

鄂尔多斯盆地东南部延长组7段页岩 有机孔发育特征及其影响因素

蔡振家^{1,2},雷裕红¹,罗晓容^{1,2},王香增^{3,4,5},程明¹,张丽霞^{3,4,5},姜呈馥^{3,4,5},赵谦平^{3,4,5},尹锦涛^{3,4,5},张立宽¹

[1. 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院油气资源研究重点实验室,北京100029; 2. 中国科学院大学,北京100049;
3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西西安710075; 4. 陕西省页岩气勘探开发工程技术研究中心,陕西西安710075;
5. 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室,陕西西安710075]

摘要:近年来的研究发现,鄂尔多斯盆地东南部延长组7段(长7段)中-低成熟度页岩中发育有机孔,但是对于影响陆相页岩储层中有机孔发育的影响因素有待进一步深入研究。借助氩离子抛光和场发射扫描电镜分析等技术,研究了鄂尔多斯盆地东南部长7段页岩中不同类型固体有机质中有机孔发育特征,并统计分析了不同成熟度页岩样品中干酪根和运移固体有机质的有机孔径和有机孔面积占有机质面积的百分比(S_R),以此为基础讨论了影响有机孔发育的主要因素。结果表明,长7段中不同成熟度页岩(R_o : 0.50%~1.25%)中有机质均发育有机孔,但是干酪根和运移固体有机质中的有机孔发育程度具有明显差异。沉积有机质(干酪根)主要以顺层富集、孤立分散及与粘土矿物共生3种形式赋存在页岩中,有机孔发育程度相对较低,有机孔面积占有机质面积的百分比介于0~44.13%,一般小于10%,平均6.03%;有机孔径主要在10~40 nm。运移固体有机质主要赋存在刚性颗粒粒间孔/粒间溶蚀孔、刚性颗粒与粘土矿物间粒间孔/粒间溶蚀孔和黄铁矿晶间孔等无机矿物孔中,有机孔发育程度较高,有机孔面积占有机质面积的百分比介于0~46.51%,一般小于30%,平均23.05%;孔径较大,主要在50~100 nm。长7段页岩中有机孔的发育程度主要受控于固体有机质类型、运移有机质丰度和有机质成熟度,运移固体有机质丰度越大,有机质成熟度越高,有机孔越发育。

关键词:固体有机质类型;有机孔;页岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characteristics and controlling factors of organic pores in the 7th member of Yanchang Formation shale in the Southeastern Ordos Basin

Cai Zhenjia^{1,2}, Lei Yuhong¹, Luo Xiaorong^{1,2}, Wang Xiangzeng^{3,4,5}, Cheng Ming¹,
Zhang Lixia^{3,4,5}, Jiang Chengfu^{3,4,5}, Zhao Qianping^{3,4,5}, Yin Jintao^{3,4,5}, Zhang Likuan¹

[1. Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 4. Shaanxi Engineering Technology Research Center of Shale Gas Exploration and Development, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 5. Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation, Xi'an, Shaanxi 710075, China]

Abstract: Recent studies have shown that organic pores are developed in the medium-to-low-maturity shale of the 7th member of Yanchang Formation in the Southeastern Ordos Basin, but the influencing factors on the development of organic pores in the continental shale reservoir need to be further understood. With the aid of argon ion polishing and FE-SEM observation, we observed the characteristics of organic pores in Chang 7 shale in the Southeastern Ordos Basin. Statistical analysis was made on the organic pore sizes in kerogen of different maturity and different types of migrated solid organic matters, and also on the ratio of organic pore area to the total organic matter area (S_R) of these organic matters. Thereafter, main factors affecting the development of organic pores were discussed. The results indicate that organic pores were widely developed in shales of diverse maturity (R_o : 0.5%~1.25%) in the Chang 7 member, but there were significant

收稿日期:2019-10-20;修订日期:2020-01-20。

第一作者简介:蔡振家(1993—),男,硕士研究生,非常规油气。E-mail:caizj0223@163.com。

通讯作者简介:雷裕红(1978—),男,高级工程师、硕士生导师,油气运聚成藏动力学和非常规油气。E-mail:leiyh@mail.iggcas.ac.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008-004);国土资源部“十三五”全国油气资源评价项目(2017YQZYPJ0110);陕西延长石油集团科技计划项目(yesy2017-ky-A-20)。

differences in the development of organic pores in kerogens and migrated solid organic matters. Sedimentary organic matter (kerogen) occurs mainly in the form of enrichment along beddings, isolated dispersion and combination with clay minerals in shale and has relatively lower degree of organic pore development. The ratio of the organic pore area to the total organic matter area ranges from 0% to 44.13%, averaging at 6.03%, but generally less than 10%. The majority of organic pores ranges from 10 nm to 40 nm in size. The migrated solid organic matters mainly occurs in inorganic mineral pores, including inter-particle pores/inter-particle dissolution pores in rigid particles, inter-particle pores/inter-particle dissolution pores between rigid particles and clay minerals, intercrystalline pores in pyrite of shale. These organic matters have relatively higher degree of organic pore development. The ratio of the organic pore area to the organic matter area varies from 0% to 46.51%, averaging at 23.05% and generally less than 30%. In addition, the pore size is larger, mainly ranging from 50 nm to 100 nm. The development of organic pores in the Chang 7 member shale is mainly controlled by the organic matter type, the abundance of migrated solid organic matters and the maturity of organic matter; positively correlated with higher content of migrated solid organic matters and more maturity of the organic matters.

Key words: type of solid organic matters, organic pore, shale, Yanchang Formation, Ordos Basin

近年来,页岩油气成为非常规油气勘探开发中新的亮点与重点,关于页岩的沉积环境、岩石矿物组成、储集空间类与特征、孔隙结构与物性、含油气性及影响因素、渗流特征等相关研究受到了广泛的重视^[1-2]。其中,因页岩的孔隙类型、孔隙结构和孔体积、连通性强烈地影响着不同赋存状态的油气含量及总油气含量、渗流特征^[2-3],是研究页岩油气赋存机理、富集条件、渗流规律、资源量估算和甜点预测的关键参数^[4]。因此,页岩的孔隙类型及发育特征、孔隙结构是目前页岩研究的热点之一^[5-7]。

页岩中的孔隙包括无机粒间孔、粒内孔、有机孔和微裂缝^[8]。前人在研究 Barnett、Woodford、Horn River、Marcellus、龙马溪组等海相富有机质页岩的孔隙类型和孔隙结构时发现,有机孔是页岩中最主要的孔隙类型^[9-10]。很多学者认为有机孔的发育程度主要取决于有机质成熟度^[10-11],只有当泥页岩中有机质成熟度(R_o)大于0.9%时才发育有机孔^[10-11];当有机质成熟度大于1.1%后,随着有机质成熟度升高,有机孔发育程度增加^[11]。但近年来的研究发现,较低成熟度的富有机质页岩(R_o :0.6%~0.9%)中也发育了大量有机孔^[12-13],并发现页岩的有机质成熟度和孔隙度的正相关性并不特别明显^[7]。

已发表的关于中国松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地等湖相页岩的研究成果表明,由于多数湖相页岩的有机质成熟度较低,处于生油窗内,孔隙类型以无机孔为主,有机孔相对不发育^[14-17]。近年来,随着扫描电镜观测精度的提高和研究的深入,一些学者发现成熟度较低的湖相页岩中有机孔也比较发育^[18],但具有较强的非均一性。由于关于中国湖相页岩有机孔的研究较少,已有少量研究也多关注有机孔的形态、孔径

大小等特征的描述,缺乏对于较低成熟度湖相页岩中有机孔形成的影响因素的深入研究。

鉴于此,本文选择鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部三叠系延长组7段(长7段)页岩为研究对象,选取不同成熟度、有机质丰度的长7段页岩样品,利用氩离子剖光和高精度扫描电镜观测技术,结合总有机碳、有机质成熟度等分析测试,识别延长组页岩中有机质类型、不同类型有机质分布特征及含量,分析不同类型有机质中有机孔的发育特征及其差异性,以此为基础探讨影响较低成熟度长7段湖相页岩中有机孔发育的主要因素。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国的中部地区,是发育在古生代华北克拉通之上的多旋回大型含油气沉积盆地^[19]。三叠系延长组是鄂尔多斯盆地重要的陆相烃源岩发育层系和油气勘探开发目的层段之一,自上而下划分为10个油层组,记录了整个湖盆的形成、发展和消亡的演化过程^[20]。其中,长7段沉积时期是三叠纪湖盆发育的鼎盛时期^[21],水体最深,最大水深60 m,半深湖-深湖区面积最大,水生生物和浮游生物大量繁殖,沉积了一套广泛分布的高有机质丰度的黑色页岩,页岩厚度介于15~120 m^[22],具有由西南至东北方向逐渐变薄的趋势。长7段页岩的岩性以灰黑色、黑色页岩为主,夹大量灰黑色-灰色粉砂-细砂岩纹层或夹层,非均质性较强^[23-24]。有机质类型以I-II₁型为主^[22,25-26],总有机碳含量(TOC)介于在1%~26%^[25-26],镜质体反射率(R_o)为0.6%~1.2%,处于生油窗期^[22];平均可溶烃含量(S_1)和氯仿沥青“A”含

量分别为 2.89 mg/g 和 0.76%, 热解烃量(S_2) 平均为 7.89 mg/g^[26-27], 具有良好的生油气条件, 是常规油气的优质烃源岩层段和主要的页岩油气勘探目的层位^[28-29]。

2 样品与测试

本文采集了研究区不同埋深的 YW1 井、YW2 井、YW3 井、YW4 井、YW5 井、YW6 井、YW7 井等 7 口井长 7 段的页岩样品, 其中以 YW1 井、YW2 井、YW3 井、YW4 井、YW5 井的样品为重点研究对象, 采样位置见图 1。

前人研究结果表明, 在对页岩样品进行氩离子抛光过程中, 由于氩离子抛光中的离子束热导致的热蚀变效应会导致有机质反射率增加 10% ~ 53%^[30-35]。为了保证分析成熟度对有机孔发育的影响的可靠性, 本文不用氩离子抛光片来分析有机质成熟度, 而是利用岩心切割仪, 沿垂直层理方向将岩心样品切割成数份块样, 一块样品用于离子抛光样品的制备与扫描电镜观测, 一份样品利用传统的显微镜检测定方法来测

试镜质体反射率; 其余样品用于总有机碳、热解等有机地球化学参数的测试分析。本文利用中国科学院地质与地球物理研究所 Leica EM TIC 3X 仪三离子束切割仪, 将页岩样品处理成厚度为 5 mm 的样品后用金刚砂纸将页岩表面磨平后, 利用氩离子抛光仪在 5 keV, 2 mA 和 2 keV, 2 mA 的条件下各循环 3 次和 2 次进行抛光, 以获得高质量抛光截面。采用 MERLIN FE-SEM 场发射扫描电子显微镜对页岩样品进行成像和观测, 二次电子模式(SE2)下的分辨率为 8 nm(1.2 keV), 并利用配备的 EDS 能谱仪识别矿物。观测时利用 Image-Pro Plus 图像分析软件对获得的高清晰 SEM 图像中的有机质和有机孔直径、有机质和有机孔面积进行测量和统计。对于单个孔隙测量最大孔径处, 在对于多个小孔隙相互连通、孔隙形态复杂的情况, 尽量把这些小孔隙分开单独进行测量, 而将其间最狭窄处认为是喉道。

本文用固体有机质中有机孔的总面积占有机质面积的百分比来表示有机孔的发育程度, 即

$$S_R = S_{\text{有机孔}} / S_{\text{有机质}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_R 为固体有机质中有机孔发育程度, %; $S_{\text{有机孔}}$ 为

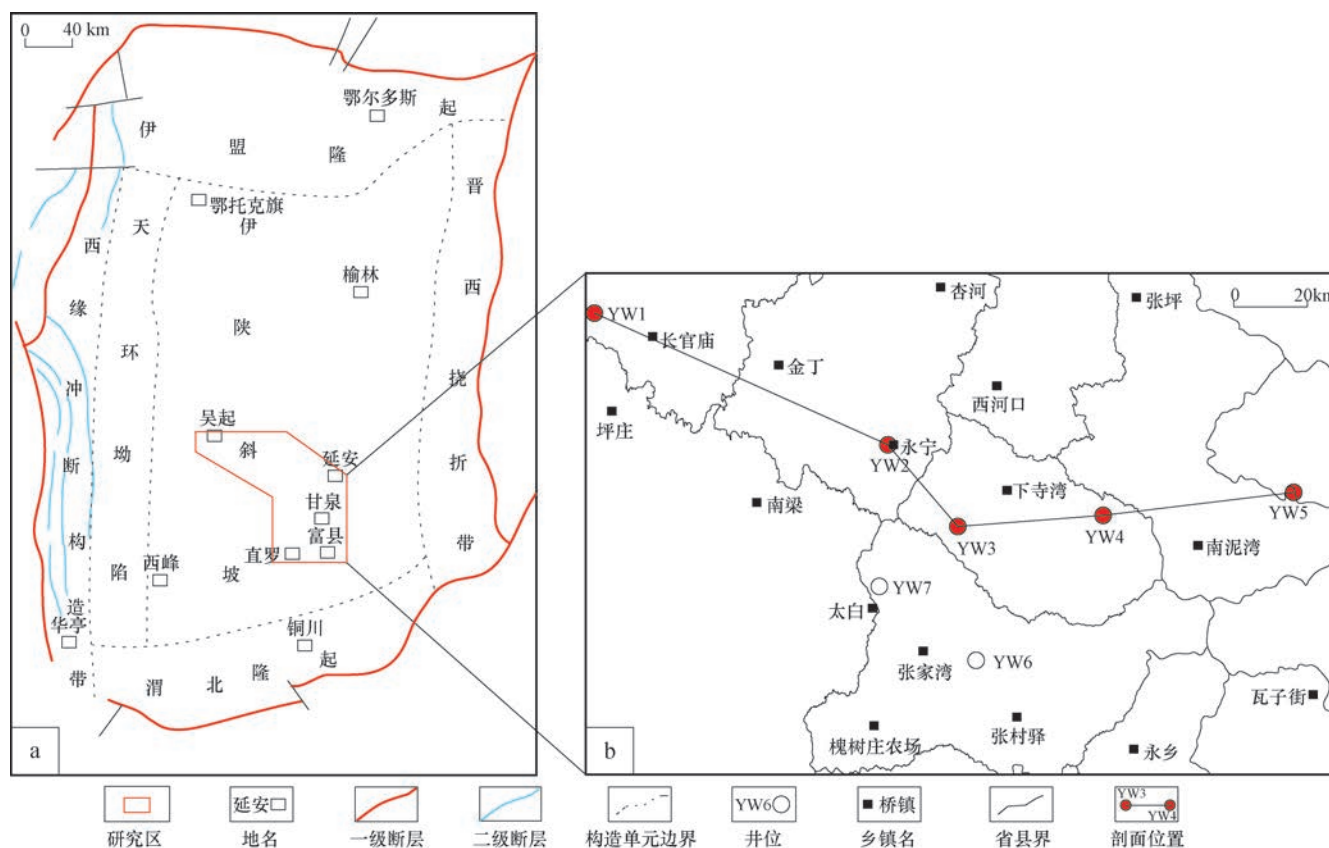


图1 鄂尔多斯盆地东南部研究区构造位置(a)和采样井位(b)(据姜呈馥等^[28]和刘华清等^[29]修改)

Fig.1 The structural location of the study area(a) and the sample well locations(b), Southeastern Ordos Basin

(modified from Jiang, et al. ^[28] and Liu, et al. ^[29])

有机质中有机孔的总面积,%; $S_{\text{有机质}}$ 为有机质面积,%。 S_{R} 越大,有机孔越发育。

3 岩石矿物学特征与有机地球化学特征

研究区长7段页岩段中页岩的矿物成分主要为粘土矿物、石英、长石和碳酸盐矿物,还有少量黄铁矿^[36]。统计结果表明,长7段黑色页岩石英和长石含量22.89%~66.67%,平均42.78%,其中石英含量为11.4%~35%,平均为23.12%,长石含量为5%~38.20%,平均为18.55%;碳酸盐含量变化较大,主要在2.01%~38.87%,平均为10.68%;粘土矿物含量22.92%~67.01%,平均46.54%(图2);黄铁矿含量为0.3%~7%,平均2.45%,黄铁矿含量尽管不高,但分布很普遍。有机地球化学分析表明,页岩样品TOC含量变化在1.77%~22.27%,平均为5.59%; S_1 含量变化在0.55~10.7 mg/g,平均为5.59 mg/g; T_{max} 变化在433~467℃,平均为453℃;氯仿沥青“A”含量变化在0.23~21.35 mg/g,平均为7.43 mg/g(图3)。有机质显微观察结果表明,长7段页岩中的有机质显微组分以腐泥组为主,平均含量高于90%,其次为镜质

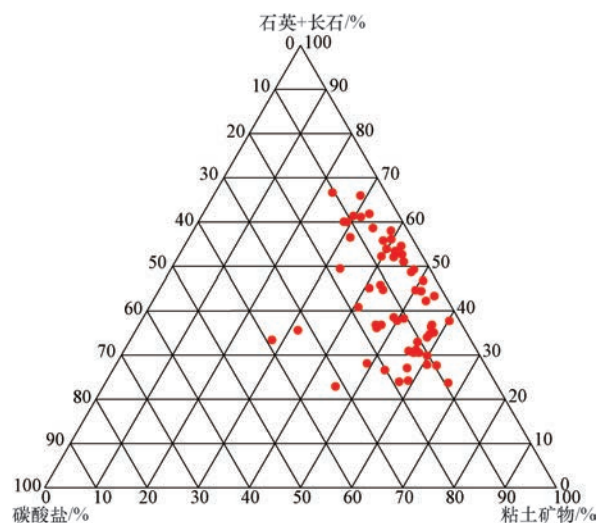


图2 鄂尔多斯盆地东南部延长组泥页岩样品矿物组成

Fig. 2 The mineral composition of shale samples from the Yanchang Formation, southeastern Ordos Basin

组和壳质组,惰质组含量最低($<1.5\%$),有机质类型以I-II₁型为主(图4),这和前人的认识^[25]基本一致。其中腐泥组以无定形有机质为主,含有部分结构藻类体和层状藻类体;镜质体以富氢镜质体为主,正常镜质体较少;壳质组以孢粉为主^[25]。

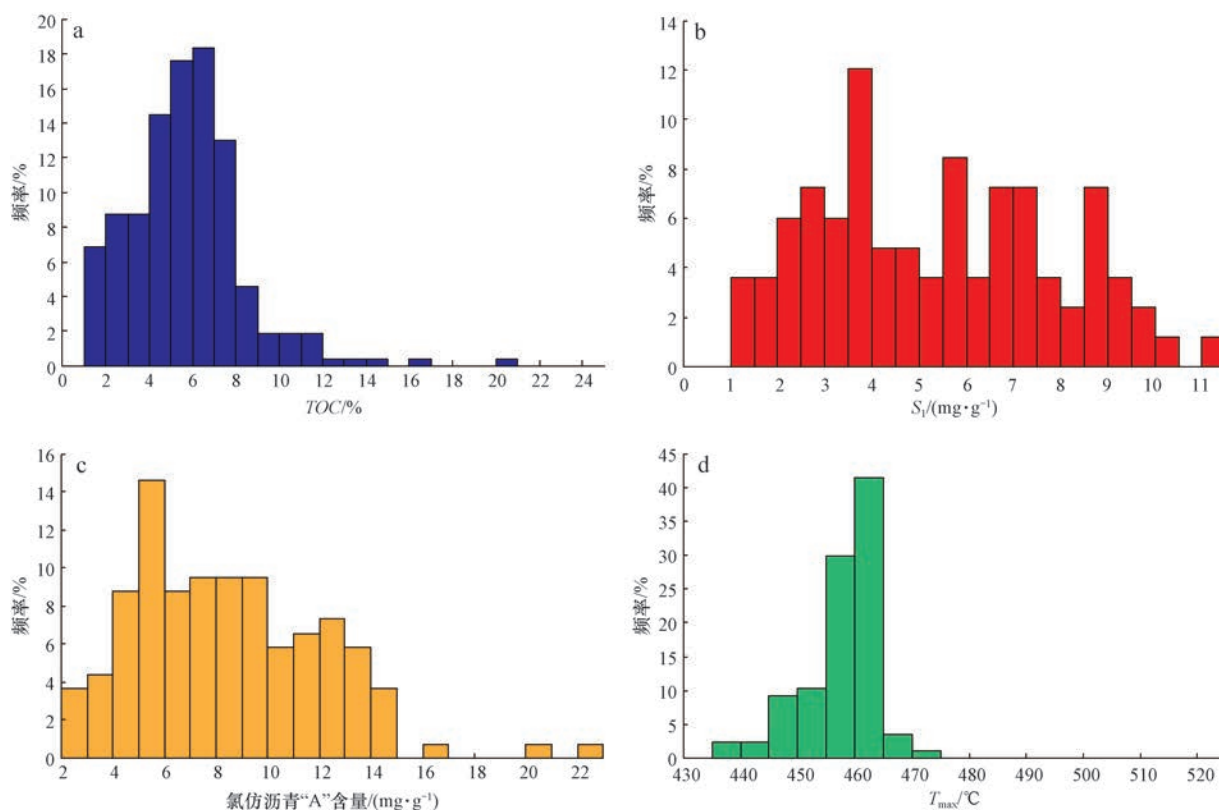


图3 鄂尔多斯盆地东南部延长组泥页岩样品有机地球化学特征

Fig. 3 Organic geochemical characteristics of shale samples from the Yanchang Formation, Southeastern Ordos Basin

a. TOC 特征; b. S_1 特征; c. 氯仿沥青“A”含量特征; d. T_{max} 特征

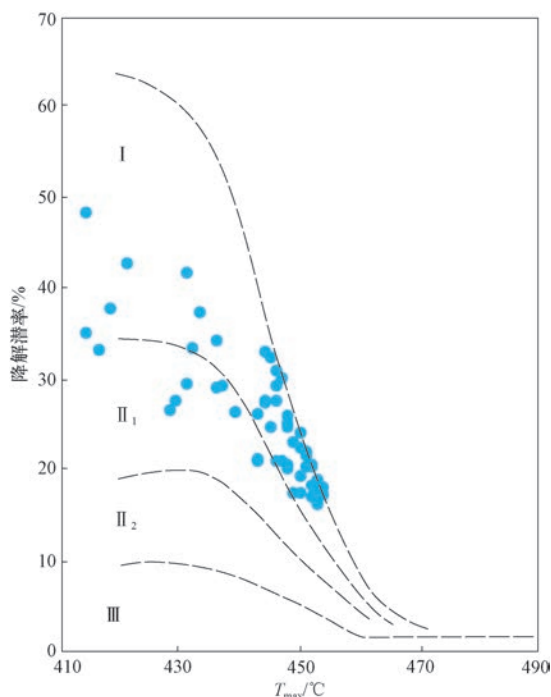


图4 鄂尔多斯盆地东南部延长组 $T_{\max}$ 与降解潜率有机质类型判别图版

Fig. 4 The identification plot of $T_{\max}$ and potential degradation rate of various organic matters in the Yanchang Formation, Southeastern Ordos Basin

4 有机孔发育特征

Landis and Castaño(1995), Loucks(2014) 等认为, 页岩中除和沉积相关的干酪根外, 还发育大量和运移相关的固体有机质^[37-38]。运移固体有机质是干酪根热演化过程中生成的中间产物或油运移到邻近孔隙或裂隙中后因热裂解、生物降解、脱沥青等作用而形成的固体沥青^[39-42]。目前, 大部分学者认为运移固体有机质主要有三种成因^[43-46], 一种是热裂解作用导致运移固体有机质的形成, 页岩层系由于埋深的进一步增加, 地层温度升高, 先前充填于孔隙或裂隙中的油进一步热裂解成固体沥青和气体^[41]; 另一种成因是脱沥青作用, 由于干酪根热降解或油热裂解作用等形成的气体进入到先前充填液态烃的孔隙或裂隙中导致了轻质油的分离和沥青质的沉淀从而形成运移固体有机质^[42]; 第三种成因是生物降解作用, 由于地层的抬升, 地层温度降低并且受到油水界面的影响作用, 岩石中的油受到微生物的蚀变或氧化进而形成运移固体有机质^[44]。干酪根在后期的埋藏过程中曾遭受过较强的压实作用而发生变形, 而运移固体有机质则是干酪根热演化过程中生成的中间产物或油运移到邻近已经存在的孔隙或裂隙中后而形成的固体有机质, 有机质中常可见晚

期的自生矿物或被自生矿物包裹, 二者的赋存特征存在差异。鉴于此, Loucks 等(2014) 提出了区分运移固体有机质和干酪根的岩相学标志: 与沉积相关的干酪根中常包裹一些沉积碎屑, 由于干酪根呈塑性, 在后期的埋藏过程中因压实作用弯曲变形, 会挤占到邻近刚性颗粒的孔隙中去, 边缘常被颗粒挤压; 运移固体有机质内部常发育自生矿物, 一般赋存于发育胶结物的粒间孔、粒内孔等无机质孔隙中; 运移固体有机质常发育有密集海绵状有机孔, 或发育不规则分布的气泡状有机孔, 孔隙形态多样, 孔径的长轴方向随机分布, 相互连通的无机质孔隙网络中充填的发育有密集海绵状有机孔的固体有机质一般为运移有机质; 干酪根内部有机孔的长轴方向一般定向排列^[38]。本节首先利用上述区分标志, 识别了长7页岩中的固体有机质类型, 以此为基础分析了不同固体有机质中有机孔的发育特征。

4.1 干酪根有机孔发育特征

对长7段页岩中的固体有机质的观察结果表明, 部分干酪根近似平行页岩层理方向顺层富集, 部分干酪根呈孤立状分散产出(图5)。顺层富集的干酪根一般呈弯曲状的长条形, 这类干酪根长轴方向延伸较远, 短轴方向的直径变化较大, 介于 $0.08 \sim 14.99 \mu\text{m}$ 。这类干酪根中有机孔发育程度低, 仅发育极少量有机孔或基本不发育, 可见一些干裂缝, 个别干酪根中可见有机孔发育, 但有机孔分布不均一, 且有机孔面积占有机质面积的比例(S_R)一般介于 $0 \sim 21.67\%$ 。如图5a, b中的固体有机质呈长条弯曲状近似平行于层理定向分布, 并受到长石、石英等刚性颗粒的挤压, 有机质中包裹少量沉积碎屑, 粘土碎屑也近似平行有机质定向分布, 表明此类有机质遭受了很强的压实作用, 其应为干酪根。图5a中的干酪根几乎未见有机孔发育, 图5b所示的干酪根可见有机孔发育, 但分布不均一, 只有少部分孤立的有机孔零星分布在矿物与有机质的边缘, 而图5c中的顺层富集干酪根中, 有机孔在中部发育, 两端及与矿物接触的部位有机孔发育程度较差, 这可能与压实作用有关。干酪根中的有机孔的孔隙多呈不规则椭圆形和不规则多角状, 部分有机孔具有顺层定向性, 有机孔孔径介于 $11 \sim 262 \text{ nm}$, 主要在 $53 \sim 57 \text{ nm}$, 有机孔面积占有机质面积的比例(S_R)为 6.85% 。

孤立状分布的干酪根一般分布在刚性颗粒间或粘土矿物碎屑间, 大小主要为 $0.46 \sim 18.73 \mu\text{m}$ 。图5d—f的有机质周缘的粘土矿物围绕有机质分布, 部分粘土矿物挤入到块状有机质中, 固体有机质经历了明显的压实作用, 表明上述有机质不是晚期的油充填于已经

存在的粒间孔后形成的固体沥青,而是干酪根。孤立的分散状干酪根中有机孔相对不发育,即使发育少量有机孔,分布也具有不均一性的特点,但总体发育程度要高于顺层富集分布的干酪根。图5d中的干酪根中基本未见有机孔发育。图5e干酪根中可见局部发育有机孔,主要呈孤立的椭圆形、圆形孔产出,有机孔的孔径30~427 nm,平均为125 nm,有机孔面积占有有机质面积的比例(S_R)为0.74%。图5f中的干酪根成熟度为1.05%,有机孔相对较发育,有机孔的孔径37~667 nm,平均为182 nm,有机孔面积占有有机质面积的比例(S_R)为23.83%。

与粘土矿物共生的分散状干酪根是沉积时形成的有机粘土复合体^[47]。粘土矿物主要是陆源搬运的产物,可见有磨损的痕迹,晶形较差,粒度小,周围粘土矿物具有顺层分布或遇到刚性矿物而发生扭曲变形的现象,因此,与粘土矿物共生的干酪根具有顺粘土层定向

产出或随周围粘土矿物发生弯曲变形的特征,而且与粘土矿物共生的干酪根有机质形态连续性差,往往被碎屑粘土矿物截隔开,主要为短柱状或条带状,有机质尺寸较小,短轴主要在20~227 nm变化,集中在50 nm;长轴主要在69~1 253 nm变化,集中在300 nm。这类干酪根中有机孔相对较发育,但也具有非均一性特征。图4g和h中与粘土矿物共生的干酪根不发育或者发育少量孤立有机孔,图4i中与粘土矿物共生的干酪根的有机孔发育,在边缘处有机孔孔径较小但数量密集,而粘土矿物格架中的有机孔孔径较大,部分相互连接形成串珠状孔,形态主要以椭圆形,不规则多角形和水滴形为主。这类干酪根的有机孔的孔径多介于8~85 nm,平均为34 nm,有机孔面积占有有机质面积的比例(S_R)为13.27%。总体来看,干酪根中的有机孔相对不发育,有机孔面积占干酪根面积的比例介于0~44.13%,平均为6.03%。

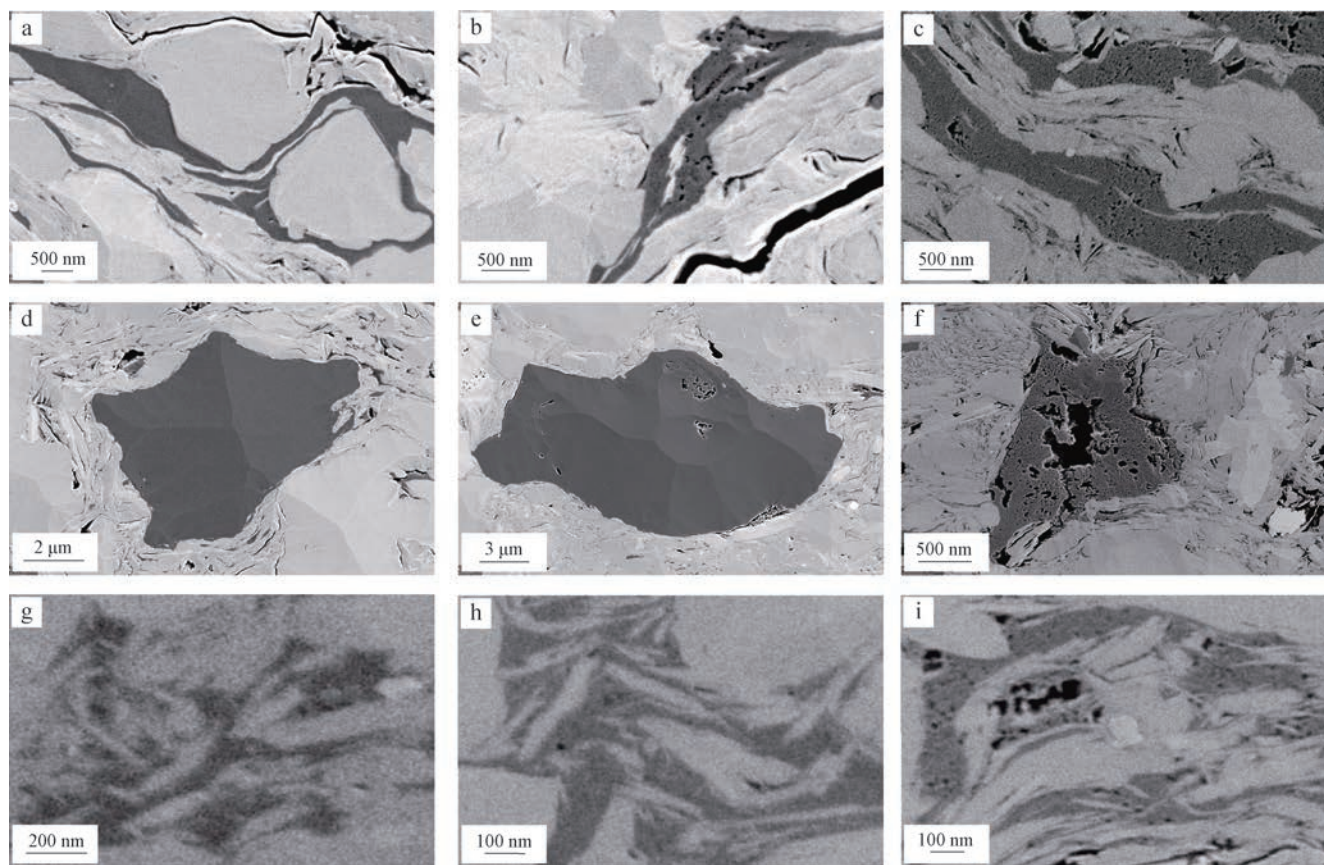


图5 鄂尔多斯盆地东南部延长组干酪根中有机孔发育特征

Fig. 5 Characteristics of organic pores developed in kerogen of the Yanchang Formation, Southeastern Ordos Basin

a. 长条弯曲状顺层富集型干酪根,受到长石、石英等刚性颗粒的挤压而发生变形,有机孔不发育,YW5井,埋深682.05 m;b. 长条弯曲状顺层富集型干酪根,有机孔不发育,内部含有粘土碎屑矿物,埋深682.05 m,YW5井;c. 长条弯曲状顺层富集型干酪根,内部含有粘土碎屑矿物,有机孔发育,YW3井,埋深1 340 m;d. 孤立块状干酪根,有机孔不发育,YW5井,埋深682.05 m;e. 孤立块状干酪根,与无机矿物一起受到挤压变形,发育少量定向有机孔,YW4井,埋深682.05 m;f. 孤立块状干酪根,有机孔非常发育,YW3井,埋深1 340 m;g. 与粘土矿物共生干酪根,粘土矿物与干酪根交织,有机孔不发育,YW3井,埋深1 340 m;h. 与粘土矿物共生干酪根,粘土矿物与干酪根交织,与粘土矿物接触的有机质发育少量有机孔,YW3井,埋深1 340 m;i. 与粘土矿物共生干酪根,有机孔较为发育,YW3井,埋深1 340 m

4.2 运移固体有机质有机孔发育特征

运移固体有机质粒径相对较小,多呈不规则等轴状、斑块状、多角状等充填于长石、石英等刚性颗粒间孔及粒间溶孔、刚性颗粒与粘土碎屑粒间孔及粒间溶孔、次生矿物晶间孔及晶间溶孔等不同类型无机孔中,粒径多介于 $0.02 \sim 18.95 \mu\text{m}$ (图6)。不同埋深、不同成熟度的页岩样品中的运移固体有机质中均可见有机孔发育。如图6a所示的固体有机质充填于刚性颗粒粒间孔中,粒间大小 $14.18 \mu\text{m}$,有机质边缘的形态平直,与刚性颗粒的接触边界明显,未有明显因压实作用造成的变形特征,为油气后期充填进刚性粒间孔中,由于埋深增加温度升高,充填于孔隙中的油气发生热裂解作用形成运移固体有机质^[59]或是气体进入到含油孔隙中导致了轻质油的分离和沥青质的沉淀进而形成运移固体有机质^[60],其内部发育典型的海绵

状有机孔,形状以不规则椭圆形、圆形和多角形为主,部分有机孔相互连通,形成串珠状有机孔,甚至形成微裂缝。有机孔的孔径多介于 $28 \sim 311 \text{ nm}$,平均为 97.09 nm ,有机孔面积占有有机质面积的比例(S_R)为 30.37% 。图6b中样品的运移固体有机质充填于刚性颗粒与粘土碎屑粒间孔中,在这些矿物颗粒的内部和边部会发育一些自生矿物,其应为运移固体有机质。该有机质中有机孔发育,有机孔的孔隙多呈不规则椭圆形、水滴状和多角状,有机孔孔径为 $21 \sim 192 \text{ nm}$,平均为 64 nm ,有机孔面积占有有机质面积的比例为 26.34% 。图6c所示运移固体有机质的长轴方向的直径约 $4.93 \mu\text{m}$,短轴方向的直径约 $1.00 \mu\text{m}$,其充填于刚性粒间溶蚀孔中,固体有机质边缘的形态局部呈树枝状、港湾状,部分呈平直状,有机质内部还可见少量长石溶蚀残余,因刚性物质的支撑保护,有机质在压实作用下未发生变形,该有机质应是运移固体有机质。

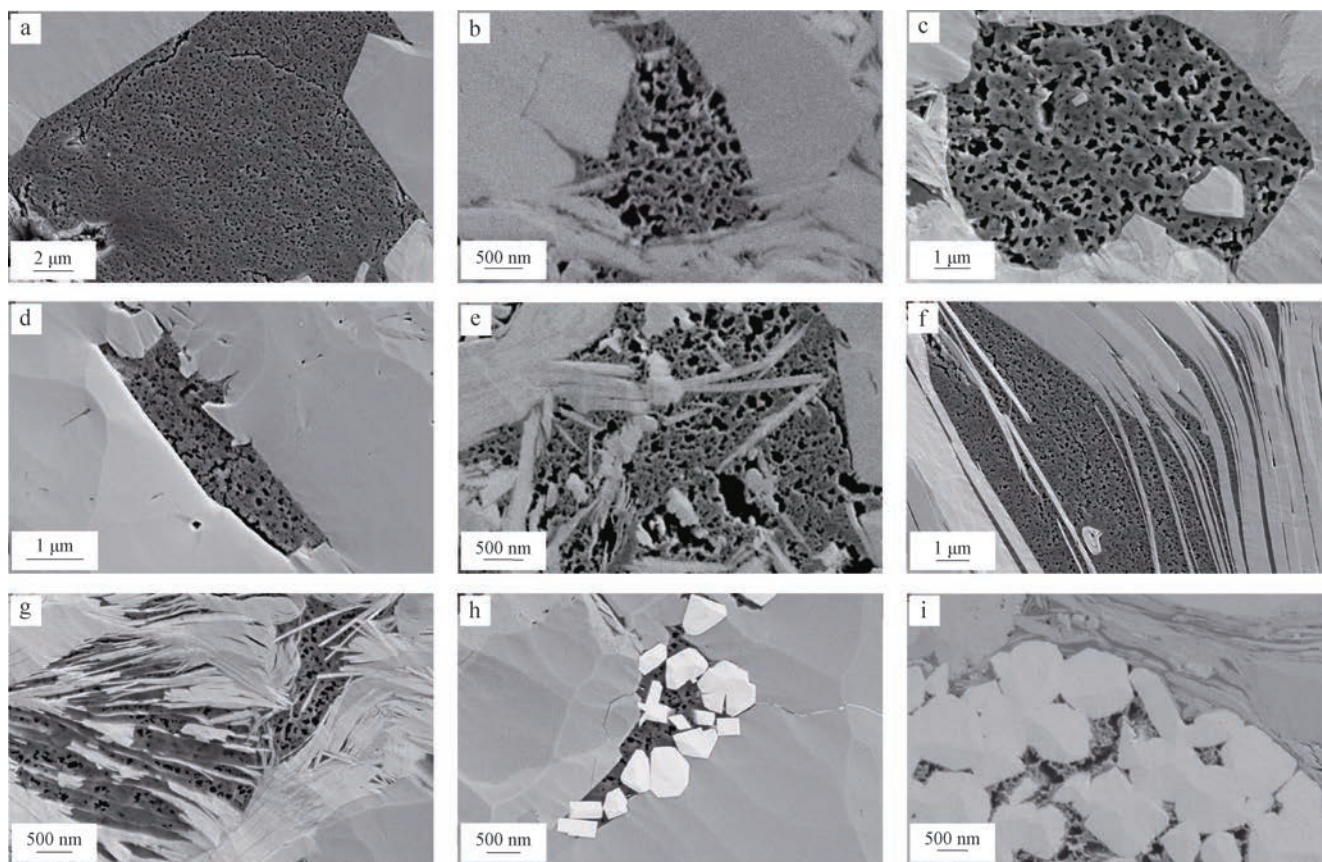


图6 鄂尔多斯盆地东南部延长组运移固体有机质中有机孔发育特征

Fig. 6 Characteristics of organic pores in migrated solid organic matters of the Yanchang Formation, Southeastern Ordos Basin

a. 刚性颗粒粒间孔中充填的运移固体,海绵状有机孔发育,YW1井,埋深2 297.31 m;b. 刚性颗粒与粘土碎屑粒间孔中充填的运移固体有机质,有机孔发育,YW3井,埋深1 340 m;c. 刚性颗粒粒间溶蚀孔中充填的运移固体有机质,内部发育溶蚀残留的长石,海绵状有机孔发育,YW1井,埋深2 297.31 m;d. 长石粒内溶蚀孔中充填的运移固体有机质,海绵状有机孔发育,YW1井,埋深2 297.31 m;e. 交织状粘土间充填的运移固体有机质,内部含自生矿物,有机孔发育,YW2井,埋深1 340 m;f. 绿泥石粘土矿物共生的运移固体有机质,海绵状有机孔发育,YW1井,埋深2 297.31 m;g. 与粘土矿物共生的运移固体有机质,有机孔发育不均一,YW1井,埋深2 297.31 m;h. 含黄铁矿粒间溶蚀孔中充填的运移固体有机质,有机孔发育,YW1井,埋深2 297.31 m;i. 草莓状黄铁矿晶间孔中充填的运移固体有机质,有机孔发育,YW3井,埋深1 340 m

该有机质中有机孔非常发育,单个有机孔多呈多角状,部分孔隙相互连通形成串珠状孔,串珠状有机孔多为2~5个有机孔相互连接形成大孔。该有机质中的有机孔的孔径介于34~227 nm,平均为96 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约21.52%。图6d为长石粒内溶蚀孔中充填的固体有机质,固体有机质边缘的形态主要为平直状,长轴方向的直径约8.22 μm ,短轴方向的直径约1.63 μm 。该有机质内有机孔非常发育,有机质内部的有机孔主要为海绵状有机孔,形状以椭圆状和不规则多角状为主,有机孔孔径为26~265 nm,平均为100 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约32.01%。

图6e所示为充填于粒间孔中的固体有机质,有机质中可见自生石英、自生粘土矿物等,其应为运移固体有机质。该有机质中有机孔非常发育,有机孔孔径介于9~193 nm,平均为35 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例约21.99%。粘土矿物的粒间孔、粒内孔也常充填有运移固体有机质,其中的有机孔非常发育。充填于粘土矿物粒间孔中的运移固体有机质是油气运移至发育有自生粘土矿物的粒间孔中经过后期热裂解作用或脱沥青作用形成的运移固体有机质,其粘土矿物主要是自生粘土矿物,晶形较好,自生粘土矿物沿着孔隙边界生长,逐渐向内部延伸,粘土矿物呈现不同的产状,有交织状,纤维状等,部分运移固体有机质由于充填在纤维状粘土矿物中,而呈现分隔的形态,有机孔形态主要呈不规则状、多边形和椭圆形,圆形较少,而且部分有机孔会连续发育,形成串珠状有机孔,甚至在串珠状有机孔上发育裂缝。图6f所示的运移固体有机质充填在粘土矿物粒内孔中,有机质中发育大量典型的海绵状有机孔。有机孔孔径介于29~259 nm,平均为114 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约22.81%。图5g

中充填于粘土矿物粒内孔和粒间孔中的运移固体有机质中有机孔非常发育,但发育程度不均一,局部密集发育,部分不发育有机孔,有机孔孔径较大,介于21~254 nm,平均孔径约87 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约11.50%。

长7段页岩中普遍发育黄铁矿^[22],黄铁矿主要呈自生矿物颗粒充填于刚性颗粒粒间孔及粒间溶蚀孔中或以草莓状黄铁矿发育,黄铁矿晶间孔中常被后期油气充填,形成运移固体有机质。如图6h和i为发育于含黄铁矿粒间溶孔中或草莓状黄铁矿晶间孔中的有机质,有机质中发育海绵状有机孔,形态多呈不规则状、多边形和椭圆形,圆形和狭缝形较少,少量有机孔连成较小的串珠孔。图6h黄铁矿晶体间的有机质内部发育有机孔,有机孔孔径为28.57~197.51 nm,平均为74.67 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约12.59%;图6i草莓状黄铁矿晶间孔中充填有固体有机质,有机孔孔径为33~235 nm,平均为97 nm,有机孔总面积占有有机质面积的比例(S_R)约36.48%。总体来看,运移固体有机质中的有机孔非常发育,有机孔发育程度明显高于干酪根中有机孔的发育程度,有机孔面积占运移固体有机质面积的比例介于0~46.51%,平均为23.05%。

对所有样品的干酪根、运移固体有机质中发育的有机孔的孔径进行统计,发现长7段中有机孔孔径变化主要在10~520 nm,主要集中在10~100 nm,占有有机孔总数的70.92%,孔径大于100 nm的有机孔占全部有机孔的比例为28.50%,孔径大于200 nm的有机孔占全部有机孔的比例为5.27%(图7)。其中干酪根中发育的有机孔孔径变化在10~360 nm,主要分布在10~40 nm和50~100 nm,分别占总有机孔的42.54%和40.16%,孔径大于100 nm的有机孔占总有机孔的14.83%(图7a)。运移固体有机质中发育的有机孔孔

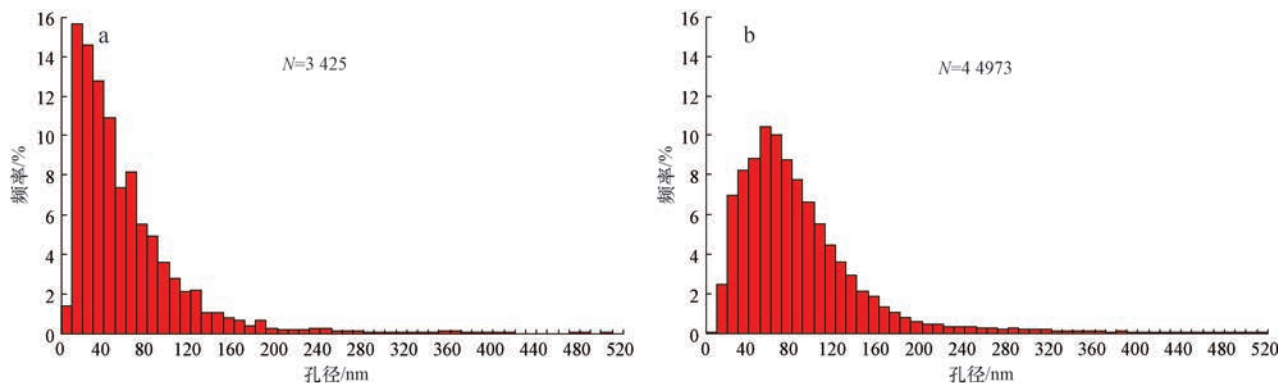


图7 鄂尔多斯盆地东南部不同类型有机质有机孔孔径发育特征

Fig.7 Characteristics of organic pore sizes of various organic matters in the Southeastern Ordos Basin

a. 干酪根有机孔孔径;b. 运移固体有机质有机孔孔径

经主要介于 10 ~ 520 nm, 主要分布在 30 ~ 100 nm, 占总有机孔的 68.15%, 孔径大于 100 nm 的有机孔占总有机孔的 29.55% (图 7b)。

5 有机孔发育影响因素

根据上述页岩有机地化特征、有机质类型识别和有机孔发育特征分析所获得的认识为基础, 笔者分析了影响长 7 段页岩中有机孔发育的主要因素。

5.1 有机质类型

对长 7 段泥页岩不同类型的固体有机质中有机孔发育特征的观测结果显示, 干酪根中有机孔相对不发育, 运移固体有机质中的有机孔相对较发育 (图 5, 图 6)。在同一样品的同一视域中, 可见运移有机质中有机孔非常发育, 而干酪根中有机孔基本不发育 (图 8)。如图 8a 和 b 中白色箭头所示的固体有机质充填于粒间孔中, 有机质内部可见大量自生矿物, 其应为充填于粒间孔中的运移固体, 这些运移固体有机质内部发育大量海绵状有机孔, S_R 分别为 17.37% 和 22.18%。图 8a 中的白色箭头所指的部分长条弯曲的有机质沿着页岩层理方向顺层发育, 边缘常被无机矿物颗粒挤压, 部分矿物被挤入有机质中, 部分有机质的弯曲变形, 与其接触的云母等塑性矿物弯曲变形的形态一致; 图 8b 中白色箭头所指的有机质周缘的粘土矿物围绕该有机质发生弯曲变形, 表明这部分有机质经历了较强的压实作用^[13], 其应为干酪根这两类干酪根中的有机孔均不发育, $S_R = 0$ 。

为了进一步分析不同类型固体有机质有机孔发育程度的差异, 对研究区不同埋深、不同成熟度页岩样品中的干酪根、运移固体有机质的有机孔发育程度分别

进行了统计。结果表明, 同一样品中的干酪根有机孔发育程度明显低于运移固体有机质中有机孔的发育程度 (图 9)。如图 9a 为 YW5 井 682.05 m 页岩 (R_o 约 0.5%, TOC 为 2.3%) 中干酪根和运移固体有机质中的 S_R 值统计结果, 干酪根中 S_R 介于 0 ~ 15%, 主要介于 0 ~ 5%, 平均 0.16%; 运移固体有机质中 S_R 介于 0 ~ 25%, 平均 5.35%, S_R 值主要分布在 5% ~ 10%, 明显高于干酪根中有机孔的发育程度。图 9b 为 YW4 井 975.6 m 页岩 (R_o 约 0.82%, TOC 为 3.23%) 中干酪根和运移固体有机质中的 S_R 值统计结果, 干酪根中 S_R 介于 0 ~ 10%, 平均 0.31%, S_R 值主要分布在 0 ~ 5%; 运移固体有机质中有机孔 S_R 值介于 0 ~ 10%, 平均 6.99%, S_R 值主要分布在 5% ~ 10%, 明显高于干酪根中有机孔的发育程度。图 9c 为 YW3 井 1 340 m 页岩 (R_o 约 1.05%, TOC 为 5.19%) 中干酪根和运移固体有机质 S_R 值统计结果, 干酪根中 S_R 介于 0 ~ 50%, S_R 值主要分布在 5% ~ 15%, 平均 8.19%, 而运移固体有机质中有机孔 S_R 值介于 0 ~ 50%, 平均 24.57%, S_R 值主要分布在 10% ~ 30%, 明显高于干酪根中有机孔的发育程度。图 9d 为 YW2 井 1 502.1 m 页岩 (R_o 约 1.10%, TOC 为 6.69%) 中干酪根和运移固体有机质中统计结果, 干酪根中 S_R 介于 0 ~ 50%, S_R 值主要分布在 5% ~ 15%, 平均 9.30%, 而运移固体有机质中有机孔 S_R 值介于 0 ~ 50%, 平均 23.45%, S_R 值主要分布在 10% ~ 30%, 明显高于干酪根中有机孔的发育程度。图 9e 为 YW1 井 2 297.31 m 粉砂岩夹层 (R_o 约 1.25%, TOC 为 1.96%) 的 S_R 值统计结果, 干酪根中有机孔 S_R 值介于 0 ~ 10%, 平均 1.50%, S_R 值主要分布在 0 ~ 5%, 而运移固体有机质中有机孔 S_R 值介于 0 ~ 45%, 平均 25.58%, S_R 值主要分布在 10% ~ 30%, 明显高于干酪根中有机孔的发育程度。由此可

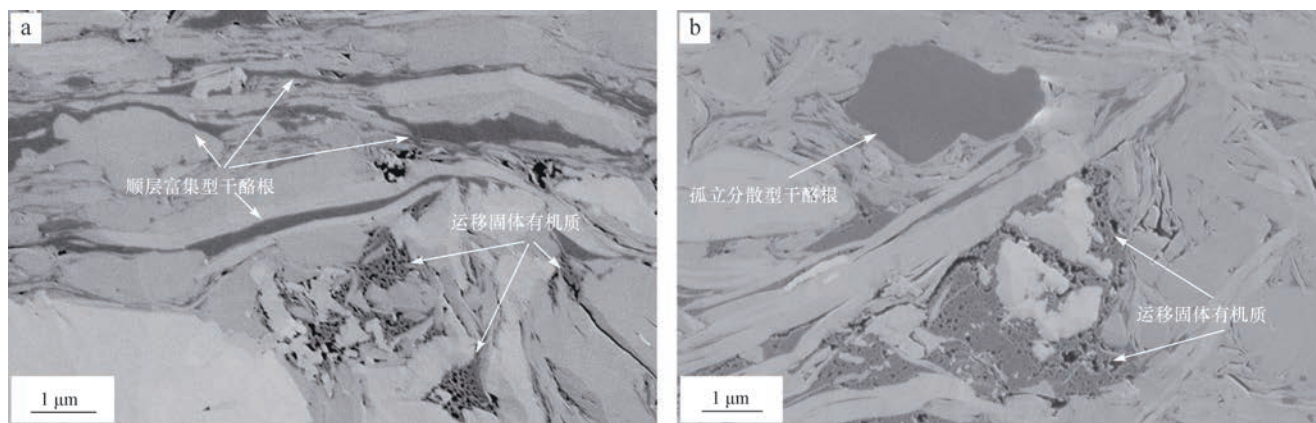


图 8 鄂尔多斯盆地东南部同一视域下不同类型有机质中有机孔发育特征

Fig. 8 Characteristics of organic pores in various organic matters in the same frame of view, Southeastern Ordos Basin

a. 顺层富集型干酪根与运移固体有机质有机孔发育特征; b. 孤立分散型干酪根与运移固体有机质有机孔发育特征

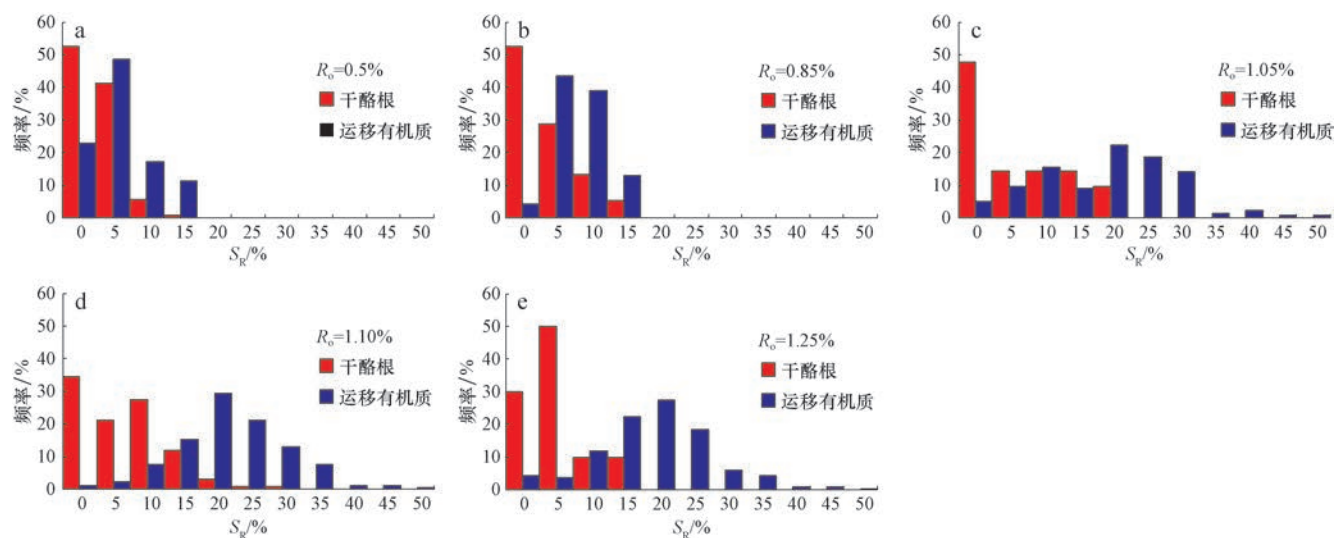


图9 鄂尔多斯盆地东南部不同类型有机质有机孔发育程度(S_R)特征

Fig. 9 Characteristics of organic pore development(S_R) in organic matters of various types, Southeastern Ordos Basin

a. YW5 井; b. YW4 井; c. YW3 井; d. YW2 井; e. YW1 井

见,页岩中不同固体有机质类型的有机孔的发育程度具有明显差异,干酪根中有机孔相对不发育,运移固体有机质有机孔发育程度相对较高。

总体来看,页岩中固体有机质类型对有机孔的发育程度具有重要的影响,干酪根中有机孔相对不发育,运移固体有机质有机孔发育程度相对较高,页岩中运移固体有机质所占比例越高,总量越多,有机孔越发育。

5.2 有机质丰度

假定利用扫描电镜在二维图像中测量的运移有机质占总有机质比例可代表样品中运移有机质占总有机质比例,即可根据实测样品的 TOC 值计算得到运移有机质百分含量、干酪根百分含量,由此可分析有机质丰度与有机孔发育间的关系。由有机质丰度(总有机碳含量,运移有机质含量)与有机孔面孔率的关系图可见,随总有机碳含量的增加,有机孔面孔率总体具升高

的趋势,但相关性较差,相关系数 R^2 约 0.59(图 10a);但运移有机质百分含量与有机孔面孔率的相关性较好,其相关系数 R^2 约 0.97(图 10b)。由此可见,有机质丰度对有机孔发育的影响实质是运移有机质丰度的影响,因为干酪根中有机孔总体发育程度较低,页岩中运移固体有机质丰度越高,有机孔越发育。

5.3 有机质成熟度

由前述分析结果可知,尽管长 7 段的页岩的成熟度较低,但有机孔比较发育,即使成熟度介于 0.5% ~ 0.6% 的页岩的有机质中,依然可见有机孔发育。如 YW5 井图 5e 中的孤立分散状干酪根中局部发育有机孔,有机孔面积占有有机质面积的比例为 0.74%。但是,尽管成熟度只有 0.5% ~ 0.6% 的页岩也可见有机孔发育,但发育程度较低(图 5e)。随着有机质成熟度升高,干酪根和运移固体有机质有机孔的发育程度均增加

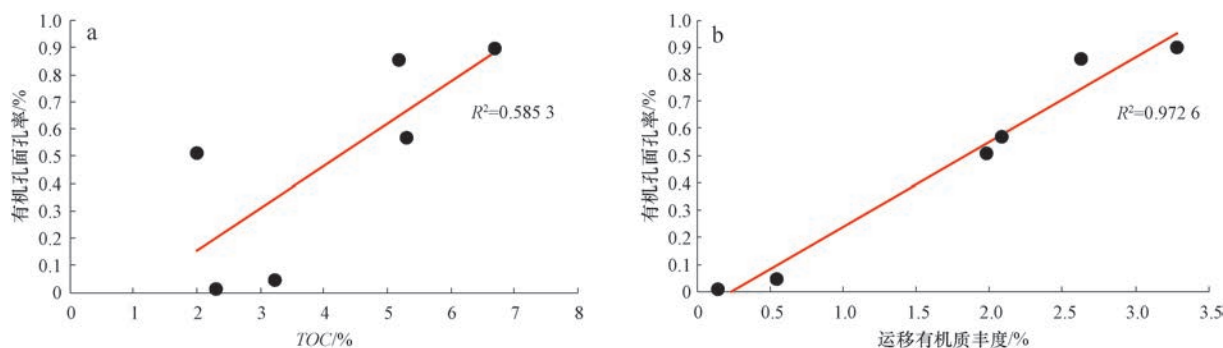


图10 鄂尔多斯盆地东南部不同 TOC 含量页岩样品中有机孔发育特征

Fig. 10 Characteristics of organic pores in shale samples of different TOC, Southeastern Ordos Basin

a. TOC; b. 运移固体有机质丰度

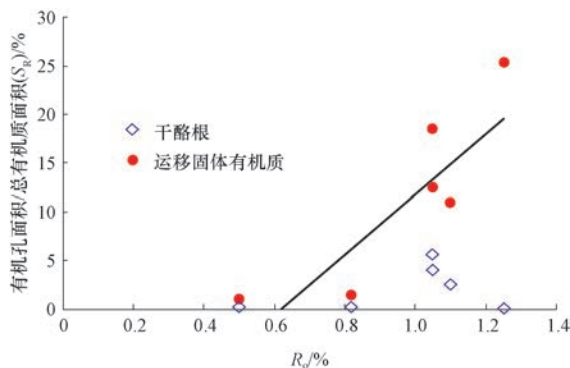


图11 鄂尔多斯盆地东南部不同成熟度页岩样品中有机孔发育特征

Fig. 11 Characteristics of organic pores in shale samples of different maturity, Southeastern Ordos Basin

(图11)。从图中可以看出,在有机质成熟度低于0.9%时,有机孔发育程度较差,而有机质成熟度大于1%之后,有机孔发育程度明显增大。如YW3井图5(i)中的干酪根有机孔发育, S_R 为13.27%;YW1井图6(f)中的运移固体有机质发育密集的海绵状有机孔,有机孔总面积占有机质面积的比例(S_R)约22.81%。此外,随成熟度增加,有机孔孔径有增大的趋势。YW5井和YW4井的样品干酪根有机孔均集中在10~50 nm,孔径大于50 nm的有机孔分别仅占总有机孔的8.70%和19.28%,而YW3井、YW2井和YW1井干酪根有机孔孔径大于50 nm的有机孔分别占总有机孔的67.13%,30.18%和69.74%。对于运移固体有机孔,YW5井和YW4井运移有机孔孔径大于50 nm的有机孔分别占总有机孔的10.97%和26.07%,而YW3井、YW2井和YW1井运移有机质有机孔孔径大于50 nm的有机孔分别占总有机孔的30.18%,47.43%和81.03%。总体而言,干酪根和运移固体有机质中有机孔孔径均有随有机质成熟度增加而增大的趋势。

由上分析可知,成熟度0.9%并不是长7页岩中有机孔发育的下限,低于0.9%的页岩中可见大量有机孔发育,但有机质成熟度对运移有机孔的发育程度具有重要的影响,随着成熟度增加,有机孔发育程度升高。

6 讨论

前人研究结果表明,在对页岩样品进行氩离子抛光过程中,由于氩离子抛光中的离子束热导致的热蚀变效应会导致有机质反射率增加10%~53%^[30],也有学者认为氩离子抛光导致的有机质反射率的增加并不是有机质成熟度因热识别而真实升高,而是由于表面

平整度的提高而导致反射率增加^[32]。为了保证分析成熟度对有机孔发育的影响的可靠性,本文不用氩离子抛光片来分析有机质成熟度,而是利用岩心切割仪将岩心样品切割成数份块样后,将其中一块样品利用传统的显微镜检测方法来测试镜质体反射率,以保证样品的成熟度测试结果不受氩离子抛光等因素的影响。

尽管氩离子抛光中的离子束热导致的热蚀变效应或表面平整度升高会导致有机质成熟度增加^[30],但即使是因热蚀变导致的变化也仅发生在表层,不会导致有机分子的深度再结晶和结构转变,即离子抛光导致的热蚀变或表面平整不会导致形成新的有机孔^[31]。而且,页岩样品是在5 keV,2 mA和2 keV,2 mA的条件下各循环3次和2次进行抛光,也避免了产生额外的新有机孔^[33]。因此,利用氩离子抛光观测的所有样品中的有机孔是真实可靠的。

前人也注意到了海相、海陆过渡相页岩有机质质中有机孔发育的非均质性特征,认识到运移固体有机质中有机孔相对发育,干酪根有机孔发育程度较差^[32],干酪根中镜质体和惰质体中有机孔少见,无定形有机质和藻质体有机孔相对发育^[48]。本次研究中观测到相比运移固体有机质而言,干酪根中有机孔发育程度较差,但干酪根中有机孔的发育程度也存在较大非均质性,造成这种有机孔差异性发育的原因还需要进一步深入研究。

7 结论

1) 鄂尔多斯盆地东南部长7段中不同成熟度的湖相页岩中均发育有机孔,有机孔的孔径主要介于10~100 nm,占有有机孔总数的70.92%,孔径大于100 nm的有机孔占全部有机孔的比例为28.50%,孔径大于200 nm的有机孔占全部有机孔的比例为5.27%。

2) 长7段页岩中发育干酪根和运移固体有机质,干酪根和运移固体有机质中有机孔的发育程度存在差异,干酪根中有机孔不发育或较少,有机孔面积占干酪根面积的比例介于0~44.13%,一般小于10%,平均6.03%;运移固体有机质中的有机孔相对发育,有机孔面积占干酪根面积的比例介于0~46.51%,主要在10%~30%,平均23.05%。

3) 长7段页岩中有机孔的发育程度主要受固体有机质类型、运移有机质丰度和有机质成熟度的影响。运移固体有机质占总固体有机质的比例越高,总量越高,有机孔越发育;而有机质成熟度越高,固体运移有机质中有机孔越发育。

参考文献

- [1] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. Shale gas-in-place calculations part I: new pore-scale considerations [J]. SPE Journal, 2012, 17(1): 219–229.
- [2] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87–125.
- [3] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916–927.
- [4] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071–1098.
- [5] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus formation (Devonian), Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177–200.
- [6] Bernard S, Wirth R, Schreiber A, et al. Formation of nanoporous pyrobitumen residues during maturation of the Barnett Shale (Fort Worth Basin) [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 3–11.
- [7] Cardott B J, Landis C R, Curtis M E. Post-oil solid bitumen network in the Woodford Shale, USA—a potential primary migration pathway [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 139: 106–113.
- [8] 俞雨溪, 罗晓容, 雷裕红, 等. 陆相页岩孔隙结构特征研究——以鄂尔多斯盆地延长组页岩为例 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 716–726.
Yu Yuxi, Luo Xiarong, Lei Yuhong, et al. Characterization of lacustrine shale pore structure: An example from the Upper-Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 716–726.
- [9] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848–861.
- [10] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 26–31.
- [11] Milliken K L, Esch W L, Reed R M, et al. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1553–1578.
- [12] Alcantar-Lopez L, Chipera S J. Improving Our Understanding of Porosity in Source Rock Reservoirs through Advanced Imaging Techniques [C]. Unconventional Resources Technology Conference. Society of Exploration Geophysicists. The Denver, Colorado, USA: 2013.
- [13] Lohr S C, Baruch E T, Hall P A, et al. Is organic pore development in gas shales influenced by the primary porosity and structure of thermally immature organic matter? [J]. Organic Geochemistry, 2015, 87: 119–132.
- [14] 杨巍, 陈国俊, 吕成福, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段富有机质页岩孔隙特征 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 418–426.
- Yang Wei, Chen Guojun, Lv Chengfu, et al. Micropore characteristics of the organic-rich shale in the 7 ~ (th) Member of the Yanchang Formation in the Southeast of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 418–426.
- [15] 王香增, 刘国恒, 黄志龙, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段泥页岩储层特征 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1385–1394.
Wang Xiangzeng, Liu Guoheng, Huang Zhilong, et al. The characteristics of shale reservoir of the No. 7 members in Yanchang Formation of Southeast Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1385–1394.
- [16] 王香增, 范柏江, 张丽霞, 等. 陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段为例 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 651–659.
Wang Xiangzeng, Fan Baijiang, Zhang Lixia, et al. Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas—a case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Erdos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 651–658.
- [17] 王香增, 张丽霞, 李宗田, 等. 鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型划分方案及其油气地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 1–7.
Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Li Zongtian, et al. Pore type classification scheme for continental Yanchang shale in Ordos Basin and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 1–7.
- [18] 王香增, 张丽霞, 雷裕红, 等. 低熟湖相页岩内运移固体有机质和有机孔特征——以鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段页岩为例 [J]. 石油学报, 2018, 39(2): 141–151.
Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Lei Yuhong, et al. Characteristics of migrated solid organic matters and organic pores in low maturity lacustrine shale: a case study of the shale in Chang 7 oil-bearing formation of Yanchang Formation, southeastern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(2): 141–151.
- [19] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气 [M]. 石油工业出版社, 2003.
He Zixin. The evolution and petroleum of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [20] 杨明慧, 刘池洋. 鄂尔多斯中生代陆相盆地层序地层格架及多种能源矿产聚集 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 563–570.
Yang Minghui, Liu Chiyang. Sequence stratigraphic framework and its control on accumulation of various energy resources in the Mesozoic continental basins in Ordos [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4): 563–570.
- [21] 王香增, 高胜利, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 294–304.
Wang Xiangzeng, Gao Shengli, Gao Chao. Geological features of Mesozoic lacustrine shale gas in south of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(3): 294–304.
- [22] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境 [J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59–64.
Zhang Wenzheng, Hua Y, Yang Y H. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59–64.
- [23] 程明, 罗晓容, 雷裕红, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩粉砂质夹层/纹层分布、分形特征和估算方法研究 [J]. 天然气地球科学,

- 2015, 26(5): 845–854.
- Cheng Ming, Luo X R, Lei Y H, et al. The distribution, fractal characteristic and thickness estimation of silty laminae and beds in the Zhangjiatan Shale, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 845–854.
- [24] Lei Yuhong, Luo X R, Wang X Z, et al. Characteristics of silty laminae in Zhangjiatan Shale of southeastern Ordos Basin, China: Implications for shale gas formation [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(4): 661–687.
- [25] 孔庆芬. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机显微组分特征[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(2): 163–166.
- Kong Qingfen. The organic maceral characteristic of Yanchang source rock in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(2): 163–166.
- [26] Guo H, Jia W, Peng P, et al. The composition and its impact on the methane sorption of lacustrine shales from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 509–520.
- [27] 雷裕红, 王晖, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩液态烃特征及对页岩气量估算的影响[J]. *石油学报*, 2016, 37(8): 952–961.
- Lei Yuhong, Wang Hui, Luo Xiaorong, et al. The characteristics of liquid hydrocarbons and its effects on the estimation of shale gas content in Zhangjiatan Shale, Ordos basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(8): 952–961.
- [28] 姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1880–1888.
- Jiang Chengfu, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, et al. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in 7th member of Yanchang Formation, southeast Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1880–1888.
- [29] 刘化清, 袁剑英, 李相博, 等. 鄂尔多斯盆地延长期湖盆演化及其成因分析[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(1): 52–56.
- Liu Huaqing, Yuan Jianying, Li Xiangbo. Lake basin evolution of Ordos Basin during Middle–Late Triassic and its origin analysis [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 52–56.
- [30] Arango I, Katz B J. Artificially-induced changes to organic matter properties as a consequence of the act of observation [C]. *AAPG Annual Convention and Exhibition*. The Chevron, Houston, Texas, USA; 2017.
- [31] Sanei H, Ardakani O H. Alteration of organic matter by ion milling [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 163: 123–131.
- [32] Mastalerz M, Schieber J. Effect of ion milling on the perceived maturity of shale samples: Implications for organic petrography and SEM analysis [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 183: 110–119.
- [33] Grobe A, Schmatz J, Littke R, et al. Enhanced surface flatness of vitrinite particles by broad ion beam polishing and implications for reflectance measurements [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 180: 113–121.
- [34] Hackley P C, Valentine B J, Hatcherian J J. On the petrographic distinction of bituminite from solid bitumen in immature to early mature source rocks [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 196: 232–245.
- [35] Valentine B J, Hackley P C, Hatcherian J, et al. Reflectance increase from broad beam ion milling of coals and organic-rich shales due to increased surface flatness [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 201: 86–101.
- [36] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 708–716.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 708–716.
- [37] Landis C R, Castaño J R. Maturation and bulk chemical properties of a suite of solid hydrocarbons [J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 22(1): 137–149.
- [38] Loucks R G, Reed R M. Scanning-electron-microscope petrographic evidence for distinguishing organic matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in mudrocks [J]. *GCAGS Transactions*, 2014, 3: 51–60.
- [39] Bernard S, Horsfield B, Schulz H M, et al. Geochemical evolution of organic-rich shales with increasing maturity: A STXM and TEM study of the Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany) [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2012, 31(1): 70–89.
- [40] Curiale J A. Origin of solid bitumens, with emphasis on biological marker results [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(1): 559–580.
- [41] Hill R J, Tang Y, Kaplan I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(12): 1651–1672.
- [42] Blanc P. Preservation, degradation, and destruction of trapped oil [J]. *AAPG Memoir*, 1994, 60: 237–247.
- [43] Rogers M A, McAlary J D, Bailey N J L. Significance of reservoir bitumens to thermal-maturation studies, Western Canada Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(9): 1806–1824.
- [44] Larter S, Wilhelms A, Head I, et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface—part I: biodegradation rates in petroleum reservoirs [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(4): 601–613.
- [45] Larter S, Huang H, Adams J, et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface: Part II—Geological controls on subsurface biodegradation fluxes and constraints on reservoir-fluid property prediction I [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(6): 921–938.
- [46] Milner C W D, Rogers M A, Evans C R. Petroleum transformations in reservoirs [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 101–153.
- [47] 卢龙飞, 蔡进功, 刘文汇, 等. 泥质烃源岩中蒙皂石与有机质的水桥结合作用——来自原位漫反射红外光谱的证据[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 47–56.
- Lu Longfei, Cai Jingong, Liu Wenhui, et al. Water bridges mechanism of organo-smectite interaction in argillaceous hydrocarbon source rocks: evidences from in situ DRIFT spectroscopic study [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 47–56.
- [48] Liu B, Schieber J, Mastalerz M. Combined SEM and reflected light petrography of organic matter in the New Albany Shale (Devonian–Mississippian) in the Illinois Basin: A perspective on organic pore development with thermal maturation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 184: 57–72.