网络首发
2025 年 8 月

地质论评　GEOLOGICAL REVIEW

Pre-pub. online
Aug.,2025

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

测井沉积学研究起源、发展及时代传承

赖锦[1,2],杨蕙[2],宋翔羽[2],苏洋[2],王志始[2],黄若坤[3],
郑欣[4],赵仪迪[5],王贵文[1,2]

1)油气资源与工程全国重点实验室,中国石油大学(北京),北京,102249;
2)中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249;
3)中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒,841000;
4)中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院,上海,200120;
5)中国石油集团测井有限公司测井技术研究院,北京,102206

内容提要:测井沉积学研究以沉积学、岩石物理学方法理论为指导,通过不同测井序列解决沉积学相关问题。为了更好地解读测井资料中蕴藏的沉积学信息,增添测井沉积学研究的活力并消除其典型研究误区,笔者等综合近几十年文献并结合作者自身工作实践,详细阐述了测井沉积学研究起源、发展及时代意义。首先简要回顾了测井沉积学概念的提出、发展与研究现状。通过梳理对沉积相标志响应较为灵敏的 *GR*、*SP* 和 *RT* 等常规测井序列,解析了常规测井相要素,地层倾角矢量模式和成像测井相模式及其与沉积相对应关系,并总结了测井沉积学研究内容及方法流程。在此基础上分析地球物理测井资料在岩性判别、沉积构造判别以及古水流系统恢复中的应用。通过常规、成像测井相结合可提取反映不同沉积微相的相标志,并指出沉积微相测井自动判别的流程与注意事项,归纳总结了测井与地质相结合的垂向沉积微相叠置序列的精细描述与评价流程。最后结合油气勘探开发历史使命指出测井沉积学研究的时代意义与发展方向。研究成果以期能够促进测井与沉积学科之间的进一步交叉融合应用,推动测井沉积学方法理论进步及其研究成果实践应用。

关键词:测井沉积学;地球物理测井;沉积地质学;测井相;沉积微相;沉积序列

测井资料蕴含丰富的地质信息,在构造、沉积与储层等各个领域得到广泛运用,同样地球物理测井学与沉积学交叉融合的工作由来已久(尹寿鹏和王贵文,1999;Lai et al., 2024)。测井沉积学是 20 世纪 70 年代诞生并发展起来的,利用地球物理测井资料解决沉积学问题的边缘学科,测井沉积学通过测井相的识别与划分,提取测井资料中蕴含的沉积学信息,通过与岩芯分析得到的"岩芯相"刻度与标定,进行未取芯井段沉积相分析(Serra and Abbott, 1980;陆凤根,1988;王贵文和张新培,2006;余继峰等,2010;赖锦等,2021)。自 1927 年地球物理测井诞生以来,最开始是用来确定地层岩性界面,并分析地层孔隙中的流体成分,而自 20 世纪 70 年代以来,随着沉积学科的发展以及测井技术的进步,测井资料中的沉积学意义逐渐受到地质学家的关注(尹寿鹏和王贵文,1999)。针对此问题,Pirson(1970)首次将测井资料应用于沉积学解释,然后 Serra 和 Abbott(1980)提出了测井相,由此搭建测井学与沉积学研究的桥梁。自此,纵向分辨率高、连续性好且价格低廉的测井资料在沉积学领域逐渐得到广泛运用(陆凤根,1988;李军和王贵文,1996;余继峰等,2010;王改云等,2013;肖承文等,2022;Lai Jin et al., 2023)。

以沉积地质学、岩石物理学理论为指导,通过不同测井序列解决相关的沉积学问题,测井沉积学展现出广阔的发展前景与应用潜力(余继峰等,2010;

注:本文为国家科技重大专项(编号:2025ZD1400307)、国家自然科学基金资助项目(编号:42002133)和中国石油大学(北京)优秀青年学者基金资助项目(编号:2462023QNXZ010)的成果。

收稿日期:2025-01-23;改回日期:2025-08-04;网络首发:2025-08-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.08.001

作者简介:赖锦,男,1988 年生,博士,教授,博士生导师,主要从事沉积储层和测井地质学教学与研究工作;Email:laijin@cup.edu.cn。通讯作者:王贵文,男,1966 年生,博士,教授,博士生导师,主要从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作;Email:wanggw@cup.edu.cn。

常文会等,2010;Folkestad et al., 2012;Keeton et al., 2015;Brekke et al., 2017;赖锦等,2021)。近50余年以来,地球物理测井资料已成为沉积学研究不可或缺的一种地下地质信息,由于岩芯资料有限,测井资料沉积学信息的解读与应用显得尤为重要(陆凤根,1988;尹寿鹏和王贵文,1999;王改云等,2013)。此外,赋予测井资料沉积学等地质意义也将拓展测井资料应用范围,使其能够跳出"一孔之见"的局限(陆凤根,1988;赖锦等,2022)。目前,测井资料被推广用于沉积学领域中的岩性识别(杨玉卿等,2004;Ozkan et al., 2011;Nian Tao et al., 2018);沉积构造的拾取(Lai Jin et al., 2017;赖锦等,2021);沉积微相的识别与划分(Folkestad et al., 2012;赖锦等,2020;Fan Hua et al., 2021);沉积序列的分析与解释(杨友运等,2005;Brekke et al., 2017;赖锦等,2018);储层评价与预测(张祥龙等,2020)以及古水流方向判别(Lai Jin et al., 2017;肖承文等,2022)等。

测井沉积学研究是一个古老且又前沿的话题,由于测井资料的多解性以及负载能力有限性,常规测井资料、成像和倾角等测井序列融合的沉积学信息的解读目前研究尚不完善(唐为清等,2001;王贵文和张新培,2006;赖锦等,2021)。为了更好地挖掘测井中蕴藏的地质信息,增添测井沉积学研究的活力,并消除测井沉积学研究中的一些误区,亟需阐明测井沉积学研究的方法原理及主要应用。笔者等首先回顾了测井沉积学研究的起源及其发展历程,并由此梳理了对沉积相标志响应较为灵敏的测井序列,包括常规测井 GR、SP、RT 曲线等,地层倾角测井以及成像测井,然后解析了测井沉积学研究内容及方法流程。通过分析地球物理测井资料在岩性判别以及沉积构造判别中的应用,指出常规、成像测井相结合可较好的判断典型沉积微相的相标志,并实现单井沉积微相及相序的精细描述与评价,总结沉积微相自动判别以及古水流方向恢复的方法流程。最后结合油气勘探开发重点领域指出测井沉积学研究的时代意义与发展方向。研究成果以期能够更好地解读测井曲线中的沉积信息,推进测井与沉积学科之间的交叉融合应用,并更好地将测井沉积学研究成果应用至油气勘探开发实践工作中。

1 测井沉积学起源与发展历程

地球物理测井诞生于1927年的法国,国内由翁文波院士首次在1939年测量得到自然电位和电阻率曲线(赖锦等,2025a)。Pirson(1970)系统整理了测井资料地质应用,并首次将测井资料应用于沉积学解释,从此地质学家逐渐关注测井与沉积两门学科的融合。测井资料中蕴含了丰富的沉积学信息,而真正将测井和沉积两个学科联系起来的标志性事件则为20世纪70~80年代测井相(well log facies)或者是电相(electrofacies)的提出,Serra 和 Abbott(1980)正式提出的测井相搭建了测井学与沉积学研究的桥梁,测井沉积学边缘交叉学科逐渐萌芽并在世界各国取得广泛应用。

陆凤根(1988)系统论述了测井沉积学研究方法、原理及其实际应用。肖义和赵谨芳(1993)在岩性测井识别的基础上,研发了一种测井资料自动识别沉积相的计算机程序。此外,主成分分析与模糊均值聚类方法等也被引入测井沉积学研究工作中(文政等,1996)。唐洪(1998)利用自然伽马、自然电位曲线、倾角测井建立了曲流河典型沉积微相的测井识别模式。尹寿鹏和王贵文(1999)系统总结了测井沉积学的概念、研究方法及计算机技术和数学方法在测井沉积学解释中的应用。

20世纪70年代引入的地层倾角测井使得通过测井资料识别沉积层理等沉积构造成为可能(何登春等,1984;吴继余和刘开,1993;李军和王贵文,1997)。20世纪80年代末发展的成像测井进一步将测井沉积学研究带入了新的高度(丁贵明,1996;尹寿鹏和王贵文,1999;杨玉卿等,2017;赖锦等,2024a)。此后越来越多的地质学家受益于常规、成像以及倾角测井,从而可以获得未取芯井段的岩性和沉积构造等沉积学信息,甚至还可以识别砂体展布以及古水流方向(文政等,1996;杨玉卿等,2004;Lai Jin et al., 2018)。

Lai Jin 等(2017)以四川盆地须家河组辫状河三角洲沉积体系为例,建立了典型岩性、沉积构造和沉积序列的测井识别图版,以指导测井沉积学研究。Brekke 等(2017)应用成像测井,实现了加拿大 Alberta 地区 McMurray 组沉积微相识别及多期河道叠置复合型砂体的划分。Feng Qingfu 等(2021)通过成像测井实现了四川盆地震旦系礁滩相白云岩沉积微相测井识别与评价。

进入21世纪以来,随着元素扫描测井等新测井采集技术的进步,丰富的测井资料已成为沉积学研究强有力手段(杨玉卿等,2017;赖锦等,2023a;Lai Jin et al., 2023)。

2　测井沉积学方法理论体系

2.1　沉积相标志提取

自 1669 年丹麦地质学家斯丹诺(Steno)“相”这一概念以来,逐渐在沉积学领域取得广泛概念,相通常被定义为“沉积环境及在该环境中形成的沉积物特征的综合”(朱筱敏等,2020)。同时 Walther 相序定律指出只有那些成因相近且横向上紧密相邻的相才能在垂向上依次叠覆出现而没有间断(朱筱敏等,2020)。

岩石颜色、岩性组合(岩石类型及其组合特征)、沉积构造(层理构造、层面构造)、古水流方向(如双向古水流通常代表潮汐环境)、岩性垂向序列变化(正粒序、反粒序、均质粒序、复合粒序)以及古生物标志为沉积岩主要的沉积相标志(唐为清等,2001;李健等,2013)。地质人员正是依据这些沉积相标志的差异来鉴别不同沉积相和恢复古环境特征(李军和张超谟,1998;王贵文和张新培,2006)。不同沉积微相的岩性、物性和含油气性等的沉积相标志差异导致其在测井曲线形态、幅度上具有不同的响应特征(李军和张超谟,1998;赖锦等,2018)。

地球物理测井信息中包含了丰富的沉积储层信息(Lai Jin et al., 2020),测井沉积学研究的关键就是挖掘蕴含在测井资料中的沉积学信息,并通过曲线形态、幅度以及图像信息甚至结合人工智能方法解读出测井资料对应的沉积地质模型(尹寿鹏和王贵文,1999)。除了常规测井曲线形态,地层倾角测井矢量图和成像测井相模式等可提供沉积岩更多地质信息的解读,如沉积倾角、古水流等(尹寿鹏和王贵文,1999)。通过测井资料可以拾取的沉积相标志主要包括岩性标志、沉积构造以及沉积粒序等(唐为清等,2001)。事实上,除了岩石颜色和古生物等标志无法通过测井资料获取之外,大多数岩芯上可拾取的相标志均能通过测井资料识别(唐为清等,2001;张龙海等,2006)。甚至对一些沉积地质事件(不整合、冲刷面等),在测井曲线上也有所响应(王立新等,2022)。

2.2　常规测井相七要素

测井相是“表征地层特征并且可以使该地层与其它地层区别开来的一组测井响应特征集”(Serra and Abbott, 1980;Bucheb and Evans, 1994)。对常规测井曲线而言,其测井相特征的描述主要可从“七要素”开展,包括:①幅度;②曲线形态;③曲线接触关系;④曲线光滑程度;⑤齿中线;⑥幅度组合包络特征;⑦形态组合特征(图 1)(唐为清等,2001;施振生等,2008;宋璠等,2009;肖何等,2020)。

(1)曲线幅度特征。测井曲线幅度可分为高幅、中幅和低幅,低幅一般是指较为平直的测井曲线,而幅度越大,代表曲线左右刻度差距越大,幅度可反映岩石粒度的大小以及泥质含量的高低(图 1)(施振生等,2008)。

(2)曲线形态。由于物源供给、水动力能量等差异,测井曲线可表现出不同的形态,包括箱形、钟形、漏斗形、指形、平直形和复合形等(图 1)。箱形曲线代表物源供给丰富,水动力条件强,形成的沉积物粒度粗,分选较好,一般对应均质粒序。钟形曲线则代表水动力能量向上变低,物源供给变弱,一般指示正粒序;漏斗形则向上水动力能量逐渐加强且物源区物质供应越来越丰富,一般代表反粒序(图 1);指形可能对应薄砂层,如典型滩坝砂体,平直曲线则可能代表厚层泥岩(图 1)(施振生等,2008);平直形 *GR* 曲线在碳酸盐岩剖面中较为常见(赖锦等,2020)。

(3)接触关系特征。岩性接触关系分渐变和突变两种,突变接触代表水动力条件的突然增加或变低,渐变则说明缓慢的河道迁移摆动过程等(图 1)(施振生等,2008)。

(4)曲线的光滑程度。曲线光滑代表物源丰富,水动力作用稳定,齿化代表间歇性沉积的叠积(图 1)(施振生等,2008)。

(5)齿中线。齿中线可分为收敛式及平行式。收敛式可分为内收敛和外收敛,而平行式又可分为水平平行、上倾平行和下倾平行三类,反映不同的沉积特征,但一般应用的较少(图 1)。

(6)幅度组合包络线类型。Pirson(1970)指出,自然电位或 *GR* 曲线包络线的形态,可以反映出湖平面或者海平面变化。进积式代表湖平面逐渐后退,沉积物往前推进,退积式则湖平面上升,沉积物往后退;加积式代表湖平面频繁规律性变化(图 1)。

(7)形态组合特征。曲线形态组合特征,包括不同形态和幅度的叠置,可反映单井垂向上沉积微相的叠置关系(图 1)(施振生等,2008)。

需要注意的是,也并不是所有的常规测井都能反映沉积特征变化,通过测井资料进行沉积信息拾取时,对沉积特征响应灵敏的通常是 *GR*、*SP* 和 *RT* 曲线,而三孔隙度曲线中的 *AC*、*CNL* 和 *DEN* 则对沉积学信息响应不敏感,同时不仅要用到曲线的幅度和形态特征,可结合曲线的幅度组合等特征综合识

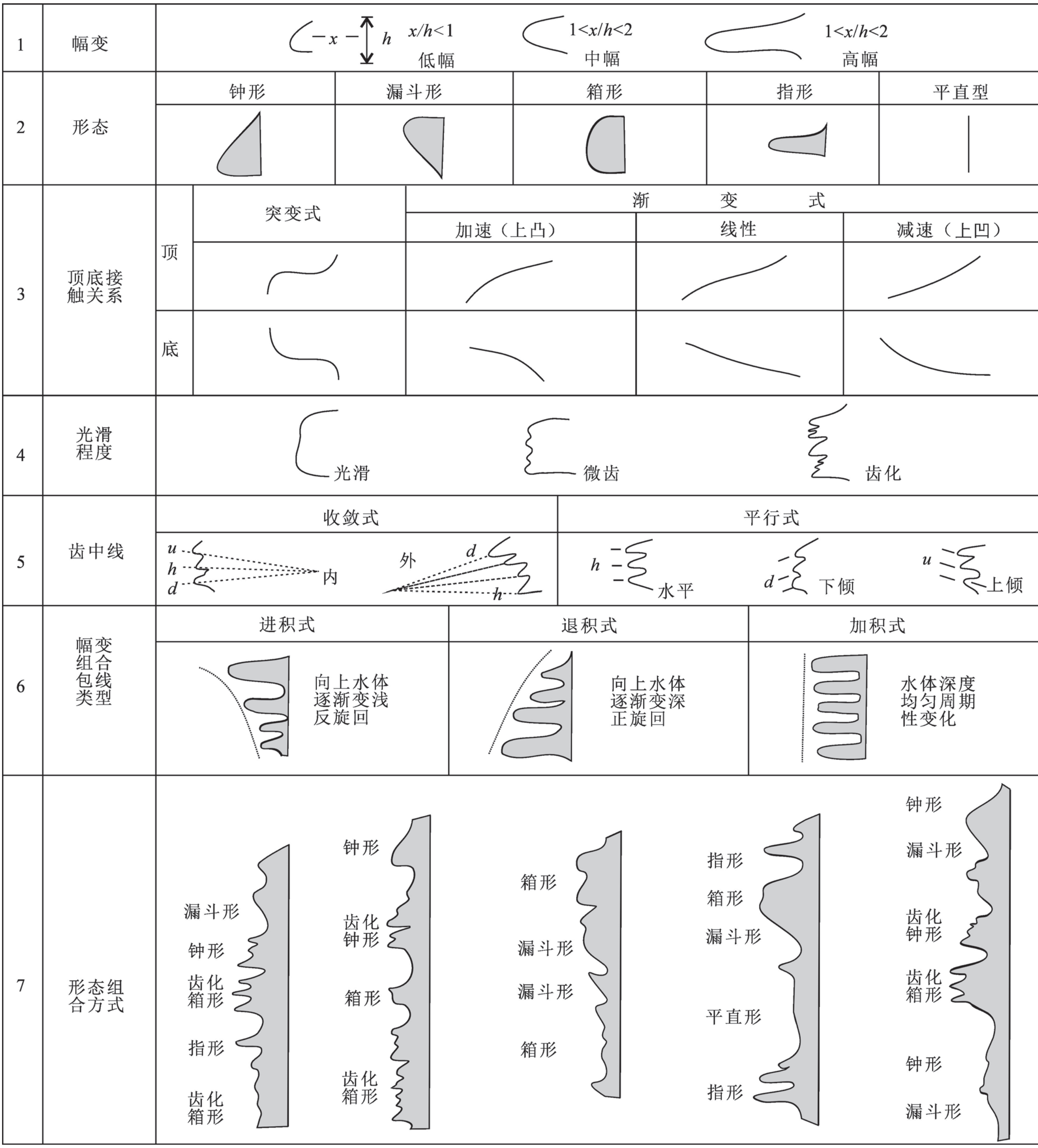

图 1 常规测井相“七要素”特征(施振生等,2008;宋璠等,2009)

Fig. 1 The seven elements of conventional well log facies (Shi Zhensheng et al., 2008; Song Fan et al., 2009)

别与判断,此外还可结合地层倾角以及成像测井进行沉积解释(王仁铎,1991;赵希刚等,2005;王贵文和张新培,2006;施振生等,2008;宋璠等,2009;闫建平等,2011;何小胡等,2013;Lai Jin et al., 2017)。

2.3 地层倾角与成像测井相

除了常规测井相外,地层倾角测井以及成像测井可以通过倾角矢量模式以及成像测井相模式建立其与沉积相关系,从而指导测井沉积学研究(尹寿鹏和王贵文,1999;钟广法和马在田,2001;罗菊兰等,2003;徐寅等,2013;赖锦等,2024a)。尤其是对于碳酸盐岩而言,常规测井分辨率有限,因此可用电成像图像颜色和结构的组合变化来描述沉积微相(图 2)(赖锦等,2020;肖何等,2020)。

地层倾角测井可提供倾角矢量图(蝌蚪图)、频

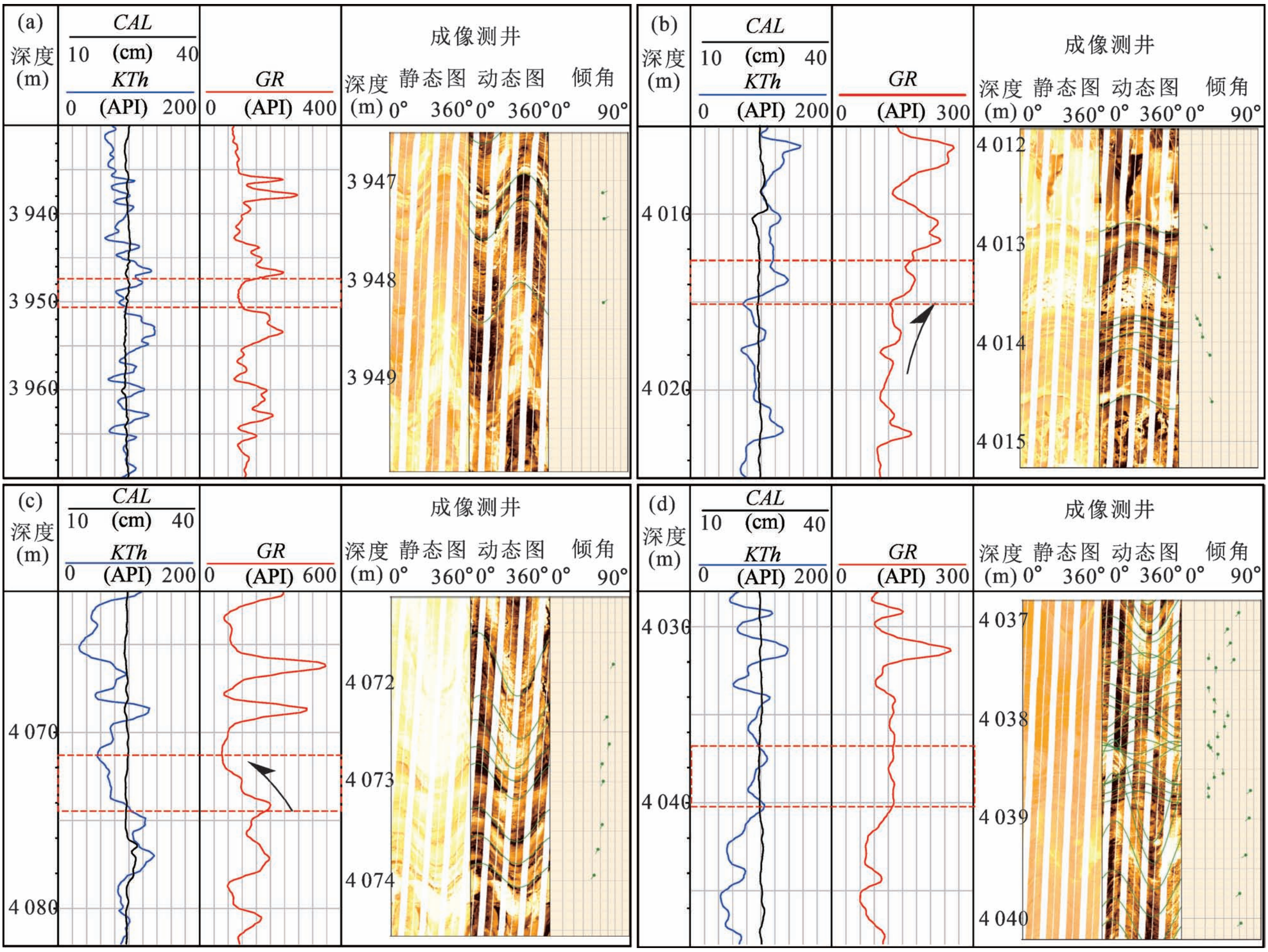

图 2 典型常规测井曲线形态、成像测井图像与地层倾角矢量模式特征

Fig. 2 Typical conventional well log curve shapes, image log and dip pattern characteristics

(a)箱型 GR 测井曲线与绿模式;(b)钟型 GR 测井曲线与红模式;(c)漏斗型 GR 测井曲线与蓝模式;(d)平直 GR 测井曲线与杂乱模式

(a) Box-shape GR curve and green model; (b) Bell-shape GR curve and red model; (c) Funnel-shape GR curve and blue model; (d) Flat GR curve and disorder model

率方位图和杆状图等,并一般根据倾角、倾向随深度的变化可以划分出:红模式、蓝模式、绿模式和白模式 4 种不同地层倾角矢量模式,从而挖掘其中潜在反映地层的沉积现象信息,进行沉积学的解释与判断(李洪奇,1995;尹寿鹏和王贵文,1999)。

蓝模式(倾向不变,倾角随深度增加而减小),反映地层沉积层理、不整合面等;红模式(倾向不变,倾角随深度增加而增大)可以反映可以指示断层、砂坝及河道;绿模式(倾角和倾向均不随深度变化)反映构造倾斜、平行或者水平层理;白模式(矢量杂乱)指示断层面、风化面或者砾岩层(图 2)(李洪奇,1995;罗菊兰等,2003;徐寅等,2013)。

成像测井可以较好地拾取岩石沉积构造特征,如沉积层理、层面构造甚至是变形构造(Goodall et al., 1998;吴文圣等,2000;代一丁和崔维平,2015;Lai Jin et al., 2017;赖锦等,2024a;Su Yang et al., 2024)。甚至还可以将成像测井划分出块状、斑状、条带状、层状、线状、杂乱模式、递变模式等成像测井相模式,从而指导沉积解释(图 2)(耿会聚等,2002;李多丽等,2009;何小胡等,2011;吴煜宇等,2013;Lai Jin et al., 2018;赖锦等,2024a)。需要说明的是,通常电成像测井对岩性和沉积层理响应清楚,而声成像测井则一般对裂缝和井壁规则性响应灵敏,而难以拾取沉积层理等信息(Lai Jin et al., 2023)。

块状模式一般指示不显层理的砂岩或泥岩段;斑状模式可分为亮斑状、暗斑状,暗斑模式通常对应

于泥砾,而亮斑模式则对应砾岩层。条带状可指示砂泥岩互层沉积特征。线状模式对应裂缝或者沉积层理。杂乱模式代表变形层理、包卷层理等。递变模式一般对应递变层理(图 2)(耿会聚等,2002;李多丽等,2009;吴煜宇等,2013;杨玉卿等,2017;赖锦等,2024a;Lai Jin et al., 2024a)。

2.4 测井沉积学研究内容及方法流程

作为测井地质学研究的重要组成部分,测井沉积学研究主要包括①测井相(常规测井、成像和倾角测井)划分;②测井相与岩芯相(岩性、沉积构造、沉积序列)对应关系;③单井、连井测井相特征分析;④沉积学(沉积微相、古水流方向、砂体展布)系统解释(丁贵明,1996;李军和王贵文,1997;张琴等,2001;于民凤等,2005;李健等,2013;杨玉卿等,2017)。

近 50 余年以来,测井沉积学研究的目的就是通过测井曲线反映沉积相特点,测井与地质相结合识别出不同的测井相,建立不同岩性和沉积微相的测井相识别标志,揭示岩性、沉积微相垂向序列特征,阐明古水流发育特征,最终达到重建沉积环境的目的(李军和王贵文,1996;宋璠等,2009;李健等,2013)。

当然由于测井解释结果的多元性,因此测井相标志和沉积相标志之间不是一一对应关系,无法用简单数学方法或函数表示出来(王贵文和张新培,2006)。可将岩芯相与测井相进行刻度后,用数学方法及逻辑推理(神经网络等)建立不同测井相到沉积相的映射关系,最终实现利用测井相来描述沉积相的目的(李军和王贵文,1997;唐为清等,2001;王贵文和张新培,2006)。

3 测井岩性判别与沉积构造拾取

测井沉积学研究中,岩性剖面的获取及沉积构造的解释是沉积微相及沉积相解释的重要基础与前提(尹寿鹏和王贵文,1999;何小胡等,2011;Folkestad et al., 2012;肖承文等,2022)。目前常规测井分辨率为分米级到米级,在与岩芯资料进行刻度或标定后,可用于拾取砂体的分布与叠置,而地层倾角、成像测井分辨率可到厘米到毫米级,因而在岩芯甚至是薄片标定的基础上可拾取层序界面、层理、层面以及沉积变形等沉积构造(赖锦等,2016;Lai Jin et al., 2017;肖承文等,2022)。

3.1 岩性测井识别

岩性分析与解释是进行沉积相分析的基础(尹寿鹏和王贵文,1999)。目前常用的对岩性响应比较灵敏的测井系列主要有 *GR*、*SP* 和 *RT* 曲线,当然三孔隙度曲线(*AC*、*CNL*、*DEN*)也可以辅助岩性的识别。在常规测井识别大套砂岩、泥岩等岩性变化的基础上,成像测井可进一步解剖大套砂体内部微细的岩性变化(Donselaar and Schmidt, 2005;何小胡等,2011;杨玉卿等,2017;Lai Jin et al., 2023)。典型砂砾岩在成像测井图像上表现为亮色斑状,泥岩则为暗色块状或条带状,砂岩则为亮黄色背景,可见指示层理发育的正弦曲线(闫建平等,2011;何小胡等,2011;Xu Chunming et al., 2015;Lai Jin et al., 2017;赖锦等,2018)。

库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组岩性以砂砾岩、中细砂岩以及泥岩为主,克深 2-2-12 井 6699.0~6706.1 m 深度段,可识别出 4 套单砂体旋回(顶底部均为高 *GR* 泥岩),其中底部的 3 套为典型正粒序特征(钟形 *GR*),顶部的则为均质粒序(箱形 *GR*),岩性基本为中、细砂岩(图 3)。成像测井以其较高的分辨率,共识别出 7 个单砂体旋回,其中 6 套为正粒序,1 套为反粒序。单砂体底部基本为冲刷面,成像测井上为明显的敏暗突变接触,代表水动力条件突然增加,成像测井进一步可揭示砂体内部的层理发育特征,在粒度变化上,砂体向上粒度逐渐变细(图 3)。

在岩性的识别方面,除了常规测井以及成像测井的应用外,元素扫描测井(LithoScanner 测井),通过解谱分析和氧化物闭合模型可得到地层元素和矿物组成质量分数,因而也逐渐被采用至复杂混积岩及细粒沉积岩的岩性识别当中,弥补了常规测井对复杂岩性识别的分辨率以及精度不够的缺陷(张永庶等,2019;赖锦等,2023a;Lai Jin et al., 2024a;苏洋等,2024)。

3.2 测井沉积构造拾取

沉积构造,包括层理构造(水平、平行、交错层理等)、层面构造(冲刷面等)以及变形构造等同样是测井沉积学研究的重要内容(尹寿鹏和王贵文,1999;Xu Chunming, 2007;闫建平等,2011;杨玉卿等,2017;赖锦等,2024a)。常规测井资料要识别沉积层理很难,但纵向分辨率高的成像测井和地层倾角测井对不同沉积层理等沉积构造有较好响应(Xu Chunming et al., 2009;赖锦等,2022;苏洋等,2025)。

典型沉积层理构造在成像测井上表现为不同方式叠置的正弦曲线,代表不同的纹层面,可指示平行

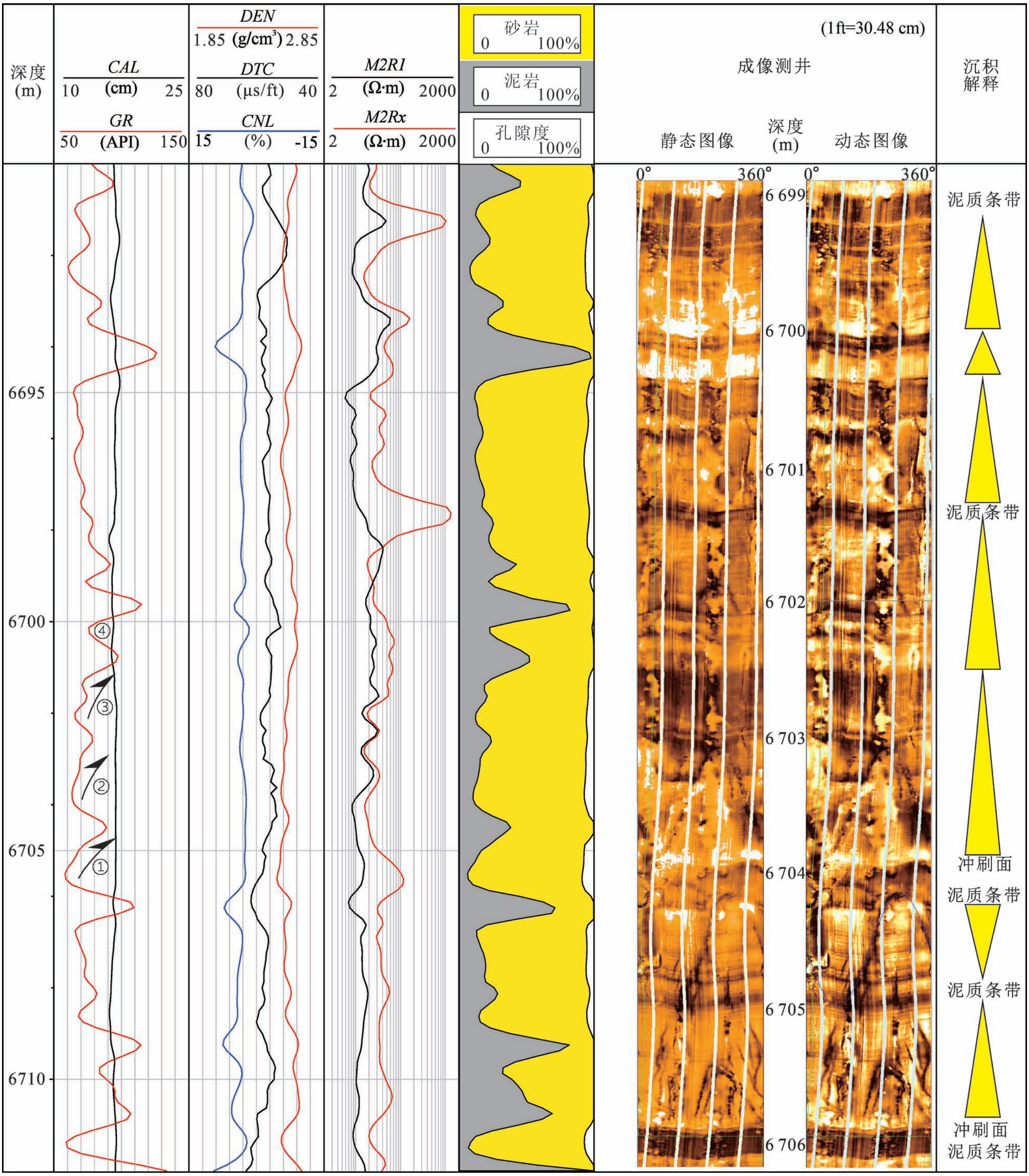

图 3 常规测井与成像测井相结合的库车坳陷白垩系巴什基奇克组岩性及沉积构造解释(克深 2-2-12 井)

Fig. 3 Lithology and sedimentary structure interpretation of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression using a combination of conventional well logs and image logs

层理、交错层理的发育。沉积层理在成像上为多组可用正弦线拟合的纹层面,如纹层面的倾向、倾角一致(绿模式),多半指示平行层理或水平层理(钟广法和马在田,2001)。如果纹层面的产状与层面斜交,则为交错层理,具体交错层理的类型还需要结合层系界面确定,板状交错层理相同纹层组内纹层面的倾向和倾角一致。槽状交错层理则表现为相同纹层组内纹层倾向相同,但倾角自下而上逐步增大。

波状交错层理纹层面呈波状起伏(钟广法和马在田,2001;Lai Jin et al., 2017)。除典型交错层理外,成像测井甚至还可以识别递变层理、透镜状层理和压扁层理等(闫建平等,2011;Lai Jin et al., 2017;赖锦等,2024a)。

层面构造如冲刷面在常规测井上表现为 GR 曲线的突变接触,成像测井则表现为明暗截切模式,通常冲刷面上覆地层一般呈亮色或亮斑,为粗粒沉积,如砾石,而下伏地层颜色相对较深,颗粒较细,如泥岩,且冲刷面附近凹凸不平,指示水动力条件的突然变化(钟广法和马在田,2001;闫建平等,2011)。变形构造成像测井上表现为纹层连续性破坏或纹层扭曲,代表砂岩的液化变形或者发生的滑动滑塌现象(闫建平等,2011)。

塔里木盆地塔中地区志留系柯坪塔格组为典型的潮坪—三角洲沉积体系(田景春等,2021),发育指示潮汐作用的双向交错层理,通过成像测井及其纹层面组合特征,可在缺少岩芯的情况下实现双向交错层理的识别(图 4)。图 4 中 3983~3986 m 深度段,成像测井可以区分明显两个方向的层理倾向和倾角(一组为北东东向,一组为南西向),代表了潮汐作用背景下形成的双向交错层理特征(图 4)。

4 沉积微相与沉积序列测井评价

在通过测井资料识别岩性及沉积构造等沉积特征的基础上,即可通过测井资料实现典型沉积微相

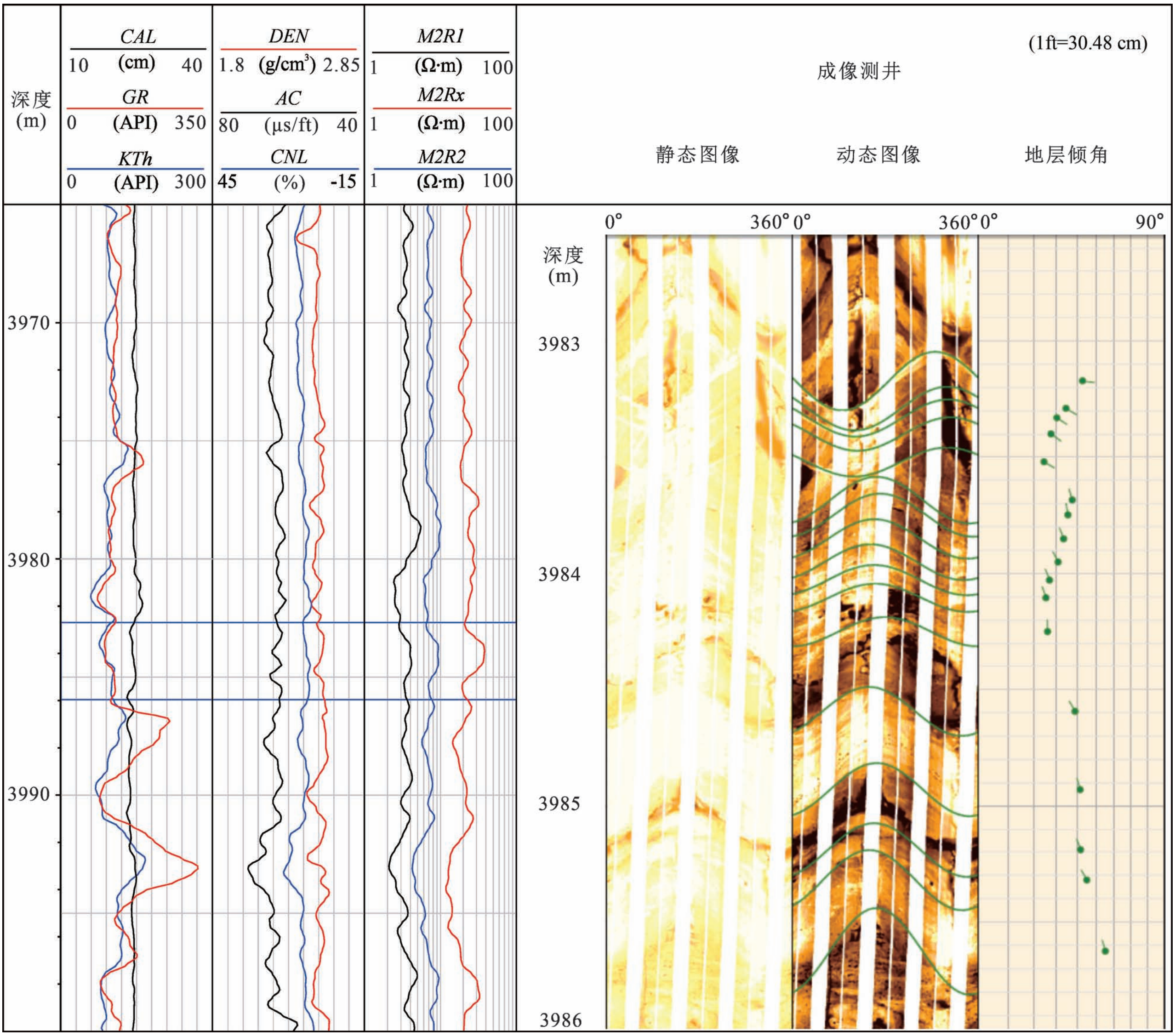

图 4 塔里木盆地塔中地区志留系柯坪塔格组典型双向交错层理测井识别特征(塔中 57H)

Fig. 4 Well log recognition characteristics of bimodal cross-bedding in Silurian Kepingtage Formation in Tazhong area of Tarim Basin (Tazhong 57H)

相标志提取,最终利用测井资料解剖单井沉积微相类型及其垂向叠置序列(Folkestad et al., 2012;Keeton et al.,2015;Brekke et al., 2017;Nian Tao et al., 2018;赖锦等,2018)。

4.1 **典型曲流河沉积微相**

以四川盆地侏罗系沙溪庙组沙二段为例,首先通过前人研究揭示的区域地质背景,结合岩芯观察和测井相标志,确定沙溪庙组沙二亚沉积体系为泛滥平原—曲流河沉积体系(吕雪莹等,2024)。而曲流河相可划分为河床、堤岸、河漫等亚相,又可进一步划分出河床滞留沉积、边滩、天然堤、决口扇和泛滥平原等沉积微相(杨凤丽等,1999;陆道林等,2011;朱筱敏等,2020)。

沙二段典型的河床滞留沉积底部以冲刷面为特征,下伏为典型的低能条件下形成的泥岩,往上粒度变粗为砂砾岩,代表水动力条件的突然增强,*GR* 曲线为突变接触。

河床滞留沉积往上一般叠置边滩(点砂坝)的砂体,边滩沉积微相其岩性以中、细砂岩为主,内部发育交错层理,正粒序或者均质粒序,自然伽马曲线为典型的箱形或者钟形,成像测井为亮色块状,内部可见沉积层理(赖锦等,2021)。

堤岸亚相可以划分出天然堤和决口扇微相,天然堤为洪水期河水漫过河岸时携带的细、粉砂级物质沿河床两岸堆积,形成平行河床的砂堤,称为天然堤。岩性主要由细砂岩、粉砂岩、泥岩组成,垂向上突出的特点是砂、泥岩组成薄互层。图 5 揭示的天然堤微相典型岩性为褐色泥岩—细砂岩薄互层,细砂岩呈块状、泥岩发育水平层理;常规测井的自然伽马曲线呈高值,无粒序变化特征;成像测井为明暗相间的条带,即亮色砂岩夹暗色薄层泥岩(图 5)。

决口扇是河水冲决天然堤,河水由决口流向漫滩,并向漫滩方向形成的扇状砂体,一般由细砂岩和粉砂岩组成,表现出典型反粒序特征(陆道林等,2011)。

曲流河顶部细粒沉积由河漫滩(泛滥平原)构成,为洪水泛滥期间河水溢出到曲流河两岸平原中最低洼的部分,岩性粒度细。因而常规测井曲线平直,成像测井为暗色块状或可见水平层理(陆道林等,2011)。

4.2 **沉积微相测井自动判别**

人工智能方法的融入推进了测井地质学研究的进程(赖锦等,2021),测井沉积学研究也逐步向自动化和智能化方向发展,沉积微相测井自动判别大为降低了解释人员的工作量(王仁铎,1991;尹寿鹏和王贵文,1999;王贵文等,2002;刘红歧等,2006;孙

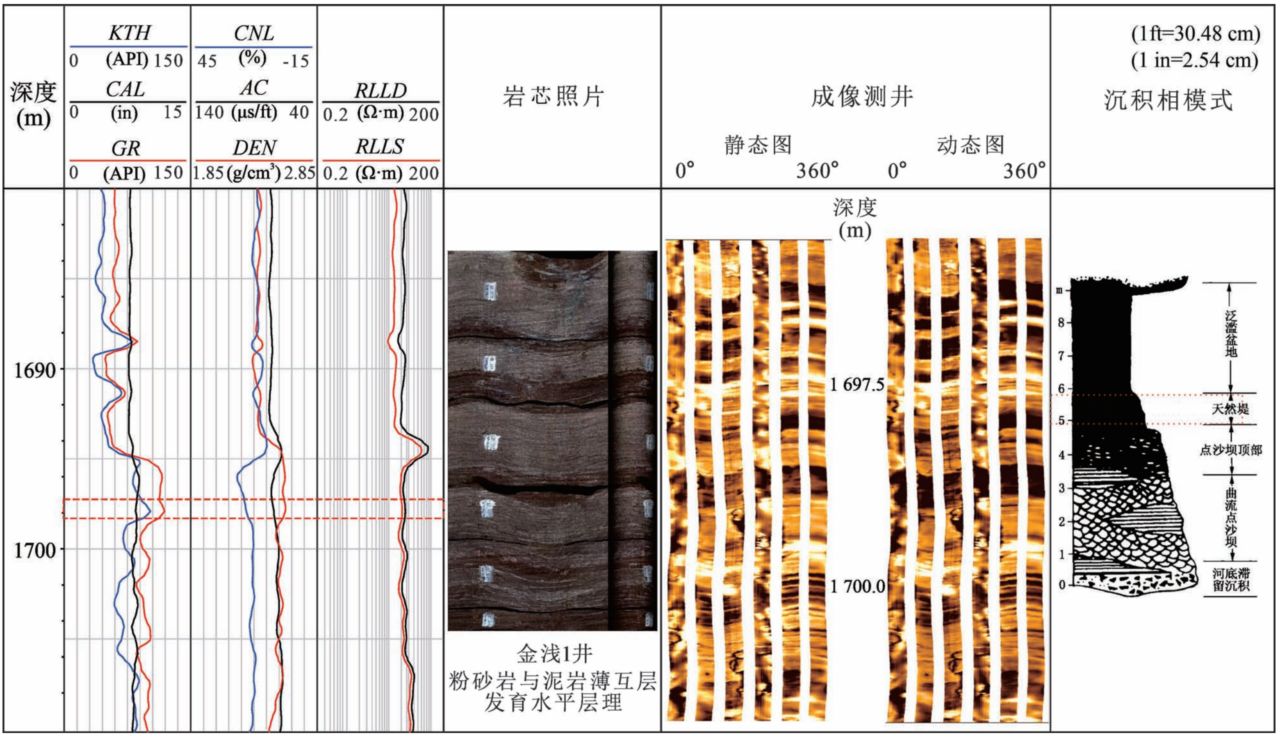

图 5 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然堤微相测井识别图版

Fig. 5 Typical well log chart of natural levee microfacies of Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin

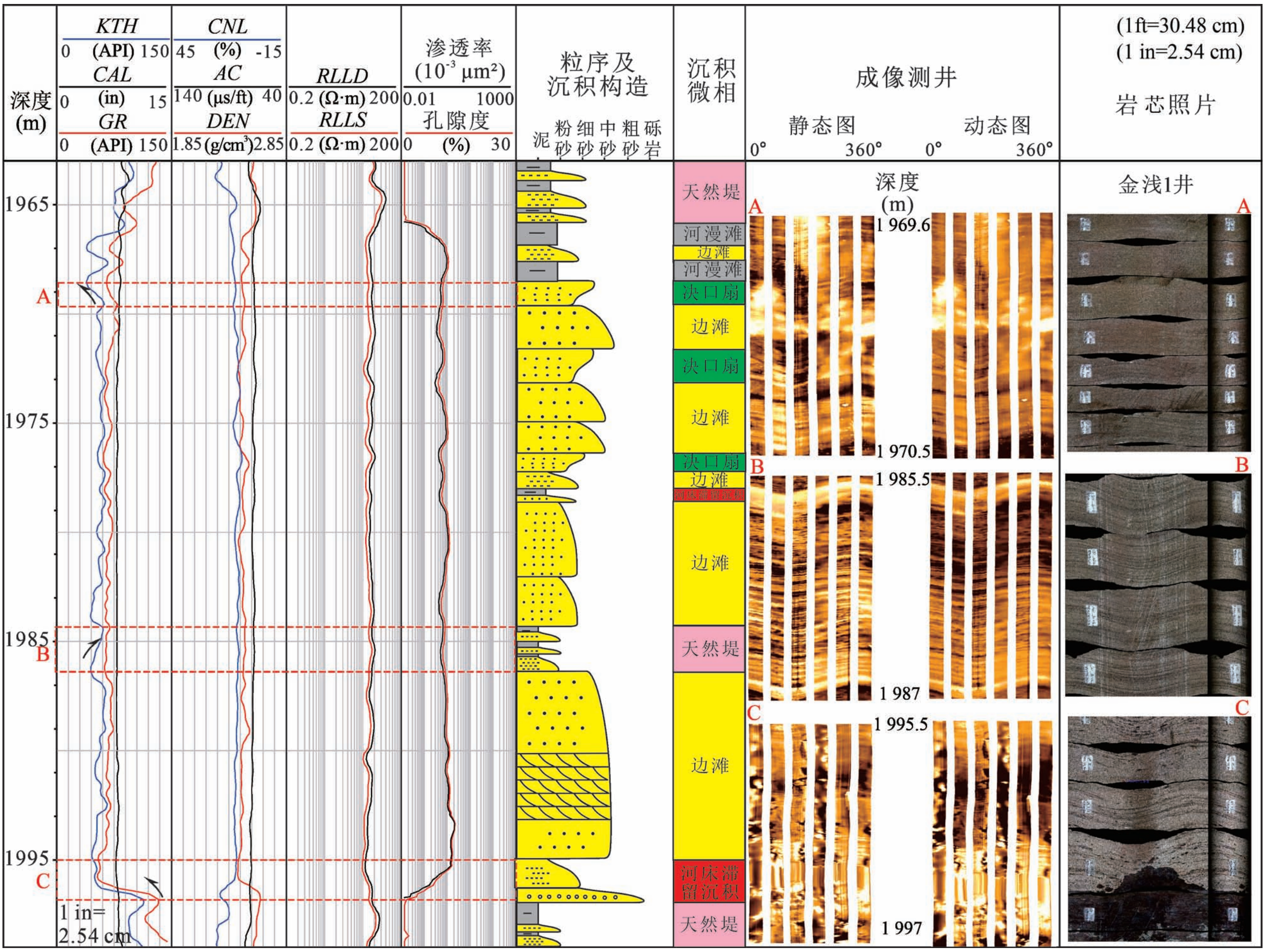

图 6 四川盆地侏罗系沙溪庙组单井沉积微相测井解释(金浅 1 井)

Fig. 6 Vertical distribution of microfacies in single well of Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin

鲁平等,2009;邓瑞和孟凡顺,2010;余继峰等,2010;郭智等,2013)。通常可采用多元统计分析中的主成分分析法,从测井曲线和参数中选取有代表性、最能反映沉积微相特征的主成分作为特征参数,实现沉积微相的自动判断(郭智等,2013)。

提取特征测井参数是沉积环境自动识别的关键,*GR*、*SP*、*RT* 等特征参数的单一或组合可以作为沉积微相类型的特征变量,将已知沉积微相类型的测井特征作为样本,即机器训练学习的输入数据,而待判别的特征向量则作为输出数据,通过机器学习和处理即可输出未取芯井段沉积微相类型(王金荣和刘洪涛,2004)。雍世和和文政(1995)提出利用 Bayes 判别法定量识别沉积微相。杨凤丽等(1999)采用模糊—均值聚类方法建立了测井—沉积微相数值模型,并利用计算机处理,自动连续地识别沉积微相。张福明等(2003)将人工神经网络技术应用于测井沉积学解释中,提高了工作效率。

人工智能的方法用来实现储层参数等定量计算优势明显,如基于 BP 神经网络、XGBoost 的孔隙度定量计算,但用于相对偏描述的沉积相(沉积相地质概念的相对模糊性使得难以用一定的定量参数来表征这些术语),确实存在一些解释的误区,如沉积相特征难以用数学方法以及计算机语言去描述,因此在实际工作中,应充分结合岩芯等资料,通过人机交互解释提高精度。

4.3 沉积序列测井精细描述

在不同沉积微相测井识别图版建立的基础上,即可通过常规测井结合成像测井识别单井微相分布特征。图 6 中为利用常规和成像测井识别出的一个典型的曲流河垂向序列(图 6)。四川盆地金浅 1 井侏罗系沙溪庙组 8 号砂组自下而上呈现由河床滞留—边滩—天然堤—河漫滩沉积,典型曲流河“二元结构”(图 6)。图中 C 段为河床滞留沉积微相,底部发育砾岩,为典型正粒序特征,物性较好,同时

成像测井上明显的突变特征,指示冲刷面的发育(图 6)。图中 B 段为典型天然堤微相特征,岩性为褐色泥岩—细砂岩薄互层,泥岩发育水平层理,成像测井上表现为明显的明暗相间薄互层。图中 A 段为典型决口扇微相,GR 曲线为漏斗形,反映逆粒序,岩性为灰白色细砂岩,成像测井上为明显的明暗截切的特征(图 6)。总体自下而上由河床滞留—边滩沉积微相向天然堤—决口扇—河漫滩沉积序列过渡,指示典型的曲流河二元结构特征(图 6)。

5　古水流方向测井恢复

古水流方向获取意义包括指导沉积相图编制,为注水开发提供指导(一般沿着古水流方向注水开采效率高)以及确定物源方向和砂体展布等等(何登春等,1984;李军和王贵文,1997;尹寿鹏和王贵文,1999)。确定物源方向的地质方法很多,如碎屑锆石测年等,而测井古水流恢复主要依托带有方向性的地层倾角和成像测井,确定单个井点古水流方向及垂向上变化(付建伟等,2021)。目前测井古水流方向识别方法主要有地层倾角蓝模式法和成像测井构造校正法,主要依托的就是地层倾角和成像测井定向性的优势(李军和王贵文,1997;何小胡等,2011;Lai Jin et al., 2018;付建伟等,2021;赖锦等,2021)。

地层倾角蓝模式法,统计目的层段内所有蓝模式矢量的方向,取其主要方向代表古水流,因蓝模式的倾角组合代表了砾石层或砂岩的纹层收敛方向,因而可以指示古水流方向(付建伟等,2021;赖锦等,2021)。此外,成像测井还可通过拾取扁平砾石定向排列方向、冲刷面倾向产状最终确定古水流方向,但该方法适用于没有经过构造变动的地层,如果经历了构造变动,那么同样需要进行构造校正才能恢复真正的古水流方向(赖锦等,2022)。

成像测井构造校正法获取古水流主要包括 3 个步骤:①拾取斜层理、沉积层理倾斜方向,得到沉积层理走向玫瑰花图;②通过读取高 *GR* 泥岩内部层理的倾斜方向或者砂泥岩界面的产状,作为构造产状,因为泥岩一般沉积的时候水平,后期发生构造变动,厚层泥岩的产状往往可以作为构造产状;③进行构造校正,即将泥岩恢复到水平方向,那么临近的砂岩沉积层理的走向即为其沉积时期的古水流方向(Xu Chunming et al., 2009;Morris et al., 2016;Lai Jin et al., 2018;赖锦等,2024b)。

库车坳陷大北克深地区白垩系巴什基奇克组沉积相编图时,虽然已经确定物源主要来自于北部的南天山造山带,其沉积体系也基本确定为扇三角洲或辫状河三角洲(张荣虎等,2015;Lai Jin et al., 2018),但三角洲平原及前缘的辫状河道与水下分流河道具体如何延伸,砂体如何展布,则尚不明确。通过研究区各个单井古水流方向测井恢复,可以看到,各个单井古水流方向基本为近于自北向南,这与研究区区域地质背景相吻合(图 7)。同时单井古水流方向的恢复为沉积相编图时河道的延伸与砂体展布确定提供了指导。

6　测井沉积学与储层评价

沉积微相控制储层的矿物成分、颗粒粒度及分选等,受后期成岩与构造改造影响,不同沉积微相类别下的储层品质差异明显(郭智等,2013;Lai Jin et al., 2017;肖承文等,2022;赖锦等,2023b;吴永平等,2025)。甚至同一沉积微相内部,由于垂向上水动力条件和物源供给的变化,导致垂向上沉积物成分、结构和构造等不同,从而造就储层品质的差异性变化(郭智等,2013;赖锦等,2013;张祥龙等,2020)。沉积微相控制了砂体展布,与成岩作用一起决定了基质孔隙发育(赖锦等,2014),甚至还决定了裂缝的发育情况(赖锦等,2015)。沉积微相精细研究可对砂体进行解剖并揭示储层内部非均质性(赖锦等,2018;卿繁等,2020;肖承文等,2022),因此测井沉积学研究可进一步指导储层分类评价与预测工作(张祥龙等,2020)。

库车坳陷大北克深地区白垩系巴什基奇克组辫状河三角洲沉积体系中,骨架砂体主要由水下分流河道与河口坝构成(图 7)(张荣虎等,2015;赖锦等,2018)。其中,水下分流河道为平原河道在水下的延续部分,该砂体具有由粗到细的正韵律特征,常规测井上为钟形,部分均质粒序的水下分流河道砂体表现为箱形,由于水动力能量强,颗粒粒度较粗,分选好,具备形成优质储层的岩石学特征基础。河口砂坝沉积韵律为向上变粗的反韵律或复合韵律,因而常规曲线特征为漏斗形。不同骨架砂体之间常被水下分流间湾泥岩所分隔,水下分流间湾泥岩高 GR,为指形特征(图 7)(赖锦等,2018)。

通过单井沉积微相识别及其与物性耦合关系发现,正粒序(钟形 *GR* 测井曲线)水下分流河道物性往往较好,且孔隙度向上逐渐变差,说明同一河道砂体,随着水动力能量降低,颗粒粒度向上变细,泥质含量增加,砂体抗压实能力逐渐变弱,因此孔隙度逐

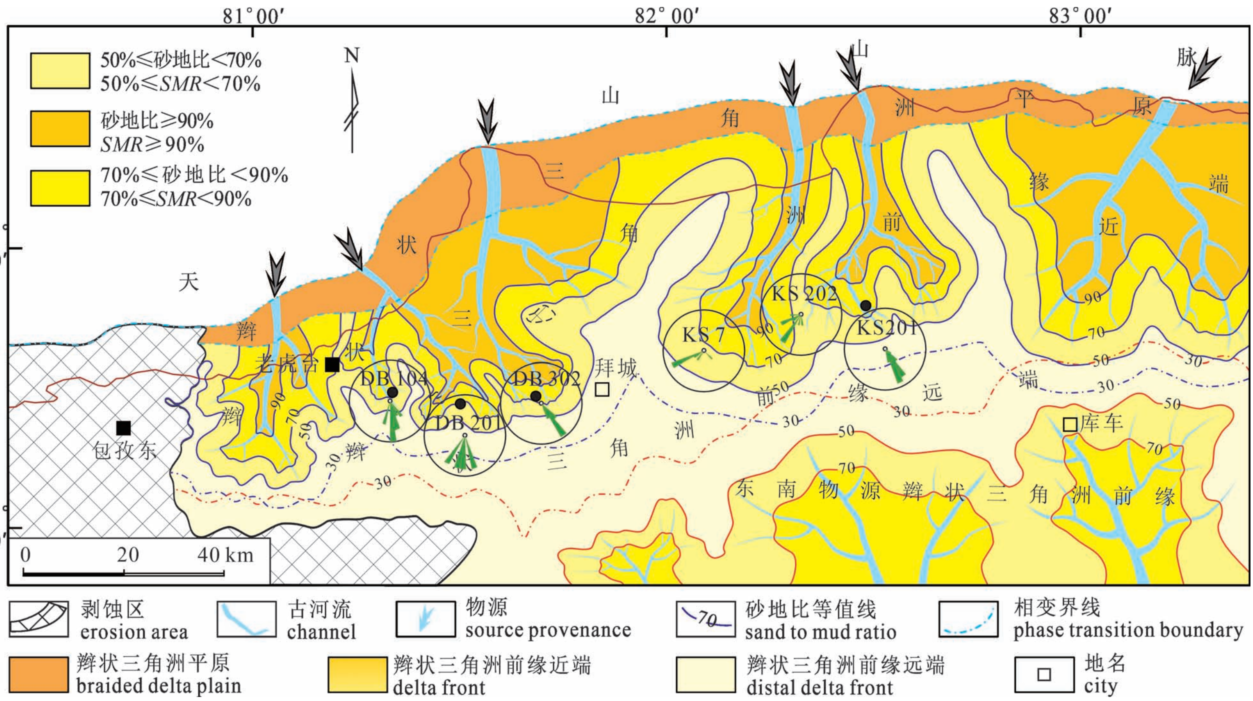

图 7 库车坳陷白垩系巴什基奇克组古水流分布平面图(张荣虎等,2015;Lai Jin et al., 2018)

Fig. 7 Paleocurrent direction determination from image logs of Cretaceous Bashijiqike Formation in the Kuqa depression (Zhang Ronghu et al., 2015; Lai Jin et al., 2018)

渐变差(图 8)。而大套箱形 *GR* 曲线为特征的均质粒序水下分流河道,孔隙度向上反而有降低的趋势,说明对于大套水下分流河道而言,在颗粒粒度与矿物成分基本一致的情况下,储层物性还受到后期成岩作用以及裂缝发育特征的控制(Lai Jin et al., 2019)(图 8)。当然高 *GR* 测井曲线代表水下分流间湾沉积微相,其储集物性最差(图 8)。

反粒序河口坝砂体相对较薄,对应常规测井曲线为漏斗形,成像测井也表现为下暗上亮的反粒序特征,在同一河口坝沉积微相内,孔隙度明显受到粒度控制。河口坝顶部的粗粒砂岩明显孔隙度最高,而底部的相对粒度较细的砂岩孔隙度则降低(图 9)。

7 时代意义及结束语

目前中国油气勘探开发已全面进入"陆上深层、海上深水、非常规油气以及老油田剩余油挖掘",即"两深一非一老"新的历史阶段(贾承造,2023;赖锦等,2025b)。测井沉积学研究紧贴时代发展主题,一方面将继续服务于深层超深层领域碎屑岩与碳酸盐岩沉积储层评价与预测工作(Wilson et al., 2013;赖锦等,2020;Fan Hua et al., 2021;Lai Jin et al., 2021)。另外一方面对于缺乏露头和取芯的海上油田,测井沉积学可指导岩性识别、沉积构造拾取、古水流方向判别等工作(杨玉卿等,2004,2012;何小胡等,2011)。同时在非常规油气勘探开发过程中,测井沉积学可实现页岩等岩相及其组合特征精细识别与评价预测,为地质与工程双"甜点"预测提供重要依据(Ozkan et al., 2011;Zou Caineng et al., 2022;Lai Jin et al., 2022;赖锦等,2023a)。对于老油田而言,开发井取芯少但井网较为密集,测井资料是揭示单砂体和剩余油分布的重要支撑手段(李栋等,2022)。

陆上深层超深层以及海上深水领域开展沉积学研究面临的共同问题都是缺乏取芯资料,尤其是海上油田同时缺乏露头信息,因此利用测井资料信息量大、数据连续和垂向分辨率高的优势从常规曲线和成像测井图像中解读出沉积学信息意义重大(杨玉卿等,2004;赖锦等,2018)。而页岩油气等非常规油气岩相的识别与评价是油气勘探开发的重要基础(马永生等,2022;赖锦等,2023a)。页岩等非常规油气评价仅仅利用常规曲线形态与幅度等难以划分页岩沉积微相与岩相(谭玉涵等,2019),因此可通过成像测井资料通过切片处理等拾取毫米级的纹层特征(纹层状、层状、块状),进一步通过

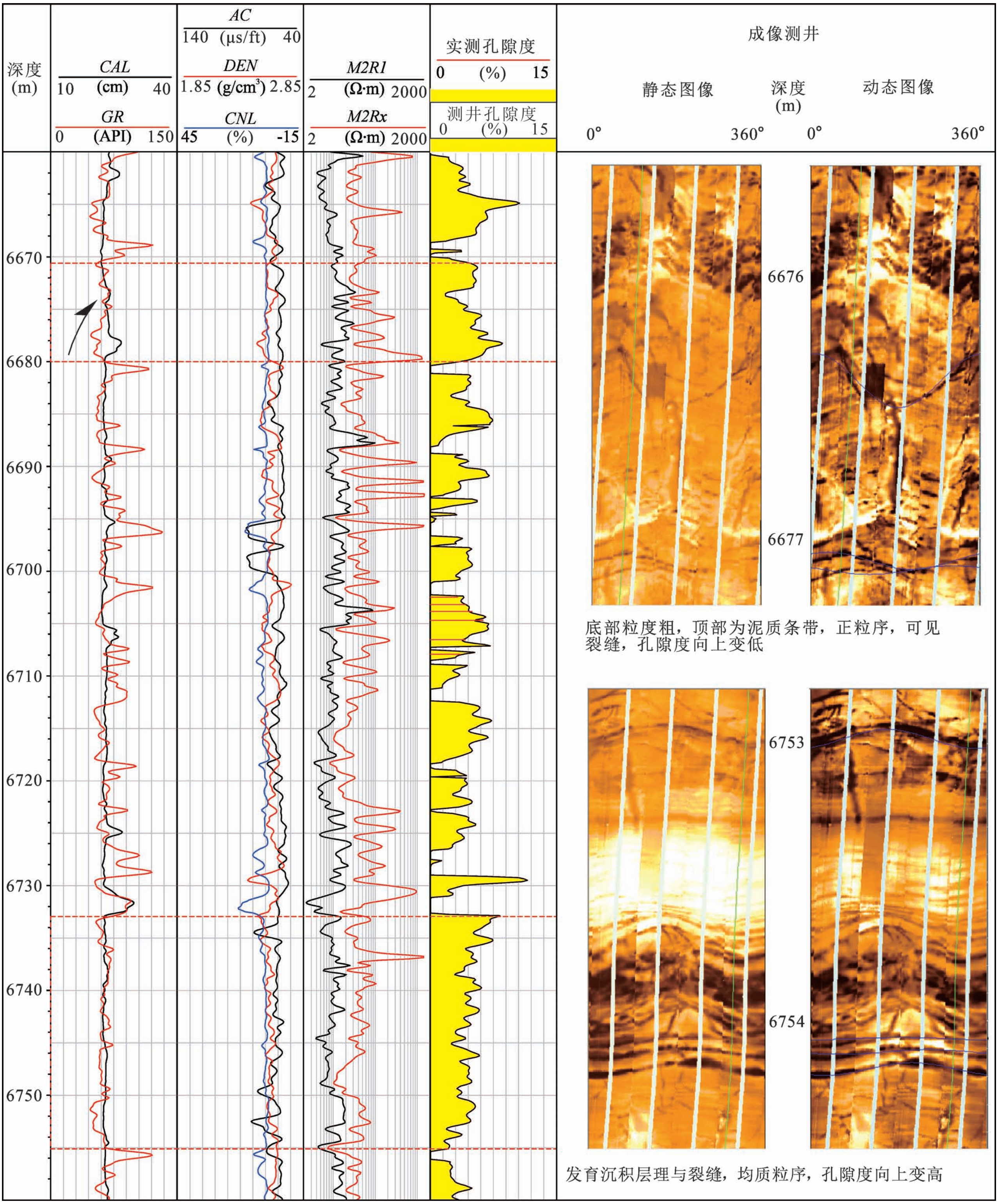

图 8 库车坳陷白垩系巴什基奇克组典型水下分流河道砂体物性变化特征(KS201 井)

Fig. 8 Reservoir property variation of typical underwater distributary channels of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression (KS 201)

LithoScanner 测井识别页岩三端元(黏土,长英质、碳酸盐)矿物组分,结合 *TOC* 含量(1%、2%为低、中、高有机质含量分界)的测井计算,即可实现 *TOC*—纹层结构—矿物组分的岩相划分,如富含 *TOC* 块状

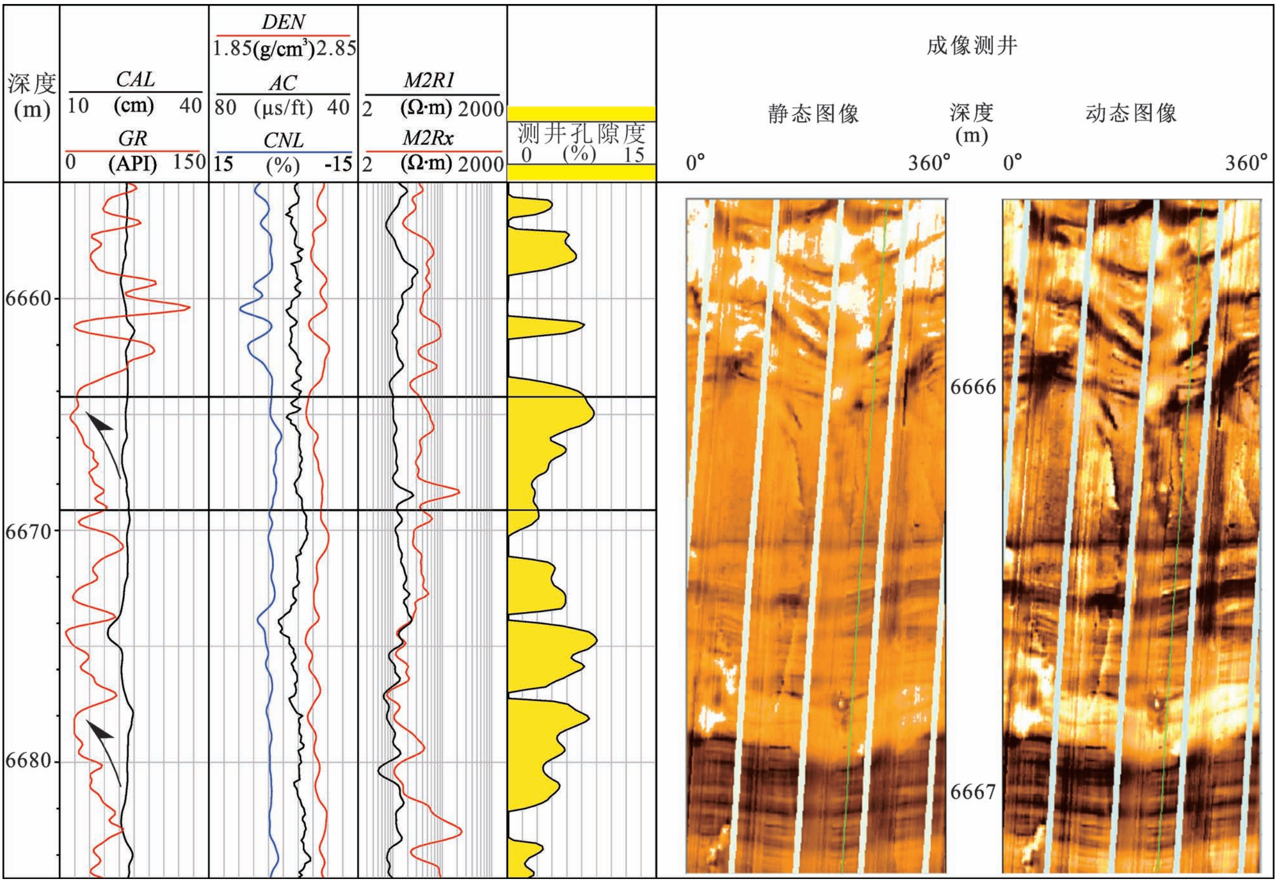

图 9 库车坳陷白垩系巴什基奇克组典型河口坝砂体物性变化特征(克深 2-2-12 井)

Fig. 9 Reservoir property variation of typical river mouth bar of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression (Keshen 2-2-12)

长英质页岩相(柳波等,2021;赖锦等,2023a)。

测井沉积学发展与沉积学、测井技术以及油气勘探开发需求密切相关。随着沉积学科理论的发展创新、地球物理测井新技术的融入以及人工智能等方法引入,必将使得测井资料更广泛地运用至岩性判别、沉积构造拾取、沉积序列评价、古水流恢复以及储层评价与预测工作中。同时测井资料可为天文旋回解释、古环境恢复以及古气候分析提供资料支持,如自然伽马能谱测井中铀(U)、钍(Th)、钾(K)含量,是恢复沉积盆地古环境、古气候的重要手段(闫建平等,2017;赖锦等,2021;彭军等,2022;Lai Jin et al., 2024b;彭诚等,2025)。测井与沉积学前沿相结合最终可以更好地解决油气勘探开发实践工作中的实践问题并推动沉积学科的发展。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

常文会, 赵永刚, 卢松. 2010. 曲流河环境沉积微相和测井相特征分析. 天然气工业, 30(2): 48~51.

代一丁, 崔维平. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷 HZ25-7 构造古近系成像测井沉积学研究. 现代地质, 29(1): 63~70.

邓瑞, 孟凡顺. 2010. 利用测井曲线精细分层识别沉积微相的方法研究. 测井技术, 34(6): 554~558.

丁贵明. 1996. 测井地质学及其在勘探中的应用. 测井技术, 20(4): 235~238.

付建伟, 李洪楠, 丁娱娇, 王贵文, 王小刚. 2021. 玛北地区百口泉组古水流方向测井识别方法研究. 测井技术, 45(6): 598~602.

耿会聚, 王贵文, 李军, 洪琪, 秦民君. 2002. 成像测井图像解释模式及典型解释图版研究. 江汉石油学院学报, 24(1): 26~30.

郭智, 杨少春, 贾爱林, 孙盈盈. 2013. 薄砂层多开发层系油田测井精细解释方法. 石油学报, 34(6): 1137~1142.

何登春, 田洪, 罗大山. 1984. 用地层倾角测井研究沉积环境和沉积相的方法探讨. 石油勘探与开发, 1(4): 17~25.

何小胡, 李俊良, 李国军, 梁全胜, 刘新宇. 2011. 成像测井沉积学研究在南海西部油田的应用. 测井技术, 35(4): 363~370.

何小胡, 张迎朝, 张道军, 左倩媚, 何卫军, 董贵能. 2013. 成像测井技术在重力流沉积研究中的应用. 测井技术, 37(1): 103~110.

贾承造. 2023. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(5): 1~12.

赖锦, 王贵文, 陈敏, 王书南, 柴毓, 蔡超, 张永辰, 李鉴伦. 2013. 基于岩石物理相划分的储层孔隙结构分类评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例. 石油勘探与开发, 40(5):566~573.

赖锦, 王贵文, 信毅, 周磊, 肖承文, 韩闯, 郑新年, 吴庆宽. 2014. 库车地区巴什基奇克组致密砂岩气储层成岩相分析. 天然气地球科学,25(7):1019~1032.

赖锦, 王贵文, 孙思勉, 蒋晨, 周磊, 郑新华, 吴庆宽, 韩闯. 2015. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展. 地球物理学进展,30(4):1712~1724.

赖锦, 王贵文, 王迪, 周正龙, 冉冶, 陈晶, 王抒忱, 张晓涛. 2016. 川中地区上三叠统须家河组成岩层序地层学特征. 地质学报, 90(6):1236~1252.

赖锦, 韩能润, 贾云武, 季玉山, 王贵文, 庞小娇, 贺智博, 王松. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述. 中国地质, 45(2): 304~318.

赖锦, 刘秉昌, 冯庆付, 冯庆付, 庞小娇, 赵太平, 王贵文, 王抒忱, 陈晶. 2020. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价. 地质学报, 94(5): 1551~1567.

赖锦, 王贵文, 庞小娇, 韩宗晏, 李栋, 赵仪迪, 王松, 江程舟, 李红斌, 黎雨航. 2021. 测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时. 地质论评, 67(6): 1804~1828.

赖锦, 庞小娇, 赵鑫, 赵仪迪, 王贵文, 黄玉越, 李红斌, 黎雨航. 2022. 测井地质学研究典型误区与科学思维. 天然气工业, 42(7): 31~44.

赖锦, 李红斌, 张梅, 白梅梅, 赵仪迪, 范旗轩, 庞小娇, 王贵文. 2023a. 非常规油气时代测井地质学研究进展. 古地理学报, 25(5): 1118~1138.

赖锦, 肖露, 赵鑫, 赵飞, 黎雨航, 朱世发, 王贵文, 刘宏坤. 2023b. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例. 石油学报, 44(4):612~625.

赖锦, 肖露, 白天宇, 范旗轩, 黄玉越, 李红斌, 赵飞, 王贵文. 2024a. 成像测井解释评价方法及其地质应用. 地质科技通报, 43(3): 323~340.

赖锦, 苏洋, 肖承文, 赵仪迪, 朱波, 张有鹏, 庞小娇, 王贵文. 2024b. 地球物理测井在地质领域应用经典案例解析. 地质科技通报,43(3): 279~288.

赖锦, 党文乐, 苏洋, 吴永平, 赵仪迪, 张有鹏, 信毅, 白天宇, 王贵文. 2025a. 声波测井地质与工程应用. 地质论评, 71(3): 1046~1072.

赖锦, 宋翔羽, 杨薰, 赵仪迪, 田银宏, 李栋, 信毅, 张荣虎, 王贵文. 2025b. 致密砂岩气储层测井综合评价技术研究进展. 石油学报, 46(1): 220~235.

李栋, 胡克来, 张燕, 赖锦, 王贵文, 王松, 张祥龙, 马源, 江程舟. 2022. 鄂尔多斯盆地环西—彭阳地区长8段储层流体性质测井判别方法. 地质学报, 96(6): 2230~2239.

李多丽, 刘兴礼, 钟广法, 郭秀丽. 2009. 塔中Ⅰ号坡折带礁滩型储集层沉积微相成像测井解释. 新疆石油地质, 30(2): 197~200.

李洪奇. 1995. 沉积学研究中的地层倾角测井资料解释. 沉积学报, 13(1): 82~87.

李健. 2013. 南图尔盖盆地下白垩统河流沉积微相测井识别与地震预测. 测井技术, 37(2): 209~213.

李军, 王贵文. 1996. 一种分析砂岩沉积相的新方法——测井相分析. 地质论评, 42(5): 443~447.

李军, 王贵文. 1997. 塔里木盆地塔中地区石炭系测井沉积学研究. 石油勘探与开发, 24(1): 65~69.

李军, 张超谟. 1998. 利用测井资料分析不同成因砂体. 测井技术, 22(1): 20~23.

刘红歧, 陈平, 夏宏泉. 2006. 测井沉积微相自动识别与应用. 测井技术, 30(3): 233~235.

柳波, 孙嘉慧, 张永清, 贺君玲, 付晓飞, 杨亮, 邢济麟, 赵小青. 2021. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式. 石油勘探与开发, 48(3): 521~535.

陆道林, 狄帮让, 李向阳, 王世瑞, 王树平. 2011. 松辽盆地南部乾安北地区扶余油层沉积微相分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(6): 8~13.

陆凤根. 1988. 测井沉积学基础. 测井技术, 12(2): 1~9.

罗菊兰, 张新, 王荣. 2003. 用测井方法研究豁地区主要储层段沉积相. 测井技术, 27(3): 233~237.

吕雪莹, 李小刚, 王小娟, 杨田, 陈双玲, 潘珂, 杨鑫, 朱德宇, 杜璐露. 2024. 远源致密砂岩气成藏主控因素及成藏概率定量评价——以四川盆地西南部中侏罗统沙溪庙组气藏为例. 天然气工业, 44(6): 12~22.

马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 胡宗全, 刘惠民, 高波, 王伟庆, 李志明, 张子麟. 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践. 地质学报, 96(1): 155~171.

彭诚, 邹长春, 曹金彧. 2025. 测井旋回地层学研究现状与发展方向. 测井技术, 49(2): 139~151.

彭军, 于乐丹, 许天宇, 韩浩东, 杨一茗. 2022. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析. 石油与天然气地质, 43(6): 1292~1308.

卿繁, 闫建平, 王军, 耿斌, 王敏, 赵振宇, 晁静. 2020. 砂砾岩体沉积期次划分及其与物性的关系:以东营凹陷北部陡坡带Y920区块沙四上亚段为例. 岩性油气藏, 32(6): 50~61.

施振生, 金惠, 郭长敏, 谢增业, 朱秋影. 2008. 四川盆地上三叠统须二段测井沉积相研究. 天然气地球科学, 19(3): 339~346.

宋璠, 侯加根, 张震, 苏妮娜. 2009. 利用测井曲线研究陆相湖泊沉积微相. 测井技术, 33(6): 589~592.

苏洋, 赖锦, 赵飞, 别康, 李栋, 黄玉越, 张有鹏, 王贵文. 2024. 岩性扫描测井解释评价方法及其地质应用. 地质论评, 70(5): 1884~1898.

苏洋, 赖锦, 别康, 李栋, 赵飞, 陈康军, 李红斌, 王贵文. 2025. 深层超深层钻井地质信息测井拾取与评价. 古地理学报, 27(1): 225~239.

孙鲁平, 首皓, 赵晓龙, 李平. 2009. 基于微电阻率扫描成像测井的沉积微相识别. 测井技术, 33(4): 379~383.

谭玉涵, 崔式涛, 牛伟, 马萌, 芮昀, 廖茂杰, 冯俊贵. 2019. 昭通页岩气区块龙马溪组下段海相页岩气储层沉积微相与测井识别. 测井技术, 43(1): 58~63.

唐洪. 1998. 综合利用测井资料划分河流沉积微相. 中国海上油气(地质), 12(5): 349~353.

唐为清, 郭荣坤, 王忠东, 王红, 罗安银, 毋学平. 2001. 沉积微相测井资料神经网络判别方法研究. 沉积学报, 19(4): 581~585.

田景春, 王峰, 郑启明, 张翔, 林小兵, 梁庆韶. 2024. 中国西部三大盆地古生界典型海相砂体特征、分布及意义. 矿物岩石, 44(3): 123~141.

王改云, 王嘹亮, 刘金萍, 胡小强. 2013. 利用测井资料研究X区块下白垩统沉积相. 测井技术, 37(5): 557~561.

王贵文, 张新培. 2006. 塔里木盆地塔中地区志留系测井沉积相研究. 中国石油大学学报(自然科学版),30(3): 40~45.

王贵文，邓清平，唐为清. 2022. 测井曲线谱分析方法及其在沉积旋回研究中的应用. 石油勘探与开发，29(1)：93～95.
王金荣，刘洪涛. 2004. 测井沉积微相识别方法及应用. 大庆石油学院学报，28(4)：18～21.
王立新，唐明远，李浩，周贤斌，黄学斌，刘双莲，赵睿，张辉，申本科，苏映宏. 2022. 基于测井曲线分析的沉积事件精准识别. 天然气工业，42(11)：50～57.
王仁铎. 1991. 利用测井曲线形态特征定量判别沉积相. 地球科学—中国地质大学学报，16(3)：303～309.
文政，雍世和，王中文. 1996. 应用测井资料定量识别沉积微相. 沉积学报，14(1)：40～46.
吴继余，刘开. 1993. 碳酸盐岩测井电相、岩相与沉积微相研究. 测井技术，17(3)：171～182.
吴文圣，陈钢花，王中文，雍世和. 2000. 用地层微电阻率扫描成像测井识别沉积构造特征. 测井技术，24(1)：60～63.
吴煜宇，张为民，田昌炳，宋本彪，高计县，高严. 2013. 成像测井资料在礁滩型碳酸盐岩储集层岩性和沉积相识别中的应用——以伊拉克鲁迈拉油田为例. 地球物理学进展，28(3)：1497～1506.
吴永平，肖露，朱波，杨薰，白晓佳，闫炳旭，张荣虎，李栋，李红斌，赖锦. 2025. 深层-超深层碎屑岩地应力测井评价及其控储效应. 古地理学报，2025，27(3)：785～796.
肖承文，赵仪迪，仵燕，李晓峰，刘静，陆慧. 2022. 高分辨率电成像测井资料在河套盆地碎屑岩中的应用. 测井技术，46(6)：721～728.
肖何，张超谟，苏向群. 2020. 应用测井资料定量识别碳酸盐岩沉积微相——以川东北元坝地区长兴组为例. 科学技术与工程，20(7)：2573～2582.
肖义，赵谨芳. 1993. 应用测井资料自动确定沉积相的计算机程序. 地质科学，28(1)：68～78.
徐寅，徐怀民，陈丽华，昌伦杰，余姣凤. 2013. 倾角测井在沉积微相划分中的应用. 新疆石油地质，34(3)：311～315.
闫建平，蔡进功，赵铭海，李尊芝，徐冠华. 2011. 电成像测井在砂砾岩体沉积特征研究中的应用. 石油勘探与开发，38(4)：444～451.
闫建平，言语，彭军，李尊芝，耿斌，赖富强. 2017. 天文地层学与旋回地层学的关系、研究进展及其意义. 岩性油气藏，29(1)：147～156.
杨凤丽，张善文，才巨宏，印兴耀，文政. 1999. 曲流河砂体的沉积相、测井相、地理相研究及预测——渤海湾南部埋岛油田实例. 石油地球物理勘探，34(2)：171～179.
杨友运，文晓峰，张普成，王鹏志. 2005. 鄂尔多斯盆地延长组沉积层序识别及测井响应特征. 测井技术，29(4)：341～345.
杨玉卿，崔维平，田洪. 2012. 碎屑岩成像测井沉积学研究及其在海上油田的应用. 海相油气地质，17(3)：40～46.
杨玉卿，崔维平，王猛. 2017. 成像测井沉积学研究进展与发展趋势. 中国海上油气，29(3)：7～18.
杨玉卿，田洪，刘颖宇，乔悦东. 2004. 测井资料在海上油田沉积相研究中的应用. 中国海上油气，16(6)：377～381.
尹寿鹏，王贵文. 1999. 测井沉积学研究综述. 地球科学进展，14(5)：440～445.
雍世和，文政. 1995. 用 Bayes 判别法定量识别沉积微相. 测井技术，13(1)：22～27.
于民凤，程日辉，那晓红. 2005. 陆相盆地主要沉积微相的测井特征. 世界地质，24(2)：182～187.
余继峰，付文钊，袁学旭，于泳. 2010. 测井沉积学研究进展. 山东科技大学学报，29(6)：1～8.
张福明，李洪奇，邵才瑞，赵晓燕. 2003. 应用神经网络模式识别技术进行测井沉积学研究. 石油勘探与开发，30(3)：121～123.
张龙海，代大经，周明顺，乔德新，宁从前，李潮流. 2006. 成像测井资料在湖盆沉积研究中的应用. 石油勘探与开发，33(1)：67～71.
张琴，王贵文，朱筱敏，张满郎. 2001. 准噶尔盆地阜东斜坡区侏罗系测井沉积相. 古地理学报，3(3)：41～47.
张荣虎，王俊鹏，马玉杰，陈戈，曾庆鲁，周晨光. 2015. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制. 天然气地球科学，26(4)：667～678.
张祥龙，刘一仓，张攀，王贵文，李栋，马源，江程舟，包萌，陈康军，刘秉昌，解宇强. 2020. 沉积微相控制下储层分类评价及预测——以鄂尔多斯盆地环西—彭阳南段地区长 8 段为例. 沉积学报，40(2)：534～546.
张永庶，张审琴，吴颜雄，杨智，施奇，马凤春. 2019. 基于成像测井和岩性扫描测井的沉积相研究——以柴达木盆地黄瓜峁地区为例. 新疆石油地质，40(5)：593～596.
张占松，蔡道刚，甘利灯. 1999. 用测井曲线能谱分析技术研究沉积速率. 江汉石油学院学报，21(4)：18～22.
赵希刚，吴汉宁，杨建军，王靖华，柏冠军. 2005. 碎屑岩油气藏沉积微相的测井参数特征识别研究. 石油物探，44(6)：582～588.
钟广法，马在田. 2001. 利用高分辨率成像测井技术识别沉积构造. 同济大学学报，29(5)：576～580.
朱筱敏. 2020. 沉积岩石学(第五版). 北京：石油工业出版社.
Brekke H，MacEachern J A，Roenitz T，and Dashtgard S E. 2017. The use of microresistivity image logs for facies interpretations：An example in point-bar deposits of the McMurray Formation，Alberta，Canada. AAPG Bulletin，101(5,)：655～682.
Bucheb J A，Evans H B. 1994. Some application of methods used in electrofacies identification. The Log Analyst，35(1)：14～26.
Chang Wenhui，Zhao Yonggang，Lu Song. 2010**&**. Features of sedimentary microfacies and electrofacies of meandering river deposits. Natural Gas Industry，30(2)：48～51.
Dai Yiding，Cui Weiping. 2015**&**. Imaging logging sedimentology study on Paleogene system in HZ25-7 Structure of Huizhou Depression in Pearl River Mouth Basin. Geoscience，29(1)：63～70.
Deng Rui，Meng Fanshun. 2010**&**. On logging curves fine delamination to identify sedimentary microfacies. Well Logging Technology，34(6)：554～558.
Ding Guiming. 1996**&**. Logging geology and its application to oil and gas exploration. Well Logging Technology，20(4)：235～238.
Donselaar M E，Schmidt J M. 2005. Integration of outcrop and borehole image logs for high-resolution facies interpretation：example from a fluvial fan in the Ebro Basin，Spain. Sedimentology，52，1021～1042.
Fan Hua，Shi Juye，Fan Tailiang，Gao Zhiqian，Gu Yu，Gao Ze，Zhang Tonghu，Li Yu，Li Bo. 2021. Sedimentary microfacies analysis of carbonate formation based on FMI and conventional logs：A case study from the Ordovician in the Tahe Oilfield，Tarim Basin，China. Journal of Petroleum Science and Engineering，203：108603.
Feng Qingfu，Xiao Yuxiang，Hou Xiulin，Chen Hongkui，Wang Zecheng，Feng Zho，Tian Han，Jiang Hua. 2021. Logging identification method of depositional facies in Sinian Dengying Formation of the Sichuan Basin. Petroleum Science，18：1086～1096.
Folkestad A，Veselovsky Z，Roberts P. 2012. Utilising borehole image logs to interpret delta to estuarine system：A case study of the subsurface Lower Jurassic Cook Formation in the Norwegian northern

North Sea. Marine and Petroleum Geology, 29: 255~275.

Fu Jianwei, Li Hongnan, Ding Yujiao, Wang Guiwen, Wang Xiaogang. 2021&. Study on the Log Identification Method of the Paleocurrent Direction of Baikouquan Formation in Mabei Area. Well Logging Technology, 45(6): 598~602.

Geng Huiju, Wang Guiwen, Li Jun, Hong Qi, Qin Minjun. 2002&. Image interpretation modes and the typical interpretation chart for imaging well logging. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 24 (1): 26~30.

Goodall T M, Moller N K, Ronningsland T M. 1998. The integration of electrical image logs with core data for improved sedimentological interpretation. Geological Society, London, Special Publications, 136: 237~248.

Guo Zhi, Yang Shaochun, Jia Ailin, Sun Yingying. 2013&. Fine log interpretation for oilfields with thin sands and multiple developed layer systems. Acta Petrolei Sinica, 34(6): 1137~1142.

He Dengchun, Tian Hong, Luo Dashan. 1984&. An approach to the application of dipmeter to study ancient sedimentary environments and sedimentary facies. Petroleum Exploration and Development, 1 (4): 17~25.

He Xiaohu, Li Junliang, Li Guojun, Liang Quansheng, Liu Xinyu. 2011&. Sedimentology research on imaging well logging and its application to Western South China Sea Oilfield. Well Logging Technology, 35(4): 363~370.

He Xiaohu, Zhang Yingzhao, Zhang Daojun, Zuo Qianmei, He Weijun, Dong Guineng. 2013&. Application of imaging logging to deep-water gravity flow deposits study. Well Logging Technology, 37(1): 103~110.

Jia Chengzao. 2023&. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 47(5): 1~12.

Keeton G, Pranter M, Cole R D, Gustason E R. 2015. Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado. AAPG Bulletin, 99(10): 1929~1956.

Lai Jin, Dang Wenle, Su Yang, Wu Yongping, Zhao Yidi, Zhang Youpeng, Xin Yi, Bai Tianyu, Wang Guiwen. 2025a. Geological and engineering applications of sonic logs. Geological Review, 71 (3): 1046~1072.

Lai Jin, Fan Xuechun, Liu Bingchang, Pang Xiiaojiao, Zhu Shhifa, Xie Weeibiao, Wang Guiwen. 2020. Qualitative and quantitative prediction of diagenetic facies via well logs. Marine and Petroleum Geology, 120: 104486.

Lai Jin, Han Nengrun, Jia Yunwu, Ji Yushan, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, He Zhibo, Wang Song. 2018&. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs. Geology in China, 45(2): 304~318.

Lai Jin, Li Dong, Wang Guiwen, Xiao Chengwen, Cao Juntao, Wu Chun, Han Chuang, Zhao Xinjian, Qin Ziqiang. 2019. Can carbonate cementation be inhibited in continental red bed sandstone?. Journal of Petroleum Science and Engineering, 179: 1123~1135.

Lai Jin, Li Hongbin, Zhang Mei, Bai Meimei, Zhao Yidi, Fan Qixuan, Pang Xiaojiao, Wang Guiwen. 2023a&. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 1118~1138.

Lai Jin, Liu Binchang, Feng Qingfu, Pang Xiaojiao, Zhao Taiping, Wang Guiwen, Wang Shuchen, Chen Jing. 2020&. Well logging identification and evaluation of depositional microfacies in dolostones from the 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in the Jingbian gas field, Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1551~1567.

Lai Jin, Liu Shichen, Xin Yi, Wang Song, Xiao Chengwen, Song Qiuqiang, Chen Xu, Yang Kefu, Wang Guiwen, Ding Xiujian. 2021. Geological—petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China. AAPG Bulletin, 105 (11): 2263~2296.

Lai Jin, Pang Xiaojiao, Zhao Xin, Zhao Yidi, Wang Guiwen, Huang Yuyue, Li Hongbin, Li Yuhang. 2022&. Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research. Natural Gas Industry, 42(7): 31~44.

Lai Jin, Song Xiangyu, Yang Xun, Zhao Yidi, Tian Yinhong, Li Dong, Xin Yi, Zhang Ronghu, Wang Guiwen. 2025b&. Research progresses of comprehensive well logging evaluation methods of tight gas sandstone reservoirs. Acta Petrolei Sinica, 46(1): 220~235.

Lai Jin, Su Yang, Xiao Chengwen, Zhao Yidi, Zhu Bo, Zhang Youpeng, Pang Xiaojiao, Wang Guiwen. 2024b&. Analysis of typical applications of geophysical well logs in geological fields. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(5): 279~288.

Lai Jin, Su Yang, Xiao Lu, Zhao Fei, Bai Tianyu, Li Yuhang, Li Hongbin, Huang Yuyue, Wang Guiwen, Qin Ziqiang. 2024a. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect. Geoscience Frontiers, 15: 101779.

Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Min, Wang Shunan, Chai Yu, Cai Chao, Zhang Yongchen, Li Jianlun. 2013&. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: A case study on chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 40(5): 566~573.

Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Qixuan, Pang Xiaojiao, Li Hongbin, Zhao Fei, Li Yuhuang, Zhao Xin, Zhao Yidi, Huang Yuyue, Bao Meng, Qin Ziqiang, Wang Qiqi. 2022. Geophysical well log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects. Surveys in Geophysics, 43: 913~957.

Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Qixuan, Zhao Fei, Zhao Xin, Li Yuhuang, Zhao Yidi, Pang Xiaojiao. 2023. Towards the scientific interpretation of geophysical well logs: typical misunderstandings and countermeasures. Surveys in Geophysics, 44: 463~494.

Lai Jin, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, Han Zongyan, Li Dong, Zhao Yidi, Wang Song, Jiang Chengzhou, Li Hongbin, Li Yuhang. 2021&. The past, present and future of well logging geology: To celebrate the publication of second edition of "Well Logging Geology". Geological Review, 67(6): 1804~1828.

Lai Jin, Wang Guiwen, Sun Simian, Jiang Chen, Zhou Lei, Zheng Xinhua, Wu Qingkuan, Han Chuang. 2015&. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs. Progress in Geophysics, 30(4): 1712~1724.

Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Di, Zhou Zhenglong, Ran Ye, Chen Jing, Wang Shuchen, Zhang Xiaotao. 2016&. The Diagenetic Sequence Stratigraphy Characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Central Sichuan Basin. Acta GeologicaSinica, 90(6): 1236~1252.

Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Song, Cao Juntao, Li Mei, Pang Xiaojiao, Han Chuang, Fan Xuqiang, Yang Liu, He Zhibo, Qin Ziqiang. 2018. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization. Marine and Petroleum Geology, 95: 139~166.

Lai Jin, Wang Guiwen, Xin Yi, Zhou Lei, Xiao Chengwen, Han Chuang, Zheng Xinnian, Wu Qingkuan. 2014&. Diagenetic Facies Analysis of Tight Sandstone Gas Reservoir of Bashijiqike Formation in kuqa Depression. Natural Gas Geoscience, 25(7): 1019~1032.

Lai Jin, Xiao Lu, Bai Tianyu, Fan Qixuan, Huang Yuyue, Li Hongbin, Zhao Fei, Wang Guiwen. 2024a&. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological applications. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(3): 323~340.

Lai Jin, Xiao Lu, Zhao Xin, Zhao Fei, Li Yuhang, Zhu Shifa, Wang Guiwen, Liu Hongkun. 2023&. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression. Acta Petrolei Sinica, 44(4): 612~625.

Lai Jin, Zhao Fei, Xia Zongli, Su Yang, Zhang Chengcheng, Tian Yinhong, Wang Guiwen, Qin Ziqiang. 2024b. Well log prediction of total organic carbon: A comprehensive review. Earth-Science Reviews, 258: 104913.

Lai, Jin, Wang Guiwen, Fan Zhuoying, Chen Jing, Wang Shuchen, Fan Xuqiang. 2017. Sedimentary characterization of a braided delta using well logs: the Upper Triassic Xujiahe formation in central Sichuan basin, China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 154: 172~193.

Li Dong, Hu Kelai, Zhang Yan, Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Song, Zhang Xianglong, Ma Yuan, Jiang Chengzhou. 2022&. Logging evaluation method for reservoir fluid properties of Chang 8 oil layer to the west of Tianhuan depression—Pengyang region of Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 96(6): 2230~2239.

Li Duoli, Liu Xingli, Zhong Guangfa, Guo Xiuli. 2009&. Interpretation of imaging logs of sedimentary microfacies of reef-flat reservoir in Tazhong No. 1 slope break zone, Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 30(2): 197~200.

Li Hongqi. 1995&. Interpretation of dipmeters in sedimentological research. Acta Sedimentologica Sinica, 13(1): 82~87.

Li Jian. 2013&. Log identification and seismic prediction of Lower Cretaceous fluvial deposit in South Turgay Basin, Kazakhstan. Well Logging Technology, 37(2): 209~213.

Li Jun, Wang Guiwen. 1996&. A new method for analyzing sandstone facies: logging facies analysis. Geological Review, 42(5): 443~447.

Li Jun, Wang Guiwen. 1997&. Logging sedimentary analysis in Tazhong area, Tarim basin. Petroleum Exploration and Development, 24(1): 65~69.

Li Jun, Zhang Chaomo. 1998&. Analysis of different geneses of sand body using logging data. Well Logging Technology, 22(1): 20~23.

Liu Bo, Sun Jiahui, Zhang Yongqing, He Junling, Fu Xiaofei, Yang Liang, Xing Jilin, Zhao Xiaoqing. 2021&. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 521~535.

Liu Hongqi, Chen Ping, Xia Hongquan. 2006&. Automatic identification of sedimentary micro facies with log data and its application. Well Logging Technology, 30(3): 233~235.

Lu Daolin, Di Bangrang, Li Xiangyang, Wang Shirui, Wang Shuping. 2011&. Sedimentary microfacies analysis of Fuyu oil-bearing layer of north area in Qian-an, south of Songliao Basin. Journal of China University of Petroleum, 35(6): 8~13.

Lu Fenggen. 1988&. Log sedimentology fundamentals. Well Logging Technology, 12(2): 1~9.

Luo Julan, Zhang Xin, Wang Rong. 2003&. Studying sedimentary facies in major hydrocarbon bearing intervals in sg area through logging methods. Well Logging Technology, 27(3): 233~237.

Lv Xueying, Li Xiaogang, Wang Xiaojuan, Yang Tian, Chen Shuangling, Pan Ke, Yang Xin, Zhu Deyu, Du Lulu. 2024&. Major controlling factors and quantitative probability evaluation of hydrocarbon accumulation in distal tight sandstone gas reservoirs: A case study on the gas reservoir of Middle Jurassic Shaximiao Formation in the southwestern Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 44(6): 12~22.

Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, Hu Zongquan, Liu Huimin, Gao Bo, Wang Weiqing, Zhang Zilin. 2022&. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China. Acta Geologica Sinica, 96(1): 155~171.

Morris, E. A, Hodgson, D. M, Flint, S. S, Brunt, R. L, Luthi, S. M, Kolenberg, Y. 2016. Integrating outcrop and subsurface data to assess the temporal evolution of a submarine channel~levee system. AAPG Bulletin, 100(11): 1663~1691.

Nian Tao, Jiang Zaixing, Wang Guiwen, Xiao Chenwen, He Wenjun, Fei Liyin, He Zhibo. 2018. Characterization of braided river-delta facies in the Tarim Basin Lower Cretaceous: Application of borehole image logs with comparative outcrops and cores. Marine and Petroleum Geology, 97: 1~23.

Ozkan A, Cumella S P, Milliken K L, Laubach S. E. 2011. Prediction of lithofacies and reservoir quality using well logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek field, Piceance Basin, Colorado. AAPG Bulletin, 95(10): 1699~1723.

Peng Cheng, Zou Changchun, Cao Jinyu. 2025&. Research status and development direction of well log cyclostratigraphy. Well Logging Technology, 49(2): 139~151.

Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu, Han Haodong, Yang Yiming. 2022&. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag,Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 43(6): 1292~1308.

Pirson S. J. 1970. Geologic Well-Log Analysis. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 370.

Qing Fan, Yan Jianping, Wang Jun, Geng Bin, Wang Min, Zhao Zhenyu, Chao Jing. 2020&. Division of sedimentary cycle of sandy conglomerate body and its relationship with physical properties: a case study from the upper submember of the fourth member of Shahejie Formation in Y920 block of northern steep slope zone in Dongying Sag. Lithologic Reservoirs, 32(6): 50~61.

Serra O, Abbott H T. 1980. The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy. In: SPE 9270, 55th Technical Conference, Dallas, TX, 19.

Shi Zhensheng, Jin Hui, Guo Changmin, Xie Zengye, Zhu Qiuying. 2008&. Member 2 Log Facies of Xujiahe Formation of Upper Triassic, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 19(3): 339~346.

Song Fan, Hou Jiagen, Zhang Zhen, Su Nina. 2009&. Application of log curves in indicating sedimentary micro-facies of lake facies basins. Well Logging Technology, 33(6): 589~592.

Su Yang, Lai Jin, Bie Kang, Li Dong, Zhao Fei, Chen Kangjun, Li Hongbin, Wang Guiwen. 2025&. Well logging evaluation and characterization of geological information for deep and ultra-deep drilling wells. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27

(1): 225~239.

Su Yang, Lai Jin, Dang Wenle, Bie Kang, Zhao Yidi, Zhao Xinjian, Li Dong, Zhao Fei, Wang Guiwen. 2024. Pore structure characterization and reservoir quality prediction in deep and ultra-deep tight sandstones by integrating image and NMR logs. Journal of Asian Earth Sciences, 272: 106232.

Su Yang, Lai Jin, Zhao Fei, Bie Kang, Li Dong, Huang Yuyue, Zhang Youpeng, Wang Guiwen. 2024&. Interpretation and evaluation methods of Litho-Scanner logging data and its geological application. Geological Review, 70(5): 1884~1898.

Sun Luping, Shou Hao, Zhao Xiaolong, Li Ping. 2009&. Sedimentary facies identification based on FMI imaging logging data. Well Logging Technology, 33(4): 379~383.

Tan Yuhan, Cui Shitao, Niu Wei, Ma Meng, Rui Yun, Liao Maojie, Feng Jungui. 2019&. Sedimentary micro-facies and log identification of marine shale gas reservoirs in the Lower Part of the Longmaxi Formation of Zhaotong Shale Gas Block. Well Logging Technology, 43(1): 58~63.

Tang Hong. 1998&. Identifying fluvial microfacies by synthetically using log data. China Offshore Oil and Gas (Geology), 12(5): 349~353.

Tang Weiqing, Guo Rongkun, Wang Zhongdong, Wang Hong, Luo Anying, Wu Xueping. 2001&. The study on method of depositional microfacies discrimination with well logging information. Acta Sedimentologica Sinica, 19(4): 581~585.

Tian Jingchun, Wang Feng, Zheng Qiming, Zhang Xiang, Lin Xiaobing, Liang Qingshao. 2024&. Characteristics, Distribution and Significance of Typical Marine Sand Bodies in the Paleozoic of the Three Major Basins in Western China. Mineralogy and Petrology, 44(3): 123~141.

Wang Gaiyun, Wang Liaoliang, Liu Jinping, Hu Xiaoqiang. 2013&. Sedimentary facies analysis using multiple logging data for the Lower Cretaceous in Block X. Well Logging Technology, 37(5): 557~561.

Wang Guiwen, Deng Qingping, Tang Weiqing. 2022&. The application of spectral analysis of logs in depositional cycle studies. Petroleum Exploration and Development, 29(1): 93~95.

Wang Guiwen, Zhang Xinpei. 2006&. Well logging sedimentary facies of Silurian in Tazhong area of Tarim Basin. Journal of China University of Petroleum, 30(3): 40~45.

Wang Jinrong, Liu Hongtao. 2004&. Identification of sedimentary microfacies of logging and its application. Journal of Daqing Petroleum Institute, 28(4): 18~21.

Wang Lixin, Tang Mingyuan, Li Hao, Zhou Xianbin, Huang Xuebin, Liu Shuanglian, Zhao Rui, Zhang Hui, Shen Benke, Su Yinghong. 2022&. Precise identification of sedimentary events based on logging curve analysis. Natural Gas Industry, 42(11): 50~57.

Wang Renduo. 1991&. Quantitative discrimination of sedimentary facies by use of shape characteristics of log curves. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 16(3): 303~309.

Wen Zheng, Yong Shihe, Wang Zhongwen. 1996&. Quantitative Discrimination of Sedimentary Microfacies by Using Well Log Data. Acta Sedimentologica Sinica, 14(1): 40~46.

Wilson, M. E. J, Lewis, D, Yogi, O, Holland, D, Hombo, L. Goldberg, A. 2013. Development of a Papua New Guinean onshore carbonate reservoir: a comparative borehole image (BHI) and petrographic evaluation. Marine and Petroleum Geology, 44: 164~195.

Wu Jiyu, Liu Kai. 1993&. Study on the Electrofacies, lithofacies and sedimentary microfacies of carbonate formation. Well Logging Technology, 17(3): 171~182.

Wu Wensheng, Chen Ganghua, Wang Zhongwen, Yong Shihe. 2000&. Features recognition of sedimentary structure on formation microscanner log. Well Logging Technology, 24(1): 60~63.

Wu Yongping, Xiao Lu, Zhu Bo, Yang Xun, Bai Xiaojia, Yan Bingxu, Zhang Ronghu, Li Dong, Li Hongbin, Lai Jin. 2025&. Logging evaluation of insitu stress and its effects on reservoir quality in deep and ultra-deep clastic rock. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(3): 785~796.

Wu Yuyu, Zhang Weimin, Song Benbiao, Gao Jixian, Gao Yan. 2013&. Application of Image logging in identifying lithologies and sedimental facies in Reef-Shoal Carbonate Reservoir——Take Rumaila Oil Field in Iraq for Example. Progress in Geophysics, 28(3): 1497~1506.

Xiao Chengwen, Zhao Yidi, Wu Yan, Li Xiaofeng, Liu Jing, Lu Hui. 2022&. Application of high-resolution electrical imaging logging data to clastic rocks in Hetao Basin. Well Logging Technology, 46(6): 721~728.

Xiao He, Zhang Chaomo, Su Xiangqun. 2020&. Quantitative discrimination of carbonate sedimentary microfacies by use of log data—taking the Changxing formation in Yuanba region of northeastern Sichuan for example. Science Technology and Engineering, 20(7): 2573~2582.

Xiao Yi, Zhao Jinfang. 1993&. A computer program for automatic determination of sedimentary facies from well logging data. Scientia Geologica Sinica, 28(1): 68~78.

Xu Chunming, Cronin T P, McGinness T E, and Steer B, 2009. Middle Atokan sediment gravity flows in the Red Oak field, Arkoma Basin, Oklahoma: A sedimentary analysis using electrical borehole images and wireline logs. AAPG Bulletin, 93(1): 1~29.

Xu Chunming, Gehenn J. M, Zhao Dahua, Xie Geyun, and Teng M. K. 2015. The fluvial and lacustrine sedimentary systems and stratigraphic correlation in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China. AAPG Bulletin, 99(11): 2023~2041.

Xu Chunming. 2007. Interpreting shoreline sands using borehole images—A case study of the Cretaceous Ferron sands in Utah. AAPG Bulletin, 91: 1319~1338.

Xu Yin, Xu Huaimin, Chen Lihua, Chang Lunjie, She Jiaofeng. 2013&. Application of dip logging to sedimentary microfacies division in Tazhong Area, Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 34(3): 311~315.

Yan Jianping, Cai Jingong, Zhao Minghai, Li Zunzhi, Xu Guanhua. 2011&. Application of electrical image logging in the study of sedimentary characteristics of sandy conglomerates. Petroleum Exploration and Development, 38(4): 444~451.

Yan Jianping, Yan Yu, Peng Jun, Li Zunzhi, Geng Bin, Lai Fuqiang. 2017&. The research progress, significance and relationship of astrostratigraphy with cyclostratigraphy. Lithologic Reservoirs, 19(1): 147~156.

Yang Fengli, Zhang Shanwen, Cai Juhong, Yin Xingyao, Wen Zheng. 1999&. Research on sedimentary facies, logging facies and seismic facies of meander sand body and its prediction: an example of Chengdao area in south Bohai Sea. Oil Geophysical Prospecting, 34(2): 171~179.

Yang Youyun, Wen Xiaofeng, Zhang Pucheng, Wang Pengzhi. 2005&. Sedimentary sequence identification and log responses in Yanchang

Formation, Erdos Basin. Well Logging Technology, 29(4): 341~345.
Yang Yuqing, Cui Weiping, Tian Hong. 2012&. Study of imaging logging sedimentology for clastic rocks and its application in offshore oilfields. Marine Origin Petroleum Geology, 17(3): 40~46.
Yang Yuqing, Cui Weiping, Wang Meng. 2017&. A review on the research progress and development trend of imaging logging sedimentology. China Offshore Oil and Gas, 29(3): 7~18.
Yang Yuqing, Tian Hong, Liu Yingyu, Qiao Yuedong. 2004&. Application of well logging data to sedimentary facies study in offshore oilfields. China Offshore Oil and Gas, 16(6): 377~381.
Yin Shoupeng, Wang Guiwen. 1999&. A summary of sedimentology from well logs. Advance in Earth Sciences, 14(5): 440~445.
Yong Shihe, Wen Zheng. 1995&. Quantitative discrimination of sedimentary microfacies with bayes discriminant analysis. Well Logging Technology, 13(1): 22~27.
Yu Jifeng, Fu Wenzhao, Yuan Xuexu, Yu Yong. 2010&. Research progress of logging sedimentology. Journal of Shandong University of Science and Technology, 29(6): 1~8.
Yu Minfeng, Cheng Rihui, Na Xiaohong. 2005&. Logging characteristics of main sedimentary microfacies in continental basins. Global Geology, 24(2): 182~187.
Zhang Fuming, Li Hongqi, Shao Cairui, Zhao Xiaoyan. 2003&. Application of artificial neural network pattern recognition technology to the study of well logging sedimentology. Petroleum Exploration and Development, 30(3): 121~123.
Zhang Longhai, Dai Dajing, Zhou Mingshun, Qiao Dexin, Ning Congqian, Li Chaoliu. 2006&. Application of imaging logs in studying lake basin sedimentations. Petroleum Exploration and Development, 33(1): 67~71.
Zhang Qin, Wang Guiwen, Zhu Xiaomin, Zhang Manlang. 2001&. Well logging sedimentary facies of the Jurassic in east Fukang slope of Junggar Basin. Journal of Palaeogeography, 3(3): 41~47.
Zhang Ronghu, Wang Junpeng, Ma Yujie, Chen Ge, Zeng Qinglu, Zhou Chenguang. 2015&. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep ~ buried cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China. Natural Gas Geoscience, 26(4): 667~678.
Zhang Xianglong, Liu Yicang, Zhang Pan, Wang Guiwen, Li Dong, Ma Yuan, Jiang Chengzhou, Bao Meng, Chen Kangjun, Liu Bingchang, Xie Yuqiang. 2020&. Reservoir classification evaluation and prediction in terms of sedimentary microfacies: a case study from Chang 8 section in Huanxi-Pengyang south section, Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 534~546.
Zhang Yongshu, Zhang Shenqin, Wu Yanxiong, Yang Zhi, Shi Qi, Ma Fengchun. 2019&. Study on sedimentary facies based on fmi logging and ls logging: A Case Study of Huangguamao Area, Qaidam Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 40(5): 593~596.
Zhang Zhansong, Cai Daogang, Gan Lideng. 1999&. Studying sedimentation rate by means of spectral analysis of logs. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 21(4): 18~22.
Zhao Xigang, Wu Hanning, Yang Jianjun, Wang Jinghua, Bo Guanjun. 2005&. The signature recognition of comprehensive logging parameters in sedimentary microfacies of clastic reservoirs. Geophysical Prospecting for Petroleum, 44(6): 582~588.
Zhong Guangfa, Ma Zaitian. 2001&. Sedimentary structures identified from high-resolution borehole micro-resistivity image logs. Journal of Tongji University, 29(5): 576~580.
Zhu Xiaomin. 2020#. Sedimentary Petrology (fifth edition). Petroleum Industry Press.
Zou Caineng, Qiu Zhen, Zhang Jiaqiang, Li Zhiyang, Wei Hengye, Liu Bei, Zhao Jianhua, Yang Tian, Zhu Shifa, Tao Huifei, Zhang Fengyuan, Wang Yuman, Zhang Qin, Liu Wen, Liu Hanlin, Feng Ziqing, Liu Dan, Gao Jinliang, Liu Rong, Li Yifan., 2022. Unconventional petroleum sedimentology: a key to understanding unconventional hydrocarbon accumulation. Engineering, 18: 62~78.

Research of well logging sedimentology: Origin, development and era successor

LAI Jin[1,2], YANG Xun[2], SONG Xiangyu[2], SU Yang[2], WANG Zhishi[2], HUANG Ruokun[3], ZHENG Xin[4], ZHAO Yidi[5], WANG Guiwen[1,2]

1) *National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing*, 102249;
2) *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing*, 102249;
3) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla, Xinjiang*, 841000;
4) *Institute of Petroleum Exploration & Development, Sinopec Offshore Oil & Gas Company, Shanghai*, 200120;
5) *Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Beijing*, 102206

Abstract: Well logging sedimentology research is guided by the method theory of sedimentology and petrophysics, and solves sedimentology-related problems through different logging sequences. In order to better interpret the sedimentological information contained in well logging data, add vitality to well logging sedimentology research and eliminate its typical research misconceptions, this paper combining the literature of recent decades and the author´s own work practice, elaborates on the origin, development and contemporary significance of well logging sedimentology. Firstly, the concept of well logging sedimentology, its development and research status are briefly reviewed. By combing the conventional logging sequences such as GR, SP and RT, which are more sensitive to markers of sedimentary facies, conventional well log facies elements, dip vector model and image log facies model and their corresponding relationship with sedimentary facies are analyzed, and the research contents and method flow of well logging sedimentology are summarized. On this basis, the application of geophysical well logging data in lithology discrimination, sedimentary structure discrimination and paleo-flow system recovery is analyzed. The facies markers reflecting different sedimentary microfacies can be extracted through the combination of conventional logs and image logs, and the process and matters needing attention for automatic logging discrimination of sedimentary microfacies are pointed out, and the fine description and evaluation process of vertical sedimentary microfacies superimposed sequences combined with logging and geology are summarized. Finally, the contemporary significance and development direction of well logging sedimentology research are pointed out in combination with historical missions of oil and gas exploration and development. The research results are expected to promote the further cross application between logging and sedimentary disciplines, and promote the theoretical progress of well logging sedimentology methods and the practical application of research results.

Keywords: well logging sedimentology; geophysical well logs; sedimentary geology; well log facies; sedimentary microfacies; sedimentary sequence

Acknowledgements: This study is supported by National Science and Technology Major Project of China (No. 2025ZD1400307), National Natural Science Foundation of China (No. 42002133), Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (No. 2462023QNXZ010).

First author: LAI Jin, male, born in 1988, Ph. D, professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology; Email: laijin@cup.edu.cn

Corresponding author: WANG Guiwen, male, born in 1966, Ph. D, professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology; Email: wanggw@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2025-01-23; Accepted on: 2025-08-04; Published online on: 2025-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.08.001　　**Edited by**: LIU Zhiqiang