

西湖凹陷花港组物源特征及对储层的影响研究

赵 洪¹, 蒋一鸣¹, 沈文超², 常吟善¹, 覃 军¹

(1. 中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200030; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘 要:为查明西湖凹陷花港组物源体系并明确其对于储层的控制作用,以砂组为研究单元,通过重矿物组合、薄片观察、古水流恢复及地质统计学等多技术手段,开展不同母源类型砂体对优质储层的影响研究。研究表明:中央带北部 T1 构造主要受钓鱼岛隆褶带影响;中央反转带中北部 T2-T5 构造 H3-H4 段砂体主要来源于西北及海礁隆起, H1-H2 段及 H4 段以下砂体来自钓鱼岛隆褶带;中央反转带南部 T7-T8 构造 H3-H4 段砂体主要来自于海礁隆起及渔山低隆起。指出了物源对储层物性的控制作用,认为变质母源的储层物性优于岩浆母源,并认为多物源盆地的母源分析应关注其非均质性,查明以段、层为单位的物源分布特征,以期对优质储层的分布及发育进行更为准确的预测。

关键词:物源;聚类分析;非均质性;重矿物;成岩差异;古水流

中图分类号:P536;P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)02-0065-08

Study on Huagang Formation provenance characteristics and effects on reservoirs in Xihu Sag

ZHAO Hong¹, JIANG Yiming¹, SHEN Wenchao², CHANG Yinshan¹, QIN Jun¹

(1. Shanghai Branch of China National offshore Oil Co., Ltd., Shanghai 200030, China;

2. China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to find out the controlling factor of provenance on reservoir quality of Huagang Formation in Xihu Sag, the heavy mineral assemblages, rock slice observation, restoration of Paleo-flow and geostatistics technical were used to make clear the influence of material source on high quality reservoir. Results show that the T1 structure was mainly affected by the Diaoyu Islands folding zone. The H3-H4 sand of T2-T5 in the central inversion mainly came from the northwest and Haijiao Uplift. The provenances of Member H1-H2 and the members below Member H4 came from the Diaoyu Islands. The H3-H4 sand of T7-T8 in south of the central inversion belt mainly came from the Haijiao Uplift and the Yushan Uplift. The reservoirs which were sourced from the metamorphic parent in the west have better qualities than those were sourced from the eastern part of the magma parent. Comprehensive research shows that provenance analysis of multi source basin should pay attention to the heterogeneity, finding 4~5 sequence scale source distribution, in order to provide a more accurate prediction of high quality reservoir.

Key words: provenance; clustering analysis; heterogeneity; heavy mineral; diagenetic difference; paleocurrent

0 引 言

多物源供给沉积盆地由于不同沉积时期多向砂体的汇聚对物源研究造成了干扰,因此其母源分析一直是地质研究的难点。西湖凹陷作为我国东海陆架盆地最大的生烃凹陷,其主力储层花港组的物源

体系至今不明,严重限制着勘探工作的深入。王鹏等^[1]通过沉积构造研究认为,除了该凹陷北部及西部物源外,钓鱼岛隆褶带作为东部物源起到了重要作用;武法东等^[2]通过重矿物分析认为物源主要来自于西部古渔山隆起与海礁隆起;陈琳琳^[3]通过层序地层与沉积学研究认为物源主要来自于北部与西

收稿日期:2018-01-01;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.02.008

基金项目:中海石油(中国)有限公司科研资助项目(YXKY-2017-SH-01);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05027-001)

作者简介:赵 洪(1979—),男,山东德州人,工程师,博士。E-mail:zhaohong14@cnoc.com.cn

引用格式:赵 洪,蒋一鸣,沈文超,等.西湖凹陷花港组物源特征及对储层的影响研究[J].煤炭科学技术,2018,46(2):65-72.

ZHAO Hong, JIANG Yiming, SHEN Wenchao, et al. Study on Huagang Formation provenance characteristics and effects on reservoirs in Xihu Sag [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 65-72.

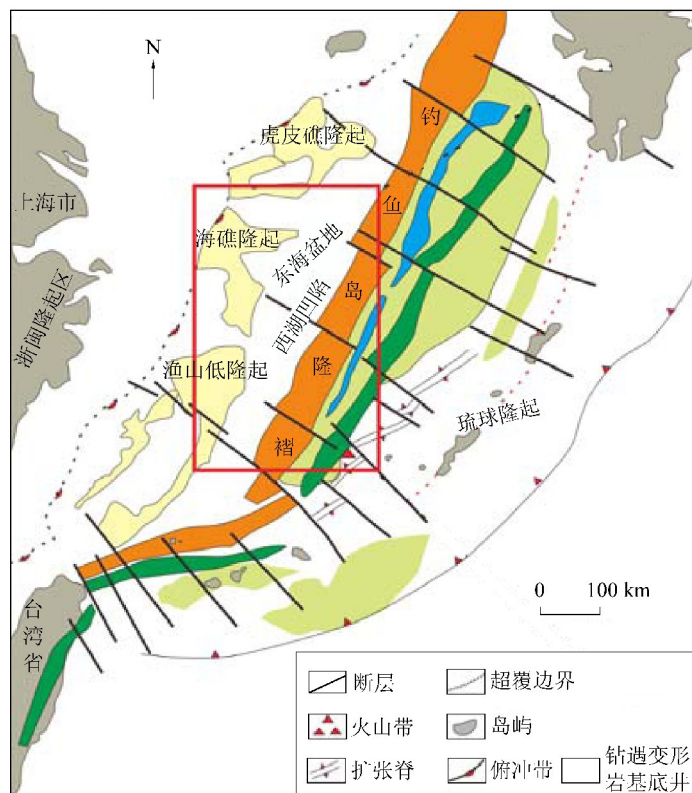
部;郝乐伟等^[4]通过碎屑组分特征研究认为物源主要来自于西部的海礁隆起;高雁飞等^[5]通过构造、重矿物、古生物等研究认为物源主要来自凹陷西部;徐艳霞等^[6]通过重矿物稳定系数及砂岩百分比等研究认为物源具有东部及西部2个来源,且以西部物源为主。前人大多以群、组为尺度进行研究,并未重视多物源体系所导致的纵向及横向强非均质性,导致目前仍然具有较大争议。与此同时,花港组物源体系如何发育、如何控制优质储层的分布、不同物源的砂体成岩演化特征如何,目前均未有明确的结论,这严重制约着西湖凹陷勘探目标的优选,是目前亟需解决的问题。

笔者在明确重矿物纵向强非均质性的基础上通

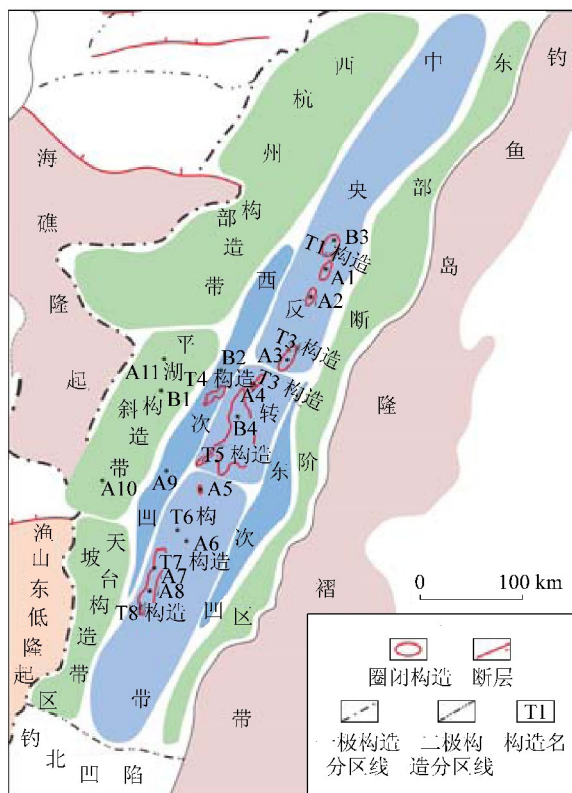
过聚类分析、镜下观察等技术手段对西湖凹陷花港组重矿物类型及组合特征进行研究,并对砂岩成熟度及古水流等进行分析,在此基础上确定花港组的物源方向。最后针对不同物源方向储层的物性及成岩作用进行研究,查明物源对储层物性的影响。

1 区域地质特征

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东北部,构造整体呈北北东向展布,是东海陆架盆地中规模最大的新生代含油气凹陷^[7-8]。凹陷总体可划分为东部陡坡带、中央洼陷-反转带、西部斜坡带等构造带。中央洼陷-反转构造带由东向西包括东次凹、中央反转构造带和西次凹等次级构造带(图1)。



(a) 东海陆架盆地



(b) 西湖凹陷构造

图1 我国东海陆架盆地西湖凹陷构造区划

Fig. 1 Tectonic division of Xihu Sag, East China Sea Basin

西湖凹陷经历了基隆运动、雁荡运动、甬江运动、玉泉运动、花港运动、龙井运动及海槽运动等7次构造运动。研究区内新生代地层自下而上发育了始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组和柳浪组、上新统三潭组及第四系东海群等地层^[7-8]。其中花港组由下到上分为花港组下段(H12-H6)及花港组上段(H5-H1)。

2 花港组物源分析

在重矿物及其组合特征分析母源性质的基础上,利用砂岩分布、成熟度及古水流特征等综合判断西湖凹陷花港组砂体的物源特征。

2.1 重矿物分析

随着近年来电子探针技术精度的不断提高,重

矿物研究已成为物源研究最可靠方法之一^[9-10]。针对西湖凹陷西部斜坡带、西次凹与中央反转带代表性钻井进行细砂岩及中砂岩样品取样,进行重矿物分析。但由于沉积岩中也可以产生新的自生重矿物,因此在分析过程中应谨慎使用原始数据。本文镜下观察分析认为重晶石与黄铁矿是研究区含量最大的自生重矿物,其局部富集程度可达 80%,由于其本身无法指明母源特征,因此在数据分析中予以舍弃并对数据进行校正。

2. 1. 1 重矿物分类特征

针对花港组各段重矿物纵向非均质性进行统计表明重矿物含量方差达可达 86.4,变异指数可达 0.8 (表 1),因此需要对花港组分段进行聚类分析。

表 1 西湖凹陷花港组重矿物非均质系数统计
Table 1 Statistical of non-homogeneity coefficient of heavy minerals in Huagang Formation of Xihu Sag

位置	重矿物含量/%			总偏差	方差	变异系数
	最小值	最大值	均值			
西斜坡	2.8	69.4	39.7	23.2	66.6	0.58
西次凹	1.2	65.1	40.7	21.7	63.9	0.53
T1 构造	3.0	63.8	25.2	17.1	60.8	0.68
T2 构造	5.3	80.9	47.8	26.3	75.6	0.55
T3 构造	0.5	86.9	46.7	28.2	86.4	0.60
T5 构造	0.5	82.7	36.2	28.3	82.2	0.78
T6 构造	1.5	87.8	35.4	28.7	86.3	0.81

利用 IBM 公司的 SPSS 聚类分析软件针对西部斜坡带、西次凹及中央反转带花港组各段细砂岩及中砂岩的重矿物进行 R 型与 Q 型聚类分析^[11-12]。R 型聚类分析表明花港组主要为锆石、电气石和金红石,赤褐铁矿、磁铁矿和绿泥石以及石榴石三种组合,符合重矿物的分类特征(图 2a)。Q 型分析表明西斜坡花港组上下段及中央反转带花港组 H3 及 H4 段重矿物具有亲缘性,中央反转带花港组 H1-H2 及 H4 段以下重矿物具有亲缘性(图 2b)。

2. 1. 2 重矿物组合特征

前人研究表明,金红石、锆石及电气石来自酸性岩浆岩母源,赤褐铁矿、磁铁矿及白钛矿为来自中基性岩浆岩母源,石榴石、绿泥石及绿帘石为来自变质岩母源的重矿物组合^[16-17]。但由于西湖凹陷绿帘石与绿泥石含量过低而导致存在偏差,但重矿物组合关系依然表现出较强的变质母源与岩浆母源类型重矿物组合的特征。

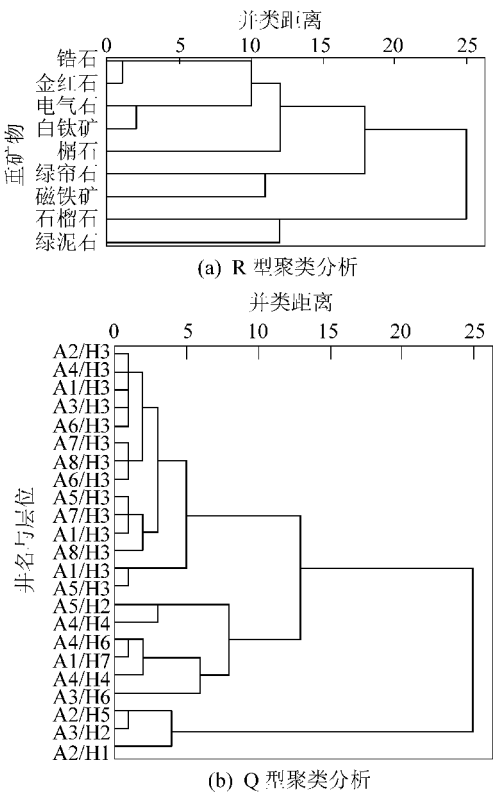


图 2 重矿物聚类分析
Fig. 2 Cluster analysis of heavy minerals

统计分析表明西斜坡砂体为典型的变质母源特征,其石榴石含量往往可以达到重矿物总含量 70% (图 3a、图 3b);西次凹花港组上段表现为高石榴石含量的特征,下部表现为高褐铁矿与白钛矿特征(图 3c、图 3d)花港组中央反转带的重矿物分布特征有所不同,北部 T1 构造带以岩浆母源与变质母源混合为特征,以中基性岩浆岩母源为主(图 3e、图 3f);中央反转带中北部至中央反转带南部重矿物具有明显的纵向非均质性,具体表现为 H1-H2 段以岩浆母源为主(图 3g),H3 及 H4 段以变质母源为主(图 3h),H4 段以下发育以岩浆岩为母源的重矿物组合(图 3i)。

这种组合特征表明,花港组沉积砂体为来自变质母源与岩浆母源的混合,其中西斜坡是以变质母源为主导,中央反转带北部 T1 构造以北为岩浆母源为主,T1 构造以南以为混合特征,其中 H3-H4 以变质母源为主,H1-H2 及 H4 以下以岩浆母源为主。

2. 1. 3 重矿物成熟度特征

鉴于花港组重矿物的强非均质性特征,笔者对花港组重矿物进行分段统计。研究表明 H1-H2 段重矿物成熟度指数^[15]在 T1 构造附近存在一个高

值区,向南则逐渐由低值向高值发育,表明 T1 构造南北存在不同物源体系(图 4a);H3—H4 重矿物分析研究表明其发育具有三段式特征:第 1 段 T1 构造带北部附近存在一个高值区,重矿物成熟度指数可达 18;第 2 段由 T1 构造南部至 T5 构造北部附近,

重矿物成熟度指数由 2.3 升至 13.5(图 4b);第 3 段由南部的 T7 构造至黄岩构造附近,熟度指数由 10.6 升至 18.8。三段式的发育特征与研究区的 3 个沉降中心相对应,也表明研究区存在 3 个不同的物源汇聚体系。

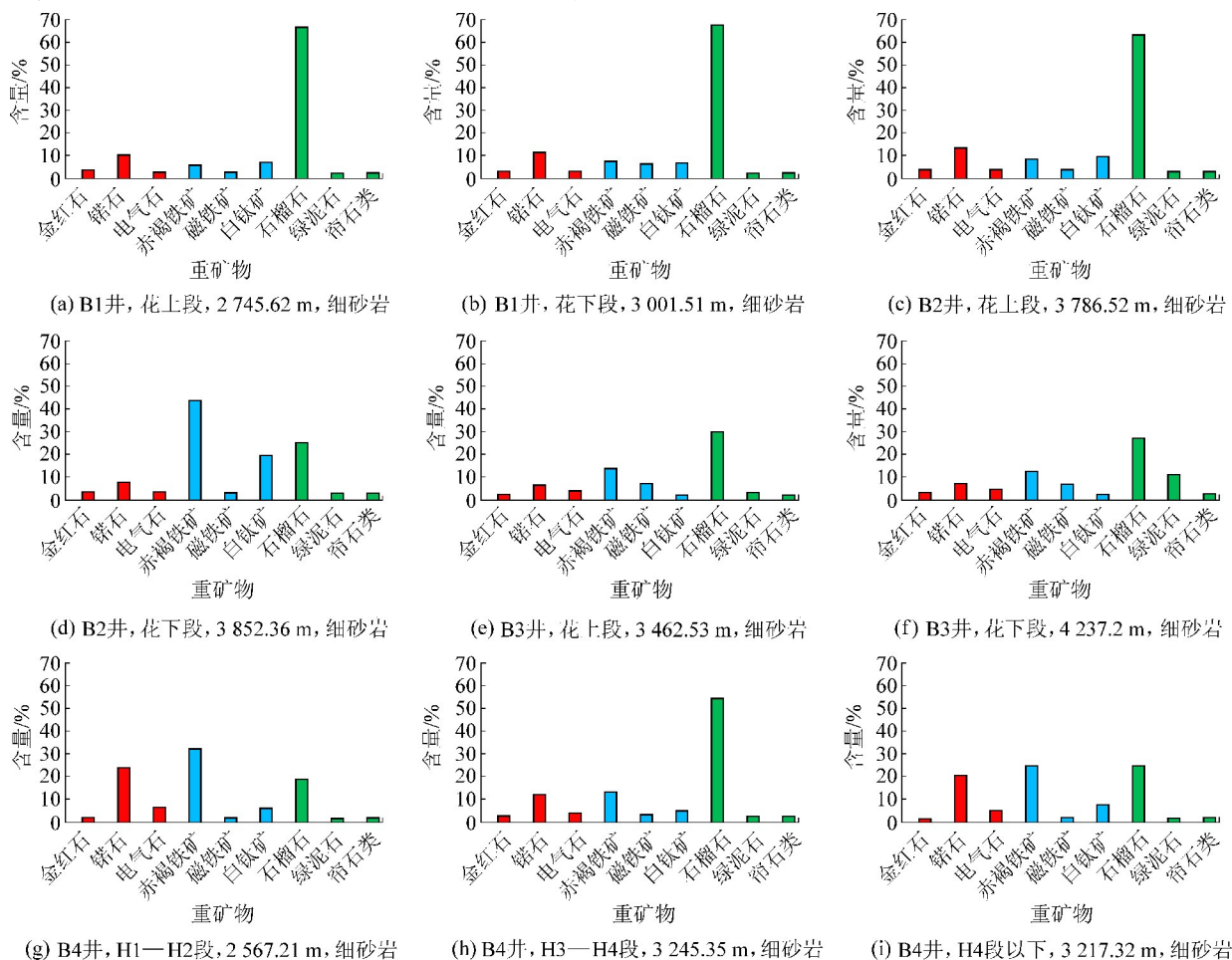


图 3 西湖凹陷花港组重矿物组合特征

Fig. 3 Heavy mineral assemblages of Huagang Formation in Xihu Depression

需要指出的是研究区东西向成熟度指数相对复杂且规律性不强,究其原因是因为西部物源与东部

物源在西次凹地区存在交汇且东西向距离较短,导致东西向数据区分度不高(图 4c)。

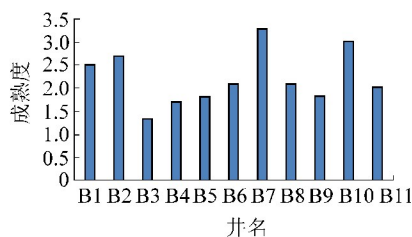
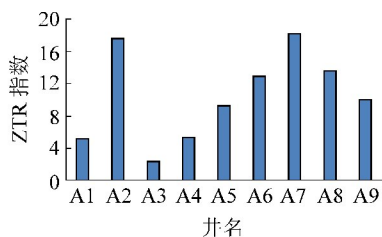
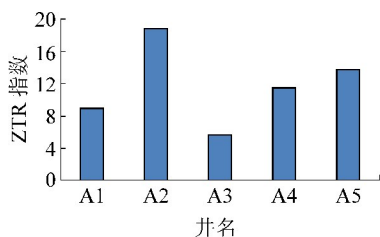


图 4 中央反转带南北向分段 ZTR 及砂岩成熟度统计

Fig. 4 S—N direction statistics of ZTR and sandstone maturity in central inversion structural belt

2.2 岩性特征分析

通过对研究区花港组砾岩、砂岩的厚度及砂地

比分布特征^[16]进行统计以明确物源方向。分析表明花港组 H1—H2 段砾岩发育较少且规律性不强;

H3-H4 段砾岩在西部杭州构造带最为发育,厚度及粒径均远大于其他地区,厚度最大可达 80 m。向南到平湖构造带中部砾岩厚度逐渐减小,向东到中央反转带逐渐减小,表现出自西北向东南逐渐降低的特征。H4 以下花港组砾岩较少发育,仅见由 T8 构造向 T7 构造砾岩具有减小的趋势。

花港组砂地比具有明显的规律性,H1-H2 段由

最东部的 60%向西逐渐降低,在西斜坡区达到 30%的最低值,继续向西则具有逐渐增高的趋势,表明此线为东西向物源的交汇(图 5a);H3-H4 段砂地比分布表明研究区具有 3 个明显的区带:其一为杭州构造带到 T5 构造逐渐降低的趋势;第二为平湖构造带南部向 T6 构造逐渐降低的区带;第三为 T8 向 T7 构造逐渐降低的区带(图 5b)。

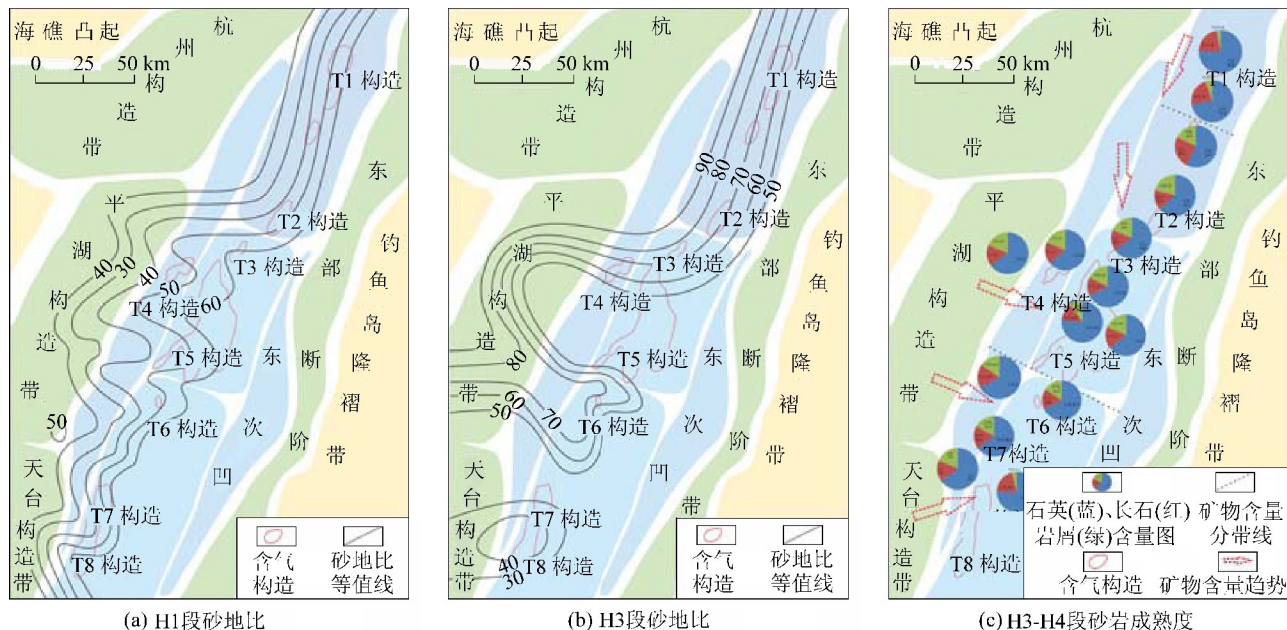


图 5 砂地比及砂岩成熟度特征

Fig. 5 Characteristics of sand ratio and sandstone maturity

针对西湖凹陷南北及东西向多井 H3-H4 段的矿物成分成熟度进行分析表明其同样具有南北分带的特征;东西向来看,由西部斜坡带到 T5 构造存在一个岩石成分成熟度上升的过程;南北向来看,第 1 带为 T1 构造带为高成分成熟度特征,其成分成熟度均大于 2.7;第 2 带为其南部的 T1 构造以南至 T5 构造,成分成熟度由 1.2 上升到 3.3;第 3 带为中央反转带南部,具有 T8 至 T7 构造矿物成分成熟度逐渐增加的趋势(图 5c)。

2.3 古水流特征分析

成像测井分析是判断古水流的有效手段^[17],针对研究区西次凹及中央反转带中北部已有成像测井资料进行研究表明,西次凹及中央反转带 H1-H2 段均具有明显的西向水流特征。而 H3-H4 段古水流特征较为复杂,位于西次凹的 T4 构造与中央反转带中北部 T3、T2 等构造均具有东南向水流特征;而位于中央反转带中部的 T5 构造古水流方向较为杂乱而没有确定的方向,根据现今砂体厚度表明花港组

沉积时期 T5 构造为深凹,为多水流汇聚或水体较为动荡的沉积部位。

同样针对不同砂层组古水流与重矿物组合进行对比分析发现,向西发育的砂体具有典型岩浆母源的特征,向东及东南向发育的砂体具有典型的变质母源特征,表明古水流与物源方向具有较好的对应关系。

综合研究表明西湖凹陷花港组沉积时期中央反转构造带北部受钓鱼岛隆褶带影响较大,流体携带大量火山物质在流经 T1 构造沉积中心时沉积下来;西北部杭州构造带相对盆地中心构造较高,顺宽缓斜坡发育厚层砾岩为特征的辫状河道沉积相。H1-H2 段主要受到东部物源影响,H3-H4 段沉积时期受到西部物源的影响,由中央反转带中北部至 T2、T3 及 T5 发育受西部物源影响的砂体;H4 以下砂体主要来自于东部钓鱼岛隆褶带的剥蚀。

3 不同物源的储层特征分析

针对不同类型母源所形成储层的物性条件进行统计分析,并结合成岩演化特征的分析,明确来自不同物源砂体的储层物性控制因素。

3.1 不同母源砂体的储层物性特征

针对研究区花港组不同深度段的细砂岩及中砂岩进行镜下鉴定、重矿物组合分析与实测物性对比可知:在孔隙度小于8%的区间内,变质母源和岩浆母源的重矿物含量 W 均分散度较大(5%~90%),与

孔隙度无明显关系;在孔隙度大于8%时,变质母源重矿物含量 w 明显增大,而岩浆母源重矿物含量与孔隙度关系呈负相关。研究区储层渗透率统计结果也具有相似的特征,表明变质母源的储层物性要优于岩浆母源(图6)。综合来看,来自于变质岩母源的细-中砂岩储层平均孔隙度可达12%,平均渗透率可达 $9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;来自于岩浆母源的细-中砂岩储层平均孔隙度为8%,平均渗透率为 $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在物性条件上表明变质岩来源的储层物性条件明显优于岩浆母源。

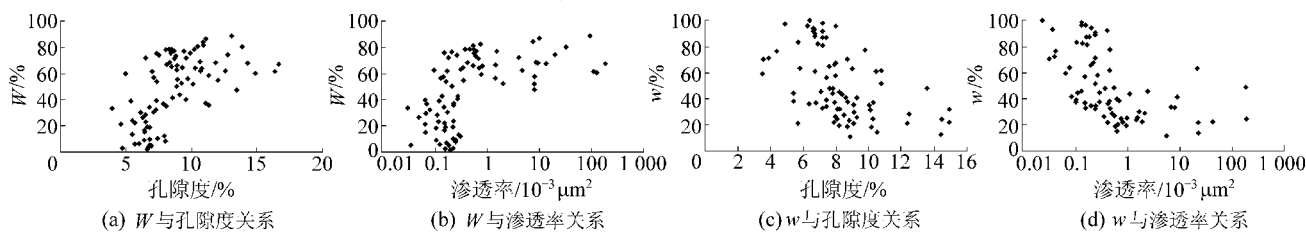


图6 不同母源储层的重矿物含量与物性关系

Fig. 6 Relationship of heavy mineral content and physical property of different source reservoir

3.2 成岩演化控制因素分析

从成岩特征来看,来自岩浆母源的石英、长石及岩屑颗粒分选及磨圆相对较差,常见火山型港湾状特征(图7a、图7b),加之塑性岩屑及凝灰质等杂基含量相对较高、分选磨圆较差导致早期压实较为强烈,镜下常见缝合及凹凸接触(图7e、图7f);岩浆母源储层中凝灰质等火山物质可以提供较多的硅质、

钙质及其它矿物化学成分对储层伤害较大,镜下常在有限的储集空间中发育导致完全堵塞孔隙(图7h、图7i);由于早期压实作用较强而导致晚期酸性流体流动受阻,因此溶蚀作用较弱且孔隙多孤立发育。镜下常见溶蚀不彻底的岩屑、长石等颗粒,一定程度上提高了孔隙度,但对于提高渗透率的作用有限(图7e、图7g)。

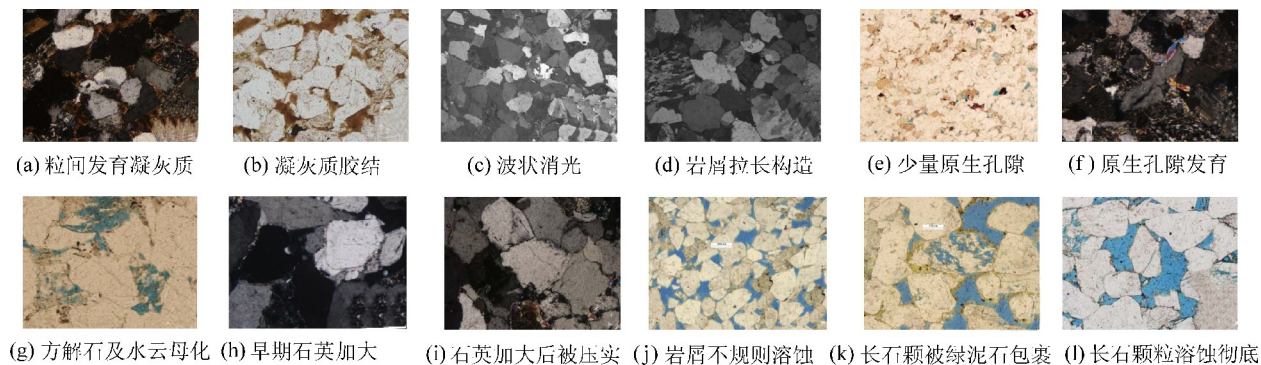


图7 西湖凹陷花港组砂岩镜下特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of sandstone in Huagang Formation, Xihu Sag

来自变质母源区的砂岩碎屑颗粒磨圆及分选较好,石英颗粒波状消光特征明显,常见硅质岩屑具有拉长构造等特征(图7c、图7d)。镜下常见以点-线接触为主,现今保存有大量原生孔隙(图7j、图7k),局部可见少量方解石、泥质、白云石以及石英自生加大等胶结(图7j),凝灰质蚀变成绿泥石包膜有效的阻止了石英颗粒硅质加大,对储层发育具有建设性

作用。颗粒较好的孔隙连通性为后期溶蚀创造了条件,颗粒边缘及孔隙中可见方解石胶结物溶蚀残余。钙质长石及部分易溶岩屑颗粒溶蚀较为完全,常见铸模孔及超大孔隙发育(图7k、图7l)。

通过成岩演化对比可知,岩浆母源较变质母源储层早期经历了更强的压实作用,加之火山灰等物质在早成岩期溶蚀产生钙质、硅质等胶结物,致使储

层致密;变质母源刚性颗粒保存了大量的原生孔隙,加之储层中绿泥石的发育为原生孔隙的保护提供了物质基础,共同形成了优质的储层的发育条件,导致变质母源来源的储层物性优于岩浆母源。

3.3 结果讨论

目前关于西湖凹陷周缘海礁隆起与渔山低隆起的母源类型仍然具有部分争议,认为海礁隆起为岩浆岩基底。其主要依据是在海礁隆起唯一钻探的海礁 1 井以钻遇了一套火山岩“基底”而完钻,因此海礁隆起是否存在变质岩基底目前存在争论。本文通过针对海礁 1 井所钻遇的火山岩同位素定年表明其年龄在 56 Ma 左右,这与西湖凹陷西斜坡基底之上所钻遇的早始新统八角亭组火山沉积岩年代相同,表明海礁 1 井之下应该具有更古老的地层。东海陆架盆地的基底是浙闽沿海陆区出露的深变质岩系向东的延伸^[1-2]。冲绳海槽盆地两侧的钓鱼岛隆褶带和琉球隆起同属于晚侏罗系-早白垩世形成的东海陆架外缘隆起。由于其均发育在华南-扬子地体的边缘,所以东海陆架外缘隆起具有元古宙结晶基底,这也对应了现今钓鱼岛隆褶带基底是元古代变质岩基底的结论^[18]。此外目前东海陆架盆地多口井也均钻遇了元古代变质岩基底,因此海礁隆起火山岩地层之下存在震旦纪基底且与中国东南沿海大陆出露的基底特征相同^[19-20],亦证明本文重矿物分析结论中认为海礁隆起具有变质母源的物质基础是成立的。

物源体系研究是沉积储层研究的先导,而多期构造运动与多期剥蚀导致古地貌恢复难度大。随着勘探开发程度的深入,以群、组为单位的物源研究尺度已无法满足需求。因此在进行多物源沉积盆地研究过程中首先应通过重矿物等对物源体系敏感的参数进行非均质性研究,再通过多证据证明物源发育特征。由于不同物源体系形成的储层特征具有较大的不同,需要对其进行区别研究,才能有效的识别多物源沉积体系对储层的影响作用。

4 结 论

1) 西湖凹陷花港组存在西部海礁隆起及渔山低隆起的变质岩母源与来自钓鱼岛物源区的岩浆岩母源二种母源类型。中央带北部 T1 构造主要受钓鱼岛隆褶带影响;中央反转带中北部 T2-T5 构造 H3-H4 段砂体主要来源于西北部的海礁隆起, H1-H2 段及 H4 段以下砂体来自钓鱼岛隆褶带;中央反

转带南部 T7-T8 构造 H3-H4 段砂体主要来自于海礁隆起及渔山低隆起。

2) 不同母源类型储层的成岩演特征不同,岩浆岩母源储层早期压实作用较强,晚期以孤立溶蚀孔隙为主,物性相对较差;变质母源颗粒承压作用强,原生孔隙得到有效保护,加之绿泥石的发育有效保护储层,物性相对较好。

3) 多物源盆地的母源分析应关注其平面及纵向非均质性,查明以砂层组为单位的物源分布特征,以对优质储层的分布及发育进行更为准确的预测。

参考文献 (References):

- [1] 王 鹏,梁建设,赵志刚,等.钓鱼岛隆褶带演化特征及其对东海盆地油气勘探的意义[J].石油地质与工程,2012,26(6):10-14.
WANG Peng, LIANG Jianshe, ZHAO Zhigang, et al. Diaoyu Islands folded-uplift belt evolution characteristics and its importance on the hydrocarbon exploration in East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(6):10-14.
- [2] 武法东,陆永潮,阮小燕,等.重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用[J].现代地质,1996,10(3):397-403.
WU Fadong, LU Yongchao, RUAN Xiaoyun, et al. Application of heavy minerals cluster analysis to study of clastic sources and stratigraphic correlation[J]. Geoscience, 1996, 10(3):397-403.
- [3] 陈琳琳.东海西湖凹陷渐新世花港组轴向水系沉积体制探讨[J].海洋石油,2001(3):35-41.
CHEN Linlin. Discussion on depositional mechanism controlled by axis-wise drainage in Huagang Formation (Oligocene) of Xihu Trough, the East China Sea[J]. Offshore Oil, 2001(3):35-41.
- [4] 郝乐伟,刘 畅,王 琦,等.西湖凹陷古近系花港组物源区特征分析[J].天然气地球科学,2011,22(2):315-323.
HAO Lewei, LIU Chang, WANG Qi, et al. Provenance Characteristics of Huagang Formation (Paleogene) in Xihu Sag, East China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2):315-323.
- [5] 高雁飞,傅 恒,葛海波,等.东海西湖凹陷 T-H 地区平湖-花港组物源分析[J].科学技术与工程,2013,22(13):6549-6552.
GAO Yanfei, FU Heng, GE Haibo, et al. Provenance analysis of Pinghu-Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 22(13):6549-6552.
- [6] 徐艳霞,胡明毅,梁建设,等.东海盆地西湖凹陷渐新统花港组物源分析[J].石油天然气学报,2010,32(5):176-179.
XU Yanxia, HU Mingyi, LIANG Jianshe, et al. Sedimentary provenance analysis of oligocene Huagang Formation in Xihu Sag of East China Sea Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(5):176-179.
- [7] 蒋一鸣,周倩羽,李 帅,等.西湖凹陷西部斜坡带平湖组含煤岩系沉积环境再思考[J].中国煤炭地质,2016,28(8):18-25.
JIANG Yiming, ZHOU Qianyu, LI Shuai, et al. Reconsideration of

- Pinghu Formation Coal - bearing rock series sedimentary environment in western of Xihu Depression[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(8): 18-25.
- [8] 高伟中, 孙 鹏, 赵 洪, 等. 西湖凹陷花港组深部储层特征及控制因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2016, 43(4): 396-404.
- GAO Weizhong, SUN Peng, ZHAO Hong, *et al.* Study of deep reservoirs characters and main control factors of Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2016, 43(4): 396-404.
- [9] 石 影, 黄文辉, 王华军, 等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩储层物性演化及评价[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(S1): 141-145.
- SHI Ying, HUANG Wenhui, WANG Huajun, *et al.* Reservoir properties evolution of glutenite reservoirs evaluation in northern steep slope of Dongying Depression[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(S1): 141-145.
- [10] 杨仁超, 李进步, 樊爱萍. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 99-107.
- YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 99-107.
- [11] 林天瑞. 应用聚类分析研究我国 Palaeolenid 类三叶虫分类-兼论我国黔东统沧浪铺组乌龙管段生物带划分[J]. 古生物学报, 2014, 53(1): 108-120.
- LIN Tianrui. Application of cluster analysis to the taxonomy of Palaeolenid trilobites, China: a new approach to the biostratigraphic classification of the upper part of Tsanglangpu Formation of Qian-dongian Series in China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2014, 53(1): 108-120.
- [12] 林冰霞, 邓明国, 梁徐文, 等. R 型因子分析在矿床成矿物质来源中的应用: 以云南镇康芦子园铅锌多金属矿床为例[J]. 矿物岩石, 2014, 34(1): 36-45.
- LIN Bingxia, DENG Mingguo, LIANG Xuwen, *et al.* The application of R-Factor analysis to the origin of metallogenic materials: a case study for Pb-Zn polymetallic deposit of Luziyuan, Zhenkang, Yunnan [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(1): 36-45.
- [13] MORTON A C, HALLSWORTH C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 1999, 124: 3-29.
- [14] 李林林, 郭召杰, 管树巍, 等. 柴达木盆地西南缘新生代碎屑重矿物组合特征及其古地理演化[J]. 中国科学: 地球科学 D 辑, 2015, 45(6): 780-798.
- LI Linlin, GUO Zhaojie, GUAN Shuwei, *et al.* Heavy mineral assemblage characteristics and the Cenozoic Paleogeographic evolution in southwestern Qaidam Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(6): 780-798.
- [15] 刘彤彦, 邵红梅, 孙先达. 海拉尔盆地土库力组重矿物组合特征[J]. 地质科学, 2009, 44(2): 707-714.
- LIU Tongyan, SHAO Hongmei, SUN Xianda. Heavy mineral assemblages in Shangkuli Formation of Hailar Basin[J]. Earth Science, 2009, 44(2): 707-714.
- [16] 李慧明, 于兴河, 李胜利. 大漠凹陷南部沙三段物源分析[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 12-15.
- LI HuiMing, YU Xinghe, LI Shengli. Es3 provenance analysis in the south of Dongpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(1): 12-15.
- [17] 李潮流, 李 谦. 利用测井信息识别古流向的方法探讨[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 427-431.
- LI Chaoliu, LI Qian. Application of log data to determination of Paleocurrent[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 427-431.
- [18] 刘金水, 廖宗延, 贾健谊, 等. 东海陆架盆地地质结构及构造演化[J]. 上海地质, 2003, 87: 1-5.
- LIU Jinshui, LIAO Zongting, JIA Jianyi, *et al.* The geological structure and tectonic evolution of the east China Sea Shelf Basin [J]. Shanghai Geology, 2003, 87: 1-5.
- [19] 陈 冰, 王家林, 吴健生, 等. 东海陆架盆地海礁凸起南块基底性质研究[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 301-305.
- CHEN Bing, WANG Jialin, WU Jiansheng, *et al.* Study on the basement properties of the south Haijiao Uplift in the East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(4): 301-305.
- [20] 郑求根, 周祖翼, 蔡立国, 等. 东海陆架盆地中生代构造背景及演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 197-201.
- ZHENG Qiugen, ZHOU Zuyi, CAI Liguo, *et al.* Meso-Cenozoic tectonic setting and evolution of East China Sea shelf basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 197-201.