

## 论沉积盆地分析领域的追踪与创新

李思田

(中国地质大学)

**提要** 层序地层学的产生为研究盆地充填提供了较完整的理论与方法体系。层序地层分析与当代沉积体系分析、构造-地层分析和高分辨事件地层分析的密切结合将形成新的综合的成因地层分析系统。

**关键词** 盆地分析 层序地层学 构造-地层分析 高分辨事件地层分析 沉积体系分析

**第一作者简介** 李思田 57 岁 教授 沉积盆地分析、煤田地质学

沉积盆地分析做为当代地质学的热点已汇聚了许多学科的最新进展,沉积作用与构造过程的紧密结合,盆地自身研究和深部过程地球动力学背景的紧密结合都使得这一领域超出了纯沉积学的范畴。鉴于沉积充填是盆地的实体,沉积学研究始终是盆地分析的主要支柱,在《沉积学报》创刊 10 周年之际仅就此领域沉积学研究方面的新发展趋向、我国的优势和发展战略提出浅见。

**层序地层学**是继 60-70 年代沉积环境和相模式研究高潮之后,在当代沉积学发展中最具有全面性影响的学科。它为盆地的沉积充填研究提供了较前阶段更为完善的一整套理论和方法体系。任何新科学产生都有其继承性的一面,以不整合为边界的层序概念由 Sloss 于 40 年代提出,并曾定义为一个构造旋回的岩石记录,因此其含意同“构造层”,在层序地层学的术语中对此种高级别的层序地层单元称之为大层序和超层序。高分辨反射地震技术在盆地分析中的应用以及随之出现的地震地层学对于当代层序地层学的产生起了关键作用,(Vail 等,1977),并在地震地层学中首先借用并发展 Sloss 的层序概念。在北美大陆边缘盆地进行的海平面变化研究,特别是其全球可对比性的发现以及海平面升降对层序和沉积体系的突出部分。以 Vail、Mitchum、Wagoner 等一大批北美学者为代表将地震地层学的研究与露头、岩心和测井曲线研究相结合,从而较严格地提出和厘定了层序地层学的概念体系(Van Wagoner et. al,1990)。层序地层学的出现对地层学、沉积学、煤和石油天然气地质学以及大地构造学等许多领域带来深刻影响,并被看作具有变革意义的地质学生长点,其主要原因在于:

1. 将相和沉积体系放在一个等时地层格架中进行研究,从而具有整体性并易于阐明分布的规律性;等时地层格架的建立基于对各种不整合界面、海泛界面等的对比和追索,在高分辨反射地震剖面上对这些界面易于连续追踪在露头及钻孔中亦可以对比。

2. 层序地层序列是一种等时的成因地层序列,按此种划分可对沉积盆地充填进行更合理的解析。高级别的层序地层单元如大层序(Mega-sequence)和超层序主要起因于大地构造运动(在 Hag 等的术语体系中将前者作为 I 级、后者作为 II 级单元),因此 Galloway 建议用“构造层序”一词。根据大区域性不整合界面对盆地充填序列做了这种划分的基础上进一步划分层序、小层序

组和小层序<sup>①</sup>。在每个层序内部包括了不同类型的沉积体系域, 小层序则是体系域的基本单元。北美学者在被动大陆架边缘盆地中识别和划分了低位体系域, 海侵体系域和高位体系域等, 其划分精度相当于小层序组。

3. 当应用古生物学、同位素等方法确定了层序地层单元及主要界面的年龄之后, 层序地层序列就兼具年代地层和成因地层意义。而且在界面选择上优于传统的地层学方法。

4. 由于若干海平面变化事件具有全球性, 因此层序地层序列有可能进行全球性比较。此外, 大的区域性构造界面的形成与板块运动引起的构造格局改组有关, 当此种关系被单明之后, 也具有很大范围的对比意义。事实上在我国, 以中生代为例, 发生于特提斯和环太平洋带的重大的板块相互作用事件已被证明皆具有远程效应, 并在地层序列中以不整合及其它构造变格形式表现出来。层序地层分析将导致对地层记录中的古构造运动界面及其与板块构造背景关系的再认识。

5. 在盆地分析中等时地层格架的建立和成因段—层序地层序列的划分是编图的基础, 通过剖面与平面图的编制可以重建沉积体系和体系域在层序内部的分布规律, 并已建立了被动大陆边缘盆地的层序地层模式, 其它类型盆地也可能依此原理阐明各自的特征。很明显, 在含油气盆地中将成为预测生、储、盖层分布的理论基础。在煤盆地中则能有效地进行煤层和煤质原生分带性的预测。

在我国, 层序地层学已受到广泛注意, 南海北部大陆边缘盆地如珠江口、琼东南和莺歌海具有许多与北美被动大陆边缘盆地相似的有利条件和优势, 目前在海洋石油总公司系统正进行着卓有成效的大规模研究。我国盆地类型多种多样, 在含油气和含煤盆地中内陆盆地占重要比例; 此外, 以较稳定地块为基底, 内陆表海沉积广泛并向大陆边缘连续过渡的盆地也占有广大面积如华北和扬子地台区的古生界。在这些不同类型的盆地中均具备开展层序地层分析的条件, 但由于地质背景不同需立足区域特色, 建立不同类型盆地的层序地层模式。

层序地层学提出的初期, 由于突出强调了全球性海平面变化的影响, 因而曾引起不同意见的激烈争论, 焦点在于如何估量区域构造的影响, 这方面自 13 届国际沉积大会以来已有重要变化, 层序地层分析与构造—地层分析的结合已有明显加强 (Vail 等, 1990)。

**动力地层分析**或称**构造地层分析**是近年来盆地分析领域的又一重要趋向。长久以来地质工作者始终把沉积作用与构造作用的关系作为盆地分析的核心问题。如 70 年代 Reading 等在斜滑盆地沉积作用研究中阐明了构造体制由张扭向压扭转化过程中在盆地充填序列中的表现; 应用冲积扇和扇三角洲体和侧向迁移证实盆地边界的同生走滑运动等 (Steel, 1988)。

近年来新的进展以前陆盆地领域最为突出, 继裂谷盆地的研究高潮之后, 前陆盆地研究在盆地分析中占显著地位, 而构造—地层分析则为前陆盆地研究中的一项关键内容。盆地边缘周期性的逆冲和推覆事件, 在盆地中造成了幕式沉积作用, 活动期与相对静止期交替, 不仅在剖面上表现了碎屑沉积楔的周期性出现, 而且发生沉积体系配置和古流体系上的根本改组。(Tankard 1986, Beck et. al, 1988)。

我国在断陷和裂谷领域的构造—地层分析进行了卓有成效的研究, 并成功地用于煤、油气源岩和储层预测。前陆式交换序列的构造—地层分析亦正在广泛开展。在新一轮的动力地层研究中精确地确定构造作用与沉积响应的精确对比地质年龄取得了明显进展。

层序地层分析与构造—地层分析的结合将成为盆地分析中的明显趋向, 在层序地层序列建立

<sup>①</sup> 将 parasequence 译“小层序”较之译“准层序”更能反映其原本含意, 因为一个层序要包括十几个或几十个 Parasequence

的基础上进一步研究构造因素与各级界面和层序地层单元的关系, 将更科学地解释盆地演化史和更有效地进行能源资源预测。事实上在某些类型的盆地中如前陆和断陷盆地中构造因素对沉积作用的影响往往比海平面变化的影响更为明显。

**高分辨事件地层学**为精确的地层对比提供了过去难以想象的精度。在许多陆内盆地中反射地震的分辨能力远远不及大陆边缘盆地, 除了少数大的反射界面外, 许多重要界面难于连续追索。但在借助于钻井和非连续露头时往往又难于保证对比的等时性。因此层序地层分析还需要与其它各种有利的对比手段相结合。活动大陆边缘的浊积岩系可能是最难以划分和对比等时段的岩系, 但日本学者对于四万十带第三纪的浊积岩系成功地详细划分和填图, 其原因是数十层火山灰、火山渣标志层的发现和应用, 并由此使海底扇的三维研究成为现实(新妻信明 1986, Tokuhashi 1989)。美国在西部白垩纪盆地中的高分辨事件地层研究特别是 1300 层火山灰层的发现充分表明此种方法可以做为精确划分盆地充填的强有力工具(Kauffman, 1988)。事件标志层尽管不一定能做为层序地层单元的界面, 但可精确对比和确定等时地层单元。目前在层序地层分析中有的学者已经应用米兰科维奇周期解释延展性广泛的周期性小层序的形成。轨道周期性变化引起了全球性气候变化, 进而导致大陆冰盖面积的变化, 从而引起海平面的升降(Vail, 1990), 这样层序地层学与事件地层学的研究从成因上结合在一起。

我国多年来在南方二叠纪含煤岩系中有成效地使用了“高岭石泥岩灰研”(火山灰转化物)进行煤系煤层对比, 地质矿产部在云贵川三省煤聚积规律研究中系统应用了此类事件标志层成功进行了跨省对比。但总体上来说我国在开展高分辨事件地层学研究上除在第四纪黄土等少数领域外, 工作的系统性和精度还存在着相当大的差距。

**沉积体系分析**由 Brown 和 Fisher 提出的沉积体系和体系域的概念和研究方法在盆地分析中有深刻影响。沉积体系域的重建已成为高精度沉积盆地古地理编图的基础(Brown & Fisher 1977)。其概念和方法体系强调沉积体三维形态与共生关系研究, 沉积体系是相的三维组合, 而体系域则是成因上相关的周期沉积体系配置。沉积体系和沉积体系域都是充填盆地的建造块。由于此种研究要求三维追索, 因而其难度与工作量上比以垂向层序为主的方法大得多, 但在沉积盆地分析中对研究生、储、盖层分布的规律, 对煤和沉积矿产分布更具实用性。在层序地层学的概念体系和工作步骤中充分汲取和发展了体系域的研究, 事实上体系域的重建必须以等时地层格架为基础, 而沉积体系和沉积体系域又是构成层序地层单元的内涵。

70 和 80 年代环境分析和相模式研究在我国已广泛普及, 但在工作方法上是以垂向层序研究为主。在国际上粗模式之后有两个主要趋势, 一是以英国沉积学家为主的, 更多地强调过程分析, 以避免简单化的模式带来的束缚; 另一方面是以北美沉积学家为代表的强调对沉积体进行内部和外部的三维研究, 即沉积环境与几何形态的统一。我国近年来的研究工作也体现了此种动向, 但按沉积体系与体系域要求的精度仅有少部分成果能够达到, 因此重建盆地中的各种沉积体系并对其内部构成解析在我国还有大量的工作要做。利用我国一些地区极为良好的出露条件, 对各种典型沉积体系进行三维研究仍然是一项有重要意义的课题, 对在我国研究程度较薄弱的体系如风成沉积体系、海底扇、扇三角洲和辫状三角洲以及障壁-泻湖体系等尤需选择良好典型深入研究。

**砂体内部构成研究和储层沉积学**在含油气盆地沉积学研究中日益占有重要位置, 1990 年在英国召开的第 13 届国际沉积学大会上储层沉积学与层序地层学同为最引人注目的焦点。Miall 提出河流砂体构成单元概念及内部等级界面划分的初期其重要性尚未被充分认识, 或被认为过于繁琐。由于在油田开发中发现砂体内部的非均质性使大量的可动油滞留于砂体内部未被采出, 这

一有重大经验意义的问题强有力地推动了这一领域的发展,并要求对砂体内部不同级别的构成单元、各级界面和薄夹层类型做精细的划分,以研究孔隙度和渗透性在砂体内部的分布和变化规律。目前除了领先研究的河流砂体外,对潮汐砂体、海底扇水道砂体等也都开展了此类研究(Miall 1987),并提出了碎屑沉积构成单元研究级别(hierarchies of architectural units)的划分方案。目前尽管对构成单元的涵义和分级的认识多种多样,但明显的趋势是随着对盆地充填的研究日益精细,各级构成单元的划分也列入了建造块的等级序列。building block这一术语既包括了层序地层单元又包括了更低级别的成分,从而将盆地充填做了分级解析。目前中国石油天然气总公司正开展规模庞大的油气储层重点攻关项目,其中将砂体内部构成和非均质性研究列为重点,并重视和资助了露头砂体的三维研究以便为建立储层非均质性预测模型提供基础。

**盆地充填过程的计算机模拟**发展迅速。盆地模拟技术使盆地演化的动态分析成为可能。早期的一维模拟侧重于盆地沉降史、热历史和生烃条件研究,但对沉积充填过程则由于其高难度和影响因素复杂而未有明显进展。近期可喜的新进展是伴随层序学出现的。由于层序地层分析提供了完整的、较为严格的地质-成因模型,因而实现了大型沉积断面上的层序地层格架的二维模拟(Lawrence et al 1990),此种技术对生、储、盖层分布的预测,检验和校正盆地充填序列的成因解释提供了新的途径。

以上仅涉及了盆地分析中沉积学研究的若干主要方面,很明显这几个领域的研究思路 and 手段虽有区别,但有密切的内在联系。其中,层序地层学处于中心地位并可带动全局。层序地层学的发展必将与高分辨事件地层分析、构造-地层分析、沉积体系分析紧密结合形成一套新的、综合性的成因地层分析方法。这在我国 90 年代沉积学和地层学研究中应占重要地位。在此学术高潮中我们的着眼点不仅是追踪世界前沿,而需要力争在有限目标上创新。

我国具有发展上述领域的优势:如丰富多彩的地质条件,难得的产状平缓可进行大面积连续追索的露头区,特别是我国的“中带”即华北地台西部和扬子地台区,古生代海相、海陆交替相发育,自陆内可追索到相邻的古大陆边缘,中生代大型内陆盆地发育并有难得精采露头。在沉积盆地内部已积累了数以十万公里计的反射地震剖面,近年来单用于勘探石油、天然气和煤的年钻探进尺量逾 300 万米,在几个重要的大型盆地中多年来积累的钻井资料都逾万口井,这些都提供了从浅部到深部进行三维研究的条件。我国有庞大的训练有素的从事地层、沉积和其它相关学科的研究队伍,产业部门、院校与科研部门结合组成多学科国家项目梯队又是我国的优势条件。为了在新的研究领域中更有成效的解决下列问题是作者衷心建议的:

1. 当代层序地层学的出现对沉积盆地研究、对整个地层学和沉积学领域都可能带来重大变革并具有里程碑意义,加速发展以层序地层学为主的,并与沉积体系分析、构造-地层分析和高分辨事件地层分析等相关学科密切结合的综合成因地层分析应在我国新一轮科研规划中占有突出地位,并分别在基础研究、应用基础研究和应用研究中通过重点与一批面上的项目给以保证。

2. 对前述领域的追踪和力争创新需从扎实的基础工作做起,其中包括技术方法的更新。在新的学术思潮中用旧的内核和工作习惯配以新的名词术语无助于此项目工作的开展。事实上上述各项领域的每个成功典型如北美被动边缘盆地的层序地层学和美国西部白垩纪的事件地层分析均是坚持多年工作并在思路方法上有重大创新的结果。与层序地层学发展密切相关的北美新生代和中生代海平面变化研究达到了前所未有的精度(达到了以 0.1Ma 为计的等级)是基于多年来沉积学、微体古生物学、高分辨地震地层学、同位素地层学和磁地层学综合研究的结果(Hag 等, 1988)。晚古生代海平面变化研究准确定年的工作虽更为困难,但也取得了很大进展(Ross 等, 1988)。这都是值得借鉴的经验。在建立不同类型沉积盆地等时地层格架和层序地层单元序列时

都要求对各种界面和各级层序做长距离对比和追索,并力求精确确定年龄,这样需要编制跨盆地的高精度沉积大断面,甚至跨构造单元大断面(如从陆内到陆缘)。在此基础上沉积体系域的重建需要进行三维控制和追索,并按小层序组成小层序进行,凡此均需极为扎实而系统的工作。

3.选择条件最有利的地区率先取得突破。例如南海北部大陆边缘盆地和东海盆地的层序地层学研究可能建立起西太平洋边缘第三纪海平面变化年表和层序地层序列的权威性成果,华北和扬子地台及其邻近造山带有条件对古生代层序地层序列进行从陆内到大陆边缘带的连续追索;内陆盆地在占我国含油气盆地的多数,其层序地层和构造-地层学的结合研究将会产生有特色的成果。

4.对于国际前沿领域进行追踪性研究的同时,更重要的在于争取做到创新,而立足于中国地质特色、借鉴的同时不受任何国外现有模式的拘束则是能否创新的前提。层序地层学领域中已发表的地层模式也象地质学中的其它模式一样源于典型地区的总结,形成机制的解释则更在争论当中。除了地区条件的局限性之外,模式总是由人概括而来,往往与千变万化的自然现象有很大距离。正因此相模式热之后,代之以更多的“过程分析”。纵观地质学史上任何更合理模式的产生都是对旧模式的冲破。

以上是对沉积学界当前新的学术思潮讨论的一点浅见,敬希指正。

### 参 考 文 献

- (1) 新妻信明, 1986, 东北日本孤四地质构造发达, 本朝彦、中村一明编日本列岛之形成, 253-265页。
- (2) Beck R. A. et al. 1988, Geological Society of America Memoir 171, p. 456-487.
- (3) Brown L.F., and W. L. Fisher, 1977, AAPG Memoir 26, p.213-248
- (4) Haq B. U. et al., 1988, Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change, in: Sea Level Changes-An Integrated Approach, SEPM Special Publication No.42
- (5) Kauffman L. G., 1988, Concepts and methods of high-resolution event stratigraphy, Ann. Rev. Earth Planet Sci., 16.
- (6) Lawrence D. T., M.Doyle T. Aigner 1990, AAPG Bulletin, V.74, N.3, p.273-295
- (7) Miall, A. D. 1985, Earth Sci. Rev., 22, p.261-308
- (8) Maill, A. D. 1989, Architectural elements and bounding Surfaces in channelized clastic deposits: notes on comparisons between fluvial and turbidite systems, in: A. Taira and F. Masuda Sedimentary Facies in the Active Plate Margin, 3-15
- (9) Steel R. J., 1988, Coarsening-upward and skewed fan bodies: symptoms of strike-slip and transfer fault movement in sedimentary basins, in: Fan Deltas: Sedimentology and Tectonic Settings, p.75-83
- (10) Tankard A. J., 1986, AAPG Bulletin V.70, N.7, p.853-868
- (11) Tokuhashi, S., 1989, Two stages of submarine fan sedimentation in an ancient forearc basin, central Japan. In: A.Taira and F.Masuda, Sedimentary Facies in the Active Plate Margin, p.439-468
- (12) Vail P. R. et al., 1990, The Stratigraphic Signatures of Tectonics, eustasy and Sedimentation-an Overview Department of Geology and Geophysics, Rice University Houston Texas Version p90-917
- (13) Vail, P. R. et al., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: relative changes of sea level from coastal onlap, in: C. W.Payton (ed), Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, p.63-97
- (14) Van Wagoner J.C. et al, 1990, Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts

## Current Review of Sedimentary Basin Analysis

Li Sitian

(China University of Geosciences, Wuhan)

### Abstract

Sequence stratigraphy, an important and significant development in sedimentology and stratigraphy, has made the sedimentary basin filling analysis both theoretical and methodological. Setting up the chronostratigraphic framework and determining the building blocks have now become the major tasks in basin analysis. This paper describes the rapid development in sequence stratigraphy and its relationship with other subjects such as depositional system analysis, tectono-stratigraphy and event stratigraphy. The inter-relationship among these subjects will become the basis for a new genetic stratigraphy system that contains the sequence stratigraphy. This system will strongly support the research in sedimentary basin analysis. Studies in sandbody architectural units, the basis for sedimentology of oil reservoir is also part of the research in building blocks of basin filling. This paper discussed the construction of sequence stratigraphic models for various basins, especially the intraplate paralic basins and the inland basins, both being the major types in China. The paper also discusses problems in theoretical research in China related to sequence stratigraphy, suggestions are as follows:

1. Based upon the sedimentology, micropaleontology and magnetostratigraphy research of the South China sea basin and East China sea basin, the Cenozoic sea level changes scheme could be constructed firstly, also the generalized schemes of sea level changes of the other periods in mainland could be put forward.

2. There are optimum conditions for the studies of Paleozoic sequence stratigraphy from intracontinent to continent margin of the Yangtze and Sino-Korean cratons.

3. Mesozoic and Cenozoic inland basins cover vast area of China continent. To study sequence stratigraphy in the lacustrine basins is of great significance, and the indirect efficacy of sea level changes to lacustrine basin may be a key problem. Tectonism has great influence on the extensional and flexural basins in the continental area so tectono-stratigraphy analysis has more importance in the basin research.