

渤中西环古近系东营组物源转换与沉积充填响应^①

李欢^{1,2} 杨香华^{1,2} 朱红涛^{1,2} 周心怀³ 李建平³

(1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074; 2.中国地质大学(武汉)资源学院 武汉 430074;
3.中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452)

摘要 通过砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄分析、火山碎屑组分含量变化、地震多属性分析、层序地层格架与沉积充填特征综合分析,认为东二段沉积时期渤中西环的物源供给方式、层序地层格架及沉积充填特征发生明显的变化。东二下段沉积期前,湖盆处于强烈裂陷期,中—深湖相泥岩发育,物源主要为盆地内部的中生代火成岩基底,沉积层序明显受盆内低凸起控制,在盆内低凸起四周发育一系列近源的扇三角洲朵体;东二下段沉积期后,湖盆处于断—坳过渡期,盆内低凸起四周的断裂活动减弱,沉积层序逐渐向盆内低凸起超覆,盆外太古代—元古代变质岩物源供给不断加强,近源的扇三角洲砂体逐渐向远源的辫状河三角洲砂体转化,同时发育宽广的滨浅湖环境。渤中西环古近纪沉积充填过程中,地层样式、沉积模式与物源供给方式的一致性变化,体现了裂陷湖盆充填演化的内在规律,为我国东部裂陷盆地演化及裂陷旋回划分提供了新的线索。

关键词 渤中西环 东营组 物源转换 层序格架 沉积充填

第一作者简介 李欢 男 1990 年出生 硕士 沉积学与层序地层学 E-mail:lihuantry@163.com

通讯作者 杨香华 男 教授 E-mail:xhyang111@vip.sina.com

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

断陷盆地面积仅占世界沉积盆地面积的 5.4%,其探明的油气储量却占总储量的 10%^[1]。我国东部中生代断陷盆地一般都经历了从早期的裂陷到晚期的裂后坳陷阶段的演化,但裂陷阶段往往具有幕式的特点^[2-5]。第三纪渤海湾盆地的裂陷过程也具有多幕的特征,古近纪经历了孔店期、沙四期、沙三期和东营期共 4 期裂陷作用^[4],研究区目的层东营组为第 IV 期裂陷的产物。

我国近海富烃凹陷在沉积充填过程中盆地的物源体系均发生有规律的变化:断陷期,构造活动强烈,盆地凹凸相间、地形坡降大、内部地形分割性强,以彼此分隔的小断陷为基本构成单元^[6-9],盆地内部的凸起、低凸起都是凹陷的物源供给区,局部物源效应明显,沉积作用具有近源、快速堆积的特点;坳陷期,断裂构造活动减弱,盆地内部低凸起较为平缓,或被水体覆盖,地形高差明显减小,风化剥蚀速度也明显减少,故盆内碎屑物供给相对减少^[8-10],这时物源区主要位于盆地边界外的造山带或褶皱带,以区域物源供给为主。

古近系渤中凹陷沉积充填过程中沉积模式、物源供给方式发生明显的变化,砂体成因类型、空间展布与物源供给方式的转换存在明显的对应关系。通过对研究区东营组物源转换及其地质响应的对比分析,可以为渤海湾盆地古近系盆地演化及研究区砂体预测提供新的信息与地质依据。

1 地质背景

渤中凹陷位于渤海湾盆地内部,其四周与渤东低凸起、渤南凸起、沙垒田凸起及石臼坨凸起相接,本文研究凹陷的西部斜坡(图 1)。渤海湾盆地断裂体系以走向连续分布的 NNE—NE 向和断续分布的 NWW—EW 向为主,这两个方向的断层形成了共轭剪切关系^[11]。研究区古近系沉积时期物源主要受盆地西北部的燕山褶皱带和石臼坨低凸起、沙垒田隆起等盆内凸起、低凸起的影响。

渤中凹陷新近系巨厚,是整个渤海湾盆地的沉积沉降中心。古近系地层发育齐全,具有典型多幕裂陷旋回的沉积充填演化特征:孔店组—沙四段地层分布范围局限,主要沉积深灰色、杂色泥岩夹白色、杂色砂、砾岩,凝灰质砂砾岩;沙三段沉积时期发育中深

^①国家重大油气专项课题(编号:2011ZX05023-001-015)、国家重大油气专项课题(编号:2011ZX05023-001-001)与国家自然科学基金项目(批准号:40702024)联合资助

收稿日期:2013-10-28;收修改稿日期:2014-04-09

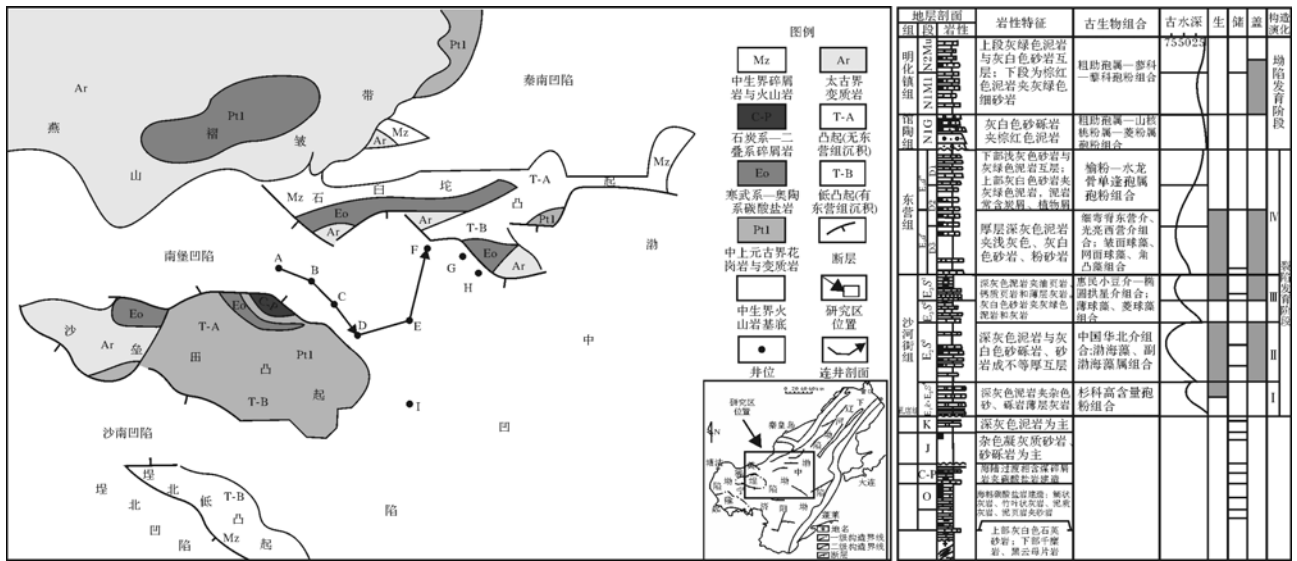


图 1 研究区位置、井位、地层层序(据何士斌等,2001 改编)及前第三系基底分布图
 Fig.1 Location, well positions, strata sequence (modified from He Shibin, et al., 2001) and pre-Tertiary basement distribution of the study area

湖—深湖相暗色泥岩,是烃源岩的主要发育层段;沙二段以粗碎屑沉积岩为主,含少量白云岩及钙质砂岩,是储层的主要发育层段;沙一段以深灰色泥岩、褐色页岩为主,是一套区域性湖相烃源岩,盆内低隆起上发育生物碎屑灰岩;东营组三段与东营组二段下部主要发育灰色—深灰色泥岩,同时发育少量薄层砂岩和泥质砂岩,是盆地中另一套重要的烃源岩,盆地四周发育扇三角洲砂体;东营组二段上部与东营组一段主要发育广阔的滨浅湖,主要物源方向发育大型辫状河三角洲。

2 古近系物源转换的证据

2.1 碎屑锆石物源示踪方法简述

物源分析的主要任务是确定物源方向、侵蚀区或母岩区位置、搬运距离及母岩的性质^[12],近年来已发展成为多方法、多技术的一门综合研究领域^[13]。由

于锆石广泛分布在各类岩石中,富含 U、Th 与 Pb,及非常高的矿物稳定性,使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最为常用和最有效的方法之一^[14]。

在一个沉积盆地中,来源于不同源区的碎屑物具有不同的年龄组成,某一沉积单元中的碎屑锆石颗粒的 U-Pb 年龄必然具有多个频率峰值^[15]。通过锆石 U-Pb 测年分析,可以明确源区岩石时代;通过阴极发光(CL)图像的分析研究,可以较好地揭示锆石内部结构特点、成因历史^[16-17],一般认为锆石的形态特征与其形成时的物理、化学环境是密切相关的^[18],不同成因锆石的基本特征如表 1。

本文利用对研究区重点井的东营组砂岩锆石的 U-Pb 年龄分析,确定母岩的地质年代;利用锆石 CL 图像分析,确定锆石成因;结合火山碎屑组分含量的变化、砂体成因及地震多属性所揭示的碎屑砂体平面展布的变化,最终明确渤中凹陷内沉积物的物质来源。

表 1 岩浆锆石与变质锆石主要特征对比^[19]

Table 1 Comparison of major characteristics of magmatogenic zircon and metamorphogenic zircon

特征	岩浆锆石	变质锆石
形成环境	熔体的结晶作用	高级变质岩的深熔作用;变质分解反应和固体成核作用;含水变质流体的结晶作用;岩浆锆石的固相重结晶作用。
化学特征	Th、U、Th/U 高,均匀;HREE 富集,Ce、Eu 异常	Th、U、Th/U 低而分散;不同程度的 LREE 富集
内部结构	振荡分带,亮色的 CL、HF 易蚀刻	黑色部分带 CL,多种增生结构(冷杉状、星云状、辐射状等),不易蚀刻
结晶习性	自形,晶面简单,晶棱尖锐,平直棱柱面发育,细长柱	半自形、不规则,晶面复杂,晶面有溶蚀,晶棱圆滑,短柱,圆形,等轴
年龄意义	冷却年龄	形成年龄,冷却年龄

渤中凹陷存在两个物源,即凹陷内的基底与凸起和盆地西北部的燕山构造带。盆地西北部的燕山构造带主要发育太古代变质岩,局部发育元古代变质岩;凹陷内石臼坨凸起主要发育中生界火山岩及火山碎屑岩,局部发育古生代碳酸盐岩及太古代变质岩,沙垒田凸起以元古代变质岩为主,局部分布太古代变质岩及古生代碳酸盐岩;盆内低凸起之间的基底以中生界火山岩及火山碎屑岩为主,这也是盆内分布面积最大的母岩类型。我们将凹陷内凸起与基底称为局部物源,盆地西北部的燕山构造带称为区域物源。上述两类物源在岩石岩性及地质时代上存在较大差异,为砂岩中碎屑锆石的物源定量示踪提供了有利条件。

2.2 样品及分析方法

本次研究选取典型钻井的东营组砂岩,挑选其中的碎屑锆石,进行 U-Pb 同位素年龄测定,具体取样层位与分析项目如表 2。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 分析完成。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal^[20-21]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法请参阅相关文

献^[20-22]。

表 2 锆石取样及分析项目

Table 2 Zircon sampling and analysis items

井位	取样深度 /m	层位	岩性	锆石 个数	分析项目
A	2 997.68	Es ₁	砾岩	25	锆石 U-Pb 测年
E	3 440~3 450	Ed ₂ ¹	砂岩	6	锆石 U-Pb 测年
F	3 003	Ed ₂ ¹	含碳酸盐砾岩	34	锆石 U-Pb 测年
F	3 341.5	Ed ₂ ¹	含碳质纹层细砂岩	25	锆石 U-Pb 测年
G	3 208.9	Ed ₂ ¹	粗砾岩	52	锆石 U-Pb 测年
H	3 037.69	Ed ₂ ¹	细砂岩	33	锆石 U-Pb 测年

2.3 砂岩中碎屑锆石形态特征

本文依据 CL 图像形态特征,将砂岩中碎屑锆石的成因将分为两类:一类为火山岩与火山碎屑岩成因,另一类为变质岩成因。

2.3.1 火成岩锆石形态特征

渤中凹陷火成岩锆石多为针状或柱状,发育典型的岩浆震荡环带(图 2),其晶形完整、晶棱磨蚀弱,反映锆石搬运距离短。F 井(井位如图 1)3 341.5 m,东二下段细砂岩中的锆石具有特征的岩浆震荡环带(图 2a);A 井 2 997.68 m,沙一段砾岩中锆石为柱状的外形特征,具有较大的长宽比值(图 2b);A 井

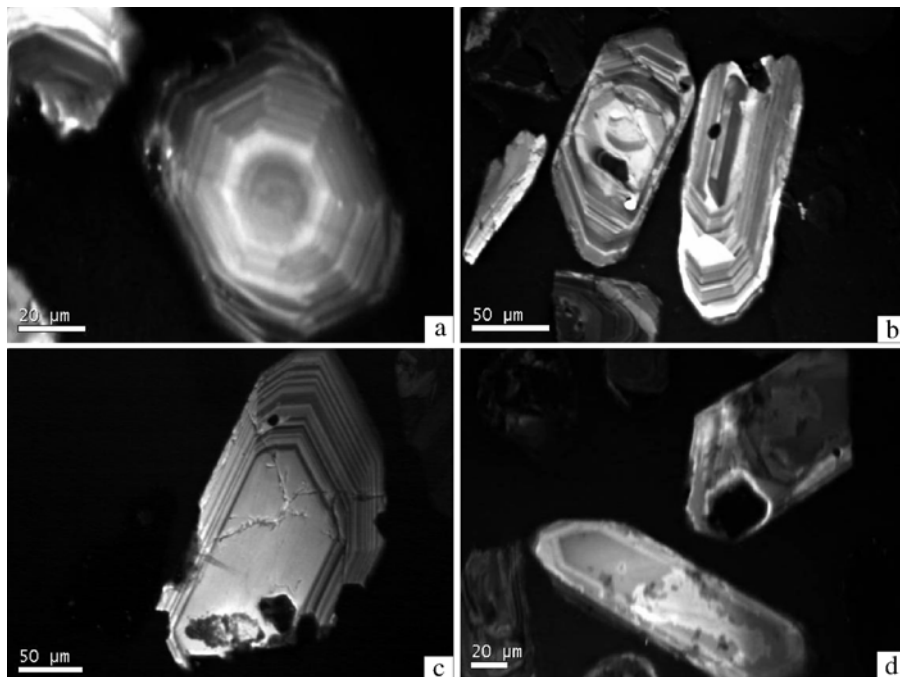


图 2 渤中凹陷西斜坡火成岩锆石形态特征

a. F 井, 3 341.5 m, 东二下段细砂岩; b. A 井, 2 997.68 m, 沙一段砾岩; c. A 井, 2 997.68 m, 沙一段砾岩; d. G 井, 3 037.69 m, 东二下段细砂岩

Fig.2 Morphological characteristics of igneous rock zircon in western slope of Bozhong sag

a. F Well, 3 341.5 m, fine sandstones in Ed₂¹; b. A Well, 2 997.68 m, conglomerate in Es₁; c. A Well, 2 997.68 m, conglomerate in Es₁; d. G Well, 3 037.69 m, fine sandstones in Ed₂¹

2 997.68 m,沙一段砾岩中锆石也具有典型的岩浆震荡环带,核部含有继承锆石的残留核(图 2c);G井 3 037.69 m,东二下段细砂岩中,锆石为柱状,具有较大的长宽比值,表现出弱分带的特征,(图 2d)。综上所述,上述样品中锆石多为柱状,具有较大的长宽比值,具有特征的岩浆震荡环带,具有典型的火成岩成因特征,因此,结合钻井位置,认为上述钻井砂岩中碎屑锆石主要来自凹陷内凸起及盆内基底的火成岩与火山碎屑岩。

2.3.2 变质岩锆石形态特征

E井 3 440~3 450 m,东二下段砂岩中锆石呈浑圆状,内部分带特征为面状分带,分带边界及晶棱较圆滑,锆石周围发育较宽的白色蚀变边,体现出热液溶蚀作用的特征^[14](图 3a);A井 2 997.68 m,沙一段砾岩中锆石呈它形,内部分带特征为斑杂状分带,晶棱呈港湾状体现了热液溶蚀作用的特征,而锆石内部的裂缝则体现了动力变质作用的特征(图 3b);G井 3 037.69 m,东二下段细砂岩中锆石呈现出斑杂状、弱分带、扇形分带的内部分带特征,有些锆石核部具有较弱的环带结构,其成因可能是变质流体活动过程中形成的脉体,也可能是在岩浆锆石的基础上发生的变质重结晶作用^[23](图 3c);变质增生边部与继承核

部边界明显,有时呈港湾状,锆石周围同样发育白色蚀变边(图 3d),其成因是岩浆锆石发生了变质增生及重结晶作用。有些锆石的变质增生边部虽然也呈现出环带结构(图 3a, d),但对比图 2 发现,岩浆环带较平直且棱角明显,而变质增生边部多呈浑圆状,且单个环带宽度明显变大,称其为面状分带更为合适^[14]。

2.4 砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄

(1) A 井砾岩中碎屑锆石年龄分布

A井 2 997.68 m,沙一段砾岩中,挑出锆石 25 颗,其年龄组成为 7 颗为侏罗纪,1 颗为三叠纪,6 颗为晚古生代,2 颗为早生代,9 颗为元古代(图 4a)。总体上 A 井砾岩中锆石年龄主要为中生代、古生代及元古代,尤以中、古生代为主,根据 A 井位置,认为其碎屑锆石年龄与附近的沙垒田及石白坨凸起基底母岩的年代与岩性有很好的对应关系。同时由于 A 井锆石中包含了一定数量的元古代锆石,认为这部分碎屑锆石可能来自于燕山褶皱带与邻近沙垒田凸起元古代变质岩。

(2) E 井砂岩中碎屑锆石年龄分布

E井 3 440~3 450 m,东二下段砂岩中,挑出锆石 6 颗,其年龄组成为 1 颗为太古代,5 颗为元古代(图

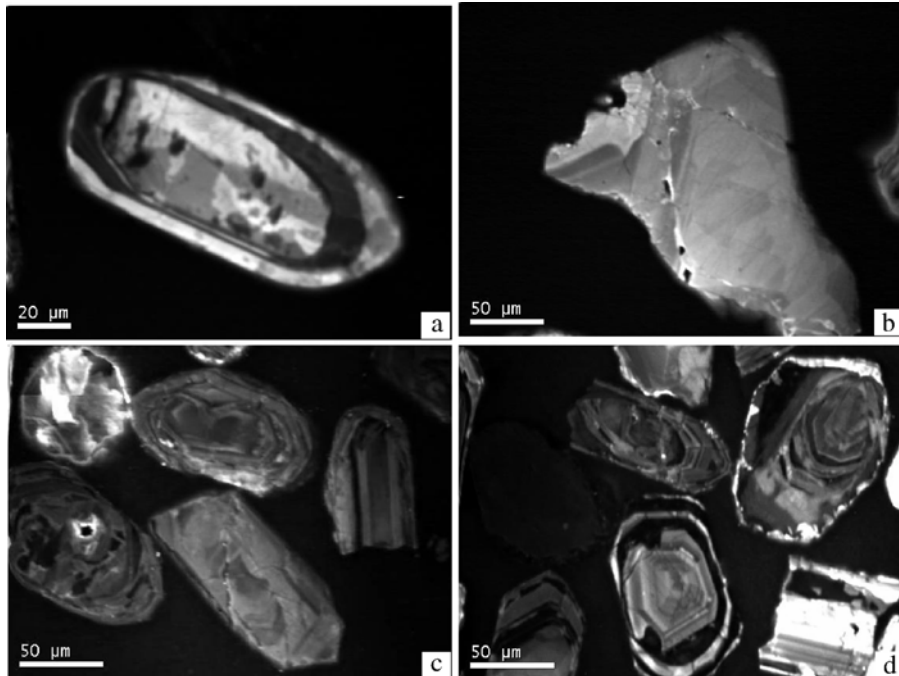


图 3 渤中凹陷西斜坡变质岩锆石形态特征

a. E 井, 3 440~3 450 m, 东二下段砂岩; b. A 井, 2 997.68 m, 沙一段砾岩; c. G 井, 3 037.69 m, 东二下段细砂岩; d. F 井, 3 003 m, 东二上段细砂岩

Fig.3 Morphological characteristics of metamorphogenic zircon in western slope of Bozhong sag

a. E Well, 3 440~3 450 m, sandstone in Ed_2^1 ; b. A Well, 2 997.68 m, conglomerate in Es_1 ; c. G Well, 3 037.69 m, fine sandstones in Ed_2^1 ; d. F Well, 3 003 m, fine sandstones in Ed_2^1

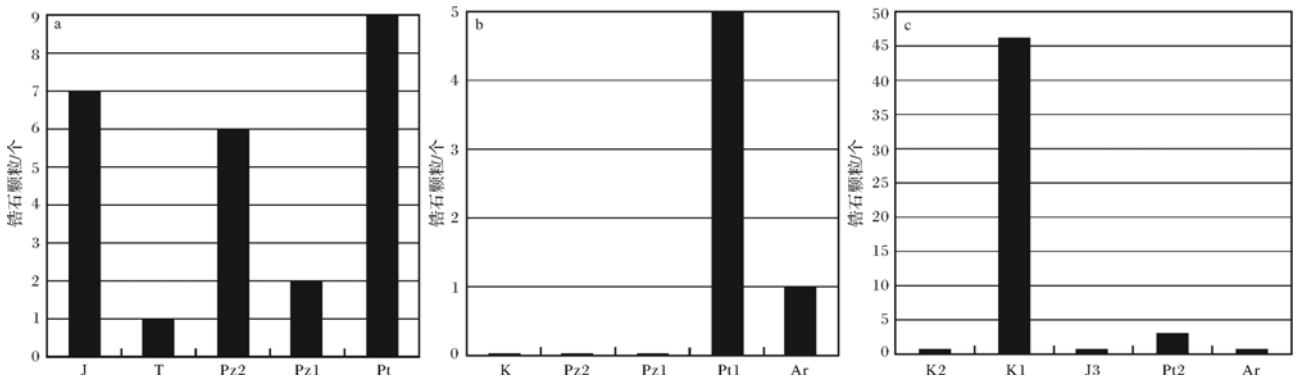


图4 A井(a),E(b)井与G井(c)砂岩中碎屑锆石年龄分布

a.A井,2 997.68 m,沙一段砾岩;b.E井,3 440~3 450 m,东二下段砂岩;c.G井,3 208.9 m,东二下段砾岩

Fig.4 Detrital zircon age distribution of sandstones from A Well (a), E well (b) and G Well (c)

a. A Well, 2 997.68 m, conglomerate in Es_1 ; b. E Well, 3 440~3 450 m, sandstones in Ed_2^1 ; c. G Well, 3 208.9 m, conglomerate in Ed_2^1

4b)。E井东二下段砂岩中6颗锆石年龄均为太古代—元古代,该井位于凹陷中心,因此其物源可能为其南部的沙垒田凸起也可能为盆地西北部的燕山构造带。

(3) G井砂岩中碎屑锆石年龄分布

G井3 208.9 m,东二下段砾岩中,挑出锆石52颗,其年龄组成为46颗为白垩纪,1颗为晚侏罗世,3颗为元古代,1颗为太古代(图4c)。根据图1,G井紧邻石臼坨凸起,结合凹陷基底岩性分布,表明G井砾岩中锆石成因及年龄组成与邻近石臼坨凸起的基底母岩岩性分布相一致,因此认为东二下段沉积期,G井以邻近的石臼坨凸起为主要物源。

(4) H井砂岩中碎屑锆石年龄分布

H井3 037.69 m,东二下段细砂岩中,挑出锆石33颗,其年龄组成为1颗为白垩纪,19颗为元古代,12颗为太古代(图5a)。H井紧邻石臼坨凸起,其前

古近系基岩为太古代—元古代变质岩,表明H井砂岩中锆石成因及年龄组成与邻近石臼坨凸起的基底岩性分布相一致,因此认为东二下段沉积期,H井以邻近的石臼坨凸起为主要物源。

H井紧邻G井,但其样品中锆石的年龄组合存在明显的差异,但均与邻近的石臼坨凸起的岩性分布具有较好的一致性。据此认为东二下段沉积期两口井均以邻近的局部物源—石臼坨凸起为主要物源区。

(5) F井砂岩中碎屑锆石年龄分布

F井中取出两组样品进行分析,其中3 003 m,东二上段细砂岩中,挑出锆石34颗,其年龄组成为6颗为白垩纪,23颗为元古代,5颗为太古代(图5b);F井3 341.5 m,东二下段细砂岩中,挑出锆石25颗,其年龄组成为1颗为白垩纪,18颗为元古代,6颗为太古代(图5c)。两组碎屑锆石具有相似的年龄组成,均以太古代—元古代为主,F井紧邻石臼坨凸起,其

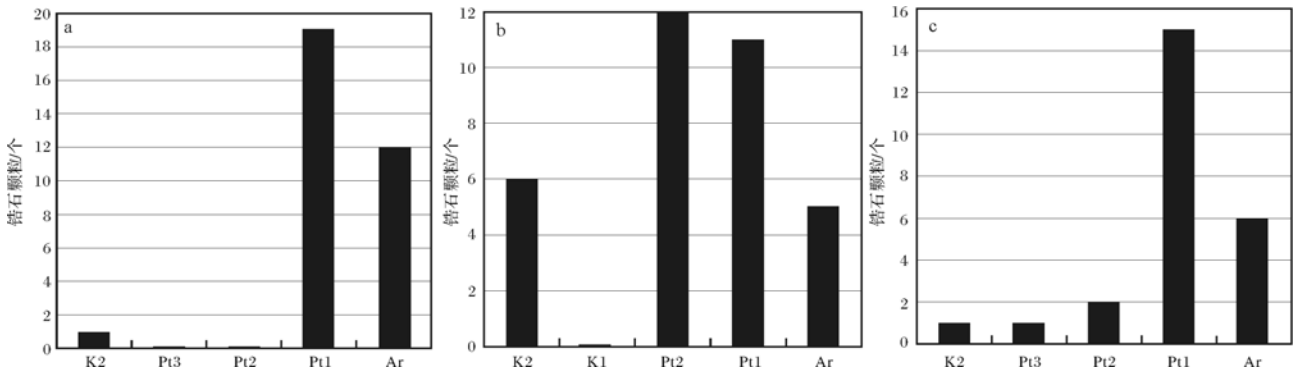


图5 H井(a)与F井(b,c)砂岩中碎屑锆石年龄分布

a.H井3 037.69 m,东二下段细砂岩;b.F井3 003 m,东二下段细砂岩;c.F井3 341.5 m,东二下段细砂岩

Fig.5 Detrital zircon age distribution of sandstones from G Well (a) and F Well (b, c)

a. G Well, 3 037.69 m, fine sandstone in Ed_2^1 ; b. F Well, 3 003 m, fine sandstone in Ed_2^1 ; c. F Well, 3 341.5 m, fine sandstone in Ed_2^1

前古近系基岩为太古代—元古代变质岩,表明 F 井砂岩中锆石成因及年龄组合与邻近石臼坨凸起的岩性分布相一致,即东营组上、下段沉积期,F 井均以邻近的石臼坨凸起为主要物源区。

综合上述共计五口井六个样品的锆石 U-Pb 年龄分析结果,表明东二段沉积期及其前期,砂岩中锆石成因及年龄组合与邻近凸起的岩性分布相一致,即以局部物源—凹陷内凸起为主要物源区。

2.5 火山碎屑组分含量变化

渤中凹陷新生代沉降过程中,洼陷四周火山活动频繁,古近系沙河街组及东二段发育中酸性火山岩碎屑、凝灰岩质及浅侵入体碎屑及矿物(图 6),这与凹陷内基底发育大面积的火山岩及火山碎屑岩的特点是相匹配的。

A 井与 I 井砂岩中火山碎屑组分含量对比图(图 7)表明由沙一段到东二段砂岩中火山碎屑含量明显降低,说明由沙一段到东二段物源性质发生了明显的

变化,即局部物源的供给明显减少,结合砂岩中锆石 U-Pb 年龄分析,认为东二段沉积期及其前期,渤中凹陷以局部物源—凹陷内部的石臼坨及沙垒田等凸起或盆内中生代火山岩基底为主要物源区,其锆石以年龄组合为中生代、成因为火成岩成因为主,砂岩中含有较多的火山碎屑组分;东二上段沉积期及其后期,渤中凹陷以区域物源—盆地西北部的燕山构造带为主要物源区,碎屑锆石以太古代—元古代变质岩成因为主,砂岩中火山碎屑含量大幅减少。即由东二段到东二上段,区域物源供给逐渐占据主导,由局部物源转换为区域物源。

2.6 地震多属性分析

由于研究区钻井较少,依据 3D 地震数据分别提取 SQd_2^L 与 SQd_2^U 层序的均方根振幅(RMS)、瞬时频率(IF)、带宽(BW)三种单属性,并拟合成地震多属性平面图(图 8),结合单井相对两个层序多属性进行解释,确定砂体的成因与展布特征。

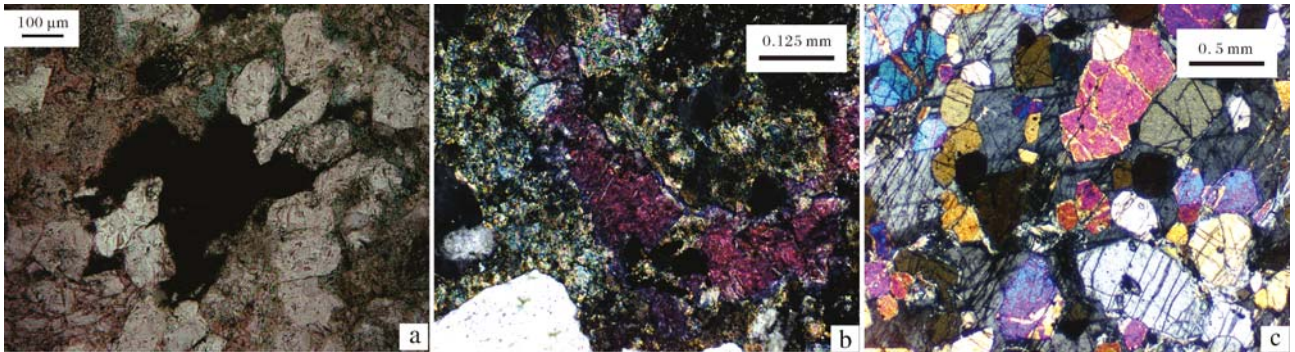


图 6 渤中凹陷古近系砂岩中发育的火山碎屑、凝灰岩质与浅侵入体

a.F 井,2 994.5~3 003.85 m,东二段中细粒长石砂岩中酸性喷出岩岩块;b.E 井,3 727~3 730 m,沙三段凝灰质组分铁白云石与铁方解石化;c: E 井,3 835~3 838 m,沙三段辉长岩

Fig.6 Enrichment tephra, tuff and shallow intrusive rock in Palaeogene sandstones of Bozhong sag

a. F well, 2 994.5~3 003.85 m, intermediate acid extrusive rock block in fine grained feldspathic sandstone in Ed_2^L ; b. E well, 3 727~3 730 m, iron dolomitization and ferroan calcilization in tuffaceous component in Es_3^m ; c. E well, 3 835~3 838 m, gabbro in Es_3

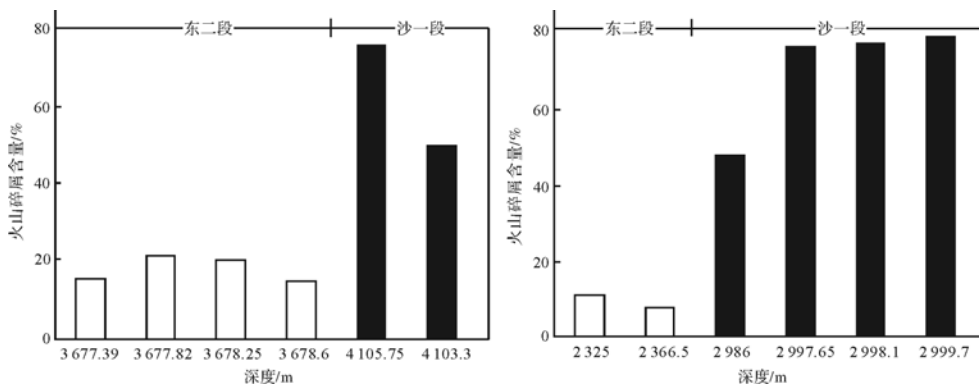


图 7 A(左)与 I(右)井东二段与沙一段砂岩中火山碎屑组分含量对比图

Fig.7 Comparison diagram of tephra component in sandstones in Ed_2 and Es_1 of A Well (left) and I Well (right)

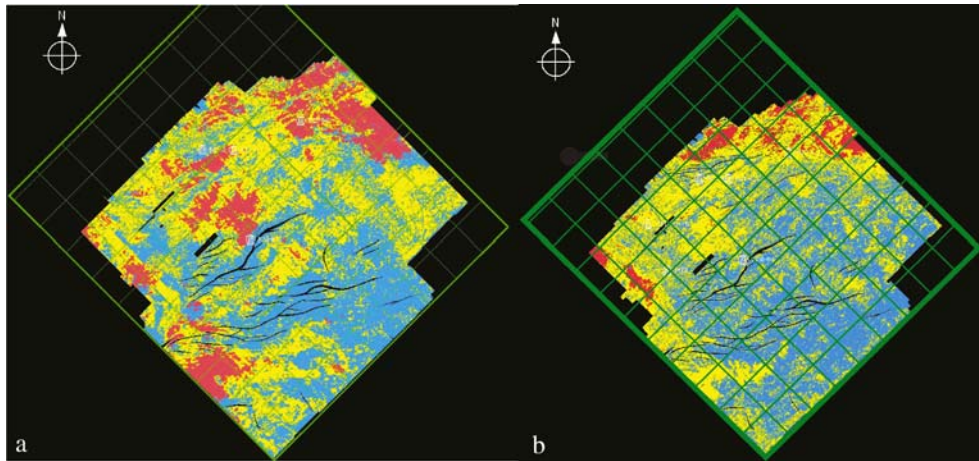


图8 SQd₂^L与SQd₂^U层序地震多属性平面图

a. SQd₂^L层序(据朱红涛等,2013改编); b. SQd₂^U层序

Fig.8 Seismic multiple attribute ichnography of sequence SQd₂^L and SQd₂^U

a. SQd₂^L sequence (modified from Zhu Hongtao, *et al.*, 2013); b. SQd₂^U sequence

图8中红色代表相对富砂沉积,黄色富砂程度次之,蓝色表示相对富泥沉积。东二下段沉积期色差明显,红色、黄色所指示的富砂沉积体紧邻石臼坨、沙垒田凸起分布,特别是红色区域围绕凸起周边分布,表明该时期凹陷以其内部的凸起为主要物源区,发育近源、快速堆积。红色区域到黄色区域的变化方向即可指示物源方向,可知研究区物源主要来自沙垒田和石臼坨凸起^[24](图8a)。这与前述锆石与火山碎屑含量所确定的东二下段沉积期以石臼坨和沙垒田凸起为主要物源的结果是相一致的。

东二上段多属性图与东二下段相比,红色区域分布面积明显减少,且分布范围不受凸起控制。在石臼坨凸起上及北部红色面积相对较大,为砂体富集区域;在沙垒田一侧仅分布范围很小的砂体富集区,表明石臼坨和沙垒田凸起的物源效应较弱。由于越靠近物源方向砂体越富集,因此图8b所示的砂体富集区域与前述锆石及火山碎屑含量所确定的东二上段沉积期以盆地西北部的燕山构造带为主要物源的结果是相一致的。

综上所述,由东二下段到东二上段,砂岩中锆石年龄组合及成因和火山碎屑组分含量发生明显变化,东二下段锆石以年龄组合为中生代、成因为火成岩成因为主,砂岩中含有较多的火山碎屑组分;东二上段锆石以年龄组合为太古代—元古代、成因为变质岩成因为主,砂岩中火山碎屑含量大幅减少。即区域物源供给逐渐增强,局部物源供给逐渐减弱,地震多属性

分析结果则进一步证实了锆石与火山碎屑含量变化所反映的物源转换的结果。

3 古近系物源转换的地质响应

3.1 层序地层格架

结合前人井震联合结果,将渤中西环古近系东营组地层划分为SQd₃、SQd₂^L、SQd₂^U、SQd₁四个(三级)层序^[25]。为了探讨物源转换与对应的砂体成因与沉积充填特征变化,制作了高精度层序地层对比剖面(图9),分析东营组纵向上的基准面旋回、层序及体系域界面、砂体成因及沉积体系的展布规律,探讨其与物源转换之间的内在联系。根据前文所述SQd₂^L和SQd₂^U两个时期凹陷物源的方向,文章建立两条井剖面(图9,剖面a近平行于石臼坨和沙垒田凸起;剖面b近垂直于石臼坨和沙垒田凸起),对全区东营组SQd₂^L和SQd₂^U两个层序的沉积充填特征进行对比分析。

(1) SQd₂^L层序

该层序相当于东营组东二下段(T3m~T3u),主要分布在石臼坨凸起与沙垒田凸起之间,地层较厚,而石臼坨凸起与沙垒田凸起上变薄或缺失,其分布明显受盆地内凸起与凸起四周的断裂控制(图9,10)。研究区仅部分钻井钻遇了该套地层,地层厚约391~679.9m,以灰—深灰色泥岩夹薄层中—细砂岩、粉砂岩的沉积组合为主,石臼坨和沙垒田凸起之间的较深湖相泥岩发育。因此,SQd₂^L层序发育期,石臼坨和沙垒田凸起不仅作为粗碎屑物源,还控制了沉积范围。

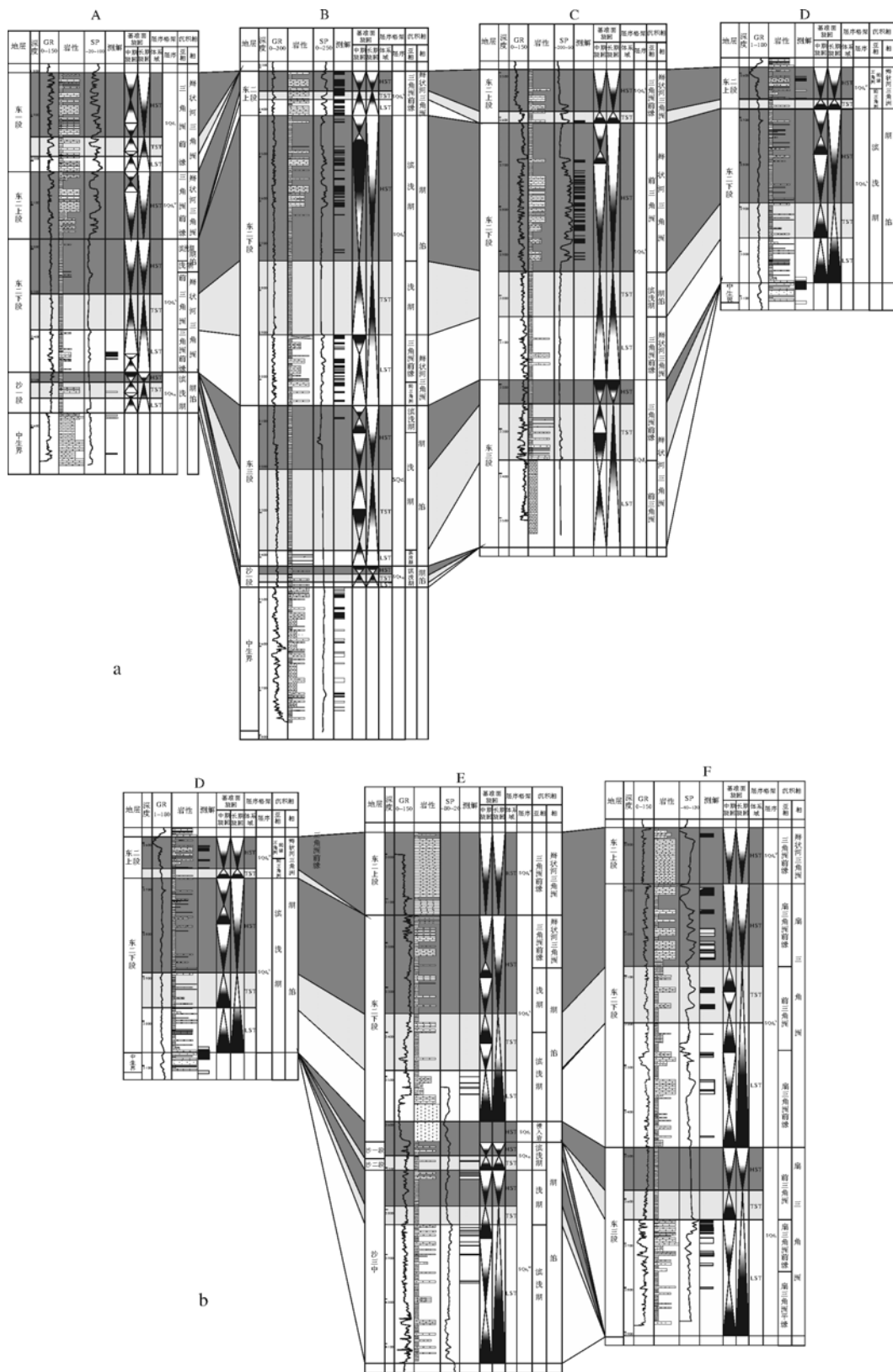


图 9 研究区连井层序地层分析剖面(剖面位置如图 1)

a.平行于石臼坨和沙垒田凸起方向;b.垂直于石臼坨和沙垒田凸起方向

Fig.9 Sequence stratigraphy analytical profile of the connected wells in the study area(location of analytical profile is shown in Fig.1)

a. direction paralleled to Shijiutuo uplift and Shaleitian uplift; b. direction perpendicular to Shijiutuo uplift and Shaleitian uplift

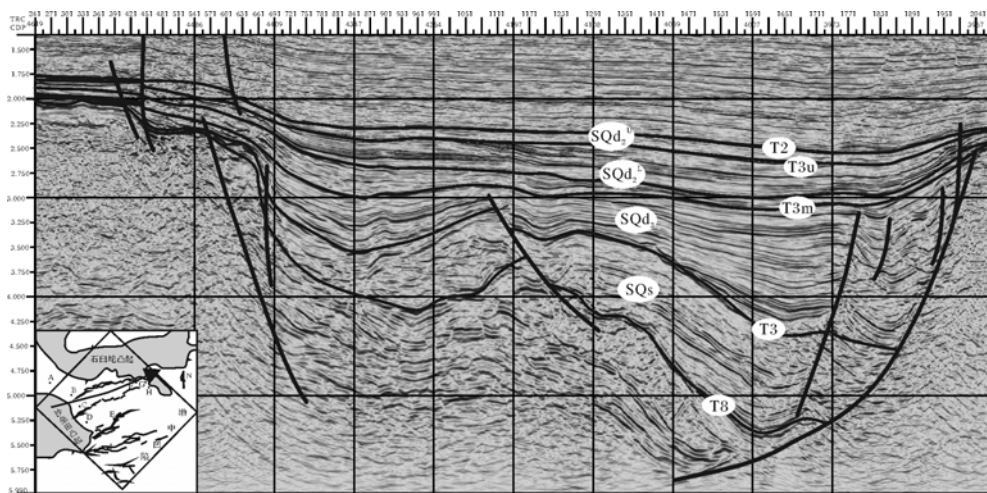


图 10 研究区沙垒田凸起北段地震测线层序地层格架

Fig.10 Sequence stratigraphic framework of seismic line of Shaleitian uplift's north section in the study area

在平行物源方向上,石臼坨凸起一侧钻井以上升半旋回的 LST 为主,GR 电性特征为漏斗形、箱形组合,主要发育扇三角洲沉积;沙垒田凸起一侧的钻井则为下降半旋回为主的非对称性旋回,GR 电性特征为平滑指状,主要对应滨浅湖相(图 9b)。上述石臼坨凸起和沙垒田凸起两侧特征的差异对比反映了 SQd₂^l 层序沉积时期,凹陷以石臼坨凸起和沙垒田凸起等局部物源为主,层序发育与沉积充填明显受两侧邻近凸起的控制。

在垂直物源方向上,各井之间则没有显著差异,主要为下降半旋回为主的非对称性旋回,GR 电性特征为中高幅指状,主要对应滨浅湖—辫状河三角洲相。这是由于连井剖面(图 9a)紧邻沙垒田凸起,主要揭示近物源的沉积组合特点。

综合上述平行及垂直物源方向的层序特征,反映 SQd₂^l 层序沉积时期湖盆处于强烈裂陷期,石臼坨凸起和沙垒田凸起四周断裂活动强度大且物源效应明显,湖盆沉降速率快,水体较深,沉积中心发育大面积的较深湖—深湖环境。

(2) SQd₂^u 层序

该层序相当于东营组东二上段(T3u~T2),由于 SQd₁^l 层序发生剥蚀,分布局限,仅 A 井钻遇,因此将其并入 SQd₂^u 层序一并讨论。该层序沉积时期以凹陷西北部的燕山褶皱带为主要物源,层序特征在平行和垂直物源方向上差异甚微,主要为下降半旋回为主的非对称性旋回。该地层在研究区分布较稳定,厚度较薄,大多数钻井都钻遇了该套地层。SQd₂^u 层序向石臼坨凸起与沙垒田凸起超覆,表明盆内凸起稳定,

凸起四周的断裂活动显著减弱(图 10)。SQd₂^u 层序厚约 94~187 m,深灰色泥岩较薄,而含砾中砂岩、中—细砂岩、粉砂岩较厚。上述特征反映 SQd₂^u 层序沉积时期,以燕山褶皱带物源为主,处于断—拗过渡期,石臼坨凸起与沙垒田凸起被湖水覆盖,湖盆面积扩大,但水体较浅,广泛发育滨浅湖与辫状河三角洲沉积。

3.2 沉积充填响应

东二段沉积时期,沙垒田凸起、石臼坨凸起的物源效应发生明显变化:东二下段沉积时期,石臼坨凸起南缘发育一系列扇三角洲,而沙垒田凸起东侧发育一系列辫状河三角洲;东二上段沉积时期,石臼坨凸起被湖水淹没,来自燕山褶皱带的一系列辫状河三角洲越过石臼坨凸起向南延伸,而沙垒田凸起东侧的辫状河三角洲规模明显变小。鉴于东二段沉积期间物源性质与沉积格局的变化,本文将分别描述 SQd₂^l 和 SQd₂^u 两个层序沉积时期的砂体时空展布(图 11),以阐明物源转换所产生的沉积充填效应。

SQd₂^l 层序发育期,储集砂体主要围绕盆内的凸起或低凸起分布。沙垒田凸起物源效应明显,其东缘沉积坡度较缓,主要发育一系列东西向延伸的断槽,这些沟槽将沙垒田凸起上的粗碎屑物向东搬运,形成一系列辫状河三角洲砂体(图 11)。在平行断槽物源方向上,过砂体的地震剖面上可见典型的前积反射结构(图 12)。此时,石臼坨凸起南缘断裂强烈活动,沉积坡度陡,在断裂下降盘发育一系列扇三角洲,这些扇三角洲厚度大,向盆内延伸距离较短(图 11)。因此,SQd₂^l 层序发育期,研究区内砂体分布明显受沙垒

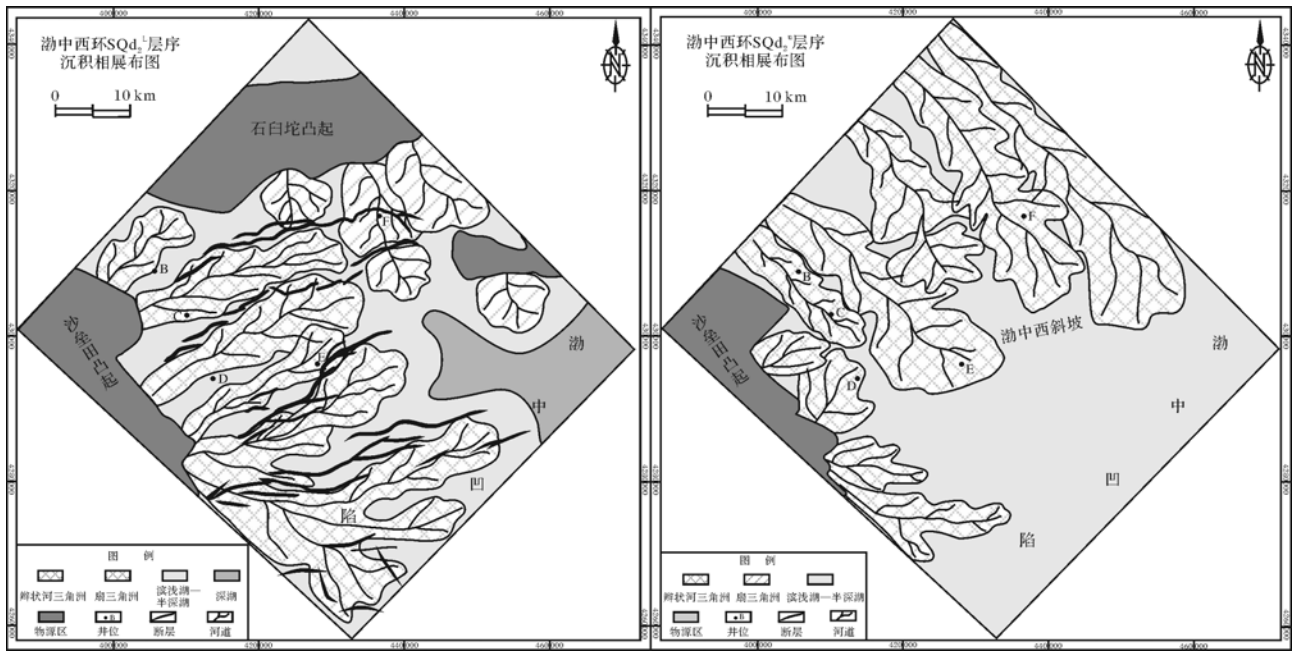


图 11 渤中西环 SQd₂^L(据朱红涛等,2013 改编)和 SQd₂^U 层序沉积相展布图

Fig.11 Sedimentary facies distribution of SQd₂^L(modified from Zhu Hongtao, *et al.*, 2013) and SQd₂^U sequence in western slope of Bozhong sag

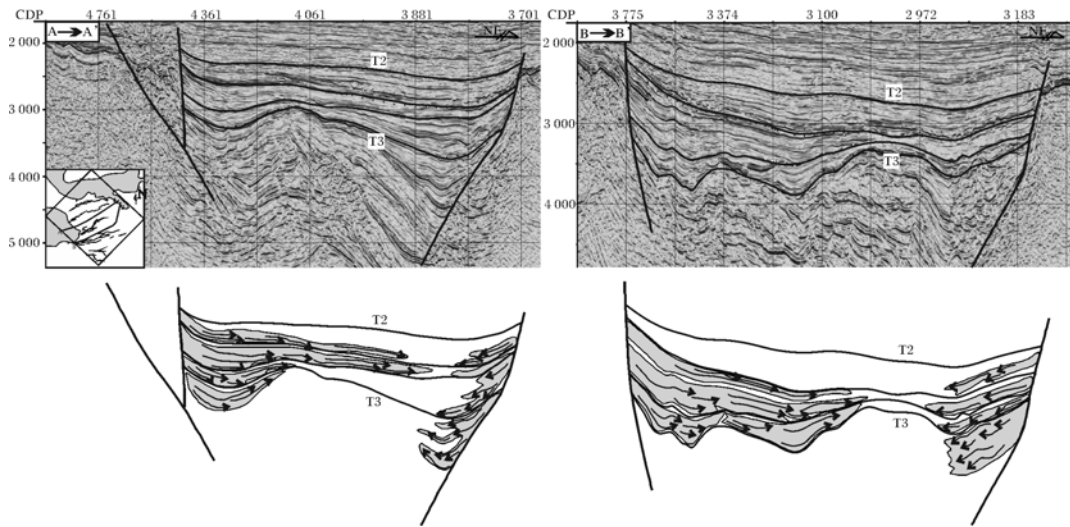


图 12 研究区东二下段平行物源方向前积特征(据朱红涛等,2013 改编)

Fig.12 Foreset characteristics in direction parallel to provenances in Ed₂^L in the study area (modified from Zhu Hongtao, *et al.*, 2013)

田凸起与石臼坨凸起控制,但控制方式不同:沙垒田凸起与其东侧断槽控制了研究区西部的辫状河三角洲,砂体延伸方向与断槽走向一致,且砂体向湖盆内延伸距离大;石臼坨凸起与其南侧断裂控制了研究区东北部的扇三角洲,砂体延伸方向与断裂走向垂直,砂体向湖盆内延伸距离较小。

SQd₂^U 层序发育时期,由于湖盆范围进一步扩大,

凹陷内凸起大部分或全部被湖水淹没,局部物源供给显著减少,盆外区域物源供给逐渐增强,对应的砂体展布发生了显著变化。石臼坨凸起完全被湖水淹没,不能提供粗碎屑物源,来自北部燕山褶皱带物源的辫状河三角洲越过石臼坨凸起向南延伸;沙垒田凸起部分被湖水覆盖,分布范围缩小,提供的粗碎屑有限,仅在东侧发育小规模辫状河三角洲砂体。因此,

SQd₂^U层序发育期,研究区内砂体分布不受石臼坨凸起的控制,沙垒田凸起的物源效应也明显减弱。

SQd₂^L层序与SQd₂^U层序的沉积充填格局与砂体展布,与盆内沙垒田凸起与石臼坨凸起的构造演化,以及盆内物源与盆外物源的转换密切相关。SQd₂^L层序沉积时期,以局部物源供给为主,沙垒田凸起与石臼坨凸起快速隆升剥蚀,对砂体展布控制明显;SQd₂^U层序沉积时期,以区域物源供给为主,沙垒田凸起与石臼坨凸起被湖水覆盖,对砂体展布控制不明显。

4 结论

(1) 东二下段沉积期前,渤中凹陷以局部物源—凹陷内部的石臼坨及沙垒田等凸起为主要物源区,砂岩中碎屑锆石以中生代火成岩成因锆石为主,砂岩中火山碎屑含量较高;东二上段沉积期后,渤中凹陷以区域物源—盆地西北部的燕山构造带为主要物源区,砂岩中碎屑锆石以太古代—元古代变质岩成因锆石为主,砂岩中火山碎屑含量大幅减少。即由东二下段到东二上段,区域物源供给逐渐占据主导,局部物源效应减弱。地震多属性分析揭示的砂体展布特征与物源示踪揭示的物源转换规律相吻合。

(2) SQd₂^L层序发育期间,湖盆处于强烈裂陷期,中—深湖相泥岩发育,平行物源方向,沙垒田凸起一侧为下降半旋回为主的非对称性旋回,GR电性特征为平滑指状,凸起东缘主要发育近东西向展布的辫状河三角洲砂体;而石臼坨凸起南缘以上升半旋回的LST为主,GR电性特征为漏斗形、箱形组合,对应多期扇三角洲沉积组合;垂利物源方向,各井之间则没有显著差异,主要为下降半旋回为主的非对称性旋回,GR电性特征为中高幅指状,以滨浅湖—辫状河三角洲沉积为主。

SQd₂^U层序发育时期,湖盆处于断—坳过渡期,盆内低凸起四周的断裂活动减弱,沉积层序在平行和垂利物源方向上差异甚微,主要为下降半旋回为主的非对称性旋回,GR电性特征为低幅度指状、齿状,地层逐渐向盆内低凸起超覆,盆外元古代变质岩物源供给不断加强,发育大量SE向展布的辫状河三角洲砂体。

(3) 在盆地的断陷、断坳、坳陷阶段,凹陷的物源及其对应砂体性质明显不同:断陷充填时期,盆内隆凹相间,物源以盆内物源为主,半深湖—深湖发育,在断裂陡坡带与构造转换带发育一系列扇三角洲与辫状河三角洲,洼陷中心发育重力流砂体;断—坳过渡

期,沉积古地貌较为平缓,以盆外区域物源供给为主,盆内局部物源效应减弱,盆内发育广泛的滨浅湖,在构造转换带发育大型浅水辫状河三角洲;坳陷充填阶段,凹陷内凸起大多数隆起均被海水淹没,物源来自盆地外围的褶皱带,以稳定沉降背景下的河流相与浅水三角洲充填为主。

参考文献 (References)

- 1 Klemme H D. Petroleum basins-classifications and characteristics[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1980, 3(2):187-207.
- 2 焦养泉,周海民,刘少峰,等. 断陷盆地多层次幕式裂陷作用与沉积充填响应—以南堡老第三纪断陷盆地为例[J]. *地球科学*, 1996, 21(6):633-636. [Jiao Yangquan, Zhou Haimin, Liu Shaofeng, et al. Multistage episodic rifting and its controls on filling in rift basin: Taking the Eocene Nanpu rift basin as an example[J]. *Earth Science*, 1996, 21(6): 633-636.]
- 3 廖计华,王华,肖军,等. 琼东南盆地古近纪幕式裂陷及构造、层序和沉积的综合响应过程[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012, 42(4):970-983. [Liao Jihua, Wang Hua, Xiao Jun, et al. Episodic rifting and integrated response process of tectonic, sequence stratigraphy and sedimentary filling in Paleogene of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(4): 970-983.]
- 4 林畅松,张燕梅,李思田,等. 中国东部中生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型[J]. *地球科学*, 2004, 29(5):583-588. [Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Episodic rifting dynamic process and quantitative model of Mesozoic-Cenozoic faulted basins in eastern China[J]. *Earth Science*, 2004, 29(5): 583-588.]
- 5 李敏. 渤中凹陷西斜坡古近系东营组沉积物源体系研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2012. [Li Min. Sediment provenance system analysis of Paleogene Dongying Formation in western slope of Bohai Bay Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2012.]
- 6 吴崇筠,薛书浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 1992. [Wu Chongjun, Xue Shuhao. *Sedimentology of Petroliferous Basin in China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.]
- 7 胡望水,王家林. 松辽裂陷盆地伸展构造演化与油气[J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(3):30-33. [Hu Wangshui, Wang Jialin. Extensional tectonic evolution and petroleum accumulation in Songliao rift Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(3): 30-33.]
- 8 郭少斌. 陆相断陷盆地层序地层模式[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(5):548-552. [Guo Shaobin. Sequence stratigraphy pattern of the terrestrial rifted basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 548-552.]
- 9 单敬福,葛黛薇,乐江华,等. 松辽盆地东南缘层序地层与沉积体系配置及演化——以梨树断陷西北部营城组地层为例[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1):67-76. [Shan Jingfu, Ge Daiwei, Le Jianghua, et al. Framework of sequence stratigraphy, sedimentary system and evolu-

- tion of southeastern Songliao Basin: An example from Yingcheng Formation in Lishu fault depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 67-76.]
- 10 于兴河,姜辉,李胜利,等. 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[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 39-45. [Yu Xinghe, Jiang Hui, Li Shengli, et al. 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[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 39-45.]
 - 11 池英柳,赵文智. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 14-20. [Chi Yingliu, Zhao Wenzhi. Strike-slip deformation during the Cenozoic and its influence on hydrocarbon accumulation in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(2): 14-20.]
 - 12 杨运海. 物源分析的几种方法[J]. 内江科技, 2009(12): 21-21. [Yang Yunhai. Several methods of provenance analysis[J]. *Neijiang Science & Technology*, 2009(12): 21-21.]
 - 13 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415. [Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.]
 - 14 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604. [Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy research of zircon and its constraint on explanation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.]
 - 15 闫义,林舸,李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 184-190. [Yan Yi, Lin Ge, Li Zian. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(2): 184-190.]
 - 16 周剑雄,陈振宇. 锆石等测年矿物的电子探针及阴极射线致发光综合研究新方法[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊4): 31-35. [Zhou Jianxiong, Chen Zhenyu. A new Integrated method for dating minerals like zircon using electron microprobe and cathodoluminescence [J]. *Geological Review*, 2002, 48(Suppl.4): 31-35.]
 - 17 Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53(1): 469-500.
 - 18 移根旺. 锆石成因矿物学研究[J]. 中国水运, 2008, 8(6): 259-260. [Yi Genwang. Genetic mineralogy research of zircon[J]. *China Water Transport*, 2008, 8(6): 259-260.]
 - 19 陈道公,李彬贤,夏群科,等. 变质岩中锆石 U-Pb 计时问题评述——兼论大别造山带锆石定年[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 129-138. [Chen Daogong, Li Binxian, Xia Qunke, et al. An evaluation of zircon U-Pb dating for metamorphic rocks and comments on zircon ages of Dabie orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 129-138.]
 - 20 Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
 - 21 Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
 - 22 Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
 - 23 张安达. 阿尔金英格利萨依超高压岩石中锆石的成因矿物学与年代学研究[D]. 西安:西北大学, 2003. [Zhang Anda. The study about genetic mineralogy and chronology of ultrahigh pressure rocks in Arkin Inge Lisa Beacha[D]. Xi'an: Northwest University, 2003.]
 - 24 朱红涛,杨香华,周心怀,等. 基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析——以渤海中凹陷西斜坡东营组为例[J]. 地球科学, 2013, 38(1): 121-129. [Zhu Hongtao, Yang Xianghua, Zhou Xinhuai, et al. Sediment transport pathway characteristics of continental lacustrine basins based on 3-D seismic data: An example from Dongying Formation of western slope of Bozhong sag [J]. *Earth Science*, 2013, 38(1): 121-129.]
 - 25 朱红涛,杨香华,周心怀,等. 基于层序地层学和地震沉积学的高精度三维沉积体系——以渤海中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组为例[J]. 地球科学, 2011, 36(6): 1073-1084. [Zhu Hongtao, Yang Xianghua, Zhou Xinhuai, et al. High resolution three-dimensional facies architecture delineation using sequence stratigraphy, seismic sedimentology: Example from Dongying Formation in BZ3-1 block of western slope of Bozhong sag, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2011, 36(6): 1073-1084.]

The Provenance Transformation and Sedimentary Filling Response of Paleogene Dongying Formation in Western Slope of Bozhong Sag

LI Huan^{1,2} YANG XiangHua^{1,2} ZHU HongTao^{1,2} ZHOU XinHuai³ LI JianPing³

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

3. China National Offshore Oil Corporation Limited-Tianjin, Tianjin 300452)

Abstract: Through comprehensive analysis of U-Pb age analysis of detrital zircons in sandstones, change of the content of tephra component, seismic multi-attributes analysis, sequence stratigraphic framework and sedimentary filling, considering that in the Donger member sedimentary period, the provenance supply mode, the sequence stratigraphic framework and sedimentary filling characteristics of the west of Bozhong sag changed obviously. In the sedimentation of SQd_{2L} and its earlier stage, lake basin was in the intense rift stage, structure activities were intense, basin was inter-phase concave-convex, sedimentation rate of the basin was accelerated, depth of water deepened, stratum deposited thickly as a whole, lithology were mainly gray-dark grey mudstones containing lamina medium-fine sandstones and siltstones, granularity was fine as a whole, provenance was mainly the local provenance like Shijiutuo uplift and Shaleitian uplift and Mesozoic igneous rock basement inside the basin, et al, content of tephra in sandstones was high, Mesozoic zircons were also rich, seismic multi-attributes ichnography show that sandstones in the Shijiutuo uplift and Shaleitian uplift two sides were rich, area of red zone is large, sedimentary sequence was obviously controlled by the lower uplifts inside the basin and faults around them, sequence characteristics have remarkable differences between the direction parallel and perpendicular to the provenance, in the direction parallel to the provenance, sequence at Shaleitian side was asymmetrical cycle which took declining half cycle as principal, its GR electrical characteristics were smooth finger, the braided river delta sand bodies which distributed approximately to EW were developed, however, sequence at Shijiutuo uplift side took LST which was rising half cycle as principal, its GR electrical characteristics were infundibulate and box combination, multi-phase fan delta lobes were developed, in the seismic section passing the fan along the provenance direction at the two uplifts, typical foreset features were visible. In the direction perpendicular to the provenance, however, there mainly no significant difference, sequence was asymmetrical cycle which took declining half cycle mainly, its GR electrical characteristics were medium-high amplitude finger, shore shallow lake-braided river delta facies were developed; After the sedimentation of SQd_{2L}, lake basin was in the fault depression-depression transition period, area of lake basin was large, depth of water was shallow, fault activities around the lower uplifts inside the basin weakened obviously, stratum was thin as a whole, lithology were primarily conglomeratic sandstones, medium-fine sandstones and siltstones, monolithic granularity was fine, clastics inside basin were mainly came from Yanshan tectonic belt (regional provenance) in the northwest part of the sag, content of tephra in sandstones reduced visibly, detrital zircons in sandstones were primarily Proterozoic zircons, seismic multi-attributes ichnography show that distribution area of red zone decreased obviously, depositional sequence overlapped toward low uplifts inside basin, sequence characteristics have little differences between the direction parallel and perpendicular to the provenance, sequence was primarily asymmetrical cycle which took declining half cycle chiefly, its GR electrical characteristics were low amplitude finger and dentation, proximal fan delta sand bodies transformed gradually to distal braided river delta sand bodies, at the same time, broad shore shallow lake environment was developed. In Paleogene sedimentary filling process of the western slope of Bozhong sag, the consistent changes of the stratigraphic pattern, sedimentary mode and provenance supply mode reflect the inherent law of filling evolution of the rifted basin, provide new clues for evolution and division of rift-subsidence cycles of the rifted basins in the eastern part of our country.

Key words: western slope of Bozhong sag; Dongying member; provenance transformation; sequence stratigraphic framework; sedimentary filling