

湖盆深水区细粒沉积成因研究进展

——以鄂尔多斯盆地延长组为例

庞军刚¹, 李 赛¹, 杨友运¹, 刘利军², 朱 杰³, 陈 栋³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 中国石油西部钻探苏里格项目部 采气综合管理部, 内蒙古 乌审旗 017314; 3. 延长油田股份有限公司 杏子川采油厂, 陕西 延安 716001)

摘要: 对于以中新生代陆相湖盆勘探为主的中国, 随着勘探领域由湖盆的浅水区转向深水区, 打破了深水区为油气勘探禁区的观念。而深水细粒沉积的研究程度低, 早期大多集中于烃源岩生油潜力分析。为了更好地认识深水区细粒沉积类型及成因, 为非常规油气勘探提供指导, 该文以鄂尔多斯盆地延长组为例, 在调研大量文献资料的基础上, 结合现代分析测试技术, 对深水区的沉积相及岩石沉积成因进行了研究。主要探讨了深水原地沉积、凝灰岩、深部热液、远端浊积岩、放射性铀等的特征及成因, 认为岩矿分析、地球化学分析是研究细粒沉积的主要手段, 而纳米技术将是当前和今后的重要研究方法。深水区细粒沉积中发育一定量的孔隙, 且由于其紧邻烃源岩, 很容易聚集成藏, 今后可作为重要的油气勘探对象之一。

关键词: 深水区; 细粒沉积; 沉积成因; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2⁺21

文献标识码: A

Study progress of origin of fine-grained sedimentary rocks in deep-water area of lacustrine basin:

Taking Yangchang Formation in Ordos Basin as an example

Pang Jungang¹, Li Sai¹, Yang Youyun¹, Liu Lijun², Zhu Jie³, Chen Dong³

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Gas Comprehensive Management Department, Western Drilling Project Manager Department in Sulige, PetroChina, Wushenqi, Inner Mongolia 017314, China; 3. Xingzichuan Oil Production Plant, Yanchang Petroleum Co Ltd, Yan'an, Shaanxi 716001, China)

Abstract: Since the exploration objects gradually changed from shallow-water to deep-water area in lacustrine basins for China's Meso-Cenozoic lacustrine basins, it will break the concept that the deep-water area is a forbidden zone for hydrocarbon exploration. Fine-grained deposits in the deep-water area were poorly studied in the past, and mainly focusing on the hydrocarbon-generating potential of source rocks. In order to determine the types and origins of the fine-grained deposits in the deep-water area, and to guide unconventional hydrocarbon explorations, a case study was made in the Yanchang Formation of the Ordos Basin. Based on a large amount of previous data and combined with modern testing techniques, the sedimentary facies and origins of rocks in the deep-water area were analyzed, especially the characteristics and origins of deep-water autochthonous sedimentation, tuff, deep thermal fluid, distal turbidite and radioactive uranium. It was emphasized that rock and mineral analysis together with geochemical analysis were the main methods to realize fine-grained deposits, among which nanotechnology would be the main research method in current and the future. A certain amount of pores developed in the fine-grained deposits in the deep-water area, which were close to source rocks, hence were favorable for hydrocarbon accumulation and exploration.

Key words: deep-water area; fine-grained deposit; sedimentary origin; Yanchang Formation; Ordos Basin

随着油气勘探向岩性油气藏的进军, 深水区细粒沉积研究及其勘探逐渐成为热点, 并且正在取得重要进展。沉积学中的深水是指正常浪基面以下

的深湖、半深湖^[1]。相对而言, 重力流、震积岩等深水区事件形成的较粗粒沉积研究成果较多, 油气勘探与开发也取得了明显的效果^[2-3]; 细粒沉积则

是侧重于烃源岩方面的研究,诸如烃源岩的厚度、类型、分布、有机质类型、成熟度等^[4-10]。随着研究的深入,人们逐渐注意到湖泛期细粒沉积在油气勘探中的作用^[11-12];同时,在鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7深水区地层中,发现了凝灰质夹层、放射性铀异常,以及烃源层中发现了可能与湖底热水活动有关的硅质岩等沉积^[13-16]。随着非常规油气藏理论的提出及其在中国的应用,人们进一步认识到深水区沉积成因研究的重要性^[17-18]。前人对重力流等粗粒沉积的研究较多,而深水细粒沉积成因的研究成果较少。人们总是习惯于使用早期研究粗粒沉积的方法和技术,但其分析精度受限,成果不明显。因此,有必要强调深水细粒沉积研究的方法和技术。诸如近期应用扫描电子显微镜在鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩中发现超微化石,为生物的演化及其环境的演化提供了有力的佐证^[19]。

1 深水沉积类型及特征

深水沉积包括深水异地沉积和深水原地沉积2种类型,海洋或湖泊深水区经横向运移而形成的沉积即为深水异地沉积,而原地沉积主要由垂直降落沉积作用形成。通常前者形成的沉积物比后者的粒度粗。深水异地沉积主要包括重力流沉积和深水牵引流沉积,近年来在这些沉积中发现了深部热液沉积、凝灰岩等。

1.1 深水原地沉积

深水细粒物质经过物理沉降作用或造岩矿物经过化学沉积作用而形成的泥页岩等沉积即为典型的深水原地沉积,其可对深水区的原有水动力特征、沉积物成分具有一定的指示意义。这个因重力作用而垂直沉降的过程非常缓慢,有机团粒和絮凝作用都可提高沉降速度。由于深水区其他营力的作用很弱,所以具有连续沉积过程的原地沉积在年代地层学和高分辨率层序地层学研究中均具有重要的意义。

1.2 凝灰岩夹层

野外露头中凝灰岩夹层为浅黄色、土黄色等,易蚀变成凝灰质黏土岩、黏土岩或斑脱岩。岩心中凝灰岩夹层颜色鲜艳多样,以灰黄色、(深)灰色、灰褐色为主,单层厚度为0.3~20 cm,累计厚度0.3~2.5 m,少量凝灰质砂泥岩或砂泥质凝灰岩或纯凝灰岩;在电测曲线上具有高自然伽马、高电阻率、高声波时差、低自然电位的特征。凝灰岩粒度通常小于2 mm,薄片中以杂基支撑为主,主要由玻屑、晶屑、岩屑组成。火山碎屑岩中玻屑、晶屑、岩屑的含量多少作为其分类命

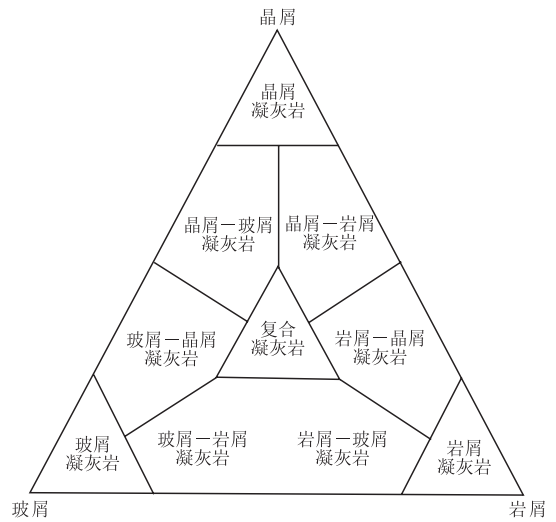


图1 凝灰岩按“三屑”含量所占比例分类^[15]

Fig.1 Classification of tuff according to proportion of glass crumbs, crystal and rock fragments

名的主要依据。以其为三角图分类的3个端元把凝灰岩分成10种类型^[15](图1)。

依据物态和成分结构特征,可将鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7油页岩中的凝灰岩划分为晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩和混合型凝灰岩,还有尘灰凝灰岩。在同一凝灰岩纹层中常可存在各种类型的凝灰岩,其具有粒度和结构成分的有序结构,由下至上,粒度由细变粗再变细。扫描电镜下凝灰岩以卷片状伊利石、层状—蜂巢状伊蒙混层及碎片状的长石为主^[16]。根据凝灰岩的形成机制可分为空降型凝灰岩和水携型凝灰岩。

1.3 硅质岩等共生体系及深部热液

目前热水沉积主要有3种成因类型^[20]:(1)产于火山—沉积岩系中与火山活动有关的热水沉积岩;(2)产于沉积岩系中的与区域地热异常有关的热水沉积岩;(3)与大陆地热系统温(热)泉或热储活动有关的热水活动。

硅质岩是常见热水活动的岩石学标志^[21]。据光学显微镜和扫描电子显微镜—能谱仪观测,在长7优质烃源层中发现了硅质条带或呈透镜状产出的硅质岩(图2)、铁白云石纹层沉积、白铁矿—黄铁矿—硬石膏共生体系、早期成岩缝中的自生钠长石充填现象,这些可能与湖底热水活动有关。能进一步佐证同期湖底热水活动存在证据的还有:长7优质烃源岩中异常高的二价硫含量(平均7.37%),Mo、Cu、U、Mn等微量元素的显著正异常特征,高的U/Th值,微晶铁白云石纹层偏重的碳同位素组成(2.88‰~3.03‰)、偏轻的氧同位素组成(-16.41‰~16.17‰)和富集Cu、Mn等微量元素的特征,莓球状黄铁矿偏正的硫同位素

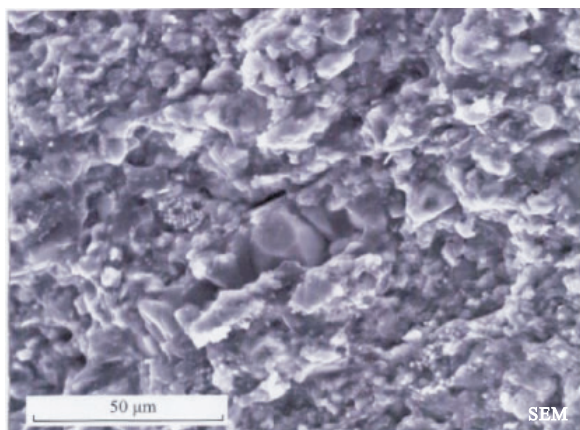


图2 鄂尔多斯盆地陇东地区庄50井长7硅质岩^[13]

Fig.2 Silicolite of Chang7 member in well Zhuang50, Longdong area, Ordos Basin

组成(2.37‰~5.90‰)特征等。长7段沉积早期,区域构造运动激活基底断裂是热水活动的动力学因素之一^[13]。由于局部的地震活动、异常高压、地热异常等形成裂缝,使得深部热水可能沿裂缝溢流,然后与凝灰岩、砂泥岩混染,形成研究区代表性的硅质—长石类热水沉积岩。

1.4 远端浊积岩

在鄂尔多斯盆地延长组的湖底扇相模式中,从物源向湖盆方向,浊积扇依次划分为内扇、中扇和外扇。中扇的浊积水道前缘微相位于中扇浊积水道的前方,多为扇前朵叶,通常与浊积水道是逐渐过渡的。沉积物粒度较细,主要以粉砂质泥岩和泥岩为主,多夹薄层粉砂岩、泥质粉砂岩,具水平层理及波状层理等,多见植物炭屑。外扇位于中扇外缘的湖底平原,通常分布在凹陷最深部位的半深水区和深水区,浊流周期性中断该平坦区的原地泥质沉积,因无水道限制,水平延伸稳定的薄层砂岩与深湖相暗色泥岩呈交互式沉积。这些均为浊流形成的细粒沉积,一般发育鲍马序列的上部组合,如CDE、DE、CE等。在测井曲线上以泥岩基线为主,夹少量低幅齿形或指形。目前在中扇浊积水道的成因细砂岩中发现了工业油流,在这些远端浊积岩中未见工业油流。

1.5 深水牵引流(等深流)

晚三叠世鄂尔多斯盆地水域宽广,深度大,水体具有不同的温度层、密度层。盆地周边构造活动也可诱发暴风、重力流。因此,水体的温度差、密度差及暴风均可引起底流,可分为砂质底流和泥质底流,两种底流的分类没有统一标准,有学者认为含砂25%是砂质底流的下限。牵引构造是鉴别底流沉积的唯一可靠标志,一般识别底流的主要标志

有:(1)岩性以粉砂、细砂为主;(2)砂岩发育薄层理或透镜状层理夹于深水泥岩中,厚度小于5 cm;(3)砂岩与泥岩顶底接触截然,无侵蚀作用;(4)砂岩内部具有侵蚀面;(5)砂岩与泥岩垂向上形成韵律层。

研究区一般为灰黑色含交错层理粉砂岩、细砂岩夹于深湖黑色泥页岩中,底流具牵引流的特征,可以改造沉积在水底的松散沉积物,形成牵引沉积构造,如沙纹层理、平行层理等,单层厚度一般小于5 cm。因此,其在地层中所占厚度和体积的比重不大,一般不能构成有效的石油储集体^[22]。

2 主要分析测试技术

2.1 岩矿分析测试方法

主要的岩矿测试方法有扫描电镜、阴极发光、电子探针及能谱、X衍射分析等。借助这些分析测试可以很好地识别细粒沉积。如根据X衍射图谱特征、扫描电镜识别主要的黏土矿物类型^[23]。

(1)扫描电镜:分辨率高,放大倍数大,景深大,立体感强。主要用于观察孔隙几何形态、充填物、内衬物、桥塞物和多种矿物的立体图像及黏土矿物、微孔隙等。其鉴定矿物的原理就是根据其形貌和晶形。近年发展的扫描电镜配上能谱仪,结合矿物成分的分析,可对形貌和晶形相似的矿物进行很好地识别(图3a,b)。

(2)阴极发光:由电子束轰击样品,使之发光,不同矿物含有不同的激活剂元素,因而产生不同的阴极发光。根据矿物的发光特征来研究其成分、晶体形态和相互关系,可以确定碎屑岩胶结物成分、岩石结构、重结晶作用等,判断胶结现象及孔隙类型等(图3c,d)。

(3)电子探针及能谱:电子探针可研究矿物的X射线能谱,确定矿物化学成分。其特点是灵敏度高、不破坏样品、分析元素范围大,对有些光学特征、形态、阴极发光颜色相近的矿物,就必须借助电子探针分析进行。如区分不同类型的长石、碳酸盐岩、黏土矿物、沸石类矿物等。测量X射线波长的谱仪为电子探针,测定X射线能量的谱仪为能谱仪。能谱仪配合扫描电镜就可以边观察样品边测定化学成分。其在所测量的某一点上能得到该点的各种元素成分及其图谱,其含量愈高,谱峰愈高,反之亦然。通过测量X射线波长或能量可以高灵敏度地测定矿物的化学成分,特别是对细小的疑难矿物,如沸石类、黏土矿物进行鉴定(图3e)。

(4)X衍射分析:能准确地定名自生矿物,对

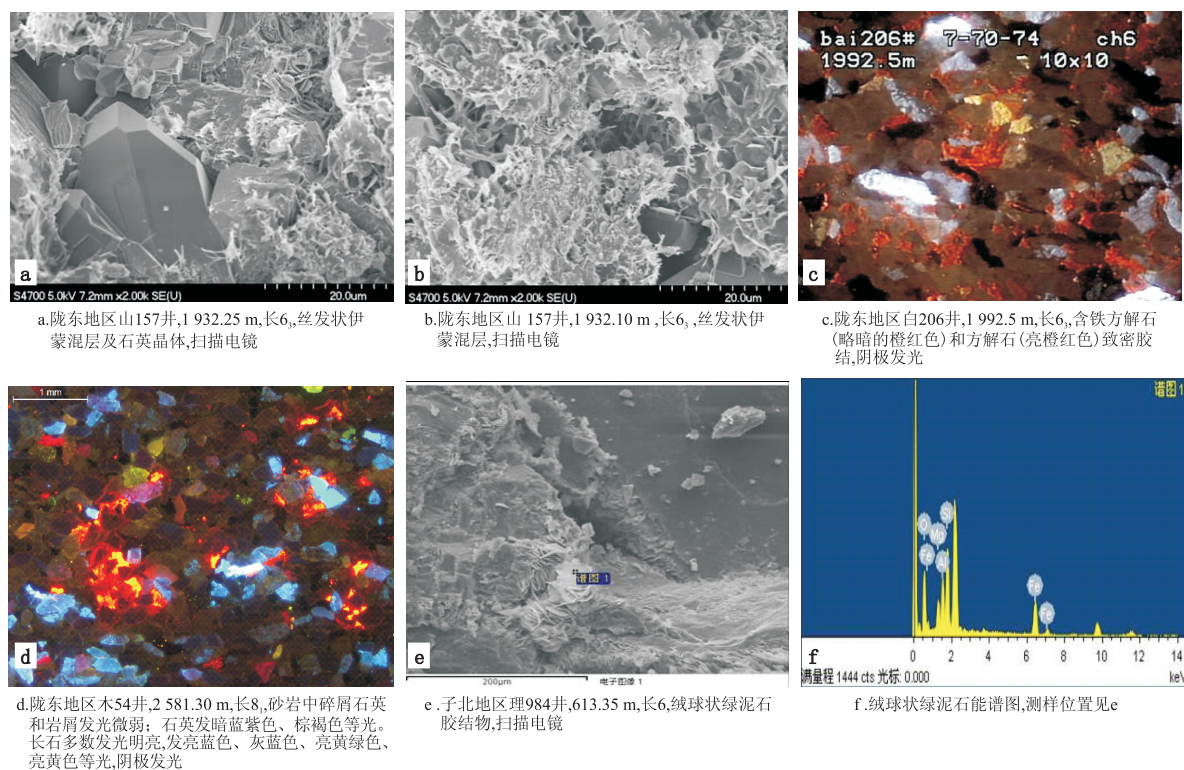


图3 各种岩矿测试方法典型实物照片

Fig.3 Typical photos of various techniques for rock and mineral tests

黏土矿物进行定性定量分析, 鉴别混层黏土矿物及混层比。黏土矿物及有些自生矿物在偏光显微镜下难以辨认, 在电镜下形貌相似的矿物也难以区分, 更不好确定其含量。而 X 衍射分析能根据常见黏土矿物的 X 衍射特征鉴定矿物类型, 进行黏土矿物半定量分析, 确定黏土矿物的百分含量, 根据衍射峰的强度和形状估算结晶度。

(5) 纳米技术: 国内外利用 Micro-CT、Nano-CT 装置在材料、生物等方面开展了诸多研究, Nano-CT 技术在岩石储层研究中的应用在国际上仍处于起步阶段。采用高性能 X 光成像的 Nano-CT 系统, 可以揭示纳米级精细三维岩石孔隙结构特征。其将 X 射线源聚焦到岩石样品内部特定区域, 进行多个岩石样品观测, 将所有观测结合生成岩石的虚拟微观三维图像, 分辨率可高达 50 nm。目前该技术已初步应用于复杂的非常规油气储层研究中, 如发现了四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩储层, 四川盆地南部寒武及志留系页岩气储层中的纳米级孔隙结构^[24]。

2.2 地球化学方法

元素地球化学可分为主量元素和稀土元素分析(简称 REE)。主量元素最直接的应用是确定岩石的主要成分, 大多数地球化学分析结果给出了主量元素数据。稀土元素在沉积岩、火成岩中应用较

广, 效果明显。由于稀土元素为最不易溶解的微量元素, 在沉积、低级变质及热液蚀变作用中活动性差。因此, 蚀变轻微的岩石 REE 类型可以大体代表其蚀变原岩的 REE 特征, 可从其峰的意义、波谷变化和斜率的大小进行判断^[8]。根据深湖区细粒沉积的地球化学分析, 可以恢复沉积时期的古环境、古气候、古水体等信息^[25]。前人对鄂尔多斯盆地延长组湖盆特征、古盐度、古水深等进行了分析^[26-27]。根据长 7 泥页岩等细粒沉积样品的 Sr 含量、Sr/Ba 值和 Th/U 值等地球化学指标及生物遗迹化石作为判识标志, 判断该期沉积环境的水介质与古气候条件。结果显示其古水介质 Sr/Ba 值为 0.19~0.65, Th/U 值为 0.36~5.03, 属陆相淡水环境; V/Ni 值为 1.75~5.53, 属于还原环境; 通过元素组合及生物遗迹化石、钴元素定量计算显示水体深度介于半深湖、深湖之间, 最大古水深为 50~120 m; 孢粉组合分析显示古气候属较温暖潮湿气候^[28]。

3 放射性铀异常

前人研究发现鄂尔多斯盆地深部存在放射性异常, 且该放射性异常主要是由于地层中的铀元素引起的。通过单井自然伽马异常段厚度的统计, 可以绘制伽马异常的平面分布图。鄂尔多斯盆地长

7₃ 底部的异常高值区主要分布在宁县、正宁以东、镇原、合水—庆阳、上里塬—环县、王洼子区域^[14]。放射性铀异常与凝灰岩的展布范围及形态一致,放射性异常高值区对应于凝灰岩累计值较大区,两者之间的时空耦合反映其具有一定的成因联系^[29]。

4 作为油气烃源岩、储层的优势和可能性

4.1 凝灰岩对烃源岩的影响

地震与盆地边缘断裂活动促进了湖盆的快速沉降和水体扩张,有利于促成适宜烃源岩发育的深水缺氧还原环境^[30]。长 7 油页岩为鄂尔多斯盆地延长组的主要烃源岩,主要分布在深湖区,和凝灰岩的分布范围大体一致。该段地层中发现了多层火山喷发作用形成的薄纹层—纹层状凝灰岩,并发现了一些湖底热水活动的岩矿证据。因此,晚三叠世长 7₃ 沉积时的热水活动与火山喷发为湖盆中的生物提供养料,促进湖盆生物的大量繁殖。同时由火山作用带来的火山灰沉积使盆地内暂时处于缺氧环境,该期大量死亡的生物残体为烃源岩的形成提供物质。而凝灰岩中出现的放射性铀异常可对有机质起到加温和催化作用,有利于烃源岩的演化。

4.2 作为油气的储集层

在非常规石油地质理论的指导下,细粒浊积岩作为油气储层可具有一定的开采价值。应用纳米技术,细粒沉积有可能作为含油气系统的储层。深水区细粒砂岩中发育一定量的孔隙,且由于其紧邻烃源岩,油气生成后在异常高压下很容易聚集成藏。油藏具有距离油源近、异常高压、储层物性差等特征,为一种典型的连续型油气藏^[18]。近年通过 Nano-CT 三维扫描成像技术在致密砂岩储层发现了杂基及颗粒纳米孔、自生矿物晶间隙及微裂缝 3 种类型纳米级孔隙。根据三维扫描重构数据计算,致密砂岩中纳米级孔隙为主要连通性孔隙类型(占总孔隙类型 85% 以上),而宏观孔隙、微米级孔隙相对较少,该特征可能是致密砂岩储层低孔—超低渗的本质特征,决定了其特殊的油气藏特征及油气成藏机理^[24]。因此,随着人们认识水平的提高及分析测试技术的进步,深水细粒沉积今后可作为重要的油气勘探对象之一。

5 主要认识

(1) 随着岩性油气藏在我国油气勘探中所占比例的增加,勘探领域逐渐由湖盆的浅水区转向深水区,打破了深水区为油气勘探禁区的观念,对于以中生代陆相湖盆勘探为主的中国,沉积相及岩

石沉积成因的研究尤为重要。

(2) 深水沉积的研究程度低,特别是深水细粒沉积的研究处于起步阶段,早期大多集中于烃源岩生油潜力分析。本文以鄂尔多斯盆地延长组地层为例,主要探讨了深水原地沉积、凝灰岩、深部热液、远端浊积岩、放射性铀等几个方面的研究进展,兼论细粒沉积的研究方法,其中纳米技术将是当前和今后的主要研究方法。

(3) 深水区细粒沉积可作为含油气系统中的烃源岩和储层。

参考文献:

- [1] 庞军刚,李文厚,肖丽.陕北地区延长组坳陷湖盆浅湖与深湖亚相的识别特征[J].兰州大学学报:自然科学版,2009,45(6):36-40.
Pang Jungang, Li Wenhui, Xiao Li. Identifying characteristics of shallow lake and deep lake of Yanchang formation depressed type lacustrine basin in Shanbei area[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2009, 45(6): 36-40.
- [2] 赵俊兴,李凤杰,申晓莉,等.鄂尔多斯盆地南部长 6 和长 7 油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J].石油学报,2008,29(3):389-394.
Zhao Junxing, Li Fengjie, Shen Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2008, 29(3): 389-394.
- [3] 杨红君,郭书生,刘博,等.莺歌海盆地 SE 区上中新统重力流与内波内潮汐沉积新认识[J].石油实验地质,2013,35(6):626-633.
Yang Hongjun, Guo Shusheng, Liu Bo, et al. Gravity flow and internal wave and internal tide deposits in Upper Miocene of SE area, Yinggehai Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 626-633.
- [4] 张林峰.湖相烃源岩研究进展[J].石油实验地质,2008,30(6):591-595.
Zhang Linfe. The progress on the study of lacustrine source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 591-595.
- [5] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [6] 张文正,杨华,李剑锋,等.论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:强生排烃特征及机理分析[J].石油勘探与开发,2006,33(3):289-293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation: hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. Petroleum Exploration and Deve-

- lopment, 2006, 33(3): 289-293.
- [7] 张文正, 杨华, 傅锁堂, 等. 鄂尔多斯盆地长 9₁ 湖相优质烃源岩的发育机制探讨 [J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊 I): 33-38.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Fu Suotang, et al. Discussing on the developmental mechanism of Chang 9₁ lacustrine high-class source rocks in the Ordos Basin [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2007, 37(Sup I): 33-38.
- [8] 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, Yang Hua, Yang Yihua, et al. 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.
- [9] 张文正, 杨华, 彭平安, 等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响 [J]. 地球化学, 2009, 38(6): 573-582.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [10] 赵雪娇, 王震亮, 范昌育, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段烃源岩排烃机制及成藏意义 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 35-38.
- Zhao Xuejiao, Wang Zhenliang, Fan Changyu, et al. Hydrocarbon-expulsion dynamic conditions and accumulation significance of petroleum of source rocks in Longdong area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 35-38.
- [11] 喻建, 杨亚娟, 杜金良. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组湖侵期沉积特征 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 181-187.
- Yu Jian, Yang Yajuan, Du Jinliang. Sedimentation during the transgression period in Late Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 181-187.
- [12] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题 [J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
- Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [13] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响: 以鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩为例 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 424-429.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.
- [14] 谭成仟, 刘池洋, 赵军龙, 等. 鄂尔多斯盆地典型地区放射性异常特征及其地质意义 [J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊 I): 147-156.
- Tan Chenqian, Liu Chiyang, Zhao Junlong, et al. Radioactive anomaly character and its geological significance in typical area, Ordos basin [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2007, 37(Sup I): 147-156.
- [15] O'Brien R T. Classification of tuff [J]. Journal of Sedimentary Research, 1963, 33(1): 234-235.
- [16] 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 等. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 1138-1146.
- Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Li Yuanhao, et al. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang formation of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 1138-1146.
- [17] 张鑫, 朱光辉, 赵汝敏, 等. 孟加拉湾盆地东部某区块深水扇沉积特征 [J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 45-48.
- Zhang Xin, Zhu Guanghui, Zhao Rumin, et al. Fan sedimentation characteristics under deep water of Block X of Eastern Bengal Bay Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(6): 45-48.
- [18] 邹才能 陶士振 袁选俊, 等. 连续型油气藏形成条件与分布特征 [J]. 石油学报, 2009, 30(3): 324-331.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [19] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 优质烃源岩中超微化石的发现及意义 [J]. 古生物学报, 2011, 50(1): 109-117.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Discovery of micro- and nanofossils in high grade hydro-carbon source rocks of the Triassic Yanchang Formation Chang 7 member in Ordos Basin and its scientific significance [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2011, 50(1): 109-117.
- [20] 吴志亮, 李峰. 热水沉积成岩作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Wu Zhiliang, Li Feng. Hydrothermal sedimentation, diagenesis and mineralization [M]. Beijing: Geological Press, 1996.
- [21] 肖荣阁, 张汉城, 陈开泉, 等. 热水沉积岩及岩石矿物标志 [J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 379-385.
- Xiao Rongge, Zhang Hancheng, Chen Huiquan, et al. Hydrothermal sedimentary rock and indicator of minerals and rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 379-385.
- [22] 杨华, 付金华. 超低渗透油藏勘探理论与技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- Yang Hua, Fu Jinhua. Exploration theory and technology for ultra-low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [23] 陈丽华, 缪昕, 魏宝和. 扫描电镜在石油地质上的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- Chen Lihua, Miao Xi, Wei Baohe. Application of SEM in the petroleum and geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [24] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值 [J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [25] 董刚, 何幼斌. 根据地层厚度恢复古水深的研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2010, 7(3): 484-486.
- Dong Gang, He Youbin. Study on the restoration of the paleowater depth according to the stratigraphic thickness [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2010, 7(3): 484-486.

types and resources characteristics of shale gas in China[J].Natural Gas Industry,2009,29(12):109-114.

[11] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):289-299.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 289-299.

[12] 孟庆峰,侯贵廷.页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J].油气地质与采收率,2012,19(1):11-14.
Meng Qingfeng, Hou Guiting. Geological controls on shale gas play and potential of shale gas resource in upper Yangtze region, China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 11-14.

[13] 冯爱国,张建平,石元会,等.中扬子地区涪陵区块海相页岩气层特征[J].特种油气藏,2013,20(6):15-19.
Feng Aiguo, Zhang Jianping, Shi Yuanhui, et al. Characteristics

of marine shale gas play in fuling block in the Middle Yangtze Area[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2012,20(6):15-19.

[14] 葛忠伟,樊莉.页岩气研究中应注意的问题[J].油气地质与采收率,2013,20(6):19-22.
Ge Zhongwei, Fan Li. Some notable problems about shale gas in the scientific research [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 19-22.

[15] 何发岐,朱彤.陆相页岩气突破和建产的有利目标:以四川盆地侏罗统为例[J].石油实验地质,2012,34(3):246-251.
He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 246-251.

[16] 朱彤,包书景,王烽.四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J].天然气工业,2012,32(9):16-21.
Zhu Tong, Bao Shujing, Wang Feng. Pooling conditions of non-marine shale gas in the Sichuan Basin and its exploration and development prospect [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 16-21.

(编辑 徐文明)

~~~~~  
(上接第 711 页)

[26] 傅强,孙喜天,刘永斗.鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(11):1537-1540.  
Fu Qiang, Sun Xitian, Liu Yongdou. Geologic significance and re-establishment of basin character in Late Triassic of Ordos Basin [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(11): 1537-1540.

[27] 文华国,郑荣才,唐飞,等.鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析[J].矿物岩石,2008,28(1):114-120.  
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the chang6 member in the Gengwan region, Ordos Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120.

[28] 张才利,高阿龙,刘哲,等.鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究[J].天然气地球科学,2011,22(4):

582-587.  
Zhang Caili, Gao Along, Liu Zhe, et al. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang 7 oil layer in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 582-587.

[29] 邱欣卫.鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层特征和形成环境[D].西安:西北大学,2008.  
Qiu Xinwei. Characteristics and forming environments of tuffs in Yanchang formation in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2008.

[30] 杨友运.印支期秦岭造山活动对鄂尔多斯盆地延长组沉积特征的影响[J].煤田地质与勘探,2004,32(5):7-9.  
Yang Youyun. Influence of Qinling Orogenic Movements in Indo-Chinese Epoch to sedimentary characteristics of Yanchang formation in Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(5): 7-9.

(编辑 徐文明)

~~~~~  
(上接第 717 页)

[41] 徐永昌.天然气成因理论及应用[M].北京:科学出版社,1994:236-255.
Xu Yongchang. Theory and application of natural gas genesis [M]. Beijing: Science Press, 1994: 236-255.

[42] 金之钧,胡文瑄,张刘平,等.深部流体活动及其油气成藏效应[M].北京:科学出版社,2007:133-142.
Jin Zhijun, Hu Wenxuan, Zhang Liuping, et al. Deep-derived flu-

id and its effect on hydrocarbon accumulation [M]. Beijing: Science Press, 2007: 133-142.

[43] Lin L H, Hall J, Lippmann-Pipke J, et al. Radiolytic H₂ in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005, 6(7): Q07003. doi: 10.1029/2004GC000907.

(编辑 黄娟)