

文章编号:0253-9985(2010)05-0535-07

沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势

姜在兴

(中国地质大学 能源学院,北京 100083)

摘要:分别论述了层序地层学及沉积体系的国内外研究现状及发展趋势,阐述了与层序地层学及沉积体系相关的理论和基本概念。层序地层学未来的发展趋势为研究方法标准化及应用地区特殊化,尤其要加强深水层序、碳酸盐岩层序及层序模拟研究。沉积体系研究要由静态描述向动态模拟、由宏观分析向微观刻画发展,要加强沉积过程恢复,在更规范、更精细的等时层序格架内编制沉积体系图件,为寻找油气提供更可靠的依据。

关键词:沉积过程;沉积体系;层序格架;层序地层学

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future

Jiang Zaixing

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper discusses the present status and the trend of domestic and international studies of sequence stratigraphy and depositional systems and presents relevant theories and basic concepts. The trend of sequence stratigraphy will be standardization of research approaches and specification of studied areas for application. In particular, the studies of deepwater sequences and carbonate sequences and sequence simulation should be strengthened. Studies of depositional systems should shift from static description to dynamic simulation and from macroscopic analysis to microscopic characterization. Reconstruction of depositional processes will be strengthened, and depositional systems will be mapped in a more standard and fine synchronic sequence framework, so as to provide more reliable foundations for petroleum exploration.

Keywords: depositional process, depositional system, sequence framework, sequence stratigraphy

沉积学的发展整体上经历了从萌芽到蓬勃发展,再到现今的储层沉积学、层序地层学、地震沉积学等派生学科发展阶段^[1,2]。这期间,沉积学的形成和发展一直服务于油气和其他沉积矿产的勘探和开发。鉴于对能源的需求和对新兴学科的探求,各国积极学习、引入并不断发展沉积学,一大批沉积学著作应运而生^[3~8]。沉积学的研究内容包括沉积岩石学特征和沉积环境沉积体系的研究,这两部分内容从宏观和微观精细刻画了二维

沉积体的沉积特征。然而,为了满足油气勘探和开发的需求,需要引入时间的概念,即在三维甚至四维时空领域内揭示沉积体的沉积特征。因此,层序地层学的产生具有划时代的意义,它为沉积分析提供了纵向的时间尺度。目前,“在等时格架内研究沉积体系的展布和沉积特征”是沉积学研究的核心内容之一。本文即针对这一论题,探讨沉积体系和层序地层学研究中的问题及发展方向。

收稿日期:2010-06-30。

作者简介:姜在兴(1962—),男,教授、博士生导师,沉积学和石油沉积地质学。

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX05009-002);教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目(IRT0864);高校博士点基金项目(200804910004)。

1 层序地层学研究现状及发展趋势

1.1 国内外层序地层学研究现状

层序地层学发展至今,理论上形成了 Vail 层序地层学、Cross 高分辨率层序地层学、Galloway 成因层序地层学三大主流派系^[9~11];除此之外,姜在兴等(2005)提出了可容纳空间转换系统的概念^[12]。方法上,除运用传统的露头、岩心、测井和高精度地震资料外,还可运用地震资料三维可视化技术、古生物、地球化学、数值分析和计算机模拟技术,使得层序地层学研究更灵活、更精细。

近几年,国内外层序地层学研究仍然处于不断完善阶段,主要集中在:(1)综合应用各种资料识别层序界面与层序的级次划分;(2)不同沉积背景层序地层模式的建立与完善(包括海相、非海相,浅水、深水,硅质碎屑岩、碳酸盐岩等沉积背景);(3)层序研究逐渐由宏观向微观发展,结合成岩相、生物相(化石相)分析,揭示古沉积环境;(4)层序形成的动力学机制分析;(5)层序的体系域构成研究,对于寻找单砂体和研究油气成藏规律具有重要意义^[13~15]。

到目前为止,针对层序研究,相关的理论和方法已比较系统、成熟,对相关术语的理解更加明确^[16~18]。尤其是国内陆相层序地层学,在层序内部体系域划分、裂谷盆地层序地层模式研究及层序地层控制因素分析等方面取得了长足进步。因此,层序地层学的广泛应用对于生储盖组合和圈闭的预测及隐蔽油气藏的勘探开发起到了重要作用^[19~21]。

1.2 国内层序地层学研究存在问题

20 世纪 80 年代后期以来,中国即融入世界层序地层学研究的大潮。

在层序地层学理论引入过程中,由于过于依赖国外海相层序地层学研究,导致概念混淆,对同学派理论名称理解有些偏差,认为 Vail 层序是经典层序地层学、Cross 层序是现代层序地层学, Vail 层序是低分辨率层序地层学、Cross 层序是高分辨率层序地层学,这些说法不够准确。20 世纪 70 年代,Vail 层序理论问世;90 年代,Cross 高分辨率层序、Galloway 成因层序等众多理论兴起。这些

不同的层序理论形成时间有先后之分,但并不代表先形成的是“经典”的、晚形成的是“现代”的,两种理论在目前是并行发展的,并且两种理论适用范围并不冲突。即使 Vail 层序理论相比较 Cross 层序理论被更多的人所接受,但并不代表 Vail 层序理论是完全成熟、没有缺陷、堪称“经典”的。

由于 Vail 层序理论来源于地震层序地层学,鉴于地震资料分辨率的局限性,所以有人认为 Vail 层序是低分辨率层序地层学,Cross 层序是高分辨率层序地层学,这种说法也不够准确。Vail 层序地层学不等于地震层序地层学,作为一种理论方法,它同样可利用露头、岩心、测井等资料进行高级别层序分析;而 Cross 层序理论是“高分辨率层序”,可用于高级别层序分析,但“高分辨率”并不等于“高频”或“高精度”^[22]。

正是由于对这些层序理论理解不够准确,目前有些科研项目中出现混用层序理论的现象,经常是低频层序研究用 Vail 层序地层学,高频层序研究用 Cross 层序地层学,甚至在 Vail 层序理论建立的层序格架内使用上升半旋回和下降半旋回这些 Cross 层序理论的专业术语,这是不对的。Vail 层序理论强调层序界面是不整合相应整合面,层序发育主控因素是海(湖)平面升降;而 Cross 层序理论强调受海(湖)平面、构造沉降、沉积负荷补偿、沉积物补给、沉积地形等综合因素制约的地层基准面升降旋回变化。地层基准面并非海(湖)平面,也不是相当于海(湖)平面的一个向陆方向延伸的水平面,而是一个相对于地球表面波状升降的、连续的、略向盆地方向下倾的抽象面(非物理面);基准面之上发生侵蚀作用,基准面之下发生沉积作用^[23](图 1);基准面一个完整的上升与下降旋回构成一个层序。因此,Vail 层序的海(湖)平面上升与下降并不完全等同于 Cross 层序的基准面上升与下降。换言之,海(湖)平面升降变化只是基准面变化的影响因素之一,有时候构造沉降、沉积物供给等其他因素的影响程度大于海(湖)平面变化幅度,从而使得基准面变化趋势与海(湖)平面变化趋势相反(图 2)。Vail 层序与 Cross 层序二者理论不同,导致形成的层序界面不能够统一吻合,因此不可混用。

此外,针对我国断层活动复杂、相带变化频繁的地质特点,在进行层序研究时,同一研究区不同

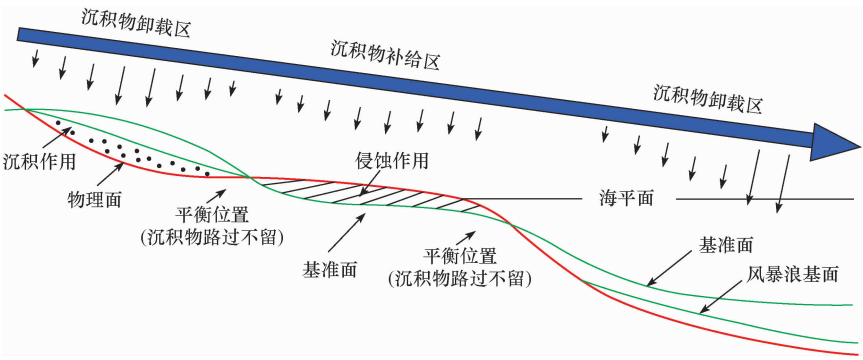


图1 基准面、可容纳空间和反映可容纳空间与沉积物供给之间平衡时的地貌状态(据 Cross,1994 修改)

Fig.1 Base level ,accommodation and morphologic prominence with the balance of accommodation and sediments supply

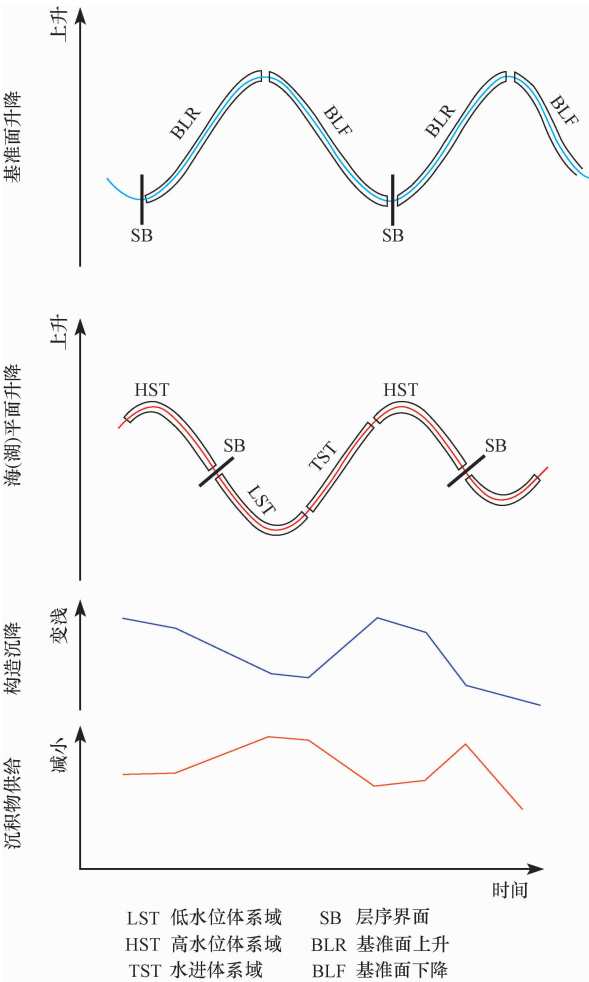


图2 体系域与基准面升降、海(湖)平面升降、构造沉降、沉积物供给的关系(据刘招君等,1994,1997 修改)

Fig.2 Relationship among base-level changes, sea (lake) level changes, tectonic subsidence and the input of sediments

学者建立的层序格架不尽相同。其原因是,缺乏统一的划分标准和规范,层序分级比较乱,难以采用统一的时间区间对层序分级,而且准层序以上更高级别的层序边界识别比较困难;此外,对于层序发育的主控因素研究也不够深入,虽然已经建立了陆相盆地层序地层模式^[24~26],但无法在各盆地推广,表明层序模式对盆地充填序列及油气勘探的预测存在局限性。以上问题需要在今后层序地层学研究中逐渐解决完善。

1.3 未来发展趋势

针对现有问题及油气勘探的需要,层序地层学未来发展趋势为:理论上寻求突破;方法上寻求完善;应用上寻求效益。研究重点集中在以下几个方面:

- 1) 深水层序地层研究,充分利用高精度地震资料反演、时频分析等地球物理方法,结合伽马能谱分析和地球化学元素(C, O, Sr 同位素等)含量的旋回分析,准确识别不整合面相应的整合面,科学地建立等时地层格架;
- 2) 可容空间转换系统的研究,强调可容空间的增大与减小之间的转换,揭示变化不统一性的存在,作为新生概念,应加强推广应用,检验其适用性;
- 3) 碳酸盐岩层序地层学研究,尤其加强与储层物性相关的成岩层序地层学研究,对寻找滩坝、生物礁储层具有重要的指导意义;
- 4) 层序地层模拟研究,将层序研究由定性向半定量或定量发展,揭示影响层序发育的主控因

素,增强对有效储层的预测功能。

2 沉积体系研究存在问题及发展趋势

在等时层序地层格架建立的基础上进行沉积体系研究,是寻找有效储层和油气圈闭的有效路径。尤其对于寻找隐蔽油气藏,沉积体系研究更是不可缺少。目前,沉积体系研究基本理论和方法已经成熟,未来要由静态向动态,由宏观向微观,向更精细、更准确、更科学的方向发展。

2.1 相关基本概念

沉积体系的概念最早由 Fisher (1967) 和 Brown (1980) 使用, Galloway (1996) 在此基础上将沉积体系定义为成因上相关的沉积环境和相互联系的沉积作用过程中所形成的一套三维沉积体^[5],这一概念目前仍被广泛应用。与沉积体系相关的概念还有沉积环境、沉积相及岩相,这些概念易于混淆。本文将这些概念加以明确,并说明相互之间的关系。

沉积环境是在物理上、化学上和生物上均有别于相邻地区的一块地表,是发生沉积作用的场所。沉积相为沉积环境及在该环境中形成的沉积岩(物)特征的综合,它包含沉积环境和沉积特征这两个方面的内容,而不应当把它简单地理解为环境,更不应当把它与地层概念相混淆。岩相是—定沉积环境中形成的岩石或岩石组合以及岩石所具有的可观测成岩特征的面貌,岩相是沉积相的主要组成部分。岩相和沉积相是从属关系而不是同义关系。

对于沉积体系与沉积相,二者的概念都包含沉积环境,核心都指沉积体,包括沉积体的空间展布和内部特征,但二者的指代范围是不相同的。区别在于沉积体系是具有成因联系的多个沉积相集合体,强调沉积体成因上要相互联系,其范围大于沉积相;而沉积相更强调沉积体的内部特征。

2.2 沉积过程恢复

沉积体系研究除了要对沉积体进行静态描述、定性分析外,还要对沉积过程进行动态恢复和定量模拟。

沉积过程发生在气(气候)–源(物源)–盆(盆地)系统中,涉及古气候、古物源和古水系、古

岸线、古地貌、古水深等因素,各因素相互制约、相互影响、不断变化。沉积过程恢复重点在于各单因素的定量恢复^[27~35](表1)。层序地层学研究恰恰涵盖了以上各因素,因此在等时地层格架内进行沉积过程研究能够更准确地预测油气藏。

在气–源–盆系统中恢复沉积过程,其中古物源恢复相对成熟,而与盆地相关的古地貌、古水深和古岸线研究程度却相对低些。古物源的恢复要完善地球物理方法,深化元素地球化学方法,并结合孢粉分析等古生物方法;古岸线研究要深入探讨古岸线在地震、测井上的响应;古地貌和古水深恢复要充分利用层序地层学研究的层拉平技术,并结合地球化学元素分析和古生物分析;古气候恢复要利用孢粉百分含量恢复温度和湿度;利用沉积物的层理、结构形态、厚度、颗粒粒度和矿物性质等恢复风向及风力。以上影响沉积过程的各种因素都间接与构造沉降和沉积物供给相关,因此要提高对埋藏史和脱压实过程恢复的精度,才能从根本上减小恢复各因素时计算的误差。

目前,沉积过程研究在完善各单因素恢复的基础上,要加强对以上几个因素进行系统的、综合的、定量的研究,这样才能够更准确地再现沉积过程,进而对油气勘探具有实际的指导作用。具体要关注以下两方面内容:一是加强计算机数值模拟研究,通过计算机软件,将各参数纳入统一系统,在界定条件下,不断调试各参数之间的关系,建立沉积过程理论数值预测模型,模拟再现沉积过程;二是加强实验沉积学研究,充分利用先进的实验设备,结合理论数值模型以及现代沉积数据分析,尽量再造沉积古环境,在实验室再现沉积过程,对理论模型进行有效检验,运用实验完善理论。

2.3 沉积体系研究与油气开发地质

沉积体系研究不局限于寻找有利砂体,而且还要寻找有效储层,因此未来更要与油气开发地质紧密结合,充分表明沉积研究由宏观向微观发展。

沉积微相及岩相研究与油气开发地质密切相关。目前,岩相研究既包括与沉积环境相关的沉积岩相,即传统所指在—定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,又包括与成岩作用相关的成岩岩相,即岩石目前所具有的可观测成岩特征的面貌。以岩石在次生成岩特征方面的差异为依据来划分,“成岩岩相”是对沉积岩相的引申与扩展^[36],

表 1 沉积过程各参数恢复方法

Table 1 Reconstruction methods of parameters of depositional process

研究内容	定性描述方法	半定量-定量分析	存在问题
古物源与古水系	① 沉积学方法(砾石产状、层理及层面构造、砾岩成分、砂岩碎屑组分、重矿物组合等); ② 地球物理方法(地震测线前积结构、沟道侵蚀、地层倾角测井等); ③ 元素地球化学方法(常量元素、微量元素、稀土元素、同位素定年等)	① 地质方法(体积平衡法、沉积速率法、未被剥蚀地层趋势延伸法、波动过程分析法等); ② 地球化学方法(镜质体反射率法、磷灰石裂变径迹法、宇宙成因核素分析法、流体包裹体法等); ③ 地球物理方法(声波时差法)	① 具有局限性,受使用条件、分析方法的限制等; ② 只适用于盆地内部的物源,对盆地外部物源的研究则不适用
古岸线	① 地貌特征(海蚀地貌); ② 岩性标志(泥炭层、煤层、蒸发岩等),沉积构造标志(浪成交错层理、冲洗交错层理等),沉积相特征(沿岸砂坝、三角洲平原、湖缘峡谷等); ③ 地震反射标志(上超尖灭、顶超、坡折点的迁移); ④ 古生物标志(贝壳滩、珊瑚礁、微古生物、遗迹化石)	① 岩石中总铁向菱铁矿和黄铁矿的转化程度 K_{Fe} 系数; ② Fe_2O_3 和 MnO 含量; ③ B, Sr, Rb, K + Na 质量分数和 Sr/Ba, Rb/K 比值等古盐度指标判断古岸线	① 研究内容不均衡,以第四纪以来岸线研究居多; ② 古岸线的识别标志不适于更古老的古岸线研究; ③ 古岸线对砂体和油气控制作用的研究不系统
古地貌	① 根据地层残余厚度及沉积体系时空配置特征推测古地貌; ② 利用古流向和物源分析、判别古地形	① 地层残余厚度法和标准层法; ② 压实恢复技术; ③ 平衡剖面恢复技术; ④ 沉积学古地貌恢复法; ⑤ 高分辨率层序地层学方法	① 遭受剥蚀的地层,其残余厚度不止是某一期构造运动风化剥蚀的结果; ② 作为地层对比用的标准层,可能存在穿时现象
古水深	① 指示水深的生物证据; ② 反映特定水深的沉积结构; ③ 反映水深的岩相; ④ Th/U 比值的相对大小	① 相序法(坝砂厚度); ② 波痕法; ③ 底栖藻法(介形虫和微体藻类等)	① 利用理想化模式的经验公式,精度不是很高; ② 不具有普遍性
古气候(古风场)	① 风蚀地貌特征; ② 风成沉积物的走向、厚度、粒度以及各种地化指标; ③ 古大气环流强度	① 利用沉积物的倾角和密度值; ② 借用湖泊滩坝厚度参数	① 反映古风向的多,反映古风强的少; ② 古风强指标多为定性,定量的少
古气候(古温度和古盐度)	① 深海沉积地层中微体化石种属的变化; ② 浮游有孔虫某些种的外壳的旋卷方向; ③ 海洋沉积物磁性特征; ④ 灰岩的生物颗粒成分	① 烯酮化合物不饱和比值 U_{37}^K ; ② 有孔虫壳体的 $\delta^{18}O$ 值; ③ 湖泊碳酸盐氧同位素记录; ④ 介壳 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 值; ⑤ 孢粉百分含量; ⑥ 流体包裹体测温(盐湖)	① 方法不具有普遍性; ② 具有时空局限性; ③ 适用条件比较苛刻

并且成岩岩相的研究将成岩特征与储层分类评价结合在一起,对于预测储层的优劣变化趋势与其含油性具有一定的可靠性和实用性^[37,38]。

沉积环境决定沉积微相类型,并通过沉积结构、沉积构造、矿物组分和流体性质,对沉积岩相和成岩特征有不同程度的控制和影响,因而沉积微相与岩相之间存在着时空上的相关性。通过对沉积微相对应的有利砂体的岩相进行详细研究,搞清楚砂体内部岩相的组合类型、分布方式以及在纵向上和横向上岩相组合变化的规律,在此基础上建立岩相-沉积微相的相关判别模式,并以沉积微相为桥梁,进一步建立岩相-测井相、岩相-

地震相对应关系,从而在平面上揭示砂体的岩相展布规律,最终通过岩相分析,结合物性参数,揭示平面储层物性及非均质性分布规律,从而对储层进行分类评价,为油气开发注水驱油、防止储层水淹等提供参考。

2.4 沉积体系编图

沉积体系编图要与层序格架特征紧密结合,从而更有效地预测砂体。

沉积体系研究的相关图件主要有单井、连井和平面 3 类。单井相分析图件划分微相时要考虑准层序单元,要注意纵向相突变与某个级别层序

界面是否吻合。连井剖面横向沉积体系对比要避免以往的“砂对砂,泥对泥”;只有在层序格架内部合理的“砂对泥”才能够如实地反映当时的沉积规律,而且要反复核查砂-泥进退变化与层序内部地层叠加样式是否相对应;对于油气开发阶段横向沉积对比要达到岩层,相当于 Wagoner 层序级别的七级。平面图编制重点在于作图单元的选择,以往的沉积体系(或古地理)图件习惯以地层组段名称为作图单元,但是地层名称的不统一造成同时期地层无法对比;为了满足需要,要在资料允许的情况下,提高沉积体系编图的精度,要按照需求以各级别层序为作图单元,并且建立各级层序与确定的地质时间的对应关系,即将沉积体系演化按照时间单元层层剥开,这样更精细的编图能够更准确地刻画沉积体的沉积特征。

3 结论

文章综述了沉积体系及层序地层学的研究现状和发展趋势,在明确相关概念的基础上,提出未来沉积体系研究要由静态向动态、由宏观向微观发展。进行沉积体系研究,首先要综合各种资料和方法,准确识别层序界面,建立高精度等时地层格架;然后,在层序格架内进行沉积环境、沉积相、亚相、微相及岩相的静态分析;第三步,在气-源-盆系统中,采用适当方法,动态恢复沉积过程,分析控制沉积的影响因素;第四步,以各级层序为作图单元,宏观与微观相结合,编制与沉积体系相关的平面展布图;最后,分析图件,揭示沉积体系与有效储层及油气圈闭的关系,寻找有利目标区。

参 考 文 献

- 1 顾家裕,张兴阳. 油气沉积学发展回顾和应用现状[J]. 沉积学报,2003,21(1):137~140
- 2 于兴河,郑秀娟. 沉积学的发展历程与未来展望[J]. 地球科学进展,2004,19(2):173~180
- 3 Pettijohn F J. Sedimentary rocks(3rd)[M]. New York:Harper & Row Pub,1975. 1~628
- 4 Friedman G M, Sanders J E. Principles of sedimentology [M]. New York:Wiley,1978. 83~402
- 5 Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous clastic depositional systems (2nd edition)[M]. New York:Springer-Verlag Berlin Heidelberg,1996. 6~326
- 6 冯增昭. 沉积岩石学(下)[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 74~298

- 7 曾允孚,夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社,1986. 219~251
- 8 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003. 257~441
- 9 Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level(part 3):relative changes of sea level from coastal onlap[A]. In: Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration, Payton[C]. AAPG Memoir, 1977, 26: 63~81
- 10 Cross T A, Baker M R, Chapin M A, et al. Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis[A]. In: Sub-surface reservoir characterization from outcrop observations[C]. Institut Francais du Petrole, 1993, 51: 11~33
- 11 Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis (I): architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 125~142
- 12 Jiang Z X, Lu H B, Yu W Q, et al. Transformation of accommodation space of the Cretaceous Qingshankou Formation, the Songliao Basin, NE China[J]. Basin Research, 2005, 17(4): 569~580
- 13 Benvenuti M, Bertini A, Conti C, et al. Integrated analyses of litho-and biofacies in a Pliocene cyclothemic, alluvial to shallow marine succession (Tuscany, Italy)[J]. Geobios, 2007, 40: 143~158
- 14 Jowett D M S, Schröder-Adams C J, Leckie D. Sequences in the Si-kanni Formation in the frontier Liard Basin of northwestern Canada—evidence for high frequency late Albian relative sea-level changes[J]. Cretaceous Research, 2007, 28: 665~695
- 15 Ruth D, García-Gil S, Díez R, et al. Stratigraphic framework of gas accumulations in the Ría de Pontevedra (NW Spain)[J]. Geo-Mar Lett, 2007, 27: 77~88
- 16 Kolla V, Posamentier H W, Eichenseer H. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall-discussion [J]. Sedimentary Geology, 1995, 95: 139~145
- 17 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
- 18 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92: 1~33
- 19 石世革. 黄骅拗陷板桥凹陷古近系沙一段中部层序地层学研究与岩性油气藏勘探[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 320~325
- 20 项华, 徐长贵. 渤海海域古近系隐蔽油气藏层序地层学特征[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 11~15
- 21 许杰, 何治亮, 董宁, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田盒3段河道砂岩相控储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 692~696, 705
- 22 汪彦, 彭军, 游李伟, 等. 中国高分辨率层序地层学的研究现状[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 351~357
- 23 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89~97

24 顾家裕,郭彬程,张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发,2005,32(5):11~15

25 刘招君,董清水,王嗣敏,等. 陆相层序地层学导论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2002. 39~50

26 顾家裕,张兴阳. 陆相层序地层学进展与在油气勘探开发中的应用[J]. 石油与天然气地质,2004,25(5):484~490

27 刘国臣,金之钧,李京昌. 沉积盆地沉积-剥蚀过程定量研究的一种新方法——盆地波动分析应用之一[J]. 沉积学报,1995,13(3):23~31

28 王毅,金之钧. 沉积盆地中恢复地层剥蚀量的新方法[J]. 地球科学进展,1999,14(5):482~486

29 沈吉,王苏民,Matsumoto R,等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义[J]. 中国科学(D辑),2001,31(12):1017~1023

30 陈萍,方念乔,胡超涌. 浮游有孔虫壳体氧同位素的古水温及古盐度意义——以东北印度洋 260 ka 以来沉积记录为例[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):141~145

31 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报,2003,21(3):409~416

32 赵俊兴,陈洪德,时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义——以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. 成都理工学院学报,2001,28(3):260~266

33 赵锡文. 古气候学概论[M]. 北京:地质出版社,1991. 7~40

34 周雁,金之钧,汤良杰,等. 楚雄晚三叠世前陆盆地沉积-剥蚀特点[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):680~687,702

35 李守军,郑德顺,姜在兴,等. 用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深——以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例[J]. 古地理学报,2005,7(3):400~406

36 钟广法,邹宁芬. 成岩岩相分析:一种全新的成岩非均质性研究方法[J]. 石油勘探与开发,1997,24(5):62~66

37 孙玉善,申银民,徐迅. 应用成岩岩相分析法评价和预测非均质性储层及其含油性——以塔里木盆地哈得逊地区为例[J]. 沉积学报,2002,20(1):55~59

38 高林. 碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用——以普光气田为例[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):733~739,747

(编辑 李 军)

(上接第 534 页)

76 耿新华,耿安松. 源自海相碳酸盐岩烃源岩原油裂解成气的动力学研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(5):695~700

77 朱光有,张水昌,梁英波. 中国海相碳酸盐岩气藏硫化氢形成的控制因素和分布预测[J]. 科学通报,2007,52(A01):115~125

78 张水昌,帅燕华,朱光有. TSR 促进原油裂解成气:模拟实验证据[J]. 中国科学(D辑),2008,38(3):307~311

79 刘全有,戴金星,金之钧,等. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. 地质学报,2009,83(1):107~114

80 陈建平,赵文智,王招明,等. 海相干酪根天然气生成成熟度上限与生气潜力极限探讨——以塔里木盆地研究为例[J]. 科学通报,2007,52(增1):95~100

81 庞雄奇. 中国西部典型叠合盆地油气成藏机制与分布规律[J]. 石油与天然气地质,2008,29(2):157~158

82 Hubbert M K, Rubey W W. Role of fluid pressure in mechanics of overfaulting[J]. AAPG Bulletin,1959,70(2):115~166

83 Magara K. Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka Plain, Japan[J]. AAPG Bulletin,1968,52:2466~2501

84 罗晓容,喻建,张发强,等. 二次运移数学模型及其在鄂尔多斯盆地陇东地区长 8 段石油运移研究中的应用[J]. 中国科学(D辑),2007,37(A01):73~82

85 马永生,储昭宏. 普光气田场地建造过程及其礁滩储层高精度层序地层学研究[J]. 石油与天然气地质,2008,29(5):548~556

86 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题[J]. 天然气地球科学,2003,14(5):338~346

87 庞雄奇,高剑波,吕修祥,等. 塔里木盆地“多元复合-过程叠加”成藏模式及其应用[J]. 石油学报,2008,29(2):159~166

88 Zhou J, Xu F, Wang T, et al. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics[J]. Earth and Planetary Science Letters,2006,243(1-2):195~210

89 Zhou J, Xu F, Wei C, et al. Shortening of analogue models with contractive substrata: insights into the origin of purely landward-vergent thrusting wedge along the Cascadia subduction zone and the deformation evolution of Himalayan-Tibetan orogen[J]. Earth and Planetary Science Letters,2007,260(1-2):313~327

90 金之钧,张金川. 深盆地成藏机理[J]. 地学前缘,2002,9(3):208

91 Pang Xiongqi, Jin Zhijun, Zeng Jianhui, et al. Prediction of the distribution range of deep basin gas accumulations and application in the Turpan-Hami Basin[J]. Energy Exploration and Exploitation,2002,20:253~286

92 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):281~288,294

93 庞雄奇,罗晓容,姜振学,等. 中国西部复杂叠合盆地油气成藏研究进展与问题[J]. 地球科学进展,2007,57(9):34~38

(编辑 李 军)