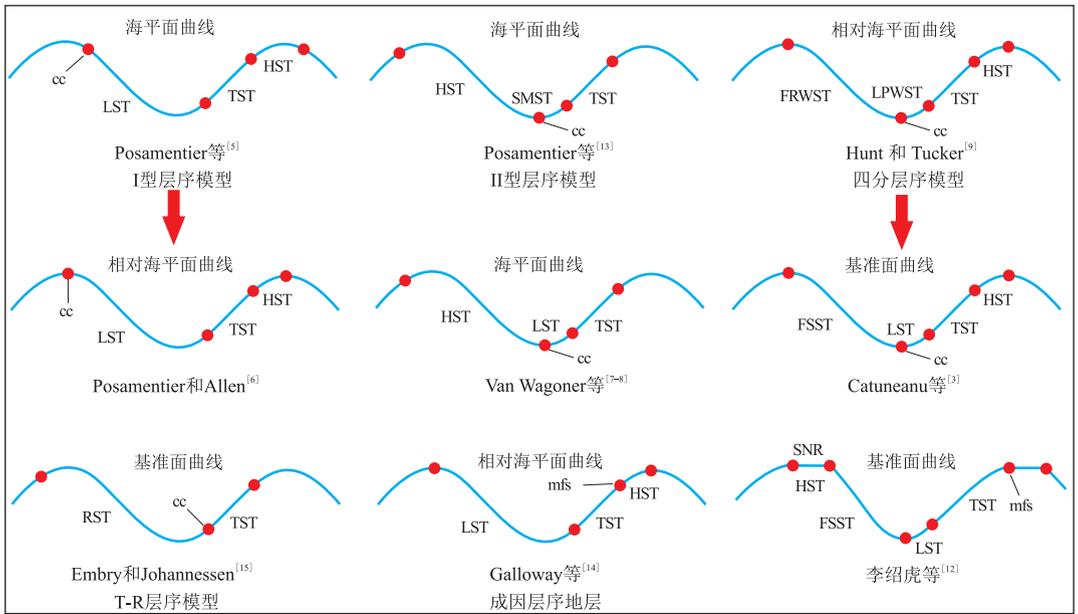


图 2 层序地层模型^[3,5-9,12-15]

LST.低位体系域;TST.海侵体系域;HST.高位体系域;SMST.陆架边缘体系域;FRWST.强迫海退楔体系域;LPWST.低位前积楔体系域;FSST.下降期体系域;RST.海退体系域;cc.相对对应整合面;mfs.最大水泛面;SNR.静止正常海退

Fig.2 Sequence stratigraphic models

间外,将相对对应整合面(cc)放置于海平面下降结束时间点(图2)^[3,5-9,12-15]。此cc之设定方案,被后续的四分层序地层模型所接受^[3,9-10,17]。

1.3.3 四分层序模型

Posamentier等^[5]将相对海平面下降阶段的沉积指定为低位扇沉积(低位体系域早期),然而并没有提供具体的实例和详细的识别标志以区分低位扇沉积^[11]。Plint等^[24]于加拿大阿尔伯塔前陆盆地上白垩统森诺曼阶Dunvegan组发现滨海砂岩直接覆盖在滨外泥岩之上,砂体底界发育Gutter Casts构造,由此将此套相对海平面下降期的沉积产物定义为强迫海退。Hunt等^[9]将经典三分模型中的低位扇称为强迫海退楔体系域(FRWST),将低位楔称为低位前积楔体系域(LPWST),层序边界位于FRWST和LPWST之间。由此层序自下而上为LPWST-TST-HST-FRWST(图2)^[3,5-9,12-15]。此四分方案随后被Helland-Hansen等^[25]证明了其理论上的逻辑性,将层序自下而上分为低位楔体系域(LWST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)、强迫海退楔体系域(FRWST),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面为界的概念^[12]。随后,Hunt等^[10]为避免误解,将FRWST、LPWST分别更改为FRST、LST,由此层序自下而上为LST-TST-HST-FRST。Plint等^[11]将基准面下降期的沉积命名为下降期体系域

(FSST),并对其进行了系统的论述,从而将四分层序模型定格为LST-TST-HST-FSST,成为目前普遍应用的层序术语。尽管出现与下降期体系域(FSST)同义的多个层序术语,但都强调一个类似的问题,而且达到类似的结果^[3,11]。

Hunt等^[9]的研究成果标志着层序地层四分方案的诞生,其具有以下特征:(1)首次将体系域分布与相对海平面曲线相结合,认识到相对海平面(绝对海平面和构造)是控制层序形成的驱动机制;(2)强迫海退楔体系域(FRWST)形成于相对海平面开始下降至下降结束期,其底界面为强迫海退面(BSFR,basal surface of forced regression),顶界面为层序边界;(3)他们的四分模式LPWST-TST-HST-FRWST和LST-TST-HST-FRST演变为后来四分模式的原型^[26]。

Catuneanu等^[3,17]对层序地层学主要模型进行了系统对比研究,采用LST-TST-HST-FSST四分模型,目前已经成为国际层序地层学标准化建议方案的核心概念模型^[12],其模式亦将相对应的整合面cc放置在基准面曲线最低位置(图2)^[3,5-9,12-15]。此四分模型中,将体系域与特定的成因单元、成因事件相联系,如:下降期体系域(FSST)与强迫海退、低位体系域(LST)与低位正常海退、海侵体系域(TST)与海侵、高位体系域(HST)与高位正常海退,为后续标准化工作准备了条件。

以上沉积层序具有如下特征:(1)各层序模型都在具余弦变化特征的海平面曲线、相对海平面曲线和基准面曲线上标定体系域分布区间;(2)不整合面并非单一时间界面,而是持续时间段的物质表现形式,故各层序模型均未能在海平面曲线、相对海平面曲线和基准面曲线上标定具体的不整合面,仅仅设定相对应的整合面(cc)的位置;(3)沉积层序边界均包括陆上不整合面。陆上不整合面形成于基准面下降阶段,对于基准面持续上升情况,沉积供给与可容纳空间的相互作用导致 LST-TST 等重复出现,此时沉积层序理论应用受到局限;(4)沉积层序边界为概念上的时间界面,并不依赖沉积供给速率,避免层序界面沿沉积走向、倾向的穿时性;(5)沉积层序的主要差异在于相对整合面(cc)位置放置的不同,Posamentier 等^[6,27]设定 cc 于基准面初始下降起点,即下降期体系域(FSST)底界面(图 2^[3,5-9,12-15]、图 3^[5,9,13,17]);下降期体系域(FSST)底界面在 seismic 剖面上可明显识别,且界面上下岩性具突变特征,但此模型的低位体系域包含明显的陆上不整合界面(图 3)^[5,9,13,17],有违成因相关的层序定义。Van Wagoner 等^[7-8]、Hunt 等^[9-10]放置 cc 于基准面初始上升点,即下降期体系域(FSST)顶界面(图 2^[3,5-9,12-15]、图 3^[5,9,13,17]);此放置方案避免了层序内部包含不整合面,但基准面初始上升点为理论上的时间界面,岩心、露头处极难区分^[11,28]。

1.3.4 修订的 Exxon 沉积层序模型

Neal 等^[29]和 Abreu 等^[30]依据受控于可容纳

空间与沉积供给相互作用的层序堆叠样式,提出了可容纳空间序列(accommodation succession)的概念,自下而上包括 PA(progradation to aggradation)序列、R(retrogradation)序列和 APD(aggradation to progradation to degradation)序列,对应的体系域(四分体系域)依次为低位体系域、海侵体系域、高位体系域+下降期体系域(AP=高位体系域、D=下降期体系域)。可容纳空间序列具以下特征:(1)A序列、D序列、APD序列等的出现能反映出可容纳空间与沉积供给相互作用的情况,进而预测随后序列的出现;(2)此模型以 APD 序列顶部(下降期体系域顶部)为层序边界,与四分体系域模型相一致;(3)此模型的相关序列是基于地层堆叠样式设定,都被赋予层序格架的基本建造块^[29,31],不同之处在于定义术语的差异。

1.4 成因地层层序模型

基于对 Frazier 等^[32]沉积幕的分析和墨西哥湾古近系地层的研究,Galloway 等^[14]提出以最大海泛(maximum marine flooding)或最大海侵(maximum transgressive flooding),亦即后来演变成的最大水泛面(MFS)作为层序边界的成因地层层序(图 2)^[3,5-9,12-15]。成因地层层序特征如下:(1)最大水泛面(MFS)代表一定的沉积间断(沉积物供给不足时,出现于陆架边缘或斜坡地带);(2)最大水泛面(MFS)标志着海退与海侵的转变,岩性上具明显区别特征,其在全盆范围内较易识别,从而克服了相对整合面的识别困难;(3)基准面持续上升过程中的海侵海退地层(无不整合面出现),最大

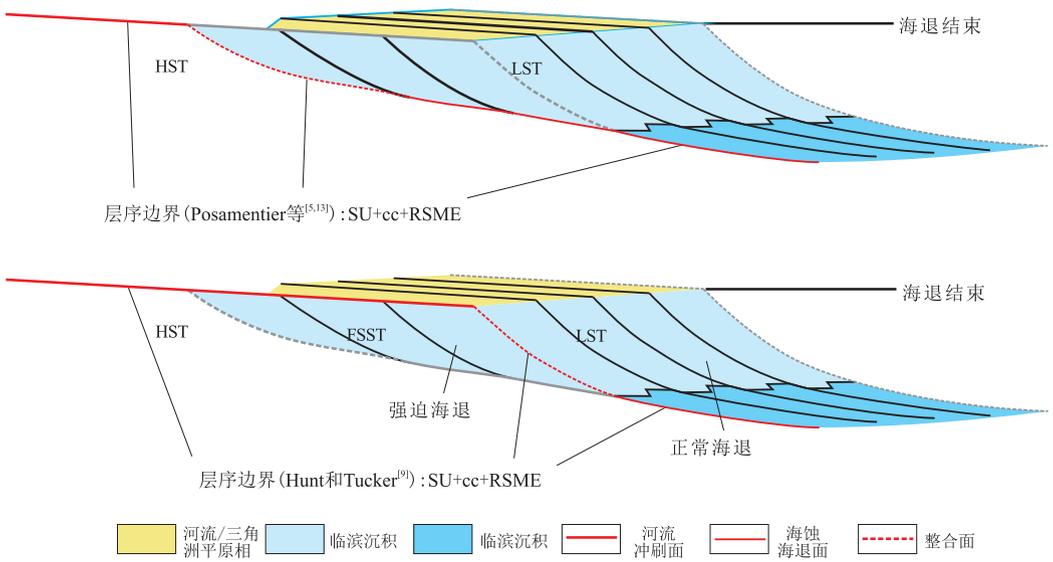


图 3 2 种不同沉积层序边界^[5,9,13,17]

SU.陆上不整合;LST.低位体系域;FSST.下降期体系域;HST.高位体系域;cc.相对整合面;RSME.海蚀海退面

Fig.3 Sequence boundaries of two different sequence models

水泛面是构建层序格架的理想界面;(4) 沉积地层形成过程对应于基准面变化的一个全周期时,成因地层层序的层序单元内部包含不整合面界面,显然有违经典的层序定义;(5) 最大水泛面(MFS)受控于基准面与沉积的共同作用,沿沉积走向和倾向具有一定穿时性^[6]。

1.5 T-R 层序模型

基于对加拿大 Sverdrup 裂谷盆地中生界的实地调查和研究,Embry 等^[15,33]提出了以陆上不整合面或不整合的滨线冲刷面及其最大海退面为边界限定的 T-R 层序模型。此层序以最大海退面(MRS, maximum regressive surface)和最大水泛面(MFS, maximum flooding surface)将层序分为海退体系域(RST)和海侵体系域(TST)(图2)^[3,5-9,12-15]。T-R 层序具以下特征:(1)陆上不整合、最大海退面(海退与海侵的转变)易在地震、露头及岩心上识别,从而克服相对整合面的识别困难;(2)基准面下降结束期,陆上不整合面达到向盆心的最大延伸^[23,29],基准面上升至海退结束时形成的最大海退面(MRS)明显晚于陆上不整合面(时间间隔为强迫海退结束到海退结束持续时间),因此 T-R 复合层序边界为不同时间面的连接。Embry 等^[15]也认为陆上不整合向盆内的延伸面也许与盆内最大水退面无法相连;(3)最大海退面、最大水泛面受基准面变化和沉积速率的双重作用,沿沉积走向、倾向具有一定的穿时性;(4)海退体系域(RST)笼统将高位正常海退、强迫海退和低位正常海退归为一体,降低层序格架下沉积矿产的预测精确度。

2 层序地层学的标准化

层序地层学作为盆地分析的一项常规技术方法,在地层格架对比、古地理重建、沉积矿产预测等方面得以广泛推广和应用。尽管如此,现行层序地层学派的持续争议、层序术语的繁多和混乱,给层序地层学发展及学术交流造成诸多不便,故 Catuneanu 等^[4]倡导独立于模型和依赖于模型两方面相结合的层序地层学标准化与工作流程,为沉积盆地层序格架的研究提供了一种更加灵活的方法。

层序地层的标准化,其实质是提供一种基本的、灵活的、能广泛应用于大多数或所有盆地的思路或方法。这种思路或方法可概况为 2 大部分:独立于模型方面(model-independent approach)和依赖于模型方面(model-dependent approach)(图4)。

2.1 独立于模型方面

独立于模型方法关键在于成因类型(genetic

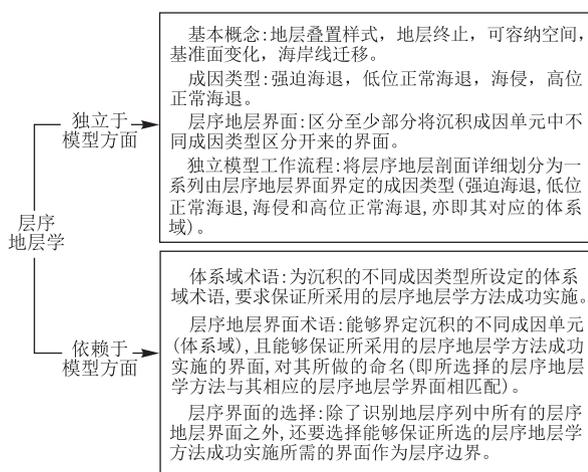


图 4 层序地层学独立模型和依赖模型方法

Fig.4 Model-independent and model-dependent approaches of sequence stratigraphy

types of deposit)及其界面的识别。成因类型是层序格架构建的基本建造块^[31],依据地层堆叠样式、相迁移与分析以及岸线轨迹迁移的研究进行识别。成因类型可分为强迫海退、低位正常海退、海侵和高位正常海退 4 类,其分别对应于下降期体系域(FSST)、低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)(图5^[4]、图6^[6,9])。每种成因类型与特定地层堆叠样式相对应。(1)下降期体系域形成于强迫海退期,表现为前积、阶梯下降的地层堆叠样式,整个基准面下降期由基准面下降驱动,而不受沉积物供给控制;(2)低位体系域形成于低位正常海退期,表现为前期前积、后期加积的地层堆叠样式,受沉积物供给驱动,沉积速率高于可容纳空间增长速率,岸线基线朝海推进;(3)海侵体系域形成于海侵期,为退积的地层叠置样式,由基准面上升驱动,沉积速率低于可容纳空间增长速率,岸线基线朝陆侵入;(4)高位体系域形成于高位正常海退期,显示前期加积、后期前积的地层堆叠样式,受沉积供给驱动,沉积速率高于可容纳空间增长速率,岸线基线朝海推进。

2.2 依赖于模型方面

基于对沉积地层成因类型的识别,可选择合适的层序界面和层序模型进行层序格架的构建。地质记录的不完整性和复杂性造成层序模式的多样化^[34-35],而根据已识别的成因类型选择最佳模型,是一种更加灵活和实用的方法。由此认为,Catuneanu 等^[4]推荐的层序地层学标准化方案,就是独立于模型与依赖于模型 2 个方面和方法的结合,在成因单元格架的基础上,识别单元界面、选择层序边界。体系域和层序边界属于与模型有关的范畴,

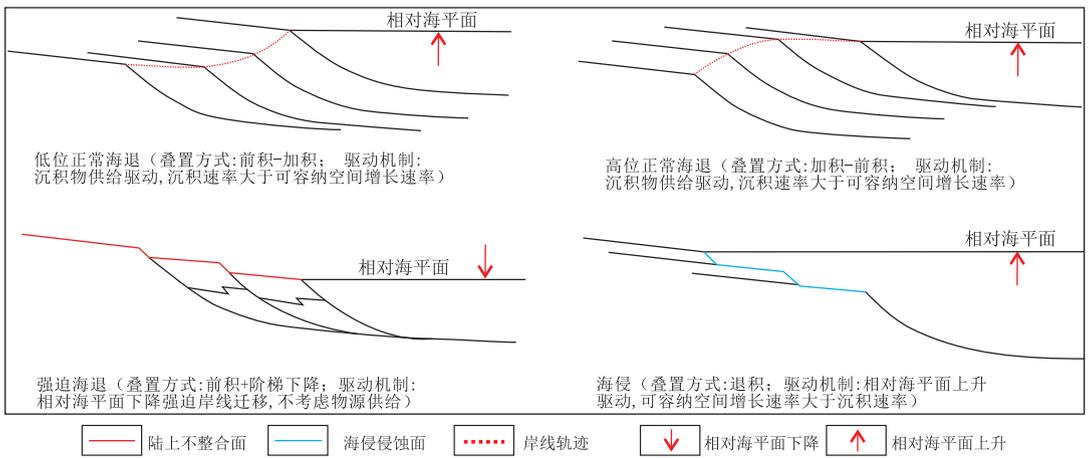


图5 层序地层之成因类型叠置样式^[4]

Fig.5 Stratigraphic stacking patterns of genetic types of sequence stratigraphy

事件	基准面	层序界面	成因类型	成因机制
高位正常海退	最大水泛面	cc	高位正常海退沉积(HST)	沉积过剩供给驱动
海侵	最大海退面		海侵沉积(TST)	基准面上升驱动
低位正常海退	最大海退面	cc*	低位正常海退沉积(LST)	沉积过剩供给驱动
强迫海退		cc	强迫海退沉积(FSST)	基准面下降驱动
相对应的整合面cc(Posamentier 和 Allen ^[6]); 相对应的整合面cc* (Hunt 和 Tucker ^[9])				

图6 与主要事件、成因类型相关的层序界面的时间属性

Fig.6 Timing of sequence stratigraphic surfaces relative to main events and genetic types of deposit

遵从格架→界面→层序边界之流程,模型由使用者自行选择。

3 结论

(1)不同层序模型均为不同地质背景下地层记录的理论提炼,具有各自的优点与不足,适用于不同的地质背景。模型构成(体系域)的出现或缺失,受控于可容纳空间与物源供给的相互作用,具体与地质背景的差异(构造、海平面、物源、气候等)有关。

(2)层序地层的标准化就是独立于模型与依赖于模型2个方面和方法的结合,标准化的关键在于层序地层格架基石或建造块(成因类型)的识别。

参考文献:

[1] Miall A D. Whither stratigraphy? [J]. Sedimentary Geology, 1995, 100(1/4): 5-20.

[2] Holz M, Kalkreuth W, Banerjee I. Sequence stratigraphy of paralic coal-bearing strata: an overview [J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 48(3/4): 147-179.

[3] Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts,

merits, and pitfalls [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35(1): 1-43.

[4] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1-33.

[5] Posamentier H W, Jerzy M J, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I - Conceptual framework [M] // Wilgus C K, Ross C A, Posamentier H W. Sea-level changes: An integrated approach. [S. l.]: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1988, 42: 109-124.

[6] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: Concepts and applications [M] // Concepts in Sedimentology and Paleontology, Vol. 7. [S. l.]: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1999: 210.

[7] Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of sequence stratigraphy and key definitions [M] // Wilgus C K, Ross C A, Posamentier H W. Sea level changes: An integrated approach. [S. l.]: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1988, 42: 39-45.

[8] 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 [M] // Methods in exploration series, Vol. 7. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990: 55.

[9] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level fall [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 1-9.

[10] 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(1/2): 147-160.

[11] Plint A G, Nummedal D. The falling stage systems tract: Recognition and importance in sequence stratigraphic analysis [M] // Hunt D, Gawthorpe G W. Sedimentary response to forced regression, special publication, Vol. 172. London: Geological Society of London, 2000: 1-17.

[12] 李绍虎, 贾丽春. 层序地层学四分模型的非常周期性与层序边界调整 [J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 105-117.

- Li Shaohu, Jia Lichun. Adjustment to non-periodicity and sequence boundary in four-divided model of sequence stratigraphy [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 105-117.
- [13] Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II - Sequence and systems tract models [M] // Wilgus C K, Ross C A, Posamentier H W. Sea-level changes: An integrated approach. [S.l.]: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1988, 42: 125-154.
- [14] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis. I: Architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(2): 125-142.
- [15] 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 [M] // Vorren T O, Bergsager E, Dahl-Stamnes Ø A, et al. Arctic geology and petroleum potential. [S.l.]: NPF Special Publication, 1992: 121-146.
- [16] 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.
- [17] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 375.
- [18] Sloss L L, Krumbein W C, Dapples E C. Integrated facies analysis [M] // Longwell-Chairman C. Sedimentary facies in geologic history, memoir, Vol. 39. [S.l.]: Geological Society of America, 1949: 91-124.
- [19] Krumbein W C, Sloss L L. Stratigraphy and sedimentation [M]. San Francisco: W.M. Freeman and Co., 1951: 495.
- [20] Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1963, 74(2): 93-114.
- [21] Mitchum Jr., R M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part II: Glossary of terms used in seismic stratigraphy [M] // Payton C E. Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration, memoir, Vol. 26. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 205-212.
- [22] Vail P R, Hardenbol J, Todd R G. Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy [M] // Schlee J S. Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation, memoir, Vol. 36. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984: 129-144.
- [23] Embry A F, Johannessen E, Owen D, et al. Sequence stratigraphy as a "concrete" stratigraphic discipline [R]. Report of the ISSC Task Group on Sequence Stratigraphy, 2007: 1-104.
- [24] 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? [M] // Macdonald D I M. Sedimentation, tectonics, and eustasy. [S.l.]: International Association of Sedimentologists, 1991, 12: 409-428.
- [25] Helland-Hansen W, Gjølberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: A different perspective [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92(1/2): 31-52.
- [26] 李绍虎. 浅议层序边界 [J]. *地质前缘*, 2012, 19(1): 20-31.
Li Shaohu. About sequence boundary [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 20-31.
- [27] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [28] Embry A F. Sequence boundaries and sequence hierarchies: Problems and proposals [M] // Steel R J, Felt V L, Johannessen E P, et al. Sequence stratigraphy on the northwest European margin. [S.l.]: Norwegian Petroleum Society (NPF), 1995: 1-11.
- [29] Neal J, Abreu V. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method [J]. *Geology*, 2009, 37(9): 779-782.
- [30] Abreu V, Neal J E, Bohacs K M, et al. Sequence stratigraphy of siliciclastic systems - The ExxonMobil methodology [M] // Concepts in sedimentology and paleontology. [S.l.]: SEPM, 2010, 9: 226.
- [31] Catuneanu O, Martins-Neto M A, Eriksson P G. Sequence stratigraphic framework and application to the Precambrian [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 33(1): 26-33.
- [32] Frazier D E. Depositional episodes: Their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin [G] // Bureau of Economic Geological Circular 74-1. Austin: University of Texas, 1974: 1-28.
- [33] Embry A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1993, 30(2): 301-320.
- [34] 梅冥相. 从地层记录的特征论岩石地层学的困惑 [J]. *地层学杂志*, 1996, 20(3): 207-212.
Mei Mingxiang. Discussion on the perplexity in lithostratigraphy in terms of the particularity of stratigraphical records [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1996, 20(3): 207-212.
- [35] 梅冥相, 马永生. 从旋回层序的特征论地层记录的两种相变面及两种穿时性 [J]. *地层学杂志*, 2001, 25(2): 150-153.
Mei Mingxiang, Ma Yongsheng. On two kinds of facies-change surface and two kinds of diachronism in stratigraphical records according to the natures of cyclic-sequences [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, 25(2): 150-153.

(编辑 韩 斌)