

层序地层学的研究进展

侯明才, 陈洪德, 田景春

(成都理工学院沉积地质研究所, 四川 成都 610059)

【摘要】“层序地层学”作为当今地质学界研究的热点问题之一, 备受国内外地质学界的关注。笔者在综合国内外大量研究成果的基础上, 本文回顾了层序地层学的起源和基本思想, 总结了层序地层学在陆相、海相、盆地分析、层序充填动力学、岩相古地理编图、层序界面分类、浅水台地与深水陆棚对相对海平面变化的层序响应等方面的研究进展, 展望了未来层序地层学的美好前景。

【关键词】 层序地层学; 层序充填动力学; 盆地分析; 台地; 深水陆棚; 沉积响应; 进展

中图分类号: TE121.3⁺.4 文献标识码 A

文章编号: 1001-6872(2001)03-0128-07

1 层序地层学的沿革及基本思想

层序地层学是上个世纪 70 年代末由美国 Rice 大学 Vail P R 及其在 Exxon 公司卡特研究中心的同行 Mitchum R M 和 Sargree J B 等在地震地层学基础上创立起来的一门新的地层学分支科学^[1]。Vail 提出的层序地层学认为: 层序发育的主要控制因素是全球海平面升降, 并提出它是研究一套由侵蚀面或无沉积面、或与之相当的不整合面所限定的、重复出现并有成因联系的、限制在一定年代地层格架内的岩石关系, 从而体现了成因地层学本质。并且

Vail 等提出层序是层序地层学研究的基本单元, 并定义: 层序是一个成因上相关、内部相对整合连续的地层单元, 其顶、底被不整合面或与之相对应的整合面所限定。由于层序界面的等时性和层序内沉积的连续性, 使层序体现了年代地层和岩石地层的双重属性。

由于该理论在学术上的先进性和实践上的巨大实用价值, 它已被广大地质工作者所认可, 且以蓬勃之势发展起来, 广泛应用于石油勘探和盆地分析之中, 取得了巨大的经济效益。1988 年 9 月全球沉积地质委员会(GSGC) 在法国迪涅召开会议、决定将“层序地层学和全球海平面变化”正式纳入全球沉积

地质计划(GSGP),使“层序地层学”面向世界,因此有人把层序地层学的发展称为现代地质科学的一场革命(Robert J Weimer, 1992)^[1]。

层序地层学自1988年真正面世至今的二十多年来,在海相和陆相地层的研究及层序发育的控制因素等方面皆取得了举世瞩目的成就,主要表现在研究领域的拓宽、研究深度的加深,同时也派生了一些新的学派和边缘学科。

2 陆相层序地层学—层序地层发展的新方向

由于我国主要的油气都产于陆相盆地中,故在层序地层理论引入我国之后,国内的油气地质专家和沉积学专家们在将层序地层学基本思想应用于陆相盆地的实践中,大大发展了陆相层序地层学,致使我国陆相层序地层学研究处于国际领先地位。赵国连(2000)将陆相层序研究分为三个学派^[2]:

2.1 类海派

该派认为,湖泊与海洋类似,湖平面变化是整个湖盆层序发育的主要控制因素,它不仅对控制着自身的沉积发育,也控制着毗邻的河流及风成沉积,故可把海相层序地层学的模式灵活地应用于陆相沉积盆地。

2.2 陆相派

该学派以李思田和解习农等人为代表。他们认为陆相层序的充填风格、沉积体系都有其自身的特点,其层序的控制因素不同于海相层序,构造作用在其层序发育过程中扮演着十分重要的角色。

李思田(1992)提出了完全不同于国外海相层序地层学模式的陆相层序地层学。他把相和沉积体系放到盆地整体地层格架内,按等时界面划分,识别并对比层序界面,划分层序,提出了盆地充填系列和构造层序。盆地充填系列指盆地充填的整体,在大型叠合盆地条件下,包括了不同原型盆地沉积充填的总积;构造层序指界于Ⅰ级古构造界面(大区域性的不整合面及假整合)之间的沉积序列,与Hubbard的大层序(Megasequence)大致相当,其内部常有次级的古构造面,伴有侵蚀和间断。构造层序由界于Ⅱ级古构造面间的层序组成。他认为层序具有三分性,层序的顶界面是古构造运动面,其下部反映了初始充填或早期充填的特征,古地貌复杂,冲积体系发育;中部为相对稳定阶段周期性的水进,主要是三角洲—湖泊发育期;顶部河流作用强化,分异性强,是新构造演化的前奏,是划分层序的根据,并认为体系域

可以划分为:沉积体系单元、成岩相、成因相内部单元、岩性—能量单元等一系列不同级别的建造。

解习农认为,陆相断陷盆地受构造作用的控制明显,物源近、堆积快、突发事件沉积占比比例较大,气候变化对沉积影响明显。因而陆相层序分析不能简单套用海相层序分析方法,我国中新代的盆地多数为叠合盆地,盆地的每一个原型代表一个构造层序,因而对原型盆地的识别较为重要。断陷盆地有的单独出现,有的则作为叠合式的一个原型。断陷盆地的层序样式根据其应力场状况划分为拉张/张扭型层序、走滑伸展型层序和热沉降型层序,并认为不同的构造层序样式具不同的体系域,拉张/张扭型层序由初始充填体系域(PST)、湖扩展体系域(EST)、湖萎缩体系域(CST)等三个体系域构成,主要以冲积扇、扇三角洲、三角洲和湖泊体系沉积为主;挤压/压扭型层序由冲积扇、河流及洪泛平原沉积构成;走滑—伸展型层序及热沉降型层序与拉张型层序相似,只是少见三角洲沉积体系。

2.3 综合派

该学派认为层序受海平面变化、湖平面变化、沉积物供给、构造作用及气候等因素的综合影响。他们把湖盆分为敞流湖盆、闭流湖盆,各自有自己的沉积模式。它们研究了陆相盆地的沉积基准面和可容纳空间,认为地层的展布形成和沉积相的分布取决于可容纳空间的大小和新增可容空间的变化率,陆相断陷盆地中的沉积基准面是湖平面的递降水流平衡剖面/河流平衡剖面。

层序是构造作用、气候变化、沉积物供给和湖平面变化等综合作用的结果,但构造和气候在层序的形成过程中扮演着十分重要的角色,对敞流盆地,构造作用与相的形成成镜像关系;而对闭流盆地,盆地基底的整体构造作用对其相对湖平面变化无影响,气候作用主要表现在潮湿气候使湖平面上升,使闭流盆地转化为敞流盆地,而干燥气候的作用恰好相反。在敞流盆地中,层序边界的形成主要受构造因素的控制,叫构造层,而闭流盆地层序主要受气候作用的影响,叫气候层^[2]。

2.4 高分辨率层序地层学

由美国科罗拉多区矿业学院Cross教授(1994)提出的高分辨率层序地层学理论,是近年来新崛起的层序地层学新学派,其理论核心是:在基准面旋回变化过程中,由于可容纳空间与沉积物补给通量比值的变化,相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用,导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构发生变化,这些变化是

在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数。该理论经邓宏文、徐怀大等传入我国后,在我国陆相盆地储层预测研究中发挥着重要的作用,极大地提高了陆相盆地的储层预测精度。

以郑荣才、邓宏文两位教授为代表的分辨率层序地层专家在将高分辨层序地层的理论运用于我国含油气盆地储层预测的实践中,极大地丰富和发展了分辨率层序地层学理论。高分辨层序地层应用于陆相盆地层序分析中的关键技术之一是识别和划分不同成因的界面与不同级次的基准面旋回。郑荣才教授根据他在辽河、胜利、长庆、大庆及滇黔桂等油田的实践,将不同构造性质的湖盆在盆地构造—沉积演化序列中的控制因素进行分类,根据界面成因特征提出了“巨旋回,超长周期旋回、长周期旋回、中期旋回、短期旋回、超短期旋回”的划分方案,建立了各级次旋回的划分标准和厘定了各级次旋回的时间跨度,使得分辨率层序地层的“高”的含义有了一个量的概念。

基于分辨率层序地层学的理论核心,识别基准面旋回所控制的层序结构类型、叠加样式,及其在高级次的旋回中所处的位置与沉积动力学的关系,已成为“如何在地层记录中识别多级次地层旋回,并进行高精度的等时地层对比和建立分辨率时间—地层格架”的关键。郑荣才、彭军(2000)^[3]等在研究四川、鄂尔多斯、辽河等陆相含油气盆地中、新生代地层高分辨率层序的实践中,率先对基准面旋回的结构叠加样式与沉积动力学的关系进行了归纳和总结。圆满地解释了层序结构、层序叠加样式与可容纳空间/沉积物补给通量比值(A/S)变化,基准面升降幅度及沉积动力学条件的相互关系。

郑荣才等人的工作对于指导我国广泛分布的中、新生代陆相含油气盆地的精细油藏描述、储层非均质性分析、流体流动数值模拟和建立油气田范围内的以单个储层砂体为识别单元的高分辨率时间—地层格架,提高储集砂体的小层对比精度和注采工艺具有重要意义。

3 海相层序地层的研究进展

海相层序地层学的研究进展主要表现在如下几个方面:

3.1 旋回沉积学的研究推动了层序地层学向前发展

米兰柯维奇的轨道旋回沉积理论研究表明,宇宙边界条件长期旋回变化(如地-月体系及其轨道参

数:偏心率、轴斜率、岁差)与地球边界条件(如大陆分布、洋流循环、海平面、冰室—温室期史替及主要构造和气候事件等)共同经大洋和大气圈反馈体系的调节而影响海洋沉积作用,包括生物成因钙和硅质碎屑物的产率、碎屑搬运和再沉积、碳酸盐的微生物溶解及陆源物质的稀释等。因此,米兰柯维奇节律在不同的沉积环境都有体现,并具有特定的沉积标识: $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$, Gamma 值, $CaCO_3$ 丰度、酸不溶物、有机碳、膏盐类矿物、古生物组合与丰度、磁性倾向和偏斜及敏感度、层理厚度、岩石类型及物理性质、生物扰动及溶解频率等。与沉积旋回息息相关的海平面变化研究的新进展表现在:①海平面变化与层序地层、古气候、天外撞事件、稳定同位素及微量元素效应、沉积盆地充填和控矿作用等密切相关;②构造、全球海平面升降及层序三位一体;③活动构造背景下的海平面变化样式及层序发育特征;④海平面升降幅度的定量测定及全球海平面曲线模拟;⑤与米兰柯维奇有关的高频海平面变化机制^①。

Bachman Gh 研究了典型的德国三叠纪干盐湖米级砂岩—碳酸盐岩—页岩韵律旋回性沉积,认为沉积的旋回性受 1 万年的米兰柯维奇带的气候潮湿—干旱变化的控制,可用它来建立德国三叠系层序地层格架。

Eberh G P 研究得出,巴哈马群岛新第三纪进积型台地顶部为暴露面封闭的浅水沉积,盆地中为泥灰岩/灰岩交互沉积,轨道岁差旋回是新第三纪 GBB 地区海平面高频变化的主控制制。加积台地和斜坡中沉积速率的高(最大达 20 cm/ka)、低(小于 2 cm/ka)变化记录了长周期的海平面变化,斜坡中伴生的堤坝冲刷夹层随堤坝暴露周期的变化而变化。

3.2 冰川与气候对层序发育的影响

冰川事件,特别是 Hoffman 等最近提出的新元古代末全球性冰川—雪地球事件,已成为地球科学研究的一大热门话题。冰川沉积记录着丰富的、与地史中气候变化息息相关的地质信息。对冰碛岩、冰川作用过程及与冰川作用相关的沉积物的形成与演化及其影响因素的深入研究,是人类了解过去地球气候演变和预测未来全球气候变化与趋势的一个重要途径。Davila, Roberto S F 研究得出,巴西潘雪拉盆地冰蚀谷中威斯特伐利亚阶(C_2)/斯蒂芬阶(C_3)拉伯砂岩由重力流、潮流、风暴、海滩沉积、河滩沉积、河流席状砂、河道及洪泛沉积组成,形成于最大冰期之后因温度上升导致冰川后退和相对海平面上升的

①刘宝瑞,王剑,谢渊等·当代沉积学研究进展与趋势译自三十一届国际地质大会发言

海侵期。他认为冰积区层序地层概念模型不同于一般被动边缘盆地,主要区别在于冰积区海侵期具有很高的沉积供给和前积速率,而远离冰川中心的盆地中主要发生退积作用和细颗粒物沉积。

根据海相沉积模式,一般认为湖泊相黑色页岩是海侵沉积。而 Guzzo J V P 等认为,湖泊相黑色页岩更有可能记录的是碎屑湖泊中低水位期沉积。因为包括瑞典下白垩统在内的全世界的湖泊相黑色页岩均直接与含盐和深水环境相联系,沉积岩发育泥裂、蒸发岩、白云岩、燧石、叠层石,而且碳酸盐岩氧同位素正偏移、水体盐度较高。气候变干旱也同时减少了碎屑溶解的供给和底水的通风换气性,从而有利于有机质的聚集和保存,因此,气候变化所决定的底水氧化作用强度和底水沉积物的注入情况的变化,是控制湖泊小级别沉积旋回的主要因素。

冰川沉积旋回是气候旋回性变化的产物, Castro M R 等把巴西 Parana 盆地东南部 Rio do sul 组(早二叠世)中冰川沉积划分为三个冰川进积/退积旋回,对应于三次气候变化旋回。Ndreicheva L N 研究认为欧洲东北部新生代晚期,六个冰川沉积阶段相对应六个沉积旋回,每个沉积旋回具有不同的岩石组合。Gaigalas A J 等把与立陶宛晚 Scandinavian 期冰盖后退有关的冰湖-湖泊沉积剖面划分为三个古气候和沉积单元;冰缘摆动后退期的冰湖沉积,随季节性暖-冷变化的间冰期湖泊沉积,摆动冰川再向前推进形成新的冰湖沉积。AGlushkova O Yu 把俄罗斯东北部晚更新世冰川划分为两期,其地貌与古地理特点可与美国阿拉斯加冰川对比,它们具有相同的规模和类型,系同一时期的冰川事件的产物。Verosub K L 等研究得出,南极罗斯海始新世-中新世冰海碛物中低磁化度代表冰川作用广泛期,高磁化度说明冰川作用不广泛,在始新世-渐新世过渡期,因晚始新世发生的几幕变冷事件而加强了冰川作用。

3.3 层序地层学在岩相古地理编图中的成功运用

从 40 年代 Pupuu(1945) 等以历史构造观简编的《全球古地理图》到 90 年代初, Christopher (1992) 等以全球构造理论编制的《全球显生宙古地理图》和刘宝珺等以板块构造理论和盆地分析方法为指导编制的《中国南方震旦纪-三叠纪岩相古地理图集》,都未能克服以下不足:①如何编制反映活动论的岩相古地理图;②在二维平面上如何反映特定时间间隔内某地区的四维沉积发展史^[4]。

以陈洪德教授为代表的一批中国学者于 90 年代率先将层序地层学的思想应用于岩相古地理编

图。他们以露头层序地层学研究为主,以体系域为主要编图单元,编制了中国南方二叠系层序岩相古地理图。编图结果表明:层序岩相古地理图具有精确性、等时性、成因连续性和勘探实用性等特点,有效地克服了同时异相难以对比的问题。海平面变化、构造作用、沉积作用、火山活动等地质信息在该图上得到充分的反映。且该图也反映了先前古地理图因比例尺太小和时间跨度太大而不能反映的地质信息,诸如古暴露剥蚀区和孤立台地的大小、形状及其演化历史等,使不同时期的海陆分布和演化历史更加精确、客观、清楚。它对生储盖组合的研究和有利储集、生油相带的圈定提供了客观、科学的依据,使得对盆地的大地构造背景的解释和相带展布的预测更趋合理。

3.4 层序界面的成因分类

经典层序地层学将层序界面分为两类,即 I 型和 II 型界面, I 型界面以河流的复状作用(硅质碎屑岩区)、沉积相向盆地方向迁移、海岸上超的向下转移以及与上覆地层和伴生的陆上暴露和同时发生的陆上侵蚀作用为特征; II 型层界面是以沉积滨浅坡折带向陆方向上的陆上暴露、上覆地层的上超以及海岸上超的向下转移为特征^[5];陈洪德、许效松教授等在研究中国南方海相地层的过程中,从层界面的成因分析入手,以盆山转换和海平面与构造活动叠加效应为指导思路,把被动大陆边缘和活动大陆边缘由盆地成生、发展转为前陆盆地过程中的成层界面分成如下九种: a. 代表盆地新生的升降侵蚀层序不整合面; b. 代表盆地扩大的海侵上超层序不整合面; c. 标志盆地稳定发展和最大海泛的水下间断层序不整合面; d. 表积盆地发生转换的水下侵蚀切割层序不整合面; e. 盆地收缩与海平面下降引起的暴露; f. 活动大陆边缘因热侵蚀切割形成的不整合面; g. 前陆造山形成的隆升层序的不整合面; h. 前陆盆地在发展过程中的形成海泛不整合; i. 海陆转换过程中的洪泛不整合,上述九种成因层序界面代表大陆边缘盆地演化至前陆盆地、盆地形成、盆山转换等一系列演变过程^②;该项成果将层序界面的成因研究与盆地演化阶段紧密结合,扩展和丰富了层序地层学理论。

3.5 层序地层与盆地分析

刘宝珺、许效松、徐强(1991) 等学者在中国西部大型盆地动力学的研究中提出了盆山转换、盆山耦合的观点^[6],受到国内外地质学家的关注;目前盆山

②陈洪德,田景春.中国南方海相震旦系-中三叠统层序岩相古地理研究及编图阶段报告

耦合及盆山转换成为揭示盆地和造山带之间相互作用关系及大陆动力学探索的热门和前沿思想生长点。沉积地质学家和构造地质学家把盆地和造山带之间的结构型式结合起来,从盆地内的层序结构揭示造山过程的响应,从造山带中探索盆地边缘的性质,研究地壳的形成演化和动力机制,作为恢复古大陆和古大洋的重要依据。他们在研究中国西部的大型盆地中,以盆山系统为整体目标,以全球构造活动论和沉积-构造地质学、对比沉积学、层序地层学为指导,选择不同性质的盆地进行分析,从各种充填堆积物的式样、序列中寻找已经消失了的古动力学和古构造环境指标,恢复各盆地的相对位置。该领域的研究已发展成为具有中国特色的地质创新。

3.6 层序充填动力学的兴起

地球系统科学的观点认为:地球的各个部分是以一定方式联结在一起的一个整体,其各个部分是统一协调地一起运动。海洋、冰层、大气、陆地以及生物圈之间的相互作用及其在不同尺度的进程之间是非线性的。陈洪德教授等(2000)从地球系统科学的观点出发,以层序-盆地-地球系统科学理论为指导,从层序界面与地质事件、层序级别与盆地充填格架、层序发育与盆地构造活动、层序充填过程与盆地演化史四个方面对右江盆地进行了初步的层序充填动力学研究,其结果表明:右江盆地是由不同性质的等时界面所分割出的不同级别的成因地层单元所构成的复合建造块体,其空间形态、内部结构及构造轮廓受盆地性质、构造活动、沉积机理及海平面变化等的综合控制,右江盆地层序充填过程包括陆内裂陷、陆缘裂谷、弧后裂谷和前陆盆地四个阶段,经历了一个完整的构造旋回^[7]。

陈洪德教授等的研究表明以地球系统科学为依托的层序充填动力学在盆地分析中具强大的生命力。

3.7 浅水台地、深水陆棚对相对海平面变化的层序响应

Vail(1987)^[8]和 Sarg(1988)^[9]的模式预言:在相对海平面上升过程中,下超点应该向陆地方向迁移以保持与滨线的迁移一致;然而在相对海平面上升期间,以生物成因为主的碳酸盐台地可能会向盆地进积,这一事实已被 Neal W· Driscoll, Jeffrey W· Weissel 等(1991)在研究南东印度洋的 Broken Ridge 时所注意到^[10],尽管此时的水深在增加;故基于被动大陆边缘的层序地层模式不能圆满解释在相对海平面上升期间,台地边缘碳酸盐沉积供给增加这一事实。为此,对这一特殊单元的层序发育机理的

研究被引起重视。

台地上碳酸盐岩的生产率限制了深水陆棚环境中的碳酸盐泥的总量。环境条件是控制碳酸盐生产的主要因素,诸如水深、水的透明度、硅质碎屑、营养成分、含氧条件等^[11~14]。尽管相对海平面在上升,但若上述因素很适宜于碳酸盐的生长,那么台地上的碳酸盐同样会向盆地方向生长,如果海平面的上升或地壳沉降引起可容纳空间增加的话,那么碳酸盐会聚集(Handford and Loucks 1993; Straser 1994),台地上高的碳酸盐生产导致碳酸盐大量地向深水陆棚输送,而当其碳酸盐生产速率较低时,会导致在较深水的环境处于沉积饥饿状态(Schlager *et al.*, 1994)。

海平面的变化在碳酸盐由台地向深水陆棚输送过程中扮演着一个重要的角色(Droxler and Schlager 1985; Schlager *et al.* 1994)。退积和进积相带进一步缩小或加强的现象会记录在远端的碳酸盐泥中。在高海平面时期的透光带内,因台地上碳酸盐的过量生产和可容纳空间的降低,此时高水位发散;细粒的沉积物被风暴等作用所搅动,然后从台地边缘输送到较深水的环境。Milliman *et al.*(1993)和 Robbins *et al.*(1997)曾提出大量的非有机质的、或微生物沉凝的碳酸盐泥被输出。Schlager(1989)认为迅速的海泛导致台地的淹没,同时环境条件的迅速改变将终止或降低碳酸盐的生产(Tipper 1997)^[15]。故台地碳酸盐的生产率主要取决于生物系统对海平面变化的响应。

碳酸盐沉积速率的高低、凝缩与非凝缩层的间隔、沉积物以灰岩为主还是以灰泥为主、深水陆棚环境中,原地或半原地因素中所包含的间隔的多少等,常被看作长周期或短周期海平面升降的指示器。

在几个百年级的长周期演化中,一般认为碳酸盐沉积物的增加与可容纳空间的增加和台地上碳酸盐生产率的增加是相相关的,同时发生着碳酸盐泥向深海陆棚的传输。凝缩层和灰泥层是由加速的台地上的海泛所致,此时碳酸盐泥的输出减慢或停止,它们对应着是大的海泛面。象这种发生在间隔内而不是不连续面上的特征,海侵带或最大海泛面能被限定(Montanez and Osleger 1993; Pasquier and Strasser 1997)。以灰泥为主的间隔被解释作低位沉积,此时台地上碳酸盐生产率极低,粘土从暴露的台地上路过。碳酸盐与灰泥相对稳定的比率被看作是高位沉积。海平面的高频波动,提供了适量的灰泥生产和输出及适量粘土传输和沉积的可能。

长期海侵期间,指示海泛的特征通过短期海平

面上叠加到通常的海侵规模上而加强。在长期海平面上升过程中,短期最大海泛面能得到最好的体现。短期层序边界对应着最大的碳酸盐由台地到深水陆棚的输出。在深水陆棚,它不是一个不连续面而是表现为以碳酸盐为主的非凝缩沉积物。

在长期退积期间,碳酸盐主要沉积在短期海平面上升时期,对应着海侵或短周期高水位早期沉积。相对重要的灰泥沉积之后的第一个石灰岩记录位于短周期海侵面之上。在许多凝缩沉积碳酸盐的顶部表面对应着该层序的最大海泛面。富灰泥沉积对应着在台地上低的碳酸盐生产率或台地上发生侵蚀。基于这些原因,在长期海退过程中,短周期层序边界通常界于发育良好的灰泥间隔层中。短期海平面升降旋回的沉积层序因此能被一个或两个灰泥-灰岩层偶来表达,小规模层序边界被隐藏在石灰岩或灰泥床中,而小规模的海侵或大海泛面通常能被很好地识别^[16]。

4 多学科交叉、高新技术的应用

古地磁、地面雷达、高精度遥感技术、地球化学、深部地震反射剖面、层析成像、大地电磁测深、热流和应力测量、X-衍射、离子和激光探针、加速质谱仪、科学深钻、计算机和通讯技术等对现代沉积学的研究与应用提供了保证;地球化学作为定量化的地学在当代层序地层的研究中日益重要,运用地化指标来定量刻画海平面变化、沉积环境的演变、成岩演化、全球地层对比、物源分析、定年、水体温度、灾变

事件以及生物绝灭事件等。

Bityukova L 根据 13 种示踪元素研究得出,东欧克拉通西北边缘早寒武世发育多个潮坪-内陆棚相组成的海侵-海退沉积旋回。海侵早期滨岸沉积中 Zr, Cr, Co 质量分数增加,深水环境中聚集 Pb, Mn, Cu; 海侵最大期富含 V, Pb, Mn, Cu, 而 Cr 质量分数减少;在旋回初期和海退期 V/Mn, Ni/Mn, Cr/Mn, Ti/Mn 及 Zr/Mn 比值增加。

Feng Z Q 通过三维地震、高频(800 Hz~4 000 Hz,垂向分辨率为 30 cm)地震信号等方法,把泰国第四纪 Gulf 河流沉积(厚度>700 m)划分为 4 个层序,它们是冰期和间冰期最后 10 万年海平面变化旋回形成的沉积。

层序地层学已成为当代沉积学的重大进展和研究热点,自 Vail 等(1987)提出的源于北美被动大陆边缘盆地的经典层序地层模式面世至今的二十年,层序地层学已在认识地球演化史的尺度和世界范围内地层对比、层序沉积模式、矿产资源评价以及油气勘探等方面取得显著进展,同时,其自身理论学科也得到了发展,形成了生物层序地层学、高分辨率层序地层学、高频层序地层学、层序充填动力学以及应用层序地层学等一些新的发展方向。二十一世纪是层序地层学蓬勃发展的时期,同时人类也面临着“人口、资源、环境和可持续发展”问题的挑战,层序地层学如何为解决这一问题作贡献,应是一个新的任务。

本文是在综合利用国内外同行研究资料的前提下所作的概略的分析和总结,文中不当之处,敬请批评指正!

参考文献

- 1 罗立民. 河湖沉积体系三维高分辨率层序地层学[M]. 北京:地质出版社, 1999, 1.
- 2 赵国连. 层序地层学的研究现状[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(3): 100~101.
- 3 郑荣才, 尹世民, 彭军. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 369~375.
- 4 陈洪德, 覃建雄, 王成善等. 中国南方二叠纪层序岩相古地理特征及演化[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 511.
- 5 钱奕中, 刘文均. 层序地层学理论及研究方法[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1994, 8~9.
- 6 许效松, 徐强. 盆山转换和当代盆地分析中的新问题[J]. 岩相古地理, 1997, 16(2): 24~23.
- 7 陈洪德, 覃建雄, 田景春等. 右江盆地层序充填动力学初探[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 165~171.
- 8 Vail P R. Seismic Stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: seismic Stratigraphy interpretation procedure[A]. In: Atls of seismic Stratigraphy (Ed. Bally A W) AAPG studies in Geology[C]. 1987, 27: 1~10.
- 9 Sarg J F. Carbonate sequence stratigraphy[A]. In Wilgus C K *et al* Eds: Sea-level changees: an integrated approach[C]. SEPM Special publication 1988, 42: 155~18.
- 10 Neal W Driscoll, Jeffrey K Weissel, Garry D Karner *et al*. Stratigraphic Response of a carbonate platform to relative sea-level changees: Broken Ridge, Southeast Indian Ocean[J]. AAPG, Bulletin. 1991, 75: 808~831.
- 11 Hallock P, Schlager W. Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate platforms[J]. Palaios, 1986, 1: 389~398.
- 12 Oschman W. Environmental cycles in the late Jurassic northwest European epeiric basin: interaction with atmospheric and hydrospheric circulations[J]. Sedimentary Geology, 1990, 69: 313~332.

- 13 Schlager W. Depositional bias and environmental change—important factors in sequence stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70: 109~130
- 14 Wilson J L and Carbonate Facieses in Geological History [M]. Berlin. Springer-Verlag. 1975:471.
- 15 Tipper J L. Modeling Carbonate platform Sedimentation—lag comes naturally [J]. *Geology*, 1997, 25:495~498.
- 16 Bernard Pittet, Andre Strasser, Emanuela Mattiol. Depositional sequences in Deep-shelf environments [A]. A response to sea-level changes and shallow-platform carbonate productivity (OXFORDIAN, GERMANY and SPAIN) *Journal of Sedimentary Research* [C]. 2000, 70:392~407.

THE PROGRESS OF SEQUENCE STRATIGRAPHY

HOU Ming-cai CHEN Hong-de TIAN Jing-chun

(*Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059*)

Abstract On the basis of previous research at home and abroad, this paper reviewed the origin and basic principle of sequence stratigraphy, and summarized its application and research progress in the field of continent, ocean, basin research, sequence filling dynamic facieology and paleogeography mapping, the sequence surface category, the sequence response to sea-level changes in shallow-platform and deep-shelf environments. The future prospect of sequence stratigraphy was also discussed.

Key words sequence stratigraphy; sequence filling dynamics; basin analysis; platform; deep-shelf; response; progress