

文章编号:1673-5005(2010)02-0008-05

# 苏北陈堡油田风成砂岩沉积成岩特征及其找油意义

丁 圣<sup>1</sup>, 林承焰<sup>1</sup>, 马宝军<sup>2</sup>, 李 坚<sup>3</sup>, 高建刚<sup>4,5</sup>

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 新疆油田 准东采油厂, 新疆 阜康 831511;  
3. 胜利油田 地质科学研究所, 山东 东营 257015; 4. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;  
5. 胜利油田 胜利采油厂, 山东 东营 257501)

**摘要:**综合应用岩心观察、薄片和扫描电镜等储层分析技术,对陈堡油田赤山组砂岩的沉积特征及成岩作用进行研究。结果表明:研究区岩石学及沉积结构特征、颗粒表面特征,特别是斯托克斯风蚀界面的发现均证实赤山组砂岩属于风成沉积;风成沙丘沉积具有沉积厚度大、成熟度高、孔隙发育等特点,是油气水的良好储集层;研究区成岩作用具有弱压实和斯托克斯风蚀界面上下明显不同的胶结特征,界面之上属风成沉积,胶结物呈星点状分布,界面之下受地下水改造具有水成沉积的特征,胶结物呈嵌晶状分布。

**关键词:**风成砂岩;赤山组;成岩作用特征;斯托克斯面;陈堡油田

**中图分类号:**P 581; TE 121. 31 **文献标志码:**A **doi:**10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2010. 02. 002

## Sedimentary and diagenetic characteristics of aeolian sandstones of Chenpu Oilfield in northern Jiangsu and its petroleum searching significance

DING Sheng<sup>1</sup>, LIN Cheng-yan<sup>1</sup>, MA Bao-jun<sup>2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>, GAO Jian-gang<sup>4,5</sup>

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
2. Zhudong Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield, Fukang 831511, China;  
3. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257015, China;  
4. Institute of Geochemistry in Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
5. Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Dongying 257501, China)

**Abstract:** By using the reservoir analysis techniques such as core observation, thin section determination and scanning electron microscope (SEM), sedimentary and diagenetic characteristics of sandstones of Chishan group were studied. The lithological features, sedimentary structure and particle surface characteristics, as well as the discovery of Stokes wind erosion interface all demonstrate that the sandstones of Chishan group were aeolian deposits. The aeolian deposit is characterized by thick deposit, high maturation, good development of the pores, which is good reservoir of oil-gas. The research area has weak compaction. The cement characteristics of aeolian sandstone above and under the Stokes wind erosion interface are different. Above the interface, the point distributed cements implicate that the sandstone belongs to aeolian deposits, whereas under the interface, sandstones with poikilitic cements are aqueous deposits.

**Key words:** aeolian sandstone; Chishan group; diagenetic characteristics; Stokes interface; Chenpu Oilfield

晚白垩世是地史上气候最干热时期之一<sup>[1]</sup>, 广布的干旱、半干旱气候条件下的风成沉积物, 反映了一种广而零星分布的沙漠湖泊及早谷环境<sup>[2]</sup>, 因此盐湖与风沙沉积广布。苏北盆地处于北纬 20°~40° 干旱

副热带高压带<sup>[3]</sup>, 由于气候干旱、蒸发量大, 在局部地区出现沙漠化。早在 20 世纪 80 年代初, 陈荣林等<sup>[2]</sup> 在观察和测量赤山剖面时首次发现其具有风成沉积特征, 认为应属于风成沉积作用和沙漠湖泊相的沉积产

收稿日期: 2009-09-20

基金项目: 国家油气重大专项课题(2009ZX05009-003)

作者简介: 丁圣(1978-), 男(汉族), 安徽潜山人, 博士研究生, 主要从事油气藏开发地质研究工作。

物;岳文哲、姜月华等相继对该区白垩纪风成沉积和气候演化等方面进行了研究<sup>[4]</sup>。截至目前,对研究区风成沉积的微观特征及成岩作用方面的研究相对薄弱,因此笔者通过岩心观察和薄片鉴定,在沉积宏观和微观特征研究基础上重点研究成岩作用特征,通过对比风成砂岩与水成砂岩成岩特征,寻找和预测风成砂岩油气聚集的有利储层分布区。

## 1 研究区地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地南部东台拗陷中部,呈北东向长条形分布,新生界地层沉积厚达7 km,是苏北盆地沉降最深的一个凹陷<sup>[5]</sup>。研究区陈3断块位于高邮凹陷的东部断阶带和吴堡低凸起中段,区内贯穿吴1、吴2两条大断层,吴堡低凸起中段地层区域性东南倾,其上倾方向被近北东方向区域性同生大断层吴1断层所遮挡,形成长条形不对称断鼻圈闭。钻井、测井资料揭示,陈3断块地层自上而下依次为第四系东台组、新近系盐城组、古近系三垛组、阜宁组二段、一段、白垩系泰州组、赤山组。据调查研究,沙漠相中的风成沙丘亚相是该区最典型、最易识别的一类亚相,广泛分布于赤山组,厚度达275 m。

## 2 赤山组风成砂岩成因

苏北盆地及其外围的构造发展史研究表明,燕山中晚期,在太平洋板块向亚欧大陆挤压,以及古特提斯向北的敛合双重作用下,郯庐断裂系强烈左移,牵动了先成的北西、北东及北北东向断裂,发生了不同规模的张性活动或张扭性转换,造成地壳减薄、地幔上涌。早白垩纪时,引发大规模中酸性钙碱系列为主的岩浆侵入与喷发,形成北东向展布相互分割小型火山沉积盆地,沉积厚度达数千米,这是苏皖地区裂谷发育阶段强烈断陷的产物。晚白垩纪早期(浦口期),该区从断陷向拗陷转化,各小型火山断陷沉积盆地连片,形成以苏北为中心,包括南黄海大部的泛盆,四周汇水面积大增,其沉积相带展布由盆地周边的冲积扇相向盆地中心过渡为冲积平原相和湖相。晚白垩世中晚期(赤山期),盆地转为缓慢拗陷并渐次封闭,地形亦渐次夷平,高差变小,在干热条件下雨水影响区缩小,从而湖水渐次干涸,面积缩小,而大区域的风扬作用将盆地边缘冲积扇及冲积平原区的沙质沉积物向盆地搬运,形成风沙沉积为主的沙漠区,仅局部低洼地段及山前区存有沙漠湖、干盐湖及沙漠绿洲沉积(图1)。晚白垩世末至第三纪早期(泰州期),断裂活动再次加剧,雨水影响区扩大,湖水淹没了原沙漠区,为赤山组的保存创造了条件<sup>[6]</sup>。

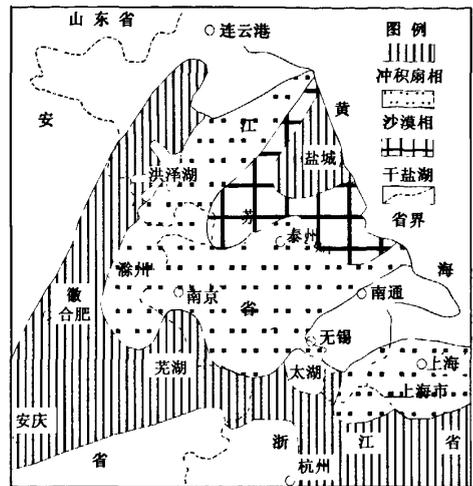


图1 晚白垩世赤山晚期沉积相略图(据岳文哲)

Fig.1 Sketch map showing sedimentary facies of late Cretaceous Chishanian

## 3 风成砂岩沉积特征及典型识别标志

### 3.1 岩石学及粒度特征

赤山组砂岩和泥岩基本以棕色为主,部分因后期淋滤、胶结等作用而呈褐黄、黄色甚至白色,砂岩结构疏松,极易破碎,反映了炎热干燥的气候和暴露的水上沉积环境。通过岩石学特征分析,认为赤山组砂岩类型以细砂岩和粉砂岩为主,陆源碎屑含量较高,填隙物含量较低<sup>[7]</sup>,在陆源碎屑中,石英含量为63.2%,长石含量为16.6%,岩屑含量为19.1%,另见少量角闪石、磁铁矿等重矿物及暗色矿物。在福克三角分类图解中,赤山组砂岩类型主要为长石质岩屑石英砂岩,此外还有少量长石质岩屑砂岩和岩屑砂岩。碎屑颗粒分选系数为0.814~1.40,分选中一较差,磨圆度为次棱角一次圆状。颗粒支撑,颗粒与颗粒之间呈接触式胶结,局部为孔隙式胶结,胶结物极少,以铁质为主,还有少量泥质。存在大量的粒间孔隙,孔隙呈三角形、多边形,孔径为0.05~0.1 mm甚至更大。从粒度累积概率曲线来看(图2(a)),跳跃总体含量一般大于87%,缺少牵引总体,悬浮总体含量一般小于15%,上截点接近90%,下截点接近0.1%,倾角分别为65°~75°和55°~65°,跃移组分斜率较大,反映颗粒被搬运过程中运行方式较单一<sup>[8]</sup>,说明分选极好,粒级集中。跳跃总体一般由两段构成,反映沙丘经常受两种强度不同的风的作用。上段较长,粒度分布为(2~3.2) $\Phi$ ,为相对较弱的主风向沉积;下段较短,粒度分布为(1.2~2) $\Phi$ ,为较强风沉积<sup>[9]</sup>。大部分样品粒度分布为(1~7) $\Phi$ ,直方图呈单峰(图2(b)),峰值在(2~4)

$\Phi$ , 峰值突出, 分选好, 这种分选性和磨圆度较好的砂岩, 缺乏胶结物并具有较高的孔隙度, 表现为比较典型的风成砂岩的沉积特征。

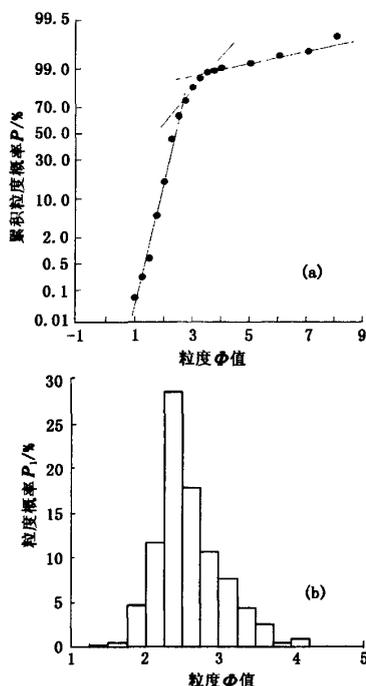


图2 赤山组砂岩粒度特征

Fig.2 Features of sandstone grain size samples from Chishan group

### 3.2 颗粒表面特征

不同的沉积环境形成不同的石英颗粒表面特征, 它受搬运力、气候条件和后生成岩作用等因素影响, 且石英具有较高的硬度和化学稳定性, 因而其沉积物颗粒表面特征能很好地反映沉积环境。对赤山组砂岩表面特征研究发现石英颗粒多呈球形, 表面见碟形或V形撞击坑及毛玻璃化外貌及溶蚀-沉淀作用形成的硅质层, 这些都是风成砂岩区别于其他环境砂岩的重要微观标志, 最具环境意义。

(1) 较高的磨圆度。岩心分析碎屑颗粒分选系数为0.814~1.40, 分选中等, 磨圆度为次棱角一次圆状, 同时样品在扫描电镜下可以直观地看出颗粒比较圆滑, 基本没有棱角, 表明研究区沙丘沉积普遍具有较高的磨圆度, 这是颗粒在搬运过程中受到机械磨蚀作用的结果, 还可能和成岩作用过程中石英的溶蚀、沉淀和重结晶有关。

(2) 石英颗粒表面的碟状撞击坑和V形撞击坑。通过镜下观察, 石英颗粒表面存在碟形撞击坑和V形撞击坑, 这是风成沉积环境具有的典型特征(图3)。在强力风暴气候条件下, 由于风扬作用, 颗粒在机械

搬运过程中相互之间发生剧烈撞击, 磨圆度低、有棱角的颗粒在碰撞过程中被击碎, 磨圆度较高的颗粒因受力均匀, 不容易破碎就形成碟形撞击坑。无论是水下环境还是风成环境中都可以形成V形撞击坑, 也是颗粒之间机械碰撞、磨损产生的结果, 反映了机械能量较高的沉积环境。研究区的砂岩样品中所见的V形撞击坑已有不同程度的磨损和充填(图3(b)), 反映撞击坑形成于风成环境, 而且由于颗粒进入风成环境的时间较短, 尚未被完全改造。

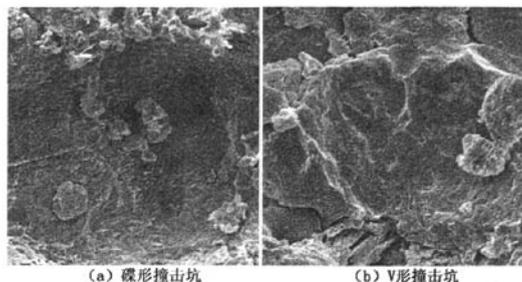


图3 石英颗粒表面撞击坑(据江苏油田)

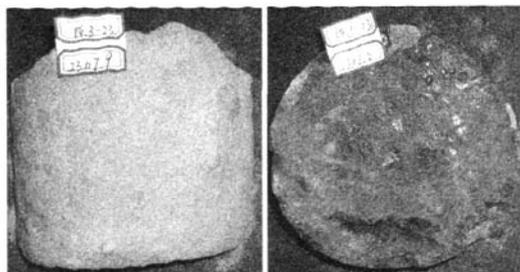
Fig.3 Impact crater in faces of quartz grain (According to Jiangsu Oilfield)

(3) 碎屑颗粒表面附生物特征。因戈壁沙漠地区非常干旱, 地下水的矿化度很高, 除各种盐类外, 水溶液中也溶解高浓度的氧化铁和氧化锰。由于含盐量高, 水分蒸发时被停留于地面上的岩石颗粒阻挡, 在颗粒表面残留一层红棕色氧化物, 像涂抹了一层油漆, 俗称沙漠漆。这就是研究区岩心颜色大多呈红褐色的原因, 而且这些氧化物呈胶状, 具有很强的黏附性, 在风扬作用下, 颗粒滚动过程中把粉尘中的黏土物质黏附在外面, 由于颗粒不断滚动的机械作用, 使得这些黏附的黏土物质均匀地包裹着整个颗粒表面, 在后期成岩作用下, 发生重结晶, 形成晶形完好的黏土矿物包壳<sup>[10]</sup>。

### 3.3 斯托克斯面

在陈3-23井2.3079 km处典型的风成沉积特征——斯托克斯面的发现, 进一步印证了赤山组风成沉积的观点。

所谓斯托克斯面是指由于沙丘的迁移, 区域性风蚀作用下切到地下水位的面<sup>[11]</sup>。在陈3-23井2.3079 km处的粉砂岩中富含钙质结核(图4(a)), 这种钙质结核和泥灰质团块是由暴露的底床因遭受较长时间的氧化及成土等风化作用所致<sup>[12]</sup>。在其下面数十厘米由于近地下水毛细管蒸发沉淀碳酸盐矿物, 产生胶结作用, 所以胶结紧密, 出现灰色斑点和条带(图4(b)), 这是斯托克斯面的典型特征。斯托克斯面既可作为识别风成砂岩沉积的典型特征, 也可作为风成地层层序划分的一个标志面。



(a) 粉砂岩中含钙质结核和泥灰质团块 (b) 粉砂岩含灰色斑点和条带

图4 斯托克斯面岩样特征

Fig.4 Features of lithology samples from Stokes

### 3.4 风成砂岩的测井特征

铸体薄片、扫描电镜等分析表明,赤山组风成砂岩的储集空间类型以原生粒间孔和溶蚀粒间孔为主,平均孔隙度为18.9%,最大值为26.6%,最小值为4.7%,渗透率平均值为 $17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最大值为 $46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最小值为 $8.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。自然伽马曲线一般呈幅度变化小、平直光滑的模式,反映出风成沉积是受风力搬运作用而形成的岩性组合均一、组分少变的沉积,与主要受水流强弱变化影响的水成沉积的上覆泰州组地层具有明显不同的模式(图5)。

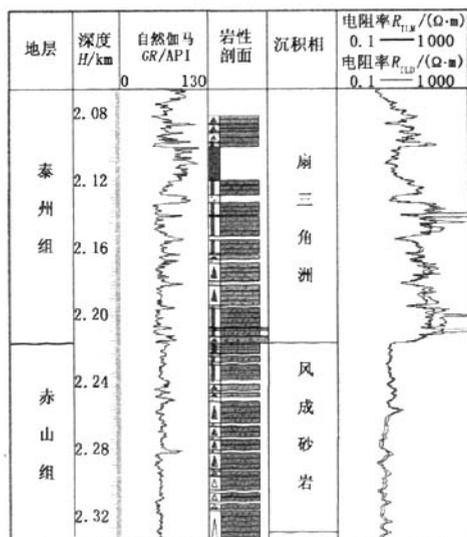


图5 陈3-25井不同沉积相测井曲线特征

Fig.5 Log curve features of different sedimentary facies of well Chen 3-25

## 4 风成砂岩成岩作用特征

除上述沉积特征是判别风成和水成沉积岩最有效的标志外,通过薄片观察还发现风成砂岩的成岩作用也具有独特的特征,在中深层压实作用较弱、仍具有大量粒间孔和胶结物呈星点状分布<sup>[13-14]</sup>。

### 4.1 中深层弱压实

陈3区块赤山组研究区埋深两千多米,如果在河湖及三角洲水成沉积体系中,应具有较强的压实作用,表现为碎屑颗粒排列紧密、呈凹凸接触,塑性颗粒挤压变形和刚性颗粒压碎等特征。然而,据本研究区薄片观察可知,赤山组砂岩的颗粒间接触关系以点一线接触为主,云母等软矿物颗粒没有弯曲变形(图6(a)),且在对赤山组岩心常规分析时发现其密度明显比上覆泰州组地层(扇三角洲沉积体系)要低(平均密度赤山组为 $1.99 \text{ g/m}^3$ ,泰州组为 $2.09 \text{ g/m}^3$ )。以上特征可证实机械压实作用比较弱,其孔隙结构较好,孔隙度相对较高。造成弱压实作用的原因主要是风成沉积过程中颗粒表面附生物在颗粒周围形成了黏土矿物包壳(图6(b)),黏土矿物包壳的存在可以抑制压实,较好地保存原生粒间孔。

### 4.2 胶结物呈星点状分布

通过薄片观察发现,斯托克斯面上下具有明显不同的胶结特征:界面之上属于风成沉积,结构松散,颗粒支撑,孔隙发育,胶结物为方解石和铁白云石,呈细小粒状星点状分布,如图6(c)染色薄片中的铁白云石呈星点状分布,这是由于在干旱气候条件下受干盐湖的蒸发浓缩, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等浓度增加或颗粒表面钙质薄膜重结晶而形成;在斯托克斯面之下数十厘米的砂岩受地下水的改造作用具有水成沉积的特点,胶结致密,呈嵌晶状胶结,其碳酸盐胶结物主要有方解石和铁白云石,钙质胶结致密坚硬<sup>[15]</sup>,多以孔隙充填的形式存在,呈嵌晶结构(图6(d)),这是近地下水面毛细管蒸发沉淀碳酸盐矿物产生胶结作用的结果,此面附近浅灰色斑块及条带的出现,说明地下水局部具有弱还原性质,这种胶结作用可阻止进一步的风蚀。胶结作用对该区砂岩储层物性的影响明显,胶结物以碳酸盐为主,含量相对较低,物性较好。

## 5 风成砂岩的石油地质意义

研究表明风成沉积与储层有着密切的关系,风成砂岩一般具有很高的物性参数,它可以作为良好的含水层,也能成为油气聚集的场所。美国西部的宾夕法尼亚系和侏罗系以及北海油田的三叠系赤底统等,均已发现具有这种类型的油气储集层<sup>[16]</sup>。欧洲也同样发现风成沉积的大型天然气田。国内除在鄂尔多斯白垩系沙漠沉积中找到了地下水储层外,其他沙漠沉积尚未有重大发现,苏北陈堡油田风成沉积的赤山组油气地质储量218万t,是主力产油层之一,也是国内在沙漠沉积环境中找到的极少数油气储层。通过对

赤山组风成砂岩沉积成岩作用特征以及油气储层特征研究,为寻找和预测风成沉积环境有利储层的分布探索新思路。中国白垩纪沙漠普遍存在,除苏北盆地外,塔里木盆地、四川盆地等6个大盆地中都存在风

成砂岩,随着常规油藏均已高含水、油气储层挖潜难度逐渐增大和油气勘探技术研究的不断深化,风成沉积必将成为我国油气勘探的新领域<sup>[17]</sup>。

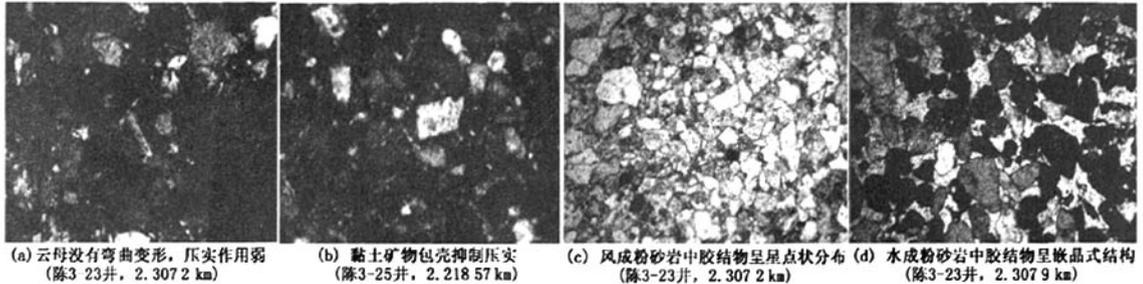


图6 风成砂岩与水成砂岩成岩特征

Fig. 6 Diagenetic characteristics of aeolian siltstone and aqueous deposit siltstone

## 6 结论

(1) 赤山组风成砂岩的岩石学及结构、颗粒表面和斯托克斯面均具有风成的典型沉积特征。

(2) 赤山组风成砂岩的成岩作用具有弱压实和胶结物呈星点状分布的独特特征,为风成砂岩重要的成岩标志。

(3) 赤山组地层厚度为100~300 m,风成砂岩沉积厚度大,除局部夹有的干盐湖薄层沉积物,其余都为风成砂岩沉积,沉积空间分布广,具有良好的物性条件。随着勘探开发的不断深入,风成沉积必将成为勘探的新领域,对我国油气储量的增长具有十分重要的意义。

### 参考文献:

- [1] FRAKES L A. Climates throughout geologic time [M]. New York: Elsevier Scientific pub Co, 1979.
- [2] 陈荣林. 苏南上白垩统赤山组风成砂初探[J]. 石油实验地质, 1982, 4(3): 220-224.  
CHEN Rong-lin. The plain research of the aeolian sandstones of Chishan group the Cretaceous period, South Jiangsu province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1982, 4(3): 220-224.
- [3] 江新胜, 李玉文. 中国中东部白垩纪沙漠的时空分布及其气候意义[J]. 岩相古地理, 1996, 16(2): 42-51.  
JIANG Xin-sheng, LI Yu-wen. Spato-temporal distribution of the cretaceous deserts in central and eastern China and its climatic significance [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(2): 42-51.
- [4] 姜月华, 业治铮. 江苏及临区中生代含油气盆地的类型、沉积特征和地球动力学背景[J]. 资源调查与环境,

1999, 20(1): 8-10.

JIANG Yue-hua, YE Zhi-zheng, Types, sedimentary characteristics and geodynamic settings of Mesozoic oil-gas-bearing basins in Jiangsu province and adjacent areas [J]. Volcanology & Mineral Resources, 1999, 20(1): 8-10.

- [5] 张金亮, 刘宝珺, 毛凤鸣, 等. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 43-49.

ZHANG Jin-liang, LIU Bao-jun, MAO Feng-ming, et al. Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing formation in north slope of Gaoyou depression in Subei Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 43-49.

- [6] 岳文浙, 业治铮, 姜月华. 江苏晚白垩统赤山组沉积环境[J]. 沉积学报, 1997, 15(增刊): 1-6.

YUE Wen-zhe, YE Zhi-zheng, JIANG Yue-hua. Sedimentary environment of the Late Cretaceous Chishan formation in the Jiangsu province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(sup): 1-6.

- [7] 阎泗民, 刘宏宇. 苏北地区上白垩统储层特征[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(增刊): 29-30.

YAN Si-min, LIU Hong-yu. Reservoir characteristics of the Cretaceous period, North Jiangsu [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25(sup): 29-30.

- [8] 欧先交, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域萨拉乌苏组沙丘砂沉积特征[J]. 地理学报, 2006, 61(9): 965-967.

OU Xian-jiao, LI Bao-sheng, JIN He-ling, et al. Sedimentary characteristics of paleo-eolian dune sands in Salawusu formation of the Salawusu River Valley [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(9): 965-967.

(下转第18页)

- [19] TEINTURIER S, PIRONON J. Experimental growth of quartz in petroleum environment (Part I): procedures and fluid trapping [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(11):2495-2507.
- [20] 白国平. 包裹体技术在油气勘探中的应用研究现状及发展趋势[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2003, 27(4):136-140.  
BAI Guo-ping. State of research on fluid inclusion technology applied to oil and gas exploration[J]. *Journal of University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2003, 27(4):136-140.
- [21] 宋明水. 含烃流体包裹体丰度法追溯古油水界面的局限性[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(3):5-8.  
SONG Ming-shui. Limitation of restoring the paleohydrocarbon-water contact by GOI[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(3):5-8.
- [22] 姜福杰, 姜振学, 庞雄奇, 等. 含油包裹体丰度指数确定油气运聚范围及应用[J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28(5):15-18.  
JIANG Fu-jie, JIANG Zheng-xue, PANG Xiong-qi, et al. Method of determination oil and gas migration by grains with oil inclusion and its application[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(5):15-18.
- [23] 刘超英, 周瑶琪, 陈勇, 等. 人工合成碳酸盐岩流体包裹体实验与定量分析[J]. *岩矿测试*, 2004, 23(3):161-167.  
LIU Chao-ying, ZHOU Yao-qi, CHEN Yong, et al. Experimental techniques and quantitative analysis of synthetic carbonate fluid inclusions[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2004, 23(3):161-167.
- [24] 邱隆伟, 姜在兴. 陆源碎屑岩的碱性成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2006.  
(编辑 徐会永)

(上接第12页)

- [9] 祁兴芬, 庄振业, 韩德亮, 等. 秦皇岛市海岸风成沙丘的研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(4):617-624.  
QI Xing-fen, ZHUANG Zhen-ye, HAN De-liang, et al. Research on the aeolian dunes in the Qinhuangdao area [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4):617-624.
- [10] 江新胜, 徐金沙, 潘忠习. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3):416-422.  
JIANG Xin-sheng, XU Jin-sha, PAN Zhong-xi. Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 21(3):416-422.
- [11] GLENNIE K W. Desert sedimentary environments, present and past—a summary [J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 50(2):135-165.
- [12] 李志德, 程守田, 蒋磊, 等. 风成沙丘间沉积成因类型与风成垂向层序——以鄂尔多斯早白垩世内陆古沙漠为例[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(3):30-34.  
LI Zhi-de, CHENG Shou-tian, JIANG Lei, et al. Inter-dune sedimentary genetic types and aeolian vertical sequence: an example from early cretaceous continental paleodesert of ordos [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(3):30-34.
- [13] 李海燕. 低渗透储层成岩储集相及储集空间演化模式[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2007, 31(5):1-6.  
LI Hai-yan. Diagenetic reservoir facies and pore space evolution pattern of low permeability reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(5):1-6.
- [14] 司学强. 博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩作用及其与储层质量的关系[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2008, 32(2):6-10.  
SI Xue-qiang. Relation between beach bar sandstones diagenesis and reservoir quality in the upper Es<sub>4</sub> of the Palaeogene in Boxing sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(2):6-10.
- [15] 江新胜, 朱同兴, 冯心涛, 等. 藏南特提斯晚三叠世海岸风成沙丘的发现及其意义[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2003, 30(5):447-452.  
JIANG Xin-sheng, ZHU Tong-xing, FENG Xin-tao, et al. Discovery of the late triassic coastal aeolian dune in South Tibet Tethys and its significance [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(5):447-452.
- [16] 里丁. 沉积环境和相[M]. 北京:科学出版社, 1985:105-126.
- [17] 陈清华, 庞飞, 渠冬芳. 苏北盆地白垩系赤山组沉积与储层特征及研究意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6):95-99.  
CHEN Qing-hua, PANG Fei, QU Dong-fang. Depositional and reservoir characteristics of the cretaceous Chishan formation in Subei Basin and their significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6):95-99.  
(编辑 徐会永)