

文章编号: 1000-0550(2006)04-0468-08

海侵背景下风暴控制的滨岸—陆棚砂体研究^①

——以塔中志留系下沥青砂岩段为例

高志勇^{1,2} 朱如凯^{1,2} 郭宏莉^{1,2} 何东博¹

(1. 中国石油勘探开发研究院实验研究中心 北京 100083; 2. 中国石油集团公司油气储层重点实验室 北京 100083)

摘要 塔中志留系下沥青砂岩段发育海侵背景下受风暴控制的滨岸—陆棚沉积体系, 沉积砂体的类型有滨岸砂、浅海砂坝和陆棚砂。风暴作用改造并控制着陆棚砂、浅海砂坝等砂体, 使其发育规模增大。海侵时期形成的上述三种砂体的储集性优于海退时期形成的潮道砂体。滨岸砂、浅海砂坝和陆棚砂体区域上尖灭与陆棚泥岩组合, 可形成较好的岩性地层圈闭。

关键词 塔中志留系 海侵 风暴控制 滨岸砂、浅海砂坝 陆棚砂

第一作者简介 高志勇 男 1974 年出生 硕士 工程师 沉积学及层序地层学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 概述

塔里木盆地塔中低凸起下志留统自下而上包括柯坪塔格组(下沥青砂岩段、灰色泥岩段、上沥青砂岩段)、塔塔埃尔塔格组(红色泥岩段和砂泥岩段)(表 1)。目前发现的主要含油层段是上沥青砂岩段和下沥青砂岩段。笔者经过对塔中 30 井、塔中 31 井等多口井的岩芯描述和测井、地震相分析, 认为研究区志留系柯坪塔格组上沥青砂岩段以海退时期形成的潮坪沉积为主, 主要发育砂坪砂体与潮道砂体, 这点与前人的认识基本一致^[1~6]; 而下沥青砂岩段主要发育海侵背景下受风暴控制的(transgressive storm-dominated)滨岸—陆棚沉积体系(此观点我们已在古

地理学报上发表^[7])。本文则是重点针对志留系下沥青砂岩段, 在海侵背景下风暴控制的滨岸—陆棚沉积体系中发育的滨岸砂、浅海砂坝^[7~8]和陆棚砂体进行详尽的探讨, 同时对以上 3 种砂体的储集性进行深入的分析。

2 沉积动力环境分析与砂体类型

塔里木及邻区晚古生代早期位于古北纬 30°以南的热带区域, 北部邻区的南天山海域志留纪受热带海洋气候影响。塔里木盆地南缘志留纪至早泥盆世推断受热带大陆性气候影响^[9]。因此, 盆地内由热带气旋所形成的风暴潮会经常发生, 并影响该区的地质环境^[10]。同时, 在同样位于古北纬 30°以南地区的三峡地区志留纪纱帽组也有发育风暴沉积^[11]的报导。热带气旋常在夏季影响塔里木盆地海域地区, 形成风暴潮。风暴潮发生时, 海平面升高 1 m 以上, 潮流流速在 120 cm/s 以上。风暴期间, 海面及强浪作用加强了海浪对海岸和海滩的冲刷。此时, 泥砂量匮乏的综合效应, 使海滩遭受冲蚀, 沿岸地貌形态发生改变。风暴潮是海岸带沉积物悬浮和运移的动力因素, 也是风暴沉积体形成的动力之一^[10]。

风暴作用在海岸的不同地带常形成不同形式的地质体, 如海湾的岬角和湾底分别出现冲刷和淤积; 废弃的河口地区明显蚀退, 尤其是伸向海中的大嘴更为明显, 冲刷的泥砂沿岸运动; 半封闭型海湾呈湾口

表 1 塔中志留系地层划分与主要砂体类型

Table 1 The stratigraphic division and sandbody types of Silurian in Tazhong area

统	组	段	主要砂体类型	岩性	水动力条件
志留系	依木干他乌组	上泥岩段下			
		上砂岩段			
	塔塔埃尔塔格组	红泥岩段	砂坪砂体	粉、细砂岩	中低能
		上沥青砂岩段	潮道砂体		
	柯坪塔格组	灰色泥岩段	陆棚砂	粉、细砂岩	中低能
		下沥青砂岩段	浅海砂坝		
		下沥青砂岩段	滨岸砂体		

① 中国石油天然气股份公司重大科研项目“岩性地层油气藏形成理论与勘探实践”成果。
收稿日期: 2005-09-19; 收修改稿日期: 2006-0-16

宽、顶部窄的形态,是地形集能作用很大的强潮湾,利于风暴潮的增幅,诱发特大风暴潮^[10]。无障壁广阔的滨岸—陆棚环境中,风暴作用尤为强烈,且频繁发生风暴的沉积与改造作用。

塔中地区在柯坪塔格组下沥青砂岩段沉积时期,发育着无障壁的广阔的滨岸—陆棚环境^[7],随着海平面的不断上升,该地区有频繁的风暴潮发生。海侵时期以冲沟侵蚀为特征,带走了所有作为暴露地表的证据,塔中 30 井、31 井等多口井的下沥青砂岩段多表现为底部具冲刷侵蚀面的正韵律的多套砂体叠置沉积。随着海侵的不断发展,形成广泛分布宽度几十千米以上的滨岸—陆棚砂岩沉积。在正常天气条件下的滨岸—陆棚沉积中,在以波浪为主的滨岸体系砂岩向滨岸方向搬运,形成的砂带宽度较窄,一般在几千米的范围内;而在风暴的天气下,滨岸—陆棚体系受风暴的影响,沉积物会以垂向海岸或平行海岸(沿岸流)的方向向海发生搬运,滨岸砂受到强风暴的改造,形成数十甚至上百千米宽的滨岸—陆棚砂岩沉积^[7,12~16](图 1)。至柯坪塔格组上沥青砂岩段沉积时期,塔中地区则主要表现为发育在强迫海退时期的潮坪沉积,发育潮坪砂体与潮道砂体。

3 风暴控制的砂体成因与分布特征

塔中地区柯坪塔格组下沥青砂岩段在海侵背景下发育有 3 种风暴控制的最重要的砂体类型,分别为滨岸砂、浅海砂坝和陆棚砂。通过对塔中 30 等多口

井岩心的观察描述,从中发现下沥青砂岩段砂体类型由下而上为滨岸砂—浅海砂坝—陆棚砂的交替演化序列(图 2)。滨岸沉积的单砂体相对较厚,一般 6~13 m;浅海砂坝和陆棚砂的单层砂体较薄,一般 3~8 m。砂体在空间展布上极具规律性,即向海方向砂体类型依次为滨岸砂—浅海砂坝—陆棚砂。

3.1 滨岸砂体

通过野外露头与 TZ30、TZ33 等多口井的岩心观察发现,部分井中的块状或具正粒序的砾岩或含砾砂岩发育,砾石成分为灰绿—深灰色泥砾,粒径 2~50 mm 不等,形状不规则,扁平面或长轴多顺层排列,底面具侵蚀面,整段厚 3~15 cm^[6]。另见大量细粒砂岩呈灰白色、浅灰色,厚度一般 3~5 m,发育高角度交错层理(层理倾角 10°~15°)或低角度冲洗层理(层理倾角 3°~5°)、楔状层理和少量波痕。粒序向上变粗,呈现出由泥岩—粉砂岩—细砂岩—中细砂岩的变化韵律。粒度分析表明双跳跃总体发育。自然伽玛和电阻率曲线光滑,呈典型的漏斗形。以上特征皆反映出此为比较典型的前滨—临滨沉积。

风暴改造的滨岸砂往往与前滨、临滨的砂岩沉积共生,在风暴控制的背景下,滨岸环境受到风暴作用的激烈改变,海浪周期性地冲刷着底部,使沉积物悬浮起来,然后随着风暴的减弱又重新把它堆积起来,保存在岩石记录中的滨岸沉积物主体可能是由风暴沉积物组成的。沉积颗粒的大小从细砂到砾石,生物建造较少。主要沉积构造是多方向的槽状交错层理,

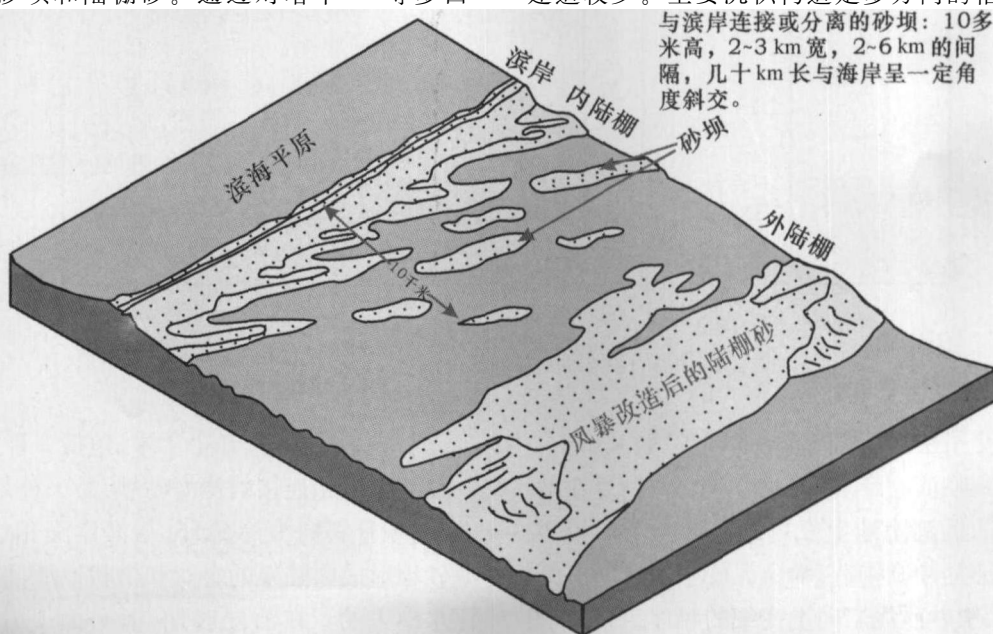


图 1 海侵背景下受风暴控制的滨岸—陆棚砂体类型(据 D. Emery 有改动)

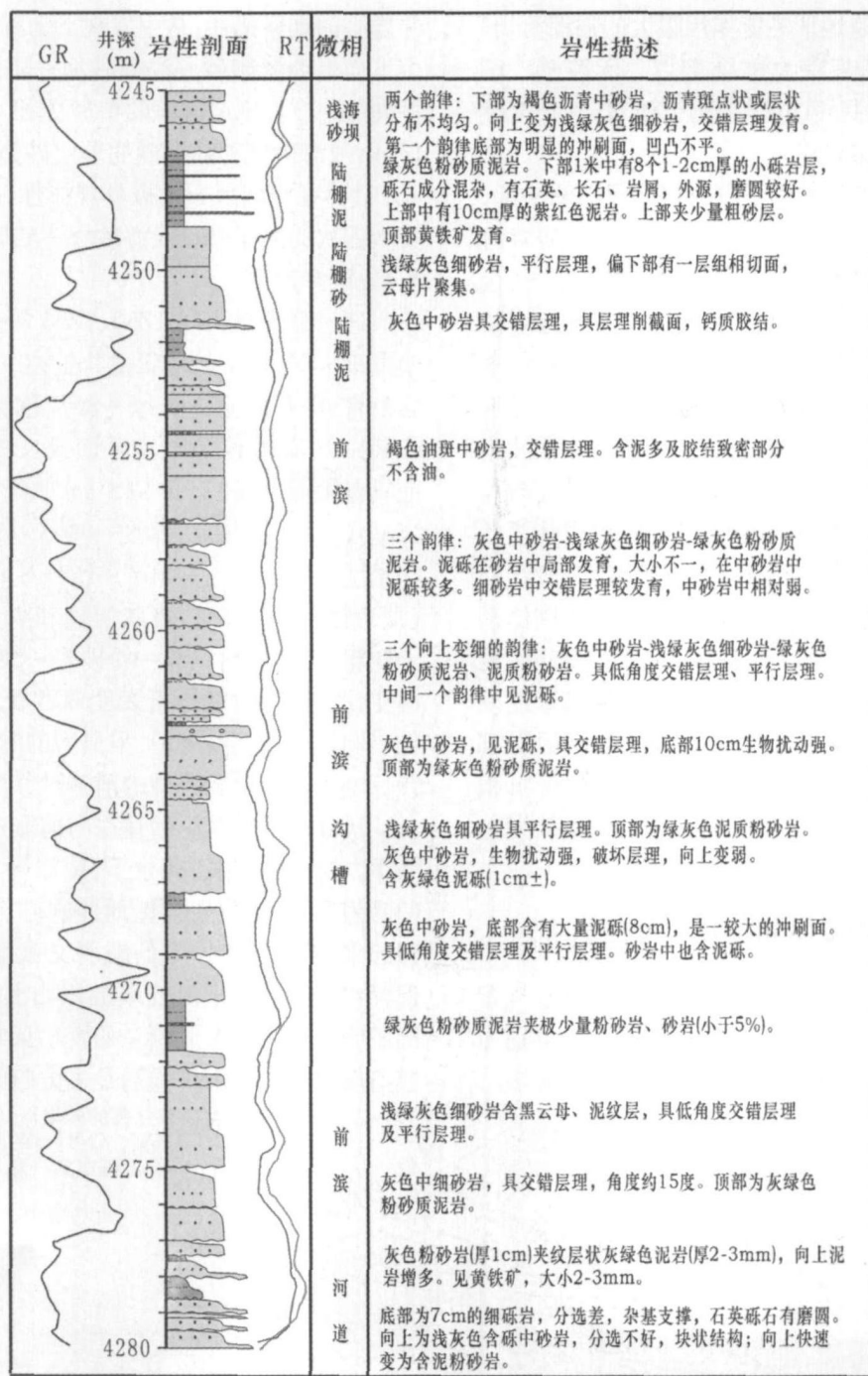


图 2 塔中 30 井中 3 种类型砂体的相序特征

Fig 2 The sedimentary sequence of three types of sandbody in Well TZ30

也出现低角度交错层理。在风暴海浪侵蚀的滨岸中，沉积物被搬运到临滨时产生砂坝和沟槽，沟槽是在前滨朝大海方向的低潮阶地上发育形成的。滨岸带沟槽沉积砂岩底部具冲刷构造，为泥砾中细砂岩→细砂岩→粉砂岩、粉砂质泥岩向上变细的相序组合^[8]。

3.2 浅海砂坝

下沥青砂岩段发育的浅海砂坝砂体高有 10 多

米，宽 2~3 千米，长几十千米，包括 2 种主要类型，其一是与滨岸相连接的浅海砂坝，另一种是孤立的浅海砂坝，坝脊斜向海岸延伸，与海岸交角约为 22°。浅海砂坝形成内陆架的脊状和槽状地形，但也有延伸进深水中去的。在海侵时期，海平面上升引起滨岸后退，并伴随着强烈的风暴流和巨浪，使与滨岸相连的砂坝发育成分离型砂坝，这些砂坝在滨岸底部受到潮

源侵蚀,沿岸水流最终在其颈部截断砂坝,在陆架上基本上将其隔离开来。然后,砂坝和沟槽保持下去,并稍稍被风暴产生的与沟槽平行的海流所改造。

塔中部分井的下沥青砂岩段中,砂岩发育有低角度槽状交错层理,并可见撕裂状与风暴扰动特征的泥砾层夹于大段砂岩中,泥砾杂乱分布在泥岩或砂岩中,部分泥砾沿层理面分布,砂岩薄片见大量海绿石颗粒,岩石成分为岩屑石英砂岩和石英砂岩。自然伽玛和电阻率曲线形态为典型的漏斗形和弓形,认为其为受风暴改造的浅海砂坝砂体。

再者,通过观察塔中 67 井下沥青砂岩段 4 631.08~4 638.98 m 岩心,发现砂岩单砂层厚 30~220 cm,该段上部主要发育浅海砂坝沉积砂体,砂体具低角度槽状交错层理。下部则主要为沟槽沉积,具明显的基底侵蚀面与正韵律特征,部分砂体底部有砾岩分布,砂体上部有小型交错层理、波状层理发育。这些“似浊积岩”砂层,被认为每一个单砂层都是一个风暴期所留下的证据,这一风暴期包括 3 个阶段:初始风暴侵蚀阶段,沉积阶段与风暴后改造阶段

(图 3)。

3.3 陆棚砂

柯坪塔格组下沥青砂岩段发育在风暴控制的海侵背景下,风暴流的影响远远大于波浪及潮汐流的影响,在部分井的岩心观察中,可见到撕裂状和风暴扰动特征的泥砾层夹于大段的砂岩中,且泥砾具有一定的磨圆,部分泥砾沿层理面分布(图 4),砂岩薄片分析见大量海绿石颗粒。每个韵律底部发育块状或含泥砾砂岩,并见侵蚀面,与滨岸风暴岩相比厚度明显减小,一般小于 3cm,泥砾粒径明显变小,一般 2~20 mm,与其上发育的细、粉砂岩呈突变接触。上部的细、粉砂岩具平行层理,正韵律,此为高流态风暴回流作用的产物。再向上发育水平层理或具生物扰动的泥岩,绿灰色泥岩中见大量莓状黄铁矿呈斑块状或成层状分布,水平潜穴发育,见水平层理,为典型安静水体,认为其为风暴末期正常陆棚泥岩沉积。

风暴期间,海滨带沉积物沿着风暴主要风道被迅速地输入到内陆架。在临滨—陆架过渡带,暴风浪和向海方向海流的共同作用,将海滨带沉积物以密度流

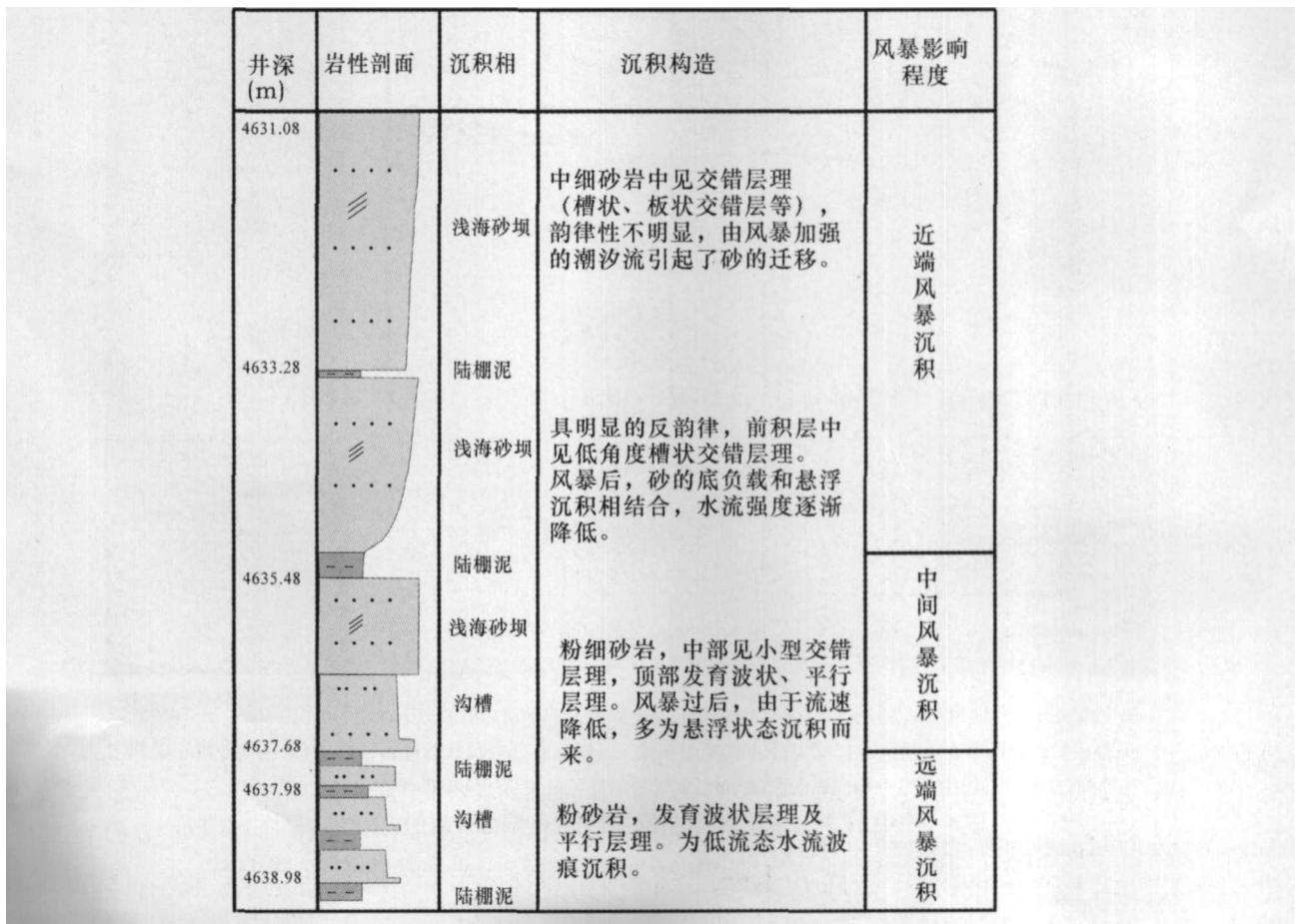


图 3 塔中 67 井风暴改造的浅海砂坝相序特征



图中由左至右分别为左 1、左 2、左 3、左 4 四列岩心，左 1 底部至左 4 顶部地层向上变浅，井深为 4609.28~4605.32 m；整段岩心为陆棚砂体沉积，左 2 岩心下部与中上部见 3 套明显底部撕裂状泥砾层，向上为灰色细砂岩正韵律演化序列，左 3 岩心段中部也见相同纵向演化序列，此皆为明显风暴控制的陆棚砂体沉积。

图 4 塔中 31 井风暴控制的陆棚砂岩与正常陆棚砂岩的岩相组合特征

Fig 4 The rock associations of storm dominated and normal shelf sand of Well TZ31

的形式继续向海中搬运，随着砂从密度流中降落位于正常天气波底以下的浅海里，形成具有丘状交错层

理的陆架席状砂岩层序^[8]，风暴沉积砂岩垂向上粒级由粗至细变化。

4 海平面变化对砂体储集性的影响

经米兰柯维奇旋回与高频波动周期识别^[17]及其它方面的研究认为,塔中志留系持续时间为4~8Ma不等,其间发育2次海侵—海退演化过程。海水由北向南进侵,TZ31、TZ10、TZ12等井分别经历了滨岸、陆棚—潮坪的沉积演化环境,与下沥青砂岩段—灰泥岩段、上沥青砂岩段—红泥岩段相对应。

在塔中志留系柯坪塔格组沉积早期,即第一次大规模海侵期发育有3~4期次级的海侵过程,滨岸线由TZ31-23井推进至TZ37-44井,最大海泛期海平面上升至TZ1-24井一线。靠岸一侧发育前滨—临滨砂体,向海方向逐渐过渡为浅海砂坝、风暴改造的陆棚砂体。砂体间沉积有薄层的绿灰色、深灰色的陆棚泥,形成了小区域内盖层。最大海侵时期,塔中地区广泛沉积了一套厚达几十米甚至上百米的暗色泥岩,即灰泥岩段,形成了覆盖下沥青砂岩段的区域性稳定盖层(图5)。滨岸砂体向陆地超覆尖灭与陆棚泥岩组合可形成地层超覆圈闭,浅海砂坝易形成砂岩透镜体圈闭,陆棚砂体在区域上尖灭与陆棚泥岩组合,可形成较好的构造—岩性圈闭。

海侵时期发育的滨岸砂、浅海砂坝与陆棚砂体,其单个准层序砂体的厚度在6~8m,其宽度应在10km左右,长度大于47km,为典型的带状砂体。砂岩物性好,是较优质储集体。以TZ31井为例,在下沥青砂岩段的4515~4520m,发育前滨—后滨沉积砂

体。砂岩中平均石英含量59.42%,长石8.64%,岩屑31.57%,平均孔隙度为9.8%,平均渗透率为 $10.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其下部4580~4630m发育浅海砂坝沉积,砂岩中平均石英含量67.31%,长石2.9%,岩屑20%,平均孔隙度为11.45%,渗透率 $73.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。可见在海侵砂体中部分浅海砂坝砂体储集性要优于滨岸砂体。同时在TZ33井部分岩心样品分析中,陆棚砂岩的孔隙度一般大于15%,储集性更优于浅海砂坝砂体。

在塔中志留系柯坪塔格组沉积早期,即海侵时期,退积成因层序的陆架地层是富砂的,而后进入了海退时期,进积成因层序的陆架地层是富泥的,这是由于滨面前积进入浪基面以下的深水陆架,滨面筛选作用减弱^[18]。这样就形成了该地区有规律的地层样式:开阔海的滨面砂岩与多湾海岸的、粗粒的潮控砂岩叠置出现(图6)。

在塔中志留系柯坪塔格组沉积晚期,即海平面下降期,沉积了上沥青砂岩段的潮坪相砂体,砂体类型主要为潮道砂体。通过对TZ33、TZ31等井岩心样品分析,潮道砂岩粒间填隙物中泥质含量一般5%~25%,方解石约占3%~20%,明显造成砂岩物性变差,孔隙度平均小于6%。而海侵时期砂岩中的泥质、方解石等填隙物含量偏低,一般小于5%,孔隙度、渗透率均比较好。因此海侵时期砂体的储集性明显好于海退时期形成的潮道砂体(图7)。

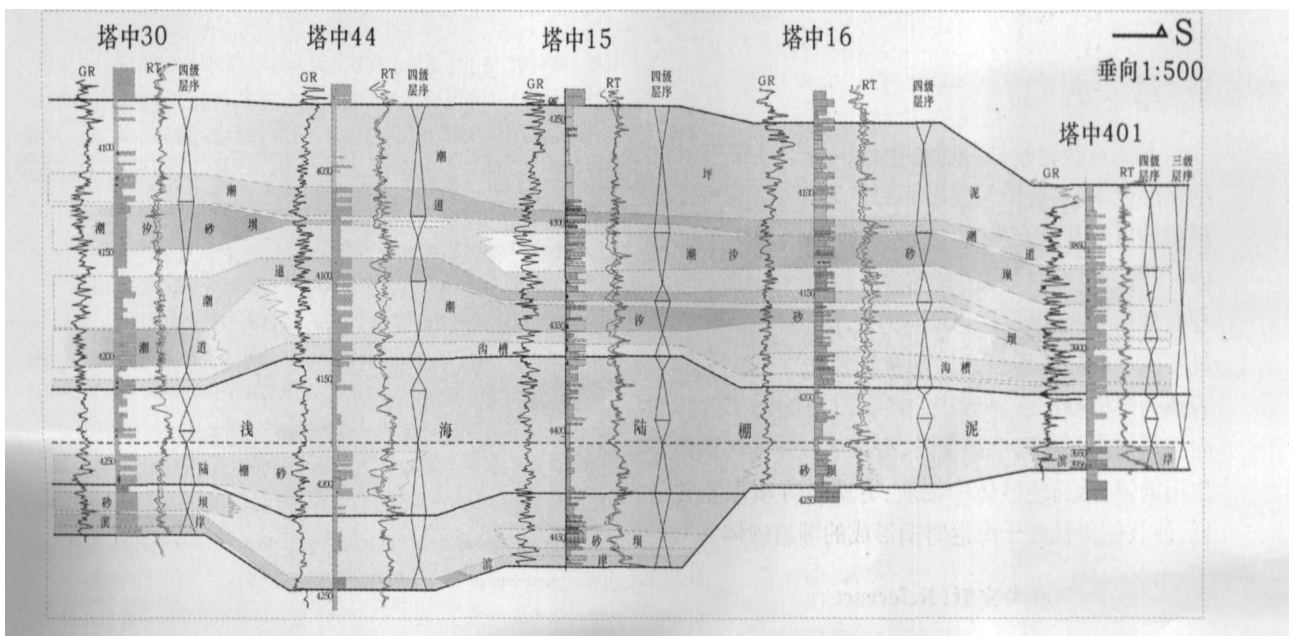


图5 塔中地区志留系柯坪塔格组沉积砂体展布特征

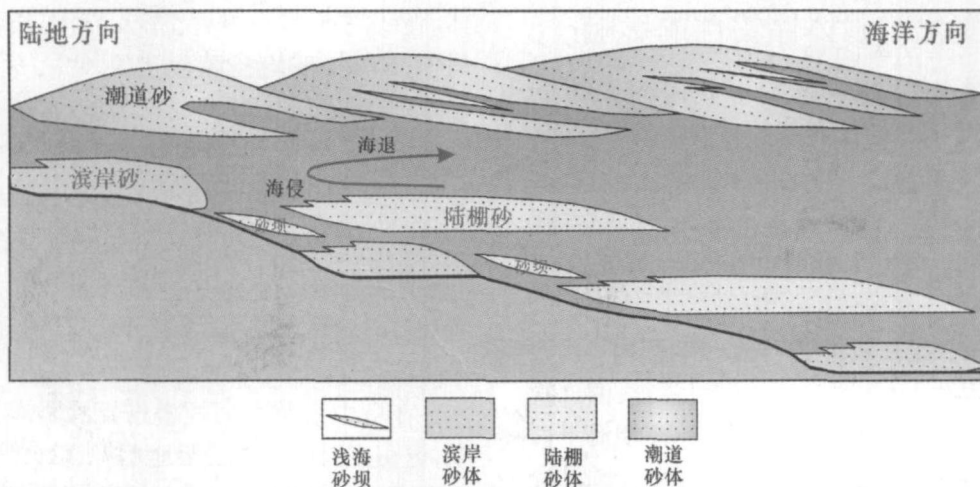
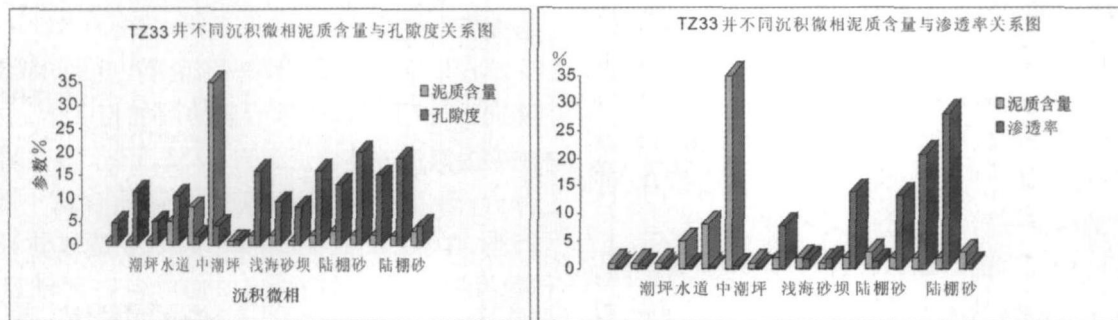


图 6 塔中志留系柯坪塔格组砂体的叠加样式图

Fig 6 The distribution of sand superimposition of the Kepingtage Formation of Silurian in Tazhong area



左图:不同沉积微相泥质含量与孔隙度关系图;

右图:不同沉积微相泥质含量与渗透率关系图。

图 7 柯坪塔格组塔中 33 井砂岩物性特征对比图

Fig 7 The sand physical property correlation of Well TZ33 of Kepingtage Formation in Tazhong area

5 结 论

下沥青砂岩段是目前塔中地区志留系最有利的勘探层位,主要为风暴控制下的一套海侵滨岸—陆棚沉积砂体。在此沉积背景下,风暴作用改造了陆棚砂、浅海砂坝等砂体,使其发育规模增大。海平面上升使砂体类型由下至上表现为滨岸砂—浅海砂坝—风暴改造的陆棚砂体的多期叠置演化序列。平面上表现为滨岸砂—浅海砂坝—风暴改造的陆棚砂体的向海延伸序列。海平面上升,海水对砂体的淘洗改造作用增强,从而使砂体中泥质、方解石等填隙物含量低,使其储集性好于海退时期形成的潮道砂体。

参考文献 (References)

1 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化. 北京:石油工业出版社, 1996 [Gu Jiayu. Sedimentary Sequence and Evolution in Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996].
中国知网 <https://www.cnki.net>

sin Beijing Petroleum Industry Press 1996]

2 朱筱敏. 塔里木盆地志留系与泥盆系碎屑潮坪沉积. 见:王英华, 等编. 沉积学及岩相古地理新进展. 北京:石油工业出版社, 1995. 166~169 [Zhu Xiaomin. The clastic tidal flat deposition of Silurian and Devonian in Tarim basin. In: Wang Yinghua et al eds. Advances in Sedimentology and Lithofacies Paleogeography. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. 166~169]

3 齐永安. 遗迹化石与潮控滨浅海泛面的识别与准层序相组合——以塔里木盆地志留统塔塔埃塔格组为例. 矿物岩石, 1998, 18(4): 12~16 [Qi Yong'an. Trace fossils and recognition of flooding surface and facies association of parasequences in tide-controlled shorelines. Journal of Mineral Petrology, 1998, 18(4): 12~16]

4 陈方鸿, 王贵文. 塔里木盆地塔中地区志留系测井层序地层学研究. 沉积学报, 1999, 17(1): 58~62 [Chen Fanghong, Wang Guiwen. On logging-sequence stratigraphy of Silurian in Tazhong area. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 58~62]

5 朱筱敏, 王贵文, 谢庆宾. 塔里木盆地志留系沉积体系及分布特征. 石油大学学报, 2002, 26(3): 5~12 [Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, Xie Qingbin. Characteristics and distribution of depositional systems of

- Silurian in Tarim Basin. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(3): 5~12]
- 6 钟广法, 彭德堂, 刘绍平, 等. 塔中地区志留系风暴沉积. 江汉石油学院学报, 1997, 19(1): 7~11 [Zhong Guangfa, Peng Detang, Liu Shaoping et al. A study on Silurian tempestites in Tazhong area. Tarim Basin. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1997, 19(1): 7~11]
 - 7 朱如凯, 罗平, 何东博, 等. 塔里木盆地塔中地区志留系柯坪塔格组沉积相和沉积模式. 古地理学报, 2005, 7(2): 197~206 [Zhu Ru-kai, Luo Ping, He Dongbo et al. Sedimentary facies and models of the Kepingtage Formation of Silurian in Tazhong area Tarim basin. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(2): 197~206]
 - 8 里丁 H G 主编. 沉积环境和相. 北京: 科学出版社, 1986 [Reading H G. Sedimentary Environments and Facies. Beijing: Science Press, 1986]
 - 9 李向东, 李强. 塔里木及邻区晚古生代早期古气候与构造. 新疆地质, 1996, 14(4): 306~315 [Li Xiangdong, Li Qiang. Paleoclimate and tectonics of Tarim and neighboring area of early late Paleozoic Xinjiang. Geology, 1996, 14(4): 306~315]
 - 10 丁东, 尹延鸿, 李晓红. 渤海沿岸风暴沉积体的成因及分布规律. 海洋地质动态, 2000, 16(7): 1~3 [Ding Dong, Yin Yanhong, Li Xiaohong. The cause of formation and the distribution of storm sediment on coastwise of Bohai Sea. Marine Geology Letters, 2000, 16(7): 1~3]
 - 11 李志宏, 牛志军, 陈立德, 等. 三峡地区志留纪纱帽组风暴岩的发现和地质意义. 华南地质与矿产, 2000, (1): 43~52 [Li Zhihong, Niu Zhijun, Chen Lide et al. Discovery and geologic significance of tempestites in Silurian Shamao Formation from the Yangtze gorges area. Geology and Mineral Resources of South China, 2000, (1): 43~52]
 - 12 Emery D. and Myers K J. Sequence Stratigraphy. Blackwell Scientific Publications, 1996
 - 13 Swift D J P, Oertel G F, Tillman R W, and Thome J A. Shelf Sand and Sandstone Bodies. Blackwell Scientific Publications, 1991
 - 14 Rhodes E G, Moslow T F. Marine clastic reservoirs: examples and analogues. Springer-Verlag, New York, 1993
 - 15 Peter A. Scholle and Darwin Spearing. Sandstone Depositional Environments. AAPG, Tulsa, Oklahoma, U. S. A., 1-385, 1982
 - 16 Richard A. Davis Jr. Oceanography: an introduction to the marine environment. Wm. C. Brown Publishers, Duhugne, Iowa, 1986, 1-427
 - 17 齐永安, 王润怀, 潘结南. 米兰柯维奇旋回与高频波动周期识别. 焦作工学院学报(自然科学版), 2000, 19(2): 81~85 [Qi Yong'an, Wang Runhuai, Pan Jienan. Milankovitch cycles and the recognition of high-frequency wave period. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science Edition), 2000, 19(2): 81~85]
 - 18 Timothy A Cross. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(4): 322~350

Study on Transgressive Storm-dominated Shoreline-neritic Shelf Sandbody: a case of the lower bitumen-bearing sandstone member of Silurian in Tazhong Area

GAO Zhi-yong^{1,2} ZHU Ru-kai^{1,2} GUO Hong-li^{1,2} HE Dong-bo¹

(1. Center Laboratory of PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083

2. Key Laboratory for Oil and Gas Reservoirs, CNPC, Beijing 100083)

Abstract Transgressive storm-dominated shore-neritic sedimentary system was developed in the lower bitumen-bearing sandstone member during Silurian period of Tazhong area in Tarim basin. The types of sandbody are shore sandbody, neritic sand bar and shelf sand in the lower bitumen-bearing sandstone member. After the storm, the distribution of shelf sand became larger than before. The physical property of sandstone during progression is better than that of sandstone of tidal flat during marine regression. There are many different characters on the sand bodies, and the shore-neritic sand bodies are the very important reservoir for the stratigraphic traps.

Key words Tazhong area, Silurian, marine progression, storm-dominated, shore sand, neritic sand bar, shelf sand