

文章编号: 1000-0550(2013)05-0867-11

利用数字露头模型技术对曲流河三角洲 沉积储层特征的研究^①

朱如凯¹ 白斌¹ 袁选俊¹ 罗忠¹ 汪沛² 高志勇¹ 苏玲¹ 李婷婷¹

(1. 提高石油采收率国家重点实验室(中国石油勘探开发研究院) 北京 100083; 2. 北京林业大学 北京 100083)

摘要 数字露头模型技术(DOM)是利用三维可视化技术虚拟露头表面,建立由一系列结构多边形构成的初步模型体,进而在模型体上叠加露头剖面所有数字化地质信息,包括三维地面激光雷达数据、遥感图像、高精度灰度照片、探地雷达数据等露头地质剖面所有地质学信息数字化数据,实现多种地质特征综合解释与测量的数字露头模型技术,已在野外露头剖面上沉积体系三维储层建模、岩性分类、构造断裂精细解译等方面研究发挥作用。本文为准确刻画沉积体系砂体与储集层空间分布特征,尝试利用数字露头模型技术,对鄂尔多斯盆地延长组曲流河三角洲平原河道砂体空间分布特征精确测量与描述,实测不同位置河道砂体储集性能,并利用探地雷达数据预测露头区域地下砂体形态特征,综合建立砂体三维空间分布模型,为储层精细对比研究提供依据。数字露头模型显示:(1)潭家河剖面河道形态明显,砂体呈顶平底凸的透镜体,横向延伸192 m,最厚处约14 m,河道与围岩切割关系明显,内部为4期沉积充填,整体表现为复合正韵律;(2)曲流河三角洲平原的分支河道砂体呈孤立状,砂体侧向迁移,垂向多期叠加,砂体在探地雷达剖面上反射特征表明,地面之下曲流河三角洲平原的分支河道砂体也呈孤立状,横向迁移频繁;横向上不同期次砂体宽度分别为192.4 m、32.54 m、41.83 m以及79.97 m,厚度对应为14 m、4.52 m、3.85 m以及5.66 m,厚宽比平均为12:1;(3)典型砂体储集物性解剖认为,三角洲平原分支河道砂体储集物性较差,储集物性空间分布特征表现为河道砂体内每期砂体下部物性优于上部,中间优于两翼,单期河道砂体最厚位置处储集性最好,孔隙度最高可达8%,渗透率为 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

关键词 数字露头建模 储集砂体形态 曲流河三角洲

第一作者简介 朱如凯 男 1968年出生 博士 高工 沉积储层地质学 E-mail: zrk@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.130.2⁺¹ **文献标志码** A

不同沉积体系砂体的空间展布形态以及储集层在纵横向变化的特征存在着明显的差别,如何准确刻画沉积体系砂体与储集层空间分布特征一直是油气勘探与开发的难点与困境。特别是在基于钻井信息开展井下小层对比时,针对同一沉积体系类型却划分出差异巨大的储层空间分布与构型特征。因此,如何实现不同储集砂体空间分布的精确测量与分析,明确不同储集体三维空间分布模型,将有效指导同类储集体的井下精细对比与研究,成为沉积储层研究的新领域之一。国内外学者针对该领域,也已开展了大量的探索研究^[1~15],但储集体形态参数研究多以定性为主,定量测试数据误差较大。目前,国外学者利用数字露头技术定量表征沉积储层空间构型研究,使储层三维构型研究更加准确。其中,对于沉积储层三维模型研究而言,构建精确地表露头数字模型是定量分析

储集体空间特征的基础。因此,本文选取鄂尔多斯盆地延长组谭家河露头曲流河三角洲平原河道砂体为研究对象,重点介绍如何建立露头数字模型过程以及利用该模型开展砂体空间分布特征精确测量与描述,分析河道砂体储集性能,并利用探地雷达数据预测露头区域地下砂体形态特征,综合明确砂体三维空间分布模型,为储层精细对比研究提供依据。

1 数字露头研究概述

数字露头概念早期是指通过遥感影像解译分析露头剖面岩石元素成份的差异。随着技术方法的进步,数字露头技术的研究对象、内容不断变化。目前研究内容包括利用三维地面激光雷达精确构建露头模型体,叠加遥感、图像、钻井地震等信息,开展露头三维沉积体形态、结构与沉积充填形态的精细刻画,

^①国家科技重大专项(2011ZX05001-002)、国家自然科学基金青年基金项目(41002034)、中国石油勘探开发研究院科学研究与技术开发项目(2012Y-007)、中国石油勘探开发研究院青年基金(2010-A-26-08)联合资助
收稿日期:2013-08-16; 收修改稿日期:2013-08-27

测量相关沉积体参数(沉积体厚度、宽度、面积)、露头储集体属性解译、构建三维储层模型、识别量化露头剖面断裂、裂缝空间展布特征等方面研究^[16~22]。研究历程可分为三个阶段:

① 1983年~1999年:以研究野外地质剖面遥感图像解译分析研究为主;

② 2000年~2003年:利用可视化软件技术,利用数字高程模型(DEM)、地理信息系统(GIS)以及高精度灰度照片解译等手段,进行露头剖面裂缝、断裂划分与识别,并开展高精度定量化分析沉积物变化规律的相关研究;

③ 2004年以来:主要利用三维地面激光雷达精确构建露头模型体,并叠加遥感、图像、钻井地震等信息,开展露头沉积储层与构造特征分析。

总之,数字露头技术方法就是在已建立的实际地表模型体上,加载所有涵盖露头地质剖面数字化采集的地质信息,最终对综合数字露头模型开展研究与分析。相对于沉积储层领域的研究,就是建立三维数字露头模型,进而模拟储层分布,具有数据采集快、数据类型多、数据可视化强、数据准确与分辨率高的特点,是客观准确开展露头地质研究的新方法。

1.1 数字露头研究数据类型

数字露头研究数据类型包括:①构建地表露头结构模型数据:为露头剖面的高程、位置等高精度三维离散点云数据,数据可通过三维地面激光雷达接收由露头剖面反射的激光束,建立三维数字露头网格模型。也可通过数字高程模型(DEM)来建立露头网格结构模型;②露头剖面各种信息化数据:包括对露头剖面采集的所有数据体,例如:全景数码相机获取的

高精度影像、遥感数据、露头剖面岩石地球化学数据、自然伽马数据、传统实测岩性剖面等数据;③综合数字露头模型数据体:是在地表露头模型上加载各类采集的信息数据,实现多种数据融合,主要利用可视化交互软件实现。

1.2 数字露头技术研究步骤

数字露头研究步骤包括:采集高精度三维离散点云数据,构建露头网格模型;采集露头剖面各种地质信息数据;叠加高精度影像数据在三维点云数据上,并将露头剖面地质研究数据、遥感数据、露头剖面元素、伽马等数字化数据进行融合;数据信息综合解译建立数字露头模型。其中,根据采集高精度三维点云数据构建露头数据网格模型是该方法研究的基础,将采集多种类型露头信息融合到露头网格模型是研究的难点,综合解译研究数字露头模型则是研究的重点。

2 鄂尔多斯盆地延长组数字露头模型

2.1 构建露头网格模型

① 三维地面激光雷达扫描数据采集

本次利用三维地面激光雷达采集高精度三维离散点云数据,构建露头网格模型。地面激光雷达可快速扫描目标,并获取高精度高密度的海量扫描数据,其中包括点云数据(x, y, z)和激光强度数据(图1)。其中,点云数据包含目标的距离值以及角度值,可以解算出目标点相对地面激光雷达的空间位置,勾勒出目标在空间的三维结构和形态;激光强度数据为激光反射率信息,可反映露头剖面岩性差异。针对研究区砂体分布特征,共扫描3 km,架设11站,约56G点云数据。

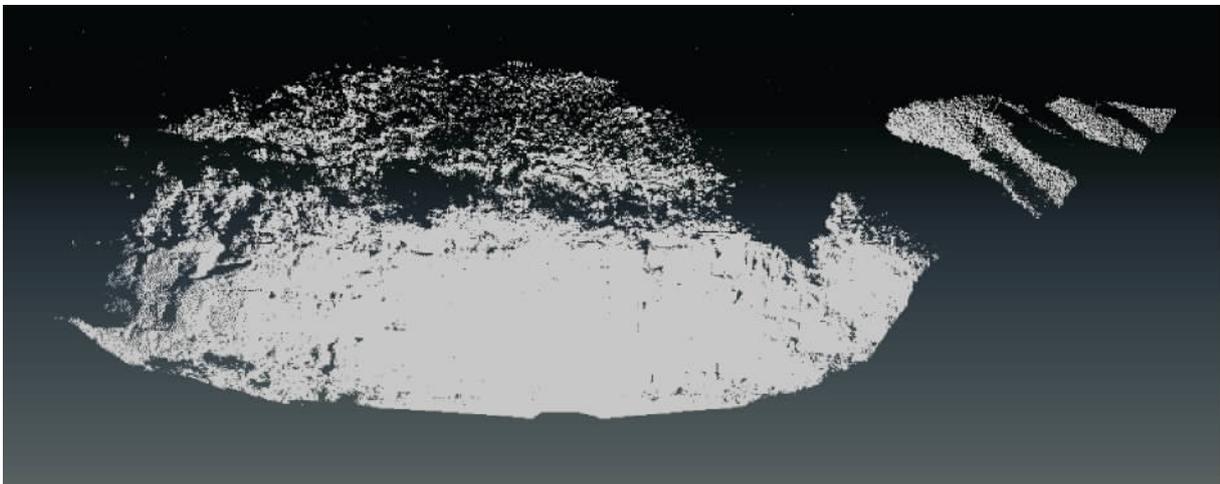


图1 研究区地面激光雷达采集点云数据

Fig. 1 Ground laser radar acquisition point cloud data of the study area

② 三维激光雷达扫描数据处理

为同时获取地质露头的纹理信息,在地面激光雷达上配置高分辨率数码相机,可同时采集点云数据与地质露头影像数据。但由于单站扫描时,地面激光雷达的视场要大于数码相机的视场,所以单站获取的激光点云数据需要与多幅数码相机影像匹配,以保证影像数据能够达到高精度拼接。拼接之后的影像数据就可以用来与激光点云数据进行配准,经过配准,激光点云中每个扫描点就可以具有相应的颜色信息,从而实现对激光点云数据的着色。图2所示激光点云数据(图1)与三幅数码相机影像相匹配(图3)的激光点云数据着色图。

由于数据采集时的空间几何及地理环境等因素,地面激光雷达所获取的激光点云数据还需要经过一系列的处理,如滤波、降噪等。为了减少如形状、风化和植被覆盖等多种因素对地质露头研究的干扰,需要对研究区域数据进行提取,从激光点云数据中提取研究区域数据(图4)。

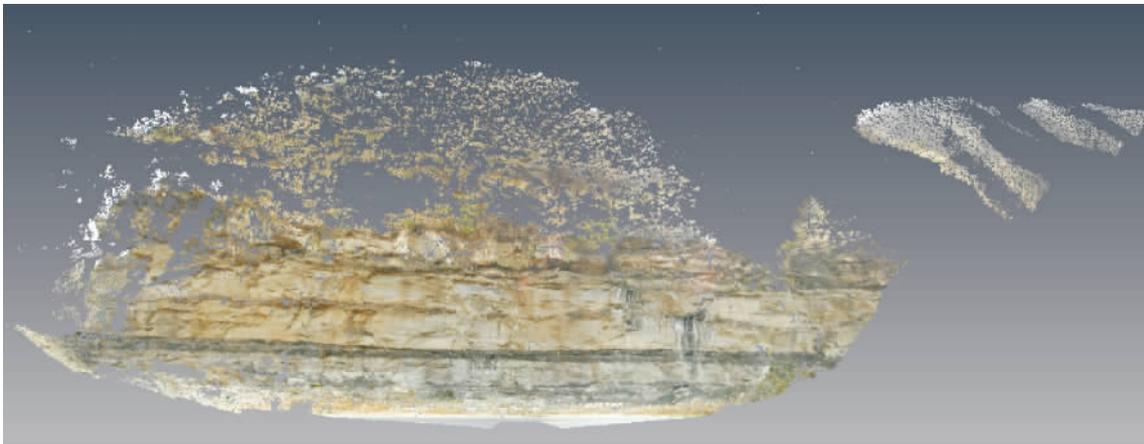


图2 研究区激光点云数据着色图

Fig. 2 Colored graph of laser point cloud data of the study area



图3 研究区露头数码影像

Fig. 3 Digital outcrop image of the study area

后续可以基于研究区域的激光点云数据、强度数据和影像数据开展建模、数据分析等一系列研究性工作。对于多站激光点云数据的处理与对单站数据的处理类似,只是多站扫描时需要在相邻扫描站点间保证约30%的覆盖度,以保证多站点云数据拼接时的精度。

2.2 露头剖面信息化数据采集

鄂尔多斯盆地晚三叠世延河剖面从沉积环境方面,更靠近湖区。浅湖及三角洲前缘席状砂沉积更为发育,由浅湖或前三角洲黑色泥页岩、三角洲前缘河口坝、席状砂、远端前缘席状化水下分流河道至近端前缘水下分流河道的反韵律沉积,过渡到三角洲平原分流河道、天然堤与决口扇至洪泛盆地相细粒沉积的正韵律沉积。其中,本次研究区谭家河露头作为曲流河三角洲平原研究的重点区域,共完成13条露头岩性柱状剖面实测,采集储集物性、伽马数据、地球化学数据、探地雷达等露头地质信息数据(图5.6)。

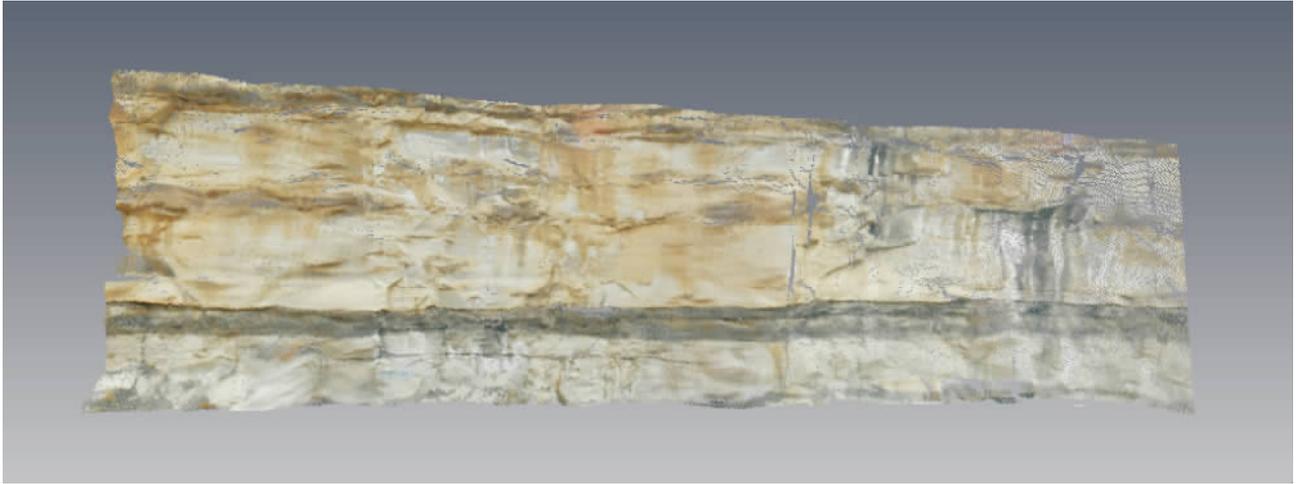


图4 研究区激光雷达扫描数据建模影像

Fig. 4 Modeling image created from laser radar scanning data of the study area

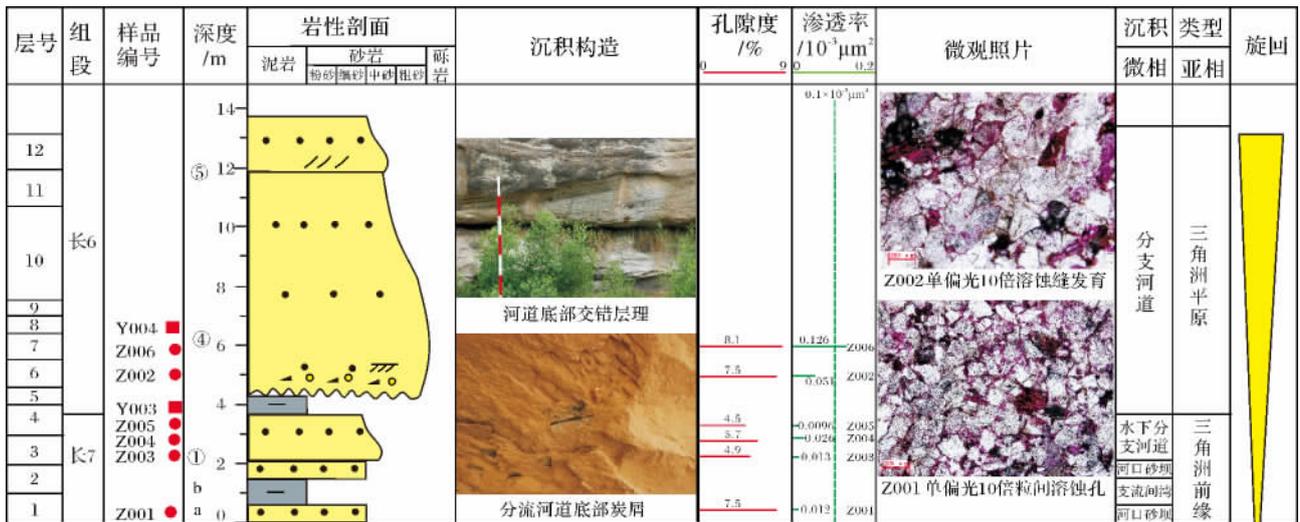


图5 晚三叠世延长组谭家河露头岩性柱状图(实测007号岩性剖面)

Fig. 5 Lithologic histogram of the Tanjiahe outcrop in the Late Triassic Yanchang Formation

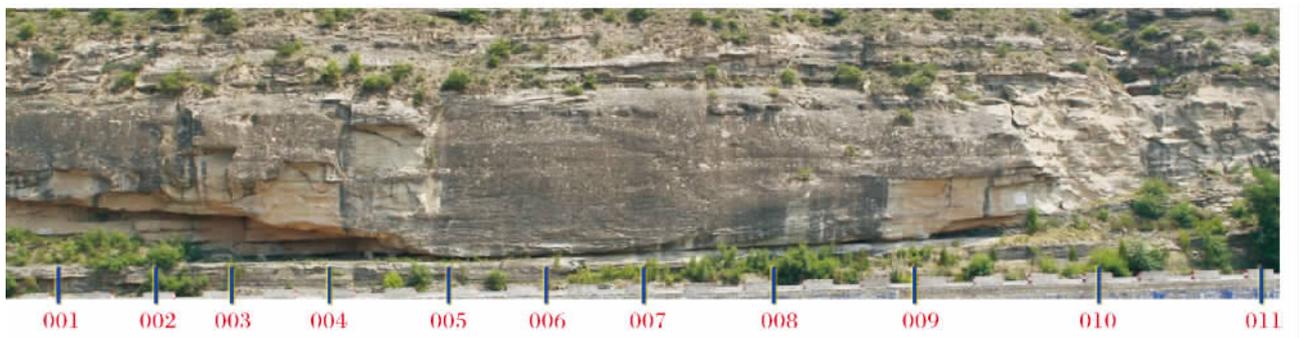


图6 研究区实测岩性剖面位置图(剖面001-011)

Fig. 6 Location of the measured lithologic section in the study area

2.3 激光强度数据提取砂体分布位置
针对包含空间位置的点云数据与影像数据,开展

露头剖面砂体形态刻画之前,利用激光强度数据对研究区砂体形态进行宏观划分,为依据数字露头剖面精

细刻画砂体形态提供依据。

① 激光雷达强度数据概念

三维地面激光扫描仪在获取露头目标点云数据之外,还接受了反映目标相关物理、化学信息的激光强度数据。假设用同一台地面激光雷达设备,在同样的实验环境中,在一次扫描测量中,这些相关的误差或者参量的影响相对恒定。同时假设这些参量引起的噪声都是乘性噪声,根据前面的讨论,进一步假设强度值 I 与激光回波信号功率 P_r 的幅度峰值之间只是简单的过零点的线性关系,并将在每一次扫描中噪声的全部影响用常数 C 来表示,如下式所示:

$$I = C \cdot P_r = C \cdot \frac{P_t D_r^2}{4} \cdot \frac{\rho \cos \alpha}{R^2}$$

$$= C \cdot \frac{\rho \cos \alpha}{R^2} \cdot \left(C = C' \cdot \frac{P_t D_r^2}{4} \right)$$

公式中 I 表示地面激光雷达获取的强度值。显然,在一系列的假设条件之下,激光强度信息跟目标的反射率、激光的入射角以及地面激光雷达与目标的距离有关系。

② 单站激光强度数据的岩性分析

在露头实际测量与高精度 RGB 影像数据分析的基础上,选取鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组谭家河露头三角洲平原分支河道第 6 个扫描站点扫描数据进行岩性分析,相应的激光强度数据和提取的激光强度二分类数据(图 7 8 9)表明,砂体在成份上存在明显的纵向差异,高度约 14m 的河道砂体在垂向上呈现



图 7 研究区单站扫描露头局部 RGB 影像图

Fig. 7 Single-station scanning RGB image of regional outcrop in the study area

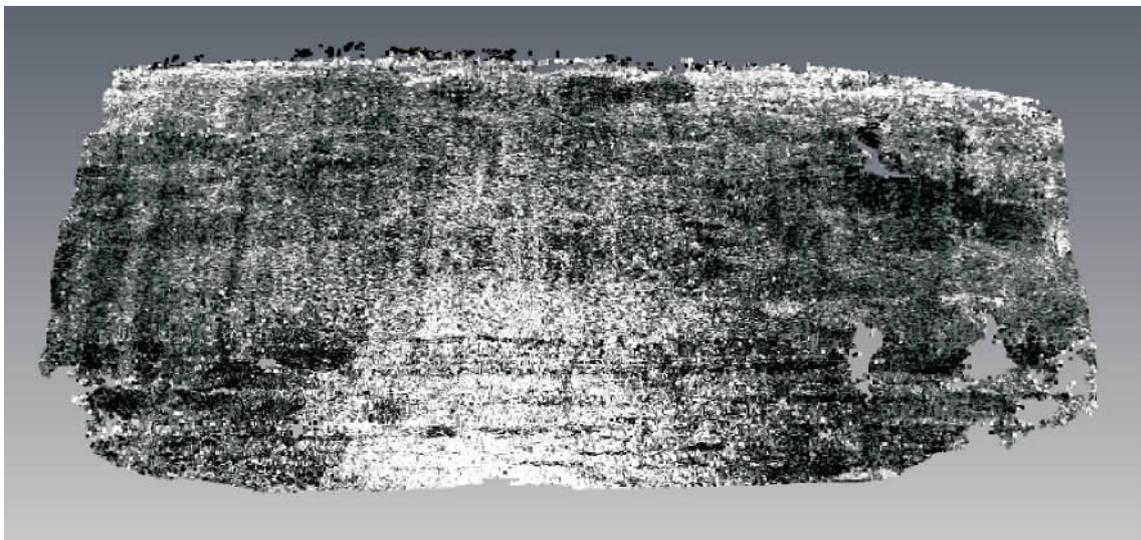


图 8 研究区激光强度数据影像图

Fig. 8 Image created from laser intensity data of the study area

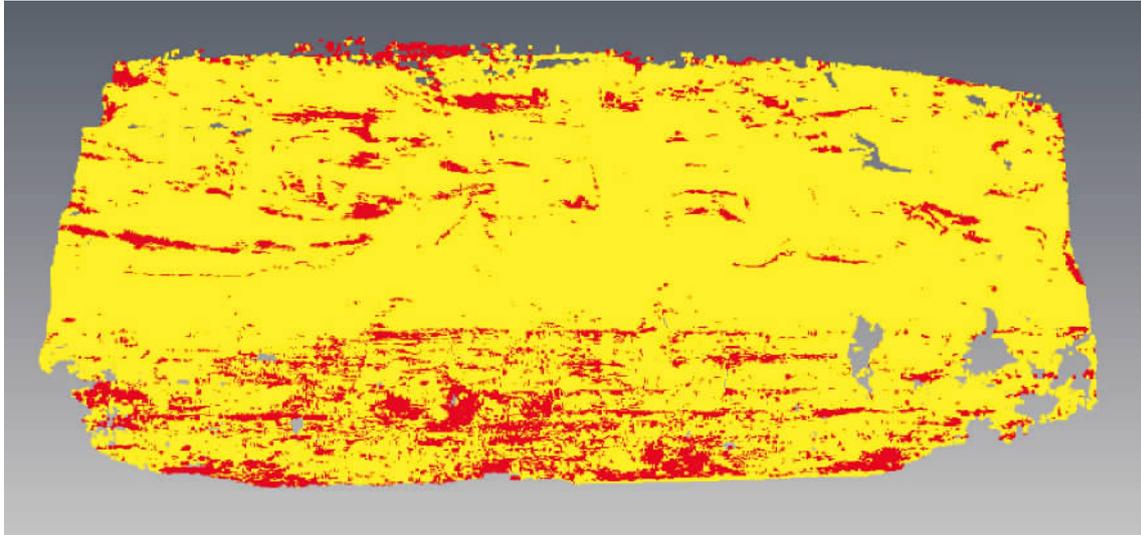


图9 研究区基于激光强度数据2分类影像图

Fig.9 2-classification image of the study area based on laser intensity data

多期叠置关系,可划分为四期河道,每期河道底部砂体粒度较粗,存在2~4 cm河道底部砾岩层,激光强度二分类数据可用作岩性差异划分的依据。

③ 连续实测数据的岩性分析

在单站点激光强度探索实验的基础上,对谭家河露头分支河道实测扫描数据进行研究,将地面激光雷达采集的数据提取岩性分层信息,截取11个露头扫描站点对应的局部数据,对其强度数据进行曲面拟合、强度值校正、检测强度数据中的线状特征、分类强度数据等处理步骤,获取岩性分层结果。

激光强度最终处理数据与岩性实测剖面对比可以看到,激光强度值与分支河道的粒度存在明显的相关性,粒度较粗,反映的激光强度较高。利用此技术对谭家河露头剖面进行处理,初步识别出露头剖面厚层粗砂体,为三角洲平原分支河道空间识别提供依据。

3 数字露头模型初步解译

3.1 刻画露头储集体三维模型砂体形态

① 刻画露头砂体形态

谭家河剖面河道形态明显,为顶平底凸的透镜体(图10),砂体横向延伸192 m,最厚处约14 m。河道与围岩切割关系明显,内部为4期沉积充填,整体表现为复合正韵律。每一期由下部的大型槽状交错层理中—细砂岩相,向上过渡为板状、楔状交错层理粉细砂岩相,层理规模向上减小,顶部灰绿色泥质粉砂岩分布不连续,为上覆砂体切割。槽状交错层理层系厚0.6~1.5 m,以0.8~1.2 m为主,板状(楔状)交错层系厚0.4~0.6 m。河道底部侵蚀下伏灰绿色粉砂质泥页岩,局部发育灰绿色撕裂状泥砾,泥砾大小为2~4 cm×6~8 cm。河道砂岩底面植物茎干印模化石发育,底部砂岩内发育直径4~9 cm的铁质结

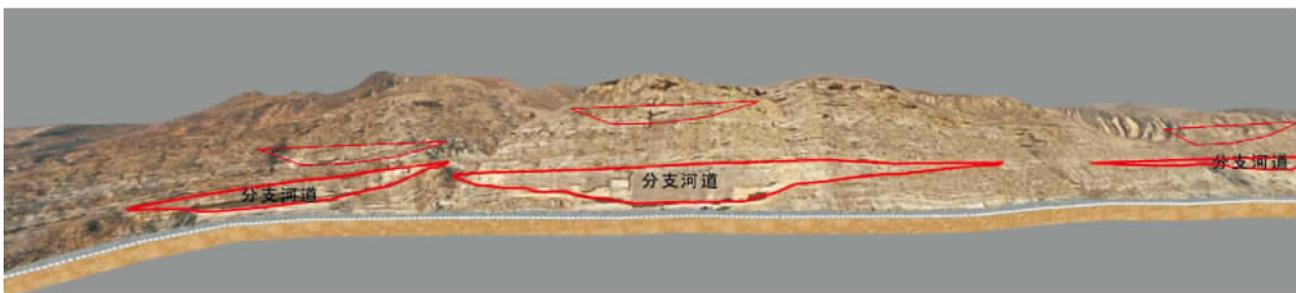


图10 研究区露头三角洲平原分支河道砂体空间分布图

Fig.10 Spatial distribution map of the delta plain distributary channel bodies outcrop in the study area

核,近顶部细砂岩内成层分布的钙质胶结细砂岩透镜体,坚硬突出层面成长透镜状、团块状,大小为 0.4 × 0.8 m ~ 0.3 × 0.6 m。

利用融合的数字露头数据体对露头剖面分支河道进行精确识别与测量表明,曲流河三角洲平原的分支河道砂体呈孤立状,砂体侧向迁移,垂向多期叠加。横向上不同期次砂体宽度分别为 192.4 m、32.54 m、41.83 m 以及 79.97 m,厚度对应为 14 m、4.52 m、3.85 m 以及 5.66 m,宽厚比平均为 12:1 (表 1),与近源沉积辫状河三角洲平原分支河道砂体空间分布规模存在明显差异,辫状河三角洲平原分支河道宽度 60 ~ 110 m、厚度 1.7 ~ 3.4 m,宽厚比 32:1 [23]。

表 1 研究区河道砂体参数统计表

Table 1 Statistical table of channel bodies parameters in the study area

| | 曲流河三角洲平原分支河道 | | | | 辫状河三角洲平原分支河道 ^[23] |
|------|--------------|-------|-------|-------|------------------------------|
| 宽度/m | 192.4 | 32.54 | 41.83 | 79.97 | 60 ~ 110 |
| 厚度/m | 14 | 4.52 | 3.85 | 5.66 | 1.7 ~ 3.4 |
| 宽厚比 | 14:1 | 7:1 | 11:1 | 14:1 | 32:1 |

② 预测地下露头砂体形态

探地雷达技术是通过接受自发射电磁波来反映不同地下介质特征,电磁波反射特征是由地下土壤中电阻抗的变化产生,反映为剖面上强弱振幅。由于不

同地下介质在成份、含水率等特征方面存在差异,导致了其导电系数的差异,最终在电磁波剖面上表现为不同的反射特征。因此,为准确预测该区地下露头砂体形态,在可见露头剖面之上先进行探地雷达实测,获取三角洲平原分支河道砂体反射特征,再对同一地区地下砂体进行探地雷达实测,依据已有该区雷达反射特征,进行地下砂体的识别与刻画,保证预测的准确性^[24-25]。

在山顶实测谭家河地面露头三角洲分支河道探地雷达剖面表明(图 11),砂体发射界面为连续的强反射振幅,砂体呈现较连续同相轴,频率较高,局部振幅强,泥岩表现为振幅较弱,比较均一。根据以上砂体反射特征,在地面对地下砂体进行探地雷达实测表明,曲流河三角洲平原的分支河道砂体呈孤立状,横向迁移频繁(图 12)。

3.2 评价露头储集体储集性能

根据谭家河数字露头剖面明确了三角洲平原分支河道砂体空间特征,选取典型砂体分析表明,三角洲平原分支河道砂体储集物性较差,孔隙度为 5 ~ 8.5%,空气渗透率为 0.01 ~ 0.13 × 10⁻³ μm²。储集物性空间分布特征表现为:河道砂体内每期河道砂体物性下部优于上部,中间优于两翼,单期河道砂体最厚位置处储集性最好(图 13),孔隙度最高可达 8%,渗透率为 0.13 × 10⁻³ μm²。

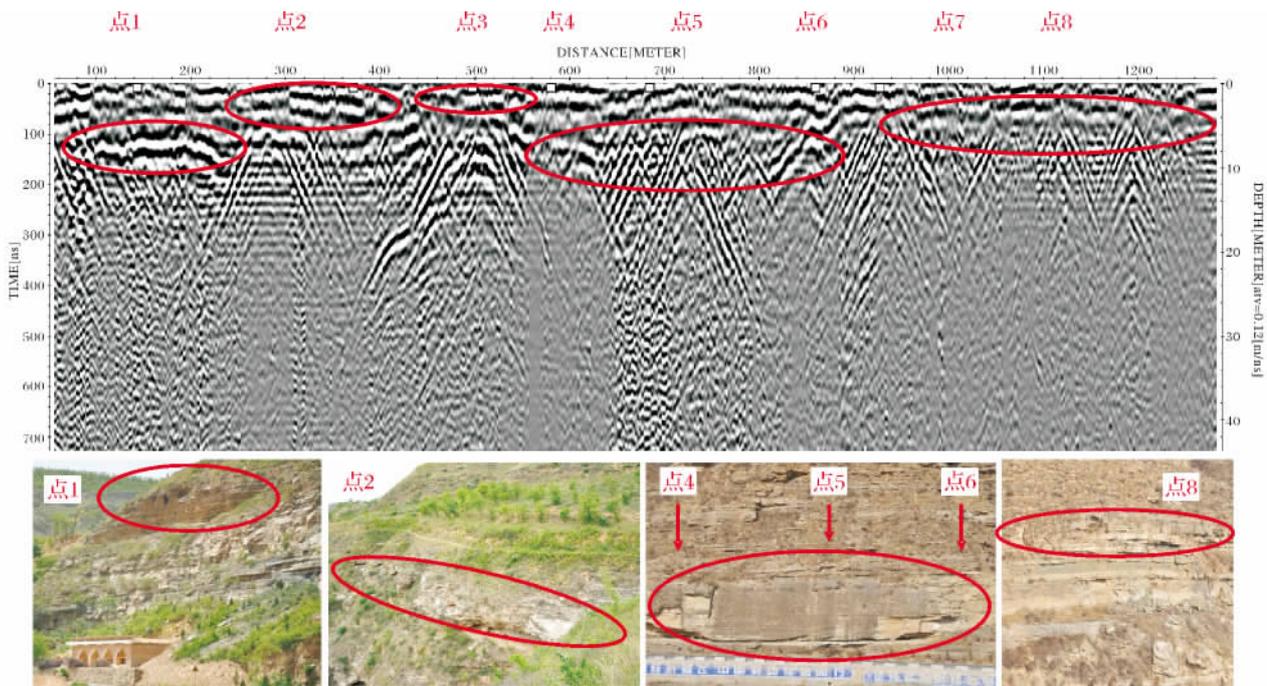


图 11 研究区露头山顶探地雷达剖面及其对应砂体分布图

Fig. 11 Ground penetrating radar profile and corresponding sandbodies distribution map of the mountaintop outcrop in the study area

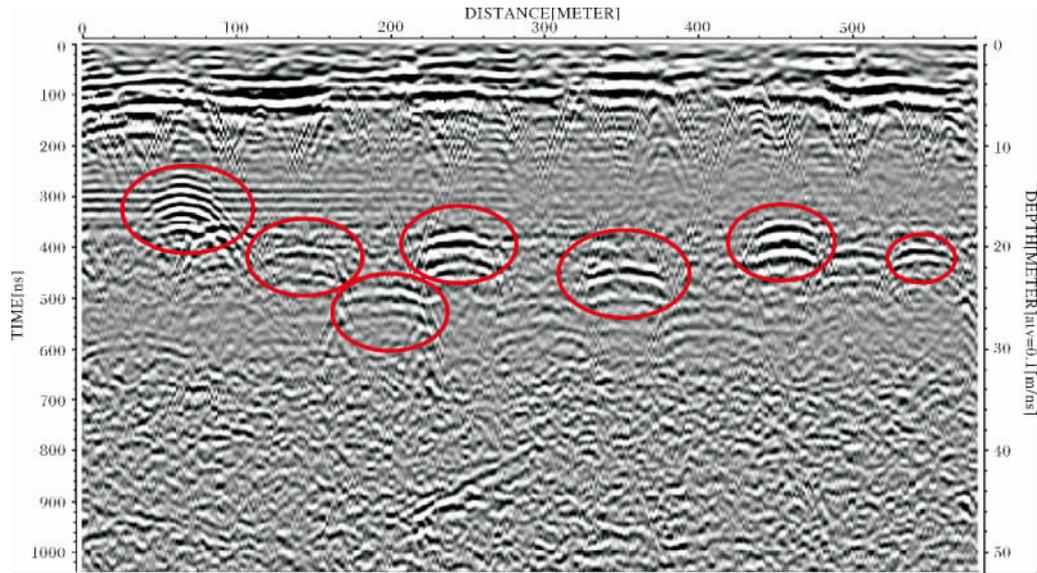


图 12 研究区露头地面探地雷达剖面

Fig. 12 Ground penetrating radar section of the studied area outcrop

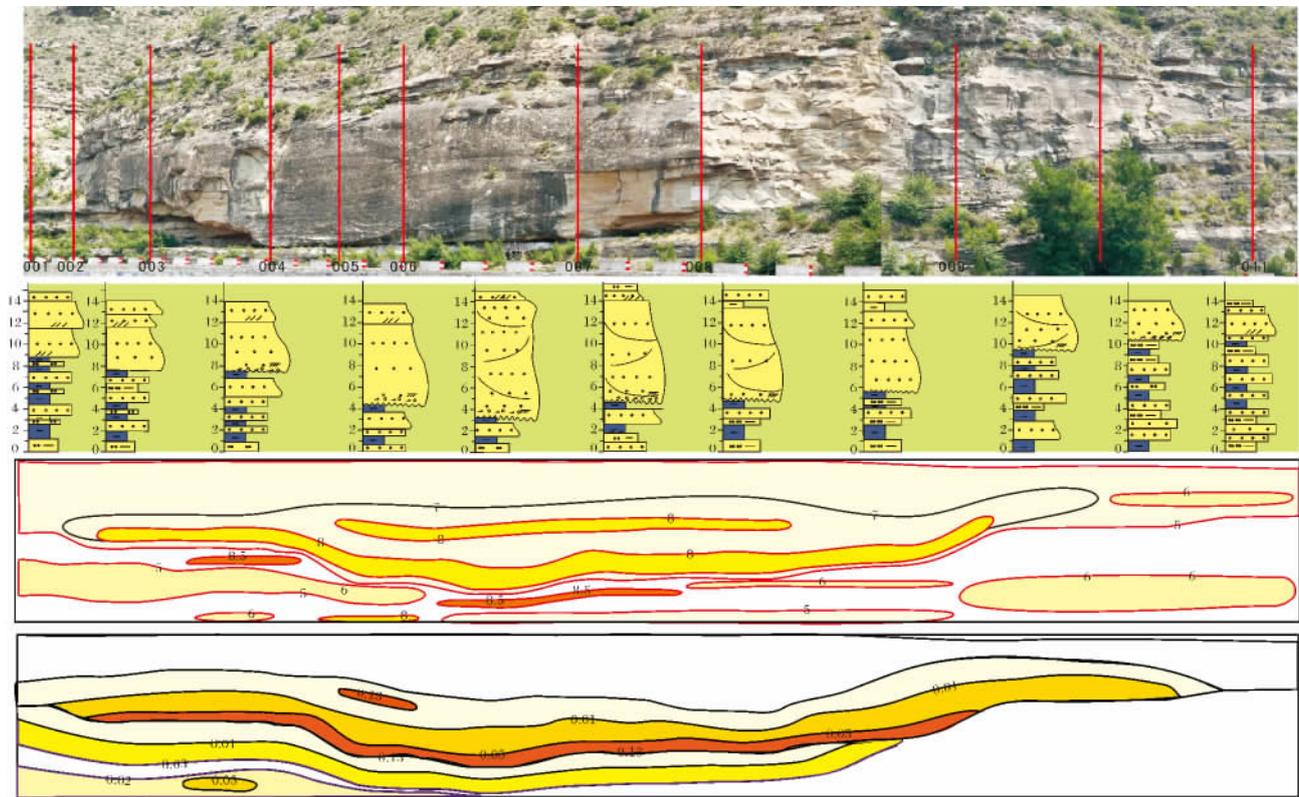


图 13 研究区露头剖面储集物性剖面图

Fig. 13 Reservoir property profile of the outcrop section in the study area

4 结论

(1) 数字露头模型技术可准确刻画露头三维沉

积体形态、结构与沉积充填形态, 测量相关沉积体参数(沉积体厚度、宽度、面积)、露头储集体属性解译、构建三维储层模型。其中 构建露头数据网格模型是

该方法研究的基础 将采集多种类型露头信息融合到露头网格模型是研究的难点 综合解译研究数字露头模型则是研究的重点。

(2) 鄂尔多斯盆地曲流河三角洲平原分支河道砂体研究表明, 河道形态明显, 砂体呈顶平底凸的透镜体, 孤立状分布, 砂体侧向迁移, 垂向多期叠加; 砂体在探地雷达剖面上反射特征表明, 野外露头之下曲流河三角洲平原的分支河道砂体呈孤立状, 横向迁移频繁; 横向上不同期次砂体宽度分别为 192.4 m、32.54 m、41.83 m 以及 79.97 m, 厚度对应为 14 m、4.52 m、3.85 m 以及 5.66 m, 宽厚比平均为 12:1。

(3) 曲流河三角洲平原的分支河道砂体内部可分为 4 期沉积充填, 整体表现为复合正韵律。砂体储集物性解剖认为, 三角洲平原分支河道砂体储集物性较差, 储集物性空间分布特征表现为砂体内每期河道砂体物性下部优于上部, 中间优于两翼, 单期河道砂体最厚位置处储集性最好, 孔隙度最高可达 8%, 渗透率为 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

参考文献 (References)

- 1 焦养泉, 李思田, 杨士恭, 等. 湖泊三角洲前缘砂体内部构成及不均一性露头研究[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1993, 18(4): 441-451 [Jiao Yangquan, Li Sitian, Yang Shigong, et al. An outcrop study on internal architecture and heterogeneity of lacustrine delta-front sandbodies [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1993, 18(4): 441-451]
- 2 于兴河, 王德发, 郑浚茂, 等. 辫状河三角洲砂体特征及砂体展布模型[J]. 石油学报, 1994, 15(1): 26-37 [Yu Xinghe, Wang Defa, Zheng Junmao, et al. 3-D extension models of braided deltaic sandbody in terrestrial facies—an observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 26-37]
- 3 付清平, 李思田. 湖泊三角洲平原砂体的露头构形分析[J]. 岩相古地理, 1994, 14(5): 21-33 [Fu Qingping, Li Sitian. Outcrop analysis of architecture of lacustrine deltaic plain sand bodies [J]. Lithofacies Paleogeography, 1994, 14(5): 21-33]
- 4 刘站立, 焦养泉. 曲流河成因相构成及其空间配置关系—鄂尔多斯盆地中生代露头沉积学地质考察[J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(3): 6-9 [Liu Zhanli, Jiao Yangquan. Composition of facies of meandering river origin and relationship of its spatial configuration—an on-the-spot geologic investigation on sedimentation of Mesozoic outcrop in Eerduosi Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1996, 15(3): 6-9]
- 5 雷卞军, 张昌民, 林克湘, 等. 定量储层沉积学是获取储层建模地质信息的重要途径—以青海省油砂山露头研究为例[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 61-67 [Lei Bianjun, Zhang Changmin, Lin Kexiang, et al. Quantitative reservoir sedimentology as an important way to obtain geologic information for reservoir model establishment: a case study on the outcrop of Youshashan in Qinghai Province [J]. 1998, 20(1): 61-67]
- 6 伍涛, 王建国, 王德发. 辫状河砂体储层沉积学研究—以张家口地区露头砂体为例[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 27-33 [Wu Tao, Wang Jianguo, Wang Defa. Reservoir sedimentology of braided river sandbodies—a case study of the outcrop in Zhangjiakou region [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 27-33]
- 7 贾爱林, 陈亮, 穆龙新, 等. 扇三角洲露头区沉积模拟研究[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 107-110 [Jia Ailin, Chen Liang, Mu Longxin, et al. A study on sedimentary simulation of Fan-delta outcrop [J]. Acta Petroleum Sinica, 2000, 21(6): 107-110]
- 8 田景春, 陈高武, 龚伟坦, 等. 湖泊三角洲前缘砂体成因组合形式和分布规律—以鄂尔多斯盆地姬塬白豹地区三叠系延长组为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 636-640 [Tian Jingchun, Chen Gaowu, Dou Weitan, et al. Origin and association types of lake delta front sandstones and their distribution patterns of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(6): 636-640]
- 9 贾开富, 戴俊生, 刘海磊, 等. 辫状河三角洲储层砂体建筑结构分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(4): 64-69 [Jia Kaifu, Dai Junsheng, Liu Hailei, et al. Architectural element analysis of the braided delta reservoir sandstones [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31(4): 64-69]
- 10 王振奇, 何贞铭, 张昌民, 等. 三角洲前缘露头储层层次分析—以鄂尔多斯盆地东缘潭家河剖面为例[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 32-36 [Wang Zhenqi, He Zhenming, Zhang Changmin, et al. Analysis on reservoir hierarchy of deltaic front outcrops—taking Tanjiahe outcrop in eastern Ordos Basin for example [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(4): 32-36]
- 11 周银邦, 吴胜和, 计秉玉, 等. 曲流河储层构型表征研究进展[J]. 地质科学进展, 2011, 26(7): 695-702 [Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Ji Bingyu, et al. Research progress on the characterization of fluvial reservoir architecture [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 695-702]
- 12 封从军, 鲍志东, 单启铜, 等. 三角洲平原复合分流河道内部单砂体划分—以扶余油田中区南部泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 77-83 [Feng Congjun, Bao Zhidong, Shan Qitong, et al. Single sand body identification in compound distributary channel of delta plain: a case study from the fourth member of Quantou Formation in the southern part of central Fuyu oil field [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 77-83]
- 13 李元觉, 李跃刚, 卢涛. 三角洲平原网状河砂体的地质概念模型及修正[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 69-73 [Li Yuanjue, Li Yuegang, Lu Tao. The geological concept model of braided channel sand body in delta plain and its modification [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 69-73]
- 14 刘自亮. 三角洲前缘储集砂体的成因组合与分布规律—以松辽盆地大老爷府地区白垩系泉头组四段为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 32-40 [Liu Ziliang. Delta-Front sandbody genetic assemblages

- and their distribution patterns of the 4th member of Quantou Formation in Dalaoyefu oilfield, southern Songliao Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 32-40
- 15 赵宝峰,王家豪,徐东浩,等. 松辽盆地新立—新北地区嫩江组三段浅水三角洲水下分流河道砂体半定量解剖[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 511-521 [Zhao Baofeng, Wang Jiahao, Xu Donghao, *et al.* Semi-quantitative research on subaqueous distributary channel sandbodies of the 3th member of Nenjiang Formation in Xinli-Xinbei area, Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 511-521]
- 16 Richard R. Jones, Jonny Imber, Ken McCaffrey. Linking Seismic and Sub-Seismic Fault Predictions using Laser Scanning of Outcrop Analogues [C]. In American Association of Petroleum Geologists Annual Convention and Exhibition, 2007
- 17 Jerome Bellian. Laser intensity mapping of outcrop geology [J]. *Journal of Oil Information Technology* 2003
- 18 J. A. Bellian, C. Kerans, D. C. Jennette. Digital Outcrop Models: Applications of Terrestrial Scanning Lidar Technology in Stratigraphic Modeling [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 166-176
- 19 S. Buckley, J. Howell, H. Enge, *et al.* Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations [J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165(3): 625-638
- 20 Buckley S J, Schwarz E, Terlaky V, *et al.* Terrestrial laser scanning combined with photogrammetry for digital outcrop modelling [J]. *IA-PRS*, 2009, Vol. XXXVIII, Part 3/W8
- 21 Bellian J A, Kerans C, Jennette D C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 166-176
- 22 H. D. Enge, S. J. Buckley, A. Rotevatn, *et al.* Howell. From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures [J]. *Geosphere*, 2007, 3: 469-490
- 23 金振奎, 时晓章, 何苗. 单河道砂体的识别方法 [J]. *新疆石油地质* 2010, 31(6): 572-575 [Jin Zhenkui, Shi Xiaozhang, He Miao. Identification methods for Single-channel sand body [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 572-575]
- 24 白旻, 王乃昂, 何瑞霞, 等. 巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 842-847 [Bai yan, Wang Naiang, He Ruixia, *et al.* Ground penetrating radar images and optically stimulated luminescence dating for lacustrine deposition of the Badain Jaran Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(4): 842-847]
- 25 闪迪. 探地雷达与面波勘探技术在考古调查中的综合应用 [J]. *工程地球物理学报*, 2011, 8(3): 339-343 [Shan Di. Application of ground penetrating radar and surface wave exploration technology to archaeological survey [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2011, 8(3): 339-343]

A New Approach for Outcrop Characterization and Geostatistical Analysis of Meandering Channels Sandbodies within a Delta Plain Setting using Digital Outcrop Models: Upper Triassic Yanchang tight sandstone Formation, Yanhe outcrop, Ordos Basin

ZHU Ru-kai¹ BAI Bin¹ YUAN Xuan-jun¹ LUO Zhong¹
WANG Pei² GAO Zhi-yong¹ SU Ling¹ LI Ting-ting¹

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083;
2. Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Digital outcrop modelling is a method of imaging outcrop as a series of polygons viewable with 3D visualization technology, on to which digital geological information (e.g., outcrop sections) may be stacked. The technique achieves a digital outcrop model (DOM) from which comprehensive measurements and interpretation may be undertaken. A DOM is able to incorporate 3D data from ground-based laser scanner, remote-sensing imagery, high precision grayscale photographs, ground-penetrating radar and other all geo-digital sources. The use of DOM in combination with traditional sedimentological field data helped improve the accuracy and efficiency of meandering delta plain sand body characterisation and consequently also improved the qualitative and quantitative assessment of data for the purpose of reservoir modelling.

We used the DOM to measure and precisely describe the distribution characteristics of channel sands of the Quliu delta plain in the Ordos Basin. In order to provide the basis for a comparative reservoir model, the 3D distribution model can be quality controlled through the measurement of the characteristics of channel sand reservoir in varied sites

and predicting the morphological characteristics of ground sand in the outcrop area by ground-penetrating radar. The DOM shows: (1) Tanjiahe section channel forms; these sandstone bodies form elongate lenses with a flat upper surface, a width of 192 m and a maximum thickness of about 14 m of the most biggest channel body sand. The boundary between channel and surrounding rocks is clear. Four stages of deposition are identified within the sandstone bodies indicating a complex positive rhythm. (2) Branch channels to the meandering river are isolated on the delta plain. These sandstone bodies show lateral migration and vertical stacking which is accurately described in the 3D DOM. The horizontal width of the multi-period superimposed channels of the sandstone bodies are 192.4 m, 32.54 m, 41.83 m and 79.97 m, thickness are 14 m, 4.52 m, 3.85 m and 5.66 m giving a width to thickness ratio of 12:1. (3) Through analysis of typical reservoir performance of the sand bodies encountered, reservoir properties can be assigned to different parts of the DOM. The delta plain branch channel sandstones are classified as poor quality. In the main channel sands the highest quality reservoir would be found in the lower part of the channel which then decreases upward. The lowest quality reservoir is found in the two channel wings. Reservoir quality is best at the thickest part of the sandstone body in every period channel where it achieves a porosity of 8% and a permeability of 0.13 mD. Building of a DOM integrated with geo-data is an effective method to quantitatively analyse outcrop analogues including the 3D spatial characteristics of potential reservoir elements which can be acquired accurately. The DOM can also provide the basis of comparative studies on reservoirs in the exploitation of oil and gas.

Key words: digital outcrop models; reservoir morphology; delta plain