

西湖凹陷古近系花港组物源区特征分析

郝乐伟^{1,2}, 刘畅³, 王琪^{1,2}, 王欢^{1,2}, 马晓峰^{1,2}, 唐俊^{1,2,4}, 廖朋^{1,2}

(1. 中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083;

4. 内蒙古科技大学数理与生物工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:西湖凹陷花港组是研究区重要的储层之一,其物源一直是争论的焦点。应用砂岩碎屑组分特征、重矿物分析并结合砂地比等值线图精细描绘物源分支,从不同角度、不同层次对西湖凹陷花港组物源体系进行了精细研究。结果表明,西湖凹陷花港组物源主要来自凹陷的西部边缘,东部钓鱼岛隆褶带影响较小,具体分为3大分支:西部的海礁隆起为近物源、西北部虎皮礁凸起和东部钓鱼岛隆褶带物源的结合影响凹陷北部地区、西南部的渔山隆起为凹陷的中南部地区提供物源。通过对岩屑类型、长石特征、石英颗粒和重矿物的微观特征和稀土元素等特征的分析,推测出凹陷周边岩体性质,花港组的母岩主要是岩浆岩,其次为变质岩,沉积岩少见。变质岩主要发育在海礁隆起的中部,影响西部的平湖地区,沉积岩仅在钓鱼岛隆褶带北部地区少量发育。

关键词:物源分析;稀土元素配分模式;重矿物组合;花港组;西湖凹陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)02-0315-09

引用格式:郝乐伟,刘畅,王琪,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.

0 引言

物源分析^[1-2]是石油地质学中重要的研究内容,在含油气盆地分析过程中,碎屑物的性质、源区方向以及供给量的确定,对于油气储层及有利油气相带的预测具有十分重要的意义^[3],且物源区对盆地内沉积体系的类型及其发育规模有重要决定作用^[4-5]。近几年来西湖凹陷古近系的油气勘探越来越受到重视,但由于对该区花港组的沉积体系与物源方向认识不清,对沉积相带、砂体规模及其平面展布格局研究不够精细,尤其在物源的方向上更是认识不清,有的学者^[6]认为是单物源,有的学者^[7]认为是双物源,观点不一致的关键原因在于研究区地处深海,周边物源区围岩的性质不明确,严重地制约了对物源的

确定。近年来随着现代分析手段电子探针、阴极发光、质谱分析等先进技术在物源分析中应用日益广泛,其方法日趋丰富,如重矿物法^[6-8]、碎屑岩类分析法^[9]、沉积法^[10]、地球化学法和同位素法^[11]、古水流与古地貌法^[12]等且与化学、物理、数学等学科的应用及相互结合,逐渐由早期的单一方法向多种方法综合运用发展^[13]。不同的方法从不同的视角分析,各有侧重各有优势,而多种方法的综合运用将更加准确确立研究区的物源体系。本文通过岩石矿物成分、重矿物、地球化学等微观特征结合宏观砂岩空间展布,从不同角度、不同层次对西湖凹陷古近系花港组物源体系进行了精细研究,对研究区的构造演化,古地貌,古环境的恢复及进一步的油气勘探具有一定的借鉴意义。

收稿日期:2010-04-29;修回日期:2010-09-20.

基金项目:南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究(编号:2009CB219400);国土资源部全国油气资源战略调查与评价项目“南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查与评价”(编号:XQ-2004-05);国家科技重大专项海洋深水油气勘探关键技术(编号:2008ZX05000-025);中国科学院“西部之光”联合学者项目联合资助。

作者简介:郝乐伟(1985-),男,山东聊城人,博士研究生,主要从事储层沉积学与储层地球化学研究. E-mail:haolewei66@163.com.

1 区域地质背景

西湖凹陷是东海陆架盆地中主要的含油气凹陷之一,目前东海已发现的油气主要集中于西湖凹陷^[14]。西湖凹陷位于东部坳陷带中部偏北,西邻虎皮礁凸起、海礁凸起和渔山凸起 3 个凸起,东接钓鱼岛隆褶带,北侧和南侧分别通过一个鞍部过渡到福江凹陷和基隆凹陷(图 1)。总体为一东断西超的箕状凹陷,面积约为 4.6 万 km²,为东海陆架盆地面积最大也是勘探程度最高的凹陷。西湖凹陷和中国东部许多盆地一样,经历了断陷—坳陷—整体沉降 3 个阶段。早期平湖组以下为断陷期;中期花港组—柳浪组为坳陷期;晚期三潭组—东海群为整体沉降期。总体沉降期又分 2 个阶段,早期沉降中心位于凹陷北部,晚期沉降中心位于凹陷南部,以冲绳运动为界,沉降中心从北向南迁移,充填了厚达万余米的

古近系、新近系沉积物^[15]。

2 区域岩石学特征

碎屑沉积物的成分反映了物源的组成、物源方向和环境方面的信息^[16]。通过对研究区的砂岩岩石薄片及数据进行详细观察和系统研究,对研究区砂岩岩石学类型进行了分类。统计分析表明砂岩可以分为长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩 2 类。研究区西部地区为岩屑砂岩,分选较好,但磨圆度较差,为棱角状和次棱角状,颗粒之间多为点接触,钙质胶结具悬浮构造,粘土杂基含量高说明为近物源沉积。研究区中南部地区主要为含长石岩屑砂岩,分选较好,颗粒均匀,磨圆度较好多为圆状,说明经过远距离搬运而来,离物源有一定距离。研究区北部地区为岩屑砂岩碎屑颗粒分选差,大小颗粒混杂,杂基含量高,磨圆度较差,为棱角状和次棱角状,说明物源区较近。

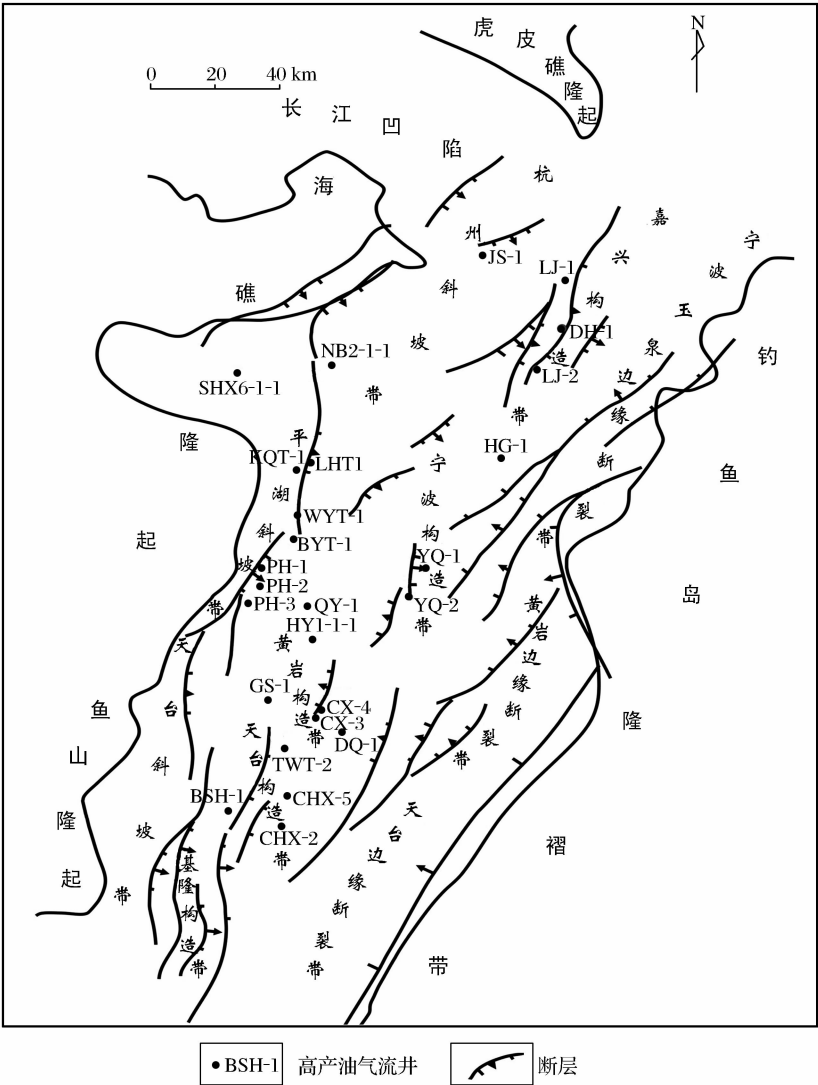


图 1 西湖凹陷构造区划

3 砂岩分散体系分析

砂岩的展布趋势与物源方向有紧密联系,含砂率的变化能够精细地刻画物源推进方向和展布特征。西湖凹陷北部地区的 DH1 井和 LJ1 井的砂岩含量都超过 60%,西部平湖地区的砂岩含量在 55% 左右,这 2 个地区的砂岩含量都较高,说明离物源较近,为近物源。在凹陷中部的断桥地区砂岩含量在 45% 左右,而同在凹陷中部的春晓地区砂岩含量为 51% 左右,这 2 个地区的砂岩含量相对于西部平湖地区的砂岩含量并未出现明显的减少,说明凹陷中部地区的物源并不是全部来自凹陷的西部地区。从花港组砂地比图中可看出西湖凹陷花港组沉积期间,盆地内砂岩主体由西向盆地东部推进,盆地内砂岩主要分布于西北部以及西南部区域,东部砂体不具有明显的特点。从砂体展布上看,凹陷西北部存在 2 个主要的推进体系,一个自西北向东,另一个为向东南方向最远至玉泉地区;凹陷西部主要为海礁凸起向东推进,展布较浅主要在平湖地区一带;在凹陷西南部,砂体主要向东北方向延伸到天外天、春晓等地区(图 2)。

4 轻矿物特征

4.1 岩屑特征

碎屑岩中岩屑类型和母岩性质息息相关,因此通过对不同类型岩屑的分析能够反映出不同母岩来源。通过对薄片观察,发现研究区常见火山喷发形成的凝灰岩屑,多发生绢云母化,为低温热液蚀变产物,通常含量较高(图 3d);其次为变质石英岩屑(图 3b)、片岩岩屑、千枚岩屑;最后,为少量的燧石岩屑(图 3c)和微晶灰岩岩屑(图 3a)。

碎屑岩中,不同母岩来源的云母具有不同的特征。研究区常见鲜艳的干涉色及压实变形特征(图 4a)的白云母碎屑,白云母一般在偏酸性火成岩中的花岗伟晶岩、白云母花岗岩中产出。而主要来自高级变质岩,如云母片岩和片麻岩的黑云母颗粒少见,由此表明研究区主体母岩性质是花岗岩。

4.2 石英颗粒成因

根据碎屑岩中石英颗粒在显微镜下的消光性质、类型、包裹体类型、复合石英的内部结构及颗粒形态等不同特点可以区别出其不同的母岩来源。通过对显微薄片的镜下观察,认为西湖凹陷西部平湖构造带碎屑岩中石英多为变质岩来源,其典型的特征有:变质石英岩屑内部石英具拉长构造、缝合线接

触(图 3b);颗粒内部偶见标准变质矿物——砂线石(图 4d),具典型的波状消光特征(图 3e)常与千枚岩屑、云母片岩屑伴生。

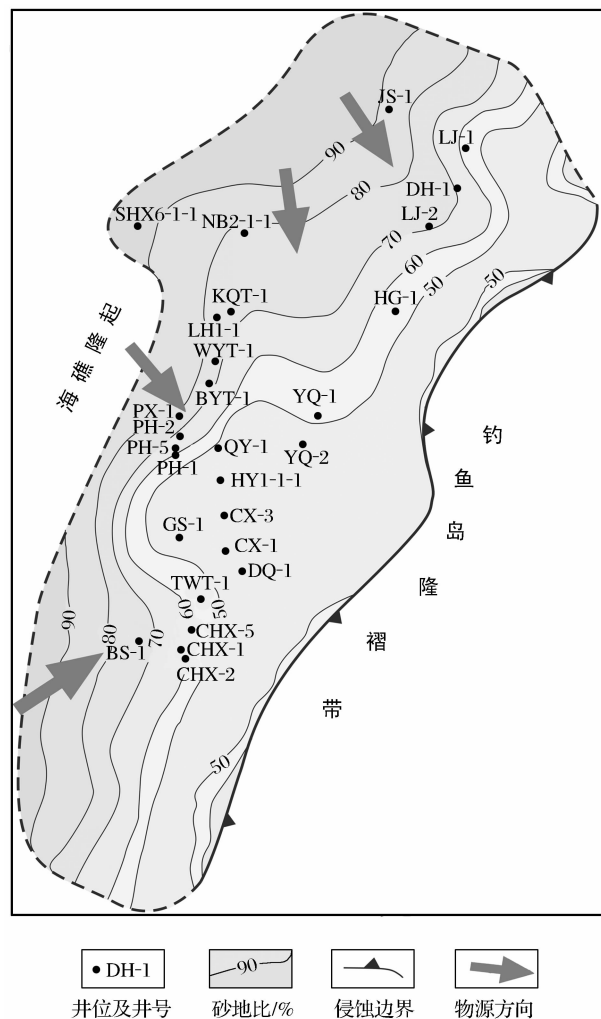


图 2 西湖凹陷花港组砂地比等值线特征

花岗岩母源的石英颗粒同样具有其典型的特征,其具四象限均匀消光特征;石英内部常见锆石(图 4e)、电气石矿物包体;常见从母岩中带来的气液包裹体(图 3f);常与火山凝灰岩屑伴生。具花岗岩来源特征的碎屑岩样品主要来自西湖凹陷内南部地区 HY7-1-1 井的碎屑岩中。

在整个凹陷内各个地区沉积岩来源的石英颗粒较少见。沉积岩来源的石英颗粒主要为由细小石英颗粒组成的燧石,其特征有:有时具有放射状球粒结构;石英颗粒多为平直线接触(图 3g)与变质石英岩屑相区别。

石英颗粒成因类型的特征分析除了镜下特征外,还可从石英阴极发光特征来判别它的成因类型。在阴极射线照射下,具有标准成因意义的石英发光颜色类型有 3 种:① 发蓝紫色光的石英形成于深成岩或

火山岩中,在高温(高于 573℃)条件下快速冷却形成。

② 发红棕、棕色光的石英形成于区域变质岩中。温度为 300~573℃,冷却速度比较“慢”;受成岩作用中压溶、温度、压力的影响,自生石英也可能发浅棕色光。

③ 不发光石英是成岩作用过程中形成的自生石英。

形成温度一般小于 300℃^[17]。通过分析研究区内石英的阴极发光特征,平湖构造区的石英主要以发棕色光的石英为主,在研究区中南部主要以岩浆岩来源的蓝紫色光的石英为主(图 3h);在各地区不发光沉积岩来源的石英均可见,但含量均较少。

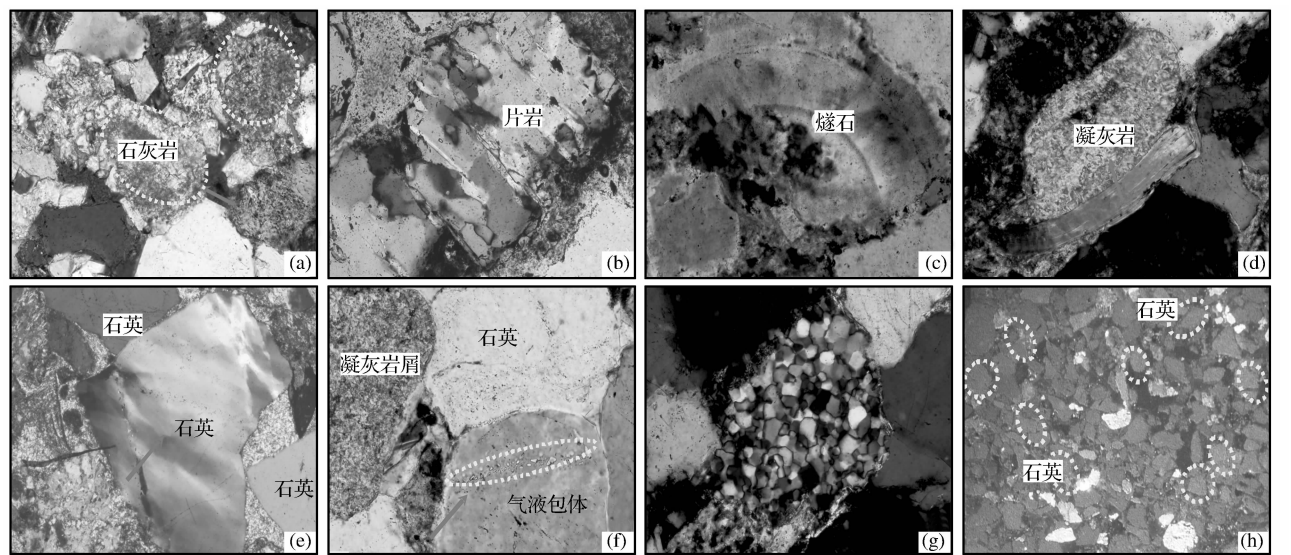


图 3 西湖凹陷花港组不同母源的岩屑及石英微观特征

(a)PH5 井,3 286.27 m,重结晶的微晶灰岩屑特征,×200,(+);(b)PH1 井,2 337.55 m,变质石英岩屑特征及其内部石英和云母定向拉长构造,×200,(+);(c)DH1 井,4 108.75 m,具放射鲕结构的燧石岩屑特征,×200,(+);(d)DH1 井,3 416.75 m,强烈绢云母化的火山岩屑,×200,(+);(e)PH3 井,3 705.14 m,变质岩来源石英的波状消光特征,×100,(+);(f)HY7-1-1 井,3 610 m,花岗岩来源石英中的气液包体,×200,(−);(g)HY7-1-1 井,3 107.50 m,长石岩屑细砂岩中燧石颗粒特征,×200,(+);(h)HY1-1-1 井,3 145 m,石英多发蓝紫色光为花岗岩来源,×50

4.3 长石颗粒特征

不同来源的长石颗粒其特征也不同。钾长石主要在花岗岩和混合岩化花岗岩中富集,而斜长石常见于中级变质岩系中^[18]。表 1 所示,在西湖凹陷西部平湖地区长石组分中以斜长石占优势,钾长石含量相对较低,反映了西湖凹陷西部平湖地区的母源性质以变质岩为主,花岗岩为辅。而在西湖凹陷中南部地区钾长石含量优于斜长石,表明花岗岩母岩占优,且斜长石含量较少进一步说明凹陷中南部的

偏多,说明虽然同在北部地区但物源有差异。以黄岩构造带为例,研究区常见碱性长石中的微斜长石和条纹长石,含少量酸性斜长石;说明该地区母岩类型主要是花岗岩。

5 重矿物特征及物源分析

根据前人研究,研究区的稳定重矿物组分主要有石榴石、锆石、电气石、磁铁矿、赤褐铁矿、榍石、金红石、锡石、板钛矿、白钛矿等,不稳定的重矿物组分主要有云母、绿帘石、黝帘石、角闪石和绿泥石等。重矿物中变质特征矿物十字石、蓝晶石、红柱石等含量很少。

表 1 西湖凹陷花港组砂岩长石含量

地区	凹陷西部 平湖地区			凹陷 中南部地区			凹陷 北部地区
	井号	PH1	PH4	PH5	DQ1	HY7-1-1	DH1 NB2-1-1
钾长石	9.77	7.00	9.33	8.73	11.72	7.06	4.30
斜长石	9.20	11.30	11.37	6.48	9.97	9.69	3.90

表 2 西湖凹陷花港组重矿物指数

地区	凹陷北部		凹陷西部		凹陷中南部	
井号	NB2-1-1	LJ2	PH1	PH3	DQ1	DQ2
稳定系数	48.02	4.43	13.6	6.6	11.8	9.24
ZTR 值	9.89	8.15	10.11	7.82	4.613	23.77

物源不完全来自于西部平湖地区,可能为凹陷西南部或者东部物源区。在凹陷北部地区靠西部的 NB2-1-1 井岩浆岩偏多,而靠东部的 DH1 井变质岩

重矿物分为稳定重矿物和不稳定重矿物。稳定重矿物抵抗风化能力强,分布广,远离物源区其含量相对升高;不稳定重矿物抵抗风化的能力弱,分布不

广,远离物源区其含量相对较少,甚至消失。因此,可通过分析稳定组分和不稳定组分的稳定系数来确定重矿物的搬运方向及搬运距离,从而进一步确定研究区离物源远近的问题。据表 2 西湖凹陷西部的平湖地区 PH1 井与 PH3 井位置相距较近,且稳定系数和 ZTR 指数都不高,说明 2 口井离物源区较近,物质来源应是西部的海礁隆起区。但 PH1 井稳定系数是 PH3 井的 2 倍,这可能与不同沉积环境等因素造成两者稳定系数差异较大有关。凹陷中南部地区 DQ1 井及 DQ2 井 2 口井两者稳定系数同样不高,甚至比西部地区的都低。说明其物源方向不可能全部来自凹陷西部的平湖地区,肯定为混合物源区,ZTR 指数差异较大可能因为两者的沉积环境存在不同,由于缺乏东部钓鱼岛隆起的资料而无法判定其是来自钓鱼岛隆起还是西南方向。凹陷东北部 LJ2 井花港组重矿物组合的稳定系数为 4.43,西北部 NB2-1-1 井花港组重矿物组合的稳定系数为 48.02,两者稳定系数差异大,但 ZTR 指数接近说明两者并不是同一物源区,LJ2 井稳定系数偏低,说明其可能为临近东部钓鱼岛隆起的近缘冲积扇沉积。

而 NB2-1-1 井稳定重矿物含量较高,花港组沉积时期发育河流相沉积,其物源较远,故稳定系数含量较高,其源区应为凹陷西部地区。

重矿物类型和组合与源区母岩性质密切相关,如绿帘石、矽线石、金红石和石榴石等重矿物主要来自变质岩母岩区,锆石、榍石为花岗岩母岩区中常见的副矿物,而沉积岩母岩区缺乏特征的重矿物源区标志。对研究区薄片研究发现,显微镜下可见到多种火山岩母岩的重矿物如富钠深成岩中副矿物锆石(图 4e),花岗伟晶岩中的电气石(图 4f),通常在碱性火成岩中产出的磷灰石(图 4b),在花岗岩中分布广泛的榍石(图 4c)。而变质岩产出的重矿物较少见,仅见到形成于接触变质岩中的针状矽线石(图 4d)。

根据重矿物成因及其组合特征,由表 3 综合分析认为西湖凹陷西部平湖地区母岩为变质岩背景,有岩浆侵入、火山喷发和热液交代变质;西湖凹陷北部、中部和南部母岩为火成岩背景,花岗岩、花岗伟晶岩、喷发岩发育,围岩为局部分布的变质岩及沉积岩,具接触带热液交代变质砂卡岩和矿化特征。

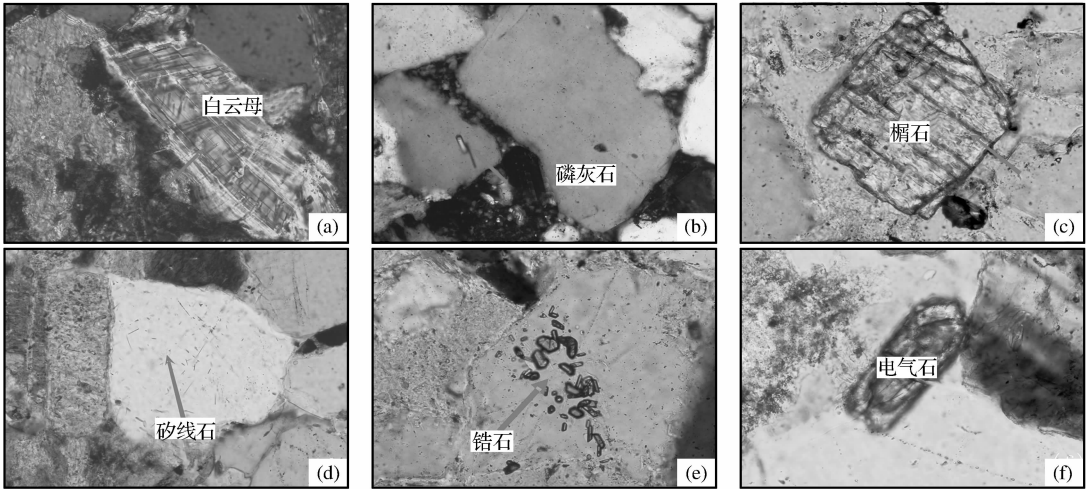


图 4 西湖凹陷花港组重矿物特征

(a)PH1 井,2 970.865 m,白云母碎屑特征,×400,(+);(b)DQ1 井,2 570.50 m,石英颗粒中磷灰石重矿物,×200,(+);(c)DQ1 井,2 521.00 m,砂岩中榍石重矿物特征,×400,(—);(d)DQ1 井,2 570.50 m,石英颗粒中针状矽线石特征,×100,(—);(e)PH1 井,2 329.10 m,花岗岩来源的石英中锆石特征,×400,(+);(f)DQ 1 井,2 522.25 m,砂岩中电气石重矿物特征,×400,(—)

6 地球化学特征

稀土元素(REE)作为沉积物物源的示踪物因其特殊的地球化学性质而在判别岩石类型、分析物源方向方面得到广泛运用^[19-20]。稀土元素在沉积过程中具有较低的活动性,并且在水介质中停留时间也较短;在风化和搬运过程中,这些元素定量地进入碎

屑沉积岩中,因而可以反映出母岩物质的特点。从表 4 来看,凹陷北部 DH1 井 ΣREE 值为 $(74 \sim 106.8) \times 10^{-6}$,较低,凹陷西部的平湖地区 ΣREE 值为 $(123.9 \sim 141.3) \times 10^{-6}$,较高,而凹陷中南部稀土 ΣREE 值介于两者之间 $(79.2 \sim 141.4) \times 10^{-6}$, Eu/Eu^* 值和 La/Ybn 值在凹陷内不同地区同样表现出了差别, Eu/Eu^* 值在凹陷北部平均为 0.9,

凹陷西部的平湖地区为 0.7, 中南部为 0.8, Lan/Ybn 值在凹陷北部平均为 12.5, 凹陷西部的平湖地区为 12.1, 而中南部为 14.4。以上分析可以看出凹陷内不同地区的物质来源是有差别的。

根据西湖凹陷 11 块泥岩样品的 La/Yb 值和

ΣREE 值投点图(图 5), 样品均投在花岗岩区域内, 说明研究区古近系花港组泥岩主要来自花岗岩母岩区。与重矿物组合、石英成因类型分析、岩屑成因分析结果一致, 说明西湖凹陷古近系碎屑岩主要来自花岗岩母岩。

表 3 西湖凹陷古近系花港组重矿物组合特征及成因分析

重矿类型	成因分析		
	主要产状与成因	重矿物组合特征	综合成因分析
石榴石	典型的高温矿物和变质矿物, 常见于花岗伟晶岩、区域变质岩和接触交代的砂卡岩中	①石榴石—电气石—磷灰石—锆石—赤褐铁矿—黑云母组合, 代表井为 PH1 井和 PH5 井	主要分布于平湖构造区, 母岩区以区域变质岩为主, 如片麻岩和石英岩, 见少量花岗岩、花岗伟晶岩侵入其中, 并在接触带形成热液交代的砂卡岩
锆石	主要形成于火成岩, 特别是碱性岩, 也形成于碱性伟晶岩和花岗伟晶岩中	②石榴石—锆石—白钛矿—磷灰石—菱铁矿组合, 代表井为 DQ2 井	主要分布于黄岩构造区南部, 母岩区以花岗岩及其中的伟晶岩为主, 在与围岩接触带形成热液交代的砂卡岩
电气石	主要产于花岗岩、花岗伟晶岩、云英岩和石英脉中, 偶见于变质岩中	③磁铁矿—石榴石—太铁矿—菱铁矿组合, 代表井为 DQ1 井	主要分布于黄岩构造区北部, 母岩区以花岗岩及其中的热液铁矿床为主, 在与围岩接触带形成热液交代的砂卡岩
金红石	产于伟晶岩中者多含铁、铌。也可在区域变质中, 由铁矿分解而成, 或见于石英脉中	④石榴石—白钛矿—赤褐铁矿—锆石—黄铁矿组合, 代表井为 NB2-1-1 井	主要分布于凹陷西北部宁波构造区, 母岩区以花岗岩为主, 在与围岩接触带形成热液交代的砂卡岩
白钛矿	主要形成于火成岩, 特别是花岗伟晶岩中	⑤石榴石—赤褐铁矿—磁铁矿—电气石—黑云母组合, 代表井为 LJ2 井	主要分布于凹陷东北部龙井构造区, 母岩区以花岗岩、花岗伟晶岩为主, 含少量变质片麻岩, 在与围岩接触带形成热液交代的砂卡岩
磁铁矿	见于岩浆成因、接触交代、气化高温、沉积变质铁矿床中以及火山作用有关的铁矿石中	⑥石榴石—白钛矿—锆石—赤褐铁矿—金红石—重晶石组合, 代表井为 DH1 井	主要分布于凹陷东北部东海构造区。母岩区以花岗岩、花岗伟晶岩为主, 含少量变质片麻岩, 在与围岩接触带形成热液交代的砂卡岩
磷灰石	作为副矿物见于各种火山岩, 亦见于伟晶岩、接触交代矿床和热液脉中		
黑云母	广泛分布于火成岩和结晶片岩、片麻岩中		
赤褐铁矿	主要为磁铁矿的氧化产物, 内生的主要以热液成因为主		
菱铁矿	热液成因或外生成因, 主要产于煤系地层中		

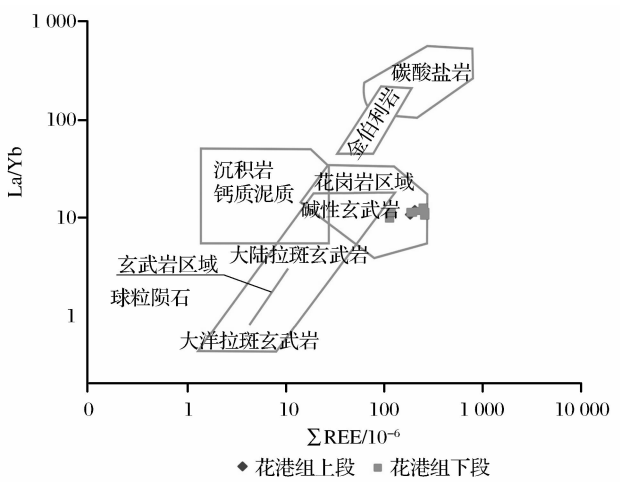


图 5 西湖凹陷花港组泥岩源岩判别 (底图据 Allegre^[21], 1974)

7 物源区讨论

根据前面轻矿物、重矿物、稀土元素的综合分析认为西湖凹陷的母源以岩浆岩为主, 其次为变质岩, 沉积岩较少, 但局部地区以变质岩为主。西部平湖

构造区母岩成分以变质岩为主, 主要为石英岩、石英片岩、云母片岩和千枚岩, 含量占 50% 以上(图 6), 其次为侵入到变质岩基底的花岗岩、花岗伟晶岩, 在接触变质带可形成砂卡岩和金属矿化现象, 沉积岩相对不发育(图 7)。母岩区非常稳定, 连续为第三系供给沉积物。

西湖凹陷中南部古近系花港组的母岩以花岗岩、火山喷发岩为主, 占 50% 以上, 其次为变质石英岩、石英片岩、千枚岩等, 占 10% 左右, 最后, 为少量的沉积燧石和泥岩, 母岩区以火成岩为主。凹陷中南部的物源主要来自于海礁隆起西南部和渔山凸起的燕山晚期火成岩和喜马拉雅中期酸性火成岩。

西湖凹陷北部花港组的母岩也以花岗岩、火山喷发岩为主, 占 60% 以上, 其次为沉积泥岩和燧石, 占 30% 左右, 最后为少量的变质石英岩、片岩和片麻岩, 母岩区以火成岩和沉积岩为主。由于此处物源成分沉积岩相对占的比例较多, 凹陷北部的物源区不可能完全来自于西湖凹陷西部的海礁隆起, 应为和东部含沉积岩的钓鱼岛隆褶带的混合沉积。

表 4 西湖凹陷花港组砂岩稀土元素组成

井号	DH1			DQ1			HY7-1-1				PH1		PH5
样品号	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11	12
ΣREE	106.8	91.4	74.0	82.5	141.4	113.6	105.4	111.3	79.2	82.0	123.9	133.6	141.4
Eu/Eu*	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	1.0	0.8	0.7	0.6
Lan/Ybn	11.5	13.5	12.6	14.6	10.4	14.7	12.2	16.8	14.3	14.3	12.8	11.4	12.3

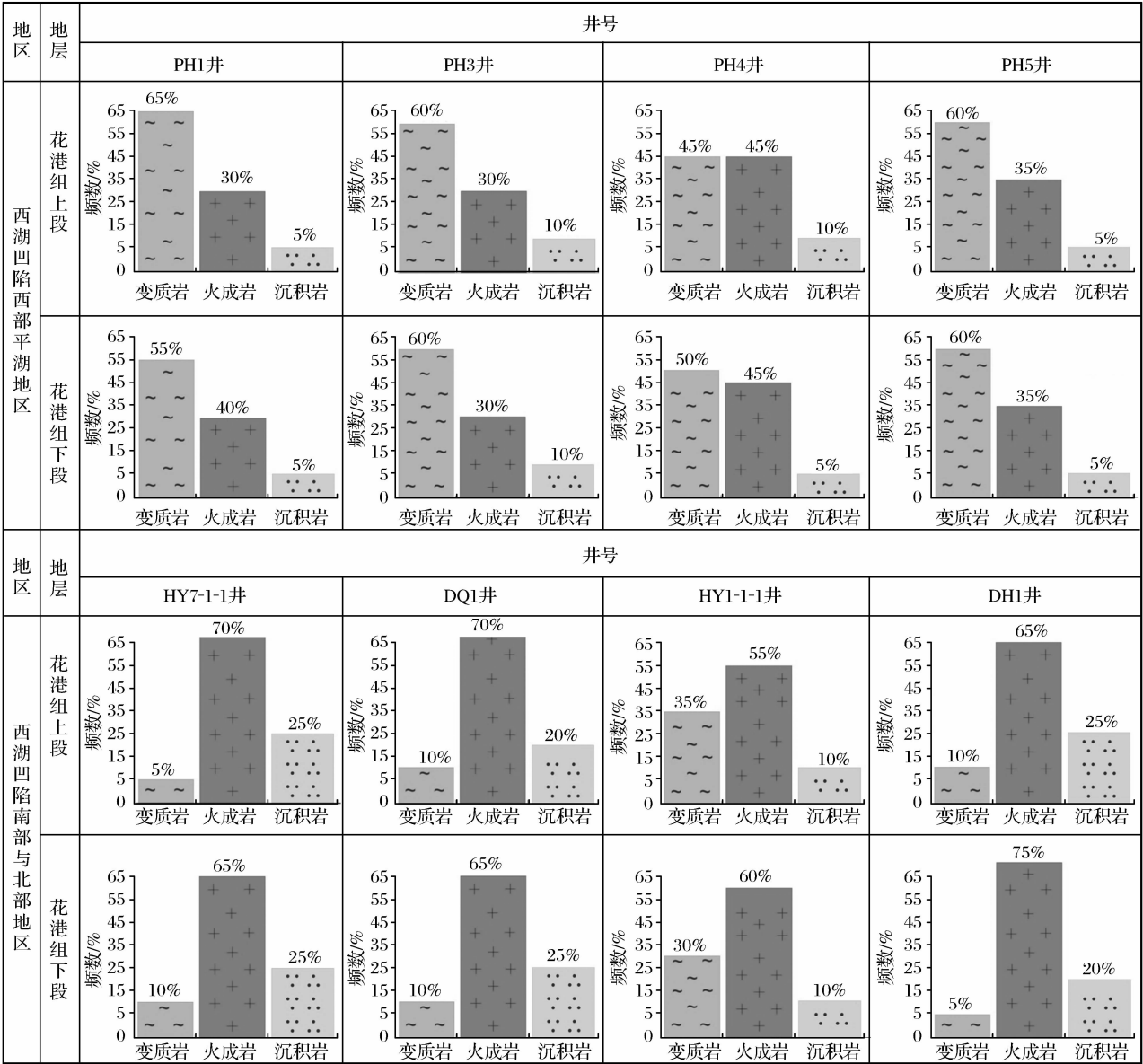


图 6 西湖凹陷花港组母岩组成分析

8 结论

(1)西湖凹陷花港组砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主。西部地区和北部地区为岩屑砂岩,分选较差,离物源较近。中南部地区主要为含长石岩屑砂岩,分选较好,为沉积物经过远距离搬运的产物。

(2)西湖凹陷物源主要受凹陷西部边缘的影响,

东部钓鱼岛隆褶带影响有限。西湖凹陷的母源以岩浆岩为主,其次为变质岩,沉积岩较少,但局部地区以变质岩为主。凹陷西部平湖构造区物源区主要来自于海礁隆起内的变质岩,凹陷中南部的物源主要来自于海礁隆起西南部和渔山凸起的燕山晚期火成岩和喜马拉雅中期酸性火成岩,凹陷北部的物源区可能来自于西湖凹陷西部的海礁隆起和东部含有沉积岩的钓鱼岛隆褶带的混合沉积。

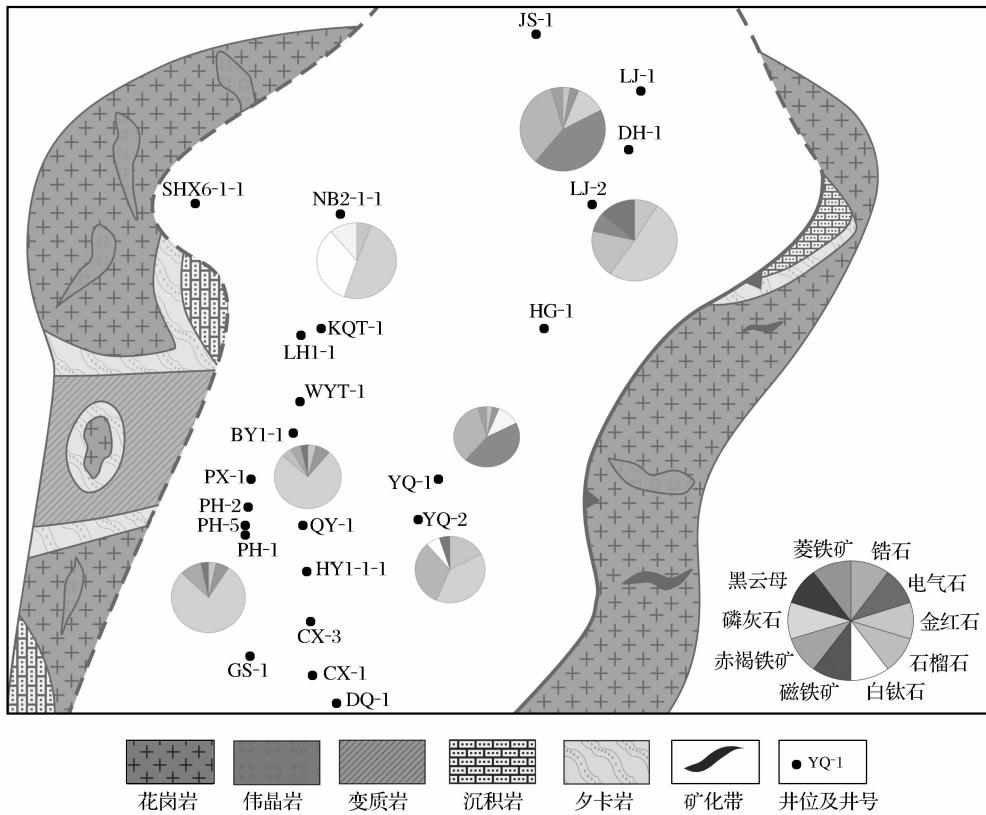


图 7 西湖凹陷物源区特征分析

参考文献:

[1] Fan Dejiang, Sun Xiaogong, Yang Zuosheng. A mathematical model on the quantitative provenance identification: Take the identification of the surface sediment sources from ECS as example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 30-33. [范德江, 孙效功, 杨作升. 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[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 30-33.]

[2] Yu Hua, Liu Zhenxia, Xiong Yingqian. Provenance study of core DGKS9617 in the East China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 651-657. [余华, 刘振夏, 熊应乾. 东海 DGKS9617 岩心物源研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 651-657.]

[3] Sadooni F N. Stratigraphic sequence, microfacies and petroleum prospects of the Yamama Formation, lower Cretaceous, southern Iraq[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(11): 1971-1988.

[4] Li Zhen, Jiao Yangquan, Liu Chunhua, et al. Source analysis of heavy mineral in Gaoliu area of Huanghua depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(6): 5-7. [李珍, 焦养泉, 刘春华, 等. 黄骅坳陷高柳地区重矿物物源分析[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 5-6.]

[5] Xu Tianwu, Wang Yingmin, Zeng Jianhui, et al. Sedimentary facies and provenance analysis of late Cretaceous Taizhou Formation in Gaoyou-Haian depression, north Jiangsu (Subei) basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 627-634. [徐田武, 王英民, 曾澍辉, 等. 苏北盆地高邮—海安地区晚白垩世泰州组沉积相及物源分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 627-634.]

[6] Zhang Fushun. Fan delta and braided delta sediments in Baiyinchagan depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(6): 553-556. [张福顺. 白音查干凹陷扇三角洲与辫状河三角洲沉积[J]. 地球学报, 2005, 26(6): 553-556.]

[7] Wu Fadong, Lu Yongchao, Ruan Xiaoyan. Application of heavy minerals cluster analysis to study of clastic sources and stratigraphic correlation[J]. Geoscience, 1996, 10(3): 397-403. [武法东, 陆永潮, 阮小燕. 重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用——以东海陆架盆地西湖凹陷平湖地区为例[J]. 现代地质, 1996, 10(3): 397-403.]

[8] Liu Jianjun, Chen Kaiyuan, Shi Zhongsheng, et al. Provenance characters of Paleogene in Xihu sag in East China Sea basin[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2003, (supplement): 241-242. [刘建军, 陈开远, 史忠生, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷下第三系物源分析[J]. 科技进步与对策, 2003, (增刊): 241-242.]

[9] Zhang Daofeng, Yang Wenjing, Qi Yaling, et al. Analysis of the material source of upper Paleozoic Shanxi Formation in Shenmu region of Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 902-906. [张道锋, 杨文敬, 漆亚玲, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区上古生界山西组物源分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 902-906.]

[10] Dickinson W R. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones[M]// Zuffa G. Provenance of Arenites. Dordrecht: D. Reidel, NATO-ASI, Series 1, 1985, 48: 333-361.

- [11] Li Zhong, Sun Shu, Li Renwei, *et al.* Mesozoic filling sequence and its indication to Dabieshan orogeny in Hefei basin[J]. Science in China: Series D, 2000, 30(3): 256-263. [李忠, 孙极, 李任伟, 等. 合肥盆地中生代充填序列及其对大别山造山作用的指示[J]. 中国科学: D辑, 2000, 30(3): 256-263.]
- [12] Liu Rui'e, Wei Xiaofeng, Wang Yali, *et al.* The geochemical characteristics of rare earth elements of the shale rock in the gologic signification of the analysis of the sedimentary provenance: An example in the upper Palaeozoic in the Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 788-791. [刘锐娥, 卫孝峰, 王亚丽, 等. 泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 788-791.]
- [13] Xie Xiaojun, Deng Hongwen. Controls of the transverse accommodation zones on the provenance system in Baxian sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 334-338. [谢晓军, 邓宏文. 冀中坳陷霸县凹陷横向调节带对物源体系的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 334-338.]
- [14] Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415. [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.]
- [15] Li Xiaolan. Discovery course of oil and gas in Xihu trough, the East China Sea shelf basin[J]. Offshore Oil, 2007, 27(2): 14-17. [李晓兰. 东海陆架盆地西湖凹陷油气发现历程回顾[J]. 海洋石油, 2007, 27(2): 14-17.]
- [16] Yan Wentao. Analysis of Sedimentary Facies on the Huagang Formation of the Oligocene in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 7-8. [颜文涛. 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统花港组沉积相分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 7-8.]
- [17] Xiao Jianxin, Sun Fenjin, He Naixiang, *et al.* Permian Shanxi Formation and Member 8 of Xiashihezi Formation in Ordos basin: Palaeogeography and catchment area for sediments derived from north and south provenances[J]. Journal of Palaeogeograph, 2008, 10(4): 341-354. [肖建新, 孙粉锦, 何乃祥, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系山西组及下石盒子组盒8段南北物源沉积汇水区与古地理[J]. 古地理学报, 2008, 10(4): 341-354.]
- [18] Wang Changyong, Zheng Rongcai, Wang Haihong, *et al.* Provenance analysis of Chang-6 oil reservoir set in Jiyuan region in Ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 52-58. [王昌勇, 郑荣才, 王海红, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长6油层组物源分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 52-58.]
- [19] Yang Shouye, Li Congxian. Research progress in ree trace for sediment source[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(2): 164-166. [杨守业, 李从先. REE示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 164-166.]
- [20] Byrne H, Kimk H. Rare earth element scavenging in sea water [J]. Geochim. Acta, 1990, 54(2): 645-656.
- [21] Allègre C J, Michard G. Introduction to Geochemistry: Geophysics and Astrophysics Monographs[M]. Kluwer: Academic Publishers, 1974.

Provenance Characteristics of Huagang Formation (Paleogene) in Xihu Sag, East China Sea

HAO Le-wei^{1,2}, LIU Chang³, WANG Qi^{1,2}, WANG Huan^{1,2},
MA Xiao-feng^{1,2}, TANG Jun^{1,2,4}, LIAO Peng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Biological Sciences and Biotechnology of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. School of Mathematics, Physics and Biological Engineering of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The Huagang Formation in Xihu sag is an important reservoir, of which the provenance has been the focus of debate at all times. The source branches are finely pictured according to the characteristics of debris composition and heavy mineral analysis combined with sand percent distribution map. The results show that the Huagang Formation provenance mainly originated from the western edge of Xihu sag and a little from the eastern Diaoyu islands fold belt. The provenance is specific divided into three branches: the western Haijiao uplift source, north-west Hupijiao uplift and east of the Diaoyu islands fold belt source which compensatively affect north area, and south-west Yushan uplift source affecting the central and southern area. The natures of the rocks around depression are speculated by analyzing debris type, feldspar features, microscopic characteristics of quartz grains and heavy minerals, rare earth elements and so on. The rocks around the Xihu sag are mainly magmatic rocks, secondly metamorphic rocks, and rarely sedimentary rocks. Metamorphic rocks are developed in the middle of Haijiao uplift affecting western Pinghu area. Only a few Sedimentary rocks exit in the northern part of the Diaoyu islands fold belt.

Key words: Provenance analysis; REE distribution pattern; Heavy mineral assemblage; Huagang Formation; Xihu sag.