

引用格式:杨光,高祥成,李永忠,等.岩心数字化技术研究与应用[J].油气地质与采收率,2024,31(4):217-226.

YANG Guang, GAO Xiangcheng, LI Yongzhong, et al. Research and application of digital core technologies[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 217-226.

岩心数字化技术研究与应用

杨光,高祥成,李永忠,李秀国,郭昭江,赵杰杰,王辉,郑胜利,董福奇

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:岩心是油气田勘探开发的核心战略资源之一,在油气藏岩相、储层物性、含油性的研究中发挥着重要作用。与纸质资料相比,岩心实物地质资料具有缩减性和可变性的特点,岩心“原貌”不可能长久保存,从而降低了岩心的使用价值。岩心数字化技术可以及时采集岩心各项原始数据,丰富岩心地质信息,提升岩心资料利用率,因此开展岩心数字化技术研究具有重要意义。根据胜利油田岩心数字化建设的生产实践,对岩心数字化的概念、设备和技术内容进行了阐述,分析了岩心伽马能谱测量、XRF元素测试、磁化率测试、CT扫描等多种重要的岩心数字化技术,并探讨了各项技术的地质应用效果。研究结果表明,岩心数字化技术具有测试快、连续性好、数据多、精度高等优势,可以精细反映沉积物的变化特征,能为泥页岩、碳酸盐岩和砂砾岩等地层的沉积成因、储层描述及评价、物质组成等问题的研究提供重要的地质依据,具有较为广阔的应用前景。岩心数字化资料是基于岩心直接获得的岩心尺度的连续性资料,从资料性质上来看介于原始资料和成果资料之间,更侧重于岩心的“原始性”,是第一手的地质资料。岩心数字化资料具有独特而重要的应用价值,是提高岩心应用水平的重要技术手段。

关键词:岩心数字化;伽马能谱测量;XRF元素测试;岩心CT扫描;泥页岩;砂砾岩

文章编号:1009-9603(2024)04-0217-10

DOI:10.13673/j.pgre.202405045

中图分类号:TE19

文献标识码:A

Research and application of digital core technologies

YANG Guang, GAO Xiangcheng, LI Yongzhong, LI Xiuguo, GUO Zhaojiang,

ZHAO Jiejie, WANG Hui, ZHENG Shengli, DONG Fuqi

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,

SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The core is one of the core strategic resources in the exploration and development of oil and gas fields and plays an important role in the research on facies of oil and gas reservoirs, physical properties of reservoirs, and oil content. Compared with the paper data, the physical geological data of the core has the characteristics of reduction and variability, and the original appearance of the core cannot be preserved for a long time, thus reducing the utilization value of the core. Digital core technologies can collect the original data of the core in time, enrich the geological information of the core, and improve the utilization rate of core data, so it is of great significance to research digital core technologies. According to the production practice of core digitization construction in Shengli Oilfield, the concept, equipment, and technical content of core digitization were described, and many important digital core technologies such as core gamma spectrometry measurement, XRF element testing, magnetic susceptibility testing, and CT scanning were analyzed. The geological application effects of each technology were discussed. The research results show that digital core technologies have the advantages of fast testing, good continuity, large data, and high precision. They can accurately reflect the characteristics of sediment changes and provide an important geological basis for the research on sedimentary genesis, reservoir description and evaluation, material composition, and other issues of shales, carbonate, and glutenite, with a broad application prospect. Digital core data is the continuous data of core scale obtained directly from the core, which is between the original data and the result data in terms of the nature of the data, and it focuses more on the originality of the core, which is the first-hand geo-

收稿日期:2024-05-13。

作者简介:杨光(1973—),男,山东金乡人,高级工程师,从事岩心综合研究工作。E-mail:yxxyangguang@126.com。

logical data. Digital core data has unique and important application value and is an important technical means to improve the application level of the core.

Key words: core digitization; gamma spectrum measurement; XRF element testing; core CT scanning; shale; sand conglomerate

岩心是油田利用取心工艺从地下岩层中取出的圆柱状地层标本,岩心及其分析资料在油气田的勘探开发中发挥着重要作用。与纸质资料相比,岩心、岩屑等实物地质资料具有以下特点:①缩减性。采样是实物资料的主要利用方式之一,因此随着采样的累加,岩心等资料会出现缩减现象,岩心连续性遭到破坏。②可变性。岩心等实物在常温常压下存在风化、变质现象,随着时间的推移,岩心的颜色、物质组成、结构会与初始状态有较大差别。上述特点表明,保护岩心原始状态非常重要,保持岩心“原貌”,就最大程度地保留了岩心的价值。利用岩心数字化技术可以及早地尽可能完整地采集岩心的原始信息,从而达到我们保留岩心价值、利用多种资料进行综合研究的需要。为此,笔者根据胜利油田岩心数字化的工作实践,梳理了近年来主要开展的岩心数字化技术,并探讨这些技术的地质应用,以期为研究人员更好地利用岩心资料提供帮助。

1 岩心数字化技术

岩心数字化是指利用实验设备对岩心进行连续测试,获得岩心的影像、成分、放射性、磁性、电性等资料的过程。广义上讲,岩心数字化资料包括通过实验、测试手段从岩心中获得的所有图像及分析数据,如扫描图像、数字岩心模型和其他实验室分析资料等。从狭义上讲,岩心数字化的概念更应注重2个方面:一是测试的对象是柱状的或块状的岩心,代表了井筒岩心的尺度;二是连续测量,其数据是表征整个岩心剖面的。因此,本文将连续、具有无损性质、岩心尺度、数值化的资料统称为岩心数字化资料,其相关的测试设备和技术称为岩心数字化技术。目前在油气领域常用的岩心数字化技术包括岩心图像采集、伽马能谱测量、XRF元素测试、磁化率测试、CT扫描和高光谱扫描等技术。岩心图像采集是较早开展的一项数字化工作,目前已在中国油气行业得到普及。通过采集高分辨率的岩心图像,可以非常直观地对地层和油气进行观察描述。近年来随着图像分辨率的提高,基于岩心的图像分析技术受到关注,通过图像分析将裂缝、纹层、荧光等研究目标提取出来,经计算统计可以获得地

层岩相、含油性等方面的信息;伽马能谱测量技术可以测量岩心中的伽马、无铀伽马、铀、钍、钾含量及体积密度等参数,用来分析沉积环境,评价生油岩,计算岩心中的泥质含量等^[1-3]。XRF元素测试技术可以测量岩心中铝、硅、铁等几十种常见元素的含量及变化,分析沉积物形成的环境和气候特征。磁化率测试技术可以反映沉积物中不同磁性矿物的组成和含量,用于判别物源,进行地层对比,研究水体沉积环境等^[4-5]。CT扫描技术在岩心空间结构展示和研究方面具有重要的价值,使岩心形成真实的“数字岩心”资料,将在驱替实验、数值模拟和地质建模中发挥更大的作用。近年来,高光谱扫描技术逐步应用于岩心的研究,通过高光谱传感器采集岩心的高光谱图像,开展高光谱编录,是岩心研究的新技术与新方向^[6]。下面仅就几项常用的岩心数字化技术进行阐述。

1.1 伽马能谱测量技术

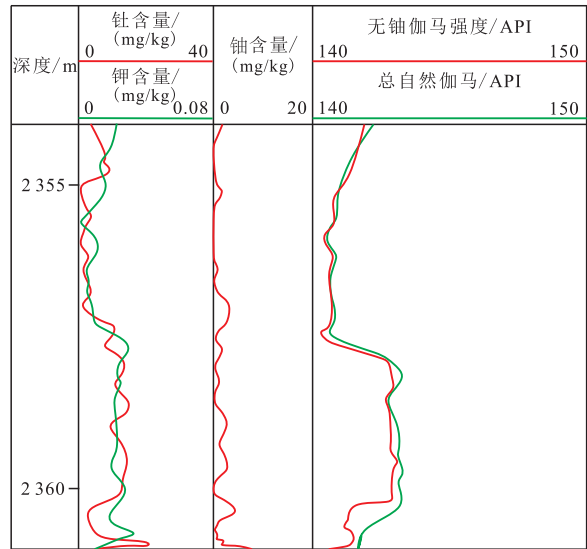
地层中的岩石具有自然放射性,放射强度取决于岩石所含放射性核素的种类(铀、钍、钾)和数量,利用地面伽马能谱测量仪可以测量岩心中伽马射线的强度及铀、钍、钾的含量,得到总自然伽马、无铀伽马强度以及铀、钍、钾放射性核素含量的5条曲线。不同岩石具有不同强度的放射性,一般火成岩所含放射性元素多、放射性强,其次是变质岩,最弱为沉积岩。在沉积岩中,由于泥岩的吸附作用,放射性元素较多,特别是深湖相泥岩,放射性强度最大;泥质类砂岩、泥灰岩放射性强度中等,砂岩、灰岩、煤、沥青等放射性强度最低。地层中的放射性元素来源于硅酸火成岩,以3种方式分布:①以矿物颗粒存在,如长石、云母等。②泥质、有机质颗粒吸附,为沉积地层含放射性元素的主要原因。③孔隙流体流动引起放射性元素迁移,如铀元素。与自然伽马相比,由于能探测出地层中铀、钍、钾放射性核素的含量,所以伽马能谱测量技术可以解决更多的勘探和开发中的地质问题。图1为美国岩心公司的伽马能谱测量仪和从砂泥岩地层中获得的5条伽马能谱测量曲线。伽马能谱测量技术广泛应用于岩性识别、地层对比、岩心和样品的测井深度归位、裂缝识别等方面。

1.2 XRF元素及磁化率测试技术

XRF元素测试是比较成熟的无损探测技术之



a.岩心地面伽马能谱测量仪



b.伽马能谱测量曲线

图1 岩心地面伽马能谱测量仪和伽马能谱测量曲线
Fig.1 Core ground gamma spectrometer and gamma spectrum measurement curve

一,其工作原理为X射线光子激发岩石矿物中的电子,每一种元素释放出特征X射线能量,通过测量特征辐射对元素的含量进行量化分析。以 Geotek 高精度岩心 XRF 元素分析仪及测试结果为例(图2,

图3),其可以测出钠到铀之间的80种元素,铝、钡、钙、铬、铜、铁、钾、镁、锰、镍、磷、铅、硅、硫、锶、钛、钒、锌、锆、砷、钼、铀等22种常用元素为绝对值含量。利用元素、元素比值及其变化可以分析沉积环境、进行地层划分等。磁化率是指物质在磁场中被磁化的程度,是反映样品中铁磁性矿物含量的指标。一般沉积岩的磁化率最低,火成岩磁化率最高,变质岩介于二者之间。磁化率主要受矿物和 水体含氧量的影响,铁磁性矿物含量高,磁化率高;水体含氧量高,活化铁稳定,磁化率高,反之活化铁不稳定,向黄铁矿转化,磁化率低。此外岩石磁化率还受到成岩、生物、粒度、时间、气候等影响,例如成岩作用加强时,会产生许多新的顺磁性矿物,如鲕绿泥石、菱铁矿向黄铁矿转化等,这会引起磁化率增高。磁化率具有良好的旋回性,在泥页岩地层中,磁化率高,表明水体含氧量增大,钾含量高,钙含量偏低,岩性多为块状-层状泥页岩,以泥岩、油泥岩为主。磁化率变低,钙含量升高,表明水体闭塞,以纹层-层状油页岩、油泥岩为主,可见利用磁化率可以解释不同泥页岩岩相的成因。

1.3 CT扫描技术

CT扫描技术是利用锥形X射线穿透物体,通过不同倍数的物镜放大图像,由360°旋转所得到的大量X射线衰减图像重构出三维立体模型,能够真实地反映岩心内部的孔隙结构(图4,图5)。CT扫描的分辨率与岩心直径关系密切,岩心直径越小,CT扫描分辨率越高,目前岩心直径为120 mm的CT扫描分辨率可达到70 μm,直径为2.5 mm的CT扫描分辨率约为14 μm,直径为3 mm的CT扫描分辨率可以达到1 μm,因此针对不同尺度的研究对象需选择

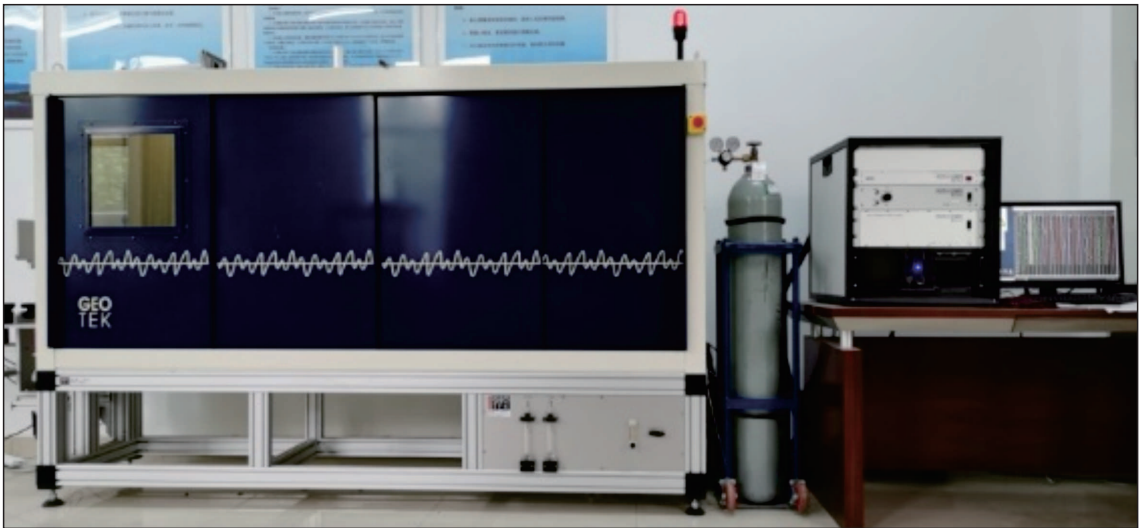


图2 Geotek 高精度岩心 XRF 元素分析仪
Fig.2 Geotek high-precision XRF element analyzer of core

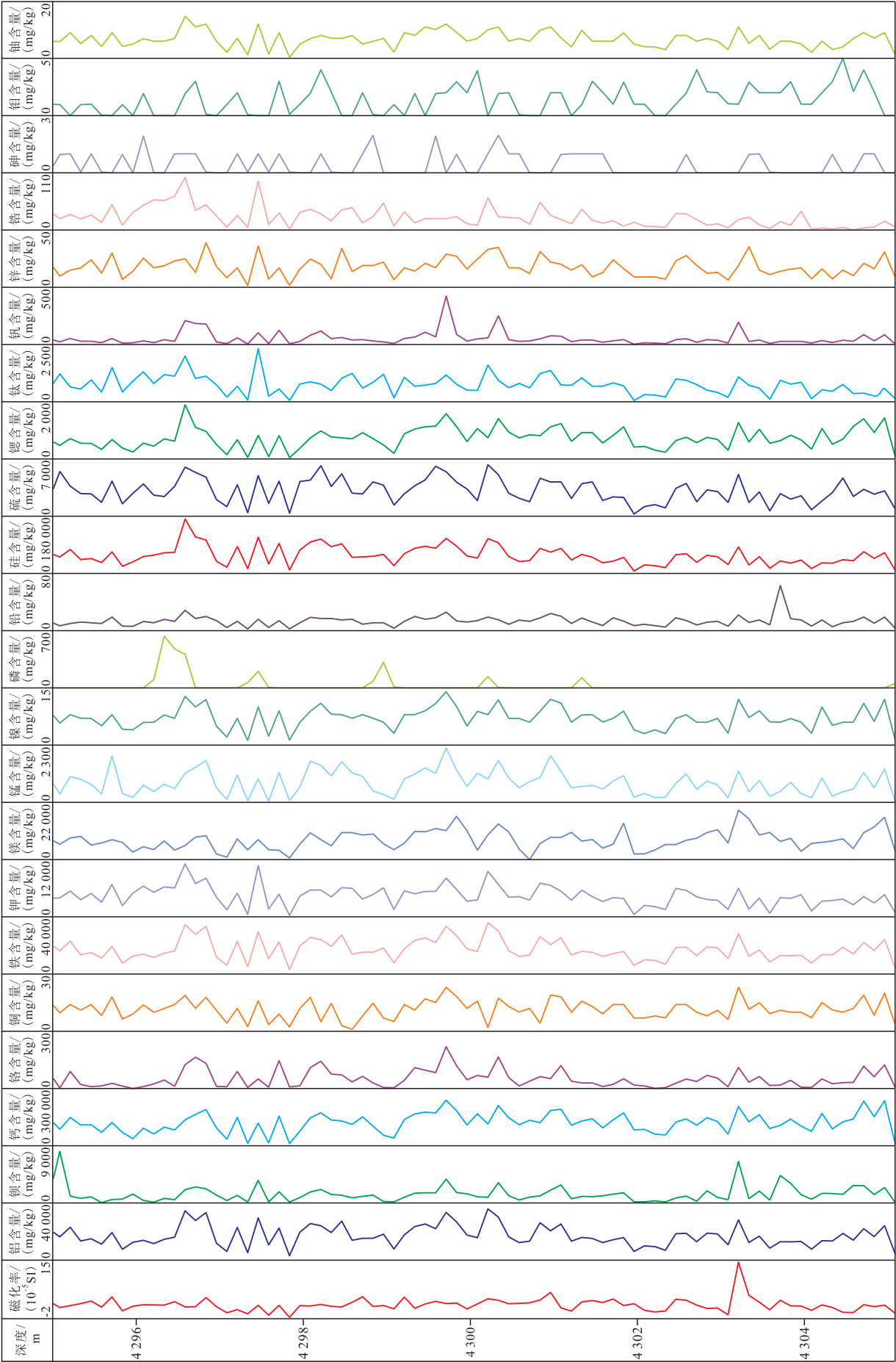


图 3 元素、磁化率测试结果
Fig.3 Element and magnetic susceptibility test results



图4 微米级岩心CT扫描设备
Fig.4 Micrometer core CT scanning equipment

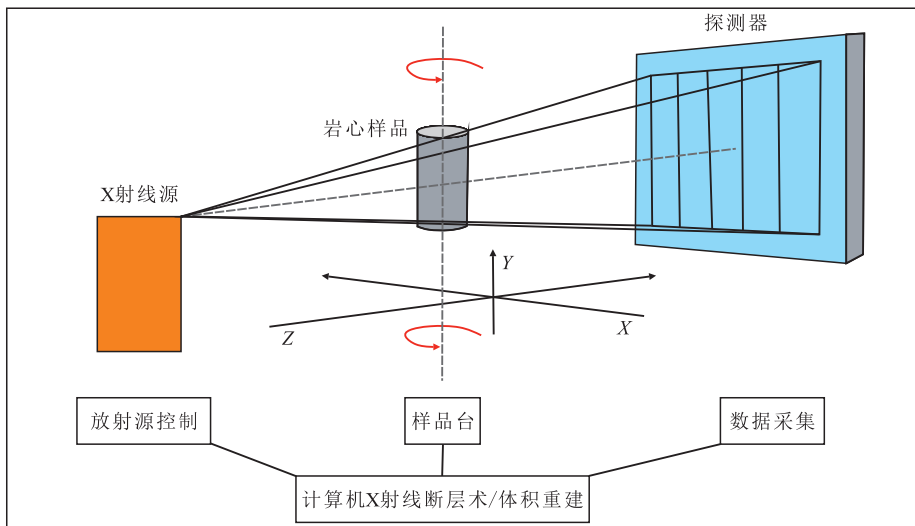


图5 微米级岩心CT扫描原理示意
Fig.5 Micrometer core CT scanning principle

不同大小的岩心样品。由于CT扫描图像的灰度值反映岩石内部物质的相对密度,因此CT扫描图像中明亮部分认为是高密度物质,而深黑部分则认为是孔隙结构。通过CT扫描分析,可以将岩心中的孔隙和裂缝提取出来,继而利用三维重建和建模技术分析岩心内部三维储集空间的分布,评价储层的连通性。

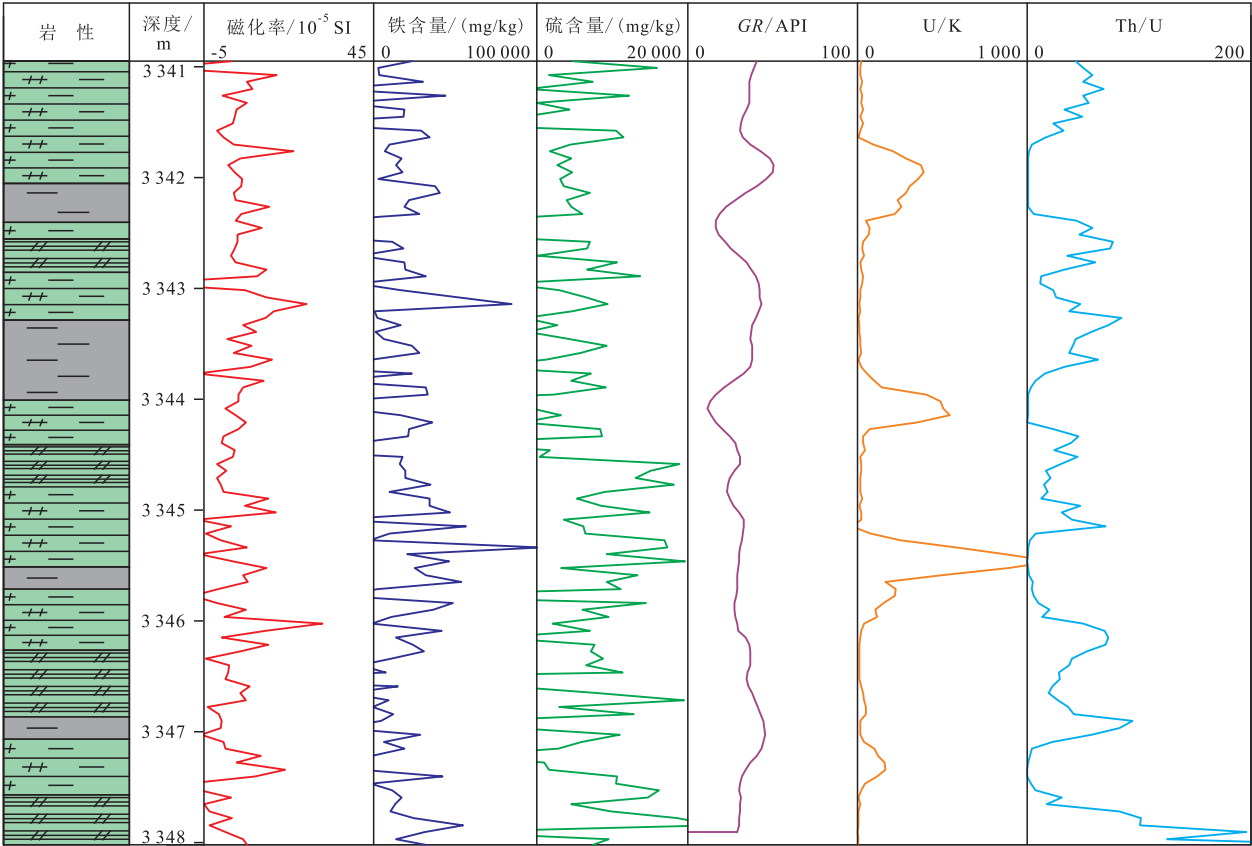
2 岩心数字化资料的应用

2.1 在泥页岩沉积环境研究中的应用

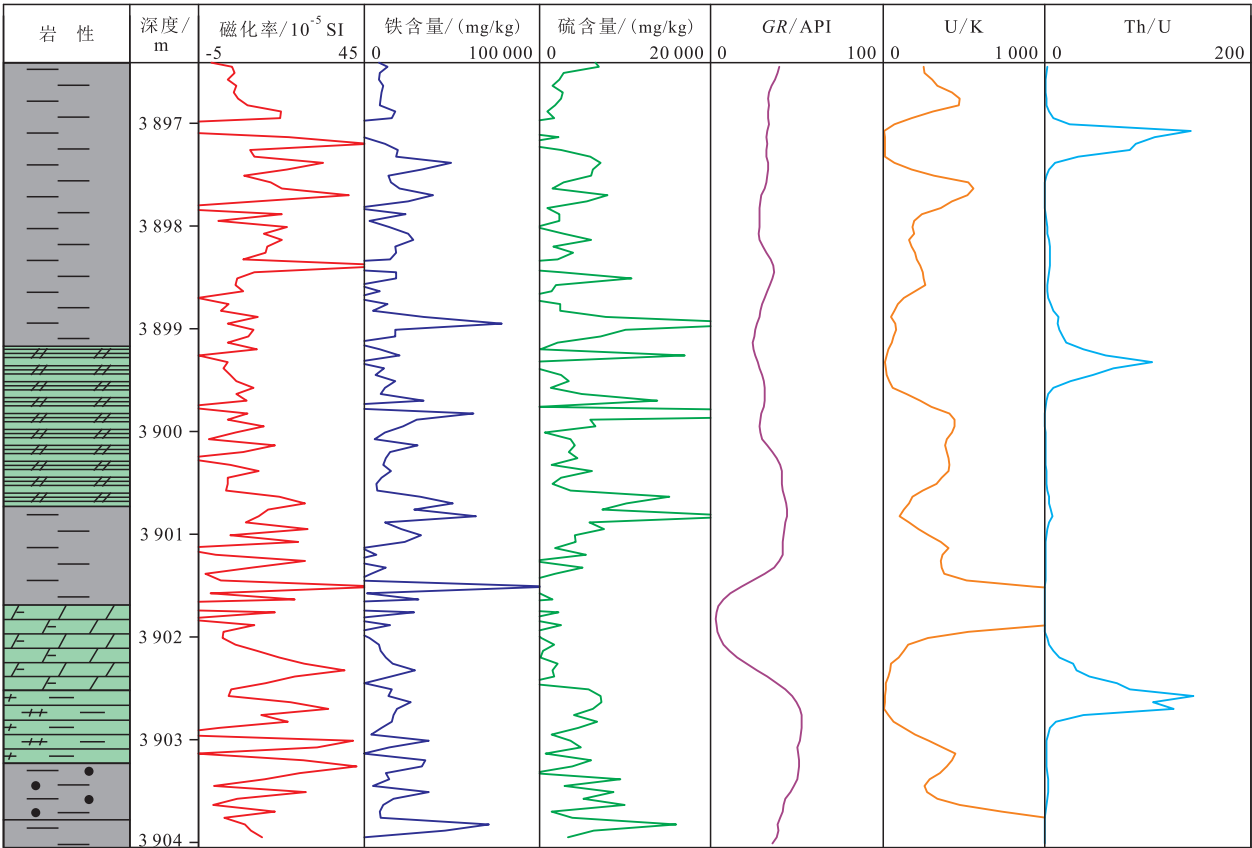
济阳断陷湖盆泥页岩岩相从构造位置上可分为缓坡、洼陷和陡坡3种岩相带,分别对应缓坡断块区、洼陷稳定区和陡坡深陷区。泥页岩普遍发育纹层,并富含有机质和碳酸盐岩^[7-8]。陡坡带泥页岩靠近边界断层,含钙较少,层、块状结构较多;缓坡带泥页岩距离边界断层较远,含钙较多,以纹层状结

构为主;洼陷带泥页岩以纹层状结构为主,泥岩颗粒细,多由有机质和黏土纹层构成。

图6为济阳坳陷沙三段下亚段部分泥页岩地层剖面及岩心数字化成果,包括岩性剖面、磁化率、元素、伽马能谱等数据。数据统计结果显示,陡坡带泥页岩的磁化率平均值为 10.21×10^{-5} SI,洼陷带泥页岩的磁化率平均值为 5.73×10^{-5} SI,陡坡带明显高于洼陷带,反映出陡坡带沉积物靠近物源、洼陷带远离物源的特点。陡坡带泥页岩的铁含量平均值为1.403 7%,硫含量平均值为0.334 3%;洼陷带铁含量平均值为1.931 6%,硫元素含量平均值为0.738 5%,说明洼陷带的沉积环境闭塞,水体含氧量低,铁元素多以二价铁离子分布,而陡坡带泥页岩靠近物源,沉积环境相对开放,水体含氧量较高,表现为较高的磁化率特征。从图6中铀钾比(U/K)、钍铀比(Th/U)和自然伽马(GR)值可以看出,陡坡带泥页岩



a. 洼陷带泥页岩



b. 陡坡带泥页岩

图6 济阳坳陷沙三段下亚段部分泥页岩数字化成果

Fig.6 Digital results of shale of Lower Submember of 3rd Member of Eocene Shahejie Formation in Jiyang Depression

的有机质含量高于洼陷带,而沉积旋回性较差。这是由于陡坡带泥页岩的埋藏深,坡度较陡,沉积速率较快,有利于有机质的快速保存。洼陷带坡度平缓,沉积速率慢,沉积物以纹层状结构为主,有机质保存条件相对较差。上述认识在本地区的全岩矿物和有机碳含量分析中得到了验证,实验表明陡坡带泥页岩的黄铁矿含量为2%~3%,有机碳含量约为4%;洼陷带泥页岩的黄铁矿含量为2.4%~4%,有机碳含量约为3%。

2.2 在缝洞型碳酸盐岩储层描述中的应用

缝洞型碳酸盐岩储层属于双重介质,储集空间类型多样,大小不一,不仅包含晶间孔隙、粒间孔隙,还包括裂缝和溶洞^[9-12]。研究表明,碳酸盐岩晶洞和溶洞的直径一般超过2 000 μm ,裂缝的宽度多为100~5 000 μm ,储集空间的尺寸较大,如果我们

选取的样品过小,就得不到正确的分析结果。利用全直径岩心(岩心直径为65~140 mm)CT扫描技术可以将岩心中较大的缝洞目标识别出来进行分析^[13-14],图7为以孔隙为例利用CT扫描序列图(图7a)进行三维储集空间分析的过程。首先通过阈值分割找出一个灰度值对孔隙和基质进行区分,然后提取孔隙后对图像进行二值化处理(图7b),最终对孔隙目标进行三维重建(图7c)、分割和分析(图7d)。通过图7d的分析可以得到体孔隙率、孔隙直径、形状因子、欧拉数、连通概率等储层参数。通过孔隙网络建模分析(图7e),可以进一步得到孔喉大小、孔喉比、配位数、渗透率等储层结构参数^[15-24]。裂缝的分析流程与孔隙类似,由于裂缝经常会和孔隙连在一起,并常出现断开的现象,因此一条完整裂缝的提取要复杂得多。

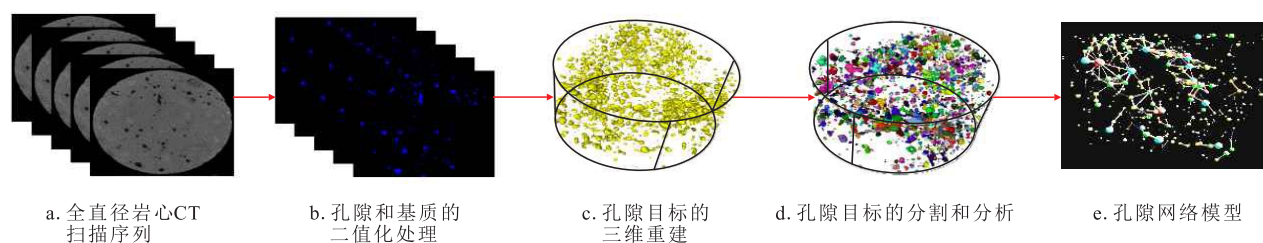


图7 三维储集空间分析过程示意

Fig.7 3D reservoir space analysis

利用CT扫描技术对胜利油田桩海地区下古生界冶里组灰质白云岩的储集空间进行分析,该灰质白云岩岩心的直径为120 mm。数字岩心分析(图8)显示,岩心中孔隙体积占比为4.18%,平均孔隙直径为608 μm ,平均孔隙形状因子为0.75。从欧拉数的变化可以看出,孔隙之间的连通性差,小孔隙较多。两点簇函数也表明孔隙的连通性较差,仅在垂向上有一定的连通。岩心发育高角度裂缝,倾角为80.74°,裂缝宽度为300 μm ,裂缝配孔率为1.79%~2.07%。测井解释该岩心对应层段地层孔隙度为4.81%,渗透率为0.25 mD,为含油斑储层,两者对比可见CT扫描数字岩心的分析数据不仅具有一定的可靠性,而且能够获得更加精细的评价参数,适用于碳酸盐岩储层储集性能的描述和对比。

2.3 在砂砾岩砾石成分分析中的应用

在济阳断陷湖盆陡坡带发育大量的砂砾岩体,这些粗碎屑沉积物来源于邻近凸起的母岩物质,其中砾石成分主要由片麻岩、火成岩、碳酸盐岩和泥岩组成^[25-26]。不同成分的砾石具有不同的自然伽马能谱和磁化率特征,一般片麻岩由于富钾贫铁,自然伽马或无铀伽马值较高,而磁化率较低;火成岩

由于含有较多的铁磁性物质,其磁化率高,而无铀伽马值偏低;碳酸盐岩的磁化率和无铀伽马值均低;泥岩自然伽马值较高,而磁化率较低^[27-30]。利用这些特征可以分析砂砾岩中砾石的成分,由图9济阳拗陷沙四段砂砾岩岩心(局部),可以看出该砂砾岩砾石成分复杂,肉眼难以区分。厚度为6.75 m的砂砾岩岩心的数字化分析成果包括无铀伽马、钾含量、磁化率和铁含量构成(图9),可以看出无铀伽马、钾含量自上而下逐渐增大,而磁化率和铁含量的变化则正好相反。这说明该砂砾岩段上部的伽马值低,磁化率高,砾石以火成岩居多;下段伽马值增高,磁化率变低,砾石以片麻岩居多,砾石成分的划分为研究砂砾岩体物源性质和沉积期次提供了重要的依据。

3 结论

(1)岩心数字化资料具有独特而重要的应用价值,是提升岩心实物利用率,提高岩心应用水平的重要手段。从资料性质上来看,岩心数字化资料介于原始资料和成果资料之间,更侧重于岩心的

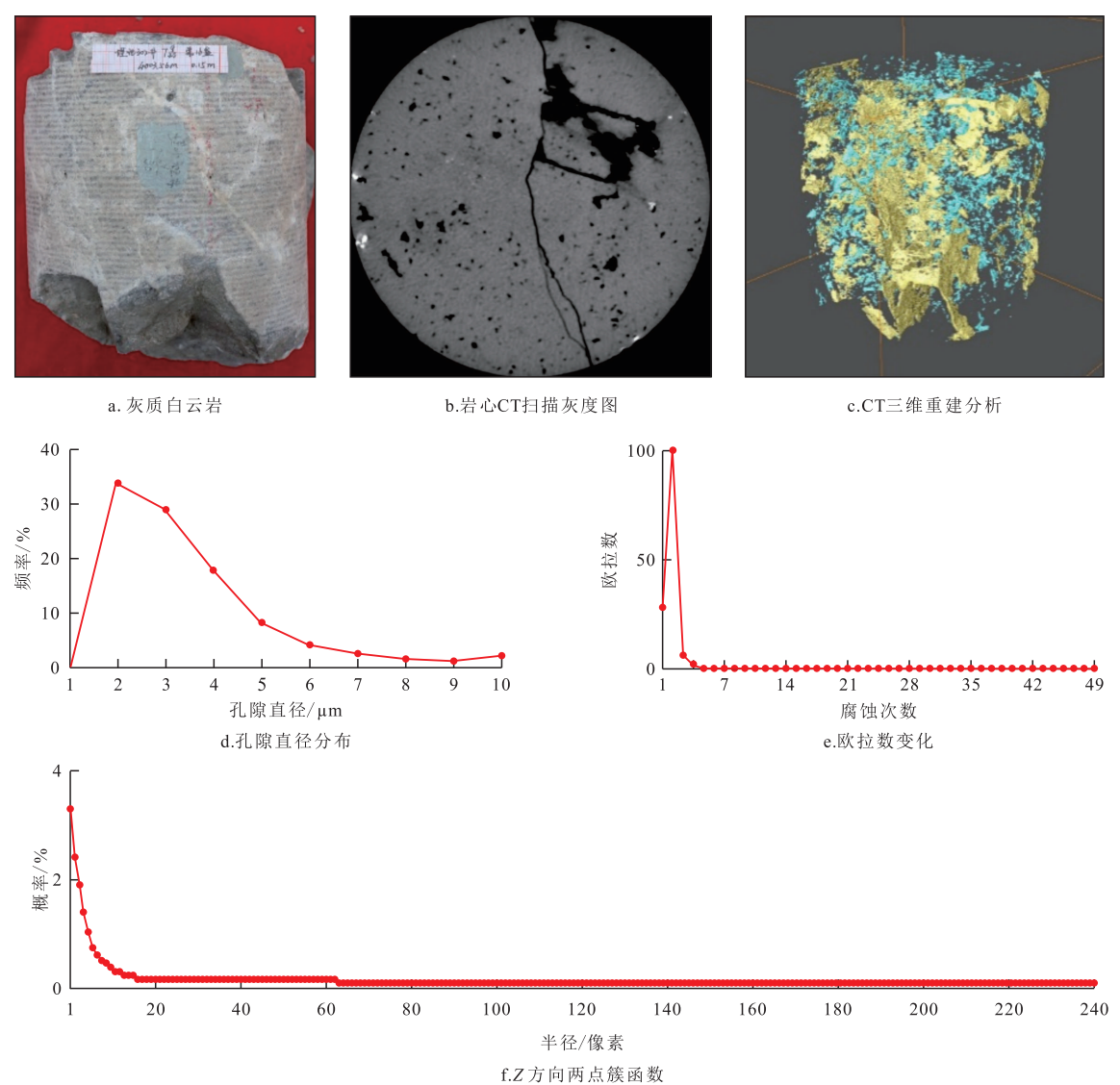


图8 胜利油田桩海地区下古生界灰质白云岩CT扫描数字岩心分析结果
Fig.8 CT scanning results of digital core analysis of Lower Paleozoic calcareous dolomite in Zhuanghai area of Shengli Oilfield

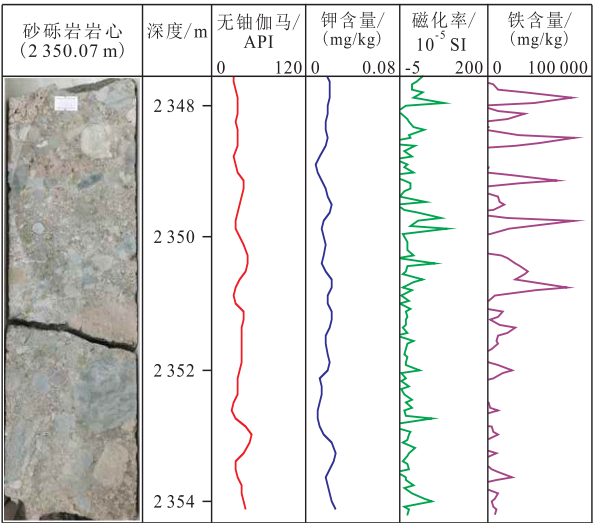


图9 济阳坳陷沙四段砂砾岩岩心及数字化分析成果
Fig.9 Core and digital analysis results of glutenite of 4th Member of Eocene Shahejie Formation in Jiyang Depression in Jiyang Depression

“原始性”,是第一手的地质资料。

(2)岩心数字化资料具有测试速度快、连续性好、数据多、精度高的优势,可以精细反映沉积物的变化特征,能为泥页岩、碳酸盐岩和砂砾岩等地层的沉积成因、储层描述及评价、物质组成等问题的研究提供重要的地质依据,具有较为广阔的应用前景。

(3)随着油气勘探开发向精细化、效益化发展,油田地质研究对岩心的需求越来越高,岩心数字化技术研究与应用将逐渐成为岩心管理过程中的顶层业务之一。

参考文献

[1] 曾文冲,欧阳健,何登春.测井地层分析与油气评价(下册)[M].北京:石油工业部勘探培训中心教材组,1982.
ZENG Wenchong, OUYANG Jian, HE Dengchun. Log forma-

- tion analysis and oil and gas evaluation (part II) [M]. Beijing: Ministry of Petroleum Industry Exploration Training Center Teaching Materials Group, 1982.
- [2] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- DING Ciqian. Geophysics well logging [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [3] 杨光, 司道彬, 刘明, 等. 自然伽马曲线在泥页岩古气候研究中的应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2015, 29(1): 18-20.
- YANG Guang, SI Daobin, LIU Ming, et al. Application of natural gamma curve in paleoclimate study of shale [J]. Journal of Shengli College, China University of Petroleum, 2015, 29(1): 18-20.
- [4] 舒小辛, 刘志伟, 王慧中, 等. 东营凹陷第三纪湖相沉积物磁性特征及其与环境变化的关系[J]. 沉积学报, 1995, 13(增刊): 96-100.
- SHU Xiaoxin, LIU Zhiwei, WANG Huizhong, et al. The magnetic properties of lake sediments from Dongying depression and their relation to the change of environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(S1): 96-100.
- [5] 汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- WANG Pinxian, LIU Chuanlian. Research methods of palaeolimnology in oil-bearing basins [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [6] 张川, 叶发旺, 徐清俊, 等. 钻孔岩心高光谱技术系统及其在矿产勘查中的应用[J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 177-183.
- ZHANG Chuan, YE Fawang, XU Qingjun, et al. Drill core hyperspectral technology system and its application in mineral prospecting [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 177-183.
- [7] 刘传联, 舒小辛, 刘志伟. 济阳坳陷下第三系湖相生油岩的微观特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 293-298.
- LIU Chuanlian, SHU Xiaoxin, LIU Zhiwei. Micro-characteristics of Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 293-298.
- [8] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1 031-1 039.
- JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1 031-1 039.
- [9] 金强. 渤海湾盆地富台油田碳酸盐岩潜山裂缝充填机制[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 454-462.
- JIN Qiang. Fracture filling mechanisms in the carbonate buried-hill of Futai Oilfield in Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 454-462.
- [10] 冯金良, 朱立平. 高海拔山地碳酸盐岩风化壳的发育特征及其地貌意义[J]. 中国岩溶, 2002, 21(4): 239-244.
- FENG Jinliang, ZHU Liping. The developing features and the geomorphic significance of carbonate rocks weathering crust on high mountains [J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(4): 239-244.
- [11] 贾振远, 蔡忠贤. 碳酸盐岩古风化壳储集层(体)研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 94-104.
- JIA Zhenyuan, CAI Zhongxian. Carbonate paleo-weathered crust reservoirs (body) [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 94-104.
- [12] 李晓燕, 蒋有录, 陈涛, 等. 古风化壳孔隙与裂缝发育特征及其油气地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 60-64, 88.
- LI Xiaoyan, JIANG Youlu, CHEN Tao. Characteristics and petroleum geological significance of pores and fissures developed in the paleo weathered crust [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(1): 60-64, 88.
- [13] 周自立. 山东济阳坳陷基岩油藏次生孔隙研究[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 13-21.
- ZHOU Zili. A study of secondary porosity in the basement oil pools in the Jiyang Depression, Shandong [J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 13-21.
- [14] 周自立. 山东车镇凹陷义北油田中生代煌斑岩侵入体油藏孔隙研究[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(2): 145-152.
- ZHOU Zili. Study on the reservoir porosity in Mesozoic lamprophyric intrusion body, Yibei Oil Field [J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(2): 145-152.
- [15] 杨丹, 滕奇志, 徐智. 岩石薄片三维重建训练图像分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 50(2): 299-303.
- YANG Dan, TENG Qizhi, XU Zhi. Training image analysis for three-dimensional reconstruction of sandstone section image [J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2013, 50(2): 299-303.
- [16] 袁浩. 岩心三维图像裂缝提取及孔喉分割算法研究[D]. 成都: 四川大学, 2008.
- YUAN Hao. Research on crack extraction and pore throat segmentation algorithm in 3D core image [D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.
- [17] 邓知秋. 三维图像裂缝识别及动态驱替模拟[D]. 成都: 四川大学, 2013.
- DENG Zhiqiu. 3D image crack recognition and dynamic displacement simulation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2013.
- [18] 林小竹, 籍俊伟, 赵国庆. 计算三维图像欧拉数的新方法[C]. 北京: 北京图像图形学学会, 2008: 5.
- LIN Xiaozhu, JI Junwei, ZHAO Guoqing. A new method for calculating Euler number of three-dimensional image [C]. Beijing: Beijing Society of Image and Graphics, 2008: 5.
- [19] 刘晶晶, 曾现洋, 倪国喜. 二维多相反应流的欧拉数值方法[J]. 计算物理, 2018, 35(1): 29-38.
- LIU Jingjing, ZENG Xianyang, NI Guoxi. Euler numerical methods for reactive flow with general equation of states in two dimensions [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2018, 35(1): 29-38.
- [20] 赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- ZHAO Xiucui. Numerical rock construction and pore network extraction [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [21] GONG X, TENG Q, WANG Z, et al. Throat segmentation of 3D rock image based on skeleton [J]. Journal of Sichuan Univer-

- sity: Engineering Science Edition, 2016, 48(S2): 100-106.
- [22] 缪慧司, 梁光明, 刘任任, 等. 结合距离变换与边缘梯度的分水岭血细胞分割[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(2): 192-198.
MIU Huisi, LIANG Guangming, LIU Renren, et al. Watershed algorithm using edge gradient combined with distance transformation for segmentation of blood cells [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(2): 192-198.
- [23] SOILLE P. Morphological image analysis: principles and applications [M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [24] 尹诗白, 王一斌, 李大鹏, 等. 模糊熵的区域合并和图割的快速矿岩分割[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(10): 1 307-1 315.
YIN Shibai, WANG Yibin, LI Dapeng, et al. Fast rock particle segmentation based on region merging and graph cut of fuzzy entropy [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(10): 1 307-1 315.
- [25] 隋风贵, 操应长, 刘惠民, 等. 东营凹陷北带东部古近系近岸水下扇储集物性演化及其油气成藏模式[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 246-256.
SUI Fenggui, CAO Yingchang, LIU Huimin, et al. Physical properties evolution and hydrocarbon accumulation of paleogene nearshore subaqueous fan in the eastern north margin of the Dongying Depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 246-256.
- [26] 宋明水, 茆书巍, 林会喜, 等. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(3): 1-13.
SONG Mingshui, MAO Shuwei, LIN Huixi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: a case study of Middle Es3 in Minfeng area, Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(3): 1-13.
- [27] 滕建彬, 刘惠民, 邱隆伟, 等. 济阳坳陷页岩油储层物质组分对含油性的控制规律[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 80-87.
TENG Jianbin, LIU Huimin, QIU Longwei, et al. Control law of material components of shale oil reservoir on oil-bearing characteristics in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 80-87.
- [28] 张顺, 刘惠民, 王永诗, 等. 东营凹陷古近系页岩成岩事件及其对页岩储集空间发育特征的影响[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 109-118.
ZHANG Shun, LIU Huimin, WANG Yongshi, et al. Diagenetic event of Paleogene shale and its influence on development characteristics of shale pore space in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 109-118.
- [29] 宋书伶, 杨二龙, 沙明宇. 基于分子模拟的页岩油赋存状态影响因素研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 31-38, 51.
SONG Shuling, YANG Erlong, SHA Mingyu. Influencing factors of occurrence state of shale oil based on molecular simulation [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 31-38, 51.
- [30] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 1-14.
FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 1-14.

编辑 邹滢滢