

# 第 1 章 高频层序地层学的理论基础

## 1.1 高频层序的基本概念和研究现状

### 1. 高频层序的基本概念

高频层序的概念起源于地质学家们对于准层序的研究。准层序最初被定义为“由海泛面所限定的层或层组组成的一个相对整合的序列”。作为准层序界面的海泛面被进一步定义为：一个将老地层与新地层分开的面，穿过该面水深突然增加<sup>[1]</sup>。这一定义主要是基于海岸沉积环境提出的，因此其定义不具有普遍性而造成概念的欠完整。Van Wagoner 和 Mitchum<sup>[2]</sup>随后将类似于准层序的地层单元重新命名为“高频层序”，对于准层序定义的欠完整性起到了一定程度的修正作用。郑荣才等<sup>[3]</sup>、Cross 等<sup>[4]</sup>所提出的短期基准面旋回和超短期基准面旋回，Anderson 和 Goodwin<sup>[5]</sup>提出的“米级旋回”，包括王鸿祯等<sup>[6]</sup>所称的“小层序”都属于高频层序的范畴。综合众多学者的观点，高频层序应是包含基准面上升期和下降期沉积的完整的地层序列，在不同沉积环境，高频层序的结构特征有差异。

### 2. 高频层序级次划分研究现状

Exxon 的经典层序地层学、Cross 的成因层序地层学、Galloway

的成因层序地层学以及 Miall 的储层构型要素分析理论关于高频层序单元的级次划分、高频层序的时限等方面有明显的差异。

经典层序地层理论源于二十世纪八十年代, Peter Vail<sup>[7]</sup>和来自 Exxon 公司的沉积学家继承了 Sloss<sup>[8]</sup>的研究成果, 提出了“层序—体系域—准层序”这样一个完整的概念体系。层序是以不整合面或与之相应的整合面为边界的、一个相对整合的、有内在联系的地层序列。层序内部可以根据初始海泛面和最大海泛面进一步划分为低位体系域、海侵体系域和高位体系域。体系域内部则包含若干个具有相互联系的准层序组或准层序。基于这一理论体系, 众多学者根据海平面持续的时间周期提出了层序划分方案<sup>[9]</sup>。受限于勘探程度、资料分辨率和现有技术手段, 在三级层序内部进行高频层序划分时所能够识别的高频层序级次也不相同, 但大多数划分至准层序组、准层序的级别, 相当于四级和五级层序。根据前人的研究成果, 四级层序时限在 0.08 ~ 0.5 Ma, 五级层序的时限在 0.01 ~ 0.08 Ma。

Cross<sup>[4]</sup>及其成因地层学小组提出了高分辨率层序地层学理论与研究方法, 其理论基础包括四个方面: 地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理与旋回等时对比法则。高分辨率层序地层学并没有根据海平面变化持续的时间来进行旋回级次划分, 而是以不同级次的基准面变化将地层划分为不同的旋回, 依据钻井和测井资料可以识别出来的最高级次的旋回称为短期旋回。Cross 指出完整的短期旋回是具有进积和加积地层序列的成因地层单元。郑荣才等<sup>[3]</sup>根据其多个盆地的高分辨率层序地层学研究成果, 建立了各级次基准面旋回的划分标准, 并且厘定了各级次旋回的时间跨度, 将基准面旋回划分为六个层次: 巨旋回、超长期旋回、长期旋回、中期旋回、短期旋回和超短期旋回。超短期旋回与短期旋回具有相似的沉积动力学形成条件和内部结构。

Galloway<sup>[10]</sup>的成因层序地层学起源于美国沉积学家 Frazier 所提出的沉积幕概念<sup>[11]</sup>。一个沉积幕相当于两次最大洪泛事件所限定的一个沉积复合体，而这一个沉积复合体依次由若干个相序列组成，这些相序列与准层序的规模相当，也属于高频层序的范畴。Galloway 在沉积幕的基础上提出了成因地层层序的模式，一个完整的成因地层层序由三个重要部分组成：退覆部分、上超海侵部分和代表最大洪泛事件的顶底界面。运用 Galloway 的成因层序地层学进行高频层序划分有其自身的优势，尤其是在油田开发阶段的地层对比工作中，在钻井和测井资料上，洪泛面比不整合面、冲刷面等层序界面易于识别，且侧向稳定性良好，十分有助于建立高质量的等时地层格架。

Miall<sup>[12]</sup>1985 年根据多年研究成果提出了储层建筑结构分析法，该方法的基本研究内容包括界面分级、岩相类型和构型要素三个方面。在随后的数年里，Miall 的不断研究使得储层划分方案达到相对完善的八级，具体为：一级界面——交错层系的界面；二级界面——层系组界面；三级界面——大型底型的内部界面，以低角度切割下伏 2~3 个交错层系；四级界面——单一河道的顶、底面；五级界面——河道充填复合体的大型砂体界面；六级界面——限定河道群或古河谷群的界面，相当于段或亚段；七级界面——大的沉积体系 (Major depositional System)、扇域 (Fan tract)、层序 (Sequence) 的界面；八级界面 - 盆地充填复合体 (Basin-fill Complex) 的界面。在建立界面分级系统的基础上，地质工作者可以进一步从三维角度将储层砂体划分为一系列具有特定成因、几何形态及内部非均质性的构成要素。

## 1.2 高频层序形成机制

对地层层序的形成机制有“自旋回”和“异旋回”两种解释。针对这两种机制，国内外学者都投入了大量的研究工作，并取得了一定的成果。

## 1. 自旋回作用机理

有关自旋回 (auto cycle) 的研究最早开始于 1944 年，国外学者 Lewis<sup>[13]</sup>通过水槽实验展示了由单一基准面变化产生多个河流阶地的过程，Schumm 和 Parker<sup>[14]</sup>完善了这一实验，并且提出了关于河流阶地形成过程中的自旋回因素的概念模型。Muto 等<sup>[15-18]</sup>依据大量水槽实验指出自旋回是由自体因素 (autogenic) 产生的地层旋回，而对于地层中的自体因素，这两位作者做出如下解释：自体因素是地层对于稳定的外部驱动力的内在响应。

国内学者对于自旋回的概念也做出了类似的解释。高志勇等<sup>[19]</sup>在探讨洪泛面的形成机理时指出，地层内的自旋回沉积作用可视为基准面上升或下降过程中瞬间稳定地层过程的产物。在基准面上升或下降过程中的某一瞬间，曲流河“凹岸侵蚀、凸岸堆积”的沉积作用所形成的边滩-漫滩序列属于自旋回作用，而当基准面上升或者下降时，才会产生异旋回的河流序列。邓宏文等<sup>[20, 21]</sup>在分析基准面旋回的识别方法时指出，构成河流相的任何一种单一微相与基准面的变化均没有任何直接的联系，只有微相的叠加样式才能反映 A/S 比值的变化，从而提供基准面升降变化的重要信息。

## 2. 异旋回作用机理

异旋回是由异源因素控制而产生的旋回。异源因素是与层序地层直接相关、控制相对大比例尺的盆地充填结构的因素，包括

常见的构造运动、海平面升降、气候变化和物源供给等，其中以气候变化和构造运动为主导。在异旋回机制的驱动下多期单一微相呈现出有规律的叠加样式，因此准层序主要受控于异源因素。目前关于气候变化对高频层序形成与发育的影响的研究成果较为丰富，而有关构造运动的作用机理研究较少。

孙阳等<sup>[22]</sup>对大庆长垣姚家组进行了高频层序分析，认为高频层序与米兰科维奇旋回之间存在着较好的一致性，地球轨道变化所引起的湖平面变化是高频层序形成的主控因素。纪友亮等<sup>[23]</sup>根据录井及岩心等资料，在东濮凹陷沙三段沉积时期，识别出了湖平面变化的 6 级周期，其变化频率约为 1 000 次/Ma。如此频繁的湖平面变化，使得低位砂体分布比较广泛，但厚度较薄，形成东濮凹陷沙三段高位期的暗色泥岩与低位期的砂岩薄互层的特点。王冠民<sup>[24]</sup>通过对济阳拗陷古近系大量岩性资料的测试分析，研究了气候变化对湖相高频泥岩和页岩的沉积控制，认为在一定的古盐度和物源距离等沉积背景下，古气候变化通过控制古湖泊有机质、碳酸盐、黏土之间的沉积比例和湖水的分层性来进一步控制泥岩和页岩的发育和类型。Gibling 等<sup>[25]</sup>研究了印度恒河平原第四系河流露头剖面的高频层序结构特征，指出河流洪泛平原环境下高频层序的加积与退积对古季风气候有非常敏感的反应，进而建立了古季风控制下的洪泛平原高频层序模式。张成等<sup>[26]</sup>利用地质、地球物理等资料对乌尔逊凹陷下白垩统高频层序特征及其控制因素进行了分析，共识别出 16 个高频层序，并且提出在低构造沉降速率和温暖潮湿气候条件下，沉积物供给速率是控制高频层序形成和发育的主要因素。

近年来，在构造背景稳定的海相地层以及陆相拗陷盆地地层中，基于米兰科维奇旋回控制下的高频旋回分析，逐渐成为探讨气候对高频层序控制作用的重要手段<sup>[27-34]</sup>。但任拥军等<sup>[35]</sup>指出陆相断陷盆地为构造盆地，断裂构造理论以及大量地表、地下的

构造、沉积现象都表明，短周期幕式构造沉降对陆相断陷盆地高频层序形成与发育存在不可忽视的控制作用。不同级别高频层序的形成可能响应不同级次的构造运动，构造活动并不是只控制三级层序的形成。在靠近断陷盆地盆缘主控断裂的一侧，构造运动有可能造成物源供给速率和盆地沉积速率的变化，进而出现完全由短周期幕式构造运动控制的高频进积-退积序列。向盆地沉积中心方向，盆缘断裂的控制作用可能会逐渐减弱，而气候因素占主导。解习农等<sup>[36]</sup>也认为，构造运动所带来的盆地沉降过程可能是非线性或间断函数，因此在高频旋回沉积过程中，会发生一系列规模较小的、不同频率的幕式构造沉降。池英柳等<sup>[37]</sup>探讨了幕式构造沉降作用对层序发育的控制作用，并建立了幕式构造旋回控制下的陆相层序地层单元分级方案。

### 1.3 扇三角洲高频层序结构与对比模式

国内学者分别依据经典层序地层学和高分辨率层序地层学理论对扇三角洲高频层序结构特征进行了深入的研究，建立了高频层序单元的分布模式，并在此基础上提出了扇三角洲地层对比模式。

赵俊青等<sup>[38]</sup>以东营凹陷胜北断层沙四上亚段扇三角洲沉积体为例，开展了高精度层序地层学研究，将扇三角洲沉积体系中的高精度层序地层单元划分为准层序组、准层序、层组和层四个级别（表 1.1）。根据 Van Wagoner 关于层组和准层序的定义，将扇三角洲沉积体系中的层组归纳为向上变粗的层组（Cu 型）、向上变细的层组（Fu 型）和向上变细再变粗的层组（Fu-Cu 型）三种类型，将准层序归纳为向上变粗的准层序（Cu 型）、向上变细再变粗的准层序（Fu-Cu 型）和由细变粗、再由粗变细的准层序

(Cu-Cu型)三种类型,并以河道底部冲刷面和洪泛面为对比标志,总结出了扇三角洲沉积体系中准层序的划分对比模式,包括顺物源方向的相序递变对比模式和切物源方向的侵蚀对比模式。针对层组的对比,依据河道形态特异性提出了分流河道发育区的层组对比模式,包括孤立水道对比模式、叠加水道对比模式和不稳定互层水道对比模式等三种对比模式。

表 1.1 扇三角洲沉积体系高精度层序地层单元与沉积地层单元对比 (据文献<sup>[38]</sup>)

| 层序地层 |                  |          |    | 沉积体系             |                  | 可对比性                     |
|------|------------------|----------|----|------------------|------------------|--------------------------|
| 层序单元 | 形成时间/a           | 延伸范围/km  | 级别 | 沉积单元             | 形成时间/a           |                          |
| 准层序组 | $10^3 \sim 10^5$ | 3 ~ 15   | 2  | 浊流体系、扇           | $10^5 \sim 10^6$ | 剖面上可区域追踪,电测曲线可区域对比,地震可识别 |
| 准层序  | $10^2 \sim 10^4$ | 3 ~ 10   | 3  | 扇朵、水下分流河道复合体     | $10^4 \sim 10^6$ | 剖面上可追踪,油田范围可电测对比,三维地震可识别 |
| 层组   | $10 \sim 10^3$   | 50 ~ 300 | 4  | 单个河道充填、席状砂、河口坝组合 | $10^2 \sim 10^3$ | 剖面上可对比,小井距条件下可对比         |
| 层    | $1 \sim 10^2$    | 20 ~ 100 | 5  | 成因砂体             | $10 \sim 10^2$   | 剖面上可对比,井下可识别,对比困难        |

靳松等<sup>[39]</sup>对胡状集油田沙三中亚段扇三角洲相储层进行了高分辨率层序地层研究,依据纵向岩相组合和界面接触关系将研究层段分为若干个短期旋回,包括向上变深的非对称型、向上变浅的非对称型和向上变深复变浅的非对称型三种类型。在顺物源

方向上，依据河道→河口坝→浅湖泥等微相的规律性变化，提出了界面（冲刷面）→岩石→界面（沉积间断面）的对比原则；在物源方向上，依据分流间湾→分流河道→分流间湾等微相的规律性变化提出了湖泛面→冲刷面→湖泛面的对比原则。樊中海等<sup>[40]</sup>考虑到多物源给扇三角洲砂体的精细对比带来巨大难度，因此根据地震、钻井等资料，提出了以五级层序为框架、以点物源为中心的储层精细对比方法。重点指出高频层序格架内，物源供给对层序构成样式的控制作用明显增强。根据扇三角洲砂体的岩性、厚度及其构成样式，可以判断其沉积物来源，在不同物源砂体的叠置区采用不同的对比方法。郭建华<sup>[41]</sup>以辽河西部凹陷为例，指出湖平面的升降旋回是控制断陷湖盆储集岩层分布的主要因素，根据湖平面变化形成的湖进-湖退（T-R）旋回和沉积旋回界面可以进行储层的划分与等时对比。

#### 1.4 扇三角洲高频层序地层学研究存在的问题

通过对前人研究成果的总结、分析，认为扇三角洲环境高频层序单元的划分、层序界面的形成机理以及地层对比模式等方面存在以下有待于深入研究的问题：

##### 1. 高频层序单元的级次划分方案

Miall 的储层划分方案方面与层序地层学三大学派的划分方案之间存在不同程度的不兼容现象，突出体现在：准层序界面、层组界面与 Miall 的四级界面、五级界面等所限定的地层实体不完全一致。

## 2. 高频层序界面形成过程中的异旋回机制与自旋回机制

首先,前人已经通过研究指出在高频旋回沉积过程中可能存在着短周期幕式构造沉降的影响,尤其在陆相断陷盆地主控断裂的一侧,高频沉积旋回的发育可能完全是由短周期幕式构造运动来控制的,但是对于具体的作用机理,目前还没有较为详细的研究成果出现。其次,已有学者注意到单一微相在形成过程中常常表现出与基准面变化不相符的变化趋势,并将其归因于自旋回因素的影响,但是对于自旋回的作用机理尚不清楚,自旋回与异旋回的相互关系也有待进一步研究。

## 3. 扇三角洲地层对比模式

扇三角洲沉积作用类型丰富,层序结构多样。前人提出的地层对比模式过于笼统,尚不能体现扇三角洲多种沉积微相之间的差异性,有待于深入研究扇三角洲不同微相环境下高频层序的内部构成和层序界面的特征。而且,随着油田开发工作的逐步深入,在进行单层划分与对比时自旋回作用的影响极大,现有对比模式也未能将这一影响考虑在内,因此亟待建立自旋回与异旋回共同控制下的地层对比模式。

