

陆相断陷盆地源—汇系统要素表征 及研究展望

聂银兰,朱筱敏,董艳蕾,杨棵,秦祎,叶蕾

中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249



内容提要:源—汇系统是指剥蚀地貌形成的物源通过搬运路径到汇水盆地分散沉积下来的动力学系统,在地球科学领域具重要研究意义。源—汇系统包含物源、搬运路径和沉积体系3个重要组成要素,必须把3个要素作为一个系统过程来研究,才能完整地认识地球表层的地动力学过程及其演化。陆相断陷盆地是我国重要的含油气沉积盆地类型,笔者等系统分析了陆相断陷盆地结构特征,其内部陡坡带与缓坡带作为断陷盆地独立的次级构造单元,形成过程和地貌结构存在差异,进而导致相应源—汇系统要素也存在差异性。根据源汇系统耦合要素可将断陷盆地不同构造带源—汇系统类型划分为3种类型:①近源—短轴—浊积扇型、②近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型和③远源—长轴—湖泊三角洲型,其中陡坡带主要发育近源—短轴—浊积扇型、近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型两种源—汇系统耦合类型;缓坡带和盆地长轴方向主要发育远源—长轴—湖泊三角洲型源汇系统耦合类型。未来源—汇系统研究将通过多学科、多方法开展综合研究,聚焦深时物源体系、搬运通道和分散体系研究,强调源—汇系统要素定量表征及其耦合响应关系,预测规模性有利沉积砂体,为沉积矿产勘探开发提供预测性模型和地质基础。

关键词:陆相断陷盆地;源—汇系统;要素表征;源汇系统类型;规模砂体预测

源—汇系统是指剥蚀地貌形成的风化产物通过搬运路径到汇水盆地沉积下来的地表动力学过程(Allen, 2008; Sømme et al., 2010),其研究历史可以追溯到1998年,美国国家科学基金会和联合海洋学协会正式启动了“洋陆边缘计划”,拉开了沉积学领域源—汇系统研究的序幕;1999年欧洲大陆边缘地层计划启动,开展大陆边缘海相沉积物源—汇沉积系统的研究;2003年,日本提出了“亚洲三角洲演化与近代变化”的研究计划;2011年,美国地球物理联合会查普曼专题会议探究了时空演变下的源—汇系统(Kuehl et al., 2011; Walsh et al., 2016);2017年国际沉积地质学会在西班牙举办主题为“源—汇地层学中的环境信号传输”研究会议,致力于建立完整的沉积动力学系统。经过近20年的发展,源—汇系统研究已经逐步从大陆边缘盆地走向陆相盆地,2017年,朱红涛、朱筱敏、曾洪流等教授在国内外刊物分别组织了源—汇系统专辑,详细介绍了中国含油气盆地源—汇系统研究成果,推动了国内源—汇系统的发展(朱红涛等,2017)。目前,源—

汇系统的研究已经从定性的要素分析转向定量的要素耦合,从源—汇现象的分析逐步深入主控因素的研究,从传统的沉积学研究方法到先进的系统分析技术,研究范围涵盖整个地球表层动力学过程,形成了由层序地层、物源和汇聚构成的完整研究体系,通过半定量—定量分析,建立物源—搬运—沉积过程的响应关系,提高了沉积体类型和规模砂体预测的精准度,有效指导了油气勘探开发。

陆相断陷盆地是我国重要的、赋存着大量矿产资源的盆地类型,它是大洋板块碰撞俯冲引起弧后拉张,滨洋大陆区张裂、沉陷而形成的拉张盆地(李丕龙,2003),由断裂分割的断块相对运动形成隆坳、凸凹相间的构造格局(潘元林和李思田,2004)。断裂拉张阶段,断层在原有基础之上进一步发育,形成大量新断层,纵横交错相互连通;进入坳陷下沉阶段,大规模的构造活动基本结束,坳陷作用形成具有双层结构的断陷盆地(栗宝鹃,2016)。断陷湖盆沉积体展布不仅决定了烃源岩的位置还控制着有利储集层的分布,然而陆相断陷盆地具有盆地边界条件

注:本文是国家重大专项专题《陆相湖盆层序地层与岩性圈闭形成机制》、中石化胜利油田《东营凹陷沙二段沉积体系研究》、中海油研究总院《三角洲相储层沉积控制因素及定量表征知识库》等项目的成果。

收稿日期:2022-03-29;改回日期:2022-07-07;网络首发:2022-07-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.07.041

作者简介:聂银兰,女,1997年生,硕士研究生,研究方向为沉积学及古地理学;Email: 2322429891@qq.com。通讯作者:朱筱敏,男,1960年生,教授,现主要从事沉积地质学的教学及科研工作;Email: xmzhu@cup.edu.cn。

表 1 陆相盆地源—汇系统要素表征内容及方法

Table 1 Contents and methods of elements representation of source-to-sink system in continental basin

要素	表征内容	表征方法
物源体系	母岩类型及风化能力	岩芯薄片、岩石类型的化学风化速率序次
	古物源系统及构造属性	碎屑成分分析、重矿物分析、元素地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄谱、定量物源分析
	古地貌恢复	地质年代学法、将近论古法、物源分析法、印模法、水文学法和沉积学法
	汇水单元刻画	通过古地貌图定量分析断层控制的分水岭汇水区面积、垂向高差和水系延伸长度等
搬运体系	搬运通道类型	通过地震剖面识别 V 型、U 型和 W 型沟谷
	搬运通道定量表征	定量统计搬运通道的参数,包括宽度、深度、宽深比及截面积
沉积体系	沉积体系类型	岩芯、测井和三维地震资料综合识别沉积相
	横向分布特征	现代沉积学、地震地层学和地震沉积学综合分析确定横向展布特征
	纵向演化规律	地层切片、测井资料分析确定纵向演化规律

复杂、物源供给多样、搬运通道多变、沉积体系复杂等特点,砂体分布范围广且类型繁多,既有牵引流成因又有重力流成因,从而导致陆相断陷盆地砂体展布规律复杂,预测难度大(徐长贵等,2004)。目前陆相断陷盆地的控砂机理主要体现在古地貌控砂(包括沟谷控砂、坡折带控砂、层序控砂、源坡控砂等),但在油气勘探开发实践中发现,仅仅研究古地貌而不研究物源及其搬运通道,难以准确预测沉积砂体形态和分布。陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂机理的提出,极大地提高了储层预测成功率和油气勘探效率。进一步研究表明,陆相断陷盆地内部不同构造带控砂机制及其影响因素差异很大,从而导致砂体类型、存在状态及砂体富集带存在明显差异(赵伟等,2011;杨勇强等,2011;张祥国,2014;叶茂松等,2014;赵春晨等,2017;周学文等,2018;蔡全升等,2018;叶蕾等,2018;陈柄屹等,2019),因此在进行实际分析时就需要考虑不同构造带的耦合控砂机制及区别。本文基于陆相断陷盆地源—汇系统研究成果,探讨了断陷盆地内部不同构造带源—汇系统的主要研究内容、要素表征、控制因素及耦合模式,对比不同构造带源汇系统耦合样式和控砂机制差异,为高效油气勘探开发提供地质基础。

1 源—汇系统要素及表征方法

源—汇系统是通过沉积物搬运系统来建立剥蚀地貌与沉积地貌之间的物质变迁和交换关系(朱红涛等,2017),不同时间尺度上侵蚀产物的量化研究对于气候分析、构造和人类活动如何影响古地貌至关重要。源—汇系统不同要素的表征有利于建立剥蚀—搬运—沉积整个过程的定量响应关系(表 1),使源—汇系统研究具有更高的准确性和预测性。

1.1 物源体系

物源供给是源—汇系统发育的根本要素,也是

沉积砂体存在的物质基础。物源分析是盆地和造山带研究的一项重要内容,对分析沉积盆地与造山带的相对位置、演化过程及相互作用等方面意义重大(陈柄屹等,2019)。物源体系研究内容主要包括母岩的类型和分布、古物源构造背景恢复、汇水单元特征刻画等。

1.1.1 母岩类型及风化能力

常见的母岩类型包括沉积岩、岩浆岩、变质岩以及多种岩性组成的混合母岩。母岩类型和分布对不同区带风化剥蚀差异、沉积区沉积组分特征有重要影响,可造成不同源—汇系统的流域面积、地形高差、沉积区面积及沉积响应存在差异。

通常,根据钻遇母岩的岩芯或井壁取心资料,结合地震反射特征,便可确定母岩的类型和分布特征。Allen 等根据相对于花岗岩的溶质产量,编制了岩石类型的化学风化速率序次,以此来衡量复合物源区中一种基岩类型相对于另一种基岩类型的抗风化能力(Allen et al., 2013)(图 1),通过对岩石类型进行分析就能定性的评价沉积体的规模。母岩抗风化能力越强,沉积物的供给量就越少,反之则越多。以云南洱海现代湖盆为例,云南洱海现代湖盆源—汇系统划分为西(S2S-W)、东(S2S-E)、北(S2S-N)3 个独立的源—汇系统,S2S-E 物源区母岩主要为碳酸盐岩,碎屑供给少,沉积体数量少、规模小;S2S-W 物源区母岩主要为变质岩及花岗岩、碳酸盐岩,碎屑供给多,沉积体数量多、规模大,相互叠置、连片分布;S2S-N 为轴向物源型源—汇系统,母岩主要为碎屑岩,沉积物供应充足,形成大型沉积体(朱秀等,2017)。

1.1.2 古物源系统及构造属性

古物源的恢复是源—汇系统研究的切入点和难点,在确定源区构造演化背景、明确沉积砂体展布、恢复盆地演化史方面起着重要的作用。

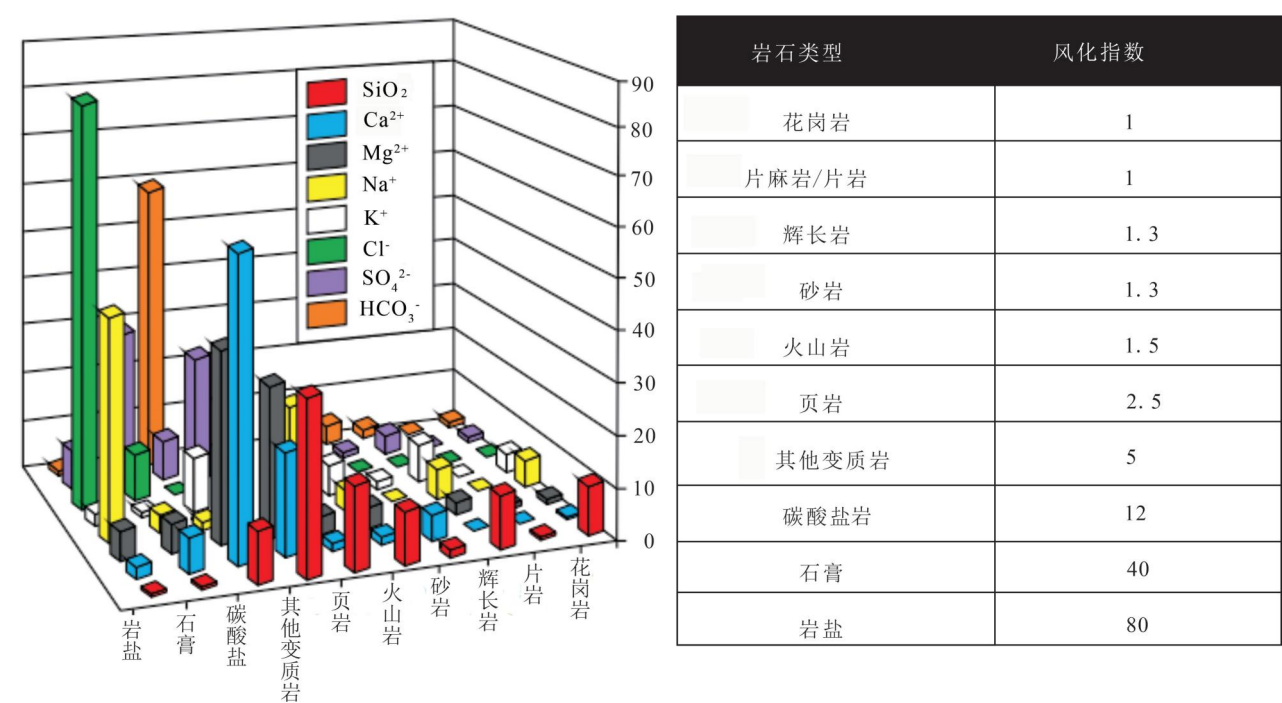


图 1 以溶质生成表示不同岩性的化学风化速率(据 Allen et al. , 2013)

Fig. 1 The chemical weathering rate of different lithology is expressed by solute formation(after Allen et al. , 2013)
(a) 8 种主要离子按岩石类型的分布;(b) 不同岩石类型的风化速率
(a) Distribution of eight main ions by rock type;(b) weathering rate of different rock types

传统的物源分析方法包括碎屑成分分析法、重矿物单颗粒分析和组合分析、元素地球化学分析等(赵红格等,2003)。碎屑成分分析法对判定物源区有很好的作用,通过对选定层位砂岩样品中的石英、长石、岩屑含量进行统计,用 Dickinson 碎屑骨架三角图(Dickinson,1985)进行投值(图 2),根据样品点的分布,确定物源类型及其构造属性。

稳定性强的重矿物能够较多的保留在沉积物中,可以通过单矿物颗粒或重矿物组合来指示物源;元素地球化学分析也经常被用来研究物源,通过研究元素的组成、组合、相对含量、分布规律、比值关系、多元图解、配分模式,以及元素与同位素的关系等,进行物源示踪(杨仁超等,2013)。

近年来地质年代测年技术不断发展完善,沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谱已经成为确定物源区组成和母岩地质年代的有效途径。通过碎屑锆石年龄组成与潜在源区结晶岩体年龄组成对比,可区分出源区母岩地质年代、母岩物质组成及优势路径系统(谈明轩等,2020)。借助于阴极发光、透射光下的锆石等碎屑矿物形态学特征,还能很好的判别物源体系类型和搬运距离(图 3)。目前碎屑锆石 U-Pb 定年

分析技术已广泛应用到大型沉积盆地源—汇系统研究当中(李忠等,2016;蒋一鸣,2019;Zhao Rui et al. , 2020)。

随着计算机技术和测试技术的不断发展,定量物源分析(QPA)成为物源研究的主要内容,主要是定量地评价从可识别的物源区到盆地充填过程中的碎屑物质类型、数量及供给速率(Weltje,2012)。范德江等依据“质量守恒”原理提出的沉积物物源定量识别非线性规划数学模型可定量计算沉积物物源,阐明入海物质的大致分布特征(范德江等,2002)。

1.1.3 汇水单元刻画

汇水区又称作集水区、集水盆地、流域盆地,是指水流所携带的物质汇聚到一共同的出水口的过程中所流经的地表区域。出水口是指物源离开汇水区的点,这个点是汇水区边界上的最低点。通常物源区包含不同规模的汇水区,确定受断层控制的分水岭、不同汇水区的面积、垂向高差和水系延伸长度等参数对研究搬运通道和沉积区十分关键。

古地貌能直观地反映母岩区的地貌特点,有利于汇水单元的刻画。目前恢复古地貌的方法主要包括:地质年代学法、将近论古法、物源分析法、印模

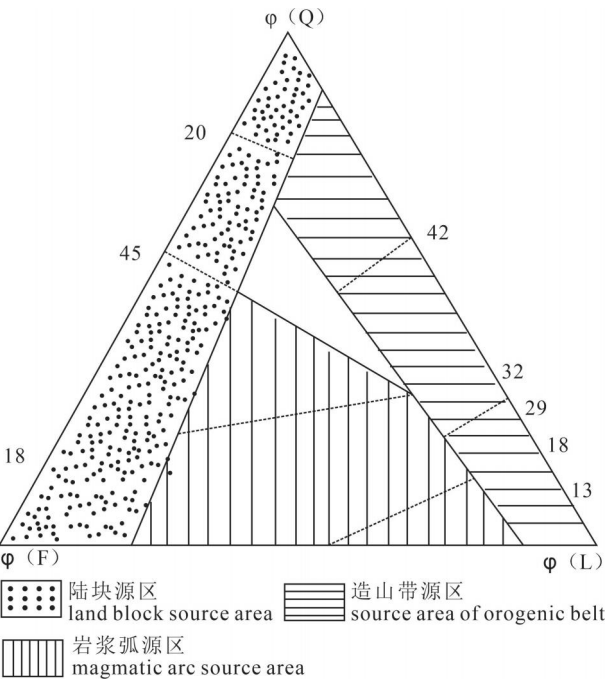


图 2 砂岩 $\phi(Q)-\phi(F)-\phi(L)$ 图解
(据 Dickinson, 1985)

Fig. 2 $\phi(Q)-\phi(F)-\phi(L)$ diagram of sandstone
(after Dickinson, 1985)

Q—石英+燧石; F—长石; L—不稳定岩屑; 1—陆块源区; 2—造山带源区; 3—岩浆弧源区。I—克拉通区; II—过渡型大陆区; III—基底抬升区; IV—切割弧区; V—过渡型弧区; VI—未切割弧区; VII—石英质再旋回区; VIII—过渡再旋回区; IX—岩屑质再旋回区; X—混和源区

Q—quartz and flint; F—feldspar; L—unstable rock cuttings; 1—land block source area; 2— source area of orogenic belt; 3—magmatic arc source area. I— cratonic region; II— transitional continental region; III— basement uplift area; IV— cutting arc area; V— transitional arc zone; VI— uncut arc area; VII— quartz re cycle area; VIII— transitional re cycle area; IX— lithic recycle area; X— mixed source area

法、水文学法和沉积学法等(操应长等,2018)。由于不同的源—汇系统保存的地质信息不同,不同源—汇系统研究方法所需的资料也不同,在进行源区重构时就要综合考虑源区特点采用不同分析方法。基于剥蚀量恢复的古地貌图是进行汇水单元划分的关键图件,利用该图件可确定母岩区凸起轴向展布与两侧坡向变化,在长轴方向拾取与之平行的分水岭,建立一级汇水单元;在一级汇水单元内综合考虑凸起边缘构造沉降量及构造样式差异,在短轴方向拾取对应的分水线,建立二级汇水单元;在二级汇水单元内综合考虑地形坡度、水系发育系数、主水系及分支水系组合等参数差异,拾取次一级分水边界,划分三级汇水单元,定量确定汇水面积、垂向高差和水系

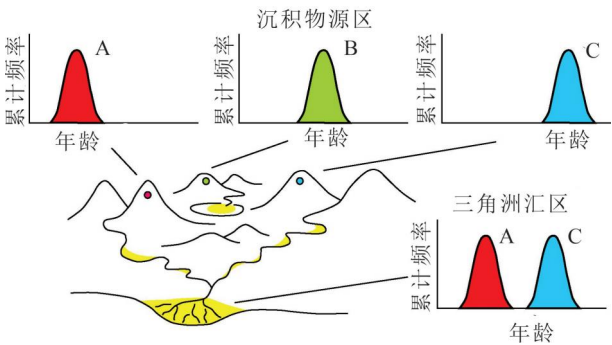


图 3 碎屑锆石 U-Pb 定年分析沉积物路径系统示意图(据谈明轩,2020)

Fig. 3 Schematic diagram of sediment path system for U-Pb dating analysis of detrital zircon (after Tan Mingxuan, 2020&)

延伸长度等参数,结合母岩岩性评价不同物源系统的供源能力以及受构造、气候等地质因素的控制演化特征(刘强虎等,2017)。

1.2 搬运体系

搬运通道是连接物源区和沉积区的运输纽带,物源区被风化剥蚀后所产生的碎屑物质,经过搬运通道的运输输导,在与搬运通道对应的坡折下倾地区堆积下来(徐长贵,2013)。搬运通道的类型、规模大小和产状控制了物源输入方向,继而影响整个源—汇系统的特征。

1.2.1 搬运通道类型

碎屑沉积物通过搬运通道进入沉积区,一部分在输砂通道终端沉积,一部分在搬运通道中滞留,另一部分在海(湖)作用下搬运至深水区沉积。搬运通道对沉积物在搬运过程中的形成和分布有重要的控制作用。陆相断陷湖盆搬运通道主要包括三种:古沟谷、断槽和构造转换带。这几种搬运通道类别和空间发育位置都具特有的发育分布特征,为连接源—汇系统组成单元起到桥梁作用。地震资料能够很好地识别不同类型的搬运通道。

古沟谷是在基准面下降到坡折点之下,地表遭受剥蚀形成的,一般沿层序界面发育,多出现在盆地边缘或古隆起上。根据沟谷的剖面几何形态,可将其划分为 V 型、U 型和 W 型。V 型古沟谷主要发育在物源区附近,水动力强,垂向下切作用明显,输砂能力强,为河流初期的河道沉积;U 型古沟谷主要发育在距离物源区相对较远的位置,水动力较强,输砂能力强,为河流壮年期的形态;W 型古沟谷主要发育在距离物源区最远的位置,水动力相对弱,河流分

叉,输砂能力减弱,为河流晚期的河道剖面形态。在平面上,辫状河供源常常对应发育 V 型和 U 型沟谷;曲流河和网状河供源常常对应发育 U 型或 W 型沟谷。古沟谷在地震剖面上有多个不同的识别标志:外部形态表现为明显的下切,同相轴不连续,内部表现为上超特征等(图 4)(肖凡,2017)。

断槽是陆相湖盆中由两条相邻的主干正断层所夹持的槽道或洼沟,可以分为单断槽和双断槽两种类型。单断槽具有一侧陡、一侧缓的不对称箕状结构和楔形充填地震相特征;双断槽具有等厚的对称结构和平行—亚平行的上超地震相特征。当物源注入方向与断裂带走向方向一致时,断槽为沉积物的搬运和沉积提供了通道与场所,可以形成一系列平行盆地长轴方向的、顺断层走向分布的条带状扇三角洲、三角洲或轴向重力流水道沉积。

构造转换带是一类在构造变形中为维持区域变形量守恒而产生的调节结构,多发育于拉张和走滑地质背景中。构造转换带类型多样,是碎屑物源注入裂陷盆地的主要通道,不仅对沉积物的搬运方向和沉积储集层的发育具有重要的控制作用(Wu Dong et al., 2015),而且对构造圈闭的形成有很大

影响。

源区地表动力学背景的差异塑造了不同级别、不同类型的搬运通道。洋陆边缘盆地源—汇系统的水系主要以稳定型曲流河为主,延伸距离较远、规模较大,构造活动稳定,主要发育古沟谷物源通道;断陷盆地源—汇系统的水系则以延伸距离较短、规模较小的辫状河为主,构造活动强烈,可发育上述古沟谷等三种搬运通道;坳陷盆地源—汇系统的水系则往往以稳定性曲流型、游荡性网状型、渐弱性改造型河流为主,构造稳定性介于洋陆边缘盆地和断陷盆地二者之间,主要发育古沟谷物源通道。不同类型的输砂体系可以相互转化,如断面随着侵蚀作用的增强,断面上也会形成沟谷,随着相对海/湖平面上升河道作用由侵蚀作用转为充填作用,搬运通道剖面形态从上游到下游则经历 V—U—W 形演化,甚至会进一步演变成山间洼地;断槽型输砂体系在晚期也可以演变成 U 型谷和山间洼地。这 3 种类型输砂体系可以是单一存在,也可以组成复合的输砂体系类型(徐长贵,2013)。

1.2.2 搬运通道定量表征

在明确搬运通道时空展布特征和类型后,可以对搬运通道进行定量表征,定量统计搬运通道的参数主要包括宽度、深度、宽深比及截面积。沟谷的宽度、深度及宽深比影响沉积物进入盆地之前的搬运方式,截面积控制了沉积物输送能力和速率,统计搬运通道的参数对研究沉积物搬运路径以及沉积物搬运通量的计算有很重要的作用(Liu Qianghu et al., 2019)。通过垂直于沟谷延伸方向地震剖面分析,可明确沟谷的延伸距离、坡度、深度、宽度、下切形态、充填样式等,从而恢复沟谷的输砂能力。

1.3 沉积体系

沉积体系是源区演化控制下物源供给、物质搬运及分配的综合响应,沉积响应继承了物源供给和搬运过程两者复杂性,更叠加了沉积区物质分配的复杂性(操应长等,2018)。分析沉积盆地沉积相类型对确定砂体展布有重要作用。在陆相断陷盆地沉积充填过程中,由于构造沉降的幕式性、湖平面变化的旋回性与气候改变的周期性导致盆地沉积地层的旋回性以及旋回的多级次性,不同级

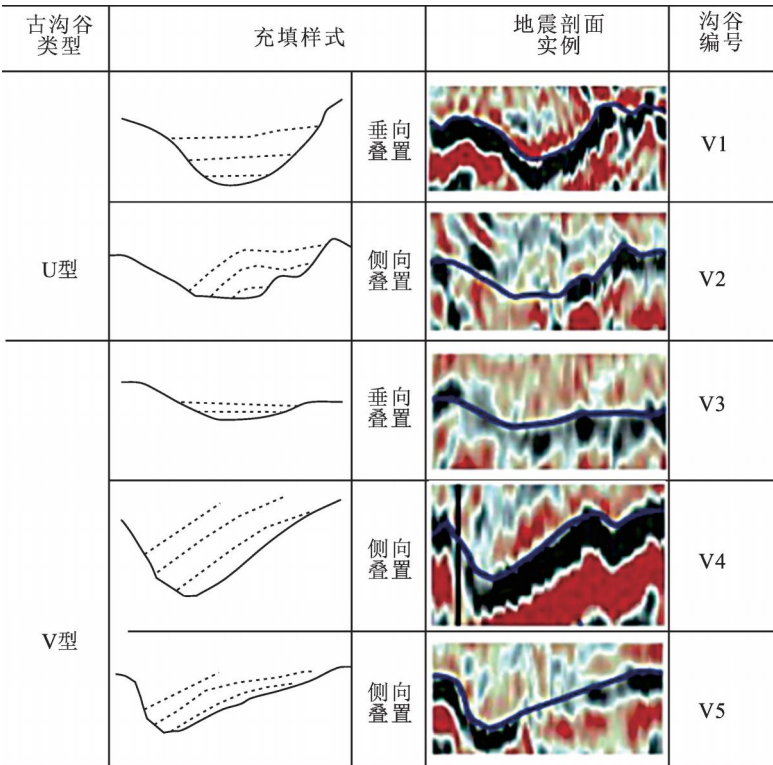


图 4 济阳坳陷埕岛东坡渐新统东营组东二段物源通道类型及充填样式
Fig. 4 Provenance channel types and filling styles of the Second Member of the Oligocene Dongying Formation in the east slope of Chengdao in Jiyang Depression

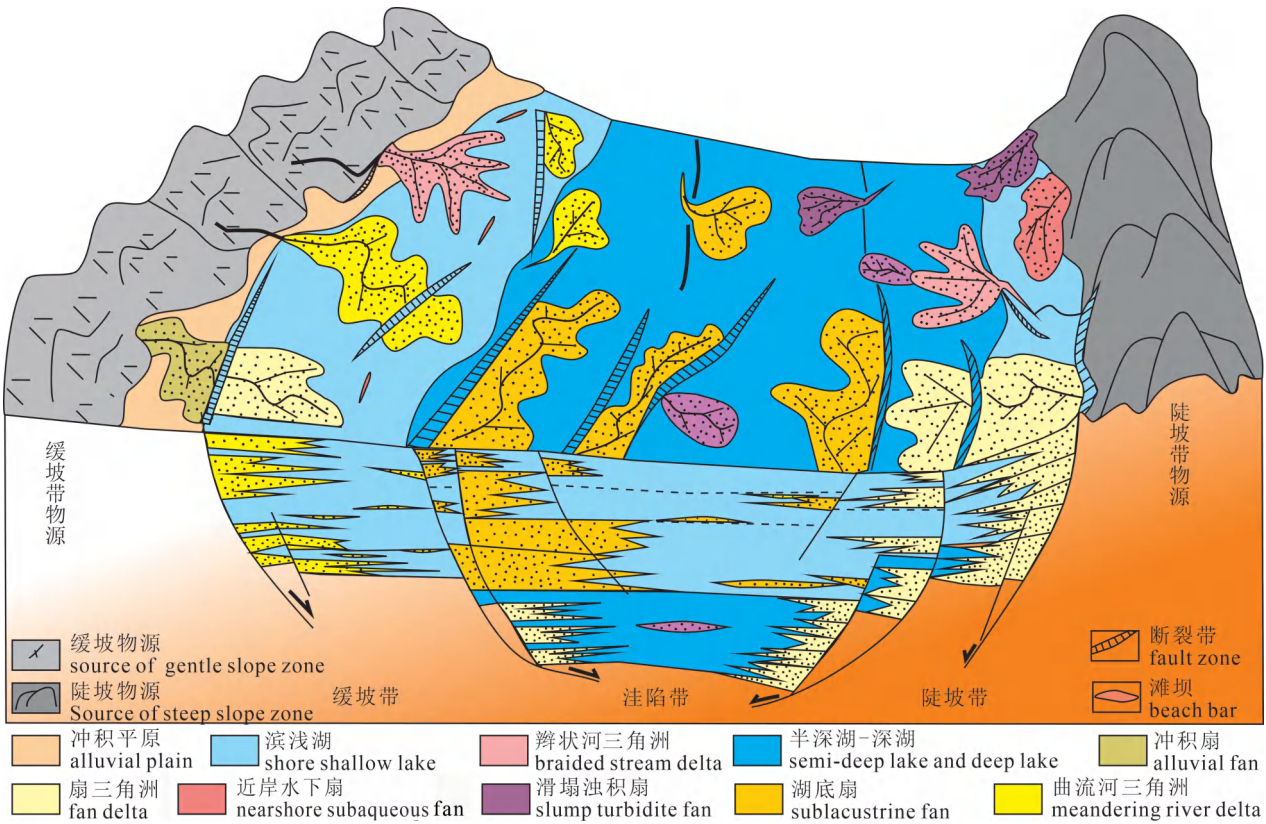


图 5 断陷湖盆构造单元及沉积充填样式(改自林畅松,2019)

Fig. 5 Structural units and sedimentary filling styles of rift basin(Modified from Lin Changsong, 2019&)

次的沉积旋回具有自相似性特征,层序地层控砂是在高分辨率层序划分与对比的基础上,对砂体成因类型与时空展布进行精细预测。

在古源汇系统的研究中,三维地震资料发挥了关键性作用。常规地震资料解释可用于划分基本构造单元(凹陷、凸起、过渡带及相互关系)、判别源—汇系统基本单位、划分古流域和古水系并计算物源区各项参数。在沉积体系研究方面,不仅使用现代沉积学和地震地层学开展沉积体系类型和分布研究,地震沉积学也得到了广泛应用。通过在岩性地震体内划分沉积层序、制作地层切片、解释岩性地貌体系,可恢复确定沉积区多个沉积层序的沉积体系类型、分布特征和纵向演化规律。

对于现代源汇系统的沉积体系研究,目前常用的方法有遥感技术或无人机扫描技术,先进的遥感技术能够清晰展示源区、搬运通道、河道规模及迁移过程、湖泊及三角洲演化等,对于定量表征源汇系统要素有重要的指导意义。

2 断陷盆地源—汇系统要素差异性

2.1 断陷湖盆结构特征

断陷盆地受控于断裂构造活动,其中箕状断陷盆地是目前最常见、具有成因意义的一种盆地结构形态或单元,在不同期次裂陷演化作用影响下,盆地中不同的沉积单元基于其时空展布特征可分为并排式、串联式、雁列式和交织式等,在不同裂陷演化期次多次叠加下形成断陷盆地复合沉积单元。根据盆地的构造地形特征及相应的沉积空间组合样式,断陷湖盆通常可细分为 3 个不同构造区带或地貌单元:陡坡带、中央注陷带和缓坡带(图 5)。

由于陆相断陷盆地特殊的成因机制,一般正断层作为断陷盆地或凹陷的主要边界断层,盆地另一侧的边界断层活动强度较弱,进而形成不对称的箕状结构(慕德梁等,2009)。盆地控盆断层及其控制的上盘断超带称为陡坡带,这些控盆断层一般为分割凸起与凹陷的、倾角陡、落差大的基底断层,上升盘凸起长期暴露地表、较长时间为物源提供区,形成超覆、披覆、断块等现象;下降盘可容空间大,容易沉积厚层砂砾岩体(李丕龙,2003)。陡坡带坡度陡、近物源、古地形起伏较大和构造活动强烈的特点(石

表 2 断陷盆地陡坡带与缓坡带源—汇系统要素及耦合关系差异对比

Table 2 Comparison of source-to- sink system elements and coupling relationship between steep slope zone and gentle slope zone of rift basin

源汇系统类型	物源区	搬运区	沉积区	耦合模式
陡坡带 源汇系统	多物源供给;近源;地形高差大;地形坡度 15°~35°;地形起伏明显。	古沟谷、断槽和构造转换带;沟谷深度较深,宽深比较大;延伸距离较近。	冲积扇、斜坡扇近岸水下扇、扇三角洲、辫状河三角洲、滑塌浊积扇。	主控因素:构造沉降。次要因素:湖平面变化、沉积物供给、气候、古地形
缓坡带 源汇系统	物源供给多样;远源;地形高差小;地形坡度小于 15°;地形起伏小。	古沟谷为主,局部发育断槽和构造转换带;沟谷深度较浅,宽深比较小;延伸距离较远。	缓坡楔状体、滩坝、曲流河三角洲、辫状河三角洲、湖底扇。	主控因素:湖平面变化、沉积物供给。次要因素:构造沉降、气候、古地形

影,2015)使其具有临近深陷带、紧邻生排烃中心、就近获得油气充注的优势,是油气勘探的重要构造区带(黄彤飞等,2020)。

缓坡带是断陷湖盆内以斜坡形式与周围凸起相连的二级构造带,横向上为控制洼陷的盆倾断层至凸起分水岭之间的构造单元。缓坡带具有坡度平缓、距物源较远、古地形起伏较小、构造活动持续缓慢和地层不整合发育等特点,发育多种成因的细粒储集体。不同类型的河流携带碎屑物质入湖,可形成扇三角洲或河流三角洲(Li Yuan et al. , 2017)。缓坡带邻近生油洼陷,而且在盆地演化过程中长期处于相对有利的构造位置,是油气运移的重要指向区。

中央洼陷带位于湖盆中部,但一般偏向陡坡区一侧,是湖盆内部地势相对最低的部分,远离物源区(张万选等,1989)。依据沉积时的水深,它可以是深湖、半深湖、浅湖,甚至于盐湖环境。洼陷带往往是盆地的油源中心,除此之外,缓坡带、中央隆起带的三角洲和扇三角洲前缘砂体等储集体垮塌沉积可发育大量浊积砂体,并形成众多的岩性相对较细的原生砂岩圈闭(图 5)。

2.2 断陷盆地陡坡带与缓坡带源汇要素差异

陡坡带与缓坡带作为断陷盆地独立的次级构造单元,其形成过程和地貌结构存在差异,进而导致其源—汇系统要素具有一定的差异性,主要差异表现在以下几个方面(表 2):

(1)物源区(物源体系)差异。陡坡带物源体系十分复杂,包括长期遭受风化剥蚀的、稳定的、容易识别的盆外物源(徐长贵等,2017),以及在特定的地质条件和特殊的地史时期遭受剥蚀而不容易识别的盆内物源(杜晓峰等,2017)。由于距离物源区较近,坡陡水急,山洪爆发时泥石流(碎屑流)沉积广布,母岩区风化产物颗粒粗、大小混杂、分选极差。陡坡带坡度较陡,一般在 15°~35°以上,由于长期继承性的断陷活动,地形高差均在 2000 m 以上,最大可达 6000 多米,造成坡脚很深,但平面宽度较窄,一般仅

几公里,最大也只十几公里。受边界断层控制,汇水区古地貌形态曲折多变,地形起伏变化明显。

与陡坡带相比,缓坡带距离物源区较远,物源体系主要包括两种:物源长时间供给的大型内陆泄水盆地通过主河道搬运沉积物,形成三角洲等大型的沉积体(Bhattacharya et al. , 2016);由古沟谷提供少量沉积物并搬运至沉积区,形成小规模沉积体(邵龙义等,2019)。由于距离物源区较远,坡度缓,构造作用缓慢,其母岩区风化产物粒度相对较细。缓坡带坡度较缓,一般小于 15°,断层延伸距离较短、落差较小,受构造活动影响相对较小,古地形起伏变化较小,在陆相断陷盆地中分布面积最广。

(2)搬运区(搬运体系)差异。陡坡带搬运通道类型主要为古沟谷、断槽和构造转换带。陡坡带距离物源近,水动力条件强,古沟谷主要为 V 型和 U 型沟谷,河道下切作用明显,沟谷深度较深,宽深比较大,延伸距离较近;断槽和构造转换带相对比较发育。

缓坡带搬运通道类型主要为古沟谷,沟谷深度相对较浅,宽深比较小,随搬运距离的增加,搬运通道的剖面形态经历 V—U—W 形演化,可进一步演变成山间洼地。断裂坡折带、挠曲坡折带和古地貌坡折带是缓坡带的重要构造样式,控制了沉积物搬运通道和沉积相类型的分布(赵贤正等,2017)。

(3)沉积区(沉积体系)差异。断陷湖盆陡坡带沉积地层中多种成因的砂砾岩扇体极为发育,垂向上沉积厚度大,横向上各沉积相带变化快。陡坡带主要发育辫状河三角洲、扇三角洲、近岸水下扇、陡坡深水浊积扇、近岸砂体前缘滑塌浊积扇等砂砾岩扇体,其中以近岸水下扇和扇三角洲最为发育(图 6)。

缓坡带发育了滨浅湖背景下的多种成因的储集体,垂向上沉积厚度较小,呈互层状,横向上各沉积相带较稳定:河流、辫状河三角洲、曲流河三角洲、滨浅湖滩坝砂体等储集体在不同部位广泛发育,其中尤以滨浅湖、滩坝及河流三角洲相砂体发育为特征(李丕龙,2002)(图 6)。

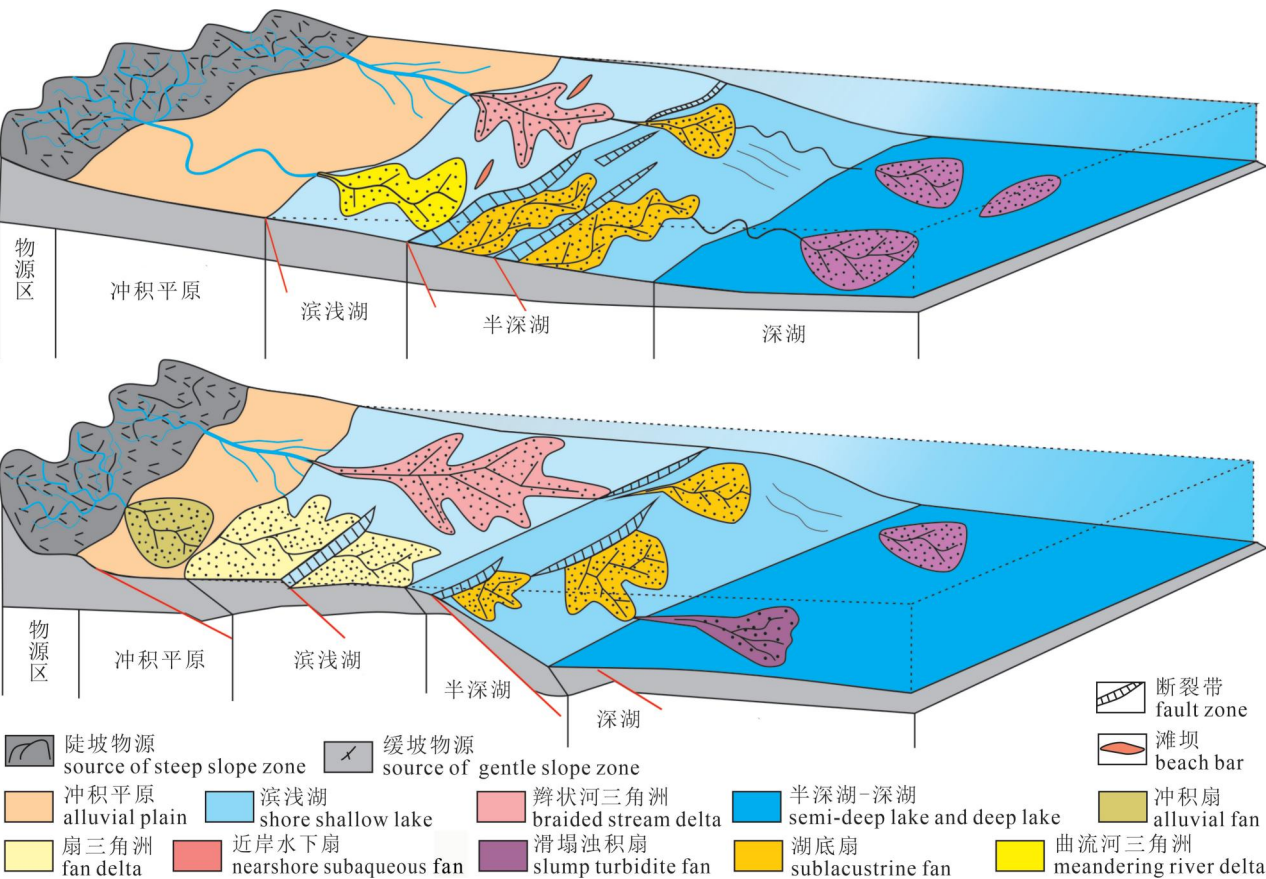


图 6 断陷湖盆陡坡带(a)与缓坡带(b)源汇系统地貌带分布

Fig. 6 Distribution of geomorphic of source-to- sink system in steep slope zone (a) and gentle slope zone (b) of rift basin

(4)源—汇系统耦合差异。综上源—汇系统要素分析,可将断陷盆地源—汇耦合系统划分为近源—短轴—浊积扇型、近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型和远源—长轴—湖泊三角洲型等类型。

断陷盆地陡坡带主要发育近源—短轴—浊积扇型、近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型两种源—汇系统耦合类型。受构造沉降的影响,断陷盆地一般都经历了从早期的裂陷到晚期的裂后拗陷阶段的演化(李欢等,2015)。初始裂陷期,构造活动较为强烈,物源供给量较少,主要发育近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型源汇系统。在暴雨期,物源区单个汇水系统形成的泥石流最终都汇集在主沟道内,形成大规模泥石流,顺主沟道入湖沉积,形成平面上小而多、垂向上厚度较大的近岸水下扇或湖相三角洲沉积,当坡度增加并形成断阶时,在洼陷区可形成浊积扇、近岸水下扇沉积。在间洪期,若主沟道内有长期存在的山间水道发育,则会有顺这些水道搬运的沉积物进入湖盆形成牵引流沉积(图 6)(Gawthorpe et al., 2000);深陷扩张期,控盆深大断裂的持续活动

使湖盆发生深陷,构造活动极其强烈,物源供给充足,稳定性极差,极易发生滑塌形成平面上小而多且垂向上厚度较大的近岸水下扇沉积,构成近源—短轴—浊积扇型源—汇系统耦合机制;当后期断裂活动与前期发生分叉或出现断阶时,水下扇或三角洲的前端则多可形成浊积扇。抬升收缩期凹陷整体发生了抬升,湖盆明显由断陷向拗陷转化,陡坡带沉积类型由水下扇向扇三角洲过渡(赖生华等,2007)。

断陷盆地缓坡带或盆地长轴方向主要发育远源—长轴—湖泊三角洲型源汇系统耦合类型。缓坡带构造作用影响相对较弱,主要受湖平面变化和沉积物供给影响。湖盆裂陷初期,湖平面较低,沉积物供给充足,由河道搬运至沉积区,在多种坡折处卸载,形成垂向上厚度相对较薄的小型粗粒三角洲;深陷扩张期,湖平面增高,沉积物供给量增加,由古沟谷输送,受波浪作用影响,形成平面上大而少且厚度相对较薄的三角洲;湖泊萎缩期,水体变浅,物源供给大幅减少,缓坡带发育以进积型正常三角洲—滩坝为组合的沉积体系。

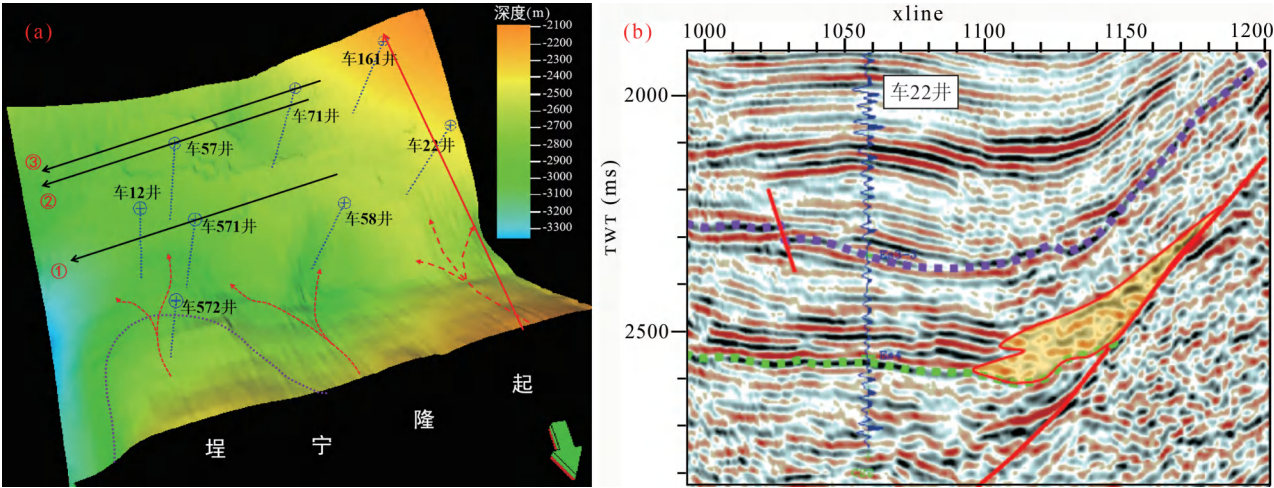


图 7 渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷车 22 井区滑塌成因的近岸水下扇

Fig. 7 Nearshore subaqueous fan caused by collapse in the Well Che-22 area, Chezhen sag, Jiyang Depression

3 断陷盆地源—汇系统研究实例

3.1 车镇凹陷陡坡带古近系沙河街组沙三下亚段源—汇系统

车镇凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷北部,其北部和西部与埕宁隆起以断层相接触、南面向义和庄凸起超覆,东端与沾化凹陷相邻,整体具有北断南超的结构特点,是典型的张扭型断陷盆地(于兴河等,2007;朱筱敏等,2014)。本次研究区位于车镇凹陷的西北部陡坡带。车镇凹陷陡坡带在沙三下亚段沉积时期湖盆强烈断陷,气候湿润,降水量很大,导致相对湖平面持续上升,湖盆可容空间变大,形成深湖区。

车镇凹陷的西北部陡坡带形成发育受北部埕南断裂带的控制,北西方向所接的埕子口凸起是研究区主要的物源区,物源区出露遭受剥蚀的母岩主要为寒武—奥陶系的碳酸盐岩和石炭—二叠系以及中生界的碎屑岩、岩浆岩,且以前者为主(鲜本忠等,2007)。

车镇凹陷的西北部陡坡带构造活动强烈,控盆边界断裂呈幕式活动,断陷湖盆中的主控断裂及其伴生形成的次级断裂组合构成的构造转换带控制了沉积物的搬运路径。研究区搬运通道类型主要有古沟谷和构造转换带两种。在构造活动相对稳定时期,物源区风化产物以山间泥石流形式沿陡坡带入湖,搬运通道主要为 V 型沟谷和 U 型沟谷的转换。

在构造活动强烈时期,发育近源—短轴—浊积扇型源—汇系统,沉积物在陡坡部位易失稳发生滑塌,沿构造转换带发育舌型近岸水下扇。以车 22 井

区为例,该区无沟道发育,断面较陡,易发生滑塌作用,形成以滑塌岩为主的近岸水下扇,扇体规模相对较小,延伸距离短(图 7)。随着滑塌沉积物不断堆积,坡度不断增大,当达到平衡位置时,这些早期滑塌沉积物再次发生滑塌,向湖盆中心进一步搬运(曹刚等,2016),形成物源供给充足,紧邻边界断层发育连片的滑塌浊积扇沉积(王星星等,2016)。

在构造活动相对稳定时期,发育近源—短轴—冲积扇/扇三角洲型源—汇系统。物源区单个汇水系统形成的泥石流最终都汇集在主沟道内,形成大规模泥石流,顺主沟道入湖沉积,形成近岸水下扇沉积,若主沟道内有长期存在的山间水道发育,则会有顺这些水道搬运的沉积物进入湖盆形成牵引流沉积。以车 57 井—车 71 井—车 571 井区为例,随搬运距离的增加,水动力条件减弱,沟道深度逐渐减小、规模减小、逐渐散开(图 8)。

综上,车西洼陷陡坡带沙三下亚段沉积时期,构造活动强烈,地形高差大,母岩类型主要为碳酸盐岩、碎屑岩和火山岩,导致了物源区的差异化侵蚀,形成了陡坡带古沟谷和滑塌两种搬运方式。两种搬运方式形成的近岸水下扇类型也不同,由滑塌作用形成的沉积体普遍发育滑塌变形构造,平面展布较小,厚度较大;由沟道搬运形成的沉积体具有明显的牵引流特征,平面展布较大,厚度相对较小。

3.2 东营凹陷南缓坡沙河街组二段源—汇系统耦合

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东南部,是一个具典型北断南超、北陡南缓不对称结构的新生

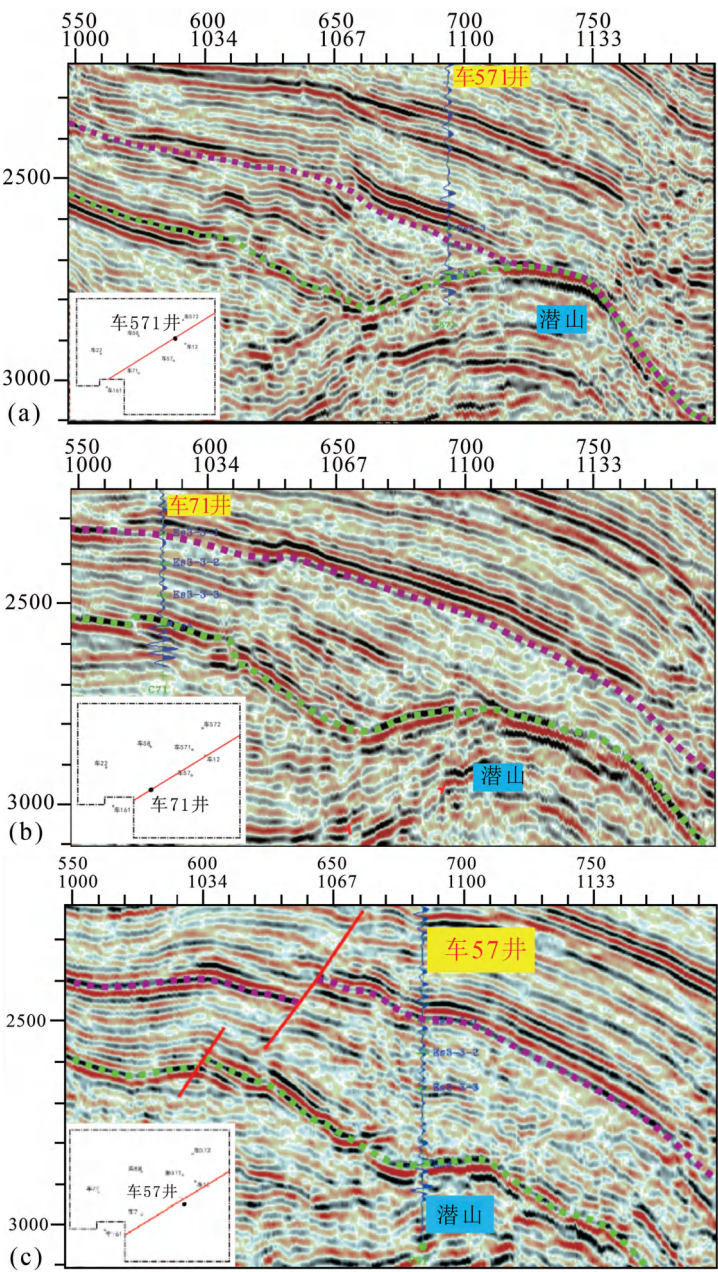


图 8 渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷车 571 井—车 71 井—车 57 井区古沟谷演化(剖面位置见图 7a)

Fig. 8 Evolution of ancient channels in the Well Che-571—the Well Che-71—the Well Che-571 area, Chezhen sag, Jiyang Depression(fig. 7a is the section position)

代箕状断陷湖盆,凹陷自北向南划分为北部陡坡带、中央断裂带、中央洼陷带和南部缓坡带(操应长等,2009)。本次研究区为东营凹陷南部缓坡带,沙二段沉积时期南部缓坡带为构造稳定的斜坡带,与其物源区广饶凸起构成完整的远源—长轴—湖泊三角洲型源—汇系统。

通过沉降回剥分析技术,恢复了东营凹陷南缓

坡沙二段沉积前古地貌,根据古地貌展布,对沙二段沉积边界精确刻画,确定了沉积边界以南的广饶凸起为本次研究的物源区。物源区母岩成分以花岗岩和变质岩为主,含有部分碳酸盐岩。结合物源区地震资料,将物源区自西向东划分为 i—iii 3 个二级汇水单元和 I—III 3 个沉积区。其中 i 区地势相对比较平坦,垂向高差和汇水面积较小;ii 区和 iii 区为局部隆起与侵蚀沟谷构成的山谷地貌,ii 区垂向高差和汇水面积相对较大;iii 区垂向高差和汇水面积最大(图 9)。

研究区搬运通道类型主要为古沟谷,包括 V 型、U 型和 W 型 3 种。通过地震剖面可从汇水单元 i—iii 划分出 W 型古沟谷 V1、W 型古沟谷 V2、U 型古沟谷 V3 和 W 型古沟谷 V4。其中汇水单元 i 区通过古沟谷 V1 向沉积 I 区供源,汇水单元 ii 通过古沟谷 V2 和 V3 联合向沉积 II 区供源,汇水单元 iii 通过古沟谷 V4 向沉积 III 区供源(图 10)。

东营凹陷南部缓坡带地形坡度相对平缓,构造活动稳定,物源供给充足,综合钻井、岩芯及分析化验资料认为该区沙二段发育浅水辫状河三角洲。在不同汇水单元的供源作用下,沉积区朵叶体的沉积过程和形态规模差异显著。向沉积 I 区供源的 i 号汇水单元面积较小,垂向高差较小,碎屑沉积物经古沟谷输送搬运,于地形坡度较大的沉积 I 区卸载,朵叶体垂向厚度大,平面展布面积小;向沉积 II 区和沉积 III 区供源的物源区汇水面积和垂向高差较大,通过古沟谷进行搬运。沉积 II 区古地形坡度小,形成大面积展布的三角洲朵叶,沉积 III 区发育的槽道对沉积物的输送及汇聚能力强,形成顺槽道延伸方向狭长状展布的朵叶体,垂向厚度大,平面展布面积较小(秦祎等,2017)。

综上,东营凹陷南部缓坡带沙二段沉积时期,构造活动稳定,气候干旱炎热,地形坡度较缓,母岩区物理风化作用较强,提供了丰富的碎屑物质及碳酸盐岩物源,沉积物沿水下分流河道迅速向前推进,分流河道长距离延伸,受汇水单元、湖平面变化及地形坡度控制,在盆地地下倾方向形成不同形态和规模的浅水辫状河三角洲。朵叶体的发育规模与源区的汇水单元面积、垂向高差及古沟谷形态与规模密切相关,源区汇水单元面积大、垂向

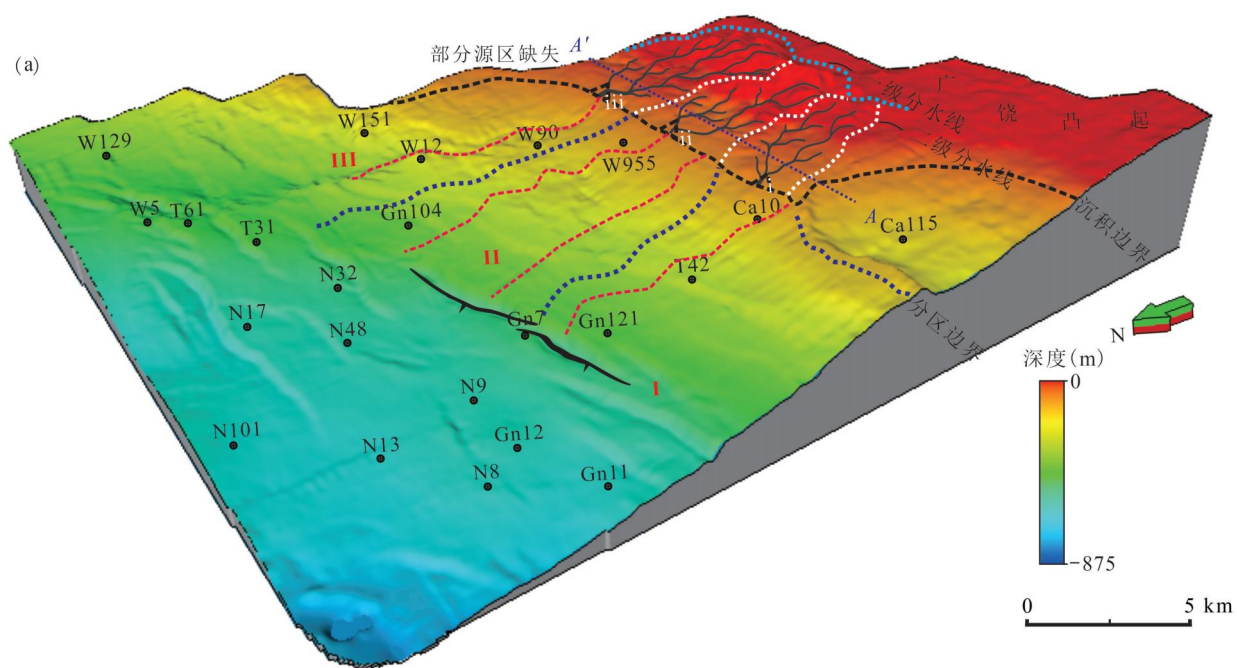


图 9 济阳拗陷东营凹陷南缓坡始新统沙二段沉积古地貌(据秦玮等,2017)

Fig. 9 Sedimentary paleogeomorphology of the Second Member of the Eocene Shahejie Formation on the south gentle slope of the Dongying Sag, Jiyang Depression (after Qin Yi et al. , 2017&)

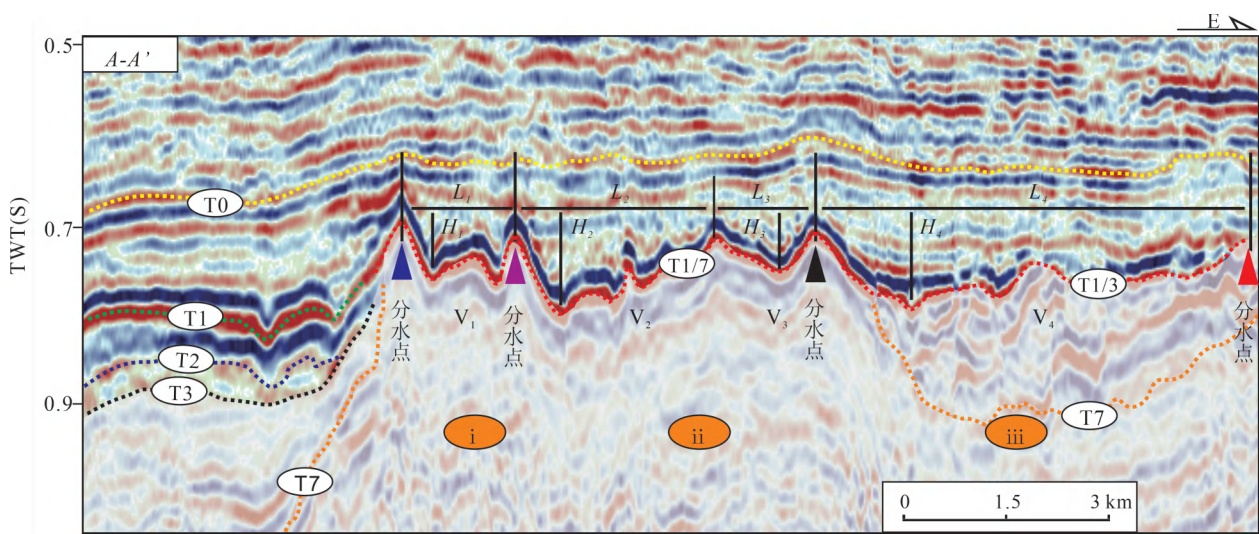


图 10 渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷南缓坡沙二段搬运通道类型(据秦玮等,2017)

Fig. 10 Types of transportation channel in the Second Member of the Eocene Shahejie Formation on the south gentle slope of the Dongying Sag, Jiyang Depression (after Qin yi et al. , 2017&)

高差大、古沟谷搬运汇聚能力强,形成的沉积体系规模大,反之则沉积体系规模小。

4 源—汇系统研究展望

关于源—汇系统的研究已经取得了丰富的成果但还有许多方面需要加强深入研究。今后应发展多学科、多方法联合研究,重视物源体系、从源到汇的

定量响应关系研究,明确源—汇系统量化约束下的沉积过程模拟,在少井条件下为规模储层预测提供有力支持。

(1)源—汇系统类型和级次划分。陆相断陷盆地地形复杂,物源供给多样,源—汇系统的定量化和精细化是目前主要的研究趋势,源—汇系统划分是源—汇系统量化研究和精细解剖的基础(陆威延

等,2020)。现代湖盆源—汇系统级次划分可以直接应用 Google Earth 和数字高程模型 DEM 进行识别;古代源—汇系统可以通过地震资料进行古地貌及原型盆地恢复,获取古地貌特征、格局和时空演化等信息,开展古代湖盆源—汇系统级次划分。

(2)深时源—汇系统研究。深时源汇系统的一个关键方面在于随着地质时间的推移,物源区、搬运区以及沉积区的边界通常难以界定,物源区地貌要素往往遭受剥蚀而不复存在,而沉积区也可经历构造作用成为后期物源区而遭受剥蚀,各要素的内在联系难以保存下来;其次深部时间系统中的另一个关键问题是地层沉积的测年分辨率及其随后的成岩作用改造,现今的测年技术仍然代表一个大的时间跨度(Brian et al., 2013)。在进行深时源汇系统的研究时,应更加强多种分析方法交叉验证,保证参数的准确性与一致性。

(3)源—汇系统参数定量研究。建立源—汇系统不同要素的定量响应关系,可以进行量化储层预测,使源—汇系统研究具有更高的准确性及预测性。通过地质年代法、将今论古法等方法准确的计算物源区剥蚀量,运用三维地震资料精确地恢复地质时期古地貌,测量古地貌参数,建立源汇系统各要素的定量耦合模型,并进行沉积体规模的预测。

(4)源—汇系统控制下的砂体预测。源—汇系统对定量表征沉积物通量有重要的作用,结合源—汇系统研究思路可以明确沉积体系演化过程及砂体的空间展布,结合测井、地震属性与反演技术可以表征砂泥岩在三维空间的分布,从而为进一步优质砂岩岩相模拟、储层属性参数的量化表征提供数据支持(商晓飞等,2022)。

(5)多学科与多方法交叉融合确定源汇系统。源—汇系统研究过程是极其复杂的,涉及的学科包括:年代地球化学、地球物理学、构造地质学、层序地层学、沉积地质学等。研究方法也逐渐从反演到正演、由静态至动态、从定性到定量方向发展。加强相关学科和方法之间的联系与验证,提高源—汇系统重塑的准确性是有效预测整个源—汇系统过程的保证。

致谢:感谢中石化、中海油相关科研项目的支持以及各位审稿专家和编辑提出的建设性意见。该文是中国石油大学(北京)朱筱敏沉积科研团队近期科研成果的总结,以此祝贺中国地质学会百年华诞和《地质论评》主编杨文采院士 80 寿辰!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 蔡全升, 胡明毅, 陈孝红, 胡忠贵. 2018. 小型断陷湖盆扇三角洲沉积特征与发育模式——以徐家围子断陷北部沙河子组为例. 岩性油气藏, 30(1): 86~96.
- 操应长, 王健, 刘惠民, 贾光华, 万念明. 2009. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式. 中国石油大学学报: 自然科学版, 33(6): 5~10.
- 操应长, 徐琦松, 王健. 2018. 沉积盆地“源—汇”系统研究进展. 地学前缘, 25(4): 116~131.
- 曹刚, 王星星, 朱筱敏, 曲全工, 吴陈冰洁, 贺敬聪, 戴博毅. 2016. 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层成岩演化及其对储层物性影响. 沉积学报, 34(1): 158~167.
- 陈炳屹, 林承焰, 马存飞, 任丽华, 王军, 李志鹏, 杜凯. 2019. 陆相断陷湖盆陡坡带深水重力流沉积类型、特征及模式——以东营凹陷胜坨地区沙四段上亚段为例. 地质学报, 93(11): 2921~2934.
- 杜晓峰, 加东辉, 王启明, 宋章强. 2017. 盆内局部物源体系及其油气勘探意义——以渤海海域古近系为例. 中国海上油气, 29(4): 19~27.
- 范德江, 孙效功, 杨作升, 郭志刚. 2002. 沉积物物源定量识别的非线性规划模型——以东海陆架北部表层沉积物物源识别为例. 沉积学报, 20(1): 30~33.
- 黄彤飞, 张荻荻, 李曰俊, 刘爱香, 程顶胜, 客伟利, 罗贝维, 王彦奇, 刘红. 2020. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷福西陡坡带变换构造特征及控藏作用. 中国石油勘探, 25(4): 105~114.
- 蒋一鸣. 2019. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组碎屑锆石 U-Pb 年龄及米兰科维奇旋回: 对源—汇系统及沉积演化的约束. 地质科技情报, 38(6): 133~140.
- 赖生华, 李晓宏. 2007. 断陷盆地沉积体系研究新思路: 从古地貌、岩性变化、水体深度到沉积体系. 沉积学报, 25(5): 663~670.
- 李欢, 杨香华, 朱红涛, 周心怀, 李建平. 2015. 渤中西环古近系东营组物源转换与沉积充填响应. 沉积学报, 33(1): 36~48.
- 李丕龙. 2002. 陆相断陷盆地缓坡带油气运聚规律研究——以惠民凹陷南坡为例. 中国科学院研究生院(兰州地质研究所), 1~99.
- 李丕龙. 2003. 陆相断陷盆地油气地质与勘探 卷六·陆相断陷盆地勘探新技术. 石油工业出版社, 1~303.
- 李忠, 高剑. 2016. 构造活动区特征源汇体系及古地理重建: 以塔里木块体北缘记录“泛非”事件的碎屑锆石分析为例. 古地理学报, 18(3): 424~440.
- 栗宝鹃. 2016. 地震沉积学及其在陆相断陷湖盆砂体预测中的应用研究. 中国石油大学(华东), 1~142.
- 林畅松. 2019. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势. 石油与天然气地质, 40(4): 685~700.
- 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 徐长贵, 杜晓峰, 李慧勇, 石文龙. 2017. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源—汇系统. 地球科学, 42(11): 1883~1896.
- 陆威延, 朱红涛, 徐长贵, 张向涛, 杜晓峰, 杜家元, 李森. 2020. 源—汇系统级次划分方法及应用. 地球科学, 45(4): 1327~1336.
- 慕德梁, 孟卫工, 李成, 李晓光, 柳锦云, 王占忠. 2009. 断陷盆地陡坡带构造样式与油气聚集——以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷陡坡带为例. 石油与天然气地质, 30(5): 635~642.

潘元林, 李思田. 2004. 大型陆相断陷盆地层序地层与隐蔽油气藏研究. 石油工业出版社, 1~225.

秦祯, 朱世发, 朱筱敏, 贾光华, 唐东, 陈涛, 张维, 高子颖. 2017. 东营凹陷南缓坡浅水三角洲沉积特征与源—汇过程. 地球科学, 42(11): 2081~2094.

商晓飞, 李蒙, 刘君龙, 段太忠. 2022. 基于源—汇系统的砂体分布预测与三维地质建模——以四川盆地川西坳陷新场构造带须二段为例. 天然气工业, 42(1): 62~72.

邵龙义, 王学天, 李雅楠, 刘炳强. 2019. 深时源—汇系统古地理重建方法评述. 古地学报, 21(1): 67~81.

石影, 黄文辉, 王华军, 万欢, 董果果. 2015. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩储层物性演化及评价. 煤炭科学技术, 43(S1): 141~145.

谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 刘伟, 赵宏超, 苏彬. 2020. 古“源—汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述. 石油与天然气地质, 41(5): 1107~1118.

王星星, 朱筱敏, 宋爽, 吴陈冰洁, 贺敬聪, 曹刚. 2016. 渤海湾盆地车西洼陷陡坡带古近系沙河街组沙三下段“源—汇”系统. 古地学报, 18(1): 65~79.

鲜本忠, 王永诗, 周廷全, 孙立东. 2007. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素——以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例. 石油勘探与开发, 34(4): 429~436.

肖凡. 2017. 源—汇系统组成单元搬运通道特征及其控制下的沉积体定量预测. 中国地质大学, 1~63.

徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 赵梦. 2017. 沉积盆地“源—汇”系统研究新进展. 石油与天然气地质, 38(1): 1~11.

徐长贵, 赖维成, 薛永安, 于水, 程建春. 2004. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用. 石油勘探与开发, 31(5): 53~56.

徐长贵. 2013. 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. 中国海上油气, 25(4): 1~11+21+88.

杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 宗敏, 张涛. 2013. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势. 沉积学报, 31(1): 99~107.

杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 银熙炉. 2011. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例. 石油学报, 32(3): 417~423.

叶蕾, 朱筱敏, 秦祯, 朱茂. 2018. 断陷湖盆浅水三角洲沉积体系. 地球科学与环境学报, 40(2): 186~202.

叶茂松, 解习农, 黄灿. 2014. 陆相坳陷湖盆斜坡带层序格架下沉积模式及隐蔽圈闭勘探: 以准噶尔盆地车排子凸起春光油田白垩系为例. 地质科技情报, 33(4): 149~158.

于兴河, 姜辉, 李胜利, 陈永峤. 2007. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳坳陷东营凹陷为例. 岩性油气藏, 19(1): 39~45.

张万选, 曾洪流, 张厚福. 1989. 中国东部陆相单断式盆地地震相模式. 石油实验地质, 11(2): 125~135.

张祥国. 2014. 陆相断陷湖盆近岸水下扇沉积特征与沉积模式——以海塔盆地塔南凹陷为例. 西部探矿工程, 26(12): 61~64.

赵春晨, 刘豪, 张帅, 潘卫红, 马波. 2017. 断陷湖盆沉积层序演化模式及主控因素分析. 科学技术与工程, 17(17): 39~49.

赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3): 409~415.

赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 陈妍. 2011. 断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式——以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例. 地质学报, 85(6): 1019~1027.

赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 周立宏, 金凤鸣, 肖敦清, 姜文亚, 韩文中, 张伟. 2017. 断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现——以歧口凹陷歧北缓坡带为例. 石油学报, 38(7): 729~739.

周学文, 姜在兴, 贾超尘, 段冶, 张译丹, 罗丹婷. 2018. 断陷湖盆三角洲—重力流体体系沉积模式与控制因素——以牛庄洼陷沙三中亚段为例. 第十五届全国古地理学及沉积学学术会议.

朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 曾洪流, 姜在兴, 刘可禹. 2017. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展. 地球科学, 42(11): 1851~1870.

朱筱敏, 赵东娜, 姜淑贤, 葛家旺, 张守鹏, 韩雪芳, 刘新. 2014. 渤海湾盆地车镇凹陷陡坡带沙河街组近岸水下扇低孔低渗储层成岩序列. 地球科学与环境学报, 36(2): 1~9+143.

朱秀, 朱红涛, 曾洪流, 杨香华. 2017. 云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异. 地球科学, 42(11): 2010~2024.

Allen P A, Armitage J J, Carter A, Duller R A, Michanel N A, Sinclair H D, Whitchurch A L, Whittaker A C. 2013. The Qs problem: mass balances of Alpine foreland basin systems. In: Alpine Sedimentology, Special Issue in Sedimentology in honour of Albert Matter and Daniel Bernoulli, International Association of Sedimentologists. Sedimentology, 60(1): 102~130.

Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. Nature, 451(7176): 274~276.

Bhattacharya J P, Copeland P, Lawton T F, Holbrook J. 2016. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential. Earth-Science Reviews, 153: 77~110.

Brian W R, Stephan A. 2013. Graham. A deep-time perspective of Land-Ocean linkages in the sedimentary record. Annual Review of Marine Science, 5: 69~94.

Cai Quansheng, Hu Mingyi, Chen Xiaohong, Hu Zhonggui. 2018&. Sedimentary characteristics and development model of fan delta in small faulted basin: a case of Shahezi Formation in northern Xujiaweizi Fault Depression, NE China. Lithologic Reservoirs, 30(1): 86~96.

Cao Gang, Wang Xingxing, Zhu Xiaomin, Qu Quangong, Wu Chen bingjie, He Jingcong, Dai Boyi. 2016&. Diagenetic evolution of Es₃ nearshore subaqueous fan reservoir and its influence on property in the steep slope zone of Western Chezheng sub-sag. Acta Sedimentologica Sinica, 34(1): 158~167.

Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, Jia Guanghua, Wan Nianming. 2009&. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying depression. Journal of China University of Petroleum, 33(6): 5~10.

Cao Yingchang, Xu Qisong, Wang Jian. 2018&. Progress in “Source-to-sink” system research. Earth Science Frontiers, 25(4): 116~131.

Chen Bingyi, Lin Chengyan, Ma Cunfei, Ren Lihua, Wang Jun, Li Zhipeng, Du Kai. 2019&. Types, characteristics and sedimentary model of deep-water gravity flow deposition in the steep slope zone of terrestrial faulted lacustrine basin: a case study of the Es submember in the Shengtuo area of Dongying depression. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2921~2934.

Dickinson W R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. Provenance of arenites. Springer Dordrecht, 333~361.

Du Xiaofeng, Jia Donghui, Wang Qiming, Song Zhangqiang. 2017&. Local provenance system and its oil and gas exploration significance: a case study of the Paleogene in Bohai sea area. China Offshore Oil and Gas, 29(4): 19~27.

Fan Dejiang, Sun Xiaogong, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. 2002&. A mathematical model on the quantitative provenance identification—Take the identification of the surface sediment sources from ECS as example. Acta Sedimentologica Sinica, 20(1): 30~33.

Gawthorpe R L, Leeder M R. 2000. Tectono—sedimentary evolution of

- active extensional basins. *Basin Research*, 12(1): 195~218.
- Huang Tongfei, Zhang Diqiu, Li Yuejun, Liu Aixiang, Cheng Dingsheng, Ke Weili, Luo Beiwei, Wang Yanqi, Liu Hong. 2020&. Characteristics of transfer structure and hydrocarbon accumulation control of Fula western steep slope belt in the Fula sag, Muglad Basin, Sudan. *China Petroleum Exploration*, 25(4): 105~114.
- Jiang Yiming. 2019&. Detrital zircon U-Pb age and milankovitch cycles of Pinghu Formation in the Pinghu slope of Xihu Depression: Constraints on source sink system and sedimentary evolution. *Geological Science and Technology Information*, 38(6): 133~140.
- Kuehl S A, Nittrouer C A. 2011. Exploring the transfer of earth surface materials from source to sink. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(22): 188~188.
- Lai Shenghua, Li Xiaohong. 2007&. A new approach in studying depositional system within rift-subsidence basin: From paleogeomorphology lithologic change and water depth to depositional system. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(5): 663~670.
- Li Baojuan. 2016&. Seismic sedimentology and its application in sandbody prediction of continental fault-depressed lacustrine basin. China University of Petroleum(East China) for the Degree of doctor of PhD, 1~142.
- Li Huan, Yang Xianghua, Zhu Hongtao, Zhou Xinhuai, Li Jianping. 2015&. The provenance transformation and sedimentary filling response of Paleogene Dongying Formation in western slope of Bozhong Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(1): 36~48.
- Li Pilog. 2002&. Research on rule of oil—gas migration and accumulation in gentle slope zone of terrestrial fault basin——Take an example of south slope of Huimin Sag. *Chinese Academy of Sciences (Lanzhou Institute of Geology)*, 1~99.
- Li Pilog. 2003#. *Petroleum geology and exploration in continental rift basins. volume VI: New exploration techniques for continental rift basins.* China Petroleum Industry Press, 1~303.
- Li Yuan, Lin Song, Wang Hua, Luo Denggui. 2017. Depositional setting analysis using seismic sedimentology: Example from the Paleogene Lishagang sequence in the Fushan depression, South China Sea. *Geodesy and Geodynamics*, 8(5): 347~355.
- Li Zhong, Gao Jian. 2016&. Characteristic source—sink systems and palaeogeographic reconstruction in active tectonic regions: A case research on detrital zircons recording the Pan-African event in northern Tarim Block. *Journal of Palaeogeography*, 18(3): 424~440.
- Lin Changsong. 2019&. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 685~700.
- Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Li Shunli. 2019. Source-to-sink analysis in an Eocene rifted lacustrine basin margin of western shaleitian uplift area, offshore Bohai Bay Basin, eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 41~58.
- Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Li Shunli, Xu Changgui, Du Xiaofeng, Li Huiyong, Shi Wenlong. 2017&. Source-to-sink system of the steep slope fault in the western shaleitian uplift. *Earth Science*, 42(11): 1883~1896.
- Lu Weiyan, Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhang Xiangtao, Du Xiaofeng, Du Jiayuan, Li Sen. 2020&. Methods and Applications of Level Subdivision of Source-to-Sink System. *Earth Science*, 45(4): 1327~1336.
- Mu Deliang, Meng Weigong, Li Cheng, Li Xiaoguang, Liu Jinyun, Wang Zhazhong. 2009&. Structural style and hydrocarbon accumulation in the steep slope zone of faulted basin: an example from the western sag of the Liaohe Depression, the Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 635~642.
- Pan Yuanlin, Li Sitian. 2004#. Research on sequence stratigraphy and subtle reservoirs in large continental rift basins. China Petroleum Industry Press, 1~225.
- Qin Yi, Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Jia Guanghua, Tang Dong, Chen Tao, Zhang Wei, Gao Zijie. 2017&. Shallow water delta sedimentation and source-to-sink process in the south slope belt, Dongying Sag. *Earth Science*, 42(11): 2081~2094.
- Shang Xiaofei, Li Meng, Lu Junlong, Duan Taizhong. 2022&. Source—sink system based sand body distribution prediction and 3D geological modeling: A case study of the 2 Member of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 42(1): 62~72.
- Shao Longyi, Wang Xuetian, Li Yanan, Liu Bingqiang. 2019&. Review on palaeogeographic reconstruction of deep-time source-to-sink systems. *Journal of Palaeogeography*, 21(1): 67~81.
- Shi Ying, Huang Wenhui, Wang Huajun, Wan Huan, Dong Guoguo. 2015&. Reservoir properties evolution of glutenite reservoirs evaluation in northern steep slope of Dongying Depression. *Coal Science and Technology*, 43(S1): 141~145.
- Sømme T O, Helland Hansen W, Martinsen O J, Thurmond J B. 2010. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: a basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems. *Basin Research*, 21(4): 361~387.
- Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Zhang Zili, Liu Wei, Zhao Hongchao, Su Bin. 2020&. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient "source-to-sink" systems. *Oil & Gas Geology*, 41(5): 1107~1118.
- Walsh J P, Wiberg P L, Alato R, Nittrouer C A, Kuehl S A. 2016. Source-to-sink research: Economy of the earth's surface and its strata. *Earth-Science Reviews*, 153: 1~6.
- Wang Xingxing, Zhu Xiaomin, Song Shuang, Wu Chenbingjie, He Jingcong, Cao Gang. 2016&. "Source-to-sink" system of the Lower Member of Paleogene Shahejie Formation in steep slope zone of Western Chezheng sub-sag, Bohai Bay Basin. *Journal Of Palaeogeography*, 18(1): 65~79.
- Weltje G J. 2012. Quantitative models of sediment generation and provenance: state of the art and future developments. *Sedimentary Geology*, 280: 4~20.
- Wu Dong, Zhu Xiaomin, Su Yongdi, Li Yutong, Li Zhi, Zhou Yuanyuan, Zhang Mengyu. 2015. Tectono—sequence stratigraphic analysis of the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation in the Fula Sub-basin, Muglad Basin, southern Sudan. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 286~306.
- Xian Benzong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, Sun Lidong. 2007&. Distribution and controlling factors of glutenite bodies in the active region of a rift basin: an example from Chezheng Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration And Development*, 34(4): 429~436.
- Xiao Fan. 2017&. Characteristics of transport pathways in component units of source to sink systems and quantitative prediction on sedimentary bodies under its control. China University of Geosciences For the Full-Time Master of Professional Degree of Geological Engineering, 1~63.
- Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, Zhao Meng. 2017&. New advances of the "Source-to-Sink" system research in sedimentary basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1~11.
- Xu Changgui, Lai Weicheng, Xue Yongan, Yu Shui. 2004&. Palaeogeomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area. *Petroleum Exploration And Development*, 31(5): 53~56.

Xu Changgui. 2003#. Controlling sand principle of source—sink coupling in time and space in continental rift basins; basic idea, conceptual systems and controlling sand models. *China Offshore Oil And Gas*, 25(4): 1~11+21+88.

Yang Renchao, Li Jinbu, Fan Aiping, Zong Min, Zhang Tao. 2003#. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 99~107.

Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Yin Xilu. 2011#. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins; A case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 32(3): 417~423.

Ye Lei, Zhu Xiaomin, Qin Yi, Zhu Mao. 2018#. Depositional system of shallow water delta in rifted lacustrine basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(2): 186~202.

Ye Maosong, Xie Xinong, Huang Can. 2014#. Depositional models and subtle trap exploration under sequence stratigraphic framework in slope belt of continental lacustrine depression basin; An example as Chunguang Cretaceous oilfield in Chepaizi Area, Junggar Basin. *Geological Science and Technology Information*, 33(4): 149~158.

Yu Xinghe, Jiang Hui, Li Shengli, Chen Yongqiao. 2007#. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China—A case study of Dongying Sag of Jiyang Depression. *Lithology Reservoirs*, 19(1): 39~45.

Zhang Wanxuan, Zeng Hongliu, Zhang Houfu. 1989#. Models of seismic facies for continental mono-faulted basins in eastern China. *Experimental Petroleum Geology*, 11(2): 125~135.

Zhao Chunchen, Liu Hao, Zhang Shuai, Pan Weihong, Ma Bo. 2017#. The evolution model of depositional sequences of rift lacustrine basin and analysis on its main controlling factors. *Science Technology and Engineering*, 17(17): 39~49.

Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003#. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409~415.

Zhao Wei, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Chen Yan. 2011#. Depositional evolution and model of shallow-water delta in the rifting lacustrine basins during the shrinking stage; A case study of the Third Member and Second Member of Paleogene Shahejie Formation in the Niuhuang Subsag, Dongying Sag. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 1019~1027.

Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Wang Jiahao, Zhou Lihong, Jin Fengming, Xiao Dunqing, Jiang Wenya, Han Wenzhong, Zhang Wei. 2017#. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin; a case study of Qibei slope in Qikou sag. *Acta Petrolei Sinica*, 38(7): 729~739.

Zhao Rui, Zhang Jinyu, Zhou Chuanmin, Zhang Zhijie, Chen Si, Daniel F S, Olariu C, Steel R, Wang Hua. 2020. Tectonic evolution of Tianshan—Bogda—Kelameili mountains, clastic wedge basin infill and chronostratigraphic divisions in the source-to-sink systems of Permian—Jurassic, southern Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104200.

Zhang Xiangguo. 2014#. Sedimentary characteristics and models of nearshore subaqueous fan in continental faulted lacustrine basin; a case study of Tanan Sag, Haila Basin. *Western Exploration Engineering*, 26(12): 61~64.

Zhou Xuewen, Jiang Zaixing, Jia Chaochen, Duan Yan, Zhang Yidan, Luo Danting. 2018#. sedimentary model and controlling factors of delta gravity fluid system in faulted lake basin—Taking the middle sub member of Es³ in Niuzhuang depression as an example. The 15th National Conference on Paleogeography and Sedimentology.

Zhu Hongtao, Steel R, Zhu Xiaomin, Liu Keyu, Zeng Hongliu, Jiang Zaixin, Wood L, Olariu C. 2017. Introduction to special section: Source-to-sink system analysis of petroliferous and other sedimentary basins. *Interpretation*, 5(4): STi~STii.

Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Jiang Zaixing, Liu Keyu. 2017#. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin. *Earth Science*, 42(11): 1851~1870.

Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Jiang Shuxian, Ge Jiawang, Ge Jiawang, Zhang Shoupeng, Han Xuefang, Liu Xin. 2014#. Diagenetic sequence of low porosity and permeability reservoirs from nearshore subaqueous fan of Shahejie Formation in the steep slope zone of chechen depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(2): 1~9+143.

Zhu Xiu, Zhu Hongtao, Zeng Hongliu, Yang Xianghua. 2017#. Subdivision, characteristics, and varieties of the source-to-sink systems of the modern lake Erhai Basin, Yunnan Province. *Earth Science*, 42(11): 2010~2024.

Characterization and research prospect of source-to-sink system elements in continental rift basin

NIE Yinlan, ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, YANG Ke, QIN Yi, YE Lei
School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249

Abstract: Source—to—sink system refers to the dynamic one in which the source formed by denudation landform is dispersed and deposited in the catchment basin through the transportation. It has an important research significance in the field of geoscience. The source—to—sink system consists of three important elements; source, transportation and depositional system. Only by studying the three elements as a systematic process can we fully understand the dynamic process and evolution of the earth’s surface. Continental rift basin is an important type of petroliferous sedimentary basin in China. In this paper, the structural characteristics of continental rift basin are systematically analyzed. As an independent secondary structural unit of faulted basin, the internal steep slope zone

and gentle slope zone are different in formation process and geomorphic structure, which leads to the differences in the elements of corresponding source-to-sink system. According to the coupling elements of source-to-sink system, the types of source-to-sink system in different structural zones of the rift basin can be divided into three types: near source-short axis-turbidite fan type, near source-short axis-alluvial fan / fan delta type and far source-long axis-lacustrine delta type. Two types of source-to-sink system coupling types, near source-short axis-turbidite fan type and near source-short axis-alluvial fan / fan delta type, are mainly developed in the steep slope zone; In the gentle slope zone and the long axis direction of the basin, the source-to-sink system coupling type of far source-long axis-lacustrine delta type is mainly developed. In the future, the source-to-sink system research will carry out comprehensive research through multiple disciplines and methods, focus on the deep-seated source system, transportation and dispersion system, emphasize the quantitative characterization of source-to-sink system elements and their coupling response relationship, predict large-scale favorable sedimentary sand bodies, and provide predictive models and geological basis for the exploration and development of sedimentary minerals.

Keywords: ontinental rift basin; source-to-sink system; element representation; source-to-sink system type; scale sandbody prediction

Acknowledgements: Thank Sinopec and CNOOC for their support of relevant scientific research projects, as well as all reviewers and editors for their constructive comments on this article. This article is a summary of the recent scientific research achievements of ZHU Xiaomin sedimentary research team of China University of Petroleum (Beijing), in order to congratulate the centenary birthday of the Chinese Geological Society and the 80th birthday of academician YANG Wencai, editor in chief of Geological Review.

First author: NIE Yinlan, female, born in 1997, is studying for a master's degree, engaged in sedimentology and paleogeography; Email: 2322429891@qq.com

Corresponding author: ZHU Xiaomin, male, born in 1960, professor, now engaged in teaching and scientific research of sedimentary geology; Email: xmzhu@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2022-03-29; Accepted on: 2022-07-07; Network published on: 2022-07-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 07. 041 **Edited by:** LIU Zhiqiang