



页岩油岩石类型组合及储集能力定量研究新方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组为例
郑庆华, 刘行军, 张荣莉, 王自亮, 王克

引用本文:

郑庆华, 刘行军, 张荣莉, 等. 页岩油岩石类型组合及储集能力定量研究新方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组为例[J]. 沉积学报, 2026, 44(2): 631-645.

ZHENG QingHua, LIU XingJun, ZHANG RongLi, et al. A New Method for the Quantitative Study of Shale Oil Rock Type Combination and Reservoir Capacity: A case study from Chang 7 oil member of the Yanchang Formation in the Longdong region, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2026, 44(2): 631-645.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

鄂尔多斯盆地西南部延长组6段重力流沉积特征及其油气地质意义

Sedimentary Characteristics and Petroleum Geological Significance of the Chang6 Gravity Flow in the Southwest Ordos Basin

沉积学报. 2020, 38(3): 571-579 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.056>

鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积岩特征与古环境——以铜川地区瑶页1井为例

Sedimentary Characteristics of Fine-grained Sedimentary Rock and Paleo-environment of Chang 7 Member in the Ordos Basin: A case study from Well Yaoye 1 in Tongchuan

沉积学报. 2020, 38(3): 554-570 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.062>

致密砂岩储层骨架砂体构型特征——以鄂尔多斯盆地合水地区延长组长6段砂体为例

Analysis of Configuration Characteristics for Skeleton Sand Body with Tight Sandstone Reservoir: A case study of Triassic Chang 6 members in Heshui area, Ordos Basin, NW China

沉积学报. 2019, 37(6): 1105-1116 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.051>

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

Flood-generated Massive Sandstones of the Sanshuihe Outcrop in the Triassic Ordos Basin: Evidence from sedimentary textural characteristics

沉积学报. 2019, 37(5): 934-944 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.186>

致密砂岩储层致密化与成藏史耦合关系研究——以鄂尔多斯南部镇原—泾川地区延长组长8油层组为例

The Coupling Relationship of Reservoir Densification History and Hydrocarbon Emplacement in Tight Sandstone Reservoir: A case study of the Chang 8 Oil Member, Yanchang Formation, southern Ordos Basin

沉积学报. 2018, 36(2): 401-414 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.029>

引用格式:郑庆华,刘行军,张荣莉,等. 2026. 页岩油岩石类型组合及储集能力定量研究新方法——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组为例[J]. 沉积学报, 44(2): 631-645.

ZHENG QingHua, LIU XingJun, ZHANG RongLi, et al. 2026. A New Method for the Quantitative Study of Shale Oil Rock Type Combination and Reservoir Capacity: A case study from Chang 7 oil member of the Yanchang Formation in the Longdong region, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 631-645.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.076

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.076

页岩油岩石类型组合及储集能力定量研究新方法 ——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组为例

郑庆华¹, 刘行军², 张荣莉², 王自亮², 王克³

1. 榆林大学化学与化工学院, 陕西榆林 719000

2. 中国石油测井有限公司长庆分公司, 西安 710200

3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组页岩油岩心地质录井中,各岩石类型单层厚度分辨率基本为10 cm,造成大量岩石类型组合长期被当成单一岩石类型描述,探索其岩石类型组合及储集能力定量研究的新方法,有利于长7油层组页岩油的高效勘探开发。【方法】通过鄂尔多斯盆地陇东地区24口井延长组长7油层组页岩油各岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm的高分辨率岩心观察,405块样品的体视显微镜、薄片鉴定,以及物性分析资料等,该项研究首先对长7油层组岩石类型进行了重新识别,其次对长7油层组岩石类型组合及储集能力进行了探索性的定量研究。【结果】长7油层组页岩油发育11种主要的岩石类型,首次定量划分出单一型、含层型、夹层型、互层型4种岩石类型组合形式,65种岩石类型组合。在11种岩石类型储集能力定量评价基础上,结合其各岩石类型厚度百分比,探索性地提出了定量计算65种岩石类型组合储集能力的新方法。【结论】鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组页岩油长期单一岩石类型思路的研究须向岩石类型组合思路的研究转变,指导长7油层组页岩油的高效勘探开发。然而,该项研究还处于探索阶段,尚需结合大量长7油层组页岩油勘探开发效果进一步完善。

关键词 鄂尔多斯盆地;长7油层组;页岩油;岩石类型组合形式;岩石类型组合;储集能力;定量研究

第一作者 郑庆华,男,1980年出生,博士研究生,副教授,油气储层地质学、致密油、页岩油教学与研究,

E-mail: 272594012@qq.com

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)02-0631-15

0 引言

中华人民共和国国家标准(GB/T 38718—2020)将页岩油定义为赋存于富有机质页岩层系中的石油,富含有机质页岩层系烃源岩内粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩的单层厚度不大于5 m,累计厚度占页岩层系总厚度的比例小于30%。鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7油层组页岩油探明了国内首个整装10亿吨级的陇东地区庆城大油田,并建成了百万吨国家级页岩油开发示范区(付金华等,2023)。长7油层组自上而下划分为长7₁、长7₂和长7₃三个小层,其沉积

期是延长组湖盆发育的最鼎盛时期,半深湖—深湖区面积最大,气候温暖潮湿,火山活动频繁,藻类等生烃母质繁盛,黑色泥岩、油页岩等优质烃源岩最发育且生烃能力最强,发育浊流或砂质碎屑流为主的粉砂岩、细砂岩等重力流沉积以及凝灰质岩(详见下文)(杨俊杰,2002;何自新,2003;李相博等,2023),总体单砂层厚度、砂地比均符合上述页岩油标准(国家市场监督管理总局,2020;付锁堂等,2021)。

然而,该研究通过鄂尔多斯盆地陇东地区24口井延长组长7油层组(取心长度790.47 m)各岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm的高分辨率岩心观察、描

收稿日期:2024-03-15;修回日期:2024-06-12;录用日期:2024-07-15;网络出版日期:2024-07-15

基金项目:陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(23JP197);榆林大学博士科研启动基金项目(18GK28);中国石油集团测井有限公司长庆分公司横向项目(ZYCJ-1Q-2023-JS-2298);陕西省科技厅科研计划项目(24GXBYXM511)

述(详见下文),以及405块样品的体视显微镜和薄片鉴定等,发现长庆油田岩心地质录井中不但存在较严重的岩石类型误判问题,而且各岩石类型单层厚度分辨率基本为10 cm(≥ 10 cm),使得厚度小于10 cm、主要呈条带状和撕裂屑状的相对薄层岩石类型常被忽略描述,从而造成大量岩石类型组合长期被当成单一岩石类型且以主要岩石类型命名描述(梁晓伟等,2022;付金华等,2023),并以这种单一岩石类型的划分思路指导长7油层组页岩油的测井识别(周正龙等,2016)、勘探开发(付金华等,2020)或工艺措施改进(付金华等,2022)等。因此,亟需开展鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组页岩油岩石类型组合及储集能力定量评价新方法的研究。本研究通过大量文献资料的调研以及鄂尔多斯盆地陇东地区长7油层组页岩油勘探开发的生产实践,在对比长庆油田长7油层组岩心地质录井描述的基础上,开展了其各岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm的高分辨率岩心观察、描述(详见下文),识别出长7油层组11种主要的岩石类型,划分出4种岩石类型组合形式、65种岩石类型组合,并提出了65种岩石类型组合储集能力的定量计算方法,进而将长7油层组划分出1、2类有利储层性岩石类型组合,旨在指导其页岩油的勘探开发。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是在华北克拉通地块基础上发育起来的中新生界含油气沉积盆地,北达阴山、西抵贺兰山—六盘山、南至秦岭、东接吕梁山,横跨蒙、宁、甘、陕、晋五省区,根据基底性质、现今构造形态及特征又可进一步划分为伊盟隆起、西缘逆冲带、渭北隆起、天环向斜、陕北斜坡、晋西挠褶带六个一级构造单元(杨俊杰,2002;何自新,2003)(图1a)。盆地上三叠统延长组自下而上可分为长10—长1共十个油层组,记录了鄂尔多斯大型内陆湖盆从发生、发展到消亡的完整演化历史,其中长7油层组黑色页岩等优质烃源岩发育(郑庆华等,2020;李相博等,2023)。

鄂尔多斯盆地陇东地区北邻吴起、西达崇信、南接旬邑、东过塔尔湾,是鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7油层组最重要的页岩油产区,其内黑色页岩等优质烃源岩发育(图1a,b)。该研究的24口井大致沿环县—马岭—庆城—合水—正宁—一线呈北西—南东向分布,基本位于陇东地区页岩油主要产区(图1b)。

2 长7油层组主要的岩石类型

2.1 岩石类型划分标准

目前,国内外陆源碎屑岩粒度划分标准主要有十进制和2的几何数制两种类型。在长庆油田岩心地质录井和科研生产中,针对鄂尔多斯盆地陇东地区长7油层组陆源碎屑岩,特别是粉砂岩、细砂岩十进制和2的几何数制的粒度划分标准长期存在混用的问题,常将细砂岩和部分粉砂岩统一描述为细砂岩或粉细砂岩。本研究主要采用2的几何数制粒度分级标准和石油天然气行业SY/T 5368—2016岩石薄片鉴定标准(国家石油和化学工业局,2000),划分鄂尔多斯盆地陇东地区长7油层组陆源碎屑岩岩石类型,但鉴于极细砂岩和细砂岩在其岩心地质录井和科研生产中正确区分的可操作性较小,因此参考十进制粒度划分标准,将极细砂岩、细砂岩统一划分、描述为细砂岩(表1)。

同时,鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组发育的火山碎屑岩基本为凝灰质岩,即凝灰岩(凝灰物质含量大于90%)、沉凝灰岩(凝灰物质含量介于50%~90%)及凝灰质沉积岩(凝灰物质含量介于10%~50%)的统称(李兆鼎等,1984;中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类命名小组,1984;郑庆华,2017;Zheng *et al.*, 2020)。参考上述粒度分级标准,依据凝灰质岩中50%及以上碎屑颗粒粒径分布范围分别为小于0.015 6 mm、0.015 6~0.062 5 mm(0.015 6 mm \leq 粒径<0.062 5 mm)、0.062 5~0.25 mm(0.062 5 mm \leq 粒径<0.25 mm),划分出泥级、粉砂级及细砂级凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰质沉积岩共计九种岩石类型(郑庆华,2017;Zheng *et al.*, 2020)(表1)。其中,长7油层组凝灰岩主要为细砂级凝灰岩、泥级凝灰岩;沉凝灰岩主要为粉砂级沉凝灰岩、细砂级沉凝灰岩,鉴于二者在实际的岩心观察中较难区分,故统一划分、描述为粉—细砂级沉凝灰岩;由于凝灰质沉积岩在实际的岩心观察中较难与泥岩、粉砂岩、细砂岩等陆源碎屑岩区分,故统一划分、描述为陆源碎屑岩。

2.2 岩石类型划分结果

在陇东地区24口井长7油层组取心长度790.47 m的岩心地质录井中,共识别出10种“岩石类型”,分别为黑色碳质泥岩、灰黑色泥岩、深灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、钙质细砂岩、凝

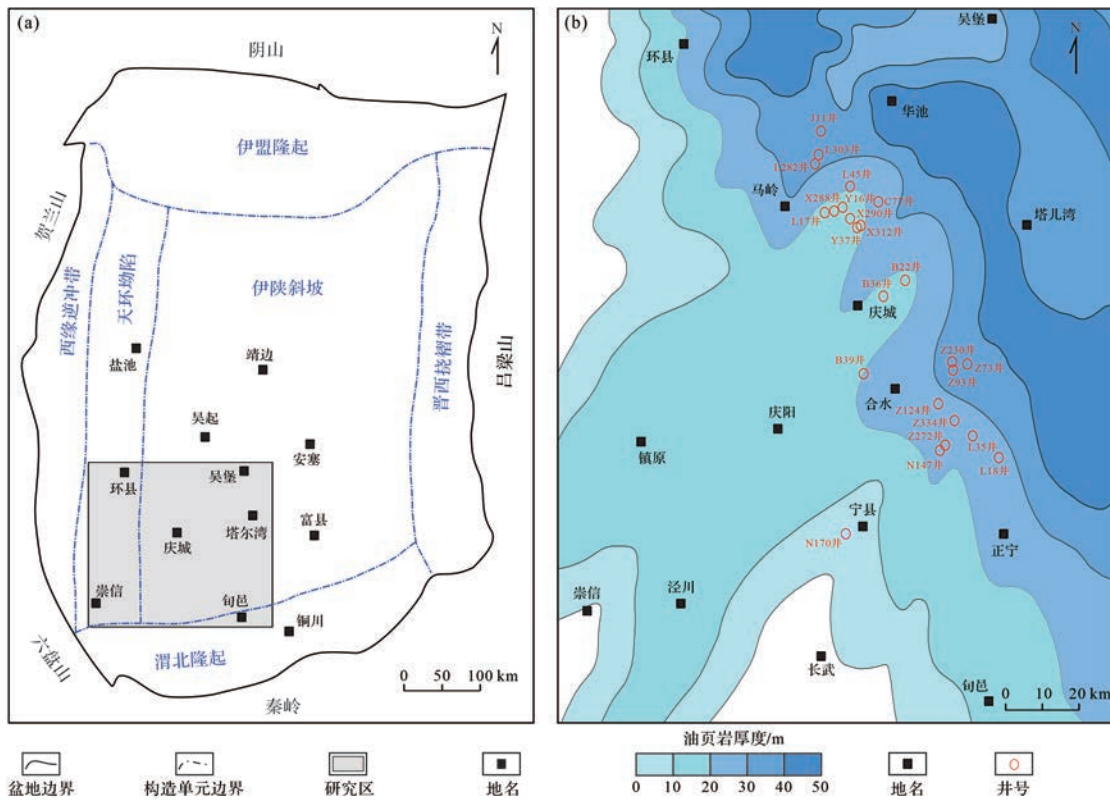


图1 (a)鄂尔多斯盆地构造单元划分(据杨俊杰,2002 修改);(b)研究区长7油层组黑色页岩厚度分布图(据杨华等,2013 修改)

Fig.1 (a) Structural units of the Ordos Basin (modified from Yang, 2002); (b) isopach map for the black shale of the Chang 7 oil member in the study area (modified from Yang *et al.*, 2013)

表1 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组碎屑岩颗粒粒级分类(据郑庆华,2017;Zheng *et al.*,2020 修改)

Table 1 Grainsize classification of clastic rock particles from Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin (modified from Zheng, 2017; Zheng *et al.*, 2020)

粒级类	陆源碎屑岩				凝灰质岩		
	十进制		2的几何数制		凝灰岩	沉凝灰岩	凝灰质沉积岩
	粒径/mm	粒级亚类	粒径/mm	粒级亚类			
砂	0.10~0.25	细砂	0.125~0.250	细砂	细砂级	细砂级	细砂级
			0.062 5~0.125 0	极细砂	凝灰岩	沉凝灰岩	凝灰质沉积岩
粉砂	0.05~0.10	粗粉砂	0.031 3~0.062 5	粗粉砂	粉砂级	粉砂级	粉砂级
			0.015 6~0.031 3	细粉砂	凝灰岩	沉凝灰岩	凝灰质沉积岩
黏土(泥)	<0.01	黏土(泥)	<0.015 6	黏土(泥)	泥级	泥级	泥级
					凝灰岩	沉凝灰岩	凝灰质沉积岩

灰岩、凝灰质泥岩(表2)。

通过各岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm的高分辨率岩心观察(详见下文)以及405块样品的体视显微镜和薄片鉴定等(表3),对上述鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组取心长度790.47 m的岩心进行了重新的观察和描述,所识别的岩石类型组合形式及岩石类型组合详见下文。该研究在陇东地区24

口井长7油层组识别出主要的岩石类型11种(表3、图1,2),为与上述岩心地质录井描述对比,岩石类型组合也以主要岩石类型命名,统计结果如表3所示,“岩石类型”分别为黑色页岩(35块样)、灰黑—黑色泥岩(29块样)、浅灰—黑灰色泥岩(43块样)、粉砂质泥岩(67块样)、泥质粉砂岩(47块样)、粉砂岩(16块样)、细砂岩(97块样)、钙质细砂岩(18块样)、泥级凝

表2 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组地质录井公司描述“岩石类型”厚度统计表

Table 2 Statistical table of rock type thickness described by geological logging company of Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

泥岩/m				泥质粉砂岩/m	粉砂岩/m	细砂岩/m	钙质细砂岩/m	凝灰质岩/m	
黑色碳质泥岩	灰黑色泥岩	深灰色泥岩	粉砂质泥岩					凝灰岩	凝灰质泥岩
14.73	14.66	118.43	39.39	84.48	8.77	508.46	0.48	0.62	0.45

表3 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组本次研究描述“岩石类型”厚度统计表

Table 3 Statistics table of rock type thickness described in this study of Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

泥岩/m				泥质粉砂岩/m	粉砂岩/m	细砂岩/m	钙质细砂岩/m	凝灰质岩/m		
黑色页岩	灰黑—黑色泥岩	浅灰—黑灰色泥岩	粉砂质泥岩					泥级凝灰岩	细砂级凝灰岩	粉—细砂级沉凝灰岩
23.09	7.63	42.62	39.42	78.5	13.01	559.33	7.51	6.61	10.19	2.56

灰岩(25块样)、细砂级凝灰岩(17块样)、粉—细砂级沉凝灰岩(11块样)。

该研究与地质录井长7油层组岩心划分、描述的“岩石类型”及“厚度”差别较大(表2,3、图2),表明地质录井“岩石类型”的识别存在较大的误判。如本次岩心描述黑色页岩、灰黑—黑色泥岩、浅灰—黑灰色泥岩与地质录井岩心描述的黑色碳质泥岩、灰黑色泥岩、深灰色泥岩的对应性较差,特别是地质录井岩心所描述的大量深灰色泥岩实际为黑色页岩(图2a,b)、黑色泥岩(图2c,d)或黑灰色泥岩(图2e,f);粉砂质泥岩、泥质粉砂岩也见误判,如地质录井岩心所描述的大量深灰色粉砂质泥岩、灰黑色粉砂质泥岩实际为灰色粉砂质泥岩(图2g,h)、灰色泥质粉砂岩(图2i,j);粉砂岩(图2k,l)、细砂岩(图2m,n)、钙质细砂岩(图2o,p)也常出现地质录井的误判;同时,泥级凝灰岩、细砂级凝灰岩、粉—细砂级沉凝灰岩等凝灰质岩也常被地质录井误判为泥岩(图2q-t)、细砂岩(图2u,v)、泥质粉砂岩(图2w,x)等。

3 长7油层组岩石类型组合划分

当鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组岩石类型无明显的组合特征时,该研究将岩石类型观察和描述的单层厚度下限定为1 cm,即当岩石类型单层厚度 ≥ 1 cm时,各岩石类型需单独划分、描述。

当2种或3种岩石类型发生明显的组合特征时(通常以2种岩石类型出现组合为主),由于次要岩石类型通常主要呈带状或撕裂屑状分布于主要岩石类型中(图3),为了突出这种岩石类型上的组合特征,本研究将次要岩石类型划分、描述的单层厚度上限

定为5 cm,即次要岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm($1 \text{ cm} \leq \text{次要岩石类型单层厚度} < 5 \text{ cm}$);当(次要)岩石类型单层厚度大于5 cm时,各岩石类型需单独划分、描述,此时无主要岩石类型和次要岩石类型组合之分,也就无岩石类型组合之说;同时,多种次要岩石类型出现时,厚度百分比相对大的次要岩石类型需放到前面进行描述。

最终,根据上述11种主要的岩石类型厚度百分比及组合特征将鄂尔多斯盆地延长组长7油层组进一步划分为单一型、含层型、夹层型、互层型4种岩石类型组合形式,4种岩石类型组合形式又进一步划分出65种岩石类型组合。

3.1 岩石类型组合形式

3.1.1 单一型

单一型岩石类型组合形式可简化定义为主要岩石类型,其中主要岩石类型厚度百分比大于95%,次要岩石类型厚度百分比小于5%(图3a)。如细砂岩(主要)与黑色页岩(次要1)、黑色泥岩(次要2)组合(即次要岩石类型以黑色页岩为主,黑色泥岩次之),若细砂岩厚度百分比大于95%,黑色页岩和黑色泥岩厚度百分比之和小于5%,则直接定义为细砂岩。

3.1.2 含层型

含层型岩石类型组合形式定义为主要岩石类型含次要岩石类型,主要岩石类型厚度百分比介于90%~95%,次要岩石厚度百分比介于5%~10%(图3b)。如细砂岩(主要)与黑色页岩(次要1)、黑色泥岩(次要2)组合(即次要岩石类型以黑色页岩为主,黑色泥岩次之),若细砂岩厚度百分比介于90%~95%,黑色页岩和黑色泥岩厚度百分比之和介于5%~

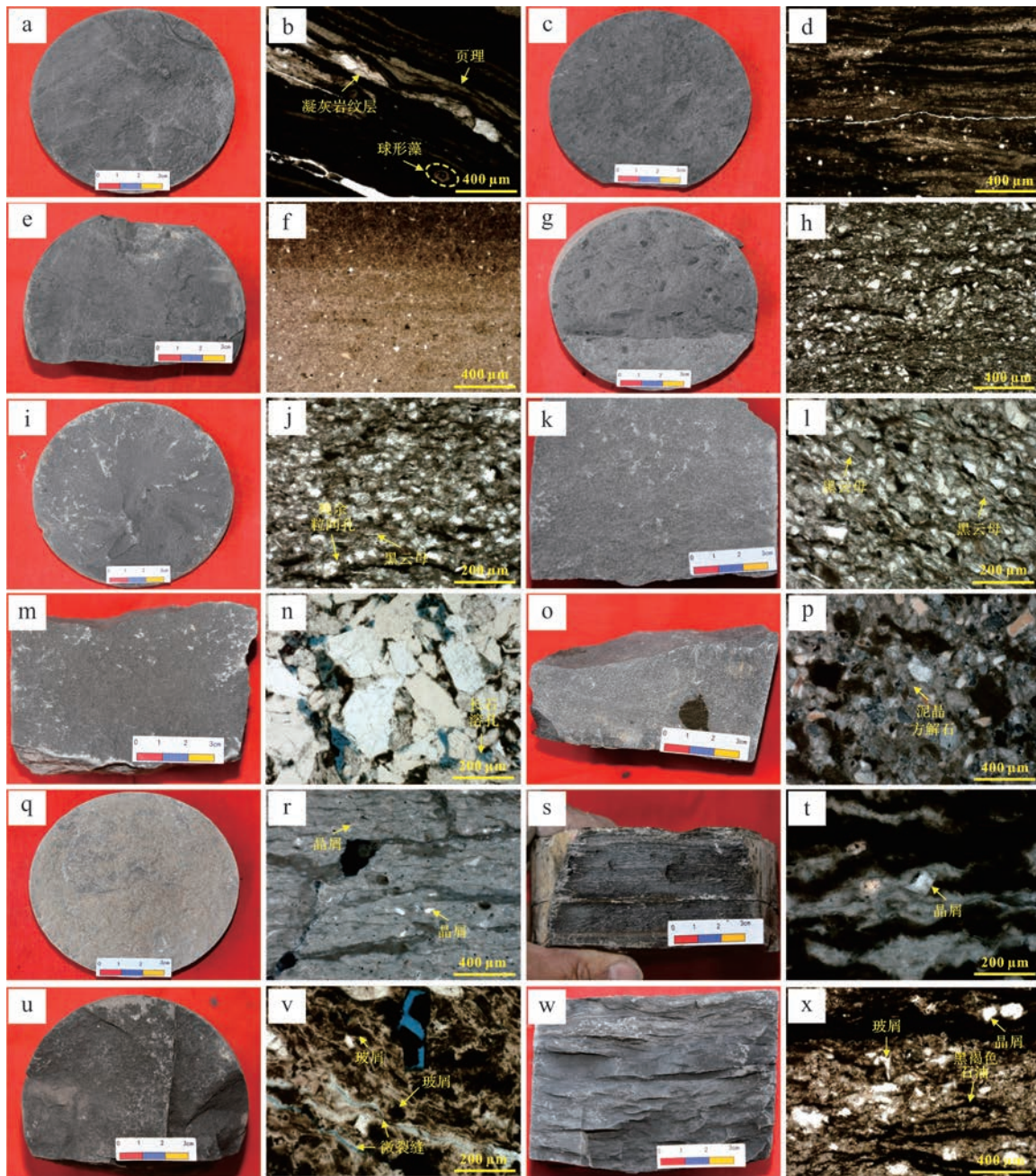


图2 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组主要的岩石类型

(a)B36井,长 7_2 ,1 962.12 m,黑色页岩,地质录井岩心描述为深灰色泥岩;(b)图a的单偏光镜下特征,发育黑色有机质、球形藻、页理;(c)X290井,长 7_1 ,1 817.65 m,黑色泥岩,地质录井岩心描述为深灰色泥岩;(d)图c的单偏光镜下特征,黑色有机质较发育,水平层理发育;(e)L282井,长 7_2 ,2 190.96 m,黑灰色泥岩,地质录井岩心描述为深灰色泥岩;(f)图e的单偏光镜下特征,黑色有机质不发育,块状层理发育;(g)X290井,长 7_3 ,1 868.16 m,灰色粉砂质泥岩,地质录井岩心描述为深灰色粉砂质泥岩;(h)图g的单偏光镜下特征,粉砂级碎屑颗粒发育;(i)L303井,长 7_1 ,2 061.57 m,灰色泥质粉砂岩,地质录井岩心描述为灰黑色粉砂质泥岩;(j)图i的单偏光镜下特征,泥质发育;(k)Z124井,长 7_2 ,1 692.05 m,浅灰褐色粉砂岩,地质录井岩心描述为褐灰色细砂岩;(l)图k的单偏光镜下特征,泥质较发育,黑云母定向分布;(m)B36井,长 7_2 ,1 953.12 m,灰褐色细砂岩,地质录井岩心描述为褐灰色细砂岩;(n)图m的单偏光镜下特征,细砂岩;(o)B36井,长 7_2 ,1 962.48 m,浅灰褐色钙质细砂岩,地质录井岩心描述为褐灰色细砂岩;(p)图o的单偏光镜下特征,钙质胶结;(q)Y16井,长 7_2 ,2 081.41 m,含少量黑色有机质棕褐色泥级凝灰岩,黑色有机质发育处显示黑灰色泥岩特征,地质录井岩心描述为灰黑色泥岩;(r)图q的正交偏光下插入石膏试板特征,不富含黑色有机质处见大量片状矿物且定向分布,显示最高干涉色二级蓝绿;(s)L303井,长 7_2 ,2 089.40 m,富含黑色有机质棕褐色泥级凝灰岩,整体显示黑色页岩特征,但黑色有机质不发育处显示棕褐色泥级凝灰岩特征,地质录井岩心描述为灰黑色泥岩;(t)图s的正交偏光下插入石膏试板特征,见大量黑色有机质,其中不富含黑色有机质处见生成大量片状物且定向分布,整体显示最高干涉色二级蓝绿;(u)B39井,长 7_3 ,1 863.38 m,浅棕褐色细砂级凝灰岩,其中富含黑色有机质处显示灰褐色细砂岩特征,地质录井岩心描述为浅灰色油迹细砂岩;(v)图u的单偏光特征,斑脱岩化强烈,见少量残存的晶屑,发育灰褐—黑褐色玻屑、微裂缝;(w)J11井,长 7_3 ,2 182.65 m,黑褐色粉砂级凝灰岩,发育槽状交错层理,地质录井岩心描述为灰色泥质粉砂岩;(x)图w的单偏光特征,斑脱岩化强烈,见少量残存晶屑、玻屑,发育微裂缝和黑色石油

Fig.2 Main rock types of Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

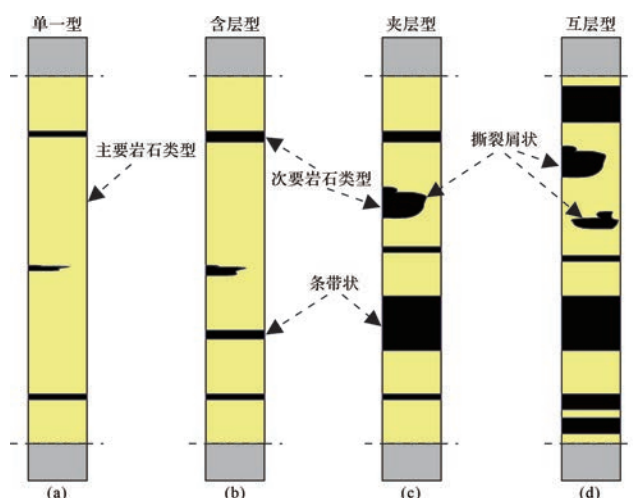


图3 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组4种岩石类型组合形式划分示意图

(a)单一型岩石类型组合形式,次要岩石类型厚度百分比小于5%,简化定义为主要岩石类型;(b)含层型岩石类型组合形式,次要岩石类型厚度介于5%~10%,定义为主要岩石类型含次要岩石类型;(c)夹层型岩石类型组合形式,次要岩石类型厚度百分比介于10%~40%,定义为主要岩石类型夹次要岩石类型;(d)互层型岩石类型组合形式,次要岩石类型厚度百分比介于40%~50%,定义为主要岩石类型与次要岩石类型互层

Fig.3 Division schematic of four rock type combination forms in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

10%且黑色页岩厚度百分比大于黑色泥岩,则直接定义为细砂岩含黑色页岩、黑色泥岩。

3.1.3 夹层型

夹层型岩石类型组合形式定义为主要岩石类型夹次要岩石类型,主要岩石类型厚度百分比介于60%~90%,次要岩石厚度百分比介于10%~40%(图3c)。如细砂岩(主要)与黑色页岩(次要1)、黑色泥岩(次要2)组合(即次要岩石类型以黑色页岩为主,黑色泥岩次之),若细砂岩厚度百分比介于60%~90%,黑色页岩和黑色泥岩厚度百分比之和介于10%~40%且黑色页岩厚度百分比大于黑色泥岩,则直接定义为细砂岩夹黑色页岩、黑色泥岩。

3.1.4 互层型

互层型岩石类型组合形式定义为主要岩石类型与次要岩石类型互层,主要岩石类型厚度百分比介于50%~60%,次要岩石厚度百分比介于40%~50%(图3d)。如细砂岩(主要)与黑色页岩(次要1)、黑色泥岩(次要2)组合(即次要岩石类型以黑色页岩为主,黑色泥岩次之),若细砂岩厚度百分比介于50%~60%,黑色页岩和黑色泥岩厚度百分比之和介于40%~50%且黑色页岩厚度百分比大于黑色泥岩,则直接定义为细砂岩与黑色页岩、黑色泥岩互层。

3.2 岩石类型组合

3.2.1 单一型

由于鄂尔多斯盆地延长组长7油层组单一型岩

石类型组合形式中的次要岩石类型基本可以忽略,因此其岩石类型组合可理解为上述11种主要的岩石类型,分别为黑色页岩、灰黑—黑色泥岩、浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、钙质细砂岩、泥级凝灰岩、细砂级凝灰岩、粉—细砂级沉凝灰岩,厚度上以细砂岩为主,其次为泥质粉砂岩、浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩、黑色页岩(表4)。

3.2.2 含层型

根据次要岩石类型主要划分为5大类岩石类型组合,分别为含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩类型组合(含层型-1),含黑色页岩类型组合(含层型-2),含粉砂—细砂岩类型组合(含层型-3),含灰黑—黑色泥岩类型组合(含层型-4),含泥级凝灰岩类型组合(含层型-5)。5大类岩石类型组合进一步又可细分为20小类岩石类型组合(表4)。厚度上以细砂岩含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩,泥质粉砂岩含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩,细砂岩含黑色页岩,浅灰—黑灰色泥岩含粉砂—细砂岩,细砂岩含灰黑—黑色泥岩,黑色页岩含泥级凝灰岩等6类岩石类型组合为主。

3.2.3 夹层型

根据次要岩石类型主要划分为5大类岩石类型组合,分别为夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩类型组合(夹层型-1),夹黑色页岩类型组合(夹层型-2),夹粉砂—细砂岩类型组合(夹层型-3),夹灰黑—黑色

表4 鄂尔多斯盆地陇东地区24口井延长组长7油层组岩石类型组合厚度统计表
Table 4 Thickness of rock type combinations in 24 wells from Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

岩石类型组合形式	岩石类型组合		累计厚度/m	岩石类型组合形式	岩石类型组合		累计厚度/m
	主要岩石类型	次要岩石类型			主要岩石类型	次要岩石类型	
单一型	黑色页岩		12.95	钙质细砂岩		1.19	
	灰黑—黑色泥岩		5.98	泥级凝灰岩	夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	0.16	
	浅灰—黑灰色泥岩		29.53	粉砂质泥岩		0.08	
	粉砂质泥岩		29.41	合计		92.13	
	泥质粉砂岩		29.65	细砂岩		33.48	
	粉砂岩	忽略	5.04	泥质粉砂岩		3.75	
	细砂岩		434.01	细砂级凝灰岩		1.73	
	钙质细砂岩		4.87	浅灰—黑灰色泥岩	夹黑色页岩	0.49	
	细砂级凝灰岩		7.77	粉砂质泥岩		0.50	
	泥级凝灰岩		6.28	粉—细砂级沉凝灰岩		0.38	
	粉—细砂级沉凝灰岩		2.18	粉砂岩		0.06	
	合计			567.67	合计		40.39
含层型	细砂岩		16.04	浅灰—黑灰色泥岩		10.18	
	泥质粉砂岩	含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	5.12	粉砂质泥岩		6.34	
	钙质细砂岩		0.24	黑色页岩	夹粉砂—细砂岩	3.97	
	合计			21.40	泥质粉砂岩	1.68	
	细砂岩		11.71	灰黑—黑色泥岩		1.32	
	钙质细砂岩		1.21	细砂岩		0.87	
	泥质粉砂岩	含黑色页岩	0.40	合计		24.36	
	细砂级凝灰岩		0.36	细砂岩		5.56	
	粉砂岩		0.19	泥质粉砂岩	夹灰黑—黑色泥岩	2.39	
	泥级凝灰岩		0.17	粉砂质泥岩		1.03	
	合计			14.04	粉砂岩	0.63	
	含层型	浅灰—黑灰色泥岩		1.75	合计		9.61
细砂岩			1.47	黑色页岩		4.27	
黑色页岩		含粉砂—细砂岩	0.97	灰黑—黑色泥岩	夹泥级凝灰岩	0.18	
粉砂质泥岩			0.74	浅灰—黑灰色泥岩		0.13	
泥质粉砂岩			0.45	粉砂质泥岩		0.05	
合计			5.38	合计		4.63	
细砂岩			4.16	合计		171.12	
泥质粉砂岩		含灰黑—黑色泥岩	0.53	泥质粉砂岩	与浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩互层	2.36	
细砂级凝灰岩			0.30	细砂岩		0.26	
合计			4.99	合计		2.62	
黑色页岩			0.83	粉砂质泥岩		1.09	
粉砂质泥岩		含泥级凝灰岩	0.18	浅灰—黑灰色泥岩	与粉砂—细砂岩互层	0.54	
灰黑—黑色泥岩		0.15	黑色页岩		0.10		
合计			1.16	合计		1.73	
合计			46.97	细砂岩	与黑色页岩互层	0.33	
夹层型	细砂岩		51.44	细砂级凝灰岩		0.03	
	泥质粉砂岩	夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	32.17	合计		0.36	
	粉砂岩		7.09	合计		4.71	

泥岩类型组合(夹层型-4),夹泥级凝灰岩类型组合(夹层型-5)。5大类岩石类型组合进一步又可细划分为27小类岩石类型组合(表4)。厚度上以细砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩,泥质粉砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩,粉砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩,细砂岩夹黑色页岩,泥质粉砂岩夹黑色页岩,浅灰—黑灰色泥岩夹粉砂—细砂岩,粉砂质泥岩夹粉砂—细砂岩,黑色页岩夹粉砂—细砂岩,细砂岩夹灰黑—黑色泥岩,黑色页岩夹泥级凝灰岩等10种岩石类型组合为主。

3.2.4 互层型

根据次要岩石类型主要划分为3大类岩石类型组合,分别为与浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩互层类型组合(互层型-1),与粉砂—细砂岩互层类型组合(互层型-2),与黑色页岩互层类型组合(互层型-3)。5大类岩石类型组合进一步又可细划分为7小类岩石类型组合(表4)。厚度上以泥质粉砂岩与浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩互层,粉砂质泥岩与粉砂—细砂岩互层,细砂岩与黑色页岩互层等3种岩石类型组合为主。

4 长7油层组储集能力定量评价

在上述鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组11种岩石类型储集能力定量评价基础上,结合各岩石类型厚度百分比,首次提出了定量计算其4种岩石类型组合形式之65种岩石类型组合储集能力的新方法。

4.1 11种岩石类型储集能力定量评价

该研究在陇东地区长7油层组岩心所描述的11种岩石类型物性分析基础上,辅以岩石薄片、聚焦离子束—扫描电镜(Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope, FIB-SEM)观察及页岩油开发前景,采用储集能力分值5分制的定量评价法对长7油层组各岩石类型储集能力进行评价,分值越高,储集能力越强,划分出1类、2类、3类储层性岩石类型(表5)。其中,1类储层性岩石类型包括细砂岩、细砂级凝灰岩和粉—细砂级沉凝灰岩;2类储层性岩石类型包括粉砂岩、泥质粉砂岩;3类储层性岩石类型包括钙质细砂岩、泥级凝灰岩、粉砂质泥岩、浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩和黑色页岩。

表5 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组11种岩石类型物性统计表

Table 5 Physical properties of 11 rock types in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

物性参数	岩石类型										
	1类储层性			2类储层性			3类储层性				
	细砂岩	细砂级凝灰岩	粉—细砂级沉凝灰岩	粉砂岩	泥质粉砂岩	钙质细砂岩	泥级凝灰岩	粉砂质泥岩	浅灰—黑灰色泥岩	灰黑—黑色泥岩	黑色页岩
样品数	246	15	5	27	61	8	4	4		/	/
孔隙度/%	最大值	11.9	10.8	9.1	9.7	7.9	6.4	6.4	4.9		/
	最小值	4.0	3.5	5.3	5.6	3.1	1.2	1.3	2.2		/
	平均值	9.1	7.6	7.1	7.2	6.0	3.4	4.4	3.5		2.1
渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	样品数	234	14	5	27	61	8	4	4		/
	最大值	0.77	0.80	0.72	0.12	0.13	0.05	0.04	0.03		/
	最小值	0.10	0.01	0.03	0.01	0.006	0.01	0.005	0.004		/
	平均值	0.20	0.22	0.23	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01		<0.01
储集能力分值/无量纲	5	4.5	4.5	4	3	2	2	1.5		1	1

注:浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩、黑色页岩物性数据引自付金华等,2020。

4.1.1 1类储层性岩石类型

相对而言,细砂岩岩石类型残余粒间孔与长石溶孔发育,孔隙结构好(图2m,n),平均孔隙度(9.1%)、平均渗透率($0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)相对高,含油性好,是长7油层组储集能力和页岩油开发相对最好的岩石类型,储集能力分值定为5;细砂级凝灰岩(图2u,v)和粉—细砂级沉凝灰岩(图2w,x)常发育微裂缝,平均渗透率($0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)相对细砂岩微高,但平均孔隙度(7.6%、7.1%)相对细砂岩明显偏低,含油性好,由于二者物性基本相当,储集能力分值均定为4.5(表5)。

4.1.2 2类储层性岩石类型

粉砂岩(图2k,l)、泥质粉砂岩(图2i,j)泥质较为发育,机械压实作用较强,孔隙较不发育,平均孔隙度(7.2%、6.0%)、平均渗透率($0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)相对1类储层孔隙度低、渗透率明显偏低,为长7油层组储集能力中等的岩石类型。因为粉砂岩相对泥质粉砂岩物性、含油性较好,所以将粉砂岩储集能力分值定为4,而泥质粉砂岩储集能力分值定为3(表5)。

4.1.3 3类储层性岩石类型

主要包括钙质细砂岩(图2o,p)、泥级凝灰岩(图2q~t)、粉砂质泥岩(图2g,h)、浅灰—黑灰色泥岩(图2e,f)、灰黑—黑色泥岩(图2c,d)和黑色页岩(图2a,

b),其平均孔隙度介于1.9%~4.4%、平均渗透率小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,页岩油勘探开发难度较大,可定义为3类储层性岩石类型。

相对而言,由于钙质细砂岩和泥级凝灰岩物性相当,相对于粉砂质泥岩、浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩和黑色页岩脆性较强、渗透率微高,故储集能力分值均定为2.0;粉砂质泥岩由于含粉砂而相对于浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩和黑色页岩物性较好,故储集能力分值定为1.5;浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩和黑色页岩物性相对最差,故储集能力分值定为1.0(表5),其中浅灰—黑灰色泥岩、灰黑—黑色泥岩平均孔隙度(2.1%)、平均渗透率($<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)虽然与黑色页岩平均孔隙度(1.9%)、平均渗透率($<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)相当(表5),但其可压裂性、页岩油可动性、工业化开采前景性均好于黑色页岩(杨华等,2016;刘翰林等,2023;徐明慧等,2025)。

前人通过FIB-SEM对富有机质黑色页岩有机孔三维结构的测试研究,认为有机质分布越集中,有机质孔隙连续性越好,储集能力越好(王羽等,2018)。FIB-SEM测试表明,研究区长7油层组黑色页岩岩石类型富含黑色有机质(图2a,b、图4a,b),常见有机质内孔隙大量发育(图4a~d)或有机质充填晶间孔隙(图4e)以及有机质收缩在矿物颗粒边

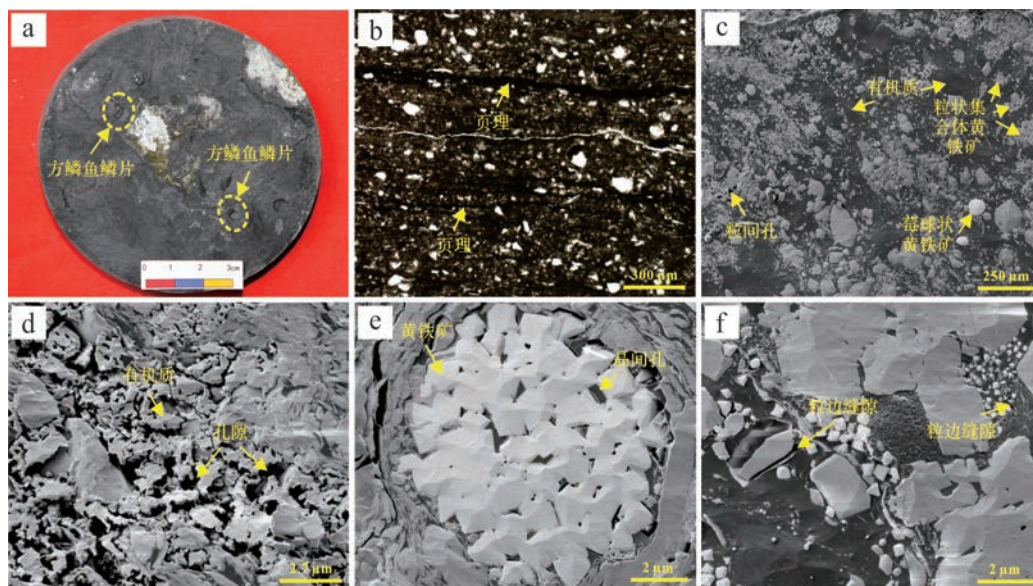


图4 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组黑色页岩特征

(a)B36井,长 7_2 ,1966.82 m,黑色页岩,发育鱼化石;(b)图a的单偏光镜下特征,发育黑色有机质、页理;(c)图a的聚焦离子束—扫描电镜(FIB-SEM)下图像特征,见有机质、莓球状和粒状黄铁矿以及粒间孔;(d)图c中有机质内孔隙;(e)图c中莓球状黄铁矿内晶间孔发育,其间充填有机质;(f)图e中有机质收缩缝隙;聚焦离子束—扫描电镜(FIB-SEM)测试由西北大学大陆演化与早期生命全国重点实验室完成,仪器型号Helios G4 UC型聚焦离子束—扫描电镜(FIB-SEM)

Fig.4 Characteristics of black shale in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

缘形成的粒边缝发育(图4f),虽然平均孔隙度(1.9%)、平均渗透率($<0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)相对最低(表5),但该岩石类型却可能具有较好的原位加热改质开采前景(杨华等,2016;张家强等,2021;李士祥等,2023)。

4.2 岩石类型组合储集能力定量评价

4.2.1 储集能力定量评价依据

1) 单一型

单一型岩石类型组合形式次要岩石占比介于0~5%,故根据其中间值2.5%,储集能力分值系数取平均值0.025,近似为0。故当发育的1种或2种次要岩

石类型可以忽略,岩石类型组合储集能力值=*岩石类型储集能力值(表6)。

2) 含层型

含层型岩石类型组合形式次要岩石占比5%~10%,故根据其中间值7.5%,储集能力分值系数取平均值0.075。

当仅发育1种次要岩石类型时,岩石类型组合储集能力值=*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.075)$ +**岩石类型储集能力值 $\times 0.075$ (表6)。该研究根据大量的岩心观察和统计,发现当次要岩石类型发育2种时,即*岩石类型(主要)含**岩石类型(次要1)、***岩石类

表6 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组岩石类型组合储集能力分值计算方法

Table 6 Reservoir capacity calculating methods of rock type combinations in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong area, Ordos Basin

岩石类型组合形式	岩石类型组合	储集能力分值系数/无量纲	主要岩石类型储集能力分值/无量纲	次要岩石类型储集能力值/无量纲		岩石类型组合储集能力值/无量纲
				次要岩石类型1	次要岩石类型2	
单一型	*岩石类型见**岩石类型	0	*岩石类型储集能力值 $\times 1$	0	0	合计值
	*岩石类型见**岩石类型、***岩石类型	0	*岩石类型储集能力值 $\times 1$	0	0	合计值
含层型	*岩石类型含**岩石类型	0.075	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.075)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.075$	0	合计值
	*岩石类型含**岩石类型、***岩石类型	0.075	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.075)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.075 \times (2/3)$	***岩石类型储集能力值 $\times 0.075 \times (1/3)$	合计值
夹层型	*岩石类型夹**岩石类型	0.25	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.25)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.25$	0	合计值
	*岩石类型夹**岩石类型、***岩石类型	0.25	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.25)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.25 \times (2/3)$	***岩石类型储集能力值 $\times 0.25 \times (1/3)$	合计值
互层型	*岩石类型与**岩石类型互层	0.45	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.45)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.45$	0	合计值
	*岩石类型与**岩石类型、***岩石类型互层	0.45	*岩石类型储集能力值 $\times(1-0.45)$	**岩石类型储集能力值 $\times 0.45 \times (2/3)$	***岩石类型储集能力值 $\times 0.45 \times (1/3)$	合计值

注:*岩石类型为为主要岩石类型,**岩石类型为次要岩石类型1,***岩石类型为次要岩石类型2。

型(次要2)时,可统一将主要的次要岩石类型**岩石类型(次要1)描述在前面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的2/3;将次要的次要岩石类型***岩石类型(次要2)描述在后面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的1/3。岩石类型组合储集能力值= $\text{*岩石类型储集能力值} \times (1-0.075) + \text{**岩石类型储集能力值} \times 0.075 \times (2/3) + \text{***岩石类型储集能力值} \times 0.075 \times (1/3)$ (表6)。

3) 夹层型

夹层型岩石类型组合形式次要岩石占比10%~40%,故根据其中间值25%,储集能力分值系数取平均值0.25。

当仅发育1种次要岩石类型时,岩石类型组合储集能力值= $\text{*岩石类型储集能力值} \times (1-0.25) + \text{**岩石类型储集能力值} \times 0.25$ (表6)。该研究根据大量的岩心观察和统计,发现当次要岩石类型发育2种时,即*岩石类型(主要)夹**岩石类型(次要1)、***岩石类型(次要2),可统一将主要的次要岩石类型**岩石类型(次要1)描述在前面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的2/3;将次要的次要岩石类型***岩石类型(次要2)描述在后面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的1/3。岩石类型组合储集能力值= $\text{*岩石类型储集能力值} \times (1-0.25) + \text{**岩石类型储集能力值} \times 0.25 \times (2/3) + \text{***岩石类型储集能力值} \times 0.25 \times (1/3)$ (表6)。

4) 互层型

互层型岩石类型组合形式次要岩石占比40%~50%,故根据其中间值45%,储集能力分值系数取平均值0.45。

当仅发育1种次要岩石类型时,岩石类型组合储集能力值= $\text{*岩石类型储集能力值} \times (1-0.45) + \text{**岩石类型储集能力值} \times 0.45$ (表6)。该研究根据大量的岩心观察和统计,当次要岩石类型发育2种时,即*岩石类型(主要)与**岩石类型(次要1)、***岩石类型(次要2)互层,可统一将主要的次要岩石类型**岩石类型(次要1)描述在前面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的2/3;将次要的次要岩石类型***岩石类型(次要2)描述在后面,厚度设定为次要岩石类型总厚度的1/3。岩石类型组合储集能力值= $\text{*岩石类型储集能力值} \times (1-0.45) + \text{**岩石类型储集能力值} \times 0.45 \times (2/3) + \text{***岩石类型储集能力值} \times 0.45 \times (1/3)$ (表6)。

4.2.2 储集能力定量评价结果

在上述陇东地区24口井长7油层组65种岩石类型组合进行了储集能力定量评价,储集能力分值也采用5分制,储集能力分值越高,储集能力越强,分别划分为1、2、3、4类储层性岩石类型组合。

当 $5 \geq$ 岩石组合形式储集能力值 >4 时,划分为1类储层性岩石类型组合;当 $4 \geq$ 岩石组合形式储集能力值 >3 时,划分为2类储层性岩石类型组合;当 $3 \geq$ 岩石组合形式储集能力值 >2 时,划分为3类储层性岩石类型组合;当 $2 \geq$ 岩石组合形式储集能力值 >1 时,划分为4类储层性岩石类型组合(表7)。

在上述陇东地区24口井长7油层组65种岩石组合类型储集能力评价基础上,对鄂尔多斯盆地陇东地区Z272井延长组长7油层组各岩心类型组合进行了储集能力定量评价(图1b、图5),其中1、2类储层性岩石类型组合为其页岩油勘探开发的有利层段。

此次开展的鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组页岩油岩石类型组合及储集能力定量评价新方法研究,明确提出了长7油层组页岩油以往长期单一岩石类型的划分思路须向岩石类型组合划分转变,这对其页岩油测井解释、勘探开发或压裂、试油等工艺措施的改进具有重要的理论和现实意义。然而,有关其岩石类型组合划分和储集能力的定量评价研究仍处于探索阶段,尚需结合大量的长7油层组页岩油勘探开发效果进一步完善。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组页岩油岩心地质录井中,各岩石类型单层厚度分辨率基本为10 cm,造成大量岩石类型组合长期被描述为单一岩石类型。

(2) 通过长7油层组各岩石类型单层厚度分辨率1~5 cm的高分辨率岩心观察,识别出11种主要的岩石类型,定量划分出了单一型、含层型、夹层型、互层型4种岩石类型组合形式,65种岩石类型组合。

(3) 长7油层组65种岩石类型组合可依据11种岩石类型储集能力值及厚度百分比,进一步划分出1、2、3、4类储层性岩石类型组合,其中1、2类储层性岩石类型组合为其页岩油勘探开发的有利层段。

表7 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组岩石类型组合储集能力分值

Table 7 Reservoir capacity values of rock type combinations in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong region, Ordos Basin

序号	岩石类型组合	岩石类型组合 储集能力分值	岩石类型组合 储集级别	序号	岩石类型组合	岩石类型组合 储集能力分值	岩石类型组合 储集级别
1	细砂岩	5.00		34	泥质粉砂岩夹黑色泥岩	2.50	
2	细砂岩含粉砂—细砂岩	4.95		35	泥质粉砂岩夹黑色页岩	2.50	3类
3	细砂岩夹粉砂—细砂岩	4.83		36	粉砂质泥岩夹粉砂—细砂岩	2.21	
4	细砂岩含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	4.71		37	泥质粉砂岩与浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩互层	2.18	
5	细砂岩含黑色泥岩	4.70	1类	38	泥级凝灰岩	2.00	
6	细砂岩含黑色页岩	4.70		39	钙质细砂岩	2.00	
7	粉—细砂级沉凝灰岩	4.50		40	钙质细砂岩含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	1.94	
8	细砂级凝灰岩	4.50		41	泥级凝灰岩含黑色页岩	1.93	
9	细砂级凝灰岩含黑色泥岩	4.24		42	钙质细砂岩含黑色页岩	1.93	
10	细砂级凝灰岩含黑色页岩	4.24		43	灰黑—黑色泥岩夹粉砂—细砂岩	1.83	
11	细砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	4.04		44	黑色页岩夹粉砂—细砂岩	1.83	
12	细砂岩夹黑色泥岩	4.00		45	浅灰—黑灰色泥岩夹粉砂—细砂岩	1.83	
13	细砂岩夹黑色页岩	4.00		46	泥级凝灰岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	1.79	
14	粉砂岩	4.00		47	钙质细砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	1.79	
15	粉砂岩含黑色页岩	3.78		48	粉砂质泥岩含粉砂—细砂岩	1.71	
16	粉—细砂级沉凝灰岩夹黑色页岩	3.63	49	粉砂质泥岩夹泥级凝灰岩	1.63		
17	细砂级凝灰岩夹黑色页岩	3.63	50	粉砂质泥岩含泥级凝灰岩	1.54		
18	泥质粉砂岩夹粉砂—细砂岩	3.33	2类	51	粉砂质泥岩	1.50	
19	粉砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	3.29		52	粉砂质泥岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	1.42	4类
20	细砂岩与浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩互层	3.28		53	粉砂质泥岩夹黑色泥岩	1.38	
21	粉砂岩夹黑色泥岩	3.25		54	粉砂质泥岩夹黑色页岩	1.38	
22	粉砂岩夹黑色页岩	3.25		55	浅灰—黑灰色泥岩夹泥级凝灰岩	1.25	
23	细砂岩与黑色页岩互层	3.20		56	灰黑—黑色泥岩夹泥级凝灰岩	1.25	
24	泥质粉砂岩含粉砂—细砂岩	3.10		57	黑色页岩夹泥级凝灰岩	1.25	
25	泥质粉砂岩	3.00		58	黑色页岩含粉砂—细砂岩	1.25	
26	细砂级凝灰岩与黑色页岩互层	2.93		59	浅灰—黑灰色泥岩含粉砂—细砂岩	1.25	
27	泥质粉砂岩含浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	2.86		60	灰黑—黑色泥岩含泥级凝灰岩	1.08	
28	泥质粉砂岩含黑色泥岩	2.85	61	黑色页岩含泥级凝灰岩	1.08		
29	泥质粉砂岩含黑色页岩	2.85	3类	62	浅灰—黑灰色泥岩夹黑色页岩	1.00	
30	粉砂质泥岩与粉砂—细砂岩互层	2.78		63	浅灰—黑灰色泥岩	1.00	
31	泥质粉砂岩夹浅灰—黑灰色泥岩、粉砂质泥岩	2.54		64	灰黑—黑色泥岩	1.00	
32	黑色页岩与粉砂—细砂岩互层	2.50		65	黑色页岩	1.00	
33	浅灰—黑灰色泥岩与粉砂—细砂岩互层	2.50					

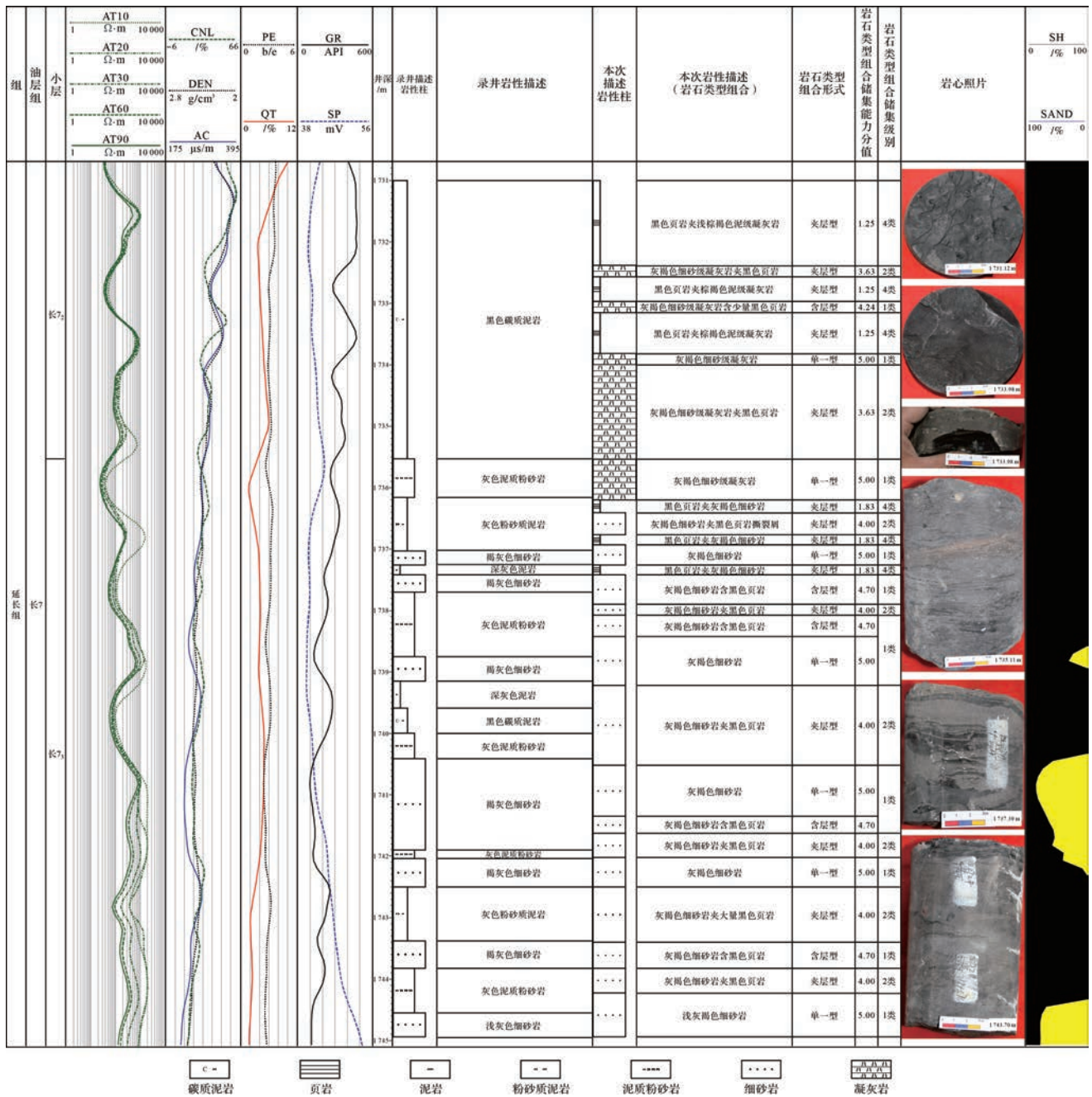


图5 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7油层组单井柱状图(Z272井)

Fig.5 Single well column diagram in Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Longdong area, Ordos Basin (well Z272)

参考文献(References)

付金华,李士祥,牛小兵,等. 2020. 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, 47(5):870-883.

[Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. 2020. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(5): 870-883.]

付金华,牛小兵,李明瑞,等. 2022. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩油风险勘探突破与意义[J]. 石油学报,43(6):760-769,787.

[Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Li Mingrui, et al. 2022. Breakthrough and significance of risk exploration in the 3rd sub-member, 7th member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 43(6): 760-769, 787.]

付金华,王龙,陈修,等. 2023. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 28(5): 1-14. [Fu Jinhua, Wang Long, Chen Xiu, et al. 2023. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the Seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 28(5): 1-14.]

- 付锁堂,金之钧,付金华,等. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 42(5): 561-569. [Fu Suotang, Jin Zhijun, Fu Jinhua, et al. 2021. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(5): 561-569.]
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. GB/T 38718—2020 页岩油地质评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社. [State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. 2020. GB/T 38718—2020 Geological evaluating methods for shale oil[S]. Beijing: Standards Press of China.]
- 国家石油和化学工业局. 2000. SY/T 5368—2000 岩石薄片鉴定[S]. 北京: 石油工业出版社. [State Administration of Petroleum and Chemical Industry. 2000. SY/T 5368—2000 Thin section examination of rock[S]. Beijing: Petroleum Industry Press.]
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社: 80-105. [He Zixin. 2003. Evolution and oil & gas of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 80-105.]
- 李士祥, 郭芪恒, 潘松圻, 等. 2023. 烃类源内微运移对页理型页岩油差异富集的影响: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例[J]. 中国石油勘探, 28(4): 46-54. [Li Shixiang, Guo Qiheng, Pan Songqi, et al. 2023. Influence of intrasource micro-migration of hydrocarbons on the differential enrichment of laminated type shale oil: A case study of the third sub-member of the Seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 28(4): 46-54.]
- 李相博, 朱如凯, 惠潇, 等. 2023. 晚三叠世卡尼期梅雨事件(CPE)在陆相盆地中的沉积学响应: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 沉积学报, 41(2): 511-526. [Li Xiangbo, Zhu Rukai, Hui Xiao, et al. 2023. Sedimentological response of a lacustrine basin to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode (CPE): Case study from the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 511-526.]
- 李兆鼐, 王碧香, 王松产, 等. 1984. 火山碎屑岩及其鉴别[C]//中国地质科学院地质研究所文集(7). 北京: 地质出版社. [Li Zhaonai, Wang Bixiang, Wang Songchan, et al. 1984. The volcanoclastic rock and their identification[C]//Bulletin of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House.]
- 梁晓伟, 鲜本忠, 冯胜斌, 等. 2022. 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, 40(3): 641-652. [Liang Xiaowei, Xian Benzong, Feng Shengbin, et al. 2022. Architecture and main controls of gravity-flow sandbodies in Chang 7 member, Longdong area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(3): 641-652.]
- 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 2023. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制: 以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. 沉积学报, 41(6): 1810-1829. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Qiu Zhen, et al. 2023. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(6): 1810-1829.]
- 王羽, 汪丽华, 王建强, 等. 2018. 基于聚焦离子束—扫描电镜方法研究页岩有机孔三维结构[J]. 岩矿测试, 37(3): 235-243. [Wang Yu, Wang Lihua, Wang Jianqiang, et al. 2018. Three-dimension characterization of organic matter pore structures of shale using focused ion beam - scanning electron microscope[J]. Rock and Mineral Analysis, 37(3): 235-243.]
- 徐明慧, 王峰, 田景春, 等. 2025. 湖相富有机质泥页岩岩相划分及沉积环境: 以鄂尔多斯盆地长7₃亚段为例[J]. 沉积学报, 43(4): 1489-1506. [Xu Minghui, Wang Feng, Tian Jingchun, et al. 2025. Classification of lacustrine organic-rich mud shale petrography and the depositional environment: An example from the Chang 7₃ sub-member in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(4): 1489-1506.]
- 杨华, 李士祥, 刘显阳. 2013. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 34(1): 1-11. [Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. 2013. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(1): 1-11.]
- 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 43(4): 511-520. [Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, et al. 2016. Exploration potential of shale oil in Chang7 member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(4): 511-520.]
- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社: 48-60. [Yang Junjie. 2002. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 48-60.]
- 张家强, 李士祥, 李宏伟, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探: 以城页水平井区长7₃小层为例[J]. 石油学报, 42(5): 570-587. [Zhang Jiaqiang, Li Shixiang, Li Hongwei, et al. 2021. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 570-587.]
- 郑庆华. 2017. 鄂尔多斯盆地长7黑色岩系成因及生烃研究[D]. 西安: 西北大学. [Zheng Qinghua. 2017. The characteristics of origin and oil generation of black rock series in Chang 7 member of Yanchang Formation in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University.]
- 郑庆华, 刘乔, 梁秀玲, 等. 2020. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7油层组沉积相分析[J]. 地层学杂志, 44(1): 35-45. [Zheng Qinghua, Liu Qiao, Liang Xiuling, et al. 2020. Sedimentary facies analysis of the Chang 7 member of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, NW China[J]. Journal of Stratigraphy, 44(1): 35-45.]
- 中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类命名小组. 1984. 火山碎

- 屑岩的分类和命名(国内推荐方案)[J]. 岩石矿物及测试, 3(4): 301-309. [The Group on the Systematics of Volcaniclastic Rocks of the Commission on Petrology of the Geological Society of China. 1984. Classification and nomenclature of volcaniclastic rocks[J]. Acta Petrologica Mineralogica et Analytica, 3(4): 301-309.]
- 周正龙, 王贵文, 冉冶, 等. 2016. 致密油储集层岩性岩相测井识别方法: 以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系延长组7段为例[J]. 石油勘探与开发, 43(1): 61-68, 83. [Zhou Zhenglong, Wang Guiwen, Ran Ye, et al. 2016. A logging identification method of tight oil reservoir lithology and lithofacies: A case from Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(1): 61-68, 83.]
- Zheng Q H, Liu X J, Liu Y Q, et al. 2020. Discovery and identification of clay-sized tuffaceous rocks in Chang 7 member of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. Journal of Central South University, 27(6): 1814-1827.

A New Method for the Quantitative Study of Shale Oil Rock Type Combination and Reservoir Capacity: A case study from Chang 7 oil member of the Yanchang Formation in the Longdong region, Ordos Basin

ZHENG QingHua¹, LIU XingJun², ZHANG RongLi², WANG ZiLiang², WANG Ke³

1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China

2. Changqing Branch, China Petroleum Well Logging Limited Company, Xi'an 710200, China

3. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: [Objective] In geological logs of shale oil cores from the Chang 7 oil member of the Yanchang Formation in the Longdong region, Ordos Basin, for a long time the resolution of single layer thickness of each rock type has been basically 10 cm, resulting in a large number of rock-type combinations being described as a single rock type. Exploring a new method for the quantitative study of shale oil rock-type combinations and reservoir capacity benefits the efficient exploration and development of shale oil in the Chang 7 oil member. [Methods] In this study, the shale oil rock types in the Chang 7 oil member were re-identified by high-resolution core observation (single layer thickness resolution 1-5 cm) together with stereo microscope and thin-section identification of 405 samples and analysis of physical property data, then the rock-type combinations and reservoir capacity of Chang 7 oil member were explored quantitatively. [Results] There are 11 main rock types in the shale oil of Chang 7 oil member of the Yanchang Formation in the Longdong region of the Ordos Basin. Firstly, four combinations of rock-type form (unitype, stratified type, interstratified type and interstratified type) and 65 rock-type combinations were quantitatively identified for the first time. Secondly, a new method is proposed for calculating reservoir capacity on the basis of quantitative evaluation of the reservoir capacity of each of the 11 rock types, combined with the thickness percentage of each rock type, for 65 rock-type combinations. [Conclusions] This study demonstrates that, to guide the efficient exploration and development of the shale oil in the Chang 7 oil member, the traditional single rock-type study for shale oil should be modified to encompass the study of rock-type combinations. However, this research for the Chang 7 oil member is at the exploratory stage; further improvement will be achieved by examining the effect of combining these findings with a large amount of shale oil exploration and development data.

Key words: Ordos Basin; Chang 7 oil member; shale oil; rock type combined form; rock type combination; reservoir capacity; quantitative study

Foundation: Shaanxi Provincial Education Department Youth Innovation Team Research Project, No. 23JP197; Doctoral Research Start-up Fund Project of Yulin University, No. 18GK28; Lateral Project of Changqing Branch of China Petroleum Group Logging Co., LTD, No. ZYCY-1Q-2023-JS-2298; Key Research and Development Program of Shaanxi Provincial Science and Technology Department, No. 24GXY-BXM511