

文章编号: 1000-0747(2016)05-0820-10 DOI: 10.11698/PED.2016.05.20

中国含油气盆地沉积地质学进展

朱筱敏¹, 钟大康¹, 袁选俊², 张惠良³, 朱世发¹,
孙海涛¹, 高志勇², 鲜本忠¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院; 2. 中国石油勘探开发研究院; 3. 中国石油杭州地质研究院)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272133); 国家科技部油气重大专项(2011ZX05001-002, 2011ZX05009-002); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201104)

摘要: 通过对比分析国内外含油气盆地沉积地质学的主要进展, 探讨中国含油气盆地沉积学发展中存在的问题及其解决思路。系统论述粗粒沉积体系、浅水三角洲沉积体系、滩坝沉积体系、深水重力流沉积体系、细粒沉积体系、碳酸盐岩礁滩沉积体系、混积沉积体系、微生物岩、地震沉积学、沉积物理模拟方面的国内外研究进展, 进一步讨论了中国沉积学的发展在微生物岩、沉积模拟方法等方面与国外存在的差距, 指出原型盆地沉积面貌和古地理格局恢复、重大构造变革期的多尺度构造古地理恢复、沉积学新理论在古老深埋老地层砂体发育规律及其与深埋新地层砂体发育规律的差异性解释中的应用、中国特色沉积体系组合和沉积模式的建立等方面所面临的问题。指出未来在源-渠-汇、沉积动力学、区域中国沉积学等沉积学理论和地震沉积学、沉积模拟研究方法技术等方面的发展趋势。图1参59

关键词: 浅水三角洲; 重力流; 滩坝; 混积岩; 微生物岩; 地震沉积学; 沉积学; 中国

中图分类号: TE122 文献标识码: A

Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China

ZHU Xiaomin¹, ZHONG Dakang¹, YUAN Xuanjun², ZHANG Huiliang³,
ZHU Shifa¹, SUN Haitao¹, GAO Zhiyong², XIAN Benzong¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 3. Hangzhou Geological Institute, PetroChina, Hangzhou 310023, China)

Abstract: This paper gives a contrastive analysis of the main progress made in petroliferous basins sedimentary geology domestically and internationally, and discusses the main problems and their solutions in the development of petroliferous basins sedimentology in China, including coarse-grained depositional system, shallow-water deltaic depositional system, beach bar depositional system, deep-water gravity flows, fine-grained depositional system, carbonate reefs, mixosedimentite, microbialite, seismic sedimentology and sedimentary physical simulation. It also reveals the developing gap of Chinese sedimentology in the areas of microbialite and sedimentary simulation, etc. and analyzes the recovery of sedimentary features and paleogeography pattern of prototype basins, multi-scale paleogeographic recovery during major tectonic movements, the different explanation of new sedimentology theories in the deep-buried new sandbodies and old sandbodies development regularities. The paper details the difficulties when it comes to the typical depositional systems combination and the setup of sedimentary models in China. Therefore, the developing tendency is described of sedimentology theories like source to sink, sedimentary dynamics as well as regional sedimentology in China, seismic sedimentology, and studying methods and technologies in sedimentary simulation.

Key words: shallow-water delta; gravity flow; beach-bar; mixo-sedimentite; micro-bialite; seismic sedimentology; sedimentology; China

0 引言

沉积学是一门古老的地质学科, 随着石油工业的发展, 沉积学理论和方法也得到了快速发展^[1-4]。2014年日内瓦国际沉积学大会^[5]、2015年波兰国际沉积学年会和2016年摩洛哥国际沉积学年会的会议热点反映了国际沉积学的最新进展。3次会议的主要热点可归纳

如下: 深海钻探和全球气候与冰川演变; 气候与地表环境以及海平面变化(Deep time研究); 源-渠-汇系统, 即沉积物源(汇水区域)、沉积过程与沉积结果关系; 沙漠沉积盆地及其沉积特征; 冲积扇(坡积扇)沉积过程与砂体构型; 河流沉积演变与(陆架边缘)浅水三角洲沉积模式; 重力流(异重流)沉积体系; 事件沉积(海啸岩)及其诱导因素、块体搬运过程和沉积

结果；碳酸盐岩台地沉积环境以及微生物岩、混积岩；细粒沉积物形成过程、细粒沉积动力学及其控制因素；中生代特提斯域沉积（Dream Project）；古地貌恢复和沉积过程模拟（水动力跳跃、重力流底床形态等）；构造变换带与沉积物源、沉积体系；构造沉积学、气候沉积学、火山沉积学与事件沉积学；地震沉积学（地震岩性学与地震地貌学）等。

中国油气资源丰富，沉积地质学在中国沉积盆地石油与天然气工业可持续发展中具有重要战略地位，并有效指导了油气勘探开发。中国东部断陷湖盆三角洲、滩坝、水下扇等多种类型储集砂体充填模式的建立推动了松辽盆地、渤海湾盆地等岩性油气藏的勘探进程。松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等浅水三角洲、砂质碎屑流模式的建立，拓展了湖盆中心岩性油气藏的勘探领域。前陆冲断带冲积扇、扇三角洲（辫状河三角洲）粗粒沉积模式的建立，推动了库车坳陷深层、准噶尔盆地西北缘油气的勘探发现。海陆过渡相三角洲体系的成因模式研究，推动了鄂尔多斯盆地苏里格大气区的发现。细粒沉积与富有机质页岩分布模式的建立，推动了渤海湾、松辽、鄂尔多斯、准噶尔盆地等致密油气与海相页岩气的勘探发现。随着碳酸盐岩台地礁滩沉积体系研究的深入，相继发现了四川盆地普光、塔里木盆地塔中Ⅰ号坡折带等大油气田（区）^[6-10]。

随着油气勘探开发的快速发展，研究具有中国特色的含油气盆地沉积地质学对于寻找油气资源，特别是经历了多期次重大构造变革的深层油气藏和地层岩性油气藏勘探具有重要意义。本文通过总结、对比国内外含油气盆地沉积地质学主要进展，来分析中国含油气盆地沉积学发展中存在的问题，进一步探讨中国含油气盆地沉积地质学未来的发展趋势。

1 含油气盆地沉积地质学主要进展

2000年以来，沉积地质学理论、方法和研究技术发展迅速。研究者根据盆地构造背景建立了前陆盆地、断陷盆地和克拉通盆地的粗粒（冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲）沉积模式；依据三角洲沉积坡度和水深以及沉积位置，划分出深水与浅水三角洲以及陆架边缘三角洲；区分了不同成因类型的滩坝主控因素；讨论了重力流类型（泥石流、碎屑流、浊流）及其沉积机制、沉积模式（扇形与非扇形、水道型与非水道型），逐步关注以悬浮载荷为主和以底床载荷为主的异重流沉积过程和沉积特征；确定了细粒沉积岩相类型

和沉积作用过程，并建立了细粒沉积模式；分析了碳酸盐岩沉积环境的多样性、礁滩演化及其控制因素；并且混积岩、微生物岩的沉积特征和沉积模式以及地震沉积学、沉积模拟等日益受到研究者的关注。

1.1 粗粒沉积体系研究进展

粗粒沉积体系包括冲积扇、扇三角洲及辫状河三角洲等类型。

目前冲积扇沉积方面的研究进展主要包括对其发育、演化的主控因素研究的深入以及多元化手段在其沉积模式建立中的运用。

冲积扇发育、演化的主控因素有山前构造活动、气候、物源、山口地貌和基准面升降等。山前构造活动和气候是控制冲积扇发育的主要因素，构造抬升幅度控制冲积扇的形态和规模。气候条件影响母岩的风化程度，控制流域碎屑物质的多少以及水动力条件，进而控制了冲积扇沉积特征。地形起伏控制冲积扇的形态以及沉积物特征，地形坡度陡，则发育的冲积扇厚度大，以砾岩为主；地形相对平缓，冲积扇面积大，以砾岩、砂岩和粉砂岩为主。基准面升降影响冲积扇的发育形态，基准面上升，冲积扇沉积厚、面积小；基准面下降，冲积扇向盆地推进，冲积扇沉积面积大。

研究者们除了研究冲积扇发育及其主要控制因素，还利用多种方法手段来建立冲积扇沉积模式。比如利用沉积物 C^{13} 含量、石英旋回发光（OSL）、电子自旋共振法（ESR）来研究冲积扇的形成时间；利用三维数值模拟研究在构造运动和海（湖）平面升降影响下前陆盆地的冲积扇形态；采用机载激光行迹映射（ALSM）研究冲积扇的形态曲率和斜度，进而建立前陆盆地、克拉通盆地和断陷盆地冲积扇沉积模式^[11-12]。

针对扇三角洲，近10年来，考虑构造背景和沉积主控因素，提出了2种新的沉积模式：由陆架进积至大陆斜坡的大型吉尔伯特型扇三角洲（陆架边缘三角洲）和堆叠于活动断层之上的吉尔伯特型三角洲^[13]；扇三角洲前积层砾质舌状体是由大量斜坡物质以滑坡/滑塌的形式错置形成的。斜坡梯度降低使块状流扩张和减速，从而引发河道口外沉积物的堆积，斜坡沉积中发育特殊的“后堆”叠覆构造（前积层沉积碎屑呈与斜坡30°的方向叠覆）与大型槽状交错层理^[14]。

辫状河三角洲是陆相盆地常见的粗粒沉积类型，其沉积模式和主要控制因素等方面均有别于扇三角洲^[15]。近些年的油气勘探实践和科学研究表明，中国鄂尔多斯盆地、塔里木盆地以及渤海湾盆地均存在辫状河三角洲沉积体系^[16-18]。在大型坳陷湖盆及断陷湖盆周缘，

沉积区邻近物源区, 利于富含砂砾的底负载辫状河进积到湖盆中形成三角洲。该类三角洲发育冲刷面、大型交错层理等浅水沉积构造和间断沉积正韵律, 水下分支河道多叉、砂层厚、延伸较远, 在构造活动、沉积物源、季节性洪水和湖平面变化等因素的共同控制下, 容易形成多期分支河道叠置的粗粒复合砂体^[17-18]。

1.2 浅水三角洲沉积体系研究进展

浅水三角洲概念由美国学者 Fisk 等^[19]首次提出。后来 Postma^[20]在研究低能盆地河控三角洲时指出浅水三角洲主要发育于湖泊浪基面以上, 水深一般在数十米以内, 并根据蓄水体深浅、坡度、河道稳定度、注水速度和负载类型等因素识别出了 8 种浅水三角洲端元。邹才能等^[21]分别对鄂尔多斯盆地晚三叠世古三角洲和鄱阳湖赣江现代三角洲等进行了综合研究, 揭示了敞流型湖盆是浅水三角洲形成的主控因素, 指出分流河道是浅水三角洲的主要骨架砂体。朱筱敏等^[6,16]

认为有利于浅水三角洲形成的地质条件包括盆地整体构造稳定沉降、盆广坡缓、干旱炎热古气候、湖平面频繁升降旋回变化、湖盆水浅动荡、河流能量强、物源充足、供源远等。揭示了湖盆浅水三角洲沉积特征: 砂岩发育交错层理和间断正韵律; 河流作用明显, 分流河道长距离延伸, 可达数十千米; 单砂体厚度较薄(数米), 复合砂体厚度大、分布广(数千平方千米); 湖盆缓坡三角洲前缘相带宽广, 骨架砂体为水下分流河道沉积, 河口坝不太发育。顶积层、前积层和底积层 3 层式结构特征不明显。浅水三角洲发育受多种地质因素控制, 其中气候是控制浅水三角洲发育的重要因素, 干旱气候下的浅水三角洲具有“大平原、小前缘”的特点, 而潮湿气候下的浅水三角洲具有“小平原、大前缘”的特点(见图 1)。

1.3 滩坝沉积体系研究进展

近几年来, 国内外加强了岩性地层油气藏勘探,

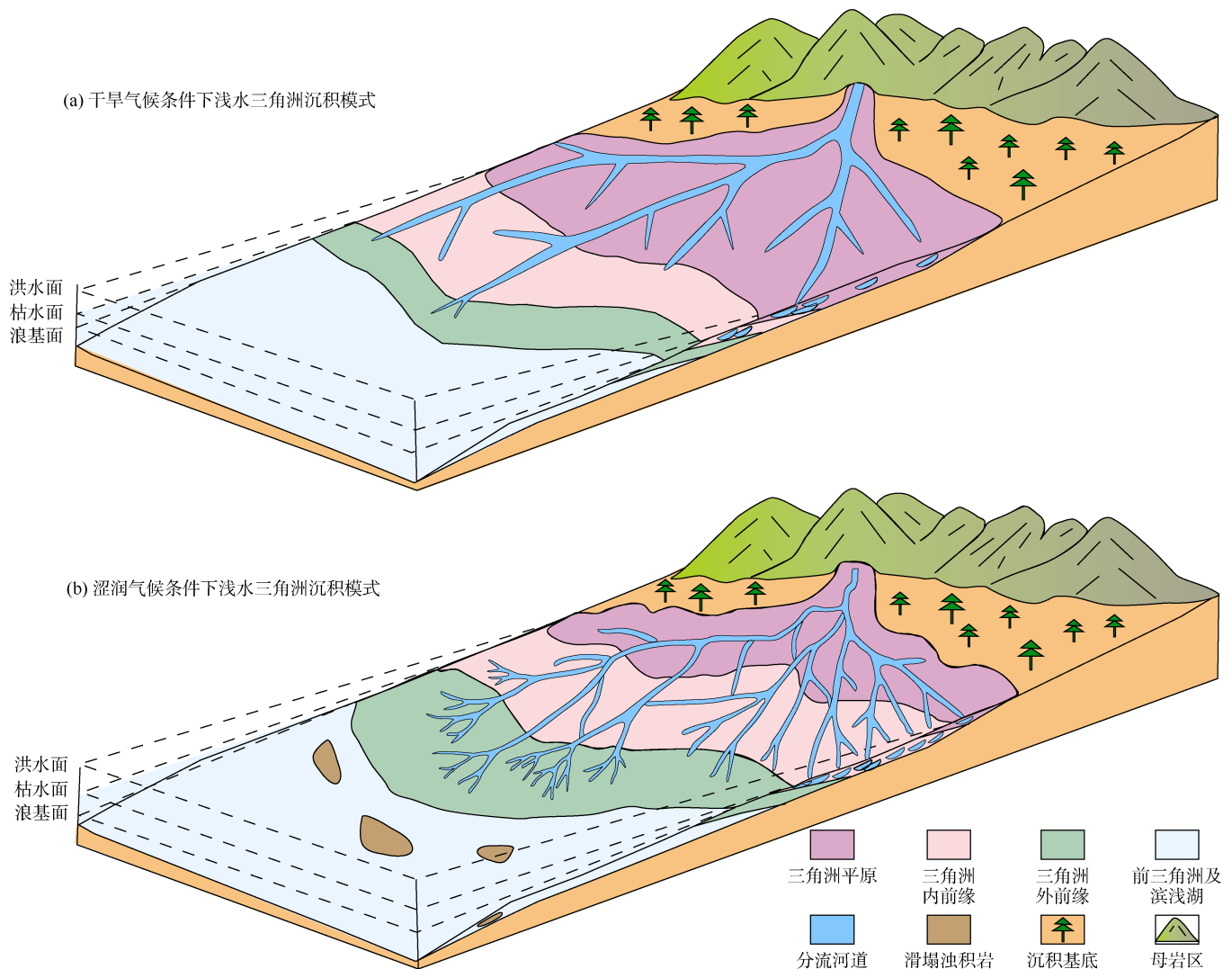


图 1 干旱和湿润气候条件下浅水三角洲沉积模式(据文献[6]修改)

位于湖盆浅水地区的滩坝储集体日益受到研究者的重视。滩坝的形成受控于湖浪和沿岸流。滩砂位于滨浅湖地带,是与岸线平行的、较宽的条带状或席状砂体,垂向上砂泥岩频繁互层,砂层多但厚度较薄(小于 2 m),粒序特征不明显。坝砂分布于滨浅湖地带,与湖岸平行或斜交,主要包括砂坝、砂嘴、障壁岛等,垂向上多表现为薄层泥岩与厚层砂岩互层,多构成反粒序,或呈先反后正的复合韵律。坝砂砂岩层数少但单层厚度相对较大(多为 3~5 m),砂体横剖面呈双凸型或底平顶凸透镜状。

中国学者根据滩坝组成成分,将其划分为陆源碎屑滩坝和碳酸盐岩滩坝。前者包括砾质滩坝和砂质滩坝,后者主要类型为鲕粒灰岩和生物碎屑灰岩滩坝^[22]。一个完整的滩坝沉积相包括坝前、滩坝外侧缘、滩坝内侧缘、滩坝主体(或坝顶)和坝后微相。滩坝的形成受到古构造、古地貌、古物源、古气候、古岸线、古水深、古水动力条件等因素控制,形成了与三角洲、水下古隆起、滨浅湖波浪作用密切相关的多种成因类型的滩坝沉积。古物源控制了滩坝组成成分和发育程度,古地貌和古水动力控制了滩坝规模和分布等^[23]。

1.4 深水重力流沉积体系研究进展

自从 1962 年建立 Bouma 序列以来,研究者逐渐关注重力流类型、沉积机制和沉积模式的研究。Middleton^[24]按支撑沉积物的颗粒机制将重力流划分为浊流、液化流、颗粒流和碎屑流。Lowe^[25]根据流体的流变学特征将重力流划分为流体流、液化流和碎屑流。Shanmugam^[26-27]基于流变学特征将重力流分为牛顿流体和宾汉塑性流体 2 大类,砂质碎屑流就是一种典型的塑性流体。在总结砂质碎屑流鉴别标志的基础上,强调砂质碎屑流是一种重要的重力流沉积类型,并提出了反映深水沉积作用过程的碎屑流沉积模式。在平面上,经典浊流沉积常呈扇形,砂质碎屑流常呈不规则舌状体。

2000 年以来,异重流受到高度关注。它是由河流供源、密度大于周围水体密度、以递变悬浮搬运为主且沿盆底流动的负浮力流体。在现代海洋沉积观测中,Huneke 和 Mulder 等^[28-29]调研全世界 147 条河流,发现 71% 的河流会从河口位置产生不同频次的异重流,进而讨论了异重流形成的环境条件。根据异重流悬浮载荷与底床载荷所占比重又可将其划分为广泛分布在海洋中、以悬浮载荷为主的异重流和在湖泊中较为发育的、以底床载荷为主的异重流。

异重流沉积也逐渐受到中国学者的重视。杨仁

超等^[30]认为鄂尔多斯盆地三叠系延长组深湖沉积中也发育异重流沉积,其旋回性使得储集层产生较明显非均质性,粗粒部分含油性较好。

1.5 细粒沉积研究进展

随着近 10 年国内外页岩油气和致密油气勘探开发的不断深入,细粒岩沉积学研究愈来愈受到重视^[31-34]。细粒沉积岩是指由粒径小于 0.062 5 mm 的细粒沉积物组成的粒径较细、成分复杂的沉积岩,其成分主要包括长英质矿物、黏土矿物、碳酸盐矿物及其他自生矿物等,传统的泥岩、页岩、黏土岩和粉砂岩等概念都属于细粒沉积岩范畴^[32]。在充分吸收和借鉴国外细粒沉积岩研究经验的基础上,中国学者针对海相与陆相盆地细粒沉积岩进行了大量的工作,在岩性-岩相、沉积体系和储集层特征等方面取得了一系列成果认识^[8,32-34]。贾承造等^[35]强调,在非常规油气地质学研究中,应建立细粒沉积体系分类方案,研究其源-储配置关系,明确细粒沉积体系与常规沉积体系的组合关系;姜在兴等^[34]阐述了细粒沉积岩的相关概念、术语及分类,研究了硅质与碳酸盐等细粒物质的沉积动力学特征,以东营凹陷为例建立了细粒沉积岩的沉积模式,并以气候、相对湖平面及物源输入等作为层序主控因素划分细粒沉积层序格架。袁选俊等^[8]总结了细粒沉积岩的研究进展与发展趋势,研究了鄂尔多斯盆地延长组细粒沉积岩沉积体系的分布规律,建立了以湖侵-水体分层为主的湖相富有机质页岩沉积模式,提出“沉积相带、水体深度、缺氧环境与湖流”均是富有机质页岩分布的主控因素。

1.6 碳酸盐岩礁滩沉积体系研究进展

礁滩沉积体系是全球海相碳酸盐岩大油气田赋存的重要储集体类型。近 3 年来,国际沉积学会(IAS 会议)多名学者拓展了全球碳酸盐岩沉积环境、沉积模式及其控制因素的研究,认为除了温暖海水台地可沉积碳酸盐岩外,在 3 000~4 000 m 的深水环境、北极地区、较混水的环境以及多种陆相环境也可形成碳酸盐岩沉积。中国塔里木盆地塔中地区和四川盆地普光、龙岗及元坝地区的深层礁滩碳酸盐岩储集层油气勘探相继获得重要发现,推动了碳酸盐礁滩沉积研究的发展。

继生物礁方面的研究(造礁生物、形成环境、礁相划分、演化阶段)进一步发展,与之伴生的滩(如生物碎屑滩、砾屑砂屑滩、鲕粒滩)演化方面的研究也得到重视。邹才能等^[36]认为滩发育演化可划分为雏滩期、滩核期和衰亡期 3 个阶段。水体条件、地貌形

态和古气候是影响礁滩发育的关键因素。礁滩对古水深敏感,海平面升降变化引起的海水深度变化和动荡程度控制了礁滩体的发育特点和叠置样式。礁滩多发育于海退过程,相对较高的古地貌利于礁滩的发育,且礁滩的高建造速率又强化了古地貌差异。

1.7 混积沉积体系研究进展

混积沉积是碎屑岩与碳酸盐岩之间的过渡沉积类型。进入 21 世纪以来,国内外学者提出了多种混积岩的分类方案^[37]。Mount^[38]采用硅质碎屑砂、硅质碎屑泥、碳酸盐碎屑(异化粒)和灰泥(泥晶)四端元对混积岩进行分类命名,将混积岩划分为间接混合、原地混合、相源混合、蚀源混合 4 种成因类型。混积岩主要由碳酸盐及陆源碎屑成分组成,形成于具备碎屑岩和碳酸盐矿物同时输入或交替输入的物源或地理条件。有利于混合沉积的沉积环境主要是滨海、滨浅湖,其次是浅海陆棚、陆表海、三角洲等浅水或较深水环境。滨海相混积岩发育的控制因素是潮汐作用、相对比较强的水动力条件以及有利于低等生物发育的浅海环境;滨浅湖相混积岩发育的控制因素是频繁的湖平面升降和气候变化。随着对混积岩及混积作用研究的不断深入,相继出现了多种混合沉积相模式,但主要集中于海相沉积环境,而陆相湖盆较少。混积岩中有机质丰度高且易于保存,能发育大套厚层烃源岩,同时发育优质储集层,若能够与盖层相匹配,则易形成油气藏^[39]。

1.8 微生物岩研究进展

微生物岩是指由底栖微生物群落(蓝细菌为主)通过捕获与黏结碎屑沉积物,或经与微生物活动相关的无机或有机诱导矿化作用在原地形成的沉积物(岩)。目前研究较多、分布最广的是微生物碳酸盐岩,其种类繁多,包括叠层石、凝块石、树形石、均一石、核形石和纹理石等。微生物碳酸盐岩主要发育于古老地层中,埋藏较深。针对微生物碳酸盐岩的类型,国内外学者的分类方案分歧较大^[40-42]。Riding^[42]将微生物碳酸盐岩划分为叠层石、凝块石、树枝石和均一石 4 类;梅冥相^[40]将微生物碳酸盐岩划分为叠层石、凝块石、核形石、树形石、纹理石和均一石 6 类。

微生物组分(包括胞外聚合物、微生物膜和微生物席等)是微生物岩形成的生物基础,微生物及其群落的微观形态主要受到微生物内部遗传基因、微生物之间的竞争、太阳照射、沉积环境及成岩过程等因素影响。微生物碳酸盐岩的宏观形态和巨型构造主要与沉积环境的水动力条件、碎屑沉积物的沉积等有关,

微生物岩常生长于温暖、清澈以及较浅水体环境^[43]。

1.9 地震沉积学研究进展

地震沉积学强调利用地震资料的横向分辨率(菲涅耳带)特殊地震参数处理来识别岩性,利用不同成因类型沉积砂体的地貌形态恢复沉积类型和沉积演化历史。自 1998 年美国学者曾洪流提出地震沉积学并在海相沉积盆地开展研究以来,在地震沉积学概念、研究内容、研究方法以及实际应用等方面取得了显著进展,同期,地震沉积学在中国石油地质界获得了相当程度的认知^[44-46]。中国油气勘探已进入复杂油气藏(深层、薄层、非常规油气藏等)的精细勘探阶段。在薄层砂体(砂体厚度小于 10 m,甚至为 1~2 m)之中存有众多油气资源,目前采用常规地质学理论和方法识别薄层砂体较困难,而地震沉积学却能通过地震岩性学和地震地貌学的综合分析(技术关键为相位调整、分频处理、地层切片、沉积解释)来研究沉积岩性、识别薄层砂体、确定沉积类型及其演化。当今世界油气勘探开发已面向复杂地区、复杂构造、复杂沉积类型和复杂沉积盆地,现代沉积学和地球物理技术的快速发展和有机结合所形成的交叉学科——地震沉积学为勘探开发复杂勘探领域油气资源提供了新的途径。

1.10 沉积物理、数值模拟研究进展

沉积模拟研究始于 19 世纪末期,至今已走过了逾百年的研究历程。现阶段的沉积模拟开始由定性转向定量,促进了实验沉积学的快速发展,奠定了现代沉积学的基础。国际上沉积物理模拟领域研究热点集中在深水沉积过程及水道、朵体物理模拟^[47]、牵引流主控下的三角洲动力地貌过程^[48]、河道分叉^[49]和海啸沉积过程^[50]。中国的沉积物理模拟始于 20 世纪 90 年代,通过模拟探讨了入湖斜坡区的坡度对三角洲形成演变(舌状和鸟足状)的控制作用^[51]和不同湖水深度下辫状河-扇三角洲的定量演变趋势,提出了湖水深度控制三角洲砂体形态和进积速率的新认识,识别出三角滩沉积燕尾式和先主流后分流自平衡调整式 2 种加积方式。系统模拟研究了冲积体系、河流、三角洲、浊流体系,使中国的模拟沉积学研究进入一个新的阶段^[52-53]。

随着物理模拟的深入,借助计算机的高速计算能力,数值模拟得以快速发展。沉积数值模拟的国际热点主要为曲流河及辫状河中侵蚀、迁移和沙坝的多样性及演化^[54]、三角洲沉积过程的水力学模型和扩散模型的建立、完善及应用^[55]。此外,重力流沉积的数值模拟也逐渐引起重视^[56]。中国沉积数值模拟研究主要集中在

在2个方面：一是以几何模型为基础的层序模拟（基于Kendall开发的Sedpak或类似模拟系统）^[57]，二是应用SedSim系统的湖盆三角洲沉积过程的模拟^[58]。

2 国内外油气沉积地质学发展对比

在碎屑岩沉积与岩相古地理方面，国外重点开展了海相、海陆过渡相沉积研究，建立了河流、三角洲、河口湾、海底扇等经典沉积模式，指导了海相、海陆过渡相碎屑岩油气勘探。中国重点开展了陆相沉积研究，建立了冲积扇、河流、（浅水）三角洲、滩坝、重力流等多种典型沉积模式，以及陆相断陷、坳陷、前陆3类原型盆地的沉积充填模式，有效指导了中国陆相油气勘探与开发。河流、三角洲、重力流等传统碎屑岩沉积学研究已比较成熟，国内外已基本接轨。中国学者对浅水三角洲研究始于20世纪80年代，提出了多种分类方案及沉积模式，研究内容主要涉及形成地质背景、沉积动力学、微相构成及结构样式等多个方面^[6,17]。随着近年对坳陷湖盆中心厚砂体成因机理的深入研究，认识到湖盆中心厚层块状砂体是砂质碎屑流成因并建立了相应成因沉积模式^[7]。

随着非常规油气勘探的深入，细粒沉积生物化学作用和沉积机理等研究取得了重要进展，国外学者认为海（湖）平面变化、构造作用、沉积物源、盆地底形会影响细粒沉积相带的分布，建立了海相黑色页岩海侵、门槛和洋流上涌3类沉积模式。中国根据湖泊构造成因、地理位置和气候等条件，确定了中—新生代不同类型湖泊沉积特征与沉积亚、微相（岩相）划分，探讨了湖泊物理化学、生物过程、沉积作用特点、富有机质页岩分布以及早期成岩作用等，开展了细粒沉积-有机相研究，建立了湖盆细粒沉积分类方案与富有机质页岩发育模式^[8,33-34]。

国外已建立了海相盆地不同台地背景下碳酸盐岩沉积模式，明确了不同沉积相带的亚相与微相特征，系统分析了地质历史时期古生物生态学与生物礁演化特征。结合中国碳酸盐岩沉积特征，中国学者在碳酸盐岩岩石学分类、台地礁滩沉积模式与演化、古老小克拉通碳酸盐岩沉积等方面取得了系列创新性成果，指出继承性发育的碳酸盐岩台地边缘、低倾斜度的缓坡古地貌背景和相对宽缓的开阔台地内水动力高能区控制了礁/滩体的规模分布^[9,36]。

微生物碳酸盐岩是新近发现的具有勘探潜力的古老而深埋的碳酸盐岩地质体，有可能成为继礁滩、岩溶之后又一个碳酸盐岩油气勘探新领域。国外对微生物

碳酸盐岩的研究较早，在冈瓦纳大陆的非洲、阿拉伯板块、印度—巴基斯坦和澳大利亚以及西伯利亚的里菲系、震旦系—寒武系、侏罗系微生物碳酸盐岩中发现了丰富油气。中国大规模微生物碳酸盐岩多发育于下古生界—前寒武系。四川、塔里木、鄂尔多斯、渤海湾等盆地深部发育的古老海相微生物碳酸盐岩储集层，将是未来的研究热点^[43]。

国外沉积学研究方法先进成熟，形成了包括现代沉积考察、数字露头与岩心、薄片鉴定与粒度分析、水槽模拟、数字正演/反演模拟、地震沉积学（包括地震属性分析）、沉积古环境恢复等方法技术体系。中国目前主要是在引进国外方法技术/软件基础上的开发应用，在现代沉积考察、野外露头沉积分析、软件开发、数字模拟与物理模拟等方面与国外存在一定差距^[53,56]。

3 中国含油气盆地沉积学发展的讨论

3.1 中国含油气盆地沉积学发展面临的问题

在含油气盆地沉积地质学研究中，陆相湖盆沉积体系及其模式的建立、地球物理和模拟方法技术的应用为沉积学理论发展和工业化应用提供了基础。但中国陆相湖盆具有多物源、近物源、构造气候变化快、源汇系统规模小、混源沉积发育的特点，给沉积地质学理论和技术创新带来了挑战。

中国油气沉积学发展还面临诸多挑战：①如何恢复原型盆地的沉积面貌、古地理格局及重大构造变革期的多尺度构造古地理；②如何说明中国不同类型沉积盆地地质背景、构造变革与沉积岩性、沉积相带的差异性，并进一步通过沉积学新理论解释古老深埋老地层砂体发育规律及其与深埋新地层砂体发育规律的差异性；③如何建立多尺度、能够指导油气勘探与开发的具有中国地域特色的沉积体系组合和沉积模式；④如何建立中国古老小克拉通盆地碳酸盐岩微地块沉积模式以及明确白云岩与微生物岩成因；⑤如何加强海、陆相盆地细粒与混积沉积体系特征和沉积动力学机理研究；⑥如何加强陆相盆地沉积动力学机制及其影响因素研究，并开展物理和数值模拟等实验沉积学研究；⑦如何确立深埋地层多尺度层序地层格架与沉积体系之间的关系，并采用源-汇系统新观点说明沉积体系分布；⑧如何在少井、地震资料品质较差的情况下，创新研究方法开展定量古地理研究；⑨如何建立沉积古地理与油气勘探开发之间的对应关系，以指导油气勘探开发；⑩如何创新与沉积学发展密切相关的交叉学科，如深时沉积学、构造沉积学、气候沉积学、

火山沉积学等。

3.2 中国含油气盆地沉积地质学理论发展趋势

目前,国际沉积学仍将围绕资源、环境、灾害和全球变化4个方面开展创新研究工作。全球沉积和气候变化、全球古地理、层序地层学、储集层地质学、盆地分析和定量沉积学等得到了不断发展和完善,构造沉积学、气候沉积学、火山沉积学等新的分支学科和交叉学科也陆续出现。

随着能源需求的增长和勘探技术的进步,中国松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地、塔里木和柴达木盆地均已步入深层油气勘探阶段,中国沉积学家将追踪当前全球沉积学研究3大热点^[5](全球气候变化沉积记录、深水沉积与事件沉积、碳酸盐与微生物沉积),不断形成中国多类盆地背景下的粗粒沉积、宽缓湖盆浅水三角洲沉积、滩坝沉积、湖盆重力流体系、咸化湖盆微生物作用沉积(灰泥丘)、海相滨岸砂岩沉积、火山碎屑沉积、裂隙槽有机质沉积和碳酸盐岩台地等沉积理论体系及其相关研究方法。

综合分析中国含油气盆地沉积学发展面临的问题以及国外沉积学研究存在的差距,作者认为未来油气沉积地质研究将会在湖盆源-汇系统、不同类型湖盆沉积动力学、浅水三角洲与重力流沉积模式以及沉积学研究方法技术等多个方面得到发展和加强:①基于源汇系统理论的湖盆沉积学研究。结合中国不同类型盆地构造演化阶段特征,深入研究物源区母岩及汇水面积、沉积物搬运通道形成发育与定量刻画、构造变化带对物源通道的控制、沉积区沉积类型与沉积响应特征等。②多类型盆地沉积动力学研究。结合中国盆地类型和构造背景研究,将形成粗粒沉积、宽缓湖盆浅水三角洲沉积、滩坝沉积、重力流等沉积动力学理论,深入沉积物侵蚀、搬运、堆积过程、机制和沉积环境效应等方面的研究。③发展构造沉积学。加强青藏高原、东南亚(特别是南海)、印度支那和印度板块地区再造山作用的研究,提高对不同级次构造活动与沉积作用之间因果关系的认识。④事件沉积学研究。加强不同地质时期构造运动、古地震、古气候的突变(洪水作用)、火山活动等诱发因素造成的正常连续沉积或不连续沉积序列研究,以及构造事件、地震事件等触发机制与事件沉积作用的相互关系研究。⑤深化陆相湖盆深层细粒及有机质沉积过程、物质转化条件、作用机制以及微相(岩相)划分、沉积模式等方面的研究。⑥不同构造背景、反映生物差异性沉积特征(特别是低等微生物碳酸盐岩)的碳酸盐岩台地模式(老

地层常发育“小礁大滩”沉积模式,新地层发育大型生物礁滩沉积模式)研究^[37,59],将实现从静态碳酸盐沉积模式转变为活动构造与碳酸盐岩台地演化的动态研究,灰泥丘(微生物岩)有可能成为继礁滩、岩溶之后又一个碳酸盐岩油气勘探的新领域。⑦生物作用与沉积(成岩)作用的关系研究。生物具有搬运和沉积作用特征,随着研究深入,沉积学在地球生物框架下将会产生一个新的分支学科——微生物席沉积学,即以微生物席为研究对象,研究地球早期生命演变、探索生物圈对水圈和大气圈的长时间影响。⑧不同类型沉积盆地沉积体系组合和沉积模式研究。通过研究不同类型沉积盆地构造背景和演化特征,结合气候变化、海(湖)平面变化、沉积物源供给等因素的分析,以期建立多尺度的沉积体系组合样式和沉积模式。

3.3 中国含油气盆地沉积地质学研究方法发展趋势

未来中国含油气盆地沉积地质学的研究方法和技术发展将追踪国际前沿,发展创新沉积学研究方法技术,建立反映中国古老海相盆地和中新生代陆相盆地地质特征的模拟方法和实验技术。将在以下几个方面得到细化、深化的发展:①多学科交叉渗透综合定量研究方法。依据现代沉积学和地球物理学最新发展,综合研究岩性组合、沉积构造、沉积序列以及地球物理响应特征,促使地质学由定性描述向定量研究发展。②由过去的宏观沉积相研究细化到现在的沉积砂体和岩石相分析,系统探索砂体成因、沉积过程、控制因素等动态特征。③现代沉积考察、水槽实验和数值模拟等将成为未来沉积地质学研究的重要手段,实验沉积地质学的发展使地质学的研究从以野外观察、描述、归纳为主,发展到归纳与演绎并重的阶段。④地震岩性学和地震地貌学方法研究。鉴于中国陆相湖盆还存在诸如砂体储集层薄、岩性-速度关系变化大、地震分辨薄层砂体难等科学和技术难题,应建立一套适合陆相盆地的地震岩性学新方法,创立各类陆相盆地的地震地貌学模式,建立陆相盆地地震沉积学研究规范。⑤创新具有中国特色的测井沉积解释模型,发展测井沉积学研究理论、方法与技术,实现不同层次的沉积类型的有效识别和岩性油气藏高效勘探。⑥多类型(深层)砂体及储集层定量预测技术是未来沉积地质学研究的热点和难点。该技术关键在于建立正确的地质模型和数学模型,采用多学科综合方法定量预测(深层)砂体规模及其物性等。⑦发展和完善井震结合的砂体描述和构型技术是沉积地质学研究及油气勘探(包含少井区深层和海洋深水油气勘探等)的重要关键。⑧利

用测井和地震资料开展碳酸盐岩岩相古地理恢复研究,在(深层)地质资料稀少情况下,发展碳酸盐岩岩石结构组分测井定量识别及碳酸盐岩岩相地震识别等多项新技术,编制定量化的岩相古地理图件。⑨发展完善沉积物理模拟和数值模拟技术,建立反映不同沉积特征的地质概念模型,充分依据水动力理论,建立多级别水槽模拟装置和多类别数值模拟软件,模拟不同环境的沉积过程和结果。⑩在未来沉积地质学研究和油气勘探开发过程中,利用计算机和互联网技术,综合利用岩心、钻井、测井、试井、地震等各种资料进行沉积储集层建模,解决沉积相、砂体分布和储集层物性以及流体时空分布问题,计算机建模技术将是沉积地质学研究中最复杂、最核心的技术。

4 结论与建议

随着能源需求的增长和油气勘探难度的增加,中国已逐渐形成了具有本国特色的沉积地质理论及方法技术,在陆相碎屑岩、海相碳酸盐岩、深水沉积以及火山碎屑岩等方面获得了系列创新成果,大大提高了沉积地质学研究水平,推动了油气的勘探开发。

针对中国当前在含油气盆地沉积地质学理论及方法技术方面的研究现状以及与国外存在的差距,结合中国沉积盆地油气勘探实际,建议在下列方面加强中国含油气盆地沉积地质学研究工作:①加强沉积盆地重大构造期、重大事件沉积岩相古地理研究。将沉积学与构造地质学相结合,重建不同历史时期的古气候与古地理格局,研究全球性黑色烃源岩与红层分布、不同级次层序界面分布、湖-海平面响应等基础问题。

②注重陆相盆地沉积动力学机制研究。根据中国盆地构造背景特点,应用源-渠-汇系统分析方法,分析盆地构造、古地貌和古环境特征,研究造山带剥蚀与沉积盆地的沉积过程、地貌演化、物源以及气候对沉积体的影响,建立不同类型沉积盆地、不同构造演化阶段沉积体系模型以及不同尺度构型单元的地质模型等。

③深化碳酸盐岩微地块沉积模式研究。根据中国古老小克拉通盆地发育特点,通过典型碳酸盐岩沉积体系分析,研究古老大型碳酸盐岩台地的建造和破坏过程,发展完善古老小克拉通盆地碳酸盐岩沉积模式;解剖大面积分布的白云岩与微生物岩成因,解决白云石成因机理与分布预测等问题。④创新建立细粒与混积岩研究方法体系,强化研究细粒、混积沉积的地球化学与生物过程,建立统一的岩性、岩相分类体系;通过沉积物理、模值模拟,明确细粒、混积岩沉积动力学机理,

明确富有机质页岩分布规律。⑤重视前沿方法技术在中国油气地质理论及油气勘探中的应用;开展现代沉积、露头 and 密井网区沉积砂体的精细解剖,加强水槽模拟和数值模拟实验,结合现代沉积研究,重新认识深层砂体成因,深化多类型沉积体系形成机理;建立不同尺度沉积地质模型,用于指导深层油气勘探开发评价工作。⑥深化沉积地质学新理论、新方法、新技术与中国地质条件的结合,解决中国油气勘探的实际问题,丰富和发展具有中国地域特色的沉积地质学理论并形成特色技术。

致谢:感谢中国科学技术协会、中国石油学会组织开展油气地质学科发展研究,感谢赵文智院士和胡素云教授的技术指导,感谢刘芬、谈明轩、张昕、杨殊凡等人对该文的技术贡献。

参考文献:

- [1] 叶连俊,孙枢,李继亮. 中国的沉积学进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1988, 7(2): 77-80.
YE Lianjun, SUN Shu, LI Jiliang. The sedimentary progress and expectation in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 1988, 7(2): 77-80.
- [2] 孙枢. 中国沉积学的今后发展: 若干思考与建议[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 3-10.
SUN Shu. Sedimentology in China: Perspectives and suggestions[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 3-10.
- [3] 孙龙德,方朝亮,李峰,等. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 385-396.
SUN Longde, FANG Chaoliang, LI Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 385-396.
- [4] 孙龙德,方朝亮,李峰,等. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 143-151.
SUN Longde, FANG Chaoliang, LI Feng, et al. Innovations and challenges of sedimentology in oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 143-151.
- [5] 鲜本忠,朱筱敏,岳大力,等. 沉积学研究热点与进展: 第19届国际沉积学大会综述[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 816-826.
XIAN Benzong, ZHU Xiaomin, YUE Dali, et al. Current hot topics and advances of sedimentology: A summary from 19th international sedimentological congress[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(6): 816-826.
- [6] 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 89-99.
ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao sag, Songliao basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 89-99.
- [7] 邹才能,赵政璋,杨华,等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1065-1075.
ZOU Caineng, ZHAO Zhenzhang, YANG Hua, et al. Genetic

- mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- [8] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34-43.
YUAN Xuanjun, LIN Senhu, LIU Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34-43.
- [9] 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 477-480.
MA Yongsheng, GUO Xusheng, GUO Tonglou, et al. Discovery of the large scale Puguang gas field in the Sichuan basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting[J]. *Geological Review*, 2005, 51(4): 477-480.
- [10] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 1-12.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 1-12.
- [11] CHAKRABORTY P P, PAUL P. Depositional character of a dry-climate alluvial fan system from Palaeoproterozoic rift setting using facies architecture and palaeohydraulics: Example from the Par Formation, Gwalior Group, central India[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 298-315.
- [12] MURAVCHIK M, BILMES A, D'ELIA L, et al. Alluvial fan deposition along a rift depocentre border from the Neuquén Basin, Argentina[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 70-89.
- [13] UROZA C A, STEEL R J. A highstand shelf-margin delta system from the Eocene of West Spitsbergen, Norway[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 203(s3/s4): 229-245.
- [14] ETHRIGDE F G, WESCOTT W A. Tectonic setting, recognition and hydrocarbon reservoir potential of fan-delta deposits[M]//KOSTER E H, STEEL R J. *Sedimentology of gravels and conglomerates*. Calgary: CSPG, 1984: 217-235.
- [15] 薛良清, GALLOWAY W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 41(2): 141-154.
XUE Liangqing, GALLOWAY W E. The classification of fan-delta, braided delta and delta systems[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 41(2): 141-154.
- [16] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. *中国石油大学学报*, 2013, 37(5): 7-14.
ZHU Xiaomin, PAN Rong, ZHAO Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, 37(5): 7-14.
- [17] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 19-28.
ZHU Xiaomin, DENG Xiuqin, LIU Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 19-28.
- [18] 董月霞, 杨贵, 陈蕾, 等. 渤海湾盆地辫状河三角洲沉积与深部储集层特征: 以南堡凹陷南部古近系沙一段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 385-393.
DONG Yuexia, YANG Shang, CHEN Lei, et al. Braided river delta deposition and deep reservoir characteristics in Bohai Bay Basin: A case study of Paleogene Sha 1 Member in the south area of Nanpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 385-393.
- [19] FISK H N, KOLB C R, MCFARLAN E, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(2): 76-99.
- [20] POSTMA G. An analysis of the variation in delta architecture[J]. *Terra Nova*, 1990, 2(2): 124-130.
- [21] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流湖陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 813-825.
ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, ZHANG Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813-825.
- [22] 杨剑萍, 李亚, 陈瑶. 冀中坳陷蠡县斜坡沙一下亚段碳酸盐岩滩坝沉积特征[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(6): 21-28.
YANG Jianping, LI Ya, CHEN Yao. Sedimentary characteristics of the carbonate rock beach bar of lower first member of Shahejie Formation in the Lixian slope of Jizhong depression[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2014, 29(6): 21-28.
- [23] 邓宏文, 高晓鹏, 赵宁, 等. 济阳坳陷北部断陷湖盆陆源碎屑滩坝成因类型、分布规律与成藏特征[J]. *古地理学报*, 2010, 12(6): 737-747.
DENG Hongwen, GAO Xiaopeng, ZHAO Ning, et al. Genetic types, distribution patterns and hydrocarbon accumulation in terrigenous beach and bar in northern faulted-lacustrine-basin of Jiyang Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(6): 737-747.
- [24] MIDDLETON G V. Experiments on density and turbidity currents: II. Uniform flow of density currents[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1966, 3(5): 627-637.
- [25] LOWE D R. Sediment gravity flows: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits[M]//DOYLE L J, PILKEY O H. *Geology of continental slopes*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1979: 75-82.
- [26] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2-10.
- [27] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm(1950s-1990s): Deep-water processes and facies models: A critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [28] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits: A review[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 6(6/7/8): 861-882.
- [29] HUNEKE H, MULDER T. Deep-sea sediments[M]. London: Elsevier, 2011.
- [30] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 10-20.
YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic Lacustrine Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 10-20.
- [31] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [32] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 198-208.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, WANG Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 198-208.
- [33] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(1): 6-15.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, DENG Yuan, et al. Several issues in

- studies on fine-grained sedimentary rocks[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(1): 6-15.
- [34] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积研究的几个问题[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- JIANG Zaixiang, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine grained sedimentary rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [35] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 1-10.
- JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Very important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 1-10.
- [36] 邹才能, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 641-651.
- ZOU Caineng, XU Chunchun, WANG Zecheng, et al. Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 641-651.
- [37] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 68.
- GUO Fusheng, YAN Zhaobin, DU Yangsong. The discussion of mixed deposition, mixed rock and sequence[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 68.
- [38] MOUNT J F. Mixing of silicilastics and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [39] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2): 297-307.
- FENG Jinlai, HU Kai, CAO Jian, et al. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 297-307.
- [40] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 222-232.
- MEI Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: Complementing the classification of limestones[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 222-232.
- [41] SHEEHAN P M, HARRIS M T. Microbialite resurgence after the Late Ordovician extinction[J]. *Nature*, 2004, 430(430): 75-78.
- [42] RIDING R. Classification of microbial carbonates[M]//RIDING R. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 21-51.
- [43] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 807-823.
- LUO Ping, WANG Shi, LI Pengwei, et al. Review and prospective of microbial carbonate reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 807-823.
- [44] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 417-426.
- ZENG Hongliu. Seismic sedimentology in China: A review[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 417-426.
- [45] 朱筱敏, 李洋, 董艳蕾, 等. 地震沉积学研究方法和岐口坳陷沙河街组沙一段实例分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 152-162.
- ZHU Xiaomin, LI Yang, DONG Yanlei, et al. The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou depression of North China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 152-162.
- [46] 董艳蕾, 朱筱敏, 耿晓洁, 等. 利用地层切片研究陆相湖盆深水滑塌浊积扇沉积特征[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 386-396.
- DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, GENG Xiaojie, et al. Using the stratal slice to study the depositional characteristics of deep-water slumped turbidite fans in continental lake basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 386-396.
- [47] SAWYER D E, FLEMINGS P B, BUTTLES J. et al. Mudflow transport behavior and deposit morphology: Role of shear stress to yield strength ratio in subaqueous experiments[J]. *Marine Geology*, 2012, 307-310: 28-39.
- [48] SHAW J B, MOHRIG D, WHITMAN S K. The morphology and evolution of channels on the Wax Lake Delta, Louisiana, USA[J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2013, 118(3): 1562-1584.
- [49] JEROLMACK D J, MOHRIG D. Conditions for branching in depositional rivers[J]. *Geology*, 2007, 35(5): 463-466.
- [50] JOHNSON J P L, DELBECQ K, KIM W, et al. Experimental tsunami deposits: Linking hydrodynamics to sediment entrainment, advection lengths and downstream fining[J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 478-490.
- [51] 赖志云, 周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验[J]. *沉积学报*, 1994, 13(2): 37-44.
- LAI Zhiyun, ZHOU Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 13(2): 37-44.
- [52] 张春生. 冲积体系及三角洲物理模拟研究[D]. 成都: 成都理工学院, 2001.
- ZHANG Chunsheng. The study of physical modelling of alluvial systems and delta[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001.
- [53] 杨华, 牛小兵, 罗顺社, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂体重力流沉积模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 322-332.
- YANG Hua, NIU Xiaobing, LUO Shunshu, et al. Research of the simulated experiment on gravity flow deposits of tight sand bodies of Chang 7 Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 322-332.
- [54] PARKER G, SAWAI K, IKEDA S. Bend theory of river meanders: Part 2: Nonlinear deformation of finite-amplitude bends[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 115: 303-314.
- [55] TURMEL D, LOCAT J, PARKER G. Morphological evolution of a well-constrained, subaerial-subaqueous source to sink system: Wabush Lake[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(6): 1636-1664.
- [56] SEQUEIROS O E, NARUSE H, ENDO N, et al. Experimental study on self-accelerating turbidity currents[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(C5): 1343-1359.
- [57] 朱红涛, 刘可禹, 杜远生, 等. 可容纳空间转换系统的定量模拟[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(5): 819-828.
- ZHU Hongtao, LIU Keyu, DU Yuansheng, et al. Quantitative simulation and new consideration on the transformation system of the accommodation space[J]. *Earth Science—China University of Geosciences*, 2009, 34(5): 819-828.
- [58] 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 1005-1013.
- HUANG Xiu, LIU Keyu, ZOU Caineng, et al. Forward stratigraphic modelling of the depositional process and evolution of shallow water deltas in the Poyang lake south China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 1005-1013.
- [59] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545-554.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545-554.

第一作者简介: 朱筱敏 (1960-), 男, 江苏扬州人, 中国石油大学 (北京) 地球科学学院教授, 从事沉积储集层和层序地层学研究。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 中国石油大学 (北京) 地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-01-16 修回日期: 2016-06-25

(编辑 魏玮 王大锐)