

沉积盆地“源-汇”系统研究新进展

徐长贵,杜晓峰,徐伟,赵梦

[中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津300459]

摘要:近年来,“源-汇”研究已逐渐成为沉积学领域颇为关注的重要课题。系统梳理了国内外“源-汇”系统研究取得的新进展,分析总结了沉积体系“源-汇”研究思路与多方法综合分析技术,并指出了“源-汇”系统研究未来的发展趋势。大陆边缘盆地沉积体系的“源-汇”研究集中于沉积事件的触发机制和沉积物的搬运过程,复杂陆相断陷盆地在储层预测方面创新形成了“源-汇”时空耦合控砂原理及相应的控砂模式。“源-汇”研究将多方法物源示踪分析应用于古源区恢复与古水系重建中。针对陆相断陷盆地局部物源背景下的“源-汇”系统,潜在剥蚀区的层序地层学精细研究恢复了隐伏物源区地质历史时期的真实面貌。“源-汇”系统要素的量化表征与储层的定量预测正在逐步探索之中,建立从源到汇的定量响应关系是最终目的,而在“源-汇”系统量化约束下的沉积过程模拟,为少井条件下储层预测提供了有力支持。重视物源体系研究、量化储层预测、多学科、多方法融合、过程化与机制化研究,形成工业化应用标准是未来沉积体系“源-汇”研究的发展趋势。

关键词:源-汇;物源示踪;时空耦合控砂原理;局部物源;量化;沉积模拟;大陆边缘盆地;陆相断陷盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin

Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, Zhao Meng

(Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: The “Source-to-Sink” system has been the focus of sedimentology research in recent years. In this paper, new research advances of “Source-to-Sink” at home and abroad are systematically reviewed, research methods and multi-methods integrated analysis technologies of the “Source-to-Sink” system are summarized and research trends are predicted. The “Source-to-Sink” system in continental margin basins focuses on the drivers of sedimentary event and transportation process, while in complex continental rift basins, principle of temporal-spatial coupled “Source-to-Sink” sandstone control and corresponding sandstone distribution models have been innovatively established. The “Source-to-Sink” research also focuses on application of multiple methods in sediment tracing to reveal paleo-provenance and reconstruct paleo-drainage. For the “Source-to-Sink” system in a provenance of continental rift basins, detailed analysis of sequence stratigraphy in potential eroded zone recovers the initial features of disappeared provenance in geological history. Quantitative characterization of the elements in the “Source-to-Sink” system and quantitative reservoir prediction has been under study, and establishment of quantitative relationship from source to sink is the final purpose. Sedimentary process simulation under the quantitative constraint provides significant support to reservoir prediction in sparse wells conditions. The research trends of “Source-to-Sink” include the following aspects: to improve provenance system research, to experiment on quantitative reservoir prediction, to combine multiple subjects and methods, to emphasize on process and mechanism analysis, and to form industrial application standard.

Key words: Source-to-Sink, provenance tracing, principle of spatial-temporal coupled sandstone control, regional provenance, quantification, sedimentary simulation, continental margin basin, continental rift basin

美国国家自然科学基金委员会在1998年正式启动了“洋陆边缘计划”(MARGINS Program),其沉积学与地

层学项目组研究专题为“源-汇”(Source-to-Sink,以下简称S2S)^[1]。1999年欧洲成立InterMargins,2002年国

收稿日期:2016-08-03;修订日期:2016-11-13。

第一作者简介:徐长贵,男,(1971—),博士、教授级高级工程师,石油地质与勘探。E-mail: xuchg@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05023-002)。

际大洋钻探计划 IODP 开始关注大陆边缘沉积作用,日本在 2003 年结合 InterMargins 提出“亚洲三角洲演化与近代变化”。国际 S2S 研究的焦点在于沉积物从源到汇全过程的驱动机制、古物源区演化恢复与古水系重建^[2-18],我国也于 2000 年启动了国家重大基础研究规划项目“中国边缘海的形成演化及重要资源的关键问题”。在南海西部莺歌海盆地、琼东南盆地以及南海北部珠江口盆地,对“源”区与“汇”区综合运用多种物源分析手段,进行了物源体系恢复等相关研究^[19-25];在南海北部的珠江口盆地尝试建立了中新统被动大陆边缘陆-洋“源-汇”系统剥蚀-沉积过程的一般模式^[26-27];针对复杂陆相断陷盆地,渤海海域创新引入“源-汇”思想,形成了“源-汇”时空耦合控砂理论,显著地提高了储层预测的成功率,这也是“源-汇”理论在国内油气勘探工作中的首次成功应用^[28]。“源-汇”研究已逐渐成为世界范围内地球科学领域颇为关注的重要课题。

总体而言,“源-汇”系统及相关理论的研究仍处于初级阶段,针对不同类型的盆地、不同的时间尺度,研究方法还有待完善,理论与技术手段还未成熟。本文旨在系统梳理国内外现阶段“源-汇”系统研究取得的新进展,包括大陆边缘沉积物搬运过程、物源示踪研究,陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论的建立及物源体系研究,“源-汇”系统量化研究探索以及在此约束下的沉积过程模拟,分析总结“源-汇”系统“过程化”、“机制化”的研究思路与多方法综合的沉积物分析技术,为“源-汇”系统研究在实际勘探工作,尤其是复杂陆相断陷盆地油气储层预测工作中的应用与发

展提供设想与借鉴。

1 沉积体系“源-汇”研究理论新进展

1.1 大陆边缘“源-汇”研究主要内容

基于 S2S 研究计划,国外学者在大陆边缘“源-汇”系统沉积过程研究方面取得了丰富的成果。大陆边缘沉积体系的“源-汇”研究集中于沉积事件的触发机制、沉积物的搬运方式与沉积响应特征等研究。

“源-汇”研究的最终目的是建立完整的沉积过程。S2S 专题以新西兰大陆边缘 Waipaoa 沉积体系为典型代表,基于最后一次冰期沉积地层记录至近现代地震、风暴和人类活动事件的记录,建立了完整的从源(山)到汇(洋)的系统,并对其间每个过程体系中沉积物的搬运与分散方式进行了描述^[3-4]。①对于源头流域的物源,沉积地层所记录的暴风雨与地震事件是其形成与搬运的主要驱动力;②陆上山地到泛滥平原,夏季湿润河谷冲刷,冬季(冰期)河道充填残留沉积物;③泛滥平原到海岸平原,辫状河体系逐渐汇聚为单支主河道,向海岸区输送沉积物;④陆架区沉积物储存与过路作用,陆架区既可以作为第一个沉积物汇聚区,又可以作为下游沉积区的物源供应区;⑤陆坡沉积物搬运路径与汇聚,严重沟谷化的上斜坡、坡度较缓的中斜坡平台、变形带前缘再次 V 型侵蚀的河口、变形形成的大型平台共同控制了沉积物的搬运与储存;⑥深海汇聚区沉积物以崩塌作用沉积在不断变化中的斜坡前缘(图 1)。

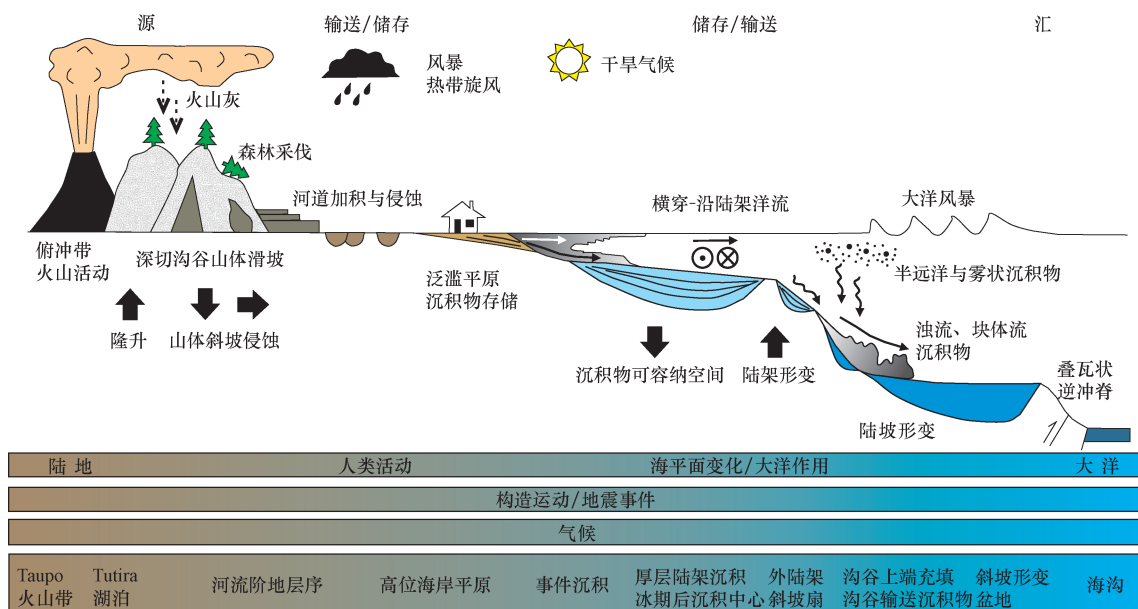


图 1 Waipaoa“源-汇”系统动力机制与搬运过程的响应特征^[4]

Fig. 1 Main drivers and related processes together with associated responses features through the Waipaoa “Source-to-Sink” system^[4]

国内近年针对被动大陆边缘“源-汇”系统也开展了一些尝试性的研究,主要集中于南海北部的珠江口盆地。陆架斜坡至深海区是从陆到洋的源-汇系统的最终沉积区,这一地貌带的研究常常聚焦于陆架坡折带的地貌与海底扇体系发育关系。祝彦贺等^[26]提出,对于陆架-陆坡的“源-汇”系统而言,影响其发育的主要控制因素包括沉积物供给强度、相对海平面变化、陆架坡折演化和海洋水动力作用,各要素之间的辩证关系决定了系统的运转特征。林畅松^[27]则总结了珠江口盆地陆-洋“源-汇”系统剥蚀-沉积过程的一般模式,划分出3类具有特定物源背景、水道或沟谷体系,以及相应的沉积体系的“源-汇”类型,不同区带的沟道和沉积体系的形态存在明显差异,反映了地形地貌、构造作用及海平面变化等多因素的控制作用。

从含油气盆地沉积地质分析的角度,研究从物源、水道到沉积体的不同“源-汇”类型的地形地貌、水系构成、沉积分散过程及沉积体的形态和分布,将是一项极其重要的研究课题。揭示不同“源-汇”系统的地质结构和沉积构成的控制机制,即构造、气候和海平面变化等因素相互作用的地表地球动力学过程,是建立具有预测或类比意义的“源-汇”模式的关键。

1.2 陆相断陷盆地“源-汇”研究逐渐兴起并在油气勘探中发挥重要作用

陆相断陷盆地构造极其复杂,受构造幕式多期活动和盆内盆外多物源水系影响,沉积相变化快,富砂沉积储层预测困难。近年来,以渤海海域为代表,在总结分析传统储层预测思路与方法的基础上,结合渤海勘探实践,创新形成了陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论,显著地提高了储层预测成功率。

1.2.1 陆相断陷盆地控砂作用研究传统方法及存在问题

以往研究揭示,砂岩体的形成和分布受多种地质因素的控制。总结国内对于控砂因素的认识一般包括古地貌和层序发育模式两大方面,其中古地貌又包括沟谷类型和坡折带类型。

沟谷是沉积物搬运的主要通道。20世纪60年代学者们就注意到了沟谷体系对扇体形成的重要作用,沟谷与扇体一般具有较好的对应关系^[29-30]。国内胜利油田在东营凹陷北部陡坡带勘探过程中认识到了沟-扇对应关系,有效地指导了陡坡扇砂砾岩体的勘探。在渤海海域,古沟谷研究较为深入,常见的沟谷类型主要包括U型沟谷、V型沟谷、W型沟谷、单

断槽型和双断槽型,不同类型的沟谷具有不同的输砂能力^[31]。

在坡折带控砂方面,国内学者们早已认识到,同沉积断裂活动导致的古地貌差异,尤其是传递带断层下降盘的古地貌低地对物源供水系起着汇聚和引导作用。对于陆相断陷盆地而言,常见的控砂型断裂坡折带一般包括平行断阶坡折、梳状断裂坡折、帚状断裂坡折、叉状断裂坡折和调节断裂坡折。坡折带控砂理论在渤海湾盆地进行了大量的实践应用,取得了丰硕的勘探成果^[32-36]。

陆相断陷盆地中引入层序地层学的概念后,建立了陆相层序地层格架砂岩分布模式,在砂体预测中起到了重要的作用,对沉积学的发展和油气勘探起到了巨大的推动作用^[37-39]。但目前关于层序控砂理论的认识还局限于层序界面附近富砂,即低位域和高位域富砂,基准面变化控制叠加样式,即低位进积、高位加积和湖泛退积。

随着勘探工作的不断深入与进步,上述原理在复杂陆相断陷盆地中的应用均遇到了不同程度的问题,例如沟和扇不一定对应,坡折不一定控砂,低位域不一定富砂,这些单一的控砂作用研究很难揭示复杂陆相断陷盆地的砂岩富集规律。现阶段国内仍然主要集中于单因素控砂机制研究,缺乏对物源、沟谷、坡折体系和沉积区特征等综合性研究,尤其是对物源区岩性与范围的恢复,同时也欠缺沉积物搬运在空间与时间上匹配关系的研究,这些都是导致在实际勘探工作中储层预测失败的主要原因。

因此,将“源-汇”思想引入到陆相断陷盆地沉积作用研究中来,把沉积物从剥蚀到搬运、沉积的整个沉积动力学过程看成一个完整的“源-汇”系统来探讨砂岩的富集机理,强调“过程”与“机制”,是控砂机制研究的必然趋势。

1.2.2 “山-沟-坡-面”——“源-汇”控砂理论的雏形

徐长贵^[40]在研究渤海海域古近系坡折带对沉积体系的控制作用时提出,陆相断陷盆地坡折带是陆相断陷盆地碎屑物质的主要富集场所,但坡折带是扇体发育的一个必要条件而不是充分条件,在坡折处形成扇体必须具备一个条件,即“山(有效物源)-沟(大型长期侵蚀沟谷)-坡(古坡折体系)-面(层序界面)”的有效配置。“山-沟-坡”的有效配置决定了砂体在平面上的分布位置,层序界面决定了砂体发育的有利时期。在复杂的陆相断陷盆地预测砂体,必须强调

多因素控砂,不能片面强调某一单因素的作用。“山-沟-坡-面”理论是“源-汇”思想在国内油气地质勘探工作的首次实践与运用,也是陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论的雏形。

1.2.3 陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论的形成及沉积响应模式的建立

徐长贵^[28]在“山-沟-坡-面”控砂理论的基础上,首次提出了陆相断陷盆地“源-汇”时空耦合控砂原理(图2),系统地对陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论进行了阐述。物源区风化剥蚀产生的碎屑物质经过一系列的输砂通道搬运后,经特定的时间与空间后沉积下来,构成了一个完整的“源-汇”时空耦合控砂系统。“源-汇”时空耦合系统包括有效物源体系、高效汇聚体系和基准面转换体系。有效物源体系包括显性物源体系和在时空上难以识别的隐性物源体系,高效汇聚体系由输砂通道、坡折带和碎屑物质的可容纳空间共同构成,基准面转换体系主要控制了一个层序内砂体发育的时期,3个因素共同控制砂体的分布特征,缺一不可。

在“源-汇”时空耦合控砂理论的指导下,在渤海海域识别并总结出常见的8种富砂型“源-汇”系统(图3),分别是区域物源-盆源斜坡-三角洲砂体富集模式、局部物源-梳状断裂坡折带-扇三角洲砂体富集模式、局部物源-同向消减型坡折-扇三角洲砂体富集模式、局部物源-轴向沟谷-辫状三角洲砂体富集模式、复杂走滑带砂体富集模式、局部物源-墙角

型坡折-扇三角洲砂体富集模式、局部物源-走向斜坡-辫状三角洲砂体富集模式和局部物源-陡坡带-近岸扇砂体富集模式。

1.2.4 陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论在渤海海域油气储层预测中发挥了重要作用

在“源-汇”时空耦合控砂理论与技术体系的推动下,渤海海域古近系储层预测成功率从40%提高到了80%,这不仅为推动渤海古近系勘探做出了重要贡献,对其他类似盆地沉积体系分析和储层预测也具有重要的借鉴意义。

辽西低凸起北段的锦州20-2北油田的发现完全得益于源-汇体系控砂理论及其技术方法。因为锦州20-2北地区位于辽西低凸起的长轴方向,一直以来,认为该地区储层不够发育,早先周边钻井也没有钻遇良好的储层,所以该构造经历了20余年的勘探,没有获得油气商业性发现。但是,在源-汇控砂理论的指导下,通过精细的层序地层分析,精细恢复了沙河街组二段沉积早期的隐性物源体系,并精细刻画了长轴方向的沟谷体系,识别了坡折体系,通过地震地质一体化方法准确识别出了沙二段优质砂体的分布(图4)。

1.3 盆内局部物源背景下“源-汇”系统越来越受到重视

在渤海海域古近系沉积作用的研究中,发现两种类型的物源体系:一类是长期存在的继承性区域物源,包括盆地边缘大型古陆、隆起区、古高地等;另一类是

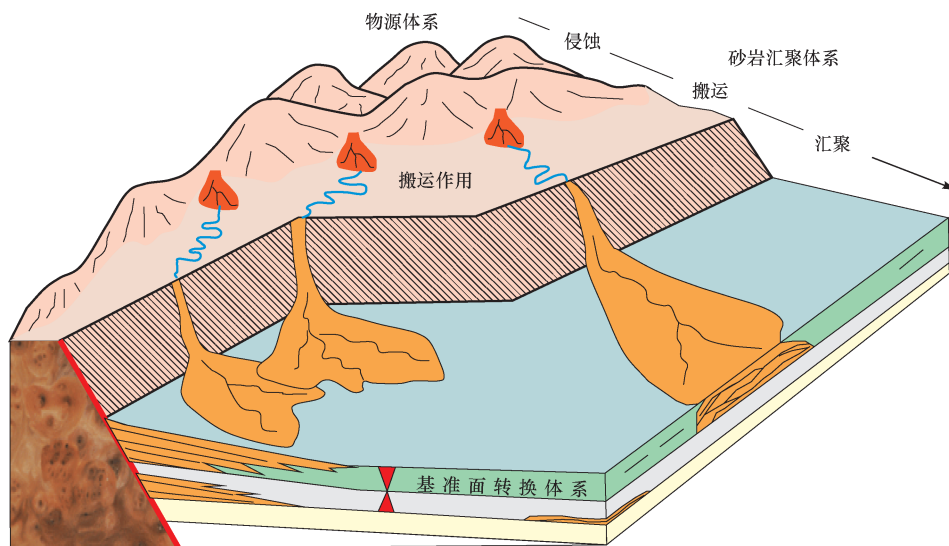


图2 陆相断陷盆地“源-汇”时空耦合体系基本概念及空间关系示意图^[28]

Fig. 2 Schematic diagram showing the concept of the “Source-to-Sink” spatial and temporal coupled system and spatial relationship in continental rift basins^[28]

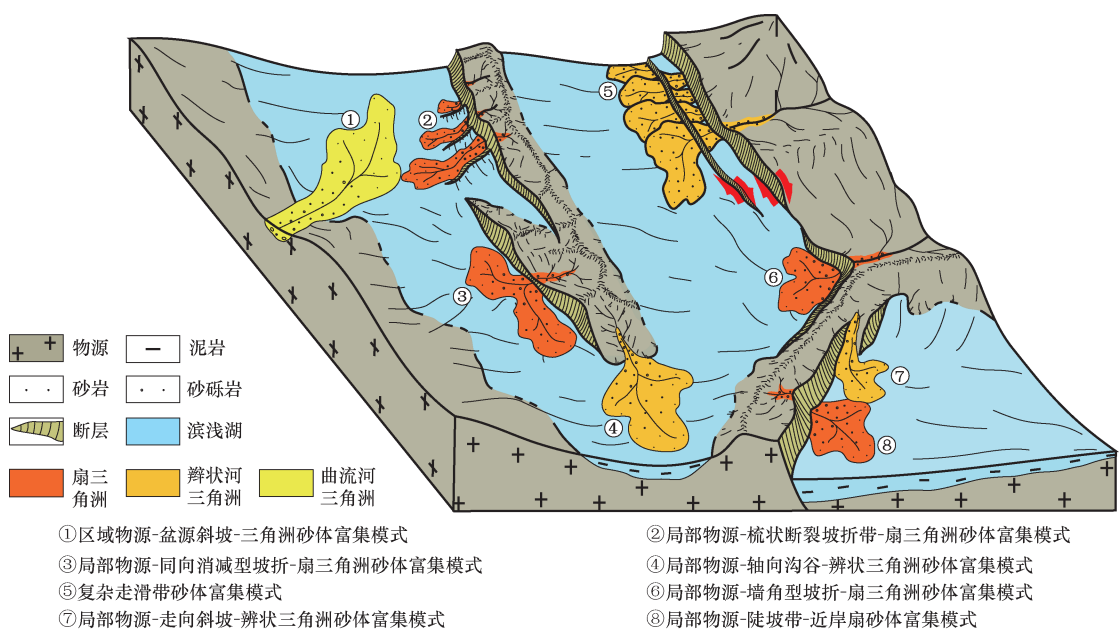


图 3 渤海海域古近系“源-汇”时空耦合控砂模式^[28]

Fig. 3 Sandstone distribution model in the spatial and temporal coupled “Source-to-Sink” system of the Palaeogene in the Bohai Sea^[28]

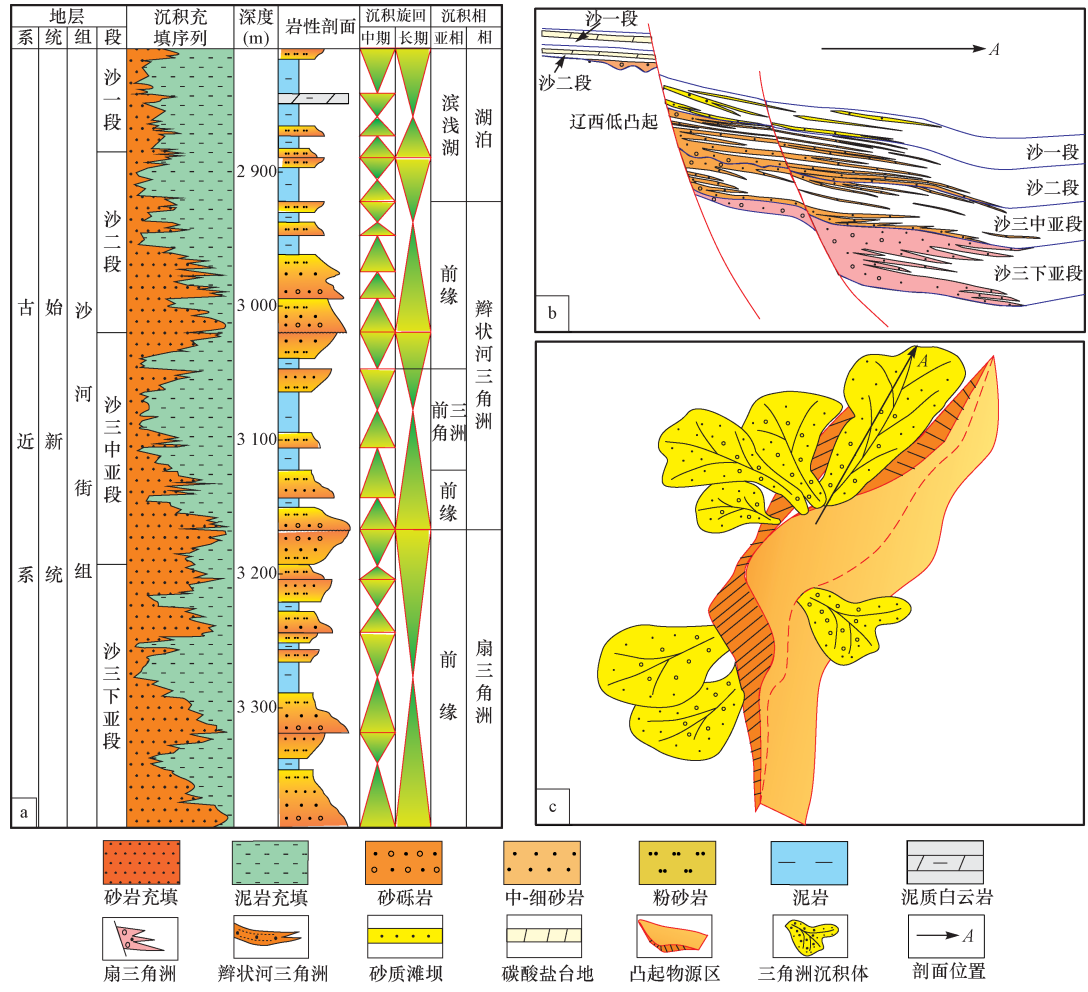


Fig. 4 Application of the “Source-to-Sink” theory in the reservoir prediction of Jinzhou 20-2 area, the Bohai Bay Basin

a. 沙河街组(A 井)综合柱状图; b. 沙河街组沉积充填剖面; c. “源-汇”系统示意图

受多期走滑拉分作用影响,基底发生掀斜或走滑扭动,在区域裂陷幕及次级裂陷幕之间的间歇期,于盆地内部形成的众多小型物源区,一般表现为小型古高地、凸起倾末端、低凸起、凹中低隆等次级正向地貌单元,在基准面下降期,能够暴露地表接受剥蚀,规模较小、存在时间较短。

盆内局部物源是指现今残余规模较小,但能在特定的构造位置和特殊的地史时期遭受剥蚀,并能够形成优质储层的盆内局部构造区划。而局部物源区以及依托局部物源区所形成的沟谷坡折、近源沉积扇体及其三者之间相互联系互为验证的关系就构成了“局部源-汇”体系,其中至关重要的问题就是对局部物源特征与性质的研究。

局部物源背景下砂体往往具有富集性发育特征,这是由于较小面积物源区不断抬升,剥蚀能力在垂向上持续得到补充,下降盘可容纳空间持续增加,砂体能够多期不断汇聚富集。同时,砂体整体呈“环物源分布、差异富集”的特征,由于沟谷体系和坡折体系输砂能力存在差异,其周边不同的构造位置储层发育程度差异性明显,根据不同的源-沟(坡折)组合样式,共总结划分出6类砂体富集模式(图3)。

基于上述局部物源体系创新认识,集成建立了渤海海域盆内局部物源富砂沉积储层预测技术序列,在渤海油田古近系中深部勘探中获得了显著勘探成效,直接指导了一批大中型油气田的勘探发现,多个传统认识上的勘探禁区获得油气发现重大突破。

2 沉积体系“源-汇”分析技术新进展

2.1 物源分析技术逐渐由单一方法向多方法综合应用发展

物源分析(provenance analysis)与“源-汇”计划(S2S)都属于“从地形到地质记录”这一大研究格局下的一部分^[41]。物源分析研究通过对比潜在母岩区与沉积区的岩石成分来示踪沉积物搬运路径。与S2S专题沉积体系研究不同,盆地物源分析研究出现较早,更多关注较长时间尺度的地质记录,但研究重点同样在“源”和“汇”两个单元。

早期的物源分析集中在沉积物的成分特征上。以Dickinson为代表的QFL砂岩组分判别分析法^[42-43]、以Rollinson为代表的元素分析法^[44]及以Morton为代表的重矿物组合及重矿物指数分析法^[45]等传统物源分析法已相对成熟并在盆地物源分析中应用广泛。近年来,物源分析学科进一步发展,沉积物碎屑锆石U-Pb

定年、矿物颗粒形态学、单矿物元素分析、Nd同位素分析等新的物源分析方法开始被普及应用于更多的研究区域^[45-56]。

物源分析主要应用于古物源区的恢复。Nie等对南美哥伦比亚Middle Magdalena Valley盆地潜在物源区进行了调研和采样分析^[57],采用了碎屑锆石U-Pb定年、重矿物、Nd同位素及砂岩组分分析,再与盆地内古新世-中新世的地层剖面取样分析结果对比,重建了古地理格局、古源汇体系及其演化过程。对盆地“源”与“汇”系统化、多元化的物源分析手段最终重建了相对高分辨率的盆地物源演化史。多种方法综合运用排除了采用单一方法时难以忽略的化学风化、沉积再循环等因素的影响,不但能够再现研究区的主要物源变化,更能实现源区演化的定性描述,甚至可以识别出仅短暂出露过的古高地源区,即“汇-源-汇”的转变过程。

多方法物源分析还可以应用于古水系重建工作中。对比古构造单元潜在物源区,综合利用重矿物组合分析、重矿物指数分析、碎屑锆石U-Pb定年分析、颗粒形态学分析及锆石、电气石单颗粒矿物元素分析等方法,从沉积区沉积物特征,倒推恢复古物源区,可以重建古水系分布,并进一步应用于储层预测中。在少井的深水勘探前缘盆地,可以利用相对有效和相对低成本的重矿物、碎屑锆石U-Pb年代学等资料进行物源和地层研究,进而重建古水系,约束储层砂岩分布^[58]。

我国南海西部莺歌海盆地、琼东南盆地以及南海东部珠江口盆地,物源分析研究也已从起步阶段的单一手段,逐步发展为多种物源分析手段综合运用,并且随着对盆地内部“汇”区沉积物分析程度提高,以上3个盆地均有不同程度的对盆地“源”区的研究开展^[19-25]。

总体而言,物源分析逐渐由单一方法向多方法综合应用发展,国际上开始对“源”与“汇”同时开展沉积物分析,通过“汇”的时间序列恢复“源”的古地理演化,重建古水系,而国内的物源示踪分析以确定物质来源为主,欠缺对物源区演化的恢复。

2.2 “源-汇”分析从定性化研究逐渐向量化研究发展

“源-汇”量化研究的思想最先体现在剥蚀量与沉积物通量关系研究中,这类研究建立了“源”与“汇”之间的定量对应关系。渤海海域在石臼坨凸起东段开展了“源-汇”系统内基于剥蚀-沉积响应的沉积储层半定量预测工作。在剥蚀作用与沉积动态响

应过程分析的基础上,利用岩矿、重矿物和微量元素等化验资料,以物源示踪法进行沉积体母岩岩性恢复和地质年代限定,进行剥蚀-沉积关系的定性恢复(图5),并借助三维地震及井资料,计算沉积体砂砾岩量,通过剥蚀地层恢复计算剥蚀量,最终建立起了剥蚀与沉积响应的半定量关系(图6),并形成相应的技术序列,首次实现渤海古近系中深部沉积储层半定量预测。

上述研究建立了“源”与“汇”之间的定量对应关系,而没有考虑造成“源”与“汇”对应关系的过程以及机制,这似乎又忽略了“源-汇”思想所强调的“过程”

性。因此,对于沉积物搬运与沉积的定量化研究应该贯穿于“源-汇”系统的每一个阶段,渤海海域也逐渐开始重视并尝试探索“源-汇”沉积过程中某一阶段的定量化研究。在运用“源-汇”思想对渤海海域沙垒田凸起围区古近系进行沉积体系研究时,首先明确了不同类型沟谷、坡折体系的性质与发育特征,并在此基础上,进一步尝试探索扇体面积与沟谷截面积、边界条件、汇水区面积之间的定量化关系。虽然难于形成对应的经验计算公式,但仍初步建立了“源-汇”响应关系的定量化表征方法,得出了“源-汇”系统各要素

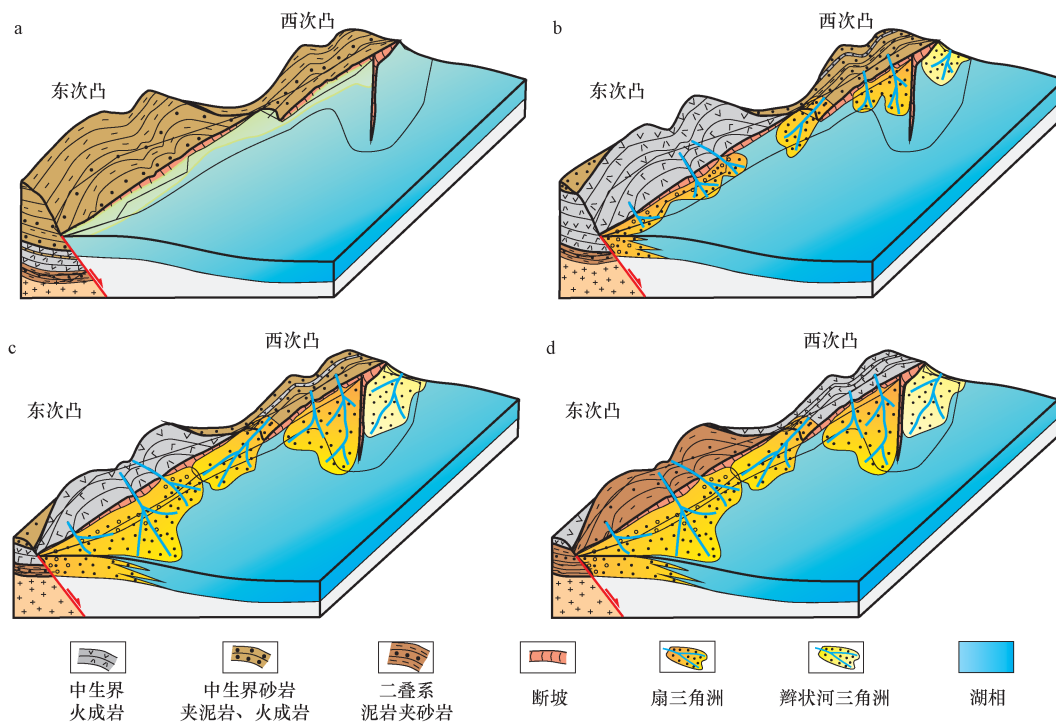


图5 渤海湾盆地石臼坨凸起东段剥蚀-沉积过程平面演化

Fig. 5 Plane view of the evolution process of erosion to deposition in Shijiutuo Uplift, the Bohai Bay Basin

a. 孔店组—沙河街组四段; b. 沙河街组三段; c. 沙河街组一段二亚段; d. 现今沉积与物源区残留岩性特征

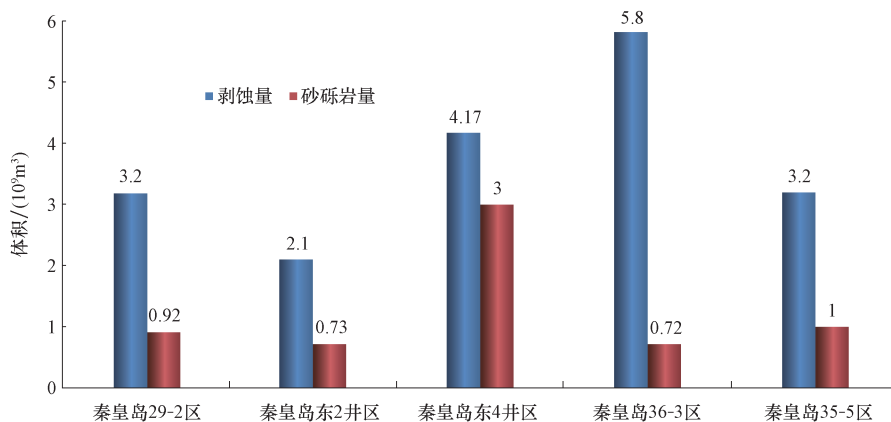


图6 剥蚀与砂砾岩沉积定量关系

Fig. 6 Quantitative correlation between erosion and glutenite deposition

与扇体展布面积之间的匹配关系:沟谷截面积指数大,断坡宽缓,形成源区汇水面积大,扇体面积相应较大;沟谷截面积指数小,断坡限制性强,源区汇水面积小,扇体面积相应较小。

随着地质学科的发展以及实际勘探工作的需求,对于沉积过程的定量化研究逐渐成为必然的趋势。“源-汇”系统的研究也是如此,系统中各体系的定量化表征以及相互之间定量匹配关系研究,决定了沉积体与储层定量预测的最终实现。

2.3 物理实验模拟和计算机数值模拟广泛应用于“源-汇”约束下的沉积过程再现

沉积过程的正演模拟一般包括两种方法,即物理实验模拟与计算机数值模拟。两种方法均是以既定的地质认识为约束条件进行实验,进而利用得出的结果来验证认识的正确性。

2.3.1 物理实验模拟

国内对于沉积过程的物理实验模拟,主要针对冲积扇、三角洲、扇三角洲、河道和重力流等沉积体系^[29-67],对其约束条件的设置一般包括宏观沉积地形、水流强度、物源供给强度和湖平面变化等。除上述一些典型沉积相的模拟实验外,我国学者也开展了一些其他探索,如沉积坡折带控砂模拟实验研究^[68]。通过这些沉积物理模拟实验,不仅可以更直观地了解沉积相的形成发展过程,丰富理论知识,也能对沉积相带的时空分布进行预测,指导油气勘探。

但现今的模拟实验只是通过诸如活动底板的升降来模拟构造沉降,通过沉积物供应参数的变化来反映物源差异,通过水流量的大小来反映气候变化,而且多为单因素作用下的沉积过程模拟,因此只能对简单的沉积过程进行重现。然而,自然界中的沉积过程是一个动态的过程,往往受多种复杂地质控制因素共同影响,并且在不同时期的沉积过程中,这些因素具有动态的变化特征,所以很多因素(如物源随时间的动态变化、不同类型坡折带的演化)都无法在实验室进行模拟。

2.3.2 计算机数值模拟

相较于物理实验模拟,沉积计算机数值模拟具有高效低成本的特点,并且不受比例尺和实验室条件限制,可以排除人为影响,大大减小原型和模型之间的差异性。沉积数值模拟建立在对沉积过程定量化分析的基础上,通过古地貌恢复,得到相对真实的沉积背景。对剥蚀期次的划分与剥蚀量的恢复,可以确定物源供给

参数。湖平面变化曲线的建立可以提供定量的可容空间变化参数。对输砂(沟谷、坡折)体系特征的地质研究则可确定沉积物的搬运方式。综合以上各项参数,进行计算模拟,可以建立少井条件下沉积体的分布模式。近年来,运用上述方法,渤海海域在辽中凹陷、石臼坨凸起倾末端、黄河口凹陷西南缓坡带以及渤中28-34等构造区进行了大量的沉积模拟工作,取得了很好的效果,为海上少井条件下储层预测与目标优选提供了有力支持。

物理模拟是数值模拟的基础,并可验证数值模拟的准确性。反过来,数值模拟在一定程度上又能指导物理模拟,两者相辅相成,相互补充,相互促进。现在已有很多模拟研究将两者结合起来,并取得了很好的成果^[69-71],物理模拟与数值模拟的日益结合无疑仍是未来沉积模拟技术发展的一个重要趋势。

3 沉积体系“源-汇”研究未来发展方向

国内外“源-汇”系统研究在大陆边缘沉积过程研究取得了丰硕的成果,陆相断陷盆地“源-汇”控砂理论在勘探实践中也得到了良好运用,但总体而言,“源-汇”系统研究仍处于初级阶段,未来仍需不断的深入探索与应用。沉积体系“源-汇”研究主要有以下几方面发展趋势。

1) 重视物源体系研究

物源是“源-汇”系统的物质来源,也是“源-汇”研究的根本。对物源体系的研究趋势体现在两个方面:一是多种方法综合应用,进行有效的物源示踪分析,排除单一方法的缺陷,准确地恢复地质历史时期“源”区岩性序列;二是对物源区进行精细层序地层分析,重建物源区分布范围与地层演化模式。

2) 定量化储层预测

运用“源-汇”思想进行定量储层预测是未来发展的一个重要方向。要达到定量的储层预测,就必须完成以下3项工作:第一,较为准确地计算物源区在某一地质历史时期内的剥蚀量;第二,通过精确的古地貌恢复,测量地质时期古地貌(沟谷、坡折)参数,实现汇聚体系的定量化表征;第三,精确计算同时期内沉积体体积。在此基础上,最终建立剥蚀-搬运-沉积整个过程的定量响应关系,达到定量化储层预测的目的,并以此推动陆相断陷盆地的精细勘探。

3) 多学科、多方法融合

“源-汇”系统是极其复杂的过程,对其进行全面系统的研究需要涉及地球化学、古构造恢复、层序地层

学分析、沉积学分析等等,随着研究程度的深入,会有越来越多的学科被应用到“源-汇”系统的研究中。

4) 过程化与机制化研究

“源-汇”系统是沉积物剥蚀-搬运-沉积的一个完整的过程,将研究集中于“源”或者“汇”两个端元,已经无法满足研究需求,因此,需要将其作为整体,对沉积物的搬运的全过程进行研究;同时,沉积物在“源-汇”系统每个阶段中的产生与输送,都具有一定触发与搬运机制,只有明确各阶段内不同的沉积物分散机制,才能准确把握沉积物的分布规律,从而达到预测沉积体与储层的目的。

5) 油气勘探工业化应用将形成标准和规范

在油气勘探中,“源-汇”系统在之前的发展都局限在理论与技术方法探索以及局部地区的应用,没有形成工业化应用的标准和规范,随着这一理论方法在油气勘探储层预测中的广泛应用,在不远的将来,一定要形成相对应的技术规范和技术标准,油气勘探中的常规沉积体系编图将逐渐被“源-汇”系统编图所替代。

参 考 文 献

- [1] The earth science community. MARGINS Program Science Plans [R]. America: MARGINS Office, 2004.
- [2] Alexander C, Walsh J, Orpin A. Modern sediment dispersal and accumulation on the outer Poverty continental margin [J]. *Marine Geology*, 2010, 270: 213 - 226.
- [3] Berryman K, Marden M, Palmer A, et al. The post-glacial downcutting history in the Waihuka tributary of Waipaoa River, Gisborne district: Implications for tectonics and landscape evolution in the Hikurangi subduction margin, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 55 - 71.
- [4] Carter L, Orpin A, Kuehl S. From mountain source to ocean sink- the passage of sediment across an active margin, Waipaoa Sedimentary System, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270: 1 - 10.
- [5] Fuller I, Marden M. Rapid channel response to variability in sediment supply: cutting and filling of the Tamdale-Fan, Waipaoa catchment, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270: 45 - 54.
- [6] Kniskern T, Kuehl S, Harris C, et al. Sediment accumulation patterns and fine-scale strata formation on the Waiapu River shelf, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 188 - 201.
- [7] Marsaglia K, DeVaughn A, James D, et al. Provenance of fluvial terrace sediments within the Waipaoa sedimentary system and their importance to New Zealand source-to-sink studies [J]. *Marine Geology*, 2010, 270: 84 - 93.
- [8] Miller A J, Kuehl S A. Shelf sedimentation on a tectonically-active margin: A modern sediment budget for Poverty continental shelf, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 175 - 187.
- [9] Orpin A R, Carter L, Rogers, et al. Holocene sedimentary record from Lake Tutira: A template for upland watershed erosion proximal to the Waipaoa Sedimentary System, northeastern New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 11 - 29.
- [10] Page M J, Trustrum N A, Orpin A R, et al. Storm frequency and magnitude in response to Holocene climate variability, Lake Tutira, North-Eastern New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 30 - 44.
- [11] Pedley K L, Barnes P M, Pettinga, et al. Seafloor structural geomorphic evolution of the accretionary frontal wedge in response to seamount subduction, Poverty Indentation, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 119 - 138.
- [12] Rose L E, Kuehl S A. Recent sedimentation patterns and facies distribution on the Poverty Shelf, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270, 160 - 174.
- [13] Shao L. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17: 255 - 269.
- [14] Shi H, Xu C, Zhou Z, Ma C. Zircon U-Pb dating on granitoids from the northern South China Sea and its geotectonic relevance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1359 - 1372.
- [15] Wang C, Liang X, Xie Y, et al. Provenance of Upper Miocene to Quaternary sediments in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from detrital zircon U-Pb ages [J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 202 - 217.
- [16] Wang C, Liang X, Xie Y, et al. Late Miocene provenance change on the eastern margin of the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: evidence from U-Pb dating and Hf isotope analyses of detrital zircons [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 123 - 139.
- [17] Wang Y M, Xu Q, Li D, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1488 - 1494.
- [18] Wolinsky, M A, Swenson, J B, Litchfield, N, et al. Coastal progradation and sediment partitioning in the Holocene Waipaoa. Sedimentary System, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 270: 94 - 107.
- [19] 邵磊. 珠江口及北部湾盆地泥岩地球化学特点 [J]. *同济大学学报*, 2000, 28(5): 523 - 527.
Shao Lei. Geochemical characteristic of mudstone and provenance analyses of the pearl basin and beibu-gulf basin [J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(5): 523 - 527.
- [20] Clift P D, Blusztajn J, Nguyen D A. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): 1 - 4.
- [21] Hoang V L, Wu F Y, Clift P D, et al. Evaluating the evolution of the Red River system based on in situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(11): 292 - 310.
- [22] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇 [J]. *科学通报*, 2011, 56(10): 781 - 787.
- [23] Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(10): 781 - 787.
- [24] 赵梦, 邵磊, 梁建设, 等. 古红河沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. *地球科学——中国地质大学(武汉)学报*, 2013, 38 增刊(1): 166 - 174.
Zhao Meng, Shao Lei, Liang Jianshe, et al. REE character of sediment from the paleo-red river and its implication of provenance [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38 suppl(1): 166 - 174.

- [25] Cao L, Jiang T, Wang Z, et al. Provenance of Upper Miocene sediments in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, northwestern South China Sea: evidence from REE, heavy minerals and zircon U-Pb ages [J]. *Marine Geology*, 2015, 361: 136–146.
- [26] 刘强虎. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J]. *石油学报*, 2015, 36(3): 286–299.
- Liu Qianghu. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(3): 286–299.
- [27] 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 等. 珠江口盆地 13.8 Ma 陆架边缘三角洲与陆坡深水扇的“源-汇”关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(12): 3827–3834.
- Zhu Yanhe, Zhu Weilin, Xu Qiang, et al. Sedimentary response to shelf-edge delta and slope deep-water fan in 13.8 Ma of Miocene epoch in Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(12): 3827–3834.
- [28] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 9–20.
- Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9–20.
- [29] 徐长贵. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(4): 1–11.
- Xu Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: basic idea, conceptual systems and controlling sand models [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(4): 1–11.
- [30] Normark W R. Submarine canyons and fan valleys: factors affecting growth patterns of deep-sea fans [J]. *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation*, Tulsa: Spec. Publ. SOC. Econ. Paleont. Miner., 1974(19): 26–68.
- [31] Nardin T R, Hein F J, Gorsline D S, et al. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics, and contrasts in slope and base-of-slope systems vs. canyon-fan-basin floor systems [J]. *Geology of Continental Slopes*. Tulsa: Spec. Publ. SOC. Econ. Paleont. Miner., 1979(19): 61–73.
- [32] 徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(5): 53–56.
- Xu Changgui, Lai Weicheng, Xue Yongan, et al. Palaeo-geomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 53–56.
- [33] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(3): 260–266.
- Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3): 260–266.
- [34] 赵贤正, 金凤鸣, 刘震, 等. 二连盆地地层岩性油藏“多元控砂-四元成藏-主元富集”与勘探实践(I)[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(2): 9–15.
- Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Liu Zhen, et al. “Multi-factor controlling, four-factor entrapping and key-factor enrichment” of stratigraphic-lithologic reservoir sand exploration practice in Erlian Basin (I): “Multi-factor controlling” mechanism [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(2): 9–15.
- [35] 冯有良, 徐秀生. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用——以渤海湾盆地古近系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(1): 22–25.
- Feng Youliang, Xu Xiusheng. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs: A case from Paleogene Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 22–25.
- [36] 王家豪, 王华, 肖敦清, 等. 伸展构造体系中传递带的控砂作用——储层预测的新思路[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(1): 20–25.
- Wang Jiahao, Wang Hua, Xiao Dunqing, et al. Control of transfer zone on sand bodies in the extensional structure system: a new approach to reservoir prediction [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(1): 20–25.
- [37] 吴海波, 李军辉, 刘赫. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组构造坡折带类型及其对砂体和油气的控制[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 358–365.
- Wu Haibo, Li Junhui, Liu He. Types of structural slope-break zone and its controls on sand bodies and hydrocarbon of Huhehu depression in Hailar basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 358–365.
- [38] 樊太亮, 李卫东. 层序地层应用于陆相油藏预测的成功实例[J]. *石油学报*, 1999, 20(2): 12–17.
- Fan Tai liang, Li Weidong. A successful case on sequence stratigraphy applied to the prediction of non marine oil reservoir [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1999, 20(2): 12–17.
- [39] 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究[J]. *地球科学*, 2002, 27(5): 592–596.
- Li Sitian, Pan Yuanlin, Lu Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 592–596.
- [40] 邓宏文, 王红亮, 王居峰, 等. 层序地层构成与层序控砂、控藏的自相似性特征——以三角洲、浊积扇体系为例[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(5): 491–495.
- Deng Hongwen, Wang Hongliang, Wang Jufeng, et al. Self-similarity of constitution of sequence stratigraphy and distribution of sandbodies and lithologic reservoirs: taking delta-turbidite fan system as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 491–495.
- [41] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 365–371.
- Xu Changgui. Genetic types of Paleogene slope-break zones and their controls on depositional system in Bohai offshore [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 365–371.
- [42] Allen P A. From landscapes into geological history [J]. *Nature*, 2008, 451, 274–276.
- [43] Dickinson W, Suczek C. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164–2182.
- [44] Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation [M]. Longman, Singapore. 1993.
- [45] Morton A C, Hallsworth C R. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary*

- Geology, 1994, 90: 241 – 256.
- [46] Li Xianhua. Geochemical and Nd isotopic variations in the sediments of the South China Sea: a response to Cenozoic tectonism in SE Asian [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211: 207 – 220.
- [47] Liu Q. Provenance identification and sedimentary analysis of the beach and bar systems in the Palaeogene of the Enping Sag [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70: 251 – 272.
- [48] Liu Z, Shi H, Zhu J, et al. Detrital K-feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages: source constraints of the Lower Miocene sandstones in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (2): 383 – 392.
- [49] Moecher D, Samson S. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: implications for sedimentary provenance analysis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 247: 252 – 266.
- [50] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. Tectonics, 2004, 23: 1 – 20.
- [51] Clift P D, Lee J I, Clark M K, et al. Erosional response of south China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea [J]. Marine Geology, 2002, 184: 207 – 226.
- [52] He M, Zheng H, Clift P D. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope data from the Yangtze River sands: Implications for major magmatic events and crustal evolution in Central China [J]. Chemical Geology, 2013, 360 – 361: 186 – 203.
- [53] Hicks D M, Gomez B, Trustrum N A. Erosion thresholds and suspended sediment yields, Waipaoa River basin, New Zealand [J]. Water Resources Research, 2000, 36: 1129 – 1142.
- [54] Hicks D M, Gomez B, Trustrum N A. Event suspended sediment characteristics and the generation of hyperpycnal plumes at river mouths: East Coast continental margin, North Island, New Zealand [J]. Journal of Geology, 2004, 112: 471 – 485.
- [55] Jiang T. Insights from heavy minerals and zircon U-Pb ages into the middle Miocene-Pliocene provenance evolution of the Yinggehai Basin, northwestern South China Sea [J]. Sedimentary Geology, 2015, 327: 32 – 42.
- [56] Yan Y, Carter A, Palk C, et al. Understanding sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12.
- [57] Zhao M, Shao L, Qiao P. No Red River capture since the late Oligocene: geochemical evidence from the northwestern South China Sea [J]. Deep Sea Research II, 2015, 122: 185 – 194.
- [58] Nie J. Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U-Pb ages, heavy mineral, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley basin, northern Andes, Colombia [J]. Earth-Science Reviews, 2012, 110: 111 – 126.
- [59] Lowe D, Sylvester P, Enachescu M. Provenance and paleodrainage patterns of Upper Jurassic and Lower Cretaceous synrift [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95 (8): 1295 – 1320.
- [60] 赖志云, 周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成以及演变的沉积模拟实验 [J]. 沉积学报, 1994, 12 (2): 37 – 43.
- Lai Zhiyun, Zhou Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12 (2): 37 – 43.
- [61] 刘忠保, 施冬, 谢锐杰, 等. 三角洲分流河道形成及演变模拟研究 [J]. 矿物岩石, 2000, 20 (3): 53 – 58.
- Liu Zhongbao, Shi Dong, Xie Ruijie, et al. The simulation of the formation and evolution of the distributary channel of delta [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000, 20 (3): 53 – 58.
- [62] 刘忠保, 龚文平, 张春生, 等. 沉积物重力流砂体形成及分布的沉积模拟试验研究 [J]. 石油天然气学报, 2006, 28 (3): 20 – 22.
- Liu Zhongbao, Gong Wenping, Zhang Chunsheng, et al. Experimental Study on Sedimentary Modeling on the Formation and Distribution of Gravity Flow Sandbody [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28 (3): 20 – 22.
- [63] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 砂质扇三角洲沉积过程实验研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25 (2): 1 – 3.
- Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Experimental study of sandy-fan-delta sedimentary process [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25 (2): 1 – 3.
- [64] 王随继, 薄俊丽. 网状河流多重河道形成过程的实验模拟 [J]. 地理科学进展, 2004, 23 (3): 34 – 42.
- Wang Suiji, Bo Junli. Experimental simulation of anastomosing multiple channel formation [J]. Process in Geography, 2004, 23 (3): 34 – 42.
- [65] 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 Xiaobin, Luo Shunsheng, et al. Research of simulated experiment on gravity flow deposits of tight sand bodies of Chang 4 Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22 (3): 322 – 332.
- [66] 吕明, 王颖, 徐徽. 沉积模拟方法在 Bonaparte 盆地的应用 [J]. 中国海上油气, 2010, 22 (2): 83 – 90.
- Lu Ming, Wang Ying, Xu Hui. An application of sedimentation simulation in Bonaparte basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22 (2): 83 – 90.
- [67] 庞雄奇. 地质过程定量模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1 – 13.
- Pang Xiongqi. Quantitative simulation of geological processes [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1 – 13.
- [68] Burton R, Kendall C G C, Lerche I. Out of our depth: On the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record [J]. Earth-Science Reviews, 1987, 24: 237 – 277.
- [69] 刘晖, 操应长, 徐涛玉, 等. 沉积坡折带控砂的模拟实验研究 [J]. 山东科技大学, 2007, 26 (1): 34 – 37.
- Liu Hui, Cao Yingchang, Xu Taoyu, et al. The simulation experiment about the control of sandybody in depositional slope-break belt [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2007, 26 (1): 34 – 37.
- [70] Kubo Y, Nakajima T. Laboratory experiments and numerical simulation of sediment-wave formation by turbidity currents [J]. Marine Geology, 2003, 192 (1): 105 – 122.
- [71] Van Heijst, Postma G. Fluvial response to sea-level changes: A quantitative analogue, experimental approach [J]. Basin Research, 2001, 13: 269 – 292.