

差异源储结构下储层发育机制及其对油气富集的影响 ——以鄂尔多斯盆地庆城地区长 7_{1-2} 段为例

姚东升^{1,2}, 陈冬霞^{1,2}, 李莎^{1,2}, 成铭^{1,2}, 王福伟^{1,2}, 马勇^{1,2}, 鲜本忠^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要:鄂尔多斯盆地长 7_{1-2} 段储层非均质性强及其差异形成机制认识不清成为制约油气富集的关键问题。结合测井、录井、岩心观察和高压压汞、X全岩衍射等分析测试,并以砂地比和砂-泥单层厚度为标准将研究区长 7_{1-2} 段划分出储夹源型、源储互层型和源夹储型等3类9种源储结构。结果表明:储夹源型中储层的物性普遍更好,表现出原生粒间孔和次生孔隙较多、分选性好和排替压力低的特征;源夹储型中储层的物性较差,表现为孔隙含量较少且排替压力大;而源储互层型中储层质量则介于两者之间。储层差异的形成受洪水型重力流沉积、胶结作用和近源有机酸溶蚀的控制。在强水动力洪水型重力流下形成的湖底扇、水道、席状砂中发育较多厚层(>5 m)的源储结构储层,因分选性好和刚性颗粒多而具有较强抗压实能力,从而保留了更多的原生孔隙。反之,半深湖、深湖中发育较多薄层的(<2 m)的源储结构储层,因岩石成分中塑性颗粒较多且分选差,导致在压实作用下原生孔隙大量减少。研究区的胶结作用主要是钙质、硅质、泥质胶结3种类型,储夹源型中储层因钙质、泥质等胶结物含量较少,绿泥石含量较多且以薄膜形态覆盖在岩石颗粒表面,抑制了硅质胶结,从而胶结程度较低,使储层中原生孔隙保存较好;而钙质等胶结物含量较多的源夹储型中的储层则表现出较强的胶结作用,使原生孔隙破坏严重。近源有机酸对孔隙的发育有着建设性的作用,其中岩石粒度较大的厚层的储层可提供有利溶蚀通道而形成较多次生孔隙;极细粒砂岩发育较多的薄层的储层通常阻碍溶蚀作用,导致次生孔隙不易形成。最终通过油井数占比和含油饱和度分析表明,储夹源型、源储互层型和源夹储型中的储层的含油性依次降低,对应的二级源储结构下的储层中厚储夹中源型、厚源厚储互层型和厚储夹薄源型的储层含油性最好。

关键词:源储结构;储层差异;成因机制;鄂尔多斯盆地;延长组 7_{1-2} 段

中图分类号: P 618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2024)02-0346-18

Reservoir development mechanism and its influence on oil and gas under differential source and reservoir structure: A case study from Chang 7_{1-2} tight sandstone of Qingcheng area, Ordos Basin

YAO Dongsheng^{1,2}, CHEN Dongxia^{1,2}, LI Sha^{1,2}, CHENG Ming^{1,2},
WANG Fuwei^{1,2}, MA Yong^{1,2}, XIAN Benzong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-08-01 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20230190

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-02-01-03)

通信作者: 陈冬霞(1974—),女,四川省隆昌市人,教授,博士生导师,工学博士,从事油气成藏机理与勘探开发方面的研究。

E-mail: lindachen@cup.edu.cn Tel: 13581885298

引用格式: 姚东升, 陈冬霞, 李莎, 等. 差异源储结构下储层发育机制及其对油气富集的影响: 以鄂尔多斯盆地庆城地区长 7_{1-2} 段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 346-363.

YAO Dongsheng, CHEN Dongxia, LI Sha, et al. Reservoir development mechanism and its influence on oil and gas under differential source and reservoir structure: A case study from Chang 7_{1-2} tight sandstone of Qingcheng area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 346-363.

Abstract: The strong reservoir heterogeneity and unclear understanding of formation mechanism of Chang7₁₋₂ member in Ordos Basin is a key issue that constrains hydrocarbon enrichment. Based on the logging, core observation, high pressure mercury injection, X diffraction analysis and other analysis tests, and further combined with sandstone percentage and sand-mud single layer thickness as the standard, the Chang 7₁₋₂ member of the study area was divided into three categories and corresponding nine sub-types of source-reservoir structures, including reservoir sandwiching source type, source sandwiching reservoir type and source-reservoir interbedding type. The results show that the reservoir in the reservoir sandwiching source type is generally better in physical property, showing more primary intergranular pores and secondary pores, good sorting and low displacement pressure. The physical properties of source sandwiching reservoir are poor, which are characterized by less pore content and large displacement pressure. The reservoir quality of source-reservoir interbedding is between the two source-reservoir structures mentioned above. The formation of reservoir differences is controlled by flood gravity flow deposition, cementation and near-source organic acid dissolution. The source-reservoir structure reservoir with more thick layers (>5 m) developed in the subacustrine fan, channel and sheet sand formed by strong hydrodynamic flood gravity flow has stronger anti-compaction ability due to good sorting and more rigid particles, thus retaining more primary pores. On the contrary, the source-reservoir structure reservoirs with more thin layers (<2 m) in semi-deep lakes and deep lakes, due to the large number of plastic particles in the rock composition and poor sorting, leads to a large reduction of primary pores under the action of compaction. The cementation in the study area is mainly composed of calcareous, siliceous and argillaceous cements. In the reservoir sandwiching source type, the content of calcareous and argillaceous cements is less, and chlorite is more in the form of thin film covering the surface of rock particles, which inhibits siliceous cementation, resulting in a lower degree of cementation and better preservation of primary pores in the reservoir. However, the reservoir with more calcium and other cement content in the source sandwiching reservoir type shows strong cementation, which leads to serious destruction of primary pores. Near-source organic acids play a constructive role in the development of pores, and the thick reservoir with large rock grain size can provide favorable dissolution channels and form more secondary pores. The thin layer reservoir with more development of very fine grained sandstone usually hinders dissolution and makes it difficult to form secondary pores. Finally, through the analysis of the oil-show well ratio and the oil saturation, it is shown that the oil content of the reservoir sandwiching source type, the source-reservoir interbedding type and the source sandwiching reservoir type decreases successively. Meanwhile, the oil content of the reservoir in the corresponding sub-types shows that thick reservoir sandwiching medium-thickness source, thick source thick reservoir interbedding, thick reservoir sandwiching thin source is the best.

Key words: source-reservoir structure; reservoir difference; genetic mechanism; Ordos Basin; Chang7₁₋₂ member of Yanchang Formation

致密砂岩油的勘探开发是全国非常规油气研究的热点领域,继北美通过开发致密砂岩油使原油产量显著提高后,中国陆续在鄂尔多斯盆地^[1]、准噶尔盆地^[2-3]、松辽盆地^[4]、渤海湾盆地^[5]烃源岩层系内取得了致密砂岩油资源的重大进展。鄂尔多斯盆地作为陆相致密油增储上产的主体之一^[6-7],致密砂岩油地质资源量巨大,其油气的主要富集层位于湖盆中部的延长组长7段^[8],初步评价长7段致密砂岩

油规模储量约为 $(30\sim 50)\times 10^8$ t,远景资源量约为 100×10^8 t^[9],是10亿t大油区的重点研究层位。

鄂尔多斯盆地长7段在湖进湖退的背景下,致密砂岩油近距离运聚成藏,烃源岩和储层大面积叠置共生,彼此接触或紧邻^[10],本文将源储这种空间上的组合关系称为“源储结构”,内部的储层称为“源储结构储层”。由于源储结构中具有自生自储、近源充注的有利条件^[11],同时烃源岩和储层非均质性

强^[12],使得源储结构的系统划分对于致密砂岩油的研究有重大意义.前人对源储结构已经进行了部分研究,如文献[13]依据源储组合方式及连续砂体厚度等,划分出多期叠置砂岩发育型、页岩夹薄层砂岩型和纯页岩型 3 类源储结构,其他学者也依据砂地比、源岩生油强度、沉积类型等提出了其他源储结构划分方案^[14-16],但他们研究的重点多侧重于源储的配置关系、致密砂岩油的充注动力、源岩生烃能力等方面^[17-19],而储层作为致密砂岩油最重要的聚集场所,仍缺乏进一步的系统研究.

庆城地区地层连续性差且岩性变化频繁,延长组长 7 段不同源储结构中的储层表现出更强的非均质性^[20],在研究区不同沉积相和不同位置中,储层的厚度、岩石粒径、成岩作用等均存在差异,源储结构中储层之间的差异性影响着致密砂岩油的聚集位置和分布格局^[21-23],阐明其差异形成机制是认识储层非均质性的重点研究方向,但不同源

储结构下储层差异性特征并不明确,影响储层差异性的机制认识不清,制约着对源储结构储层控藏理论的认识和油气差异性分布的研究.本文在测井、录井资料的基础上,结合岩心观察和高压压汞、X 全岩衍射等分析测试,以砂体更为发育的长 7₁亚段和长 7₂亚段作为研究目标,对源储结构中的储层进行精细刻画,分析其差异性形成机制,研究不同源储结构下储层对含油性的控制作用,为预测致密砂岩油分布提供理论依据.

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,是一个多旋回的叠合含油气盆地,可划分出西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起及渭北隆起 6 个二级构造单元^[24].庆城地区位于鄂尔多斯盆地次级构造单元伊陕斜坡西南部,北起三十里铺,南至合水,西抵驿马,东达安置农场(图 1).

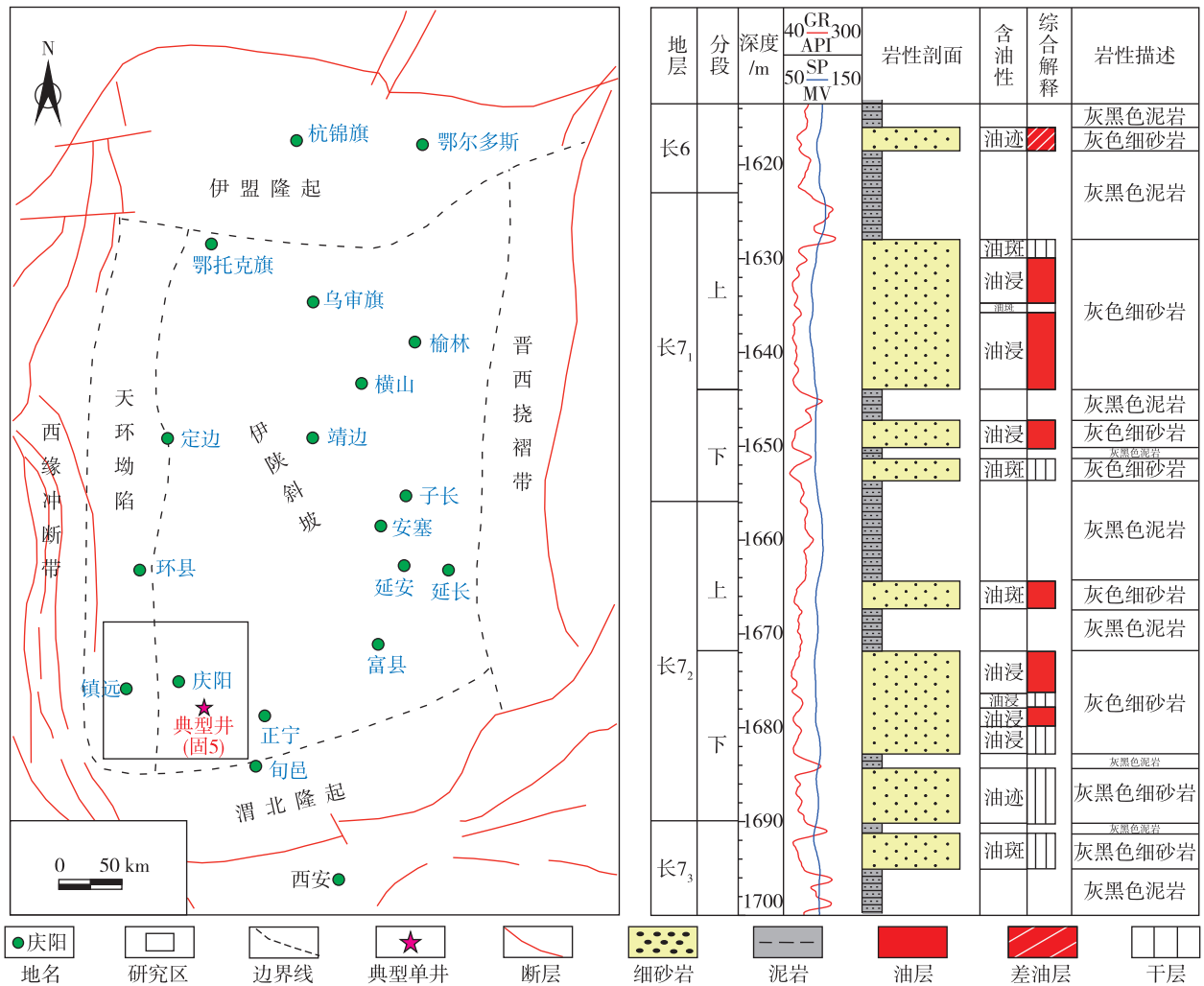


图 1 研究区地理位置及地质特征
Fig. 1 Geographical location and geological characteristics of the study area

盆地周缘区域构造较活跃,受西南方向强烈挤压和东北方向垂向隆升的影响,发生了南北不平衡、不对称的快速拗陷过程,湖盆的基底呈“南陡北缓”的展布格局^[25].长 7 段沉积期是湖盆最大的扩张期,湖水深、水域广,形成了面积达 6.5 × 10⁴ km²的半深湖-深湖区,沉积了一套以暗色泥岩、黑色页岩为主的生油岩系,与长 7 段湖退过程中形成的砂体叠置接触.

长 7 段中的长 7₂亚段和长 7₁亚段是本次研究的重点层段,主要以半深湖-深湖沉积为主,周围的水系不断将沉积物向湖盆搬运,长 7₃时期为湖侵作用最强时期.长 7₂时期湖水面积减小,浊积体规模较长 7₃明显扩大,到长 7₁时期湖侵作用进一步减弱,浊积体规模达到最大^[26].受重力流沉积作用,建造了一套以砂质碎屑流为主的沉积砂体,是

油气富集的主要场所^[27].广覆式分布的泥页岩与大面积粉-细砂岩紧密接触或互层共生,源储配置好,油气近源高压充注,勘探潜力巨大^[28-29].

2 源储结构类型划分

划分不同源储结构是研究储层差异及油气分布的基础.前人虽然已经提出依据沉积类型、砂地比、源岩特征等进行源储结构划分的方案,但仅表征了源储接触关系及岩性组合,并且侧重于油气充注的方面,缺乏对于储层纵向组合及非均质性的基础^[30-31].针对不同层段砂体厚度、物性的特征,对研究区 353 口井单层砂-泥岩厚度统计分析后,首先以砂地比(40%,60%)为依据,划分出储夹源型、源储互层型和源夹储型 3 类储层(图 2).

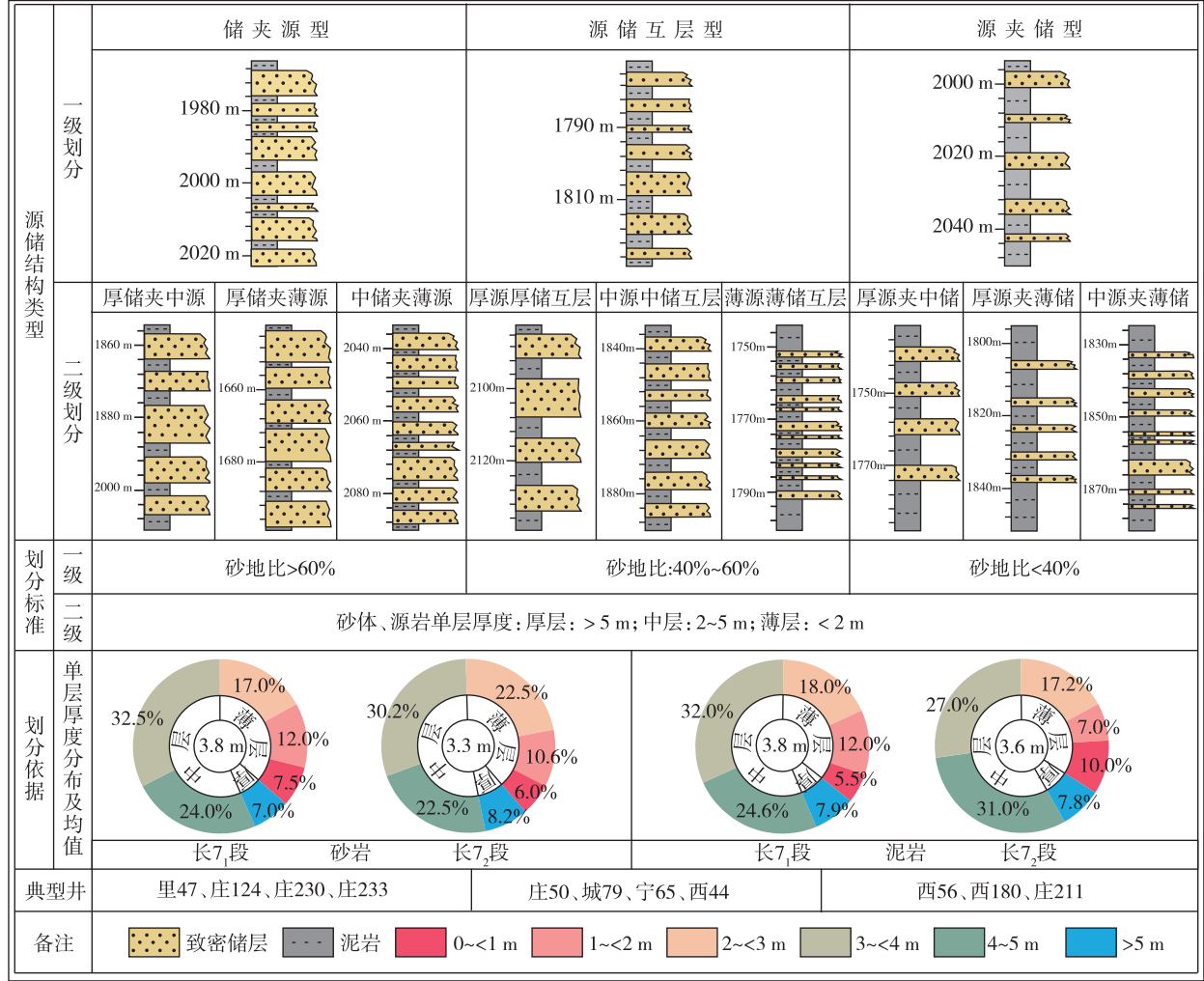


图 2 庆城地区区长 7₁₋₂段源储结构储层类型划分
Fig. 2 Reservoir type division of source reservoir structure of Chang 7₁₋₂ member in Qingcheng area

不同类型储层在物性、含油性上表现出明显的差异.但在重力流、三角洲沉积作用下,砂体的类型与规模差异性增大^[32],同类的源储结构储层的物性

和孔隙结构仍表现出不同的特征.因此,本文进一步根据沉积旋回等将长 7₁、长 7₂段划分出长 7₁上、长 7₁下、长 7₂上和长 7₂下这 4 个亚段,并以砂-泥岩单

层厚度作为依据,对研究区源储结构储层进行二级精细划分.统计结果显示,砂岩和泥岩单层厚度分布类似,砂-泥单层厚度平均为 3.6 m,在 4 个亚段中单层厚度为 0~<2 m 的砂泥层平均占比为 52.7%,2~5 m 砂泥层平均占比为 39.1%,>5 m 砂泥层占比平均 8.2%.比较不同砂泥岩单层厚度的分布及物性等特征后,以 2 m 和 5 m 作为二级划分的界限,进一步将烃源岩和储层划分出薄层(<2 m)、中层(2~5 m)和厚层(>5 m)3 种类型.源储结构储层的命名上,遵循一级命名优先级高于二级命名的原则,即二级命名在一级命名的前面,如“厚源夹厚储型储层”.综合以上划分标准和依据,最终将长 7₁₋₂ 这 4 个亚段划分出储夹源型、源储互层型和源夹储型 3 类一级源储结构储层,以及在此基础上划分的 9 种二级源储结构储层(图 2).

3 源储结构储层差异特征

3.1 储层物性差异

在对庆城地区进行录井资料、高压压汞及 73 块铸体薄片分析后,延长组长 7₁₋₂ 段储层整体表现

为低孔、特低渗的特征.其中,储夹源型储层(砂地比>60%)物性最好,砂体多连片分布且单层厚度普遍较厚,平均孔隙度为 8.7%,平均渗透率为 0.13 mD,所对应的二级源储结构储层中,厚储夹中源型储层物性最好,主要孔隙度(介于 25%~75%之间)分布在 5.7%~9.4%,最大孔隙度可达 12.6%(图 3a).源储互层型储层砂地比介于 40%~60%之间,平均孔隙度为 8.2%,平均渗透率为 0.10 mD,所对应二级源储结构中,厚源厚储互层型储层物性最好,主要孔隙度分布在 5.6%~9.3%,薄源薄储型物性较差,主要孔隙度分布在 4.8%~7.9%.源夹储型储层整体物性较差,平均孔隙度为 6.8%,平均渗透率为 0.06 mD,所对应的二级源储结构中,中源夹薄储型储层物性明显低于其他储层,孔隙度主要分布在 2.4%~4.5%.

结合典型单井中不同源储结构储层中物性的差异,观察到以储夹源型储层为主的单井,储层物性相对较高,单层厚度相对较大,如庄 230 井长 7₁₋₂ 段均为储夹源型,平均孔隙度为 8.5%,平均渗透率为 0.1 mD(图 3b).

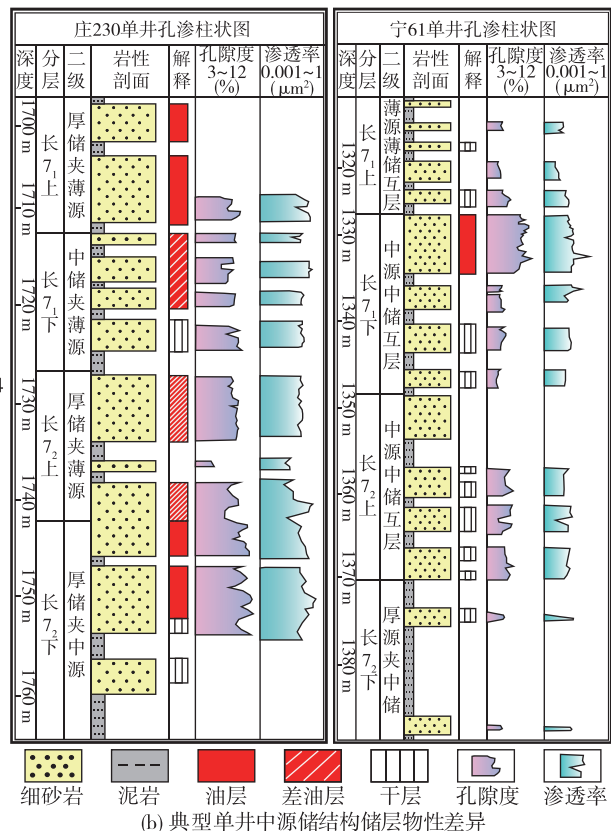
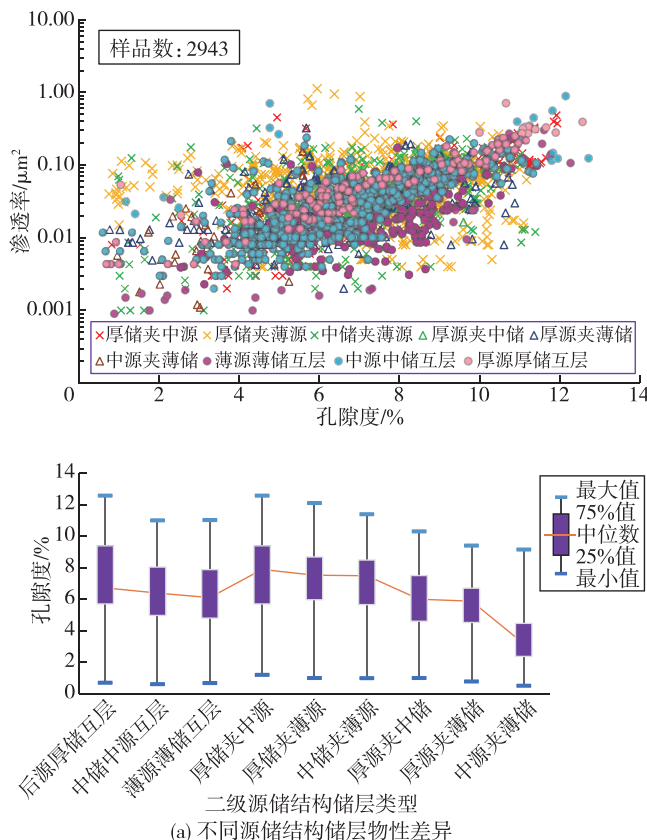


图 3 庆城地区长 7₁₋₂ 段二级源储结构储层物性差异

Fig. 3 Reservoir physical property difference of secondary source reservoir structure of Chang 7₁₋₂ member in Qingcheng area

在单井中观察到的源储互层型的储层物性非均质性较强,孔隙度极差为 12.11%,渗透率极差

为 3.30 mD,厚层的储层物性高于薄层的储层.单井中源夹储型储层的物性普遍偏低,如宁 61 井长

7₂下段源夹储型储层平均孔隙度为 5.1%，平均渗透率为 0.04 mD。综合以上分析，储层物性由好到差依次为：储夹源型、源储互层型、源夹储型储层；二级源储结构中厚储夹中源型、厚源厚储互层型物性最好，中源夹薄储层型储层物性最差。

3.2 孔隙类型差异

根据铸体薄片、岩石薄片、扫描电镜等进行观察分析可知，长 7₁₋₂ 储层主要发育原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、等孔隙类型。溶蚀孔隙普遍发育，占总孔隙含量的 66.7%，包含粒内溶孔(图 4a,4b)、粒间溶孔

和岩屑溶孔。其中长石溶孔是次生孔隙的主要类型，占总孔隙的 32.2%(图 4b,4c)，粒间溶孔次之，占总孔隙的 22.5%(图 4d)，岩屑溶孔占总孔隙的 10.9%，表明研究区发育了强烈的溶蚀作用。除溶孔外，原生粒间孔占比也较大，占总孔隙含量的 22.5%(图 4e,4f)，同时研究区可见少量的晶间孔，占总孔隙含量的 10.9%(图 4g)。微孔发育较少，镜下较难观察到(图 4h,4i)。庆城地区多为致密砂岩储层，不同类型储层孔隙的多少直接影响着油气的储集能力。统计不同源储结构储层孔隙类型百分含量及其面孔率(图 5)。

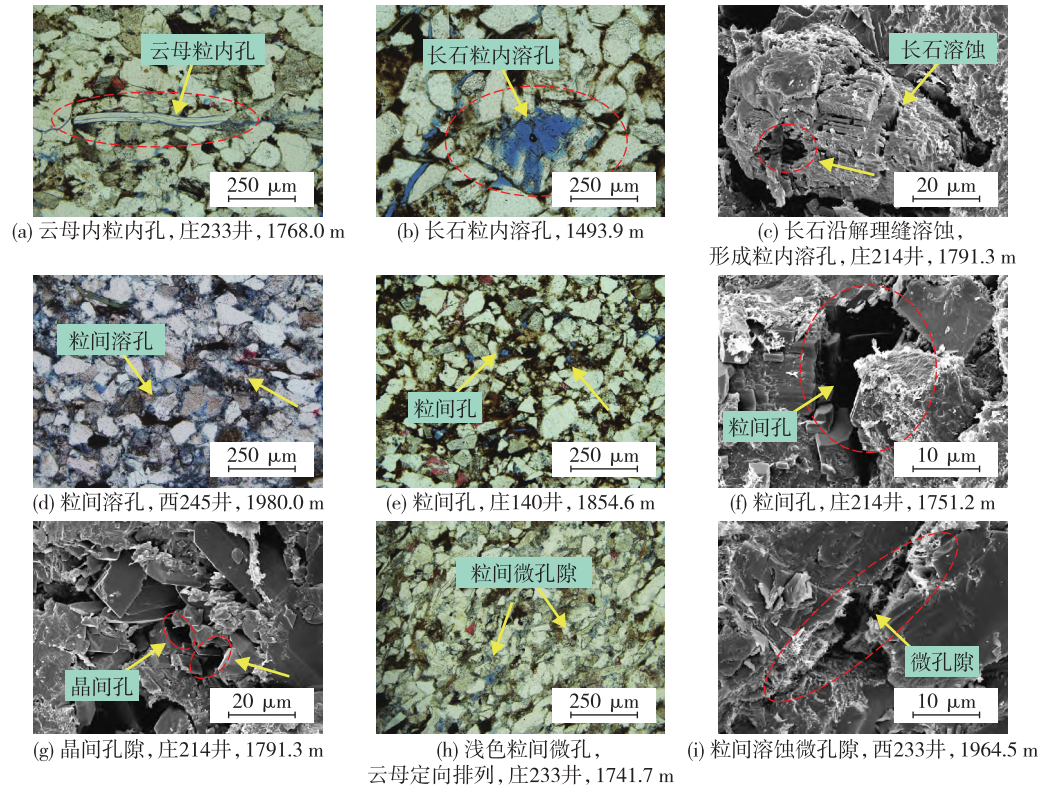


图 4 鄂尔多斯盆地延长组长 7₁₋₂ 段储层微观孔隙特征

Fig. 4 Micropore characteristics of Chang 7₁₋₂ reservoir in Yanchang, Ordos Basin

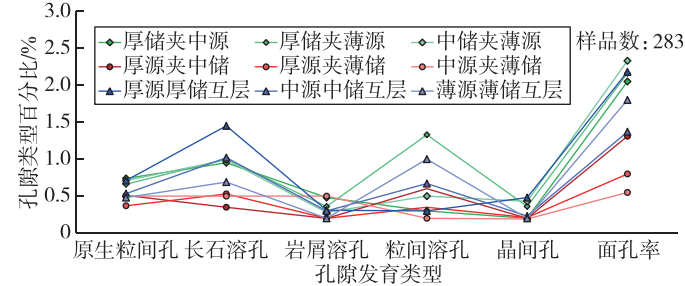


图 5 庆城地区二级源储结构孔隙类型百分含量

Fig. 5 Percentage of pore types of secondary source reservoir structure in Qingcheng area

结果显示，储夹源型孔隙含量整体较高，面孔率均在 2.0% 以上，原生粒间孔平均为 0.70%，主要的次生孔隙(长石溶孔)平均为 0.98%。所对应的二级源储结构储层中，长石溶孔和原生粒间孔相差不大，但厚储夹薄源型储层的粒间溶孔显著高于其他储

层，占比达 1.33%。源夹储型储层的孔隙含量相对较低，面孔率平均为 0.89%，所包含的二级源储结构中岩屑溶孔、粒间溶孔等次生孔隙占比较低，均在 0.2% 左右。总的来说，研究区 3 类储层孔隙含量对比中，储夹源型储层孔隙含量最多，其次是源储互

层型储层,源夹储型储层最少,所对应的二级源储结构储层中,厚储夹薄源型、厚源厚储互层型和厚储夹中源型孔隙含量较多。

3.3 孔隙结构差异

孔隙结构是判断储层储集性能的重要参数,长 7 段物性较差,具有低孔低渗和微观孔隙结构较差的特点^[33],结合庆城地区长 7₁₋₂ 段储层的高压压汞资料(表 1),储夹源型储层孔隙特征为:岩石致密程度相对较低,中值压力平均为 9.02 MPa,排替压力较小(2.71 MPa),连通性好,最大进汞饱和度平均为 77.14%,喉道中等,平均为 0.08 μm 。相比之下源夹储型源储结构储层致密程度较高,中值压力平均为 25.02 MPa,排替压力较大(7.05 MPa),连通性差,喉道细。源储互层型储层孔隙结

构参数介于两者之间,孔喉分布较复杂。

二级源储结构储层孔隙结构特征整体上与它所对应的一级源储结构储层类似,但不同直径的孔径在渗透率贡献度上存在差异。结合压汞曲线和孔径分布资料,厚储夹中源型和中源中储互层型储层的最小非饱和孔隙体积百分数($S_{\min}$)较小,分别为 43.6%、41.4%,低于其它源储结构储层,表明其大孔径喉道占比较多(图 6a)。此外,厚储夹中源型、中源中储互层型和中储夹薄源型储层孔径主要分布在 0.003~0.097 μm ,均是数值相对较大的孔径在渗透率贡献度上起主要作用,且三者起主要渗透率贡献的孔径的大小依次降低。厚源厚储互层型储层直径大和直径小的孔径对渗透率贡献度都起重要作用(图 6b)。

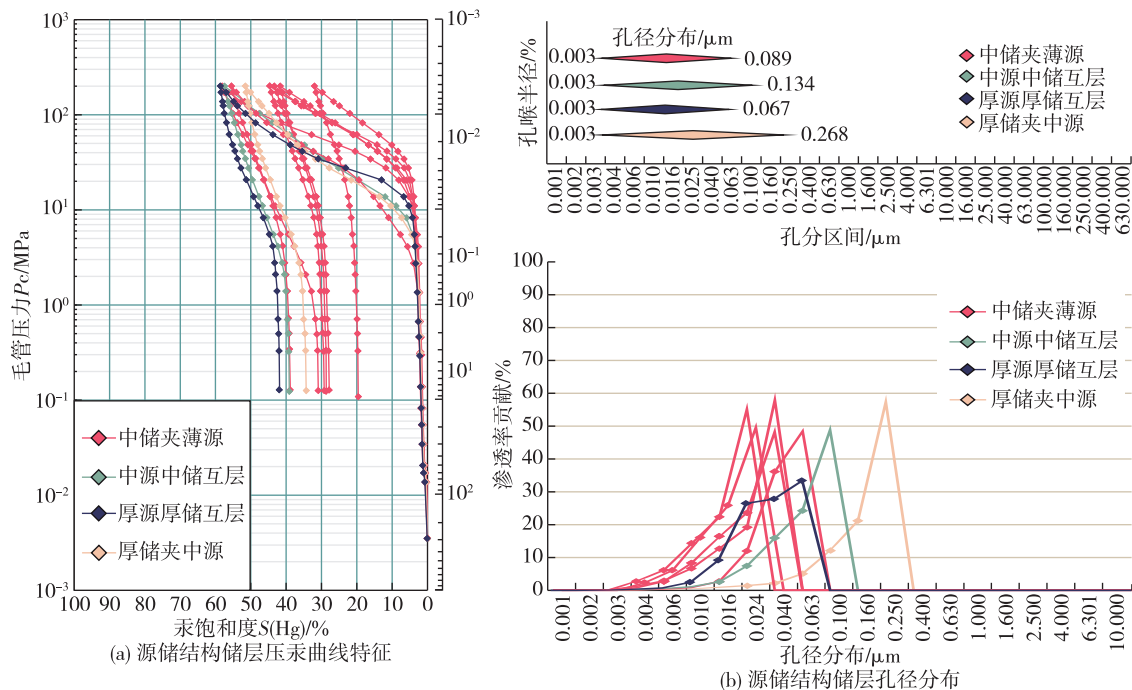


图 6 庆城地区典型样品中不同源储结构下储层压汞曲线及孔径分布

Fig. 6 Mercury pressure curves and pore diameter distribution of reservoirs with different source reservoir structures in Qingcheng area

表 1 庆城地区源储结构储层孔喉参数表

Table 1 Pore throat parameters of source reservoir structure reservoir in Qingcheng area

井名	深度/m	二级源储结构	分选系数	中值压力/ MPa	排驱压力/ MPa	最大进汞 /%	退汞效率 /%	中值半径/ μm	孔隙度/ %	渗透率/ mD
里 68	2009.6	中源中储互层	0.8440	13.4497	5.2148	75.10	29.5	0.0547	10.4	0.068
里 68	1999.7	中源中储互层	1.0488	7.9303	3.3695	80.90	31.3	0.0927	11.6	0.092
宁 56	1492.6	薄源薄储互层	1.0650	14.4257	3.9312	73.09	31.5	0.0510	9.7	0.079
庄 62	1884.9	薄源薄储互层	0.7645	22.5122	6.6659	61.60	18.2	0.0327	7.7	0.062
宁 44	1516.0	厚储夹中源	1.5451	6.9969	1.6488	69.10	25.0	0.1050	10.1	0.220
宁 45	1667.5	厚储夹中源	2.1881	10.4380	1.1645	88.22	23.5	0.0704	9.4	0.135
庄 211	1656.6	厚储夹薄源	0.8781	10.6428	4.8388	81.34	28.6	0.0691	8.6	0.045
庄 62	1912.1	厚储夹薄源	0.9790	10.1188	4.1787	68.20	12.5	0.0727	8.4	0.106
宁 44	1484.8	中储夹薄源	1.6670	8.2360	1.2057	75.90	34.4	0.0892	12.1	0.357
城 75	2075.2	中储夹薄源	1.0994	7.6971	3.2482	80.07	29.1	0.0955	11.9	0.132
午 75	1740.9	厚源夹中储	0.7068	27.7809	7.1526	63.55	16.9	0.0265	8.1	0.053
塔 32	1881.0	厚源夹薄储	0.7661	22.2594	6.3612	63.33	25.2	0.0333	7.8	0.041
宁 79	1653.0	中源夹薄储	0.6295	—	7.6315	44.30	30.6	—	8.0	0.051

4 储层差异形成机理

4.1 强水动力洪水型重力流控制着原生粒间孔隙发育及保存

重力流是由含大量悬浮物质的高密度流体在重力驱动下,沿斜坡向下进行阵发性、短暂性的快速沉积^[34]。庆城地区长 7 段主要发育深水重力流沉积体系,可划分为砂质碎屑流、泥质碎屑流、浊流及滑塌沉积。研究区主要发育了以砂岩底部交错层理与块状层理不同比例组合为特征的洪水主控重力流模式^[35]。

4.1.1 洪水重力流控制下的源储结构储层分布

庆城地区长 7₁₋₂ 段重力流砂体规模大,物源主要来源于西南方向,其次是东北物源^[36],发育典型的重力流水道—湖底扇沉积^[37]。为了明确沉积相对源储结构中储层发育的影响,本次研究挑选了 5 种规模性发育的沉积相,分别是半深湖、深湖、水道等 3 种亚相,湖底扇相及其内部的浊积席状砂沉

积微相^[38-39]。在长 7₂ 段到长 7₁ 段沉积过程中,湖侵作用逐渐减弱,湖底扇和席状砂面积逐渐增大,不同源储结构储层在平面上有较为明显的分区性(图 7a,7b)。

储层源型储层主要分布在湖底扇中(图 7c),所对应的厚储夹中源、厚储夹薄源、厚源厚储互层型储层在湖底扇中占比共 62%,在浊积砂和水道中总占比也相对较多,分别为 34% 和 40%。

源夹储型储层主要分布在半深湖和深湖中(图 7c),这两种沉积亚相往往位于水体较深部位,距物源较远,发育较多灰黑色、深灰色的泥页岩,砂岩含量相对较少。对应的厚源夹中储、厚源夹薄储和中源夹薄储型储层在半深湖中共占比为 71%,在深湖中共占比为 39%,湖底扇中源夹储型储层较少。源储互层型储层主要发育在沉积相的边界处,在各个沉积相中均有较大比例的分布,其中在水道和深湖中分布较多,总占比分别为 49% 和 48%。

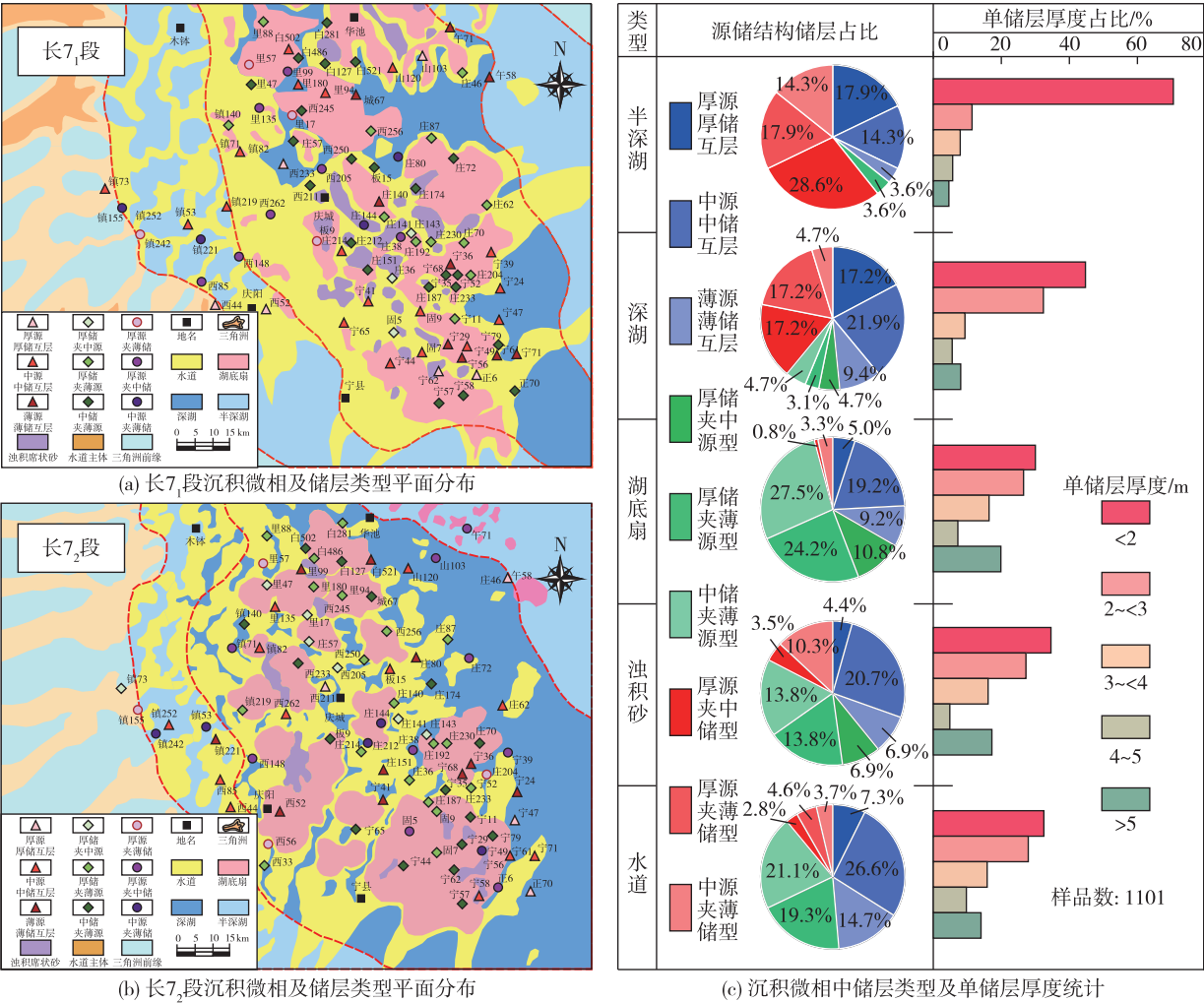


图 7 长 7₁₋₂ 段沉积相与源储结构储层分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of sedimentary facies and source reservoir structure of Chang 7₁₋₂ member

型储层紧邻湖盆中心, 杂基体积分数普遍较高, 分选中等-差, 颗粒间为点-线接触, 部分表现为凹-凸接触, 刚性颗粒少, 平均含量为 1.5%。从而压实作用强烈, 岩石易受压实作用而迅速减孔^[41]。源储互层型储层中刚性颗粒占比平均为 2.25%, 受压实

作用影响程度介于其他两类之间, 对应的二级源储结构储层中, 储夹源型所对应的 3 种源储结构储层和厚源厚储互层型储层刚性颗粒相对较多, 抗压实能力较强, 原生孔隙保留的更多。

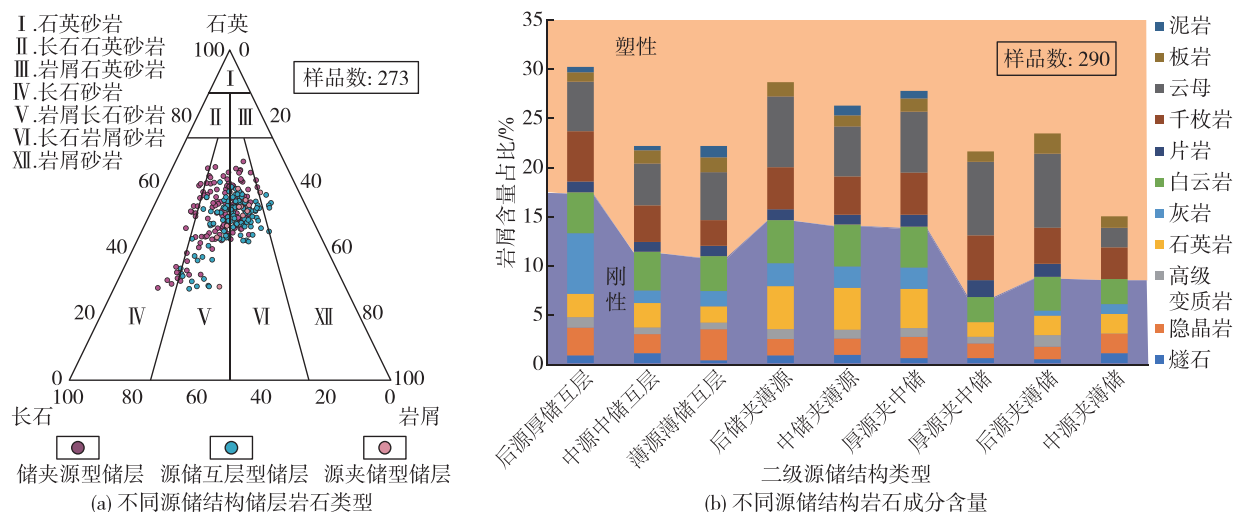


图9 不同源储结构储层岩石类型及其岩屑含量分布

Fig. 9 Rock types and rock cuttings content distribution of reservoir in different source reservoir structures

4.2 3种胶结作用下原生孔隙差异破坏

庆城地区长7₁₋₂段胶结作用普遍发育, 是破坏性成岩作用, 岩石中的胶结物主要有伊利石、硅质、高岭石、铁方解石、铁白云石、硅质和绿泥石等, 胶结类型主要为碳酸盐胶结、黏土胶结和硅质胶结。

碳酸盐胶结是研究区最主要的胶结作用, 胶结物以方解石、铁方解石、白云石、铁白云石为主, 钙质主要来自压实作用联合酸性地层水, 将长石溶解从而提高地层水 pH 值, 进而使碎屑矿物溶解和黏土矿物转化成 Ca^{2+} 离子^[42-43]。随着压实作用增强, 泥岩孔隙压力增大, 使 Ca^{2+} 流向储层, 但由于储层厚度大, 泥岩中的压力不足以使 Ca^{2+} 进入储层内部^[44-45]。最终导致钙质胶结主要发生在源岩和储层交界附近, 离砂-泥界面越近, 碳酸盐胶结往往会更强烈(图 10a)。本文根据钙质胶结的相对位置, 总结出 3 类普遍发生的钙质胶结模式: 分别为单砂体较厚的顶底式胶结型、单砂体为中-厚层的顶部式或底部单边式胶结型, 以及单砂体较薄的全胶结型(图 10b), 3 种模式的胶结作用强度逐渐增大。接着通过 X-衍射全岩定量分析, 结果显示储夹源型储层钙质含量较低, 平均为 4.7%, 多为顶底式胶结模式, 受钙质胶结影响相对较小。源储互层型储层钙质含量平均为 6.5%, 钙质胶结模式以顶底式和单边式为主, 受钙质胶结影响也相对较

小, 而源夹储型储层钙质含量较高, 平均为 9.3%, 大部分呈现出全胶结模式, 钙质胶结作用较强(图 10c)。

黏土胶结中起主要作用的矿物是伊利石, 扫描电镜下伊利石普遍发育, 部分以集合体的形式出现, 多呈片丝状充填于碎屑颗粒之间, 或是附着于碎屑颗粒表面, 在成岩作用中容易堵塞孔隙和喉道从而降低储层的物性。储夹源型和源储互层型储层的伊利石含量相近, 平均为 10.6%(图 10c), 胶结类型多为孔隙胶结和孔隙-接触型胶结, 胶结物相对较少。源夹储型储层伊利石含量平均为 13.1%, 发育较为强烈的黏土胶结, 胶结类型以孔隙-接触型为主, 可见部分压嵌型胶结, 使碎屑颗粒相对更加紧密, 原生粒间孔隙破坏严重。

硅质胶结在研究区也普遍发育, 产出形式以石英次生加大为主。3 种源储结构储层的硅质含量相差不大, 平均为 1.4%, 源夹储型储层硅质含量相对会偏高, 平均为 1.7%, 储夹源型硅质含量较低, 平均为 1.1%。但 3 类储层中绿泥石含量存在差异, 研究区绿泥石主要以绿泥石膜的形式分布于碎屑颗粒周围, 绿泥石膜会抑制石英次生加大, 从而减少硅质胶结, 进而减少原生孔隙在硅质胶结下的破坏^[46-47]。基于 X-衍射全岩定量分析资料, 3 类储层中的绿泥石含量相差较大, 储夹源型平均为 0.67%, 源储互层型平均为 0.53%, 而源夹储型

储层几乎没有绿泥石,仅厚源夹薄储中含少量绿泥石,这就使得绿泥石含量多的储夹源型和源储互层型储层硅质胶结更弱,利于原生孔隙保存,而源夹储型硅质胶结较为强烈,原生孔隙破坏严重。

总的来说,在钙质、泥质、硅质胶结下,3 类储

层因胶结物含量和成分有差异而使原生孔隙受破坏程度不同.储夹源型储层胶结作用下减孔较少,其次是源储互层型储层,源夹储型储层因储层薄且胶结物含量多而减孔较多。

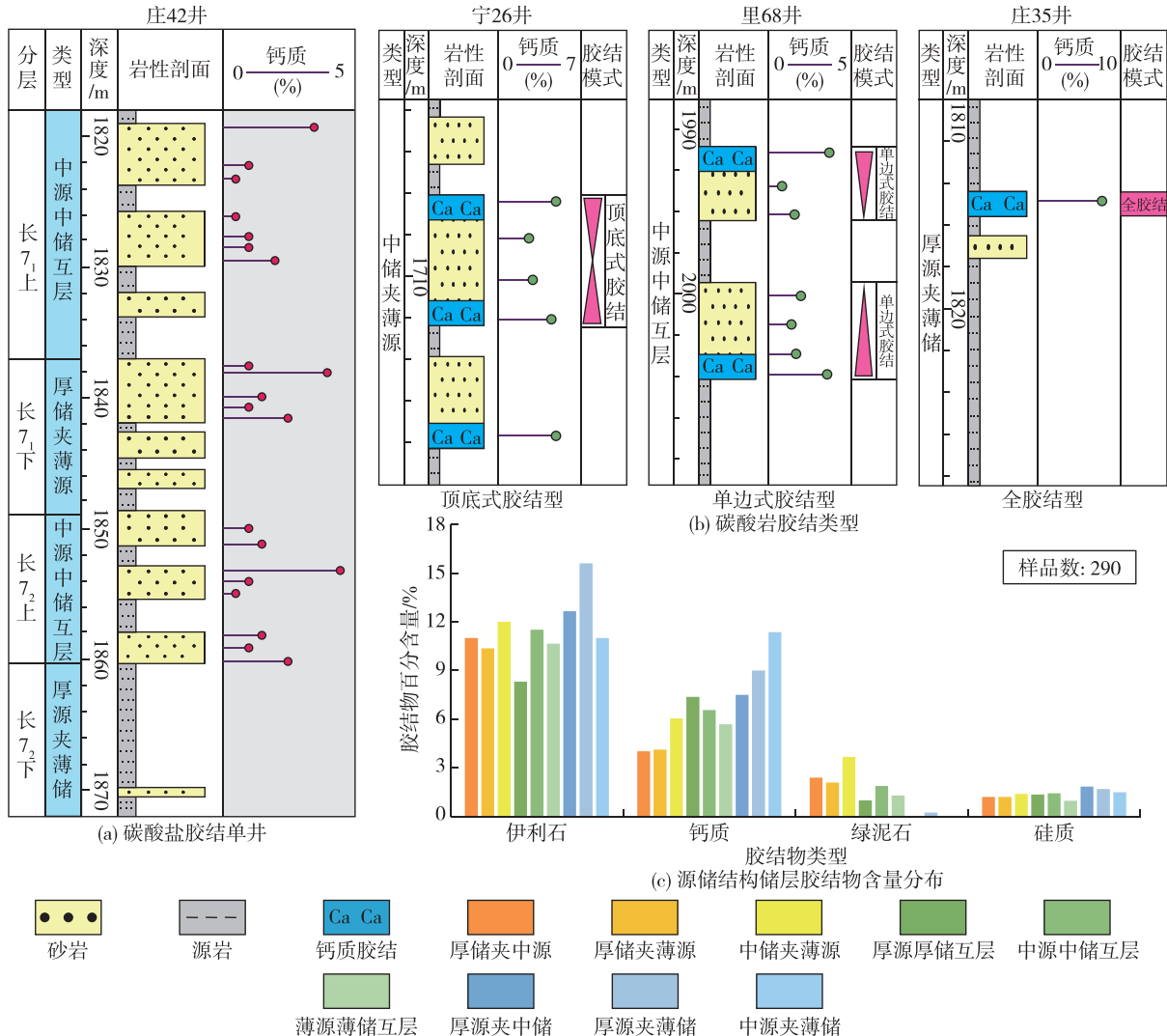


图 10 源储结构储层钙质胶结模式及胶结物含量分布特征

Fig. 10 Calcareous cementing mode and cementing content distribution characteristics of source reservoir structure reservoir

4.3 近源有机酸溶蚀导致次生孔隙差异发育

溶蚀作用对孔隙的改善有着建设性的作用.鄂尔多斯盆地在湖进湖退的作用下,源岩和储层叠置分布,源岩层生烃产生的有机酸,在满足自身碳酸岩等矿物消耗后,会进入到邻近的储层,在储层连通性好且邻近源岩的位置发生溶蚀作用.研究区最常见的溶蚀作用是长石沿解理缝被溶蚀,也可见颗粒间杂基溶蚀形成粒间溶孔和胶结物被溶蚀形成粒间溶孔和粒内溶孔,溶蚀作用在研究区普遍发育。

为了解溶蚀作用如何影响储层的物性,本文采用控制变量的方法来研究近源有机酸溶蚀的规

律(图 11a).首先,在相同总有机碳含量(TOC),不同储层厚度条件下:选取近源为低 TOC 但砂体厚度不同的庄 80 井和庄 143 井(TOC 平均为 3%),和近源为高 TOC 但砂体厚度不同的庄 140 和庄 233 井(TOC 平均为 8%)对比.结果显示,在相同 TOC 下,厚层砂体的孔隙度会更高,且厚层砂体在砂-泥边界向砂层中部的过程中孔隙度会呈现出一定的下降趋势.接着,在相同储层厚度,不同近源 TOC 的情况下:选取储层为薄层但近源 TOC 不同的庄 140 和庄 180 井(厚度为 1.5 m),和储层为厚层但近源 TOC 不同的庄 143 和庄 233 井(厚度约 8.6 m)对比.结果表明,厚层砂体中,近源 TOC

较低时,孔隙度平均为 9.6%,TOC 较高时,孔隙度平均为 11.2%,存在正相关关系,而薄储层中孔隙度变化不明显,平均为 4.9%。总的来说,单储层孔隙度与其邻近源岩 TOC 的大小存在一定的正

相关关系(图 11b),近源有机酸对较厚的储层影响较大,且邻近砂-泥界面的厚储层溶蚀作用更加强烈,具有更高的孔隙度。而较薄的储层受近源有机酸溶蚀作用影响较小,次生孔隙发育较差。

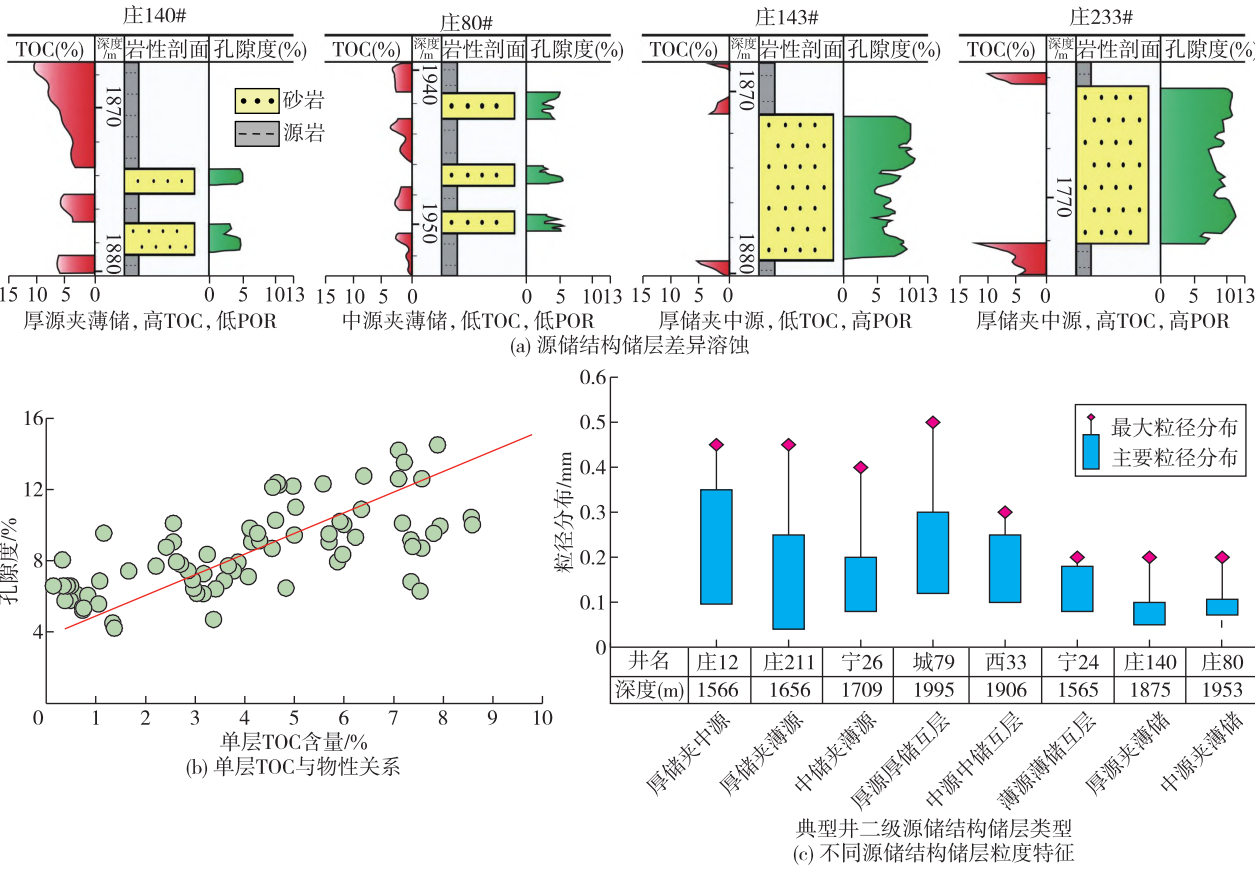


图 11 源储结构储层近源有机酸溶蚀差异及其粒度分布特征
Fig. 11 Source reservoir structure near source organic acid corrosion difference and particle size distribution characteristics

溶蚀作用的发育主要受源岩质量,运移通道和源储距离的控制.为了解不同源储结构储层差异溶蚀的机制,本文通过 X 衍射全岩定量分析和薄片观察,结果显示,储层岩石颗粒粒度大小是影响次生溶孔发育的关键.储夹源型、源储互层型和源夹储型储层岩石粒度大小依次降低(图 12).所对应的二级源储结构中,厚储夹中源型粒度最大,主要分布在 0.1~0.35 mm,最大为 0.45 mm(图

11c);其次为厚源厚储互层型.厚源夹薄储和中源夹薄储型粒径普遍偏小,主要分布在 0.05~0.1 mm,最大粒径为 0.2 mm.岩石颗粒粒度相对较大,会为有机酸提供了进入的通道(图 12a),利于次生孔隙生成;而粒度相对较细的源夹储型储层,致密程度较高,无法为近源有机酸提供有利通道,抑制了次生溶孔的形成(图 12c).

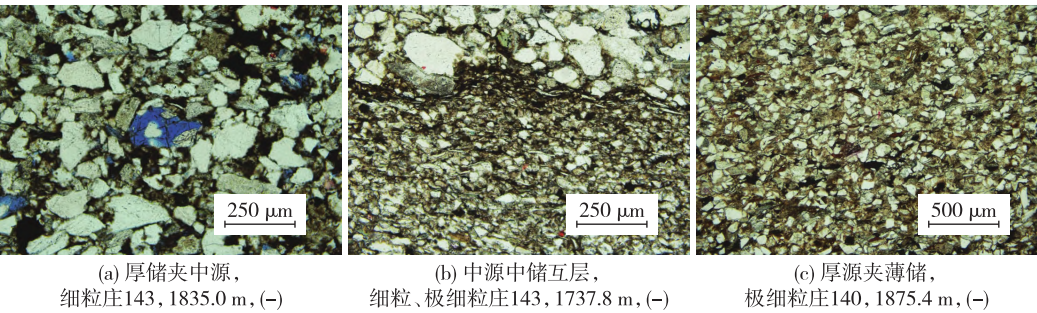


图 12 庆城地区不同源储结构储层岩石粒度特征
Fig. 12 Grain size characteristics of reservoir rocks with different source reservoir structures in Qingcheng area

5 源储结构储层油气充注特征及差异形成模式

5.1 含油性特征

储层非均质性与含油气性关系密切,储层物性越好,含油气性通常越好.依据典型单井上油气显示,源储结构储层含油性特征表现为:储夹源型储层孔隙度更高,平均为 11.1%,油气显示中油层的占比较高,含部分差油层;源储互层型储层孔隙度低于储夹源型,平均为 7.6%,油气显示多为差油层,含少量干层.源夹储型储层孔隙度较低,平均为 5.4%,油气显示多为干层(图 13a).

为了定量表征不同源储结构储层含油性特征,本文采用油井数占比(某类型源储结构储层有油气显示的井数与包含该类型总井数的比值)和含油饱和度 2 个参数进行分析.结果显示,储夹源

型储层的油井数占比平均为 68.1%(图 13b),含油饱和度平均为 29.8%(图 13c),对应的二级源储结构储层中厚储夹薄源型更好,油井数占比平均为 82.5%,含油饱和度超过了 30%.源储互层型储层含油性差于储夹源型储层,油井数占比平均为 53.2%,含油饱和度平均为 28.1%,对应的二级源储结构中,厚源厚储互层型含油性最好,油井数占比和含油饱和度最高.源夹储型储层含油性较差,油井数占比和含油饱和度明显小于其他类型储层,分别为 18.9%和 19.4%.

总体来说,长 7₁₋₂段源储结构储层中储夹源型和源储互层型储层含油性较好,源夹储型含油性较差,二级源储结构储层中含油气性较好的储层依次是厚储夹中源型、厚源厚储互层型和厚储夹薄源型储层.

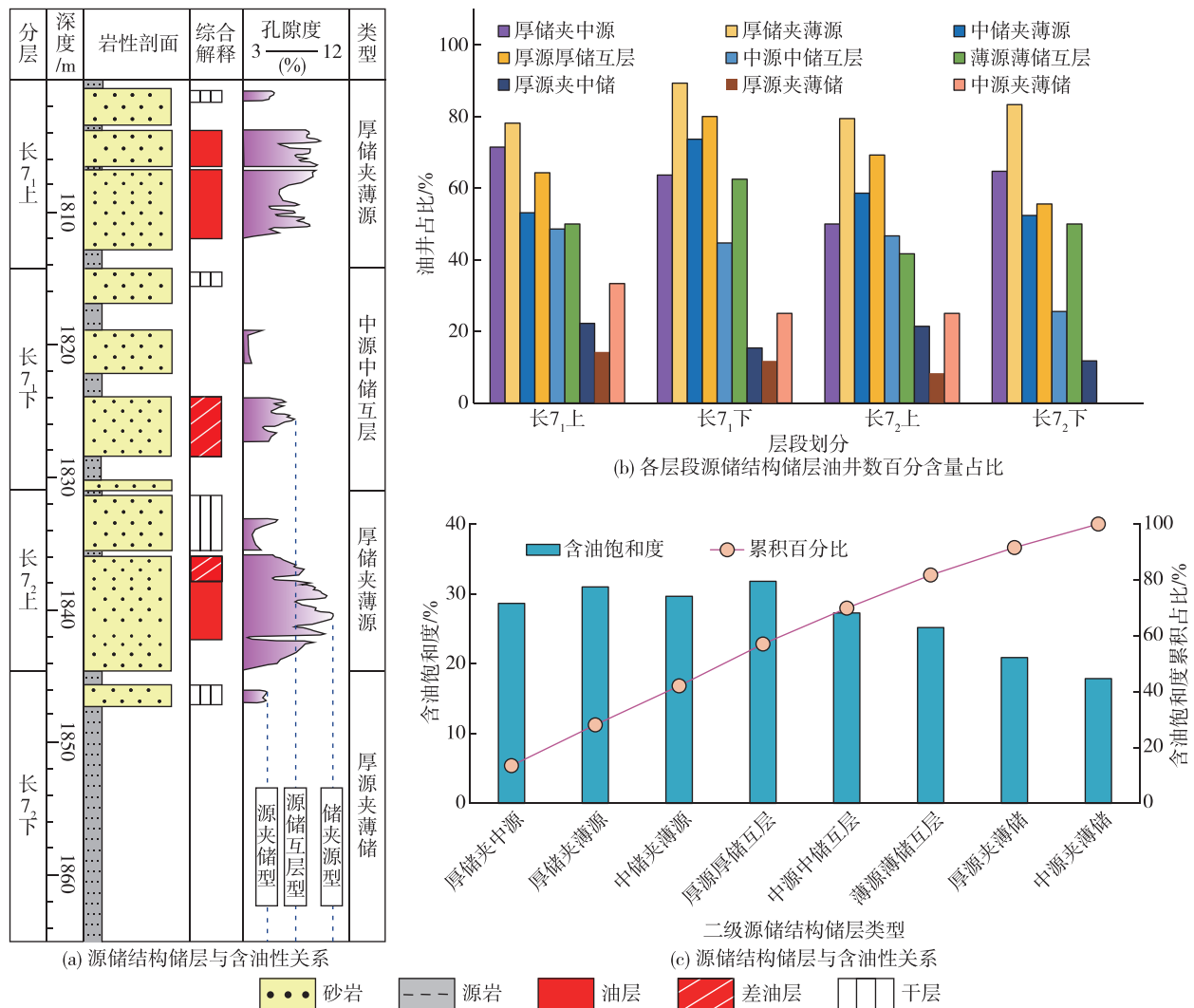


Fig. 13 Oil and gas display and oil bearing characteristics of source reservoir structure of Chang 7₁₋₂ member

5.2 源储结构储层差异性形成与油气富集模式

庆城地区湖岸平缓,物源主要来自西南,主要发育洪水型重力流,长 7₂到长 7₁时期,湖侵作用逐渐减弱,强水动力下浊积砂体不断发育,并在长 7₁时期达到最大.洪水型重力流作用下,使不同沉积沉积相中砂体的厚度、粒径、成分和分布等都会有所差别,影响着源储结构储层的分布,是不同类型储层差异形成的基础.

储夹源型储层主要分布在湖底扇、浊积席状砂和水道中,具有砂层厚度较大、分选较好和岩石颗粒较大的特征,并且岩石成分中刚性颗粒相对

较多,增加了储层的抗压实能力,从而使原生粒间孔得到更多保留.此外,储夹源型储层岩石成分中钙质、黏土等胶结物含量较少,钙质胶结模式以单边式或顶底式为主,同时绿泥石含量较多,以薄膜的形式阻碍硅质胶结,抑制了胶结作用对原生孔隙的破坏.后期发生溶蚀作用改善储层储集性能时,由于储层岩石粒径大、连通性好,为有机酸提供了相对优势的通道,利于次生溶蚀孔隙的发育,从而使油气更容易富集.在这种形成机制下,所对应的二级源储结构储层含油性较好的有厚储夹中源、厚储夹薄源型储层(图 14).

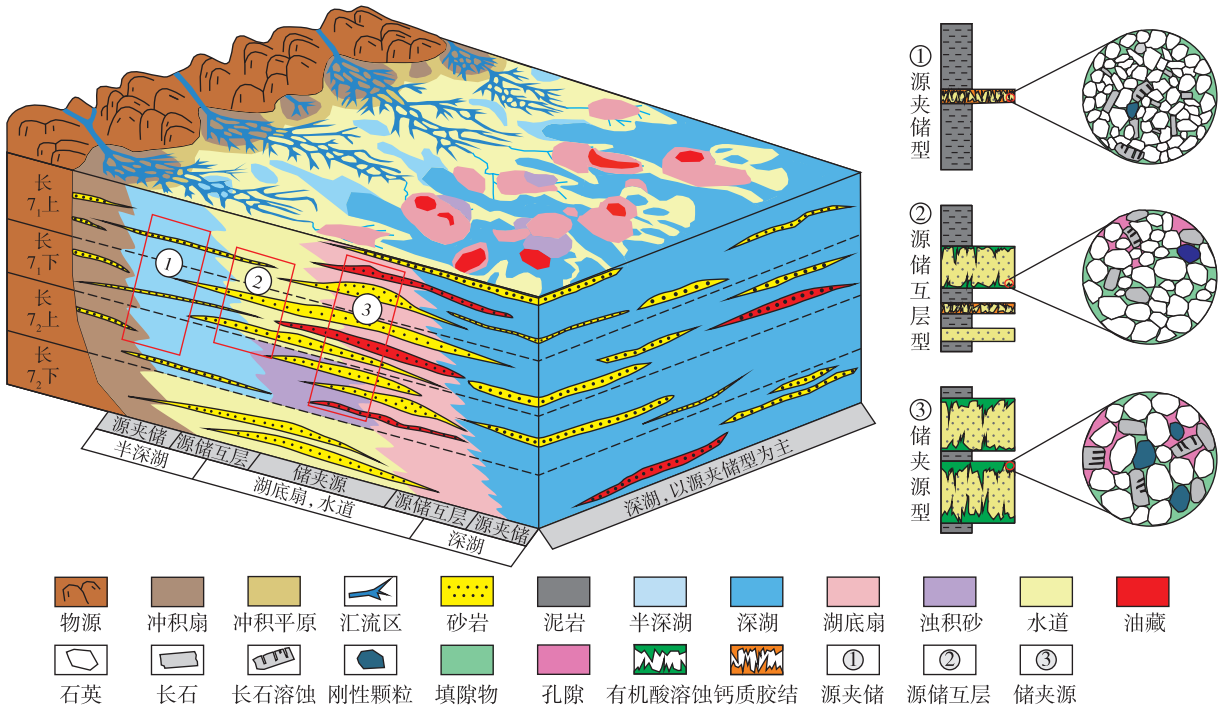


图 14 源储结构储层差异形成机制及油气富集模式
Fig. 14 Formation mechanism of source reservoir structure reservoir difference and hydrocarbon enrichment mode

相比之下,源夹储型储层主要分布在半深湖和深湖中,具有砂层厚度较小、分选性差和岩石颗粒较小的特点,并且含有较多塑性颗粒,导致压实作用较强,储层内原生孔隙迅速减少.此外,岩石中胶结物含量较多且多发育全胶结式的钙质胶结模式,导致源夹储型储层在胶结作用下损失较多原生孔隙.后期近源有机酸溶蚀增孔时,由于岩石粒径小,储层致密,有机酸难以流动,抑制了次生溶蚀孔隙的形成.因此,源夹储型储层及其对应的二级源储结构储层都表现出物性和孔喉结构较差、充注程度低、油气显示多为干层的特征.

而源储互层型储层主要发育在相边界,同时具备着上述 2 种储层类型的特点,对应的二级源储结构中,厚源厚储互层型与储夹源型的特征相似,孔渗较高,连通性较好,利于油气富集.相反,薄源

薄储互层与源夹储型储层的特征相似,储层致密,物性和连通性较差,抑制了油气的富集.

6 结 论

1)鄂尔多斯盆地庆城地区长 7₁₋₂ 段根据砂地比(40%,60%)划分出储夹源型、源储互层型和源夹储型 3 种一级源储结构,并进一步依据砂-泥单层厚度(2 m,5 m)划分出 9 种二级源储结构类型.

2)不同源储结构的储层在物性、孔隙类型和孔隙结构上存在差异.储夹源型储层孔渗相对较高,孔隙类型以次生溶孔和原生粒间孔为主,孔隙结构较好,表现出大孔径占比多,排驱压力较低,连通性好的孔喉特征.相比之下源夹储型储层物性较差,孔隙类型以原生粒间孔为主,孔隙含量低,孔喉特征上表现出小孔径占比多,排驱压力大,储

层致密程度高,连通性差的特征;源储互层型储层各项参数介于两者之间。

3) 储层差异的形成主要受洪水型重力流沉积、胶结作用和近源有机酸溶蚀的控制。储夹源型主要发育在强水动力形成的湖底扇和浊积砂中,具有储层厚度大、刚性颗粒较多、钙质等胶结物少和岩石粒径大的特征,使其有更强的抗压实能力和较低程度的胶结作用,保留更多原生孔隙,同时溶蚀作用发生时能为有机酸流动提供通道,产生大量次生孔隙。相反,源夹储型储层主要发育在半深湖、深湖中,表现出储层较薄、胶结物多且粒度小的特征,压实作用和胶结作用较强且抑制溶蚀作用发生,导致原生孔隙大量破坏,次生孔隙较难形成。源储互层型介于两者之间。

4) 长₇₋₂段储夹源型和源储互层型储层是主要的富集油气储层类型,表现为油井数占比和含油饱和度较高,源夹储型储层含油气性较差,二级源储结构储层中,厚储夹中源型、厚源厚储互层型和厚储夹薄源型储层的含油性最好。

参考文献:

- [1] 付锁堂,付金华,牛小兵,等.庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2020,41(7):777-795.
FU Suotang, FU Jinhua, NIU Xiaobing, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 777-795.
- [2] 许琳,常秋生,冯玲丽,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J].中国石油勘探,2019,24(5):649-660.
XU Lin, CHANG Qiusheng, FENG Lingli, et al. The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 649-660.
- [3] 高阳,叶义平,何吉祥,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J].中国石油勘探,2020,25(2):133-141.
GAO Yang, YE Yiping, HE Jixiang, et al. Development practice of continental shale oil in the Jimisar Sag in the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 133-141.
- [4] 王玉华,梁江平,张金友,等.松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J].大庆石油地质与开发,2020,39(3):20-34.
WANG Yuhua, LIANG Jiangping, ZHANG Jinyou, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 20-34.
- [5] 周立宏,赵贤正,柴公权,等.陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1059-1066.
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: A case study of member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059-1066.
- [6] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an Instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [7] 付金华,喻建,徐黎明,等.鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J].中国石油勘探,2015,20(5):9-19.
FU Jinhua, YU Jian, XU Liming, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos Basin and main controlling factors of large-scale enrichment and exploitable capacity[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 9-19.
- [8] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等.中国陆相致密油形成机理与富集规律[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184.
ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [9] 付金华,董国栋,周新平,等.鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J].中国石油勘探,2021,26(3):19-40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.
- [10] ZHU G Y, GU L J, SU J, et al. Sedimentary association of alternated mudstones and tight sandstones in China's oil and gas bearing basins and its natural gas accumulation[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 50: 88-104.

- [11] 黄东, 段勇, 杨光, 等. 淡水湖相沉积区源储配置模式对致密油富集的控制作用: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 石油学报, 2018, 39(5): 518-527.
HUANG Dong, DUAN Yong, YANG Guang, et al. Controlling effect of source reservoir configuration model on tight oil enrichment in freshwater lacustrine sedimentary area: A case study of the Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2018, 39(5): 518-527.
- [12] 葛云锦, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地富县—甘泉地区三叠系延长组7油层组致密油富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1190-1200.
GE Yunjin, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Main factors controlling the tight oil enrichment in the 7th oil layer group of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian-Ganquan area, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2018, 39(6): 1190-1200.
- [13] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601-614.
FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601-614.
- [14] ZOU C N, YANG Z, TAO S Z. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 15-32.
- [15] 李登华, 李建忠, 张斌, 等. 四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 740-752.
LI Denghua, LI Jianzhong, ZHANG Bin, et al. Formation condition, resource potential and sweet-spot area prediction of Jurassic tight oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2017, 38(7): 740-752.
- [16] SONG Y, LUO Q, JIANG Z X, et al. Enrichment of tight oil and its controlling factors in central and western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 492-506.
- [17] 杨智, 付金华, 郭秋麟, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 9-15.
YANG Zhi, FU Jinhua, GUO Qiulin, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9-15.
- [18] 杨智峰, 曾溅辉, 韩菲. 鄂尔多斯盆地西南部延长组7段致密油充注影响因素分析[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(7): 961-972.
YANG Zhifeng, ZENG Jianhui, HAN Fei. Analysis of influencing factors on tight oil charging of the 7th member of Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(7): 961-972.
- [19] QIU Z, SHI Z S, DONG D Z, et al. Geological characteristics of source rock and reservoir of tight oil and its accumulation mechanism: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 1013-1024.
- [20] CAO Z, LIU G D, ZHAN H B, et al. Geological control factors of micro oil distribution in tight reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 1193-1205.
- [21] 张威, 何发岐, 闫相宾, 等. 鄂尔多斯盆地北部构造叠置与天然气聚集研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 689-703.
ZHANG Wei, HE Faqi, YAN Xiangbin, et al. Tectonic superposition and accumulation of natural gas in northern Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 689-703.
- [22] BJORLYKKE K, EGEBERG P K. Quartz cementation in sedimentary basins[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1538-1548.
- [23] 程敏华, 孟德伟, 王丽娟, 等. 致密砂岩气藏水平井差异化开发效果评价: 以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 354-363.
CHENG Minhua, MENG Dewei, WANG Lijuan, et al. Evaluation of horizontal well differential development effect in tight sandstone gas reservoir: A case study of Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 354-363.
- [24] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration And Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [25] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 1013-1024.

- 737-747.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, WANG Feng, et al. Mesozoic tectonic properties in the western margin of Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 737-747.
- [26] 庞军刚, 李文厚, 石 硕, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段浊积岩沉积演化模式及石油地质意义[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 73-77.
- PANG Jungang, LI Wenhui, SHI Shuo, et al. Sedimentary evolution model and petroleum significance of Chang-7 member turbidite, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(4): 73-77.
- [27] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624-634.
- FU Jinhua, DENG Xiuqin, ZHANG Xiaolei, et al. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 624-634.
- [28] 黄振凯, 刘全有, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 513-521.
- HUANG Zhenkai, LIU Quanyou, LI Maowen, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 513-521.
- [29] 林森虎, 袁选俊, 杨 智. 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义: 以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 517-223.
- LIN Senhu, YUAN Xuanjun, YANG Zhi. Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7th member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 517-223.
- [30] 杨智峰, 曾溅辉, 冯 泉, 等. 源储岩性组合对致密油聚集的影响: 以鄂尔多斯盆地延长组长 7 段为例[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 389-393.
- YANG Zhifeng, ZENG Jianhui, FENG Xiao, et al. Effects of source-reservoir lithologic assemblage on tight oil accumulation: A case study of Yanchang Chang-7 Member in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(4): 389-393.
- [31] 高 岗, 梁晓伟, 朱康乐, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段源储组合特征与油气成藏模式[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 198-205.
- GAO Gang, LIANG Xiaowei, ZHU Kangle, et al. Characteristics of source-reservoir assemblage and hydrocarbon accumulation model of Chang 7 Member in Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 198-205.
- [32] 付金华, 郭 雯, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段多类型页岩油特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1749-1761.
- FU Jinhua, GUO Wen, LI Shixiang, et al. Characteristics and exploration potential of multi-type shale oil in the 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1749-1761.
- [33] 陈富瑜, 周 勇, 杨栋吉, 等. 基于分形理论的致密砂岩储层孔隙结构研究: 以鄂尔多斯盆地庆城地区延长组长 7 段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 941-955.
- CHEN Fuyu, ZHOU Yong, YANG Dongji, et al. Study of pore structure of tight sandstone reservoir based on fractal theory: A case study from Chang 7 tight sandstone of Yanchang formation in Qingcheng area, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 941-955.
- [34] 朱红梅, 陈中斌, 曹鹏福, 等. 鄂尔多斯盆地洪德南地区长 7-2 亚段重力流类型及物源分析[J]. 化工管理, 2021(24): 197-198.
- ZHU Hongmei, CHEN Zhongbin, CAO Pengfu, et al. Analysis of gravity flow types and physical sources in Chang7-2 Subsection of Hongdenan Area of Ordos Basin[J]. *Chemical Management*, 2021(24): 197-198.
- [35] XIAN B Z, WANG J H, GONG C L, et al. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 368: 68-82.
- [36] 张国栋, 鲜本忠, 晁储志, 等. 鄂尔多斯盆地三水河剖面上三叠统块状砂岩的异重流成因: 来自岩石结构的证据[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 934-944.
- ZHANG Guodong, XIAN Benzong, CHAO Chuzhi, et al. Flood-generated massive sandstones of the sanshuihe outcrop in the triassic Ordos Basin: Evidence from sedimentary textural characteristics [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 934-944.
- [37] 梁晓伟, 鲜本忠, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段重力流砂体构型及其主控因素[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 641-652.
- LIANG Xiaowei, XIAN Benzong, FENG Shengbin, et al. Architecture and main controls of gravity-flow sandbodies in Chang7 Member, Longdong Area,

- Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(3): 641-652.
- [38] 吴千然, 鲜本忠, 高先志, 等. 强制湖退期湖底扇沉积构造的多样性及成因: 以渤海湾盆地东营凹陷沙三段中亚段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 782-794.
- WU Qianran, XIAN Benzhong, GAO Xianzhi, et al. Diversity and origin of depositional architecture of sublacustrine fans during forced regression: A case study of Middle Sha 3 Member in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 782-794.
- [39] 牛成民, 惠冠洲, 杜晓峰, 等. 辽中凹陷西斜坡古近系东三段湖底扇发育模式及大油田发现[J/OL]. 岩性油气藏: 1-10[2023-07-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20230630.1651.003.html>.
- NIU Chengmin, HUI Guanzhou, DU Xiaofeng, et al. Sedimentary model of sublacustrine fan of the third member of Paleogene Dongying Formation and large-scale oilfield discovered in western slope of Liaozhong Sag[J/OL]. *Lithologic Reservoirs*: 1-10[2023-0708]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20230630.1651.003.html>.
- [40] KATZ B, LIN F. Lacustrine basin unconventional resource plays: Key differences[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 56: 255-265.
- [41] 胡才志, 罗晓容, 张立宽, 等. 鄂尔多斯盆地中西部长9储层差异化成岩与烃类充注过程研究[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1141-1157.
- HU Caizhi, LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, et al. Differential diagenesis and hydrocarbon charge process of the 9th member of Yanchang Formation in the central and western Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1141-1157.
- [42] CHEN Z H, ZHA M, LIU T X. Response and evolution of formation water chemical fields of the Paleogene in Dongying Sag[J]. *Lake Sci*, 2008, 20: 705-714.
- [43] ZHANG R F. Application of scanning electron microscopy to study of mineral change—Transformation of feldspar into clay minerals[J]. *Sci Geol Sin*, 1992, 27: 66-70.
- [44] WANG C, CHEN D, LI H, et al. Differential genetic mechanisms of deep high-quality reservoirs in the paleogene Wenchang Formation in the Zhu-1 Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3277.
- [45] JIAN W, CAO Y, JIE X. Factors controlling reservoir properties and hydrocarbon accumulation of the Eocene lacustrine beach-bar sandstones in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. *China Mar Pet Geol*, 2018, 57: 327-344.
- [46] 梁月华, 旬邑-宜君区块延长组储层成岩作用分析[J]. *内蒙古石油化工*, 2014, 40(13): 44-48.
- LIANG Yuehua. Diagenesis analysis of Yanchang Formation reservoir in Xunyi Yijun Block[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2014, 40(13): 44-48.
- [47] 庞军刚, 李文厚, 国吉安, 等. 特低渗透一致密砂岩成岩作用特征及其差异性分析: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 121-135.
- PANG Jungang, LI Wenhong, GUO Ji'an, et al. Diagenesis characteristics and difference analysis of ultra-low permeability and tight sandstone: Taking Yanchang Formation in Longdong area of Ordos Basin as an example[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 121-135.

(责任编辑 宋爽全 腾)