

# 鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊 风暴沉积

周晓峰<sup>1</sup>, 刘丽丽<sup>2</sup>, 王建国<sup>1</sup>, 代金友<sup>1</sup>, 兰朝利<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院; 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

**摘要** 通过岩心观察,发现鄂尔多斯盆地延长组长8油层组具有典型的风暴沉积特征,主要包括底面侵蚀构造、丘状交错层理、特征异地煤、滞积层、生物逃逸迹等,是风暴流作用于湖岸线附近的三角洲沉积,是沉积物经再搬运和再沉积的产物。其理想的垂向序列由A-G7段构成,向湖盆中心方向,强能量风暴流形成的滞积层和块状砂岩减少,低-弱能量的丘状交错层理和波状纹层段明显增加。鄂尔多斯盆地延长组发育独具特色的开阔浅水湖泊风暴沉积,垂向上表现为多期叠置,平面上表现为对浅水三角洲沉积物的全面改造,总体上呈现出“满盆砂”,成为一种新型储集层,可形成大规模分布的岩性油气藏。

**关键词** 风暴沉积; 满盆砂; 开阔浅水湖泊; 延长组; 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地是中国陆上重要的含油气沉积盆地,三叠系延长组为其主要含油层位,自上而下划分为长1~长10共10个油层组<sup>[1]</sup>。自2000年在盆地西南部发现亿吨级西峰油田,其主力产层长8的沉积相研究就成为勘探家和地质学家关注的热点之一,并取得了大量的成果<sup>[2-8]</sup>。纵观以往成果,前人认为鄂尔多斯盆地长8砂岩主要为河流-三角洲沉积体系,而对湖盆水体和砂体的改造关注较少。2009—2014年,笔者先后3次对该盆地77口钻井的1682.4 m长8岩心进行了详细观察,发现了丰富的丘状交错层理、特征异地煤、滞积层、袋模构造、生物逃逸迹等风暴沉积的相标志及其组合,表明鄂尔多斯盆地延长组具有开阔浅水湖泊风暴沉积。风暴沉积理论是国内外学者从海相沉积建立的<sup>[9-16]</sup>,近年来陆相湖盆中不断地发现风暴沉积<sup>[17-25]</sup>,进一步丰富和发展了风暴沉积理论。

## 1 风暴沉积的鉴别标志

风暴沉积理论认为,风暴作用的影响范围主要集中于纬度 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 区域<sup>[10]</sup>,晴天浪底之上为风暴蚀源区,晴天浪底至风暴浪底之间是风暴沉积发育的场所,风暴浪底之下为浊流沉积区。陆相湖盆中,风暴浪底的深度一般小于20 m<sup>[26,27]</sup>。

延长组沉积时期,鄂尔多斯湖盆位于北纬 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 区域附近<sup>[28]</sup>,相当于现在的江浙地区,受到强台风或风暴作用是完全可能的。长8沉积时期,鄂尔多斯湖盆古地形十分平缓(坡

降不足 $0.1^{\circ}$ ),湖泊覆水面积大(约 $5\times 10^4\text{ km}^2$ ),水深一般小于5 m,为开阔浅水湖盆<sup>[7]</sup>,平缓湖底基本上位于风暴浪底之上,缺乏浊流沉积的条件。在风暴期间,由直接作用于湖底的风暴涡流和无定向底流挖蚀、冲刷簸选而改造以往的沉积物,就地或近距离搬运后再沉积而形成风暴沉积。丘状交错层理、特征异地煤、袋模构造、冲刷满、截切构造、滞积层、生物逃逸迹等是利用钻井岩心鉴别鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖盆风暴沉积最具特征的标志,也是最能反映风暴流特征的沉积构造(图1)。

### 1.1 丘状交错层理

丘状交错层理,是风暴衰减期的沉积构造,是甄别风暴沉积和浊流沉积的经典标志。在风暴作用衰减期,风暴能量逐渐减弱,由强烈的风暴流逐渐转变为浪成振荡水流和多向水流,作用于湖底床沙上,形成丘状交错层理,由具有丘状和凹状表面形态的纹理组成。研究区丘状交错层理内部纹理清晰,有5种类型:1)中砂岩中的丘状交错层理(图1(a))由多个宽缓上凸的细层组成,条带状含油,下部细层中扁平状泥砾呈串珠状顺层分布,泥砾粒径小于0.5 cm,成分一般为深灰色或黑色泥岩,这一现象可能反映水体较浅、风暴扰动较强<sup>[13]</sup>;2)深灰色泥质粉砂岩细层和浅灰色细砂岩细层交互组成的丘状交错层理(图1(b)),各细层脊部较薄,向两端有增厚的趋势,外形呈圆丘状;3)层系由粉砂质泥岩或泥质粉砂岩组成,下部细层下凹成洼状,上部细层上凸成丘形,上下细

收稿日期:2015-06-20;修回日期:2015-10-29

基金项目:中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-02-46);国家科技重大专项(2011ZX05013-006)

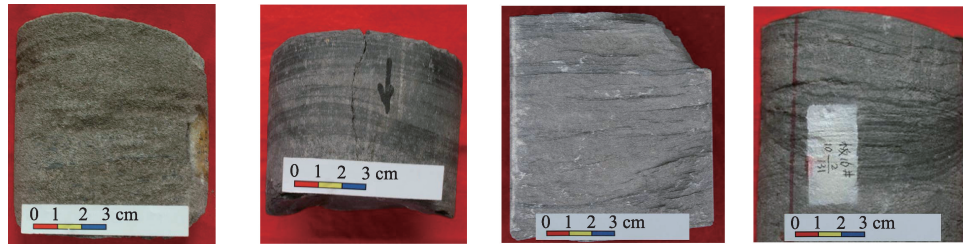
作者简介:周晓峰,讲师,研究方向为沉积学和储层地质学,电子信箱:zhouxf2004-10-24@126.com

引用格式:周晓峰,刘丽丽,王建国,等.鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴沉积[J].科技导报,2016,34(18):203-208;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.028

层逐渐收敛至两端汇合一处,总体上表现为一个近似水平的纺锤形(图1(c));4) 细砂岩组成的丘状交错层理(图1(d)),下部细层下凹,顺层分布撕裂状煤屑,由下向上煤屑变小,至上部上凸细层消失,可能反映了一次风暴流能量的衰减过程;5) 细层呈下凹状,向两端收敛,上部细层的一部分被风暴流侵蚀,与上覆风暴沉积成低角度突变接触(图1(e))。

丘状交错层理形成和发育规模受沉积物粒度、风暴浪作

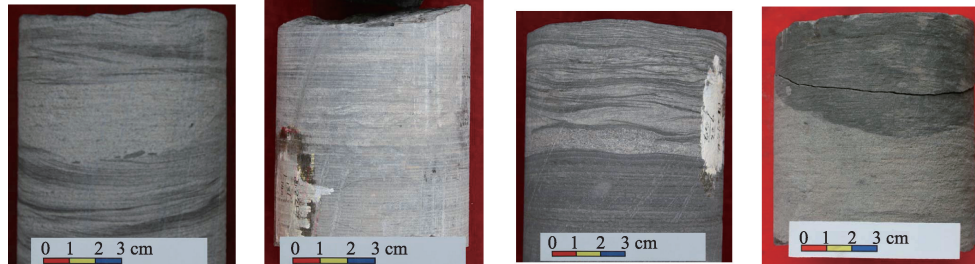
用强度、沉积速率以及地形坡度等因素的控制<sup>[18]</sup>,Dumas等<sup>[14]</sup>的模拟结果进一步支持了丘状交错层理的浪成振荡水流和单向水流成因。鄂尔多斯盆地延长组丘状交错层理的丘高一般为0.5~2.0 cm,间距5~15 cm,交错层倾角小于10°,其规模比海相丘状交错层理的规模小(丘高一般为10~50 cm,间距一般1 m以上,交错层倾角小于15°<sup>[11]</sup>),反映了海相与陆相开阔浅水湖盆风暴浪能级的巨大差异。



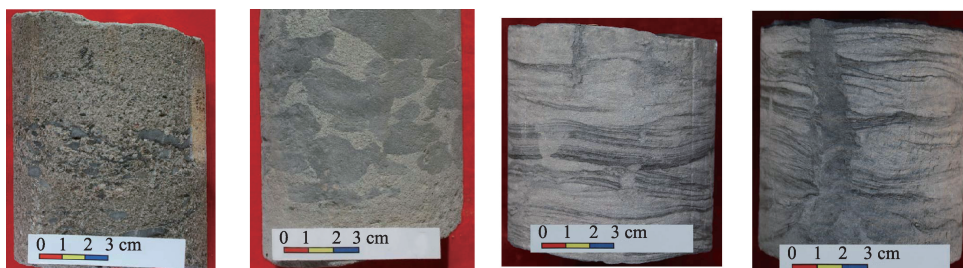
(a) 环61,长8,2147.25 m, (b) 板16,长8,2048.61 m, (c) 西232,长8,2104.21 m, (d) 板16,长8,2048.66 m,  
丘状交错层理 丘状交错层理 丘状交错层理 丘状交错层理



(e) 西66,长8,1559.85 m, (g) 西130,长8,1966.08 m, (h) 板16,长8,2048.72 m,  
丘状交错层理 含撕裂煤屑的块状砂岩 袋模构造



(i) 镇50,长8,1932.50 m, (j) 西232,长8,2109.81 m, (k) 午221,长8,1710.53 m,  
槽状冲刷面 特征异地煤 平缓波状冲刷面 截切构造



(l) 环78,长8,2684.62 m, (m) 演67,长8,2363.90 m, (n) 午25,长8,2106 m, (o) 庄137,长8,1600.70 m,  
滞积层砾岩 风暴角砾岩 波状层理、生物逃逸迹 波状层理,生物逃逸迹

图1 鄂尔多斯盆地延长组风暴岩的主要沉积构造类型

Fig. 1 Sedimentary characteristics of tempestites in Yanchang Formation, Ordos Basin

## 1.2 (特征)异地煤

(特征)异地煤的概念由苏华成、李书舜、胡益成等于1992年提出<sup>[29]</sup>,之后胡益成等<sup>[30]</sup>对异地煤的特征、成因机制及成因动力学进行了详细研究,指出特征异地煤是风暴沉积的产物,有许多其他煤层所不具有的特征:煤层底板没有代表土壤化的根土岩,其直接顶底板均是浅海相灰岩,煤中见不到通常具有的线理状、透镜状和条带状等原生结构,煤中含有大量的、种属丰富的海相动物化石等,煤层本身具有与风暴沉积相同或类似的沉积序列。

鄂尔多斯盆地延长组异地煤的特征极为典型:煤层厚度3~8 cm,其顶、底与块状砂岩直接接触呈剥离线,横向上难以追踪(图1(f))。Kreisa和Bambach<sup>[12]</sup>认为,煤层漂浮在砂砾岩中或者薄煤层与砂岩直接突变接触的特征是风暴沉积。延长组长8沉积时期,开阔浅水湖盆中沼泽发育,当飓风来临时,产生威力强大的风暴上升流能够强烈地掏蚀沼泽地带的生物碎屑、泥炭物质等;当飓风强度减弱或者中心转移之后,风暴下降流携带大量的被搅动起来的砂质、生物碎屑、泥炭等悬浮物质以密度流的性质搬运并沉积下来,砂质和生物碎屑一起沉积下来者形成了含撕裂状煤屑的块状砂岩(图1(g)),随风暴流的进一步减弱,按重力分选的法则依次沉积,作为煤的前身(细而轻)的泥炭物质遗体也沉积下来。

异地煤是一种重要但研究程度很低的煤<sup>[30]</sup>。这是因为,过去只注意到被水介质搬运到沼泽范围之外的泥炭物质,而且泥炭物质在其被搬运过程中还会遭受严重的氧化分解,从而认为在“活动碎屑环境只能形成碳质泥岩”,但是没有注意到,在风暴流这种特定的水动力作用下,由于泥炭物质是在快速掏蚀、快速搬运、快速沉积和快速埋藏(水体覆盖)的条件下,泥炭物质不会遭受太大的破坏而被保存下来。前人认为鄂尔多斯盆地长8发育煤线,即沼泽中形成的原地薄煤层,笔者认为这种认识过于片面,应根据煤层与围岩的关系具体分析:薄煤层与顶、底的砂岩或泥岩直接接触呈剥离线者应为异地煤;薄煤层与水平层理的泥岩或碳质泥岩接触者可能为煤线。笔者岩心观察,尚未发现保存较好的煤线记录。诸多学者将含撕裂状煤屑的颗粒分选较好的厚层块状砂岩(可达10 m)认为是水下分流河道沉积,这种解释有悖于牵引流作用下的机械分异原理,而风暴沉积是其最为合理可信的解释。

## 1.3 底面侵蚀构造

风暴流流经沉积物表面时,便形成各种侵蚀构造。保存于沉积物底面的侵蚀构造是识别风暴岩的重要标志<sup>[9]</sup>。本区常见的侵蚀构造有袋模、冲刷面和截切构造等。

袋模(pot cast)也译作壶模、钵模、渠模,是风暴高峰期,强烈气流摩擦湖水形成强大的定向水流或涡流,在湖底冲蚀或旋切沉积物形成刨蚀坑,坑内充填粗碎屑沉积和泥砾。本区袋模构造规模较小,一般深2~4 cm,袋壁较为宽缓 and 略显光滑,内被砂质沉积物、黑色泥砾和炭屑充填(图1(h))。

冲刷面在研究区呈槽状(图1(i))和平缓的波状(图1(j)),其凹凸程度反映了风暴作用的大小。图1(i)为镇50井1932.50 m深度段的槽状冲刷面,其上为块状含砾砂岩,其下为灰黑色块状含砾泥岩,为较强风暴流冲刷湖底沉积物形成。图1(j)为西232井2109.81 m深度段的平缓波状冲刷面,为较弱风暴流冲刷水平层理的灰黑色泥岩形成,其上为丘状交错层理的细砂岩。

截切是造成研究区砂岩顶面不平整的构造之一,如午221井(图1(k)),块状层理的砂岩一侧高出,一侧变平,截切角度较大,并被泥质充填,表现为泥质冲刷砂质,它是由于风暴底部回流有很强的剪切力,使先期沉积的砂质遭到侵蚀,并被部分切去,形成了不规则的剪切面。

## 1.4 滞积层

滞积层位于袋模构造或冲刷面之上,由深灰色、黑色泥砾和砂混合组成,为风暴流高潮阶段的产物。研究区滞积层可以分为2种类型。一种滞积层表现为具有向上变细的递变层理(图1(l)),且泥砾定向-半定向排列,分选中等-好,磨圆中等-好,这种特征反映了延续时间稍长而较弱的风暴流作用。另一种滞积层中泥砾大、小混杂,棱角明显,杂乱堆积,形成风暴角砾岩(图1(m)),其反映了振荡为主、快速沉积的强风暴事件。

## 1.5 生物逃逸迹

生物逃逸迹指示了一种突发性沉积事件的发生,可作为风暴作用的辅助标志。风暴发生时,生物为了不被埋葬便向上或向下逃逸,就留下了逃逸迹。研究区指示风暴沉积的生物逃逸迹多出现在泥质粉砂岩或粉砂质泥岩中,表现为一种细长或略倾斜的垂直潜穴,长度可达20 cm以上,宽度近2 cm,回填现象少见(图1(n)、(o))。

## 2 风暴岩的垂向序列类型

一次风暴作用的水动力变化,塑造了各阶段对应的沉积层序和沉积特征。诸多学者对陆相湖盆的风暴沉积进行了研究,取得了大量的成果(对应前面)。张金亮<sup>[17]</sup>建立了渤海湾盆地东濮凹陷沙三段风暴岩沉积序列,由下向上依次为块状层理段、平行层理段、丘状交错层理段、波状层理段、水平层理段、块状泥岩段组成,缺少极强能量的滞积层。柳成志等<sup>[20]</sup>建立了松辽盆地北部哈尔温地区萨尔图油层风暴沉积序列:递变层理段、块状层理段、平行层理段、丘状交错层理段、波状层理段、含介形虫透镜体泥岩段,缺少极强能量的滞积层。李华启等<sup>[21]</sup>则认为四川盆地西部须家河组的风暴岩垂向上由风暴滞积段、平行层理段、风暴浪震荡作用段、生物逃逸迹段和正常天气沉积段构成,块状层理少见。综观前人的研究成果,由于沉积环境和沉积背景以及风暴流强度与频率的差异,不同地区的风暴岩垂向序列的构成有所差异。通过岩心观察,概括出鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴沉积的理想垂向序列,由7个层段构成(图2)。

厚度/cm	层序	序号	沉积特征	能量
2~10		G	泥岩段, 底部截切构造; 内含砂条、泥砾、炭屑和生物逃逸迹	低-弱能量
5~15		F	波状纹层段, 粉砂岩-泥质粉砂岩	
3~15		E	丘状交错层理段, 粉砂岩-细砂岩	中等能量
5~10		D	平行层理段, 细砂岩	
3~8		C	特征异地煤	
5~50		B	块状层理段, 中-细砂岩, 可见泥砾、炭屑和煤屑	强能量
2~20		A	滞积层段, 底面发育袋模构造, 角砾岩和砂砾岩, 含泥砾、炭屑和煤屑	
			水平层理泥岩	弱能量

图2 鄂尔多斯盆地延长组风暴岩的垂向序列

Fig. 2 The vertical sedimentary sequence of tempestites in Yanchang Formation, Ordos Basin

滞积层段(A): 厚度2~20 cm, 以风暴角砾岩和含砾砂岩为主。其底部有明显的风暴流侵蚀冲刷作用的痕迹(袋模、冲刷面), 侵蚀面上泥砾杂乱或定向排列, 并含有丰富的煤屑。

块状层理段(B): 厚度一般5~50 cm, 岩性以中砂岩和细砂岩为主, 可见灰黑色泥砾和煤屑, 无明显粒级变化, 与下伏滞积层段渐变接触。

特征异地煤段(C): 煤层厚度3~8 cm, 横向上难以追踪。煤层底板没有根土岩, 煤中见不到通常具有的线理状、透镜状和条带状等原生结构。

平行层理段(D): 厚度为5~10 cm, 以粉-细砂岩为主, 由平行层理、剥离线理组成。

丘状交错层理段(E): 是风暴流沉积特有的一段, 厚度为3~15 cm, 岩性以细砂岩和粉砂岩为主, 横向上不稳定。

波状纹层段(F): 厚度5~15 cm, 岩性为粉砂岩和泥质粉砂岩, 发育浪成沙纹层理、波状层理和爬升层理, 内见觅食迹和逃逸迹, 为风暴停歇期波浪作用形成。

浅湖泥岩段(G): 厚度2~10 cm, 以粉砂质泥岩和泥岩为主, 内部见植物碎片、砂条及生物觅食迹, 发育水平层理或块状层理, 底部可以见到截切构造。

这种向上变细的序列形成于风暴流能量的逐渐衰减。一次风暴沉积过程中, 风暴流的掏蚀、扰动能力逐渐由强变弱, 而牵引力的作用则由弱至强。因此上述沉积序列根据风暴流能量的大小大致可分为4部分: 下部A段为极强能量, B段和C段为强能量; 中部D、E段为中等能量; 上部F、G段为低-弱能量。然而一个完整的层序很难发育, 常常见到的是不完整的沉积序列。区内常见9种风暴岩垂向沉积序列(图3), 反映的风暴流能量各不相同。

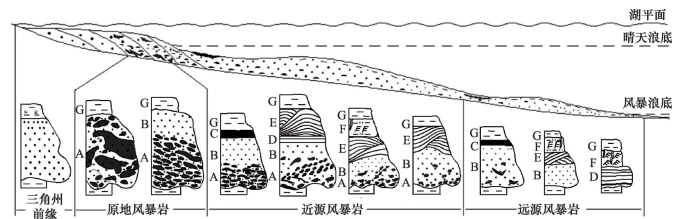


图3 鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴沉积模式

Fig. 3 Sedimentary model of tempestites in wide and shallow lacustrine environment in Yanchang Formation, Ordos Basin

### 3 风暴岩的沉积模式

根据风暴流的能量变化、风暴岩的垂向序列类型、风暴作用的沉积环境、风暴沉积的物源, 将鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴岩分为原地风暴岩、近源风暴岩和远源风暴岩。

#### 3.1 风暴岩的物源

风暴沉积的物源为开阔浅水湖泊三角洲。长8沉积时期, 鄂尔多斯湖泊面积大(约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ )、水浅(水深一般小于5 m), 发育大型浅水三角洲, 砂质沉积物沿湖岸线富集<sup>[11]</sup>。岸线频繁进退, 三角洲前缘暴露频繁, 特征异地煤、煤屑、植物茎秆等反映不稳定沼泽沉积环境发育。岸线附近的三角洲前缘水浅, 在恶劣的天气下受风暴的影响最大, 易发生滑塌和悬浮, 是风暴沉积的重要物源。在风暴吹向的下游, 逆风追索就是不同风暴能量作用形成的风暴岩沉积区。

#### 3.2 风暴岩的沉积模式

本区西部为湖岸线, 向东湖水逐渐变深, 来自岸线附近的风暴流开始卸载, 形成风暴沉积。根据距离湖岸线的远近可划分为三种类型的风暴岩: 原地风暴岩、近源风暴岩和远源风暴岩(图3)。

原地风暴岩多位于湖岸线附近(晴天浪底之上), 垂向上发育AG或ABG沉积序列, 底部具有袋模构造, 反映了沉积物就地被风暴打碎、搅动、再沉积的过程, 是风暴高潮期的产物, 风暴流的能量极强。

近源型风暴岩发育于正常浪基面以下靠近湖岸线的区域, 是由于风暴高潮期过后风暴流能量减弱、流速降低所携带沉积物短距离搬运而成。与原地型风暴岩相似, 其冲刷作用显著, 与底部突变接触, 但其侵蚀幅度减小, 沉积物粒度变细, 层理构造丰富, 多见ABEG、ABCG、ABDEG和ABEFG等4种垂向沉积序列。

远源型风暴岩主要发育于开阔浅水湖泊中心, 属于风暴流远距离搬运产物。其沉积时风暴能量已经较弱, 不再具有对原地沉积物的冲刷侵蚀能力, 沉积物粒度较细, 以细砂岩、粉砂岩及泥岩为主, 砂岩分选好, 缺少粗粒成分。垂向序列中缺乏A段, BCG、BEFG、DFG、FG序列组合常见。

#### 4 风暴岩的沉积规律

对部分钻井取心的统计结果表明,地层剖面中风暴沉积与非风暴沉积交互出现,但前者所占比例总是大于后者所占的比例,由湖岸线附近向湖泊中心非风暴沉积的比例有所增加,分析认为这种差异性与距离湖岸线远近、古地形、古水深、碎屑供给、风暴流特征等条件有关(表1)。

研究区发现的风暴沉积发育在地形平缓、坡降极小、湖面广阔的湖泊中,与前人研究的半深湖风暴沉积相比,具有独特的沉积特征:半深湖地区发育的风暴岩,在垂向剖面中风暴沉积与非风暴沉积交互出现,在平面上风暴岩被非风暴岩所包围<sup>[18,23]</sup>;而开阔浅水湖泊中形成的风暴岩,垂向剖面上表现为多期叠置,平面上表现为对浅水三角洲沉积物的全面改造,总体上呈现出“满盆风暴岩(满盆砂)”的特点(表1)。

表1 鄂尔多斯盆地延长组风暴岩发育程度

Table 1 Tempestites thickness in Yanchang Formation, Ordos Basin

位置	井名	风暴岩厚度占取心地层厚度比/%
由湖岸线附近向湖盆中心方向	环61	89.2
	西221	84.5
	里149	77.9
	镇88	69.7
	西233	54
	西237	53.5
	庄211	51.4
	午25	39.6

#### 5 结论

风暴沉积的发现对于古地理位置、古环境特征以及地层学的研究都有重要的意义<sup>[18,25]</sup>。同时,三角洲砂体经过风暴作用的改造,形成的块状砂岩粒度相对适中,分选磨圆较好,杂基含量相对较低,从而提高了其储集能力,可以成为一种新的储层类型。长8风暴岩上覆长7优质烃源岩,生烃后优先排入邻近的砂岩,易形成风暴岩体油藏。另外,风暴作用形成的砂岩垂向上多期叠置和平面上大面积分布,侧向上与三角洲前缘砂体衔接,呈现出“满盆砂”的特点,可形成大规模分布的岩性油气藏。因此,风暴岩的发现将为鄂尔多斯盆地延长组岩性油气藏的勘探提供新的领域。

#### 参考文献 (References)

[1] 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: 50-56.  
Yang Junjie. Tectonic evolution and oil and gas distribution rules in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 50-56.

[2] 张哨楠, 胡江奈. 鄂尔多斯盆地南部镇泾地区延长组的沉积特征[J]. 矿物岩石, 2000, 12(4): 25-30.  
Zhang Shaonan, Hu Jiangnai. The sedimentary characteristics of Yan-

chang Formation in Zhenyuan and Jingchuan districts, southern part of Ordos Basin[J]. Journal Mineral Petrology, 2000, 12(4): 25-30.

[3] 王力, 崔攀峰. 鄂尔多斯盆地西峰油田长8沉积相研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003, 18(6): 26-30.  
Wang Li, Cui Panfeng. Study on the sedimentary facies of Chang 8 oil-bearing bed in Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2003, 18(6): 26-30.

[4] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34-44.  
Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 34-44.

[5] 王成玉, 韩永林, 王海红, 等. 西峰、镇北地区长8沉积相再认识[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2006, 28(5): 28-31.  
Wang Chengyu, Han Yonglin, Wang Haihong, et al. Recognition of sedimentary facies in Chang 8 in Xifeng and Zhenbei area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(5): 28-31.

[6] 司学强, 张金亮. 西峰油田长8油组沉积相与油气分布规律[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(6): 67-71.  
Si Xueqiang, Zhang Jinliang. Sedimentary facies and hydrocarbon distribution law in Chang 8 reservoirs, Xifeng Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(6): 67-71.

[7] 刘化清, 李相博, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地长8油层组古地理环境与沉积特征[J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1086-1095.  
Liu Huaqing, Li Xiangbo, Wanyan Rong, et al. Palaeogeographic and sedimentological characteristics of the Triassic Chang 8, Ordos Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1086-1095.

[8] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 19-28.  
Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19-28.

[9] Aigner T. Calcareous tempestite: storm-dominated stratification in upper Muschelkalk Limestones (Middle Trias, SW-Germany)[M]// Einsele G, Seilacher A. Cyclic and Event Stratification. New York: Springer Co., 1982: 180-198.

[10] Marsaglia K M, Klein G de V. The paleogeography of Paleozoic and Mesozoic storm depositional systems[J]. Journal of Geology, 1983, 91(2): 117-142.

[11] Swift D J P, Figueiredo A G, Freeland G L, et al. Hummocky cross-stratification and megaripples: A geological double standard[J]. Journal of Sedimentology, 1983, 53(4): 1295-1317.

[12] Kreisa K D, Bamback R K. The role of storm processes in generating sheti beds in Paleozoic Shelf environments, cyclic and event stratification[M]// Einsele G, Sellacher A. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 200-206.

[13] Duke W L. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms[J]. Sedimentology, 1985, 32(2): 167-194.

[14] Dumas S, Arnott R W C. Origin of hummocky and swaley cross-stratification—The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate[J]. Geology, 2006, 34: 1073-1076.

[15] 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. 地质学报, 1986, 60(1): 55-67.  
Liu Baojun, Zhang Jiqing, Xu Xiaosong. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 60(1): 55-67.

[16] 佟再三. 青海尖扎哈玉沟三叠系浊积扇与风暴流沉积的发现及基本特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(2): 98-102.

- Tong Zaisan. Discovery of the Triassic turbidity fans and tempestites at Hayugou Qinghai and their fundamental characteristics[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1997, 33(2): 98-102.
- [17] 张金亮. 东濮凹陷沙三段的风暴沉积[J]. 沉积学报, 1988, 6(1): 50-57.  
Zhang Jinliang. The storm deposits of Sha-3 member in Dongpu sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1988, 6(1): 50-57.
- [18] 姜在兴, 赵澄林, 刘孟慧. 东濮凹陷西部湖相风暴沉积的初步研究[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 107-113.  
Jiang Zaixing, Zhao Chenglin, Liu Menghui. The preliminary study of lacustrine tempestites of western Dongpu depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 107-113.
- [19] 张天营, 赵澄林, 刘孟慧. 二连盆地阿南地区早白垩世风暴沉积[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(4): 449-454.  
Zhang Tianying, Zhao Chenglin, Liu Menghui. Lower Cretaceous storm deposits in a Anan region, Erlian Basin[J]. Oil and Gas Geology, 1991, 12(4): 449-454.
- [20] 柳成志, 张兴金, 徐景祺, 等. 松辽盆地北部哈尔滨地区萨尔图油层风暴沉积特征[J]. 大庆石油学院学报, 1993, 17(1): 143-149.  
Liu Chengzhi, Zhang Xingjin, Xu Jingzhen, et al. The tempestuous sedimentary features of Sartu Formation in Harwen area, northern Songliao Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1993, 17(1): 143-149.
- [21] 李华启, 姜在兴, 邢焕清. 四川盆地西部上三叠统须家河组二段风暴沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 81-85.  
Li Huaqi, Jiang Zaixing, Xing Huanqing. Characteristics of storm deposits in upper Triassic Xujiahe formation, Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2003, 24(1): 81-85.
- [22] 侯方浩, 蒋裕强, 方少仙, 等. 四川盆地上三叠统香溪组二段和四段砂岩沉积模式[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 30-34.  
Hou Fanghao, Jiang Yuqiang, Fang Shaoxian, et al. Sedimentary model of sandstone in second and fourth members of Xiangxi Formation in the Upper Triassic of Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 26(2): 30-34.
- [23] 袁静. 山东惠民凹陷古近系风暴岩沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 43-49.  
Yuan Jing. The sedimentary characteristics and models of tempestites of Paleogene in Huimin sag, Shandong province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 43-49.
- [24] 方少仙, 侯方浩, 杨西燕, 等. 鄂尔多斯盆地内部中二叠统石盒子组盒8下亚段砂岩中的风暴岩[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 24-30.  
Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Yang Xiyan, et al. Tempestites in Lower Submember of Member 8 of Shihezi Formation(Middle Permian) in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 24-30.
- [25] 唐武, 王英民, 袁文芳, 等. 塔北地区三叠系黄山街组湖相风暴沉积[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4179-4186.  
Tang Wu, Wang Yingmin, Yuan Wenfang, et al. Lacustrine storm deposits of Triassic Huangshanjie Formation in northern Tarim Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(10): 4179-4186.
- [26] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 32-43.  
Wu Chongjun, Xue Shuhao. Sedimentology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 32-43.
- [27] 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 427-456.  
Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Liu Huanjie, et al. Sedimentology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 427-456.
- [28] 马醒华, 邢历生, 杨振宇, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来古地磁研究[J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 68-79.  
Ma Xinghua, Xing Lisheng, Yang Zhenyu, et al. Paleomagnetic study since Late Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 36(1): 68-79.
- [29] 苏华成, 李书舜, 胡益成. 一个识别古代风暴作用的新标志-特征异地煤[J]. 岩相古地理, 1992(2): 1-5.  
Su Huacheng, Li Shushun, Hu Yicheng. Distinctive allochthonous coal as the criteria for recognition of ancient storm processes[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1992(2): 1-5.
- [30] 胡益成, 廖玉枝. 河南荣巩煤田早二叠世早期地层中异地煤的成因动力学研究[J]. 中国煤田地质, 2000, 12(2): 3-7.  
Hu Yicheng, Liao Yuzhi. Research on genetical dynamics of allochthonous coal in Early Permian strata of Xingong Coal Field, Henan Province[J]. Coal Geology of China, 2000, 12(2): 3-7.
- [31] 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长8油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 265-274.  
Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yuguo, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265-274.

## Storm deposits in wide and shallow lacustrine environment in Yanchang Formation, Ordos Basin

ZHOU Xiaofeng<sup>1</sup>, LIU Lili<sup>2</sup>, WANG Jianguo<sup>1</sup>, DAI Jinyou<sup>1</sup>, LAN Chaoli<sup>1</sup>

1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering; College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China
2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

**Abstract** Through the core observations, storm deposits are found in Chang 8 of Yanchang Formation, Ordos Basin, with features including the etching structure, the hummocky cross stratification, the allochthonous coal, the storm lag deposit, and the Fugichnia. The deposits are developed by the tempestuous currents retransporting and redepositing the delta sediment near the lacustrine shoreline. Their vertical sedimentary sequence consists of seven lithofacies units from A to G. Toward the lacustrine centre, the storm lag deposits and the massive sandstones gradually decrease and correspondingly, the hummocky cross stratification and ripples increase. It is shown that the distinctive storm deposits are developed in the wide and shallow lacustrine environment. The multi-stage deposits are overlain in the vertical section and the fully reconstructed shallow delta sediment is in the horizontal section, with rich sandstones being raised in the whole basin to provide a new reservoir. This study is conducive to the formation of the large lithologic reservoirs and to a new field for the petroleum exploration in Ordos Basin.

**Keywords** storm deposits; rich sandstones in the whole basin; wide and shallow lacustrine environment; Yanchang Formation; Ordos Basin  
(编辑 傅雪)