

# 塔里木盆地东部寒武系 碳酸盐深水重力流沉积及其储集性能

郑兴平<sup>1,2,3</sup>, 张艳秋<sup>4</sup>, 张君龙<sup>5</sup>, 沈安江<sup>1,2</sup>, 朱永进<sup>1,2</sup>,  
陈娅娜<sup>1,2</sup>, 陈希光<sup>1,2</sup>, 杨钊<sup>1,2</sup>, 何敏<sup>6</sup>

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)  
(3 中国石油勘探开发研究院研究生部; 4 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院)  
(5 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院; 6 中国石油大学(北京)地球与资源学院)

**摘要** 通过野外露头、钻井岩心薄片的观察,在塔里木盆地东部辨识出寒武系大量碳酸盐深水重力流沉积,并划分出斜坡角砾岩、高密度钙屑浊积岩、低密度钙屑浊积岩等三种类型。通过单井厚度标定、地震相分析和区域成图,平面上沿斜坡发育较大规模碳酸盐深水重力流沉积,宽度达 40~80 km,厚度达 50~150 m。分析测试和测井解释资料表明,重力流(特别是高密度浊积岩)可以发育厚度较大的良好储层。塔东寒武系斜坡区碳酸盐深水重力流油气显示丰富,是值得深入探索的勘探领域。

**关键词** 塔里木盆地东部; 寒武系; 深水沉积; 重力流沉积; 碳酸盐岩; 浊积岩; 沉积特征; 储集特征

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

## 1 概况

碳酸盐深水重力流是油气勘探的重要领域之一,在世界范围内已发现多处碳酸盐深水重力流油气田(藏),例如墨西哥于 20 世纪 70 年代发现的 Cantarell、Bermudez 等一系列油田,产层是侏罗系—白垩系斜坡粗碎屑碳酸盐岩,地质储量近  $60 \times 10^8 \text{ t}$ ; 20 世纪 30 年代发现的 Poza Rica 钙屑浊积岩油田,可采储量达到  $2 \times 10^8 \text{ t}$  油当量以上<sup>[1-2]</sup>。中国南方晚古生代陆缘断陷区台缘斜坡和台间海槽区跌积边缘型碳酸盐重力流沉积物发育,其内富含沥青质,其中广西河池拉朝的泥盆纪地层中已开采碳沥青数万吨<sup>[3-4]</sup>。尽管目前深水碳酸盐岩油气田所占比例比较小,特别是国内尚没有大的发现,但其勘探潜力不容置疑,值得深入探索。

塔里木盆地东部(以下简称塔东)寒武系普遍沉积,面积达  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$  以上,且盆地东北缘库鲁克塔格有较多的寒武系露头(图1)。前人已经开展过塔东寒武系的地层、沉积相及岩相古地理研究,基本明确

了寒武系跨越碳酸盐台地、斜坡、盆地三大相带的格局<sup>[5-7]</sup>。寒武系深水沉积岩石类型丰富,以颜色较深、生物较少、粒度较细的薄层泥晶灰岩、泥质灰岩、泥岩、页岩和硅质岩等为主要特征,面积广阔,厚度较大(200~500 m)。除了这些原地沉积外,还有厚度不小的异地再沉积碳酸盐重力流,成分是来源于台地的碳酸盐岩砾石、砂级碎屑,粒度粗,层理构造丰富。

塔东寒武系油气勘探始于 20 世纪 80 年代后期,已钻探井 10 余口(图1),除古城低凸起和罗布泊凸起的部分探井外,在塔东隆起带、孔雀河斜坡所钻的多数探井,其目的层主要是寒武系深水沉积。钻遇寒武系深水碳酸盐岩的大部分探井具有不同程度的沥青和油气显示。其中,塔东2井获得少量原油,英东2井获得低产气流,库鲁克塔格恰克马克剖面下寒武统露头钙屑浊积岩富含沥青。目前,塔东寒武系深水碳酸盐岩尚未取得大的油气突破,据分析,中下寒武统优质烃源岩热演化程度过高和早期成藏的油气散失是其重要原因<sup>[8-10]</sup>。相对于满加尔凹陷,古城低凸起东侧斜坡和罗布泊凸起西侧斜坡的埋藏深度和热演

收稿日期: 2014-06-18; 改回日期: 2014-09-15

本文受中国石油天然气股份有限公司重大科技专项《深层规模优质储层成因与有利储集区评价》(编号: 2014E-32-02)资助

郑兴平: 1971 年生,高级工程师,1996 年中国石油大学(北京)毕业,获硕士学位。主要从事碳酸盐岩储层地质及实验工作。

E-mail: zhengxp\_hz@petrochina.com.cn

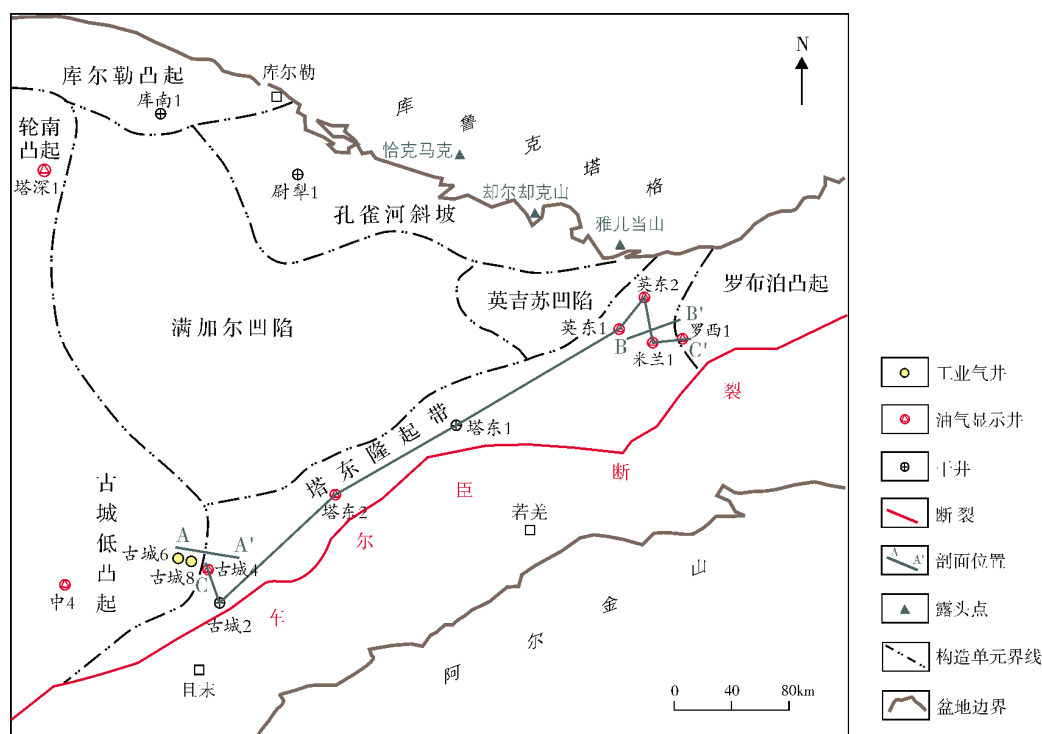


图1 塔里木盆地东部寒武系构造区划及探井、露头分布图

化程度较低,具备持续生烃条件;特别是近三年来古城低凸起奥陶系浅水台地相碳酸盐岩天然气勘探获得多个突破(如古城6井、古城8井),这使得生烃和成藏条件与之类似的古城低凸起东斜坡的重力流勘探前景更加明朗。

目前,关于塔东寒武系碳酸盐深水重力流沉积只有零星论述<sup>[5-7,11-12]</sup>,其主要类型、规模、分布,特别是储集条件等方面尚无专门论述和全面认识;并且,已钻遇重力流储层的探井当时均按照白云岩领域来勘探<sup>[13-15]</sup>,对储层发育的规律认识不清。本文通过研究区东北侧库鲁克塔格恰克马克露头、研究区内9口钻井(罗西1、米兰1、英东1、英东2、塔东1、塔东2、古城2、古城4、库南1)的岩心薄片及6 000余千米地震资料分析,按照露头和单井识别、地震相展开分析和优势相成图的技术思路开展工作,认识到塔东寒武系沿斜坡发育较大规模的碳酸盐深水重力流和良好储层,油气显示丰富,可以作为重要勘探对象。

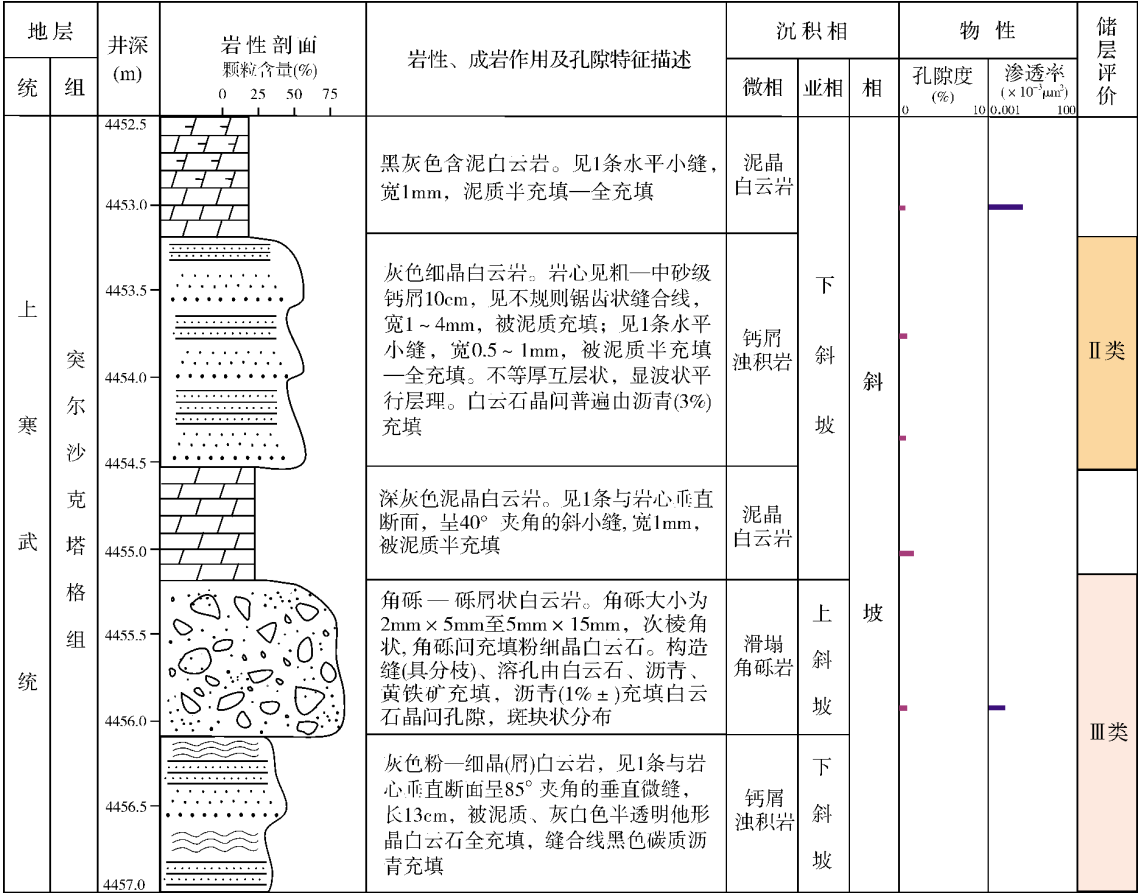
## 2 塔东寒武系碳酸盐深水重力流类型及特征

深水碳酸盐沉积在国外已经得到重视和广泛研

究<sup>[16-20]</sup>。斜坡至盆地,深水异地再沉积的类型很多,按照搬运机制可划分为块体搬运的岩崩、滑移、滑塌等,以及沉积物重力流的碎屑流、颗粒流、液化流、浊流等类型<sup>[21]</sup>。本文参考Tucker的论述<sup>[17]</sup>,考虑到出现概率、储层相对重要性以及平面分布预测的需求,将碳酸盐深水重力流简单地划分为斜坡角砾岩、浊积岩(图2),后者可进一步分为高密度浊积岩和低密度浊积岩。

斜坡角砾岩包含了岩崩、滑移和滑塌所形成的大尺度异地沉积碎屑,砾石搬运距离一般有限,磨圆程度较差,角砾间泥杂基含量一般较多。其中:岩崩沿着陡峭的斜坡发生,为斜坡底部的碎石堆供料;滑移指大量沉积物整块在滑面上运动,内部变形少;而滑塌是指内部变形严重的大量沉积物运动,这些沉积物大多留在斜坡上。

沉积物重力流是沉积物在重力的作用下移动下坡。其中最常见的是浊流,其减速时沉积物由悬浮搬运变为推移搬运,发育以递变层理为特征的鲍马序列。浊流可以分为低密度浊流和高密度浊流。低密度浊流形成中—细粒度浊积岩,常发育交错—波状层理段和水平纹层段,而块状层理和平行层理段常缺失。高密度浊流搬运粗砂粒甚至砾石级沉积物,常见冲刷



取心井段: 4452.5~4457.0m; 进尺: 4.5m; 心长: 4.5m; 收获率: 100%

图2 英东2井上寒武统岩心沉积、储层综合柱状图

构造,常发育块状层理、平行层理段和交错层理段。

2.1 斜坡角砾岩

在库鲁克塔格恰克马克剖面, 上寒武统见到大套斜坡角砾岩(图3a),角砾成分有瘤状灰岩、生物灰岩等,大砾石直径可达30 cm以上,且见到内部少量泥灰岩薄层发生滑塌变形的构造。露头剖面上该套角砾岩单层厚度约3.5 m, 横向延伸近百米未见终止,其上下岩层为薄层泥晶灰岩。

米兰1井上寒武统多筒岩心见到斜坡角砾岩(图3b),已发生白云石化,夹于泥粉晶白云岩和颗粒质白云岩(钙屑浊积岩)中,砾石粒径较小,一般小于10 cm,单层厚度可达到1.5 m。

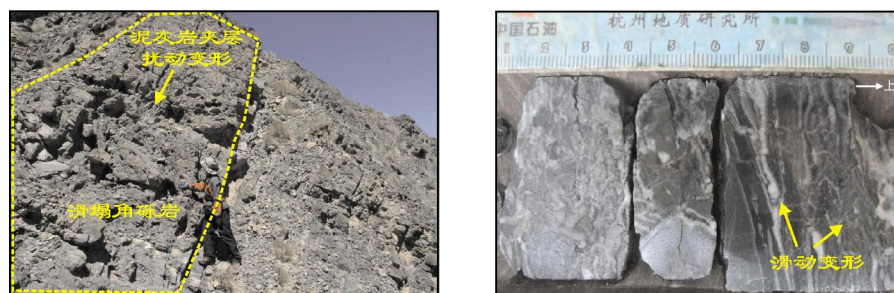
2.2 高密度钙屑浊积岩

库鲁克塔格恰克马克剖面下寒武统发现一套厚度达2m的中粗砂夹细砂屑石灰岩(图4a—4c),主要

显示粒序和平行层理两种结构, 顶底为深灰色泥页岩,判断为钙屑浊积岩A—B段组合的多次叠加。这套岩石外观呈灰黑色,铁锤敲打有浓烈沥青味。显微镜观察为部分重结晶的白云石化砂屑石灰岩,内含少量石英粉砂,粒间、晶间孔隙充填沥青。

塔东隆起带上寒武统白云岩储层较发育,白云石化成因类型多样<sup>[13-15]</sup>。通过详细的岩心和薄片观察,发现在泥粉晶白云岩中夹有大量颗粒结构和鲍马序列明显的层段, 这些层段原始沉积属于钙屑浊积岩。英东2井、米兰1井岩心见大套颗粒白云岩,其中以粗—中砂级粒序层、平行层理和波状变形层理段为主(图4d—4f,图2),属于鲍马序列的A-B-C段组合;单层厚度30~40 cm,且多次连续叠加出现,导致累加厚度较大。显微镜下见已全部转化为细—中晶白云岩,白云石晶间孔隙发育(图4g),或由沥青充填(图4h),阴极发光下仍可以见到颗粒幻影(图4i)。

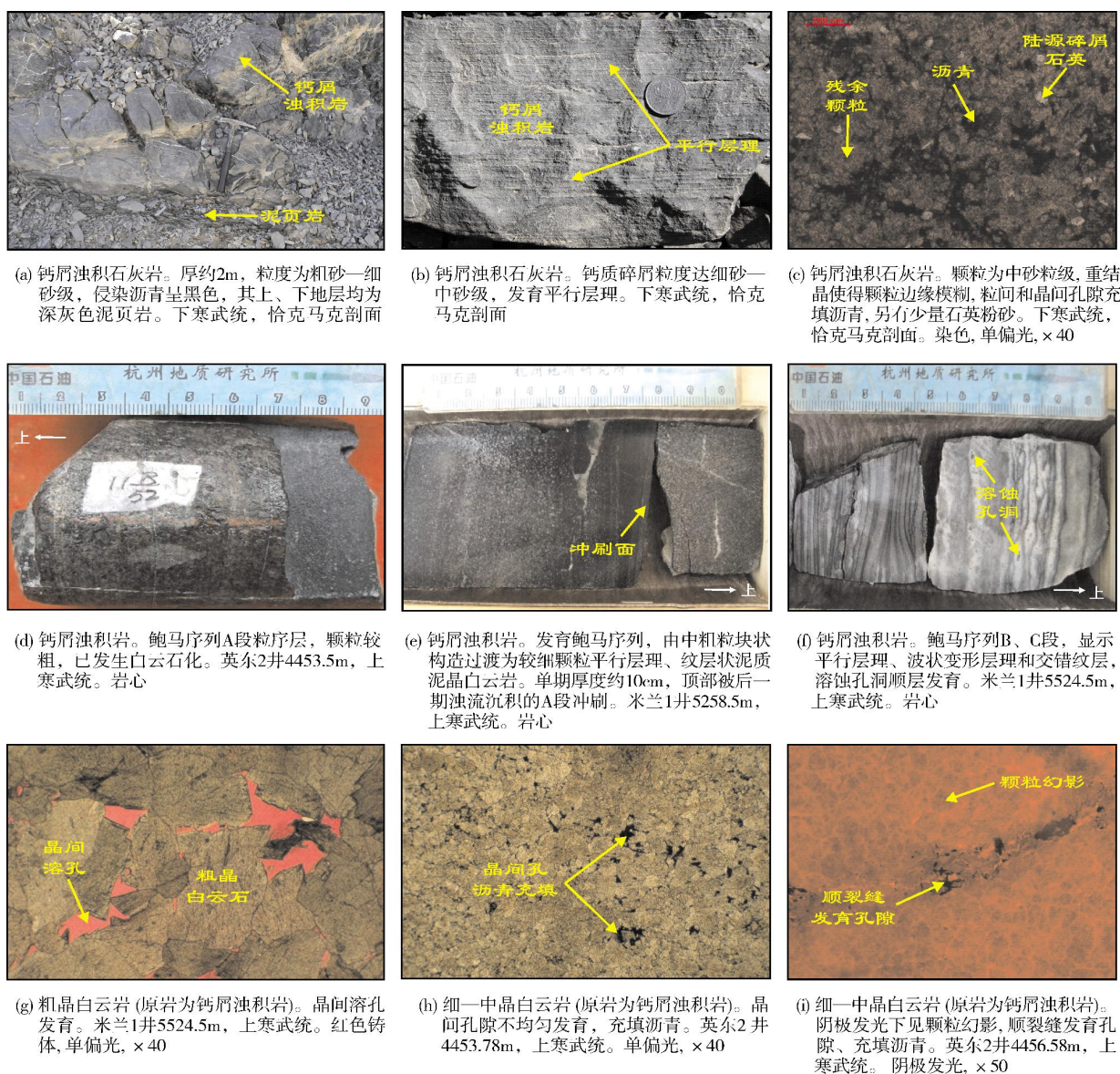




(a) 斜坡滑塌角砾岩。整体呈块状, 延伸近百米未见边界。内部少量泥灰岩薄层发生变形甚至错断, 石灰岩砾石分选极差, 有的砾石中含生物碎屑。上寒武统, 恰克马克剖面

(b) 斜坡角砾岩。砾石大者  $3\text{cm} \times 5\text{cm}$ , 砾石棱角状, 上部有滑动变形构造。米兰1井5658.1m, 上寒武统。岩心

图3 塔里木盆地东部寒武系斜坡角砾岩露头 and 岩心特征



(a) 钙屑浊积石灰岩。厚约2m, 粒度为粗砂—细砂级, 侵染沥青呈黑色, 其上、下地层均为深灰色泥页岩。下寒武统, 恰克马克剖面

(b) 钙屑浊积石灰岩。钙质碎屑粒度达细砂—中砂级, 发育平行层理。下寒武统, 恰克马克剖面

(c) 钙屑浊积石灰岩。颗粒为中砂粒级, 重结晶使得颗粒边缘模糊, 粒间和晶间孔隙充填沥青, 另有少量石英粉砂。下寒武统, 恰克马克剖面。染色, 单偏光,  $\times 40$

(d) 钙屑浊积岩。鲍马序列A段粒序层, 颗粒较粗, 已发生白云石化。英东2井4453.5m, 上寒武统。岩心

(e) 钙屑浊积岩。发育鲍马序列, 由中粗粒块状构造过渡为较细颗粒平行层理、纹层状泥质泥晶白云岩。单期厚度约10cm, 顶部被后期浊流沉积的A段冲刷。米兰1井5258.5m, 上寒武统。岩心

(f) 钙屑浊积岩。鲍马序列B、C段, 显示平行层理、波状变形层理和交错纹层, 溶蚀孔洞顺层发育。米兰1井5524.5m, 上寒武统。岩心

(g) 粗晶白云岩 (原岩为钙屑浊积岩)。晶间溶孔发育。米兰1井5524.5m, 上寒武统。红色铸体, 单偏光,  $\times 40$

(h) 细—中晶白云岩 (原岩为钙屑浊积岩)。晶间孔隙不均匀发育, 充填沥青。英东2井4453.78m, 上寒武统。单偏光,  $\times 40$

(i) 细—中晶白云岩 (原岩为钙屑浊积岩)。阴极发光下见颗粒幻影, 顺裂缝发育孔隙、充填沥青。英东2井4456.58m, 上寒武统。阴极发光,  $\times 50$

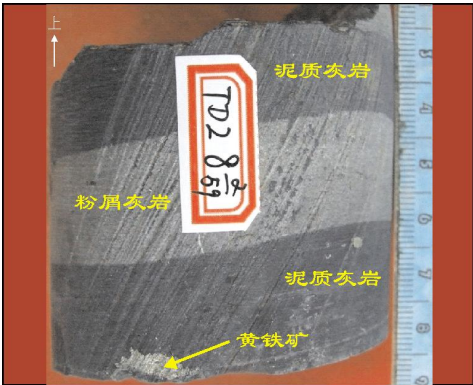
图4 塔里木盆地东部寒武系高密度钙屑浊积岩露头、岩心及薄片特征



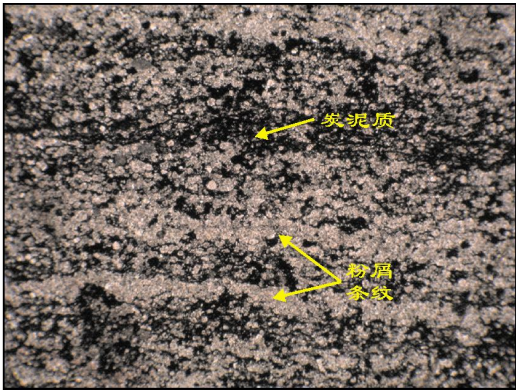
2.3 低密度钙屑浊积岩

低密度钙屑浊积岩是深水碳酸盐岩的常见类型之一<sup>[17,21]</sup>,在塔东几乎每口井的寒武系深水沉积中都可以辨识出来。其特点是粒度细(以粉细钙屑为主),

单层厚度薄(一般 1~10cm),与深水泥质沉积物互层,而且鲍马序列不全,以平行层理 B 段、波状纹层 C 段和水平纹层 D 段为主,下部递变层理段经常缺失,而较厚的泥质悬浮沉积 E 段实际上已属于原地静水沉积,以塔东 1 井、塔东 2 井最为典型(图 5a,5b)。



(a) 浊积灰岩。厚2cm, 浅色, 颗粒以粉屑为主, 显示波状纹层和水平层理, 上下为黑灰色泥质灰岩, 底部有黄铁矿斑块。塔东2井4670.3m, 上寒武统。岩心



(b) 浊积灰岩。颗粒以粉屑为主, 碳泥质、泥晶方解石呈互层状。塔东2井4769.25m, 上寒武统。染色, 单偏光, × 40

图 5 塔里木盆地东部寒武系低密度钙屑浊积岩岩心及薄片特征

3 塔东寒武系碳酸盐深水重力流沉积厚度和分布

为了估算塔东寒武系碳酸盐深水重力流的发育厚度, 对取心较多的 6 口探井岩心进行了岩相辨识和厚度及比例统计, 见表 1。碳酸盐深水重力流厚度占寒武系地层厚度的比例一般在 10%~30%之间, 平均 22.5%, 斜坡—盆地相区寒武系地层厚度一般在 200~500m, 估算其中深水重力流沉积厚度可达 50~150m。

表 1 塔里木盆地东部探井岩心寒武系碳酸盐深水重力流厚度及比例统计

井名	沉积相带	取心厚度 $H_0(\text{m})$	重力流厚度 $H_s(\text{m})$	厚度比例 $H_s/H_0(\%)$
库南 1	斜坡	30.70	8.10	26.4
塔东 2	盆地	31.34	5.90	18.8
塔东 1	盆地	4.51	0.50	11.1
英东 1	斜坡	3.91	0.60	15.3
英东 2	斜坡	21.06	4.00	19.0
米兰 1	斜坡	22.16	6.51	29.4
合计		113.68	25.61	22.5

寒武系的地层厚度由台地向斜坡、盆地逐渐变薄(图 6)。盆地相泥质岩厚度较薄, 成层性好, 地震剖面上显示为薄的连续强反射层。碳酸盐深水重力流由台地物源搬运而来, 沉积厚度较大, 斜坡角砾岩为楔状体, 内部杂乱反射, 高密度重力流为弱振幅、弱连续夹局部强反射, 低密度重力流为弱连续、中等强度反射(图 6)。

根据以上单井标定的重力流厚度和地震相特征, 对塔东二维地震测线进行了解释, 编制了塔东上寒武统深水重力流沉积分布图(图 7)。

从大的格局上看, 在研究区的西部、东部两个台地之间有广阔的斜坡、盆地相沉积(图 7)。其中, 前缘斜坡的重力流厚度较大, 普遍达到 100~150m 以上, 而盆地相的重力流累计厚度降至 50m 以下。由于台地和上斜坡是线状供应物源, 重力流在沉积平面上呈沿台缘斜坡的裙边形状。斜坡角砾岩和高密度钙屑浊积岩发育带向盆地方向的发育宽度一般在 40~80 km, 发育规模相当可观。

4 塔东寒武系碳酸盐深水重力流的储集性能

塔东寒武系深水沉积中, 泥页岩、硅质岩、泥

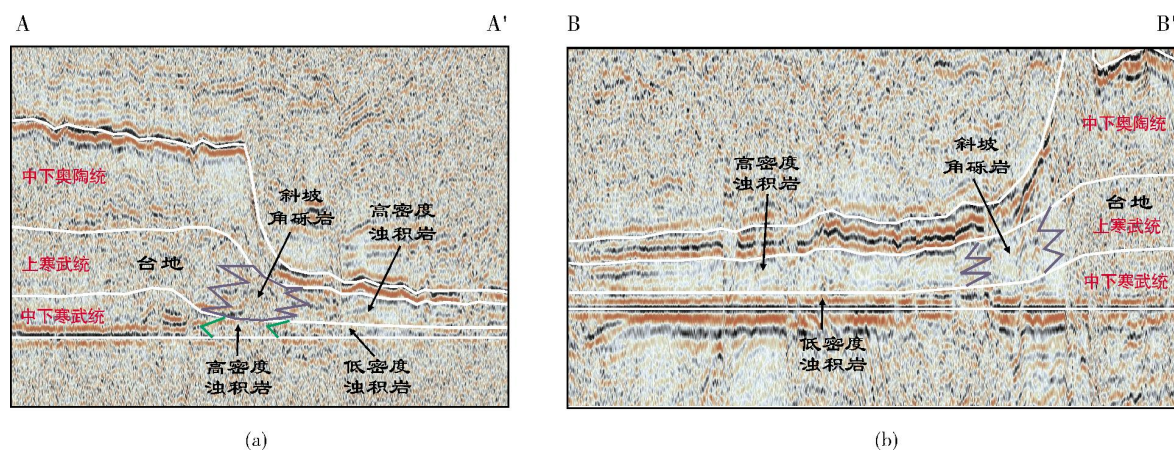


图6 塔里木盆地东部寒武系深水重力流地震响应  
以寒武系底部拉平。剖面位置见图1和图7

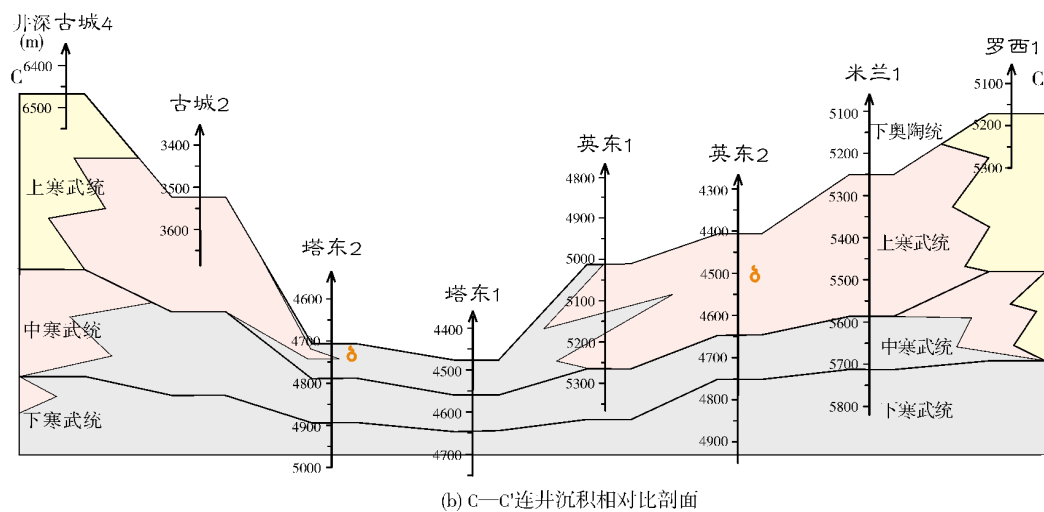
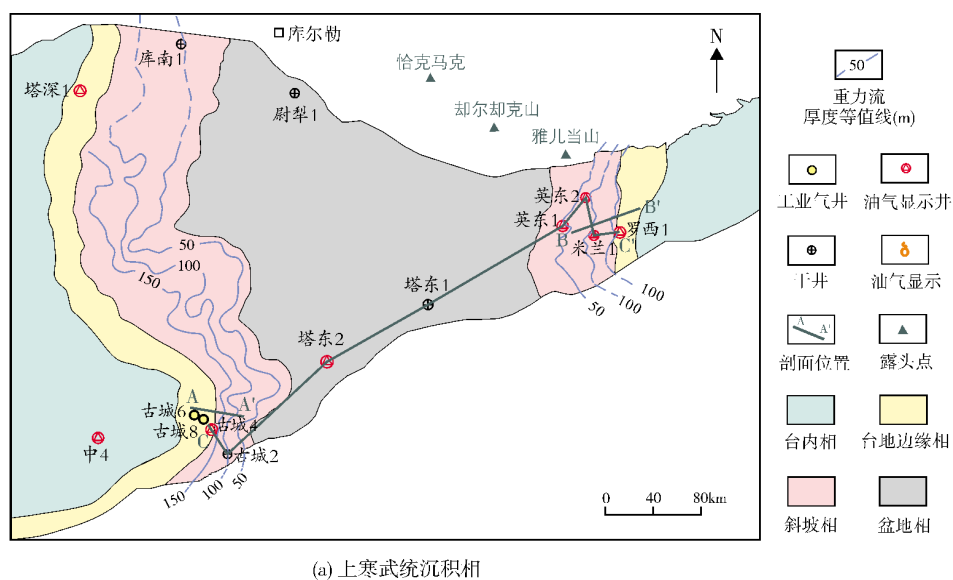


图7 塔里木盆地东部上寒武统碳酸盐深水重力流分布图

质灰岩、泥晶灰岩等原地正常沉积的孔隙等物性极差;而斜坡角砾岩、钙屑浊积岩等深水异地再沉积岩石的储集性能相对偏好,甚至不乏优质的储层段。

对塔东隆起带5口探井的上寒武统岩样孔隙度测试数据进行统计,英东2井、米兰1井高密度浊积岩的平均孔隙度1%~1.4%,最大孔隙度2.83%~4%,储集空间主要是溶蚀孔洞和晶间孔隙(图4f, 4g)。需要说明的是,由于样品的沥青清洗不干净,孔隙度测试数据比实际孔隙度偏低。以泥质岩、泥晶岩等深水原地正常沉积为主、夹低密度浊积岩的塔东2井、塔东1井,其平均孔隙度均小于1%,储集性能较差。英东1井的物性介于上述两种沉积类型之间。

测井解释更能较全面地反映储层发育情况:英东2井、英东1井、米兰1井的高密度浊积岩,I、II类储层单井平均厚度达到37 m,而以原地正常沉积为主、夹低密度浊积岩的塔东2井、塔东1井,I、II类储层厚度较薄,均小于10 m。

以上的统计分析表明,塔东寒武系碳酸盐深水重力流(特别是高密度钙屑浊积岩)可以发育成为厚度较大的良好储层;薄层的低密度细粒钙屑浊积岩、漂浮在泥杂基中的角砾岩往往储集性能较差,需要经历后期的白云石化和破裂作用才能改善。

## 5 结 语

碳酸盐深水重力流储层的形态、规模和分布受深水沉积相的严格控制。科学的深水地质概念模式与高品质的地震资料解释结合,有助于精细刻画快速堆积、厚度较大、粒度较粗的碳酸盐深水重力流沉积体和寻找相对优质的储层。

塔里木盆地东部寒武系发育较大规模的碳酸盐深水重力流沉积,厚度可达50~150 m以上,平面上沿台缘斜坡呈裙边状分布。上寒武统斜坡角砾岩、高密度钙屑浊积岩向盆地方向发育宽度一般为40~80 km,其储集性能较好,储集空间有粒(砾)间溶蚀孔洞、白云石晶间孔等。塔东寒武系碳酸盐深水重力流储层发育,罗布泊凸起西斜坡、古城低凸起东斜坡油气显示丰富,是值得深入探索的勘探领域。

致谢:西南石油大学侯方浩教授、方少仙教授对本论文进行了悉心指导;中国石油勘探开发研究院李明教授、罗平教授、中国地质大学(北京)何金有博士在野外考察中提供了帮助。

## 参 考 文 献

- [1] ENOS P. Cretaceous debris reservoirs, Poza Rica Field, Veracruz, Mexico [C]// ROEHL P O, CHOQUETTE P W. Carbonate Petroleum Reservoirs. New York: Springer-Verlag, 1985: 455-469.
- [2] JANSON X, KERANS C, LOUCKS R. Seismic architecture of a Lower Cretaceous platform-to-slope system, Santa Agueda and Poza Rica Fields, Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(1): 105-146.
- [3] 侯方浩, 方少仙, 张庭山, 等. 华南陆块西南部晚古生代深水碳酸盐岩的控油气性[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(2): 1-12.
- [4] 侯方浩, 方少仙, 张庭山, 等. 中国南方晚古生代深水碳酸盐岩及控油气性[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 133-144.
- [5] 赵治信, 雍天寿, 贾承造, 等. 塔里木盆地勘探丛书: 塔里木盆地地层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- [6] 郑家凤, 穆曙光. 塔里木盆地震旦纪—奥陶纪岩相古地理[J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(4): 1-5.
- [7] 杨永剑, 刘家铎, 田景春, 等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 450-459.
- [8] 冉启贵, 程宏岗, 肖中尧, 等. 塔东地区构造热事件及其对原油裂解的影响[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 541-548.
- [9] 程宏岗, 冉启贵, 王宗礼, 等. 塔东地区下古生界原油裂解气资源评价[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(5): 707-711.
- [10] 唐友军, 王铁冠. 塔里木盆地塔东2井寒武系稠油分子化石与油源分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 18-22.
- [11] 郭建华, 朱扬明. 库南一井区寒武—奥陶系沉积特征与生油岩[J]. 石油学报, 1995, 16(2): 8-15.
- [12] 胡九珍, 冉启贵, 刘树根, 等. 塔里木盆地东部地区寒武系—奥陶系沉积相分析[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 70-75.
- [13] 邵龙义, 韩俊, 马锋, 等. 塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 953-961.
- [14] 刘永福, 殷军, 孙雄伟, 等. 塔里木盆地东部寒武系沉积特征及优质白云岩储层成因[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 126-132.
- [15] 马锋, 许怀先, 顾家裕, 等. 塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 144-155
- [16] COOK H E, ENOS P. 深水碳酸盐岩环境[M]. 冯增昭, 等, 译. 北京: 地质出版社, 1987: 1-4
- [17] TUCKER M E, WRIGHT V P, DICKSON J A D. Carbonate Sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1990:



- 256-282.
- [18] RUBERT Y, JATI M, LOISY C, et al. Sedimentology of resedimented carbonates: Facies and geometrical characterization of an upper Cretaceous calciturbidite system in Albania[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 257/260: 63-77.
- [19] BORGOMANO J R F. The Upper Cretaceous carbonates of the Gargano-Murge region southern Italy: A model of platform-to-basin transition[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(10): 1561-1588.
- [20] 牛新生, 王成善. 异地碳酸盐岩块体与碳酸盐岩重力流沉积研究及展望[J]. *古地理学报*, 2010, 12(1): 17-30.
- [21] LOWE D R. Sediment gravity flows(II): Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279-297.

编辑:董庸

## Reservoir Characteristics of Cambrian Deepwater Carbonate Gravity Flow Depositional Rock in Eastern Part of Tarim Basin

Zheng Xingping, Zhang Yanqiu, Zhang Junlong, Shen Anjiang, Zhu Yongjin,  
Chen Ya'na, Chen Xiguang, Yang Zhao, He Min

**Abstract:** The observation and research results of the outcrops and drilling cores show that Cambrian deepwater carbonate gravity flow depositional rock is widely distributed in the eastern part of Tarim Basin. The gravity flow rock can be divided into slope breccia, high-density calcarenaceous turbidite and low-density calcarenaceous turbidite. By means of marking single well thickness, analyzing seismic facies and drawing regional maps, it is shown that the slope breccia and the high-density calcarenaceous turbidite are distributed in a large scale of 40~80km of width and 50~150m of thickness along the Upper Cambrian slope. According to the core analysis and log interpretation, a certain thickness of good reservoirs may develop in the strata of gravity flow depositional rock, especially in the strata of high density turbidite. The fact of numerous oil and gas shows in the Upper Cambrian slope has revealed that the deepwater carbonate gravity flow rock is a domain worthy to prospect.

**Key words:** Cambrian; Deep water deposit; Gravity flow deposit; Carbonate rock; Turbidite; Deposition Characteristics; Tarim Basin

Zheng Xingping: male, DSc., Senior Petroleum Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China.