

文章编号:1000-0550(2014)06-1016-10

鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨^①

刘群¹ 袁选俊¹ 林森虎¹ 王岚¹ 郭浩¹ 潘松圻¹ 姚泾利²

(1.中国石油勘探开发研究院 北京 100083;2.中国石油长庆油田分公司 西安 710018)

摘要 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组沉积了区域分布的大套湖相黏土岩,它不但是鄂尔多斯盆地中生界最重要的烃源岩,同时也是目前致密油/页岩油勘探的主要领域。作者在对国内外黏土岩分类及其成因机制等系统调研基础上,通过对工区25口连续取芯井的岩芯描述和400余块典型黏土岩薄片观察,并充分应用X衍射、有机地球化学等分析测试资料,提出了湖相黏土岩的分类方案与基本特征,探讨了不同类型黏土岩形成的沉积环境。根据岩石组分、沉积构造等特征,鄂尔多斯盆地延长组长7油层组黏土岩主要发育5种类型:①块状泥岩;②粒序层理泥岩;③波状纹层页岩;④平直纹层页岩;⑤似块状页岩。该成因分类方案将黏土岩类型与沉积环境相结合。指出受三角洲前缘影响的浅湖区以块状泥岩为主;受湖流和波浪影响的浅湖—半深湖环境以波状纹层页岩为主;深湖静水区以平直纹层状页岩为主;深湖拗陷区以粒序层理泥岩为主;火山灰爆发时期以似块状页岩为主。粒序层理泥岩是致密油赋存的主要类型,有机碳平均含量为6%;似块状页岩是页岩油赋存的主要类型,有机碳平均含量为17.17%。

关键词 湖相黏土岩 5种岩相 沉积环境 延长组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 刘群女 1991年出生 硕士研究生 湖盆沉积学与非常规石油地质 E-mail:ro1q114@abdn.ac.uk

中图分类号 TE121.3⁺¹ **文献标识码** A

0 引言

黏土岩这一术语的涵义和使用,在国际沉积学界仍未有统一的认识^[1]。如阿弗杜辛(1956)^[2]定义黏土岩为0.01 mm~5 nm的质点(超过50%)组成的岩石,小于5 nm的质点为黏土质溶液;鲁欣(1964)^[3]的定义是含泥质颗粒(直径小于0.01 mm)50%以上,且其中小于0.001 mm的颗粒又不小于25%的岩石均划归为黏土岩;苏联学者维库洛娃(1958,1973)用“黏土质岩石”来概括这一类岩石,她认为黏土质岩石中泥质颗粒(<0.01 mm)的含量应达50%,其中<0.001 mm颗粒不少于25%,并按固结程度,把它分为黏土→固结黏土→泥板岩;美国学者波特(Potter)用泥质岩(mudrocks)这一术语概括粉砂岩和上述的黏土质岩石,即根据<0.003 9 mm颗粒的含量,把未固结的沉积物分为粉砂、泥、黏土三种,固结之后分别称为粉砂岩、泥岩和黏土岩,显然波特所指的黏土岩是狭义的概念^[4];布拉特等(1978)^[5]使用“泥状岩”这个术语来表示粉砂、黏土以及两者的混合物组成的岩石。目前国际通用标准,是将粒度小于0.003 9 mm的黏土级颗粒(含量大于50%)组成的细粒沉积岩称为黏土岩,并根据页理发育程度又将黏土岩分为泥岩

和页岩2大类。

“泥岩”和“页岩”这两个术语的涵义比较模糊且难以严格区分。从粒级上来说,泥岩和页岩的颗粒大小基本相同,部分学者认为泥岩等同页岩。另一些学者认为泥岩和页岩具有不同的含义,页岩是具有页理的黏土岩,泥岩是不具页理的黏土岩,如冯增昭(1994)^[6]等。此外,页岩和泥岩的成分也可能具有较大差异,如布拉特等(1978)^[7]认为,页岩的黏土矿物含量显著高于泥岩;阿弗杜辛(1956)^[2]认为泥岩是成分中大小为0.01~0.000 1 mm(0.000 2 mm)的矿物质点占50%以上的黏土岩,即较粗部分的黏土岩,泥岩还可以分为粗粒泥岩(主要为0.01~0.001 mm的质点)和细粒泥岩(主要为0.001~0.000 1 mm(0.000 2 mm)的质点),小于0.000 1 mm的质点所组成的岩石列入胶体黏土中,其中也分为粗胶体(0.000 1 mm~5 nm)和真黏土胶体(<5 nm)两类。还有一些学者认为,页岩的范畴更大,应该包含泥岩(塞利,1985)。

近年来,针对黏土岩成因机制,国内外学者也开展了较为深入的研究。通过薄片观察,扫描电镜等手段观察发现海相黏土岩的非均质性很强,往往可以看作是一些事件性沉积薄层,而不是连续沉降的沉积物^[7]。这些薄层主要有以下几种沉积机制:①波浪

^①国家油气重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”(编号:2011ZX05001)资助
收稿日期:2013-12-16;收修改稿日期:2014-03-21

增强引起的沉积物重力流^[8];②远端风暴^[9];③波纹发育的牵引流^[10];④悬浮沉降;⑤浊流^[11]⑥洪水引发的异重流^[12]。中国主要发育湖相黏土岩,但关于其微相特点、分布特征与形成机理的研究才刚刚起步。传统认识认为深水环境中的黏土岩沉积受控于高频气候旋回,较少探讨沉积水动力对黏土岩沉积的控制作用^[13],但济阳坳陷沾化凹陷沙三下亚段110 m 连续的黏土岩岩芯中,发现事件成因黏土岩所占比例超过厚度的 75%^[14]。

本文在对鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组沉积特征系统研究的基础上,通过对工区 25 口连续取芯井的岩芯描述和 400 余块典型黏土岩薄片观察,并充分应用 X 衍射、有机地球化学等分析测试资料,提出了湖相黏土岩的分类方案与基本特征,探讨了不同类型黏土岩的形成与分布。

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,面积约 25×10⁴ km²,是一个发育在太古代—早元古代结晶基底之上的大型多旋回克拉通盆地,主要形成了古生代和中生代两套含油气系统^[15-17]。其中中生代含油气系统以三叠系延长组长 7 油层组湖相泥页岩为主要烃源岩,延长组致密砂岩和侏罗系常规砂岩为主要储层,在盆地南部已发现安塞等大型岩性油田和华庆等大型致密砂岩油田。

鄂尔多斯盆地延长组发育一套厚 800~1 200 m 的深灰色、灰黑色泥岩和灰绿色、灰色粉砂岩、中细粒

砂岩互层的旋回性沉积。根据岩性、电性、含油情况,将其自下而上划分为 5 个岩性段(T₃y¹~T₃y⁵)或 10 个油层组(长 10~长 1)。其中长 7 油层组沉积时期为湖盆演化的鼎盛时期,湖盆水体最深,湖面宽广,湖泊面积超过 10×10⁴ km²,水体深度可达 150 m,沉积了一套生烃能力巨大的湖相黏土岩。长 7 油层组沉积厚度 100~150 m,自下而上可分为 3 个小层。沉积相研究表明,长 7₃以深湖相沉积为主,页岩发育,在湖泊周缘发育三角洲砂体,在深湖区发育小规模砂质碎屑流砂体(图 1)^[18];长 7₂湖泊开始萎缩,深湖相沉积范围减小,西南部大型三角洲发育并向湖延伸,导致深湖区发育大规模砂质碎屑流沉积;长 7₁湖泊继续萎缩,大型三角洲持续发育,深湖区砂质碎屑流沉积范围进一步扩大。本文旨在通过建立黏土岩(泥岩、页岩)类型与沉积环境关系,划定富有机质黏土岩分布范围。

1 黏土岩分类及基本特征

目前国内关于湖相黏土岩的岩石分类方法大都以成因法为主,但分类原则与划分方案差异较大(表 1)。邓宏文(1998)^[14]、王冠民(2011)^[19]主要根据沉积构造、纹层组分特征对泥页岩进行了划分;刘昭君(2009)^[20]、郭巍(2009)^[21]主要根据湖盆类型、水体盐度和有机质类型对油页岩进行了划分;姜在兴(2013)^[22]主要根据有机碳含量和矿物含量对黏土

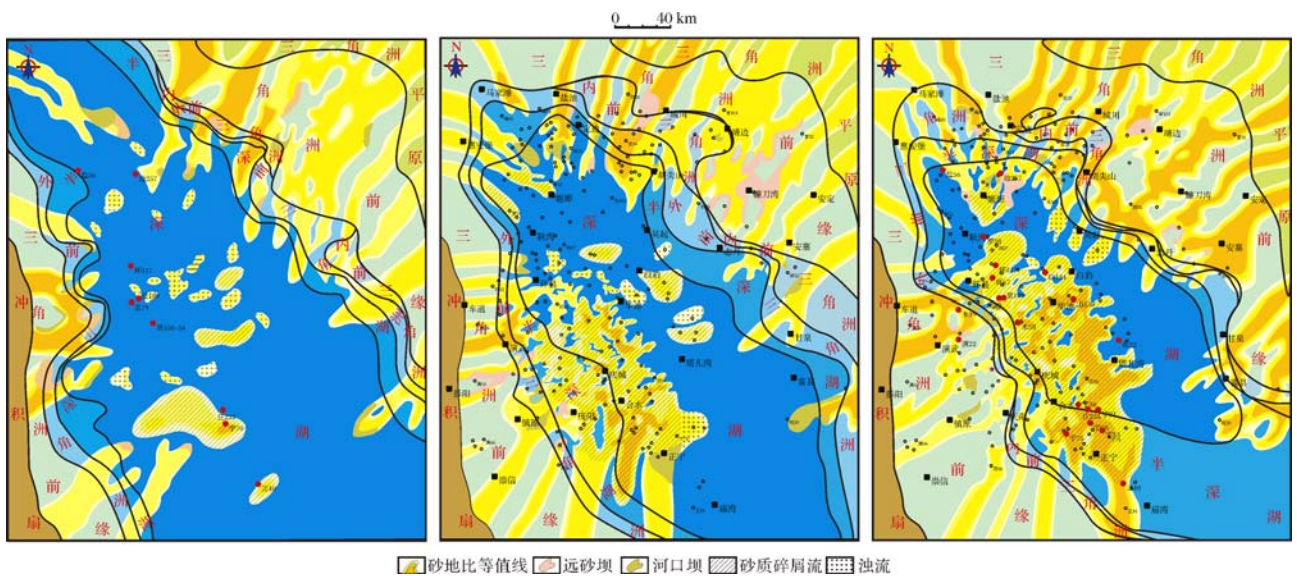


图 1 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 油层组 3 个小层沉积相图(左:长 7₃,中:长 7₂,右:长 7₁)(据林森虎,2012)
(黑点为观察井位,红色为采样井位)

Fig.1 The sedimentary facies of sub-Chang 7 members, Triassic, Ordos Basin
(left: Chang 7₃, middle: Chang 7₂, right: Chang 7₁) (after Lin Senhu, 2012)

岩、湖相灰岩等细粒沉积岩进行了划分。

作者在前人分类方案基础上,将成分、成因、有机碳含量相结合对黏土岩进行分类(表 2)。根据岩石组分、纹层结构、有机碳含量等指标,首先将湖相黏土岩分为泥岩与页岩两大类。根据沉积结构,进一步将泥岩分为块状泥岩、粒序层理泥岩 2 类;将页岩分为波状纹层页岩、平直纹层页岩、似块状页岩等 3 类。黏土岩沉积构造反映沉积过程,受沉积环境控制。黏土岩的有机碳含量及有机质类型主要受沉积环境和沉积相带控制。因此将传统成分分类方案与沉积构造,有机碳含量指标结合,更能将黏土岩岩相类型与沉积相带和沉积环境结合。有机碳含量、有机质类型指标的结合更有助于划分富有机质页岩区域。

通过 400 多块泥、页岩薄片的显微镜观察,X 衍射、有机地球化学等指标分析,鄂尔多斯盆地长 7 油层组 5 种湖相黏土岩类型基本特征如表 2。

1.1 块状泥岩

岩石主要为灰色、深灰色粉砂质泥岩,含粉砂泥

岩。显微镜下,泥岩纹层一般模糊不清。纹理一般仅仅靠断续的有机质脉体、碳屑呈现。

因为粉砂质泥岩是在较高能量下沉积,所以常常会伴有一些泥质撕裂屑(图 2a)。图 2b 中可到泥质层与粉砂岩交互,反映沉积时能量逐渐减弱,悬浮物质依次沉降。图 2c 中可见生物扰动,指示其沉积时在有氧界面;图 2d 中可见砂质条带纹层。

1.2 粒序层理泥岩

岩石表现为泥和砂毫米级间互沉积,肉眼可见多条砂质条带。显微镜下观察,可见多期递变层理,岩性由粗到细,渐变或者突变。

如图 3a 和 3b 岩石粒度由细砂到泥的过渡,呈现厘米级韵律层。图 3c 中浅色条带多为石英,深色多为黏土矿物。图 4d 中可见到一个完整的细砂岩—粉砂岩—页岩的正粒序。

1.3 波状纹层页岩

岩石主要为黑色粉砂质页岩、页岩;在肉眼下不易分辨,但在薄片下可见断续的波状层理、连续波状

表 1 湖湘黏土岩分类方案汇总表

Table 1 The summary on classification of mudrock

作者	分类方法	分类原则	岩石类型
邓洪文(1998)	成因	沉积构造	黑页岩、水平纹层粉砂质泥岩、递变纹层粉砂质泥岩、钙片黑页岩、钙质纹层页岩
郭巍(2009)	成因	有机质类型	腐泥型油页岩、混合型油页岩、腐殖残殖型油页岩
刘昭君(2009)	成因	湖盆类型	坳陷湖成油页岩,断陷湖成油页岩和断陷湖泊—沼泽油页岩
刘昭君(2009)	成因	水体盐度	淡水油页岩和半咸水油页岩
王冠民(2011)	成因	纹层组份	黑页岩、钙质纹层页岩、油页岩、纹层状页岩、纹层状灰岩、钙质页岩、泥页岩
姜在兴(2013)	成分	有机碳含量和矿物含量	高有机质灰岩、高有机质黏土岩、中有机质黏土岩、中有机质灰岩、低有机质灰岩、低有机质黏土岩
本文	成分与成因	岩石组分	泥岩
		纹层结构	块状泥岩 粒序层理泥岩 波状纹层页岩 平直纹层页岩 似块状页岩
		有机碳含量	页岩

表 2 鄂尔多斯盆地长 7 油层组黏土岩类型的基本特征

Table 2 The basic characteristics of mudstone in Chang 7 member, Ordos Basin

序号	岩石命名	沉积特征	主要矿物成分(平均)	TOC/%	TOC 类型	沉积机理	沉积环境
I	块状泥岩	灰色,深灰色;块状	石英:37.1%;长石:12%;黏土矿物:40%;黄铁矿:2%	2.04%	II ₂ 和 III 型	高能态机械分异沉降	三角洲前缘—浅湖
II	粒序层理泥岩	灰色,深灰色,粒序层理	石英:35%;长石:12%;黏土矿物:40%;黄铁矿:6%	6%	II ₂ 和 III 型	浊流,异重流等事件性沉积	深湖凹陷区
III	波状纹层页岩	黑色;断续或连续波状层理,透镜状组构	石英:30%;长石:11%;黏土矿物:45%;黄铁矿:5%	6.86%	II ₂ 型	底负载荷搬运	浅湖—半深湖
IV	平直纹层页岩	黑色,纹层平直分布	石英:23.8%;长石:11%;黏土矿物:53.2%;黄铁矿:14%	6.06%	I 型	季节性沉积	深湖静水区
V	似块状页岩	黑色,透镜状有机—矿物集合体定向排列	石英:25.2%;长石:8.15%;黏土矿物:43.2%;黄铁矿:18.5%	17.17%	I 型	有机质—矿物集合体悬浮沉降	火山喷发期

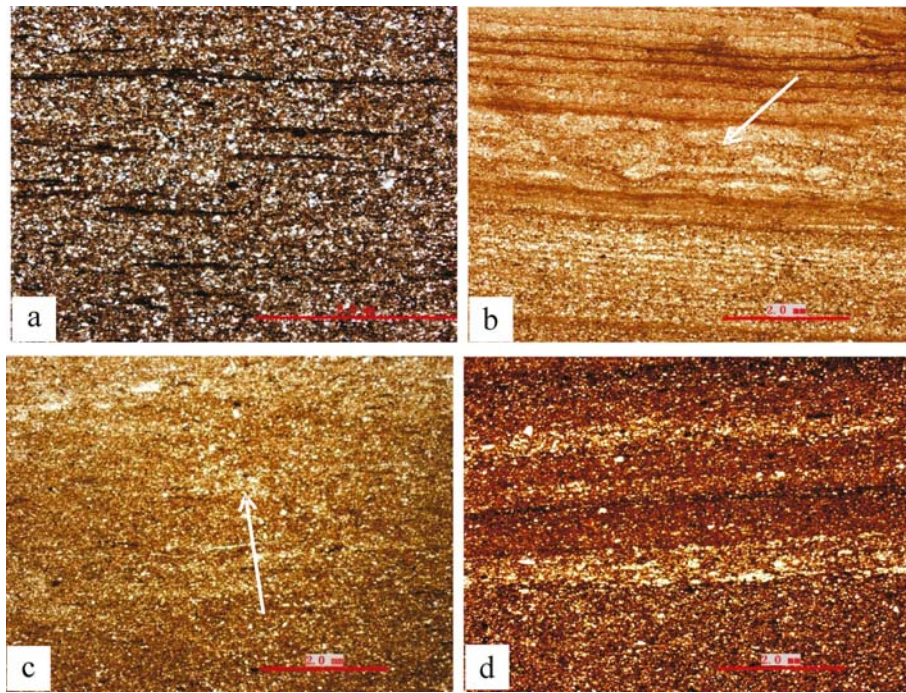


图 2 块状泥岩典型薄片特征

a.环 317 井,2 431.8 m,粉砂质泥岩,可见长条状撕裂屑,TOC=0.9%; b.黄 269 井,2 435 m,砂与泥间互,可见流水构造(箭头)TOC=0.26%; c.里 231 井,2 663.32 m,含粉砂泥岩,可见生物扰动迹象(箭头),TOC=0.9%; d.含粉砂泥岩,可见几处砂质条带,TOC=0.5%

Fig.2 The thin-section characteristics of typical massive mudstone

a.Well Huan317, 2 431.8 m, silty mudstone, long streak mud clasts appeared, TOC=0.9%; b.Well Huang269, 2 435 m, continuous intercalated silt and mud laminae, flow structure can be seen (arrow), TOC=0.26%; c. Well Li231, 2 663.32 m, silt-bearing mudstone, bioturbation is pointed out (arrow), TOC=0.9%; d. silt-bearing mudstone, silty bands can be seen, TOC=0.5%.

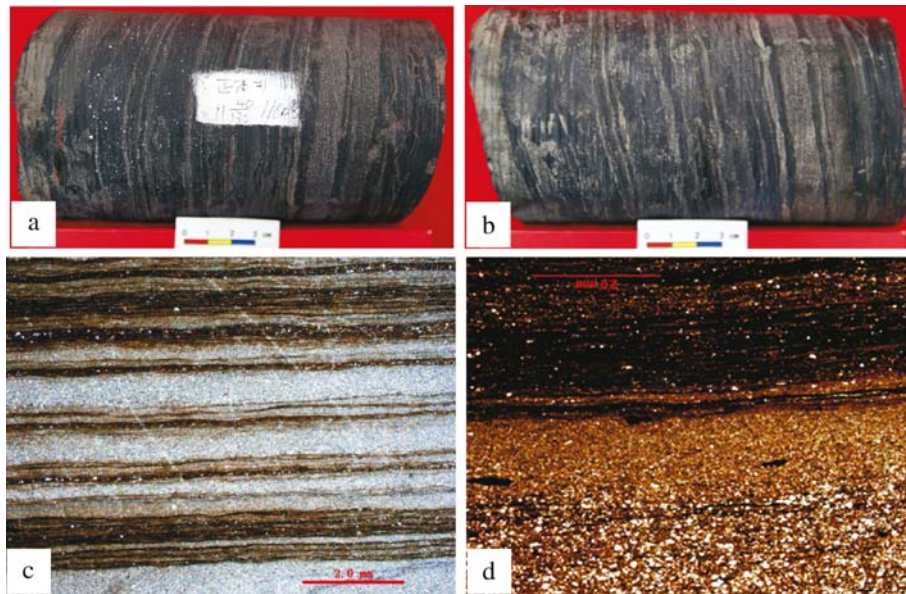


图 3 粒序层理泥岩典型岩芯、薄片特征

a,b.正 70 井,1 160.8 m,多期砂与泥间互条带;c.蔡 107 井,2 196.6 m,粉砂质泥岩,多期的砂条于泥的间互,TOC=0.3%; d.镇 269 井,2 497.4 m,细砂岩—泥岩—页岩,正粒序结构;TOC=4%

Fig.3 The typical core and thin-section characteristics of graded mudstone

a, b. Well Zheng70, 1 160.8 m, multiple alternating layers of silt and mud; c. Well Cai107, 2 196.6 m, silty mudstone; TOC=0.3% d. Well Zhen269, 2 497.4 m, fine sandstone-mudstone-shale, normal grading; TOC=4%

层理、透镜状组构等等。

如图4a和图4b所示,薄片可见断续的波状层理。这类页岩通常是有毫米级的薄层组成,粉砂质含量较高。

1.4 平直纹层页岩

该类页岩呈黑色,薄片观察下纹层平直分布,一般显示为有机质—石英和黏土的“二元结构”或有机质—石英—黏土的“三元结构”。

如图5所示,纹层厚度普遍小于0.1 mm。在纹层内部,富有机质纹层与黏土纹层一般渐变;在纹层之间,富有机质纹层与黏土纹层一般是突变,表明季节性水体的变化。

1.5 似块状页岩

该页岩呈黑色,且污手,镜下观察主要由有机质—黏土结合体在压实后,呈现扁平状透镜体组成,大小一般为0.5 mm左右。杂基为黄铁矿、胶磷矿包

裹的生物化石、有机质、黏土和粉砂级的碎屑(黏土矿物及石英颗粒)。这是区别于其他页岩最主要的特征,尤其是有别于纹层状页岩。

图6c中,可以看见存在着多种组构的超微化石。这些生物化石有多种类型,外形上有球形、椭球型等,常常具有胶磷矿和黄铁矿的外壳,内部为有机质,如图6d所示。原生厚的胶磷矿外壳或生物膜壳的快速黄铁矿化,是长7有机质得以保存的主要影响因素^[23]。图6d中的微体化石为图6c中白色箭头所指,外壳为胶磷矿,内部为微体化石群,另见藻纹层层状分布。

2 沉积环境探讨

2.1 岩石类型与沉积环境

沉积环境是控制黏土岩形成的主要因素,包括气候、水体物理化学性质、生物作用、水动力条件等。沉

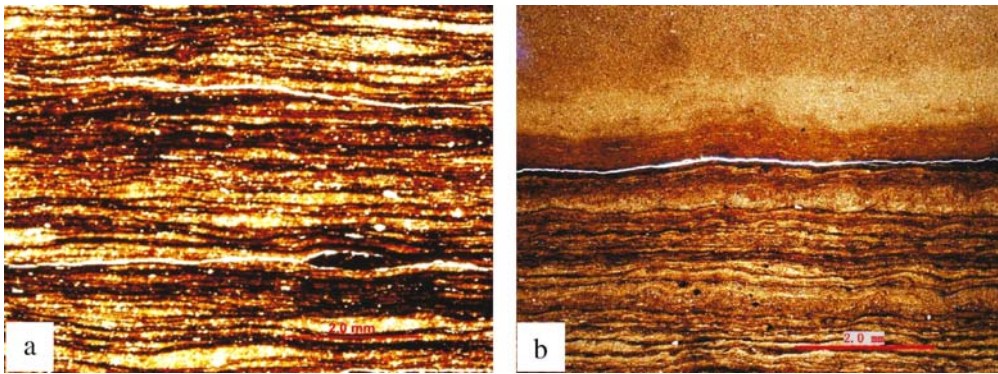


图4 波状纹层页岩典型薄片特征

a. 镇269井, 2196.7 m, 长条状透镜体断续波状分布; TOC = 6%; b. 白522井, 1931.50 m, 粉砂质泥岩, 连续波状层理, TOC = 2%

Fig.4 The typical characteristics of wavy laminated shale

a. Well Zhen269, 2196.7 m, elongated lens, discontinuous wavy lamination;

b. Well Bai522, 1931.50 m, silty mudstone, continuous wavy bedding, TOC = 2%

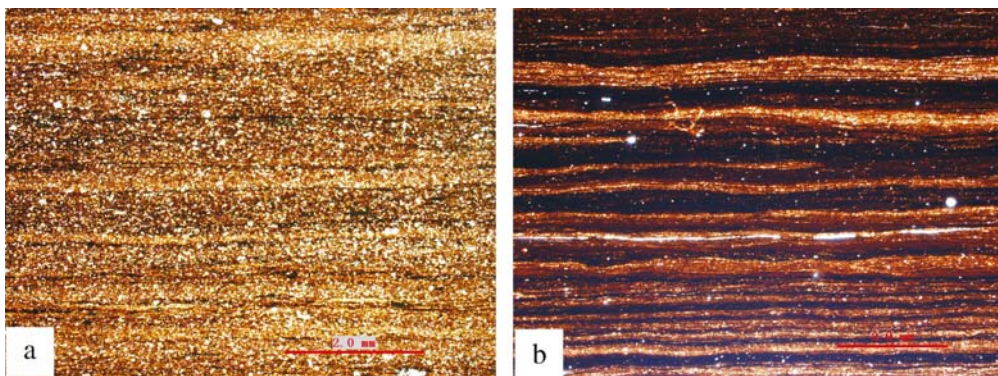


图5 平直纹层页岩典型薄片特征

a. 盐56井, 2998.4 m, 三元结构, 粉砂—黏土—有机质等间距互层, TOC = 8.6%; b. 盐66井, 2993.4 m, 二元结构, TOC = 6.99%

Fig.5 The typical characteristics of even lamina shale

a. Well Yan56, 2998.4 m, triplet structure, silt-mud-organic matter, TOC = 8.6%; b. Well Yan66, 2993.4 m, TOC = 6.99%

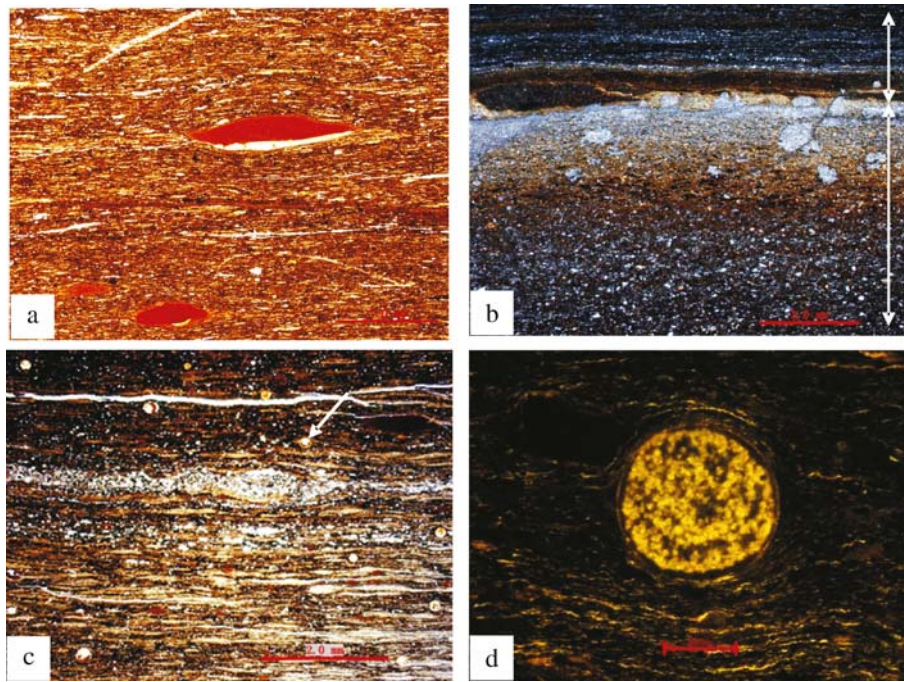


图6 似块状页岩典型薄片特征

a. 黄15井, 2 494.2 m, TOC = 12.6%; b. 正70井, 1 954 m, A为同期正粒序凝灰岩, B为黄铁矿化的页岩层; c. 正70井, 1 952.9 m, TOC = 17.5%, 黄铁矿 30%, 胶磷矿 15%; d. 生物化石

Fig.6 The typical thin-section characteristics of block-like shale

a. Well Huang15, 2 494.2 m, TOC = 12.6%; b. Well Zheng70, 1 954 m, A is a tuff laminae which shows gradual changes in granularity and constituents, B has undergone pyritization; c. Well Zheng70, 1 952.9 m, TOC = 17.5%, pyrite 30%, collophanite 15%; d. microfuna

积环境的差异导致黏土岩在矿物组分、颗粒大小、颗粒来源、沉积构造、有机质含量与类型等各方面均存在着很大的差异。高的生产率,快的埋藏速率,好的保存条件通常是富有机质黏土岩形成的重要因素^[24~28]。

块状泥岩形成于相对浅水区,水流能量较强,湖泊底水动荡。沉积机理为高能态的悬浮沉降。泥岩中经常可见粉砂质泥岩、粉砂岩条带或透镜体,代表湖底环境经常受底流改造。有时可见一些泥质层与粉砂岩交互,表明离河口较近,受三角洲的影响,水动力环境不是特别安静。由于离物源较近,有机质遭到稀释作用;沉积时位于有氧界面遭受生物扰动,所以有机质最低。泥岩的石英含量最高,TOC含量平均为2.04%,有机质类型以II₂和III型为主。

粒序层理泥岩多形成于深湖凹陷区。沉积机理为浊流,异重流等。沉积物重力流是指沉积物、沉积物与水的混合物在重力作用下顺斜坡运动形成的流动,流动的机制是重力驱使沉积物运动而带动间隙流体运动^[28]。粒序层理是沉积物重力流的标志,表明物质从不断减弱的流态中沉降。对于细粒沉积物而

言,沉积物重力流的形成与粗粒沉积物需要一定坡度,地震等触发机制相比要相对容易。近年来,认为更多的成因可以产生这样的结构,如洪水、风暴、等深流等^[29]。洪水以连续供给浊流的形式在湖盆底部流动,将大量有机质带入到三角洲前缘或者深湖区。这种浊流沉积在很多低盐度的湖泊中已成为一种规律^[30~32]。该类岩石有机质含量平均为6%,有机质类型为II₂型和III型。因为物源供给充分、强缺氧环境,有机质及其丰富,有些地区可达30%。深湖区形成的烃源岩和重力流储层可以形成很好的致密油与页岩油聚集。

薄层状页岩形成于受波浪或者湖流影响的浅湖—半深湖区,沉积机理是絮凝状黏土以底负载荷形式搬运。Scheiber等(2011)^[33]通过实验指出在风暴或者一定水流速度下,浅湖区泥质沉积物被侵蚀后再悬浮,以平流形式搬运后在深湖区沉积。絮凝状黏土以波纹形式搬运,沉积后形成“粉砂滞留层—砂泥交互层—泥岩盖层”的薄层。同时,以Joe H. S. Macquaker^[34]为代表的学者认为,波浪引起的沉积物重力流是非常普遍的现象,即使在坡度很缓的大陆架上

也能搬运相当数量的泥质流体。其搬运过程可以分为三个阶段:波浪作用引发的湍流,沉积物重力流的层流形态,能量减弱后的悬浮沉降。相应的微层序为:有侵蚀面的粉砂滞留沉积,粉砂和泥的交互沉积,泥质沉积。这种递变特征可由其结构与成份显示出来。结构上的递变表现为最大颗粒粒径或砂泥比值的减少;成份上的递变表现为颜色由浅变深,这主要是由粒度变细,有机质含量增加所引起。由于陆源碎屑供给相对少,沉积速率快,有机质保存良好,平均为6.86%。该层段发育致密油与页岩油。

波状纹层页岩沉积于泥质丰富缓坡带,在湖侵期这种沉积现象更为普遍。沉积机理为再悬浮作用,底负载荷搬运。Scheiber^[35]认为,浅水区沉积的高含水泥质沉积物被侵蚀,经过搬运后在深水的地方沉积下来经过压实后,形成透镜状层理,或者断续波状层理。由于陆源碎屑供给相对少,搬运的泥质沉积物中含有有机质,所以有机质含量较高,平均为8.9%。有机质类型以II₂型和I型为主。

平直纹层状页岩沉积于深湖静水区。沉积机理为不同季节碎屑和有机质的交替沉积。王冠民等(2004)认为湖相页岩主要沉积于湖水明显分层的条件下,湖水的分层受气候、盐度、水体深度等多方面控制^[36]。在湖水分层的前提下,各种藻类、碳酸盐、有机质、黏土、粉砂等,可按不同季节分别形成不连续的纹层。其中,藻类、有机质纹层的沉积与藻类季节性勃发密切相关;碳酸盐纹层的沉积可以与化学作用有关,也可以与藻类勃发产生的生物化学作用有关,粉砂、黏土以平流或层间流方式季节性输入。纹层或页岩沉积的变化与气候变化密切相关,利用纹层中的沉积信息研究气候和环境变化早已引起人们的重视,但以气候的周期性变化为主控因素来探讨纹层的变化和湖水的物理化学性质演化还有待研究。这类页岩保存条件好,但是因为沉积速率相对慢,物质沉降到底部消耗有机质,有机质含量平均为6.06%。有机质类型为I型。

似块状页岩多出现在长7底部,并常常出现在凝灰质纹层附近,可能与火山喷发期有关。火山喷发引起营养物质的大量富集和水体的极度缺氧,可能引起藻类大量生长。藻类勃发一直被认为是湖相烃源岩形成的主要机制,这种快速事件性沉积在早第三纪湖泊中相当常见^[37]。似块状页岩中出现的化石的层段在垂向上比较局限,表现出短暂的“勃发—消亡”特征,证实火山喷发、湖底热液活动等可能为其触发机

制。在海洋环境中称这样的形成过程为“海洋雪”^[38],但是在陆相沉积中还没有一个专有的名词来描述。这类页岩有机质含量最高,平均为17.7%;且黄铁矿和胶磷矿非常富集,分别为18.6%和4%。似块状页岩是页岩油赋存的主要类型。

2.2 黏土岩的非均质性

沉积环境决定了黏土岩的岩石类型,而其垂向变化则与湖盆的演化密切相关。以黄269井为例,黄269井位于工区西北部姬塬地区,连续取芯长度达62m,取芯层位包括长7₃和长7₂(图7)。通过45块岩芯薄片观察、TOC实验分析,以及根据 $\Delta \lg R$ 法拟合得出的TOC曲线结果来看,TOC呈现出旋回式发展特征。如图8所示,3米以内的4块样品,表现出了有机碳随岩性变化减少的趋势。样品1为平直纹层页岩,样品2和3为波状纹层页岩,样品4为块状泥岩。

3 主要结论

(1) 对黏土岩进行成因分类,可为致密油和页岩油的勘探提供依据。致密油勘探核心在于寻找烃源岩与致密储层匹配层段;页岩油勘探关键是划定富有机质页岩的分布范围。初步认为粒序层理泥岩为致密油的赋存层段,页岩相为页岩油的有利赋存层段。从颗粒组份和沉积构造的综合角度考虑对页岩进行划分,能够较好的反映页岩形成条件、沉积环境的关系,且可以通过有机质含量、类型及矿物组分,找到有效的烃源岩段和储集段。

(2) 揭示了黏土岩石学特征与沉积环境之间的对应关系。泥质沉积物通过与有机质结合悬浮沉降、波浪或湖流等侵蚀或洪水、地震等引发的沉积物重力流等方式共同作用被搬运到深湖区。受三角洲影响的浅湖区一般以块状泥岩为主;受湖流和波浪影响的浅湖—半深湖以薄层状页岩为主;泥质丰富的浅湖缓坡区以波状页岩为主;深湖区以纹层状页岩为主;深湖拗陷区以粒序层理泥岩为主;火山灰爆发时期以似块状页岩为主。

(3) 事件性沉积在湖泊中所起的作用不容忽视,可以占50%以上的比重。湖泊相比海洋而言,更容易受环境变化的影响。生物灾变现象在湖泊时有发生。如何将藻类勃发、洪水、重力流等事件性沉积作用证实并预测其沉积范围,是下一步需要继续深入的重点。

(4) 富有机质页岩是页岩油赋存的基础,鄂尔多

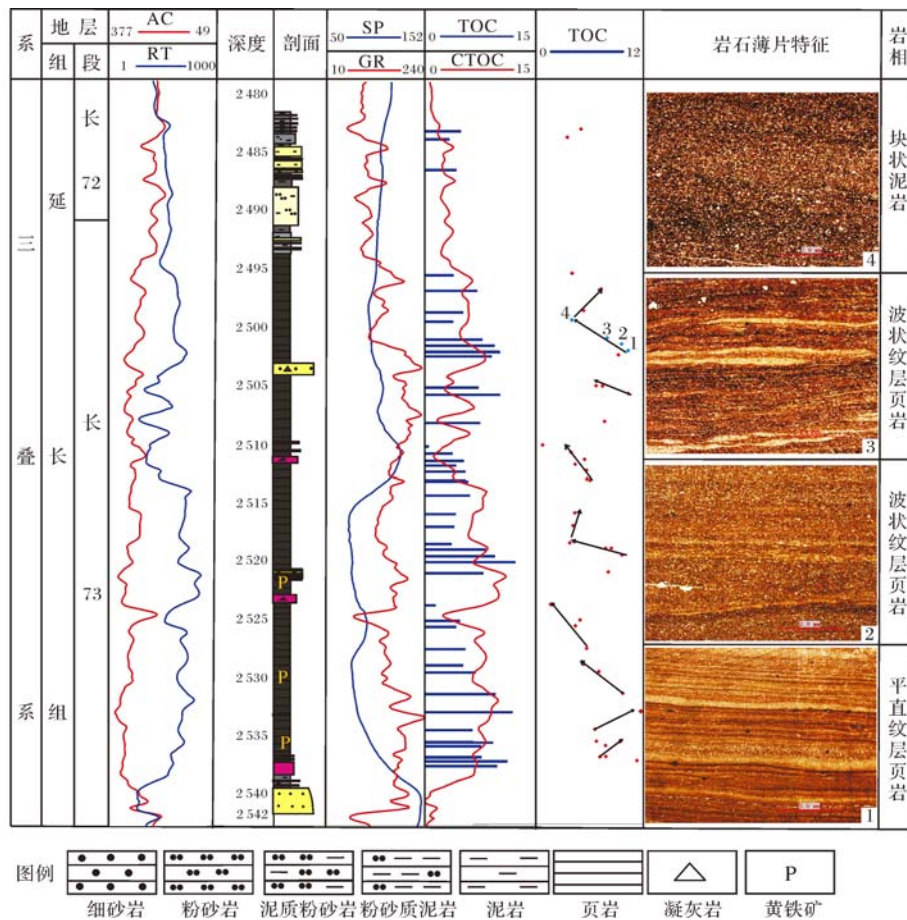


图 7 鄂尔多斯盆地长 7 段黄 269 井 TOC 旋回综合分析图

Fig.7 Sketch map of TOC cycle analysis of Well Huang269

斯盆地是页岩油最主要的盆地之一。要进一步研究其形成环境、分布模式,为页岩油和致密油勘探提供理论依据。

致谢 在本文写作过程中得到了朱如凯和侯连华高工的指导,实习过程中得到了长庆油田研究院齐亚林等大力支持,两位评审专家对初稿修改提供了许多宝贵的意见,在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献 (References)

- 1 Macquaker J H S, Adams A E. Macquaker J H S, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks; an inclusive nomenclature for mudstones [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 735-744
- 2 П.П.阿弗杜辛. 粘土沉积岩[M]. 周鸿生,译. 北京:地质出版社, 1956:7-8[П.П.阿弗杜辛. Claystone[M]. Translated by Zhou Hongsheng. Beijing: Geological Publishing House, 1956: 7-8]
- 3 Л.Б.鲁欣. 沉积岩石学手册(下册)[M]. 北京:中国工业出版社, 1964:101-106[Л.Б.Русь. Sedimentary Rocks [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1964: 101-106]

- 4 方邳森,任磊夫. 沉积岩石学教程[M]. 北京:地质出版社,1987: 139-140[Fang Yesen, Ren Leifu. Sedimentology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 139-140]
- 5 H·布拉特,G·V·米德顿,R·C·穆雷. 沉积岩成因[M]. 北京:科学出版社,1978:266-284[H·Blatt, G·V·Middleton, R·C·Millon. The Attributes of Sedimentary Rocks [M]. Beijing: Science Press, 1978: 266-284]
- 6 冯增昭,等. 沉积岩石学(上册)[M]. 北京:石油工业出版社, 1994:124-125[Feng Zengzhao, et al. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 124-125]
- 7 Josef P. Werne, et al. An integrated assessment of a "type euxinic" deposit: evidence for multiple controls on black shale deposition in the middle Devonian Oatka Creek Formation[J]. American Journal of Science, 2002, 302(2): 110-143
- 8 Ghadeer S G, Macquaker J H S. Sediment transport processes in an ancient mud-dominated succession: a comparison of processes operating in marine offshore settings and anoxic basinal environments[J]. Journal of the Geological Society of London, 2011, 168(5): 1121-1132
- 9 Guy P A. Mud dispersal across a Cretaceous prodelta: Storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies[J]. Sedimentology, 2014, 61(3): 609-647

- 10 Guy P A, Macquaker J H S, Varban B L, Bedload transport of mud across a wide, storm influenced ramp: Cenomanian - Turonian Kaskapau Formation, western Canada Foreland Basin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(11): 801-822
- 11 Mulder T, Syvitski J P M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans[J]. *Journal of Geology*, 1995, 103: 285-299
- 12 Mulder T, Migeon S, Savoye B, *et al.* Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2001, 21(2): 86-93
- 13 李万春,李世杰,濮培民. 高分辨率古环境指示器—湖泊纹泥研究综述[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 172-176 [Li Wanchun, Li Shijie, Pu Peimin. Review on the high-resolution varved lake sediments as a proxy of paleoenvironment[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 172-176]
- 14 邓宏文,钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. *沉积学报*, 1990, 8(3): 1-21 [Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstone[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(3): 1-21]
- 15 杨俊杰. 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, 2002: 36-37 [Yang Junjie. On Structural Evolution and Hydrocarbon Distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 36-37]
- 16 Zhao M, Behr H, Ahrendt H, *et al.* Thermal and tectonic history of the Ordos Basin, China: Evidence from apatite fission track analysis, vitrinite reflectance, and K-Ar dating[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(7): 1110-1134
- 17 Wang B, Al-Aasm I S. Karst-controlled diagenesis and reservoir development; example from the Ordovician main reservoir carbonate rocks on the eastern margin of the Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(9): 1639-1658
- 18 林森虎. 鄂尔多斯盆地长7段细粒沉积物特征与致密油分布[D]. 北京:中国石油勘探开发研究院, 2012: 1-106 [Lin Senhu. The characteristics of fine-grained sedimentary rocks and tight oil distribution in Chang7 member, Ordos Basin [D]. Beijing: Research Institute of China Exploration and Development, 2012: 1-106]
- 19 王冠民. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. *吉林大学科学学报:地球科学版*, 2012, 42(3): 666-671, 680 [Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang depression[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(3): 666-671, 680]
- 20 刘招君,孟庆涛,柳蓉. 中国陆相油页岩特征及成因类型[J]. *古地理学报*, 2009, 11(1): 105-114 [Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong. Characteristics and genetic types of continental oil shales in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(1): 105-114]
- 21 郭巍,刘招君,宋玉勤,等. 青海—甘肃民和盆地油页岩的成因类型及特征[J]. *地质通报*, 2009, 28(6): 780-786 [Guo Wei, Liu Zhaojun, Song Yuqin, *et al.* Genetic type and features of oil shale in the Minhe Basin, Qinghai-Gansu provinces, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(6): 780-786]
- 22 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]
- 23 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]
- 24 Bradley B. Sagemana. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle - Upper Devonian, Appalachian basin[J]. *Chemical Geology*, 2002, 95(2003): 229-273
- 25 Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 2(1): 9-31
- 26 Tyson R V. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modeling study[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(2): 333-339
- 27 Stow D A V, Huc A Y & Bertrand. Depositional processes of black shales in deep water[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 491-498
- 28 Middleton G V, Hampton M A. Sediment Gravity Flow: Mechanics of Flow and Deposition[C]// Middleton G V, Bouma A H. Turbidites and Deep Water Sedimentation. Anaheim: SEPM pacific sec. short Course Note, 1973: 1-38
- 29 Yu Saitoh, Fujio Masuda. Spatial change of grading pattern of subaqueous flood deposits in lake Shinji, Japan[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(2): 221-233
- 30 Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269-299
- 31 Mulder T, Migeon S, Savoye B, Faugeères J C. Reply to discussion by Shanmugam on Mulder *et al.* (2001, *Geo-Marine Letters* 21: 86 - 93) Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean. A record of deposits from flood generated turbidity currents? [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(2): 112-120
- 32 Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, *et al.* Marine hyperpycnal flows; initiation, behavior and related deposits; a review [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 861-882
- 33 Schieber J. Reverse engineering mother nature—shale sedimentology from an experimental perspective. [J]. *Sedimentology*, 2011, 238(1): 1-22
- 34 Macquaker J H S, *et al.* Wave-enhanced sediment gravity flows and mud dispersal across continental shelves; Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions[J]. *Geology*, 2010, 38(10): 947-950
- 35 Schieber J. Lenticular shale fabrics resulting from intermittent erosion of water-rich muds—Interpreting the rock record in the light of recent flume experiments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80

- (1): 119-128
- 36 王冠民,钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志,2004,23(1):43-48[Wang Guanming, Zhong Jianhua. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23(1): 43-48]
- 37 刘传联,徐金鲤,汪品先. 藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制[J]. 地质论评,2001,47(2):207-210[Liu Chuanlian, Xu Jinli, Wang Pinxian. Algal blooms: the primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks [J]. Geological Review, 2001, 47(2): 207-210]
- 38 Macquaker J H S, Keller M A, Davies S J. Algal blooms and marine snow: mechanisms that enhance preservation of organic carbon in ancient fine-grained sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80(11): 934-942

The Classification of Lacustrine Mudrock and Research on Its' Depositional Environment

LIU Qun¹ YUAN Xuan-jun¹ LIN Sen-hu¹ WANG Lan¹ GUO Hao¹
PAN Song-qi¹ YAO Jing-li²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083;

2. Institute of Exploration and Development of Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 710018)

Abstract: The deep lacustrine mudrock are the important source rock as well as self-stored reservoirs. The exploration of unconventional resources has been a hot topic at present. Being the main target of tight oil and shale oil, it's characteristics and formation mechanism have been paid great attention. Chang 7 member of Yanchang Formation, which is deposited in the late Triassic, is the main source rock of Ordos Basin.

A classification scheme based on the constituents and texture is proposed. The research of the lacustrine mudstone of Chang 7 member indicates that the deep lacustrine mudstone comprises at least 5 lithofacies: massive mudstone, graded laminated mudstone, wavy laminated shale, even laminated shale, and block-like laminated shale. These mudstone facies assemble two categories on the basis of self-generating characteristics, i.e. allogenuous mudrock, including massive mudstone, graded laminated mudstone; autogenic mudrock, including wavy laminated shale, even laminated shale, block-like shale.

This classification is associated with sedimentary environment. Shallow lake which is influenced by delta is dominated by massive mudstone; shallow-semi shallow lake being influenced by lake currents and waves is mainly deposited with wavy laminated shale; deep quite lake is associated with even laminated shale; deep lake depression is dominated by graded mudstone; block-like shale mainly appears in the period of volcano eruption.

However, the mudstone lithology is changing with the evolution of the lake and thus one interval has different types of mudrock. The lithology can be changed within centimeters. We can conclude in this way that the mudrock interval is highly heterogeneous, which makes our prediction much more difficult. As a whole, graded mudstone is the interval of tight oil and the block-like shale is the main source rock and contains shale oil.

Key words: lacustrine mudrock; 5 lithofacies; sedimentary environment; Yanchang Formation; Ordos Basin