

东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响

陈春峰^{1,2}, 钟楷³, 朱伟林¹, 徐东浩², 王军², 张伯成²

[1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 3. 中国海洋石油总公司, 北京 100025]

摘要:为确定东海陆架盆地丽水凹陷物源并寻找有利储层发育区,通过碎屑锆石 U-Pb 定年分析丽水凹陷东、西次洼的物源及源区性质,在此基础上探讨不同物源对砂岩储层物性的影响。经分析,丽水西次洼物源主要来自凹陷西部的闽浙隆起区,以火山岩为主,含少量侵入岩及变质岩;该物源形成的砂岩塑性物质含量较高、岩石抗压性相对较弱,由压实作用造成的孔隙损失量相对较大。丽水东次洼物源主要来自凹陷东部的渔山隆起区,以沉积岩、侵入岩为主要物源;该物源形成的砂岩塑性物质含量较低、岩石抗压性较强,由压实作用造成的孔隙损失量相对较小。研究表明,物源差异对储层物性有较大的影响。

关键词:U-Pb 定年;碎屑锆石;物源;储层物性;丽水凹陷;东海陆架盆地

中图分类号:TE112

文献标识码:A

Provenance of sediments and its effects on reservoir physical properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

Chen Chunfeng^{1,2}, Zhong Kai³, Zhu Weilin¹, Xu Donghao², Wang Jun², Zhang Bocheng²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China; 3. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100025, China)

Abstract: In order to determine the provenance of sediments and play fairways in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin, we analyzed and characterized the provenances of the sediments in the sub-sags in eastern and western Lishui Sag through detrital zircon U-Pb dating and discussed the influences of different provenances on the physical properties of sandstone reservoirs in the Sag. The results show that sediments in the west sub-sag were mostly sourced from Minzhe Uplift Zone in the western part of the Sag where volcanic rocks are predominant with some intrusive and metamorphic rocks. The sandstone formed by sediments sourced from this provenance has high plastic content and low resistance to compaction, thus porosity loss is relatively large during compaction processes. The sediments in the east sub-sag were mostly sourced from Yushan Uplift Zone in the eastern part of the Sag where sedimentary rocks and intrusive rocks are predominant. The sandstone formed by sediments sourced from this provenance has low plastic content and strong resistance to compaction, thus porosity loss is relatively small during compaction. It is suggested that the provenance differences indeed have certain impact upon the physical properties of the reservoirs in the Sag.

Key words: U-Pb dating, detrital zircon, provenance, reservoir physical property, Lishui Sag, China East Sea Shelf Basin

东海陆架盆地在近期已发现多个大型气田。丽水凹陷作为该盆地内一个主要潜力区,其油气勘探面临的主要问题是寻找优质储层。前人对丽水凹陷的储层研究发现,其内部东、西次洼的岩石物性差异大,但对造成这种差异的原因认识不清。

碎屑锆石 U-Pb 定年是沉积物源研究的重要手段之一^[1]。此方法的优势在于通过锆石微区定年,与

潜在源区岩层(体)进行时代对比来确定物源^[2-3]。在沉积环境相似条件下,物源性质的差异对储层物性有重要影响。相对于火山岩物源区而言,来自变质岩、侵入岩物源区的沉积物刚性颗粒含量更高、岩石抗压性强,岩石孔隙在深层保存得就会更好^[4-5]。因此,本文在分析丽水凹陷内部各区物源差异的基础上,分析物源性质差异对储层物性产生的影响,以预测丽水凹陷

收稿日期:2017-03-23;修订日期:2017-07-19。

第一作者简介:陈春峰(1972—),男,博士研究生,石油地质。E-mail:chenchf@cnooc.com.cn。

通讯作者简介:钟楷(1974—),男,高级工程师,石油地质。E-mail:zhk717@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05023-003)。

永康群的沉积^[9]。

渔山隆起分布面积最广的是福州凹陷侏罗系-白垩系的沉积岩和火山岩-沉积岩系,其次是隆起区与丽水凹陷东北部过渡区发育的火山岩及花岗岩,局部发育变质岩。福州凹陷发育中-下侏罗统福州组含煤碎屑岩、下白垩统渔山组河湖相砂泥岩及上白垩统闽江组河湖相沉积岩-火山碎屑岩系。其中,福州组主要为石英砂岩和长石石英砂岩;渔山组物源主要来自岩浆弧,砂岩为富火山岩岩屑的长石砂岩-岩屑长石砂岩;闽江组底部为含安山质玄武岩组分的砾岩,中部为砂、泥岩互层,上部为安山质玄武岩。本次研究在渔山隆起西缘 W2 井中的前新生代基底内火山岩中发现继承变质锆石,其年龄分别为 1 882 Ma 和 2 212 Ma;另外,在丽水凹陷中部的灵峰凸起钻遇黑云母角闪斜长片麻岩,其年龄为 1 806 Ma。

综合对比,丽水凹陷东、西部前新生代基底性质及年龄有较大的差异。西部的闽浙隆起物源以晚中生代 168~90 Ma 的火山岩和侵入岩为主,少量变质基底及中生代沉积物源;而渔山隆起则以中生代早侏罗世-晚白垩世的沉积岩和火山岩-沉积岩系为主,其次是花岗岩、火山岩及少量古老变质岩物源。

2.2 丽水凹陷碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

本次研究在丽水凹陷东、西次洼各选择一口井为代表,分析丽水凹陷沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征(图 2,图 3)。

2.2.1 东次洼碎屑锆石特征

丽水凹陷东次洼以其东部边缘的 WZ26-1 构造为代表(图 1)。在该构造 W1 井取到 3 个样品,分别取自月桂峰组(样品深度 3 708~3 720 m)、灵峰组下段(样品深度 3 465~3 481 m)及灵峰组上段(样品深度 3 036~3 051 m)。每个样质量为 2 kg,为灰白色细砂岩、粉砂岩。

W1 井的锆石颗粒细小,月桂峰组锆石晶体大小(粒径)为 0.03~0.15 mm,灵峰组下段锆石晶体大小为 0.06~0.20 mm,灵峰组上段锆石晶体大小为 0.03~0.12 mm;锆石主要为粉色、无色,少量玫瑰紫色。

该井月桂峰组样品共测得 60 颗锆石的年龄、Th/U 值和 CL(阴极发光)图像,年龄主要分布在 99.7~74 Ma(占总样品的 11.7%)、137~106 Ma(占 63.3%)和 204~183 Ma(占 11.7%)3 个区间(图 4c),此外还有少量锆石年龄大于 220 Ma。该井晚中生代锆石的 Th/U 值普遍偏高,最高达 2.2(图 2),均发育振荡环带,属于岩浆锆石(图 3a,c);年龄大于 220 Ma 的锆石 Th/U 值相对较低,且分布不一,CL 图像较暗,多为弱分带、面状分带,可见核边结构,属于变质锆石(图 3d)。

灵峰组下段样品共测试了 45 颗锆石的年龄、Th/U 值和 CL 图像,年龄主要分布在 139~86 Ma(图 4b),占总样品的 62%;其次为年龄 170~125 Ma 的锆石,占 26.7%;此外,还有两颗锆石的年龄在 400 Ma 左右(分别为 395 Ma 和 414 Ma),两颗在 230 Ma 左右(分别为

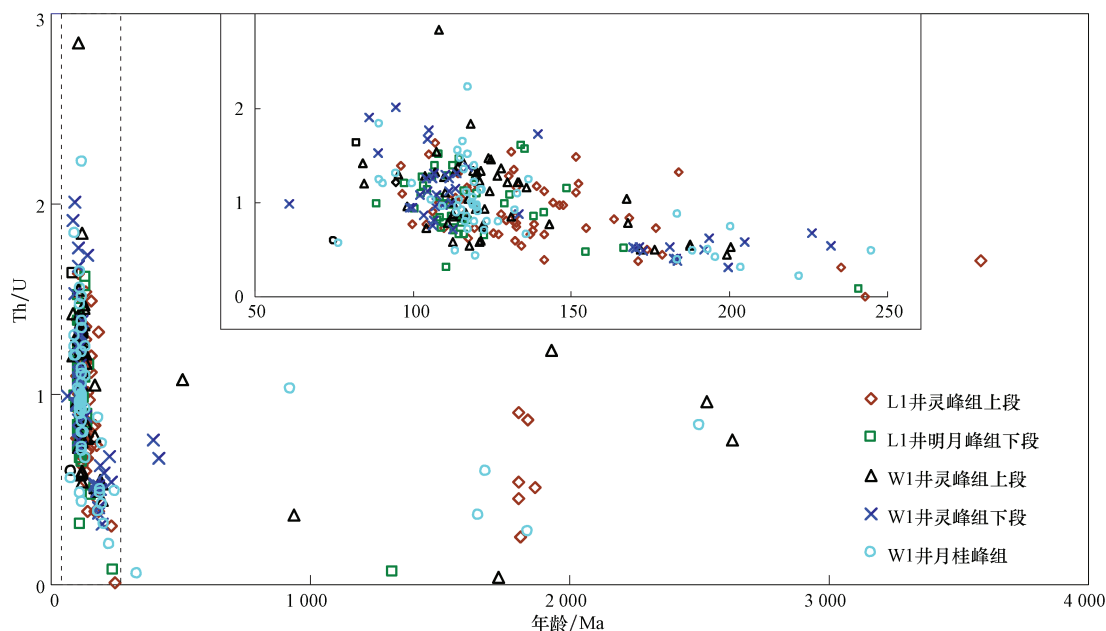


图2 丽水凹陷定年样品碎屑锆石 Th/U 值分布

Fig. 2 Distribution of Th/U ratios of detrital zircon in samples from Lishui Sag

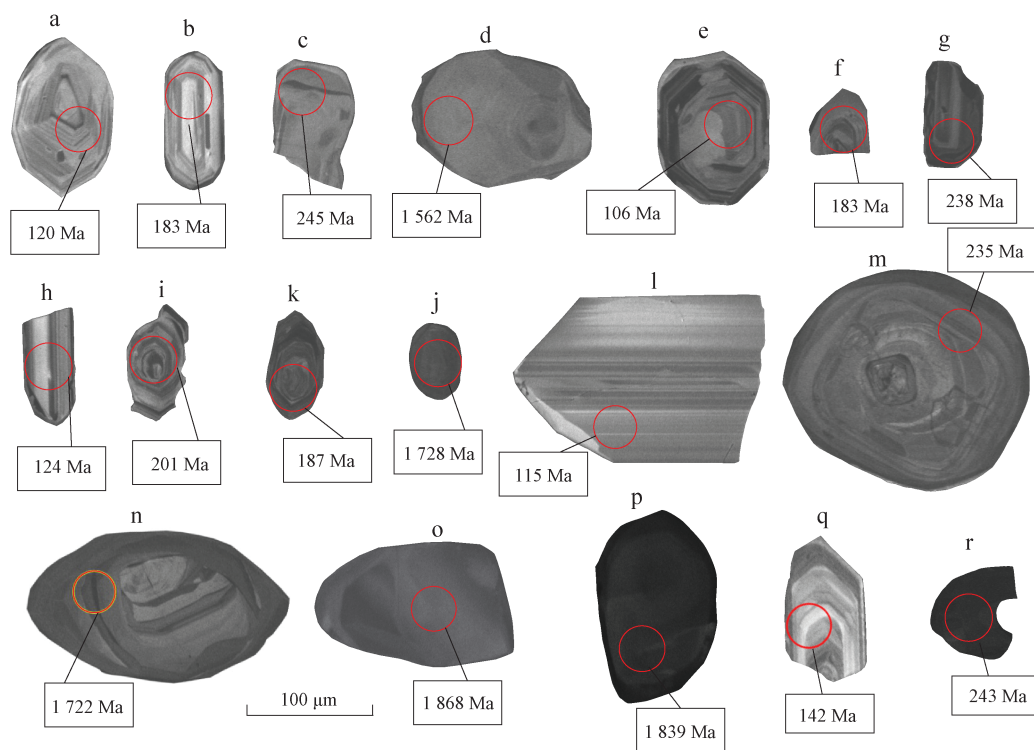


图3 丽水凹陷典型碎屑锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Typical cathodoluminescence images of detrital zircons from Lishui Sag

226 Ma 和 232 Ma), 一颗锆石年龄为 60.8 Ma。上述年龄 139 ~ 86 Ma 及两颗 400 Ma 左右的锆石 Th/U 值普遍大于 0.7, 年龄 170 ~ 125 Ma 的锆石 Th/U 值相对较低、集中在 0.5 左右(图 2), 它们均发育岩浆锆石振荡环带(图 3e, f), 表明其来源于火山岩; 而两颗年龄 230 Ma 左右的锆石 Th/U 值分别为 0.54 和 0.67, CL 图像较暗、弱分带, 推测可能为变质锆石(图 3g)。

灵峰组上段样品测得 59 颗锆石的年龄、Th/U 值和 CL 图像, 主要分布在两个年龄区间, 分别为 143 ~ 84 Ma(78.0%) 及 201 ~ 168 Ma(13.5%)(图 4a), 其余锆石年龄散布在 2 624 ~ 500 Ma。分布在上述两个主要年龄段的锆石 Th/U 值均较高, CL 图像显示内部振荡环带发育, 为典型的岩浆锆石(图 3h, k); 年龄大于 500 Ma 的锆石 Th/U 值差异很大, CL 图像很暗、无分带或弱分带(图 3j), 为变质锆石。

2.2.2 西次洼碎屑锆石特征

丽水西次洼以 LS36-1 构造资料较丰富。在该构造 L1 井取得 2 个样品, 分别来自灵峰组上段(样品深度为 2 682 ~ 2 727 m) 和明月峰组下段(样品深度为 2 575 ~ 2 585 m)。每个样品质量为 2 kg, 为灰白色细砂岩。

该井的碎屑锆石均以浅粉色为主, 少量为次圆粒状玫瑰色; 以自形-半自形柱状为主, 少量短柱粒状。

灵峰组上段浅粉色锆石晶体大小为 0.05 ~ 0.25 mm; 玫瑰色颗粒小, 约为 0.03 ~ 0.08 mm。明月峰组下段浅粉色锆石晶体大小以 0.03 ~ 0.15 mm 为主, 0.15 ~ 0.25 mm 次之, 个别达 0.35 mm; 玫瑰色颗粒较小, 约为 0.04 ~ 0.15 mm。

L1 井灵峰组上段样品共测得 66 颗碎屑锆石的年龄、Th/U 值和 CL 图像, 其中 86.3% 的锆石年龄分布在 184 ~ 94 Ma(图 4e), 峰值年龄主要为 140.8 Ma, 另两个峰值为 112.4 Ma 和 175 Ma, 锆石 Th/U 值高, 均大于 0.5(图 2), 振荡环带发育(图 3l), 为岩浆锆石; 其次有 9% 的锆石颗粒年龄分布在 1 920 ~ 1 645 Ma, 锆石 CL 图像暗、无分带、弱分带, 常见核结构(图 3n), 为变质锆石; 还有两颗年龄分别为 235 Ma 和 243 Ma 的锆石, 其 Th/U 值较低(图 2), CL 图像暗、无分带(图 3m), 为典型变质锆石。

L1 井明月峰组下段样品共测得 45 颗碎屑锆石的年龄、Th/U 值和 CL 图像。测年数据显示, 95% 为中生代锆石(图 4d), 均发育典型岩浆锆石震荡环带(图 3q); 其中, 69% 的锆石年龄近正态分布在 120 ~ 100 Ma、峰值为 110 Ma, 剩余 31% 散布在 95 ~ 85 Ma 及 155 ~ 120 Ma, 无明显峰值。两颗年龄较老的锆石, 其 Th/U 值小于 0.1(图 2), 年龄分别为 235 Ma 和 1 317 Ma, 前者粒状、面状分带(图 3r)、见窄变质亮边, 后者见残留核, 经历多期变质增生(图 3p), 均为典型变质锆石。

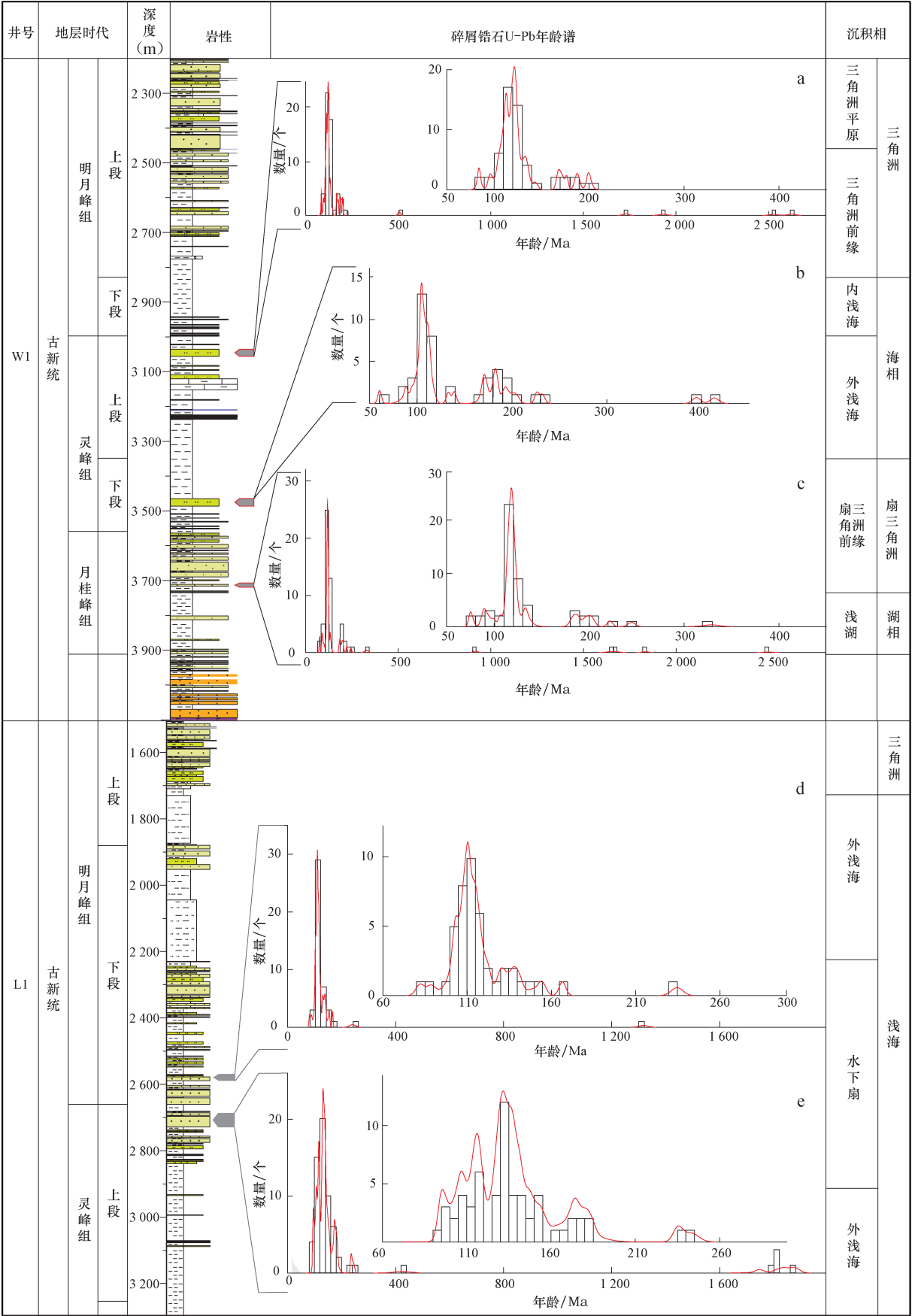


图 4 丽水凹陷碎屑锆石 U - Pb 年龄谱

Fig. 4 U-Pb age-spectra of detrital zircon in samples from Lishui Sag

2.3 物源分析

丽水凹陷东次洼的物源可能主要源于东部的渔山隆起区。丽水凹陷东次洼 W1 井月桂峰组—灵峰组上段物源无显著差异,以 125 ~ 74 Ma 的岩浆锆石为主,峰值年龄 120 ~ 100 Ma,部分 205 ~ 170 Ma 的岩浆锆石,少量 2 624 ~ 230 Ma 的变质锆石(图 4)。W1 井东北部、东部及东南部为渔山隆起区。渔山隆起发育大面积沉积岩和火山岩^[17],其中隆起上的福州凹陷广泛发育上白垩统闽江组火山碎屑岩系,其形成年龄与 W1 井中大量的 125 ~ 74 Ma 的岩浆锆石相对应。W1 井发现少量变质锆石年龄为 2 624 Ma 左右,与 W2 井中揭示的渔山隆起区前新生代基岩中的变质锆石年龄 1 882 Ma 和 2 212 Ma 也有一定对应关系。综合分析认为,东次洼 W1 井物源绝大部分应来自凹陷东部的渔山隆起。

丽水凹陷西次洼 L1 井的碎屑锆石峰值年龄为 140.8 Ma 和 110 Ma,同时见数颗 235,243 和 1 317 Ma 的变质锆石及 1 920 ~ 1 645 Ma 的变质锆石(占灵峰组上段样品的 9%)(图 4)。对比 L1 井与闽浙隆起区、渔山隆起区锆石类型及年龄峰值可以看出,L1 井中岩浆锆石峰值年龄为 140.8 Ma 和 110 Ma,对应于闽浙陆域方向的中生代中期形成的火山岩,而与渔山隆起区晚白垩世形成的火山岩年龄(99.6 ~ 65.5 Ma)相差较大。L1 井中的变质锆石可能源于闽浙隆起区的变质岩,其中 L1 井中年龄 230 Ma 左右的变质锆石可能来自芝溪头变质杂岩,灵峰组上段有一定含量的年龄 1 920 ~ 1 645 Ma 的变质锆石可能源于八都群变质岩。以上分析表明,丽水西次洼的物源主要来自凹陷西部的闽浙隆起区。

3 物源对储层物性的影响

3.1 丽水凹陷储层物性

丽水凹陷东、西次洼的储层物性存在明显差异。在 2 200 ~ 2 300 m 深井段,西次洼的 LS36-1 构造古新统上部明月峰组 A1 和 B1 砂层平均孔隙度分别为 16.5% 和 17.2%(表 1);而东次洼 WZ26-1 构造相同埋深、相同层位的 C1 和 C2 砂层平均孔隙度分别为 26.4% 和 23.2%。LS36-1 构造古新统中部灵峰组 B3 和 B4 砂层埋深为 2 700 ~ 2 900 m,测井平均孔隙度分别为 12.6% 和 9.8%;而 WZ26-1 构造古新统下部月桂峰组 C4 和 C5 砂层的埋深达 3 600 ~ 3 910 m,其砂岩实测孔隙度仍达到 11.1% ~ 11.3%。显然,在

相同埋深、相同层位东次洼 WZ26-1 构造的储层物性明显要比西次洼 LS36-1 构造储层物性好。

影响岩石物性有多种因素,包括沉积物源区条件、沉积条件及成岩作用等^[5,18-21]。物源区条件包括物源区性质、物源供应情况及沉积区与物源区距离等。在上述因素中,当物源性质差异较大时,物源性质的差异对储层物性会产生重要影响^[4-5]。

3.2 物源对物性的影响

Pittman 针对不同物源性质的岩石可压缩性进行了模拟实验^[4],建立了变质岩、玄武岩及页岩 3 种类型的塑性岩屑颗粒与石英颗粒所代表的刚性颗粒在不同的含量下(塑性物质含量分别为 25%,50% 和 75%)随深度变化时孔隙度的变化规律(图 5a,b)。结果显示,玄武岩岩屑的塑性最强(代表火山岩),页岩岩屑次之(代表沉积岩),变质岩岩屑的抗压缩性能最强。该试验表明,砂岩中塑性物质的类型和含量是影响压实作用发育的主控因素,而成岩作用中压实作用对碎屑岩储层物性影响最大^[22]。

为了尽量减少沉积条件对储层物性的干扰,本次研究挑选沉积条件相似的砂岩作为研究对象,即选择沉积水动力强、砂岩粒度较粗和杂基含量低的细砂岩、中砂岩、粗砂岩及含砾砂岩等样品进行研究。考虑到与岩石岩屑成分的分析点相对应,本次选取了 11 个样品点或砂岩发育段(表 1)进行物性与物源性质对应关系分析,其中 8 个砂岩段为测井解释孔隙度(测井解释孔隙度已经过井壁取心物性标定),3 个砂岩点为实测孔隙度。

3.2.1 西次洼岩屑类型对储层物性影响

在西次洼以 LS36-1 构造为代表进行分析。根据镜下观察结果,该构造砂岩中刚性颗粒主要是石英和长石;塑性物质主要包括岩屑及岩石中少量的杂基。在 L1 井,各砂层塑性物质总含量为 54.6% ~ 56.4%;其中,岩屑绝对含量为 50.6% ~ 54.6%,火成岩岩屑绝对含量为 49.6% ~ 53.6%,少量变质岩岩屑(表 1)。L2 井各砂层塑性物质总含量为 45.9% ~ 52.5%;其中,岩屑绝对含量为 43.8% ~ 49.2%,火成岩岩屑绝对含量为 42.8% ~ 48.2%,极少量变质岩岩屑(表 1)。总体上看,该构造塑性物质含量处于较高水平,约在 46% ~ 57%,且主要是火成岩岩屑。

砂岩储层原始的地面孔隙度一般在 40% 左右^[22]。由地面原始孔隙度 40% 减去砂层在某深度点的剩余粒间体积即为压实作用产生的孔隙度损失量(由测得

表 1 丽水凹陷岩石物源及物性参数数据

Table 1 Provenances and physical properties of sedimentary rocks in Lishui Sag

井号	层号	井段/m	层位	岩性	岩屑绝对含量/%	岩屑类型及含量/%	杂基含量/%	岩屑及杂基总量/%	孔隙度/%	胶结物总量/%	总粒间体积/%	次生孔隙/%	去次生作用粒间体积/%	压实用损失孔隙/%	胶结作用损失孔隙/%	孔隙总损失量/%	压实程度	白云石含量/%	高岭石含量/%	长石相对含量/%	影响因素
W1	C1	2 197 ~ 2 235	瓯江组	中砂岩	19.0	火成岩 18.6 燧石 0.4	3.4	22.4	26.4 (测井)	4.0	30.4	1.4	29.0	11.0	4.0	13.6	急剧压实早期	0	3.0	25.8	压实作用 溶解作用
	C2	2 490 ~ 2 515	明月峰组	中砂岩	12.4	火成岩 10.8 燧石 1.6	3.8	16.2	23.2 (测井)	2.4	25.6	2.0	23.6	16.4	2.4	16.8	急剧压实早期	0	0.4	20.4	压实作用 溶解作用
	C3	2 608 ~ 2 650	明月峰组	中砂岩	11.5	火成岩 10.6 燧石 0.9	5.3	16.1	17.0 (测井)	9.1	26.1	0.4	25.7	14.3	9.1	23.0	急剧压实早期	3.1	3.2	18.7	压实作用 早期胶结 溶解作用
	W1																				
I2	C4	3 636 ~ 3 660	月桂峰组	中-粗砂岩	23.4	沉积岩 3.4 变质岩 1.5 火成岩 16.1 燧石 2.4	11.7	35.1	11.1 (实测)	6.1	17.2	0.9	16.3	23.7	6.1	28.9	急剧实晚期	0	0.2	27.1	压实作用 胶结作用
	C5	3 897 ~ 3 910	月桂峰组	中-粗砂岩	10.7	火成岩 10.7	16.1	26.8	11.3 (测井)	7.1	18.4	0.2	18.4	21.8	7.1	28.7	急剧实晚期	0	6.1	19.6	压实作用 胶结作用 溶解作用
	B1	2 235.3 ~ 2 255.8	明月峰组	中-细砂岩	44.3	变质岩 1.1 为成岩 43.2	1.6	45.9	17.2 (实测)	6.1	23.3	0.8	22.5	17.5	6.1	22.8	急剧实早期	2.7	0	14.2	压实作用 早期胶结 溶解作用
	B2	2 600 ~ 2 679	明月峰组	中-细砂岩	47.0	变质岩 1.0 火成岩 46.0	2.8	49.8	13.6 (测井)	4.1	17.7	0	17.7	22.3	4.1	26.4	急剧实晚期	1.3	0	16.6	压实作用 胶结作用
I1	B3	2 704 ~ 2 819	灵峰组	中-细砂岩	43.8	变质岩 1.0 火成岩 42.8	3.2	46.9	12.6 (测井)	3.3	15.9	0	15.9	24.1	3.3	27.4	急剧实晚期	1.2	0	16.8	压实作用 胶结作用
	B4	2 819 ~ 2 900	灵峰组	中-细砂岩	49.2	变质岩 1.0 火成岩 48.2	3.3	52.5	9.8 (测井)	4.2	14.0	0.2	13.8	26.2	4.2	30.2	急剧实晚期	1.8	0	15.8	压实作用 胶结作用 溶解作用
	A1	2 250 ~ 2 301	明月峰组	中-细砂岩	50.6	变质岩 1.0 火成岩 49.6	4.0	54.6	16.5 (测井)	4.6	21.1	0	21.1	18.9	4.6	23.5	急剧实早期	2.3	0	7.8	压实作用 早期胶结
	A2	2 578 ~ 2 588.7	明月峰组	细砂岩	54.6	变质岩 1.0 火成岩 53.6	1.8	56.4	12.8 (实测)	5.2	18.0	0	18.0	22.0	5.2	27.2	急剧实晚期	2.0	0	13.3	压实作用 早期胶结

注:压实用孔隙总损失量=40%-(粒间体积-次生孔隙)。

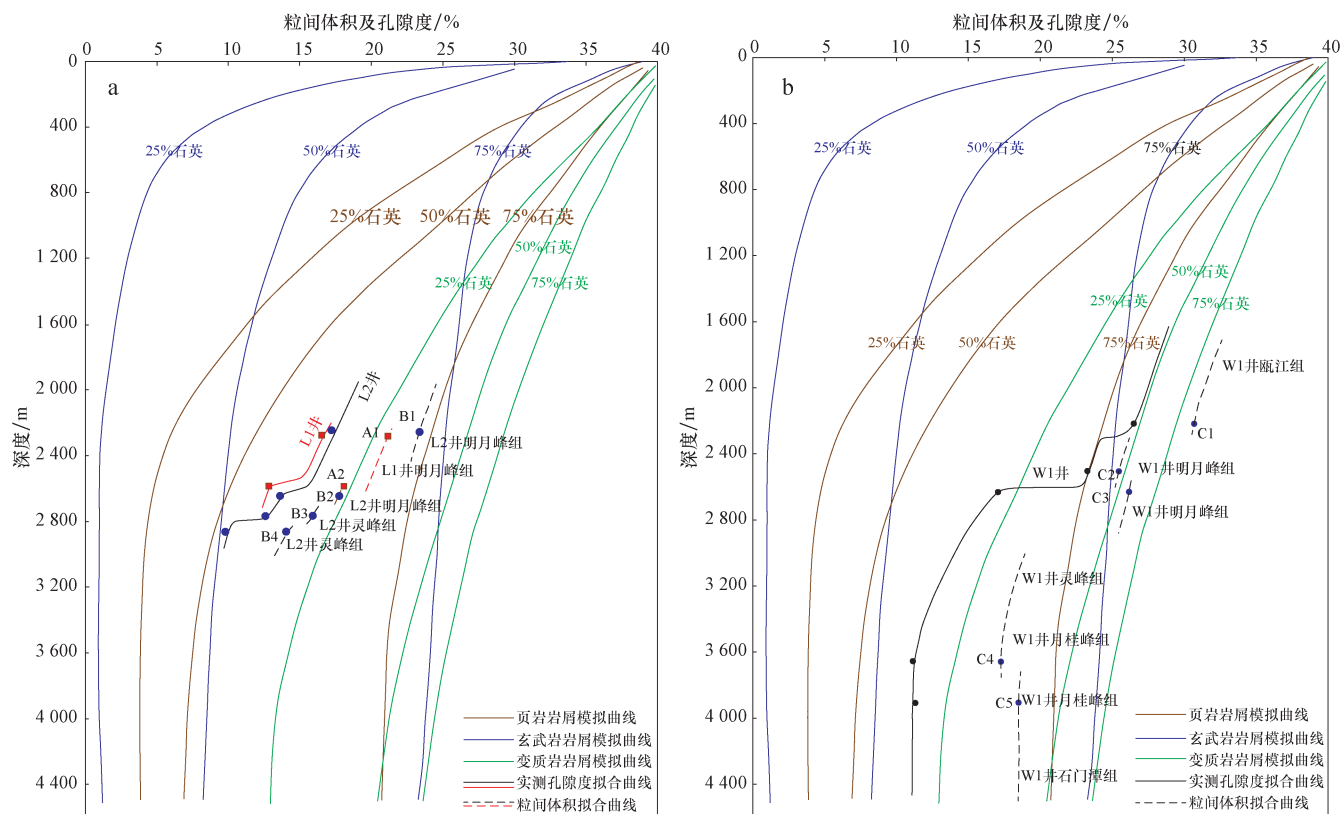


图5 丽水凹陷压实作用分析

Fig. 5 Compaction process of sandstones in Lishui Sag

a. 西次洼 LS36-1 构造; b. 东次洼 WZ26-1 构造

的岩石样品孔隙度加上胶结物所占据的体积可计算出岩石在某深度的总粒间体积,由于总粒间体积包括了溶蚀作用产生的粒间体积,因此总粒间体积减去次生孔隙即为去除次生孔隙影响由压实作用产生的剩余粒间体积^[23]。

据计算(表1),LS36-1构造A1和A2砂层由压实作用产生的孔隙度损失量分别为18.9%和22.0%;B1,B2,B3和B4砂层由压实作用产生的孔隙度损失量分别为17.5%,22.3%,24.1%和26.2%。

将LS36-1构造各砂层相应深度点的孔隙度值和去除次生孔隙影响的剩余粒间体积值投到Pittman模型图中(图5a中的点A1,A2,B1,B2,B3和B4)。L1井及L2井的塑性物质含量在44%~57%,以火山岩岩屑为主,极少量变质岩岩屑。L1井及L2井的A2,B2,B3和B4共4个点分布于玄武岩岩屑压实模型塑性物质含量27%~40%的趋势线附近,或者变质岩岩屑压实模型塑性物质含量60%~80%的趋势线附近。实际投点显示,该构造砂岩的抗压性比压实模型中的玄武岩岩屑和页岩岩屑的抗压性要强一些,但弱于模型中的变质岩岩屑。综合分析显示,该两口井的压实模型介于变质岩岩屑与玄武岩岩屑模型之间。因此,

我们参照这两个模型的趋势线划出各点的剩余粒间体积变化趋势线(图5a中的虚线段);同时,参照粒间体积变化趋势线作出孔隙度随深度变化趋势线。

对比LS36-1构造内部几个砂岩层,砂岩粒间孔隙与塑性物质含量呈反比,即在深度相近的情况下,砂岩塑性物质含量越高,砂岩的粒间体积越小。

3.2.2 东次洼岩屑类型对储层物性影响

东次洼以WZ26-1构造为例。该构造W1井5个砂层岩屑绝对含量为10.7%~23.4%。其中,火成岩岩屑含量最高,绝对含量为10.6%~18.6%;变质岩岩屑绝对含量为0~1.5%;另有极少量的沉积岩岩屑和燧石。岩屑加上杂基后,该井塑性物质总含量为16.1%~35.1%(表1)。

据分析,W1井C1—C5砂层的去次生作用后剩余粒间体积分别为29.0%,23.6%,25.7%,16.3%和18.4%;压实作用产生的孔隙度损失量分别为11.0%,16.4%,14.3%,23.7%和21.8%。

C1—C5砂层的塑性物质总含量在16%~35%。将各砂层的孔隙度值和剩余粒间体积值投到Pittman模型图中,从实际投点的位置来看(图5b中的点C1,

C2, C3, C4 和 C5), 5 个点均分布于页岩岩屑压实模型塑性物质含量 15% ~ 32% 的趋势线附近, 表明该构造的岩屑抗压能力弱于变质岩岩屑而强于火成岩岩屑。因此, 参照页岩岩屑压实趋势线划出各点的粒间体积变化趋势线及孔隙度随深度变化趋势线。从几个砂岩层对比来看, 砂岩粒间体积、孔隙度与其塑性物质含量呈反比关系, 如 C4 砂层塑性物质含量比 C5 砂层高, 其粒间体积及孔隙度明显比 C5 砂层要小一些。

3.2.3 物源性质差异对压实作用影响

对比分析显示, 以火山岩为主要物源的西次洼 LS36-1 构造容易形成较高的塑性物质总含量, 达到 44% ~ 57%, 该构造砂岩在 2 300 ~ 2 900 m 埋深由压实作用产生的孔隙度损失量达 17.5% ~ 26.2%; 而以沉积岩和侵入岩为主要物源的东次洼 WZ26-1 构造的塑性物质总含量较低, 在 16% ~ 35%, 该构造在 2 250 ~ 3 100 m 埋深由压实作用产生的孔隙度损失量为 11.0% ~ 16.4%。在相同埋深下 (2 250 ~ 3 100 m), 由压实作用造成 WZ26-1 构造储层孔隙度比 LS36-1 构造高约 7.2% ~ 8.7% (已去除次生孔隙影响)。对比两构造的塑性物质总含量、岩屑类型与压实作用造成的孔隙度损失情况, 可以发现物源的差异首先表现在塑性物质含量及类型的差异上, 而塑性物质含量及类型的差异进而形成压实作用程度差异及储层物性差异。

3.3 其他因素对物性的影响

成岩中的胶结作用会降低储层的孔隙度^[23]。西次洼 LS36-1 构造和东次洼 WZ26-1 构造砂岩的中、后期胶结作用发育程度一般。其中, LS36-1 构造砂岩胶结物总量为 3.3% ~ 6.1%; WZ26-1 构造胶结物含量稍高, 在 2.4% ~ 9.1%。总体上, 两构造的胶结物含量差异不大。

溶解作用对物性的影响是使储层孔隙度增加。本区明月峰组和瓯江组地层中的煤层和月桂峰组烃源岩发育, 煤层和烃源岩产生的有机酸为溶蚀孔的形成提供了条件^[24-26], 东次洼 WZ26-1 构造的 W1 井薄片可观察到由溶蚀作用产生的次生孔隙, 面孔率平均值约为 0.2% ~ 3.0%; 相对而言, 西次洼 LS36-1 构造的溶蚀作用不是很发育, 次生孔隙发育程度弱, 面孔率仅为 0 ~ 0.8%。

4 结论

1) 丽水凹陷西次洼 LS36-1 构造的物源是来自西部闽浙隆起带的火山岩、侵入岩及少量变质岩, 以火

山岩为主要物源。以火山岩为主的物源形成该构造塑性物质含量较高, 岩石抗压性相对较弱, 由压实作用造成的孔隙损失量相对较大。

2) 丽水东次洼 WZ26-1 构造的物源主要来自东部的渔山隆起, 是以沉积岩和侵入岩为主要物源, 形成该构造塑性物质含量相对较低, 岩石抗压性较强, 由压实作用造成的孔隙损失量相对较小。

3) 两构造储层物性具有较大的差异, 造成物性差异的直接原因是两构造在砂岩塑性物质含量上的差异, 而造成塑性物质含量及类型差异的原因是物源性差异。预测在丽水凹陷以东渔山隆起为物源区形成的岩石物性好于以西部闽浙隆起带为物源区的岩石物性。

参 考 文 献

- [1] Link P K, Fanning C M, Beranek L P. Reliability and longitudinal change of detrital-zircon age spectra in the Snake River system, Idaho and Wyoming: An example of reproducing the bumpy barcode [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 182(1): 101-142.
- [2] Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 277-303.
- [3] 李瑞磊, 朱建峰, 刘玮, 等. 松辽盆地长岭断陷火山岩锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 736-744.
Li Ruilei, Zhu Jianfeng, Liu Wei, et al. Zircon U-Pb dating of volcanic rocks of Changling Fault Depression in the southern Songliao Basin and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 736-744.
- [4] Pittman E D, Larese R E. Compaction of lithic sands: Experimental results and applications [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(8): 1279-1299.
- [5] 王洪建, 吴小斌, 孙卫, 等. 陇东地区延长组长 3、长 4 + 5 储层物源及其对储层物性的影响 [J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1): 38-43.
Wang Hongjian, Wu Xiaobin, Sun Wei, et al. Provenance of Member 3 and Member 4 + 5 in Yanchang Formation of Longdong area in Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30(1): 38-43.
- [6] 冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征 [J]. *中国海上油气 (地质)*, 2003, 17(1): 33-37.
Feng Xiaojie, Cai Dongsheng, Wang Chunxiu, et al. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution in East China Sea shelf basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(1): 33-37.
- [7] 田兵, 李小燕, 庞国印, 等. 叠合断陷盆地沉积体系分析——以东海丽水-椒江凹陷为例 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(4): 696-705.
Tian Bing, Li Xiaoyan, Pang Guoyin, et al. Sedimentary systems of the superimposed rift-subsidence basin: Taking Lishui-Jiajiang sag of the East China Sea as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(4): 696-705.

- [8] 陈国俊,李超,梁建设,等. 东海陆架盆地瓊江凹陷明月峰组沉积相及沉积特征分析[J]. 天然气地球科学,2011,22(5):760-769.
Chen Guojun, Li Chao, Liang Jianshe, et al. Sedimentary facies of Mingyuefeng Formation in Oujiang sag, East China Sea basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5):760-769.
- [9] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989:131-451.
Zhejiang Geological Minerals Bureau. Regional geology of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:131-451.
- [10] 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1985:134-418.
Fujian Geological Minerals Bureau. Regional geology of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985:134-418.
- [11] Guo F, Fan W, Li C, et al. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces [J]. Lithos, 2012, 150:62-84.
- [12] Li J, Zhang Y, Dong S, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 134:98-136.
- [13] 赵磊. 浙西南八都群早前寒武纪变质演化与年代学研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2012.
Zhao Lei. Study on the Early Precambrian metamorphic evolution and geochronology of the Badu Group in southwestern Zhejiang province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- [14] 向华,张利,周汉文,等. 浙西南变质基底基性-超基性变质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究: 华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2008, 38(4): 401-413.
Xiang Hua, Zhang Li, Zhou Hanwen, et al. U-Pb zircon geochronology and Hf isotope study of metamorphosed basic-ultrabasic rocks from metamorphic basement in southwestern Zhejiang: The response of the Cathaysia Block to Indosinian orogenic event[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(4):401-413.
- [15] Wan Y, Liu D, Xu M, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units[J]. Gondwana Research, 2007, 12(1):166-183.
- [16] 胡艳华,顾明光,徐岩,等. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(11):1661-1670.
Hu Yanhua, Gu Mingguang, Xu Yan, et al. The confirmation of the age of Caledonian Chencai Group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(11):1661-1670.
- [17] 王长势,朱伟林,陈春峰,等. 东海丽水-椒江新生代凹陷基底的岩性及分布[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 636-644.
Wang Changshi, Zhu Weilin, Chen Chunfeng, et al. Basement lithology and distribution of Lishui-Jiajiang Cenozoic Sag in East China Sea [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(4):636-644.
- [18] 贺静,冯胜斌,黄静,等. 物源对鄂尔多斯盆地中部延长组长 6 砂岩孔隙发育的控制作用[J]. 沉积学报, 2011, 29(1):80-87.
He Jing, Feng Shengbin, Huang Jing, et al. Effects of provenance on porosity development of Chang 6 sandstone of the Yanchang Formation in the center of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1):80-87.
- [19] 王多云,郑希民,李凤杰,等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2):87-91.
Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, et al. Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2):87-91.
- [20] 张兴良,田景春,王峰,等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价——以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒 8 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2):212-217.
Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: A case from the 8th Member of Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao region, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):212-217.
- [21] 秦伟军,李娜,付兆辉. 高邮凹陷深层系有效储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5):788-792.
Qin Weijun, Li Na, Fu Zhaohui. Factors controlling formation of effective reservoirs in deep of the Gaoyou Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5):788-792.
- [22] 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2001:125-137.
Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001:125-137.
- [23] 李继岩. 渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境时空演化及成岩孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1):90-97.
Li Jiyan. Temporal spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1):90-97.
- [24] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2002:87-98.
Yu Xinghe. Petroleum reservoir sedimentology of clastic rocks [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:87-98.
- [25] 张永旺,曾澍辉,曲正阳,等. 东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1):73-79.
Zhang Yongwang, Zeng Jianhui, Qu Zhengyang, et al. Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in sandstone reservoirs of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1):73-79.
- [26] 周翔,何生,陈召佑,等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组 8 段低孔渗砂岩成岩作用及成岩相 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2):155-164.
Zhou Xiang, He Sheng, Chen Zhaoyou, et al. Diagenesis and diagenetic facies of low porosity and permeability sandstone in Member 8 of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin. [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):155-164.