

引用本文:何发岐,朱建辉,齐荣,等.基于天文周期等时格架预测细粒沉积岩相展布——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系长 7 段为例[J].石油实验地质,2024,46(5):927-940.DOI:10.11781/sysydz202405927.

HE Faqi, ZHU Jianhui, QI Rong, et al. Prediction of fine-grained sedimentary lithofacies distribution based on astronomical cycle isochronous lattice: a case study of Triassic Chang 7 member of Fuxian area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 927-940. DOI: 10.11781/sysydz202405927.

基于天文周期等时格架预测细粒沉积岩相展布

——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系长 7 段为例

何发岐¹, 朱建辉², 齐荣¹, 武英利², 缪九军², 姜龙燕¹, 王东燕², 陈现²

1. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450006;

2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

摘要:预测陆相不同类型岩相厚度分布是陆相页岩油富集区带优选评价的基础工作, 以此开展的不同类型岩相含油条件、储集条件以及可动条件的研究, 对靶区优选和水平井段方向部署有着重要的作用。以岩心观察与测井识别为基础, 开展测井资料的频谱分析, 引入稳定的天文轨道时间周期, 进行时空调谐, 建立钻井对比的高频层序等时格架, 定量计算每个层序旋回内不同类型岩相厚度的平面变化趋势, 认识岩相展布规律。针对鄂尔多斯盆地南部富县地区三叠系延长组 7 段的研究表明, 自然伽马测井曲线包括了若干组天文周期信息, 其中可以识别出 6 个完整的稳定 405 kyr 长偏心率天文周期旋回, 以 R203 井长 7 段全岩心段观察和测井相特征分析为基础, 合理建立高频等时格架进行井间对比。结果表明, 泥页岩和纹层页岩主要发育长 7₃ 亚段到长 7₂ 亚段的底部旋回地层, 细砂岩、粉砂岩在长 7₂ 亚段中上部到长 7₁ 亚段底部的 IV—V 旋回地层中最为发育; 井间横向对比表明, 早期旋回的泥页岩和纹层页岩相广泛分布, 旋回 I 时期主要分布在研究区西南部, 旋回 II 时期分布在西部和东—东北部, 中部地区局部较厚, 而 IV—V 旋回地层的细砂岩厚度分布由北东—南西的沉积体系控制, 平面上呈北—北东往南—南西展布, 往西南延伸到 ZF27—ZF32 井一线, 形成了长 7 段 3 种源储组合类型。其中纹层页岩与细砂岩岩相配置组合为长 7₃ 亚段中上部与长 7₂ 亚段中上部—长 7₁ 亚段下部层系组合, 平面上主要分布在富县地区的中部—北、北东部; 页岩岩相厚度发育较好的为长 7₃ 亚段, 平面上主要分布在富县地区的北东—东部、西南部区域。

关键词:岩相; 米氏旋回; 长偏心率; 等时格架; 延长组; 三叠系; 富县地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz202405927

Prediction of fine-grained sedimentary lithofacies distribution based on astronomical cycle isochronous lattice:

a case study of Triassic Chang 7 member of Fuxian area, Ordos Basin

HE Faqi¹, ZHU Jianhui², QI Rong¹, WU Yingli²,

MIAO Jiujun², JIANG Longyan¹, WANG Dongyan², CHEN Xian²

1. SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China

Abstract: Predicting the thickness distribution of different types of continental lithofacies is a fundamental task for selecting and evaluating continental shale oil-rich zones. Research on oil-bearing conditions, reservoir characteristics, and mobility of different types of lithofacies plays an important role in target area selection and the deployment of horizontal well sections. Based on core observation and logging identification, spectrum analysis of logging data was carried out. Stable astronomical orbital time cycles were introduced to perform spatio-temporal tuning. A high-frequency sequence isochronous lattice for drilling well comparison was established and the planar thickness variation trends of different types of lithofacies in each sequence cycle were quantitatively calculated,

收稿日期 (Received): 2023-11-08; 修订日期 (Revised): 2024-08-22; 出版日期 (Published): 2024-09-28.

作者简介: 何发岐 (1967—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事石油地质综合研究及油气勘探开发研究。E-mail: hefq.hbsj@sinopec.com.

通信作者: 朱建辉 (1970—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气勘探研究。E-mail: zhujh.syky@sinopec.com.

基金项目: 中国石化科技部项目 (P22179) 和中国石化重大项目 (P23229) 联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

providing insights into lithofacies distribution patterns. Research on the 7th member (Chang 7) of Triassic Yanchang Formation in the Fuxian area of the southern Ordos Basin showed that the natural gamma logging curves contained several sets of astronomical cycle information, among which 6 complete stable 405 kyr long eccentricity astronomical cycles could be identified. Based on the observation of the whole core section of Chang 7 member in well R203 and logging facies characteristics analysis, a reasonable high-frequency isochronous lattice was established for well-to-well comparison. The results showed that mud shale and laminated shale mainly developed in the bottom cyclic strata from Chang 7₃ to Chang 7₂ sub-member, and the fine-grained sandstone and siltstone were mostly developed in strata of cycles IV to V from the middle and upper parts of Chang 7₂ to the bottom of Chang 7₁. Lateral comparison between wells showed that the mud shale and laminated shale lithofacies in the early cycles were widely distributed. During cycle I period, these facies were mainly distributed in the southwest of the study area, and during cycle II period, they were distributed in the west and east-northeast, with thicker storage in the central area. The fine-grained sandstone thickness distribution in strata of cycles IV to V was controlled by a northeast-southwest sedimentary system, with a planar distribution from the north-northeast to the south-southwest, further extending to the southwest along wells ZF 27 to ZF 32. Three types of source and reservoir combinations were formed in Chang 7 member. The combination of laminated shale and fine-grained sandstone lithofacies occurred from the middle and upper parts of Chang 7₃ and Chang 7₂ sub-members to the lower part of Chang 7₁ sub-member, primarily distributed in the central-north, north, and northeast parts of the Fuxian area. The shale lithofacies thickness was well developed in Chang 7₃ sub-member, mainly distributed in the northeast, east, and southwest regions of the Fuxian area.

Key words: lithofacies; Milankovitch cycle; long eccentricity; isochronous lattice; Yanchang Formation; Triassic; Fuxian area; Ordos Basin

近年来,鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组7段的油气勘探取得了重大突破,发现了庆城油田、新安边油田两个十亿吨非常规页岩油资源基地^[1-2],带动了对长7段更加深入的认识和评价。早期主要将长7段作为烃源岩发育层系来研究^[3-4],特别是长7₃亚段的“张家滩页岩”,在南部延长组沉积区测井均表现为高自然伽马、高声波时差、低密度以及高电阻率等稳定的特征^[5-6],可将这套页岩、油页岩层系作为全区可对比的区域标志层^[7];并以中生界油气资源评价为目的,从多个角度评价了其烃源岩品质、生排油能力^[8-9],聚焦在长7段的有机质丰度、类型、来源以及形成环境等研究,但对其间所夹泥岩、粉砂岩、细砂岩等岩相的沉积环境、形成条件、控制因素以及纵向演化特征和横向展布变化等研究较少。

随着勘探开发技术的进步,目前已经在长7段以细砂岩为主的夹层中获得了高产油气^[2],也进一步在长7₃亚段页岩层系中获得突破^[2,10]。勘探开发方面的进展不仅提出了对整个长7段沉积环境演化、烃源岩发育情况的深化认识的需求,还需要进一步从纵向和横向上细化长7段不同区域岩性、岩相组合,这是不同区带长7段页岩油(致密油)勘探开发一体化评价中选区、选层、选甜点的

重要的基础地质问题。

区域上,长7段主要在定边—吴起—志丹的陕北地区、环县—庆城—合水的陇东地区取得了勘探突破,这些地区处于延长期湖盆沉积的北东部和湖泊中心的深湖部位。而位于湖盆周边的富县、彬长、旬邑以及西南的镇泾等地区,目前仅多见油气显示而未有突破,且勘探程度较低、认识程度也较低。东南部富县地区虽然钻遇长7段的钻井较多,但前期未将该段作为主要勘探层系,并未对长7段的岩相演化和平面展布进行深入研究。2021年以页岩油为勘探方向,在研究区中部开展R203井的长7段百余米系统全取心,提供了研究区长7段岩性岩相发育的基础实物资料。因而,本文以该井为依托,开展长7段岩心观察、描述,结合测井特征,判识沉积微相,建立研究区不同类型岩相的定量识别方案,并以此划分纵向岩相类型;然后,依托该井自然伽马测井资料,开展频谱分析,引入米兰科维奇提出的地球轨道周期变化参数,通过滤波和调谐,识别长7段地层高频旋回,建立横向井间对比的高频等时格架,合理预测长7段不同亚段、不同类型岩相厚度的横向展布,以期为该页岩油(致密油)选区、选甜点的勘探开发部署方案的制定提供依据。

1 地质背景

晚三叠世期间,鄂尔多斯盆地南部地区经历了一个长期的内陆拗陷湖盆发育阶段,随着南部秦岭往北推覆、西缘关闭挤压^[11-12],以及基底古隆起格局的影响,延长组沉积时期整体为近北西—南东的陆相大型湖泊沉积环境,构造总体较为平稳。延长期由下而上沉积了长10—长1段,在区域构造环境影响下,不同层段沉积时期湖泊沉积中心呈东西迁移。现今延长组残留结构特征略呈北东—南西的平缓近对称变化(图1b),地质历史时期随着盆地基底沉降中心的变化,在长9、长7和长4+5段沉积时期分别形成了3个最大湖泛面,不同时期湖泊中心位置以及湖泊深水区影响范围均有不同^[13],湖平面变化和深水区的变化控制和影响了不同层段的沉积岩性组合。长3—长1段沉积时期,湖泊沉积往北东方向萎缩,演化为早侏罗世的河流和沼泽环境。

延长期拗陷湖盆沉降沉积中心的长轴一直呈北西—南东走向^[14];侏罗纪—白垩纪的构造运动导致沉降沉积中心东西方向的横向迁移。西—西南缘多发北东、北西向共轭断裂控制着陡坡带走向和结构变化,北东、东南缓坡带经历了多次构造抬升,东南地区抬升幅度最大,现今延长组底界埋深约为800~1500 m,但较大规模的断裂发育程度较

低。长7期是延长期湖盆发育鼎盛时期,湖平面覆盖范围大,水体深,其中长7₃期为最大湖泛面时期,形成了可横向对比的“张家滩页岩”的区域标志层。长7期,西—西南到东—东北略不对称结构控制了湖盆周缘的物源供给,形成了来自西、西南、北、东北、东南5个方向的沉积体系(图1a),西、西南来自六盘山等地区物源越过古隆起^[14],往东形成了扇三角洲—重力流沉积体系,直接影响着陇东、合水地区延长组沉积组合;北东—东南地区物源主要来自陕北—安塞等抬升剥蚀区^[15],往西形成了水下三角洲沉积体系,影响了广阔的东缘缓坡地区。横向上,由西到东为陡坡扇三角洲—深湖重力流—缓坡三角洲沉积体系(图1b)。

目前揭示的长7段岩性变化,在不同地区略有不同,但总体以细粒岩为主。与湖盆的西缘和中部多发育重力流沉积体系的沉积构造和岩性组合不同,东南部(富县地区及周缘)和北东部地区长7段主要受缓坡结构环境下的水下三角洲体系控制;沉积构造特征主要表现为三角洲前缘环境中多发育块状、平行层理、波状层理、斜层理等,前三角洲—深湖环境中多发育水平层理、块状层理、纹层结构,结构特征相对简单;主要岩性为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和页岩等,与西、西南缘形成较大差异的岩相组合。综合表明,虽然东南部地区(如富县地区,图1c)沉积构造与

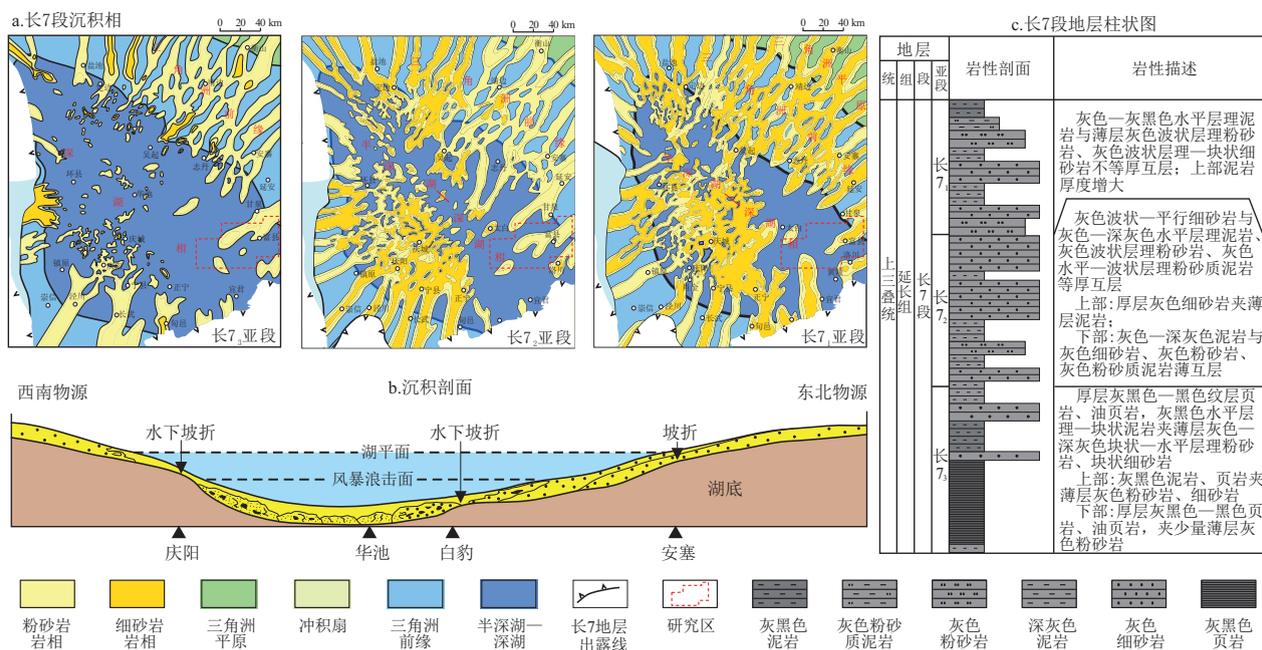


图1 鄂尔多斯盆地三叠系长7段各亚期沉积相和东西向沉积剖面以及研究区长7段地层柱状图

a-b 图据参考文献[14]修改。

Fig.1 Sedimentary facies of each sub-stage, east to west sedimentary cross section, and stratigraphic column of Triassic Chang 7 member, Ordos Basin

岩性较为简单,但长7段纵向上岩性变化较大,厚度在百米左右。下部长7₃亚段以灰黑色—黑色纹层状、水平层理以及块状泥页岩为主,夹有薄层的粉—粉细砂岩;中部的长7₂亚段由下而上逐渐由厚层块状、水平层理的深灰色泥岩过渡到厚层波状—平行—块状层理交互的灰色细砂岩,单层泥岩厚度由下往上逐渐减薄,单层砂岩厚度逐渐增大,粉砂岩发育于过渡段;上部长7₁亚段的下部岩相特征为长7₂亚段顶部的继续性发育,由下而上,又从厚层细砂岩逐渐过渡到上部的薄层层理状泥岩、粉砂岩和细砂岩互层。平面上,受沉积环境、沉积体系展布的控制,不同区带存在岩相组合横向变化,这种变化在富县地区变化较大。这不仅对深化认识研究区内长7段的沉积环境演化提出了更细致的要求,同时也是评价长7段源储组合配置的厚度、叠合关系的重要工作之一。因而,通过细致描述长7段岩性岩相纵向发育特征,在建立纵向岩相变化序列的同时,还需要避免钻井中亚段分层的人为因素,开展高频层序地层划分和对比,建立高频等时格架,明确各亚段不同岩相的横向变化,预测不同区带的主要源储组合,为不同区带长7段页岩油(致密油)选区和甜点评价以及勘探开发部署方案的制定提供依据。

2 原理和方法

传统地层层序划分是以不整合面为标志,以基准面升降^[16]、海平面升降^[17]作为依据,建立等时地层层序。这种方法在低级别层序(超级—三级层序)划分上效果较好,因为在大尺度上能找到较为明确的层序边界,但是针对小于50万年的高频层序变化,尤其是准层序(四级—六级层序)划分上,由于岩性组合变化频繁,层序边界不是很明确,缺乏确定性判识标志,划分过程多有人为因素,导致判断随意和划分不统一。勘探生产上所采用的段、亚段、小层划分,多依据地层层序和岩性组合综合判断,等时效应较为模糊,以此建立对比格架,可能导致在岩相展布、微相展布、沉积演化分析上形成较大的误差,影响勘探评价和部署。

20世纪40年代米兰科维奇^[18]提出地球轨道周期变化,建立了米氏旋回理论;HAYS等^[19]通过南印度洋钻孔有孔虫氧同位素分析,验证了旋回的存在。此后,众多学者相继应用该旋回理论开展了天文时间精确定年^[20]、建立各时代地层的沉积旋回^[21],以此弥补地层沉积旋回研究中高频层序格架建立的不足。具体手段上多利用相关的频谱分

析、小波分析^[22-25]等算法,开展地层沉积旋回中天文周期定量识别工作,也对应开发了一系列相关分析软件^[22,26]。

米兰科维奇天文周期理论的核心是对地球轨道三参数偏心率、斜率、岁差变化周期的确定,认为地球轨道参数周期性变化导致了太阳对地球日照辐射量的周期性变化^[26],从而引起地球古气候周期性变化,进而影响沉积环境和沉积过程,这个沉积环境和沉积过程的变化被记录在地层中。根据米兰科维奇旋回的定义,偏心率周期到岁差周期大约约束了小于40 Ma的天文周期变化^[26],这为通过识别地层中地球轨道天文周期,划分高频层序地层提供了基础。研究认为,由于太阳系中木星质量稳定不变的缘故,地球轨道周期中长偏心率405 kyr的周期是非常稳定的^[27-28],因而,将地球轨道的天文时间周期通过调谐,识别出地层空间上的旋回变化周期,就能较好地建立地层高频等时层序,提供盆地间、井间同层系的对比高频等时格架。

所谓天文调谐,就是将地层替代性指标的变化校准到地球轨道周期的偏心率、斜率、岁差的目标曲线上^[27]。这里的替代性指标,就是指研究目的地层可供标识的数据资料,如测井资料等。按照上述原理,古气候变化是建立天文时间周期和地层空间旋回之间的桥梁,替代性指标所采用的如地层沉积记录(包括反映地层沉积记录的相关信息)要能较好反映包括古气候在内的沉积环境变化。目前,对于陆相湖泊沉积记录,多采用自然伽马测井资料作为替代性指标。因为自然伽马数值变化与岩性变化存在强相关性,而岩性变化的直接控制因素就是沉积时期古环境的变化^[29]。

针对R203井长7段,利用Acycle时间序列分析软件包,选择自然伽马测井资料为古气候替代数据,开展频谱分析、天文调谐。Acycle软件是个开源包,在MATLAB环境中运行,是一种时间序列分析软件,用于评估、检测和过滤古气候中的天文周期信号,并通过最大化天文解的功率谱与古气候序列之间的相关系数,来估计最可能的地层沉积速率的变化。主要用于特定的古气候学和旋回地层学分析^[26]。运行该软件的主要步骤如下:

(1)对GR测井曲线预处理。包括通过插值形成资料采样密度一致性;采用去除异常、孤立的采样点等能提高信噪比。

(2)对GR测井曲线进行去趋势处理,消除低级地层层序,即大尺度沉积环境周期在替代性指标中的影响。这是因为替代性指标(如GR测井曲

线)的地层旋回叠加了多种级别周期古气候的影响,尽可能消除低级层序(一级—三级)古气候周期的影响,将沉积记录对比到地球轨道参数变化曲线上,才能更好地开展天文调谐工作。

(3)对GR测井曲线进行频谱分析。就是按照时间序列的信号,将地层替代性指标信号,按频率顺序展开,形成连续窗口的不同频率在时间域上的变化。

(4)对GR测井曲线展开的时间域频率谱进行滤波。就是对这个时间域上不同频率的变化进行特定波段频率的过滤操作,提取目标频率信号。

(5)对过滤信号进行天文调谐。就是将过滤出的天文周期时间曲线对比到地层的替代性指标上,建立等时层序格架。

2022年,中国石化华北油气分公司在富县地区中部的羊泉三维区钻探了R203井,对长7段开展了全取心,取心井段深度大约在587~695 m,长度约为108 m。本文在完成全井段连续、完整岩心的系统观察和取样,详细描述了岩性、结构特征,建立了该井段岩性、结构特征与自然伽马、声波时差、密度、电阻率测井资料等的对应关系,分辨了不同岩性、岩相组合的测井特征,建立富县地区长7段不同岩相识别的测井定量模板(表1)。测井资料采样间隔为0.125 m。

利用此方法识别地层沉积天文旋回特征的重要参数是长7段顶、底界的地质绝对年龄的确定。根据延长组划分沿革,一般学者认为长7—长10段属

于中三叠统,长7期属于中三叠世末期^[7];而油田上普遍采用整个延长组均为上三叠统的意见。也有学者提出长10—长8期的持续时间为228~216.5 Ma,长7—长2期的持续时间为216.5~203.6 Ma^[30]。本文采用的绝对年龄依据2012年的国际地层年代表,认为延长组沉积持续时间大约27 Ma,应该为晚三叠世时期,长7段沉积持续时间约2.5~2.7 Ma,其中值绝对年龄约为215 Ma;粗略估算,富县地区长7段平均沉积速率应该在4.5~5 cm/kyr左右,虽然有些误差,但误差不影响本文对长7段天文节律周期的计算。

3 沉积环境演化和岩相特征

目前富县地区揭示长7段的钻井有数百口,依据揭示的埋深、厚度以及地震反射等资料,现今区内构造变化平缓,长7段底界埋深由东南往西北逐渐缓慢变深,由700多m变化到1200m左右;地层厚度从东—北东往西—西南逐渐变厚,厚度变化不大,总体上由近100m变化到130~140m左右;地震反射特征基本上反映出该特点。区内不发育具有明显规模断距的断层,导致在地震反射界面上较难识别出断层,但钻井岩心可见明显的裂缝和微裂缝发育。总体表现为构造、结构平缓变化,厚度横向渐变,现今厚度与埋深平面上呈“剪刀叉”变化。宏观区域背景研究表明^[14],富县地区长7期受来自北东方向安塞三角洲沉积体系的控制,总体上处于三角洲前缘亚相沉积环境。

表1 鄂尔多斯盆地富县地区R203井长7段岩相识别指标模板

Table 1 Lithofacies identification index template for Chang 7 member in well R203 of Fuxian area, Ordos Basin

岩相划分	测井相		岩相连续性	分布	沉积相
	参数:最小值~最大值/平均值	形态			
块状细砂岩岩相	GR/API:80~110/100 AC/(μs/m):230~260/240 DEN/(g/cm ³):2.35~2.50/2.43	齿化— 低幅指状箱形	连续厚层	长7 ₂ 亚段上部 (顶部)—长7 ₁ 亚段下部(底部)	水下河道微相
层理状细砂岩岩相	GR/API:60~100/80 AC/(μs/m):190~240/220 DEN/(g/cm ³):2.4~2.6/2.5		块状单层厚度 大于0.8 m		
夹细砂粉砂岩岩相	GR/API:80~125/105 AC/(μs/m):210~280/225 DEN/(g/cm ³):2.45~2.65/2.55	齿化漏斗型为主	细砂岩厚0.5~1 m; 泥岩厚0.5~2 m; 粉砂岩厚0.2~1 m	长7 ₂ 亚段中部, 长7 ₁ 亚段中部	河口坝微相, 分支间湾微相
粉砂岩岩相	GR/API:90~130/110 AC/(μs/m):200~250/220 DEN/(g/cm ³):2.52~2.64/2.55	齿状(薄互层)— 指状(厚层)交互	连续厚层,或薄互 层、粉砂岩单层厚 0.5~0.7 m	长7 ₂ 亚段中部, 长7 ₁ 亚段上部	河口坝微相
泥岩岩相	GR/API:90~150/115~135 AC/(μs/m):215~295/235~265 DEN/(g/cm ³):2.49~2.64/2.52~2.61	齿化平直	连续	长7 ₂ 亚段下部, 长7 ₁ 亚段中下部, 长7 ₁ 亚段中部	分支间湾微相, 半深湖亚相, 前三角洲亚相
层理泥页岩岩相	GR/API:110~160/135 AC/(μs/m):305~340/320 DEN:2.4~2.48/2.43	齿化箱形,纹层 状页岩要比水平 理状页岩GR值高、 DEN值低	连续	长7 ₂ 亚段中上部, 长7 ₁ 亚段下部	半深湖— 深湖亚相
纹层页岩岩相	GR/API:125~220/175 AC/(μs/m):290~330/310 DEN/(g/cm ³):2.27~2.45/2.37				

3.1 岩石学特征

R203 井所揭示的 108 m 长 7 段,生产单位提供了亚段分层方案,底部(695~666.2 m)为长 7₃ 亚段,以灰黑色—黑色泥页岩为主,其中夹有薄层粉细砂岩、泥质粉砂岩;中部(666.2~610.28 m)为长 7₂ 亚段,发育细砂岩、粉砂岩、泥岩,与少量薄层页岩呈不等厚互层,由下往上,从黑色、灰黑色泥页岩过渡到块状、层理状细砂岩;上部(610.28~587 m)为长 7₁ 亚段,发育细砂岩、粉砂岩、泥岩薄互层,由下而上是互层组合,顶部以高 GR 特征突变为标志层,为长 7 段与长 6 段的分层界线。总体上,发育岩性特征比较简单,主要有 6 类,即细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和页岩。

细砂岩集中发育于长 7₂ 亚段的上部,埋深约为 607~624 m,其他层段均以薄层为主,夹在粉砂岩、泥岩中,以灰色、灰白色为主,也是 R203 井油气显示最多、级别最高的岩性段。细砂岩主要呈块状、平行—交错层理 2 种沉积构造,对应是强—较强水动力条件和物源供给充足。块状结构主要发育于 607~612 m 埋深段,颗粒分选、磨圆好,成分成熟度高;612 m 埋深以下为平行层理和波状交错层理发育段,表明了水动力条件发生了一定程度的改变,夹杂了更细颗粒的泥质薄纹层,在层理状细砂岩组分含量检测中泥质组分往往偏高。粉砂岩—泥质粉砂岩主要以薄层为主,颜色多为深灰色和灰黑色,在长 7₂—长 7₁ 亚段均有发育。在长 7₃

亚段中下部,其多呈薄层发育,且层理构造较为丰富,波状层理、斜层理发育,局部可见似包卷层理、水平层理,与泥岩薄互层、层理发育等特征表明,较强—较弱的水动力条件频繁交替变化,物源供给不足,组分中泥质含量高。泥岩为灰黑色—深灰色,在长 7₁ 亚段中部多为薄层,并与泥质粉砂岩互层;长 7₂ 亚段的中下部以厚层为主,中部为薄层与泥质粉砂岩、粉砂岩互层,沉积构造多为块状和水平层理。页岩主要发育在长 7₃ 亚段的中上部,纵向连续性好,连续厚度可超过 10 m,灰黑色—黑色,下部与泥岩薄互层,夹有薄层泥质粉砂岩、粉砂岩;岩性的变化反映出长 7₃ 期异于长 7₁—长 7₂ 期的水深、水动力条件以及物源供给。另外该井也与湖泊中心地区城页 1 井、南部深水彬 1 井^[31] 岩性组合存在明显差异,表明富县地区在长 7 段沉积时期,并不是湖泊深水发育区。依据系列样品的 X 衍射全岩组分分析,长 7 段主要为富硅长石—石英细砂岩—泥页岩(图 2),碳酸盐矿物含量很少,绝大多数不足 5%,少部分样品的含量超过 10%,各亚段在富硅—富泥组分之间变化。其中,细砂岩的长英质组分含量一般略高于泥质组分,而泥页岩呈相反特征。

3.2 沉积微相演化与岩相划分

综合岩性、沉积构造及其组合关系,R203 井长 7 段沉积时期由早到晚为半深湖(局部深湖)—三角洲前缘沉积环境。长 7₃ 期为半深湖—深湖亚相环境,晚期是深湖相发育的鼎盛时期;长 7₂ 期为半

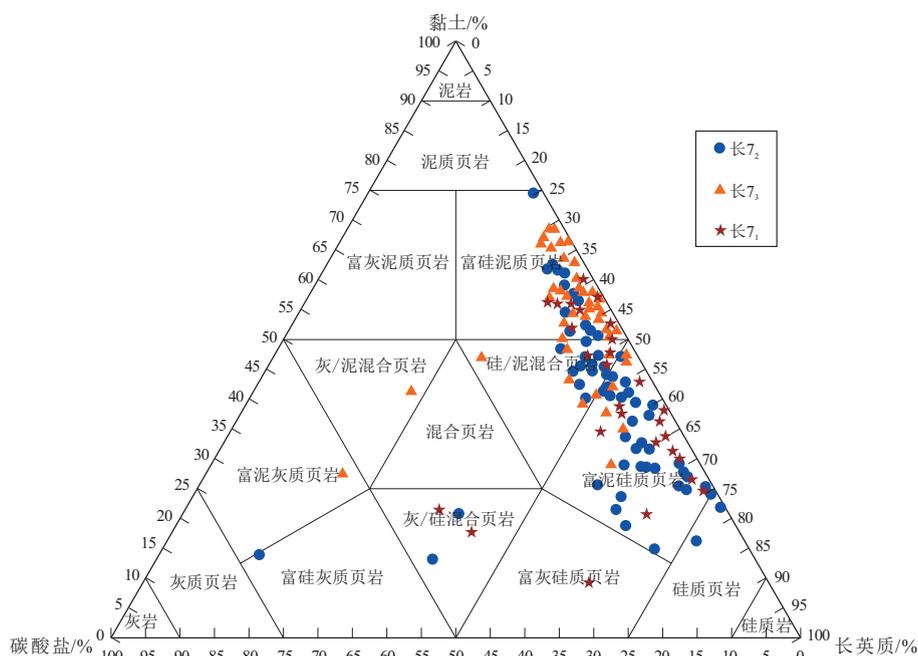


图 2 鄂尔多斯盆地富县地区 R203 井三叠系长 7 段不同亚段全岩组分三角图

Fig.2 Ternary diagram of whole-rock components in different sub-members of Triassic Chang 7 member in well R203 of Fuxian area, Ordos Basin

深湖—前三角洲—三角洲前缘亚相环境;长 7_2 晚期—长 7_1 早期是三角洲前缘环境发育的鼎盛时期。依据岩性、结构和构造特征,三角洲前缘亚相主要发育了水下河道、分支间湾以及河口坝3类微相,为厚层细砂岩,或为细砂岩夹薄层、薄互层粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩等多种岩性组合;前三角洲亚相主要发育远砂坝微相,岩性组合为前三角洲中厚层泥岩,或粉砂岩、泥质粉砂岩与泥岩薄互层;半深湖—深湖亚相环境主要发育纹层状—水平层理泥页岩,局部为席状砂微相,多呈泥岩、席状砂薄互层出现。

将全取心资料提供的岩性识别与测井资料进行对应,在沉积亚相、微相分析基础上,建立岩相—测井相—微相的对应关系,选择自然伽马、声波时差、密度三类测井资料,优化定量组合,给出了测井识别指标,划分 R203 井长 7 段的 7 种岩相类型(表 1),这些指标可为富县地区识别长 7 段岩相类型提供参考模板。

(1)水下河道微相发育的块状、层理状细砂岩岩相。连续发育的细砂岩岩相主要位于长 7_2 亚段的中上部—长 7_1 亚段的下部,沉积于物源供给充足、受水下河道控制的沉积环境,水体动能较强,存在块状和平行—波状层理 2 种结构。其中块状细砂岩的粒序较为均匀,反映了充分的分选和淘洗;而平行—波状层理的细砂岩反映出动能环境存在一定的动荡变化,导致粒序变化大,夹有泥质薄纹层层理,其对应的自然伽马呈低值、声波时差呈中高值、密度测井为低值的“一高二低”特征,主要以低自然伽马值和低密度值与其他砂岩区分,测井曲线形态上多表现为齿化—低幅指状的箱形。R203 井的长 7_2 亚段中上部—长 7_1 亚段下部表现出较好的连续性,而在长 7_2 亚段下部为中—薄互层。

(2)河口坝—分支间湾微相发育的夹细砂粉砂岩岩相、夹薄泥岩的粉砂岩岩相。该岩相主要围绕水下河道微相周缘展布,受水下河道横向摆动的影响,河道横向摆动形成了纵向上河道沉积环境往河口坝、边滩以及分支间湾沉积环境的转变;微相沉积环境变迁也改变了水体的动能环境,形成了纵向粒序的频繁变化,表现为细砂岩—粉砂岩—泥岩纵向上频繁薄互层。河口坝微相主要沉积了细砂岩、粉砂岩,动能环境较高段的层理构造发育,平行、波状、交错以及水平层理与不同岩性组合配置,形成了自然伽马中—高、声波时差中—低以及密度测井较高的特征,测井曲线形态为齿化漏斗型;动能环境较低段的成分成熟度和结构成熟度均较低,

多为粉砂岩和泥岩互层,测井曲线形态多为齿状—指状交互。其主要区分标志为自然伽马总体值中等、密度值较高。此岩相组合主要分布在长 7_2 亚段的中下部、长 7_1 亚段的上部。

(3)前三角洲亚相发育的夹薄层粉砂岩的泥岩岩相。该岩相是深湖亚相往三角洲前缘亚相的过渡,以泥岩为主,其特点是夹薄层粉砂岩,所以该岩相与半深湖环境中的泥岩岩相较难区别;自然伽马值表现为中—高值,密度测井值相对其他岩性是最高的,可以用自然伽马与密度测井组合判断,在长 7_3 亚段下部、长 7_2 亚段中下部连续性较好。

(4)半深湖—深湖亚相发育的纹层—层理结构的页岩—泥页岩岩相。在较大水深、物源供给不充足、水体环境较为稳定条件下,形成了以黑色—黑灰色页岩、泥岩为主的岩性组合,其中黑色页岩主要发育在长 7_3 亚段中上部,而黑灰色—黑色泥页岩主要发育在长 7_3 亚段的中下部和长 7_2 亚段的底部;沉积构造为水平层理、纹层等特征,其对应的自然伽马高幅、声波时差高值、密度测井低值的“二高一低”特征。发育于长 7_3 亚段中上部的这套黑色页岩是盆地南部地区区域可对比的标志层,是长 7_3 期湖平面最高时形成的广泛分布的“张家滩页岩”^[7]。

综上所述,富县地区长 7 段岩相变化明显受沉积环境变化的控制,以深水环境为主,导致沉积颗粒较细。纵向上由泥页岩为主转变到以细砂岩为主,反映了长 7 段由深湖—半深湖到水下三角洲前缘亚相的转变。长 7_3 亚段沉积中晚期为水深最大时期,也是湖平面最高时期;长 7_2 亚段沉积晚期到长 7_1 亚段沉积早期为水下三角洲前缘发育较盛时期,此时物源供给较充足,局部细砂岩连续好;其余时期为半深湖亚相到水下三角洲前缘亚相之间的过渡环境,泥岩、粉砂岩与细砂岩薄互层是主要岩性组合特征。

4 高频层序地层等时格架建立

4.1 基于米氏旋回的高频层序划分

依据前述的原理和方法,结合 R203 井的沉积微相演化和岩相组合变化分析,利用 Acycle 时间序列分析软件,以 R203 井自然伽马测井为替代指标,计算 583~700 m 的长 7 段天文旋回。

Acycle 软件提供了 405、125、95、33.8、22.2、18 kyr 等从长偏心率到岁差的地球轨道周期^[32]的时间标尺,数值相比较关系为 1 : 0.308 642 : 0.234 568 :

0.083 457 : 0.054 815 : 0.044 444; 按照米氏理论^[18], 其中的长偏心率周期 405 kyr 相对较为稳定, 而 125、95 kyr 的短偏心率周期以及 33.8 kyr 斜率周期、22.2 kyr 及以下的岁差周期受到地球纬度差异的影响, 表现出了不同地区周期时长的差异。

选择前述的长 7 段持续沉积时间、地层绝对年

龄中值参数, 结合沉积速率计算(图 3a), 对自然伽马测井数据进行去趋势处理(图 3b), 消除宏观周期地质作用的影响。然后对去趋势后的自然伽马测井数据进行频谱分析, 可以得到若干高功率峰值, 这些高功率峰值均对应了某个旋回频率变化(图 3c)。取置信度超过 95% 的峰值分别对应的

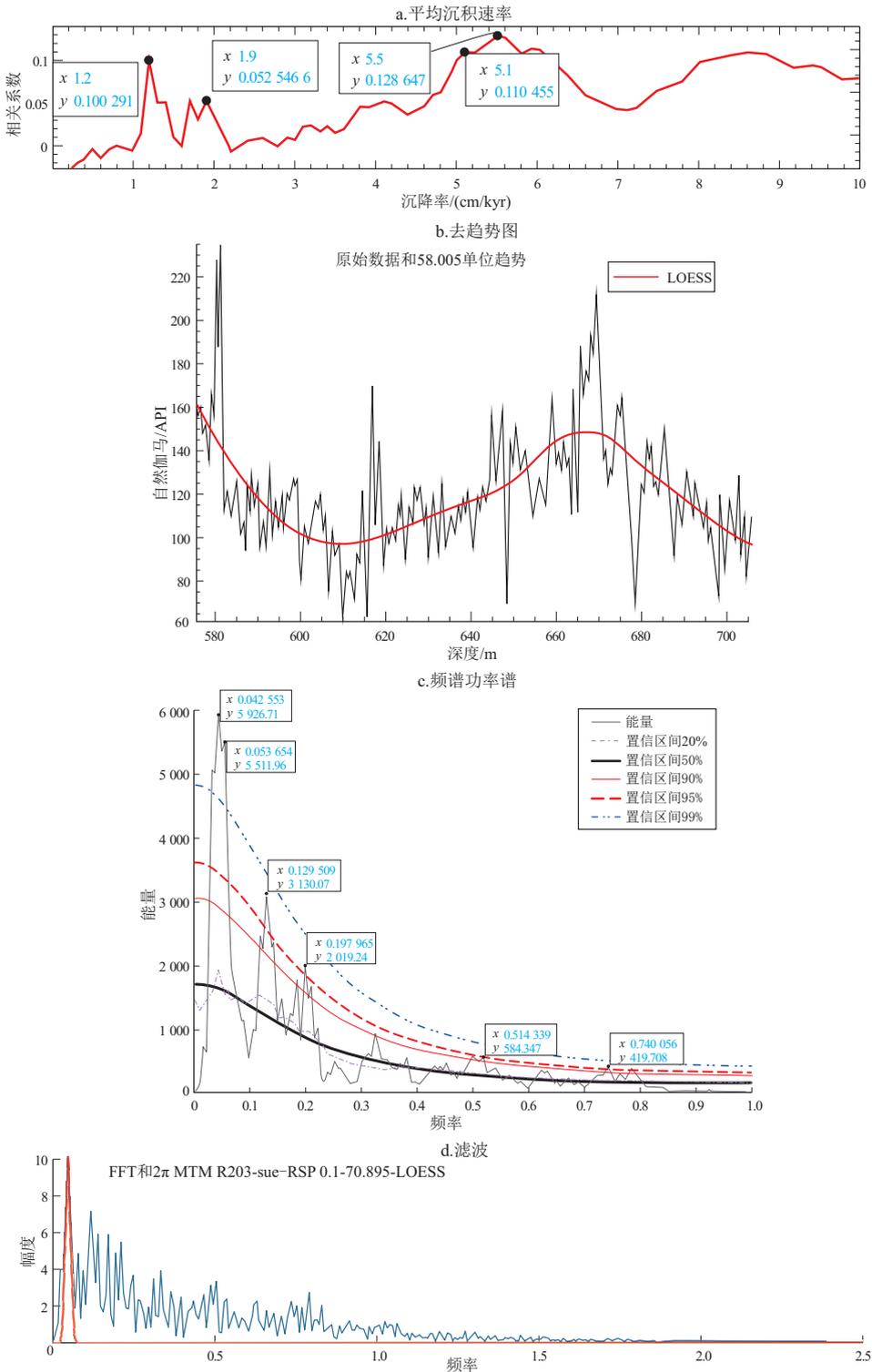


图 3 鄂尔多斯盆地南部富县地区 R203 井自然伽马曲线频谱分析

Fig.3 Spectral analysis of natural gamma curves in well R203 of Fuxian area, southern Ordos Basin

0.042 553、0.053 654、0.129 509、0.197 965、0.514 339、0.740 056、0.782 609 等频率值,为频谱分析得到的主要的地层旋回周期信号。依据选择的 Acycle 软件提供的天文旋回周期时间标尺,选择比例关系相近的,作为时空对应旋回周期。功率值高、置信度超过 95% 的频率为 0.053 654、0.197 965、0.741 906(比较关系为 1 : 0.271 028 : 0.072 319) 对应了 405 kyr 的长偏心率周期、125 kyr 的短偏心率周期、33.8 kyr 的斜率周期;这 3 个周期变化对应的平均旋回地层厚度分别为 18.64、5.05、1.35 m,对应长 7 段中的旋回个数分别为 5.79、21.38、80.13(表 2)。

依据天文周期稳定性、旋回地层厚度、旋回个数的计算,本文选择 405 kyr 长偏心率周期、单地层旋回厚度为 18.64 m、6 个地层旋回的高频变化方案作为建立富县地区长 7 段地层等时对比格架的

依据,稳定性差以及划分得过于细的方案(如 125 kyr、99 kyr 短偏心率,33.8 kyr 斜率周期等),因其可靠性差和人为复杂而不采纳。通过选择长短偏心率天文周期对应频率变化范围对频谱分析结果开展滤波(图 3d),将过滤波段与 R203 井长 7 段地层单元调谐对应,可以得到纵向对应长偏心率天文周期的近 6 个地层旋回、对应短偏心率天文周期的近 22 个地层旋回(图 4)。

通过调谐,由下而上的旋回 I 相应的埋深为 678~695 m,相当于长 7₃亚段的中下部,厚度为 17 m;旋回 II 相应的埋深为 659~678 m,相当于长 7₃亚段上部—长 7₂亚段底部,厚度为 19 m;旋回 III 相应的埋深为 640.1~659 m,相当于长 7₂亚段的中下部,厚度为 18.9 m;旋回 IV 相应的埋深为 621.2~640.1 m,相当于长 7₂亚段的中上部,厚度为 18.9 m;

表 2 鄂尔多斯盆地富县地区 R203 井地层频谱分析与天文周期对应关系

Table 2 Correlation between stratigraphic spectral analysis and astronomical cycles in well R203, Fuxian area, Ordos Basin

地层旋回频率	频率比值	周期比值	对应的天文周期时间/kyr	天文周期类型	对应旋回地层数/个	平均旋回地层厚度/m
0.053 654	1	1	405	长偏心率周期	5.794 635	18.637 931
0.129 509	2.413 793	0.414 286				
0.197 965	3.689 655	0.271 028	125	短偏心率周期	21.380 2	5.051 402
0.514 339	9.586 207	0.104 317				
0.740 056	13.827 59	0.072 319	33.8	斜率周期	80.125 81	1.347 880
0.782 609	14.586 21	0.068 558	22.2	岁差周期	84.521 74	1.277 778

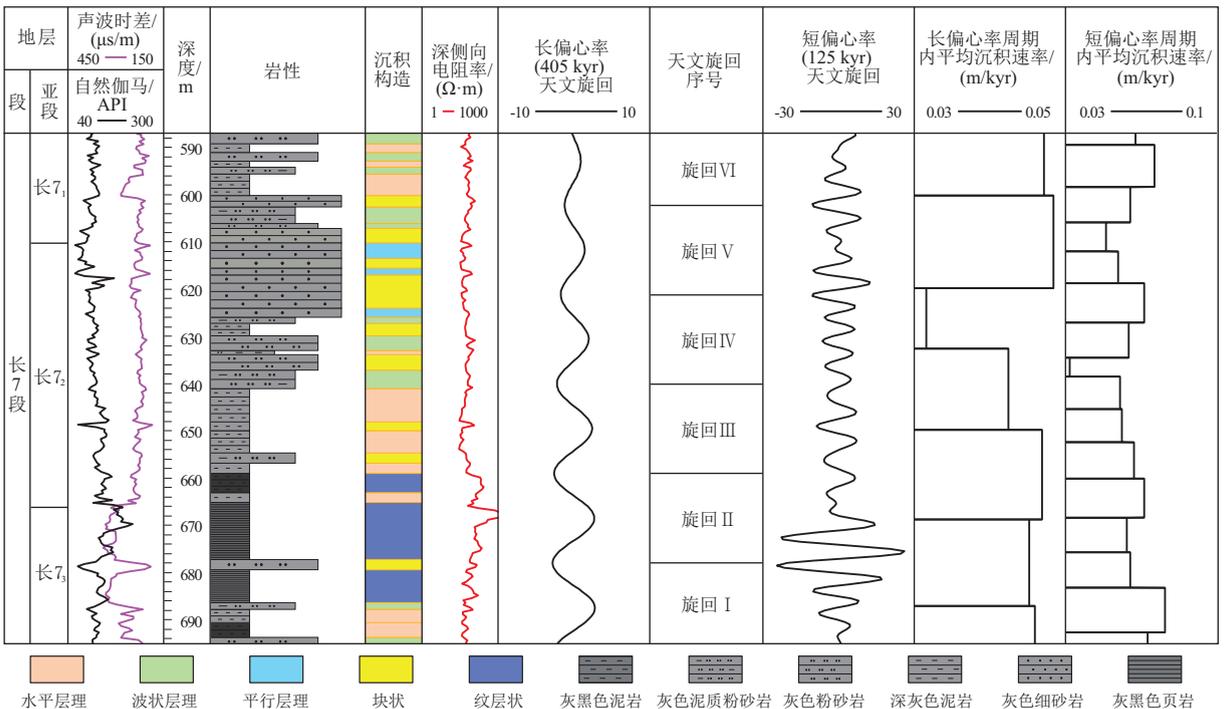


图 4 鄂尔多斯南部富县地区 R203 井天文周期旋回地层划分

Fig.4 Division of cyclic strata based on astronomical cycles in well R203 of Fuxian area, southern Ordos Basin

旋回 V 相应的埋深为 602.3~621.2 m, 相当于长 7₂ 亚段顶部—长 7₁ 亚段下部, 厚度为 18.9 m; 旋回 VI 相应的埋深为 587~602.3 m, 相当于长 7₁ 亚段下部—长 6 段底部, 厚度为 15.3 m。

4.2 不同旋回地层的岩性组合特征

高频旋回的划分能够更加清晰地认识岩性岩相随时间的变化, 也能进一步认识沉积环境和微相的变迁, 这对认识和评价长 7 段不同类型页岩油的有利区带提供了较好的基础。结合上述 R203 井岩心观察, 进行不同旋回地层的统计(表 3)表明, 底部旋回 I 地层对应了长 7₃ 亚段到长 7₂ 亚段的底部, 岩性以发育层理的泥页岩和纹层页岩为主, 两者厚度占旋回地层比值达到了 71.4%~96%; 底部旋回 I 地层尚发育 14.29% 的粉砂岩—泥质粉砂岩, 往上旋回 II 地层仅有 3.95%, 表明早期旋回具有逐渐的水深变化过程。旋回 II 地层沉积时期达到了最大水深, 物源供给少, 岩性为较纯的页岩, 这是最好的烃源岩发育层位, 也是典型的基质型页岩油发育层段。细砂岩、粉砂岩最发育的地层为旋回 IV—V, 其中旋回 V 细砂岩厚度占比达到 75.66%, 旋回 IV 发育了 22.52% 的细砂岩以及 33.11% 的粉细砂岩, 同时泥质粉砂岩、粉砂质泥岩以及泥岩厚度占比为 44.37%, 上下的变化表明物源供给的增加, 块状结构的细砂岩在旋回 V 中达到 52% 以上, 发育连续性好、均质性强的细砂岩, 是长 7 段夹层型页岩油的发育层段。长偏心率天文周期所确定的地层旋回, 可以在其他单井中加以识别和计算, 各钻井依据天文周期得到的地层旋回具有等时性, 以此建立的等时格架进行对比能合理地表达同时期岩相的横向变化, 为富县地区长 7 段不同亚段不同类型岩相横向分布做出预测评价。

5 长 7 段源储组合类型和主要岩相分布

R203 井展示了富县地区长 7 段由下而上, 由

细到粗、由泥页岩为主转变到细砂岩为主到砂泥岩薄互层的岩性组合特征, 是由半深湖—深湖往三角洲前缘亚相沉积环境的转变。这种纵向岩性变化, 形成了以长 7₃ 亚段泥页岩为主、长 7₂—长 7₁ 亚段泥岩为辅的烃源岩层系与长 7₃ 亚段内部、长 7₂—长 7₁ 亚段的粉砂岩、长 7₂ 亚段上部—长 7₁ 亚段下部细砂岩的储集岩的源储配置关系, 包括长 7₃ 亚段泥页岩自生自储的条件。本文认为, 富县地区长 7 段发育 3 种源储组合类型, 5 种层系组合。(1) 纹层页岩岩相与细砂岩岩相源储组合。主要层系为长 7₃ 亚段中上部页岩与长 7₁ 亚段下部、长 7₂ 亚段上部细砂 2 组源储组合。共同特点为源储岩相厚度大(8~10 m)、连续性好、品质好(TOC 含量高、孔隙度相对较高), 但纵向上源储距离较大, 运移动力和路径的分析评价对油气聚集、富集规律认识至关重要。(2) 纹层页岩岩相与粉砂岩类岩相源储组合。主要层系为长 7₃ 亚段中上部页岩与长 7₂ 亚段中下部粉砂岩类源储组合、以及与长 7₃ 亚段粉砂岩类(主要集中在中下部)两组源储组合。共同特点是源储紧密相邻, 在油气充注距离上存在优势, 但粉砂岩类岩相储集空间较差, 优选储集条件较好的区带是评价的关键。(3) 长 7₃ 亚段页岩自生自储。该类源储组合是评价长 7 段页岩油类型资源前景和识别甜点的重要领域, 从源岩品质以及游离油含量检测值分析, 其含油性好, 但页岩自身的渗透性能和可压性能评价是勘探开发的关键因素。

不同源储组合类型横向变化预测是长 7 段区带优选、勘探开发一体化的“甜点”识别的重要基础。基于高频等时格架下的连井剖面(图 5), 可以明显地展示页岩岩相主要分布于长 7 段下部的早期旋回地层(长 7₃ 亚段—长 7₂ 亚段下部)。横向上不同区带页岩发育情况存在一定差异, 且连续性不强, 从纹层页岩累计厚度变化来看, 总体上往西—西南区域有增大、连续性变好的趋势。厚度较大的

表 3 鄂尔多斯盆地南部 R203 井长 7 段不同旋回地层的岩性组合特征

Table 3 Lithological combination characteristics in different cyclic strata of Chang 7 member in well R203, southern Ordos Basin

旋回 地层	顶界埋深/ m	底界埋深/ m	占比/%						
			块状 细砂岩	层理 细砂岩	夹细沙 粉砂岩	粉砂岩	泥岩	层理 泥页岩	纹层 页岩
VI	587	602.3	9.76	0	16.26	17.89	56.10	0	0
V	602.3	621.2	52.63	23.03	5.26	15.79	3.29	0	0
IV	621.2	640.1	13.25	9.27	33.11	21.19	23.18	0	0
III	640.1	659	0	0	0	13.25	78.81	6.62	1.32
II	659	678	0	0	0	3.95	0	5.92	90.13
I	678	695	0	0	0.79	13.49	14.29	26.98	44.44

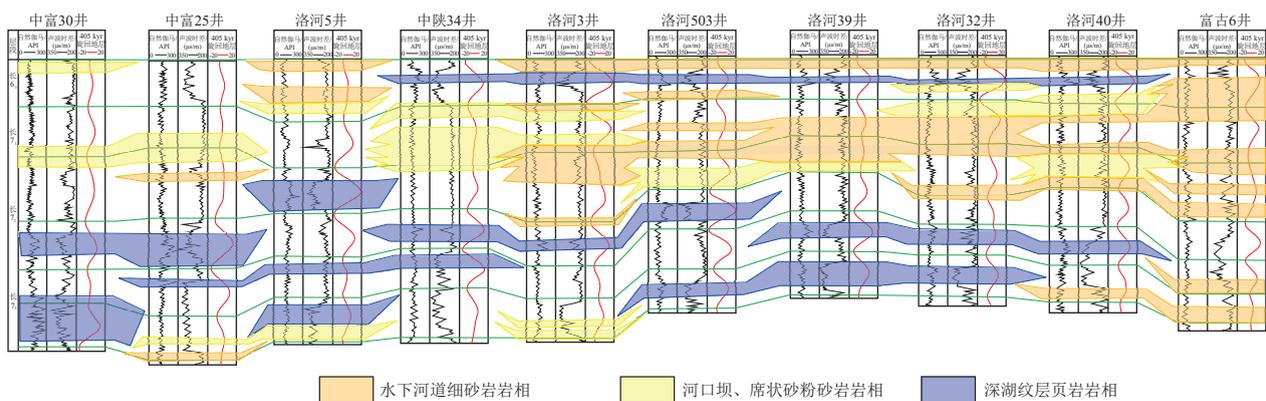


图5 鄂尔多斯盆地富县地区富古6井—中富30井剖面
Fig.5 Profile of wells FG6 to ZF30 in Fuxian area, Ordos Basin

区带主要位于北东地区的中富47井—洛河27井以及洛河35井区周围,累计厚度超过12 m;中部洛河9井—洛河504井区周围,厚度大多超过8~12 m;西—西部的中富26井—中富30井的大片区域最大累计厚度超过了16~20 m;北部地区在洛河1井区范围内局部发育,厚度超过8 m。由此可见,早期旋回的纹层页岩在富县地区分布广泛,具有横向上厚度变化大、连续性不强的特点(图6a)。主要分布于旋回IV—V周期(长 7_2 亚段中上部—长 7_1 亚段)的细砂岩岩相在研究区中东部厚度明显较西部地区要大,且小层多、纵横向连续性好。平面展布上呈现3组北东走向的厚度变化:北部地区由中富13井—中陕44井—洛河5井变化,累计厚度由20 m往南减薄为5 m;中部地区由牛东4井—洛河19井—洛河30井—洛河3井—洛河42井展布,厚度大多超过20~25 m,在南部往西、南2个方向呈现分支;东部主要以富古6井为中心,局部厚度大(图6b)。这受控于来自北东方向进入研究区的三角洲前缘沉积体系,往西南延伸的水下河道呈3个方向影响本区域,影响范围一直到中富27井—张村—洛河42井南一线。

3套源储组合配置较好的地区具有不同的平面分布。其中纹层页岩与细砂岩岩相比较好的区域在研究区北—中—南、东南部,北部洛河1井区、洛河16井区、中部洛河501—洛河32井区,东部富古6井区以北,均为细砂岩岩相厚度大、纹层页岩厚度较大;北东部中富47井区,纹层页岩厚度大,但细砂岩厚度相对较薄。纹层页岩自生源储组合发育较好的地区主要分布在西—西南部以及北东局部地区。而粉砂岩岩相与纹层页岩岩相配置较好的地区主要分布于中西部的洛河21井西—富县—张村—寺仙一线,东部地区局部发育。

6 陆源湖相环境下天文节律旋回计算方法

高频层序地层划分一直是地质领域较难的研究课题,它的难点不在于能否划分出来,而在于是否能寻找出客观、明确的层序边界判识的依据或者标准,并且这样的依据或者标准要具有等时意义,这样的划分才有对比的现实意义,建立的等时格架才能更好地用来对比地层,分析沉积环境的演变。

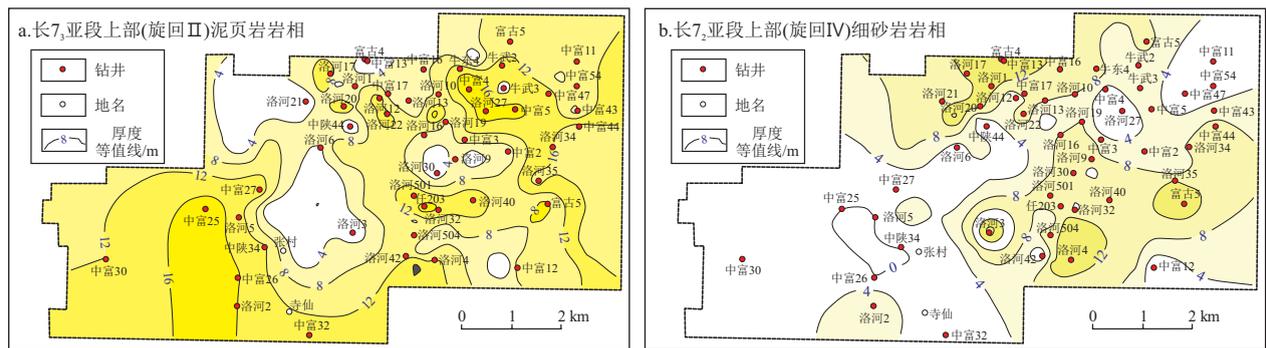


图6 鄂尔多斯盆地富县地区主要旋回地层重要岩相厚度分布预测

Fig.6 Predicted thickness distribution of important lithofacies in main cyclic strata in Fuxian area, Ordos Basin

要改变人工高频层序划分中的随意性,基于米氏旋回理论天文节律周期的旋回划分提供了非常好的高频层序定量识别和划分的方法,不仅从技术上往定量的方向实现,能在确定性的地质年龄条件下给出定量的周期时间和旋回深度;同时基于统一尺度上开展的天文节律旋回周期计算,在所有钻井上都具有等时性,这样开展井间横向对比而得到的岩相变化,以及各种油气地质参数的对比,均有了等时的概念。

因而,首要的要素就是天文周期的稳定性和测井资料的可靠性。目前在该领域的研究中,基本明确了地球公转偏心率的周期变化较为稳定,地球轴斜率和岁差的周期变化受到了纬度或者是地质时代的约束^[28],也就是说偏心率全球稳定性是目前较为公认的,众多学者也依据偏心率的预测而得到较好证实。但是,根据天文研究,地球公转是逐渐变快的^[24]。这种条件下,偏心率的变化,尤其是405 kyr时间的变化,是不能确保稳定性的。目前的资料和技术,也很难去证实这种稳定性。但还是有很多学者^[33],将这个405 kyr的长偏心率周期应用于三叠纪,甚至更早的奥陶纪地层的对比和定年;其次是确定较好的测井资料。所谓较好的资料,就是对地层岩性变化较为敏感的测井资料。地层岩性是最好的地质历史时期古气候变化的记录,同时岩性包括一些岩石物理、岩石地化性质的变化,通常都反映在不同的测井资料上,因而,选择测井资料的时候,重要考虑的因素是测井资料对岩性变化客观反映程度的好坏。依据目前天文调谐旋回计算模型在大多数碎屑岩地层中的应用情况,优选对砂泥岩岩性反映较敏感、分辨率较高的测井,如自然伽马测井、自然电位测井、密度测井等,而对不主要反映岩性变化,仅对地层流体、孔隙空间或者放射性含量等反映较好的测井一般不被采用。

其次的要素是地层无间断。应用天文节律周期来识别高频层序旋回,是一种将时间和空间紧密结合的计算方法。地质时间用来表达连续的天文节律周期是没有间断的,而实际的地层空间是可能存在间断的,即断层作用、无沉积作用或者经历了剥蚀作用等。如果存在地层缺失,那么空间就存在不连续状态,就不能形成时空完整的相互调谐,也就是说如果存在由于不整合面、断层等地质作用的影响而形成地层缺失,是不能使用该方法进行高频层序划分的,除非能合理、准确地补充缺失的地层。但反过来推理,可以通过对缺失天文周期时间、沉积速率等计算来估算单井的剥蚀量。

第三是适用领域和参数的确定。重要参数之一就是地层的绝对年龄,对于研究的目的层系,往往要比较精确的顶底界绝对年龄,但是一般情况下,准确获得这个参数并取得共识是比较困难的。如果地质绝对年龄取值有偏差,将导致对应的天文节律时间的错位,获得的是假的天文周期旋回。其次,该方法很依赖于地球地表气候环境变化,因而对于灾难性地质作用导致的瞬间沉积作用,如地震、局部火山喷发等,会存在包括岩性、厚度等在内的局部地层层系性质、厚度等的突变,引起相对古气候变化的替代性指标较大的偏离度,这些变化是非古气候变化形成,或者与古气候变化没有直接相关性,这种情况下开展天文调谐应用也会导致旋回调谐的失真。另外,测井资料的选择不仅要采用能较好反映岩性变化的,还要重视测井资料的质量问题,尤其是不同时期、不同设备所获得的测井成果,在数据上存在校正的问题。

最后是地质分析的重要性。对于有明确沉积间断标注地层边界的情况下,即相对地质年代较为确定,那么计算天文节律周期的地层年代边界相对确定。但对于连续沉积的岩性组合,通过自然伽马得到的调谐周期的底界和顶界与实际生产中采用的地层组、段分层会出现差异,比如研究区内长7段与上部长6段、下部长8段分界,长7段内部亚段分层分界,地层段、亚段分层结果与天文调谐得到的旋回地层分界是不同的,天文节律周期可能是跨越地层段和亚段分层界线的。因而,必须在地质认识控制下,将长8段上部与长6段下部作为长7段沉积延续而一起考虑天文节律周期在空间上的反映,这样才能得到合理的时空匹配高频层序地层划分方案。

7 结论

(1)鄂尔多斯盆地富县地区延长组7段沉积时期受到来自北东方向三角洲沉积体系的影响,发育了半深湖—深湖到三角洲前缘2种沉积亚相,沉积了细砂岩到页岩的细粒沉积组合。长7段可以划分为块状细砂岩岩相、层理状细砂岩岩相、夹细砂粉砂岩岩相、粉砂岩岩相、泥岩岩相、层理泥页岩岩相、纹层页岩岩相等7种岩相类型。

(2)识别出长7段存在6个长偏心率(405 kyr时间周期)、22个短偏心率(125 kyr时间周期)稳定的天文旋回,可作为划分高频层序地层等时格架的依据,进行全区地层对比。结合岩相分类,页岩岩相主要分布在早期旋回I—II地层(长7₃亚

段—长 7_2 亚段下部)中,其中旋回Ⅱ地层中纹层页岩厚度大、连续性好;细砂岩岩相主要分布在旋回Ⅳ—Ⅴ地层(长 7_2 亚段中上部—长 7_1 亚段)中,其中旋回Ⅴ地层中块状细砂岩厚度大、连续性好。

(3)研究区内,早期旋回Ⅰ—Ⅱ地层的页岩岩相横向展布在中西部、西部地区连续性好,厚度大,中部地区局部厚;旋回Ⅳ—Ⅴ地层的细砂岩岩相横向展布在北东—中部地区连续性好,局部厚度大,呈北东走向3套砂体展布。形成了富县地区长7段3种源储组合类型,5种层系组合。其中页岩与细砂岩岩相配置为长 7_3 亚段中上部与长 7_2 中上部—长 7_1 下部层系组合,平面上主要分布在富县地区的中部—北、北东部;长 7_3 亚段和长 7_2 亚段的中下部,页岩与粉砂岩岩相配置以及页岩岩相厚度发育较大,平面上主要分布在富县地区的中部—西部、南部区域。

利益冲突声明/Conflict of Interests

作者朱建辉、武英利、缪九军、王东燕和陈现是本刊主办单位员工,均未参与本文的同行评审或决策。

Authors ZHU Jianhui, WU Yingli, MIAO Jiujun, WANG Dongyan, and CHEN Xian are employees of the sponsor of this journal, and they did not take part in peer review or decision making of this article.

作者贡献/Authors' Contributions

何发岐、齐荣参与项目整体设计规划和研究方法确定;朱建辉、武英利、缪九军、姜龙燕负责项目研究执行;朱建辉完成论文初稿写作;何发岐、武英利、缪九军参与论文的修改;王东燕、陈现参与论文中数据处理。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed and the research method was determined by HE Faqi and QI Rong. The research and implementation of the project was completed by ZHU Jianhui, WU Yingli, MIAO Jiujun, and JIANG Longyan. The first draft of the paper was completed by ZHU Jianhui. HE Faqi, WU Yingli, and MIAO Jiujun participated in the revision of the paper. WANG Dongyan and CHEN Xian participated in data processing in the paper. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [2] 付锁堂,金之钧,付金华,等.鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J].石油学报,2021,42(5):561-569.
FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.
- [3] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用;地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.
YANG Hua, ZHANG Wenzheng. Leading effect of the seventh member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [4] 张文正,杨华,彭平安,等.晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J].地球化学,2009,38(6):573-582.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, PENG Pingan, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [5] 常莎莎.鄂尔多斯盆地胡尖山地区三叠系延长组长7油层组沉积相研究[D].成都:西南石油大学,2012.
CHANG Shasha. Sedimentary facies study of the Triassic Yanchang Group 7 oil formation in the Hujianshan area of the Ordos Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [6] 郭懿萱.鄂尔多斯盆地安塞油田三叠系延长组长7油层组沉积相及储层特征研究[D].西安:西北大学,2013.
GUO Yixuan. Study on sedimentary facies and reservoir characteristics of Chang 7 oil formation in Ansai oilfield of Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [7] 邓秀芹,蔺昉晓,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J].古地理学报,2008,10(2):159-166.
DENG Xiuqin, LIN Fangxiao, LIU Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 159-166.
- [8] 邓南涛,张枝焕,任来义,等.鄂尔多斯盆地南部延长组烃源岩生物标志物特征及生烃潜力分析[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(3):317-325.
DENG Nantao, ZHANG Zhihuan, REN Laiyi, et al. Biomarker characteristics and hydrocarbon generation potential of hydrocarbon source rocks from the Yanchang Formation in the south Ordos Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(3): 317-325.
- [9] 李威,文志刚.鄂尔多斯盆地马岭地区延长组长7烃源岩特征与分布[J].断块油气田,2014,21(1):24-27.
LI Wei, WEN Zhigang. Characteristics and distribution of Chang 7 source rocks of Yanchang Formation in Maling area of Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 24-27.
- [10] 何浩男,赵卫卫,王汇智,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组长7致密油成藏机制及主控因素[J].非常规油气,2019,6(3):33-40.
HE Haonan, ZHAO Weiwei, WANG Huizhi, et al. Mechanism of hydrocarbon accumulation formation and main controlling factors in Chang-7 tight oil of Yanchang Formation, southeastern Ordos Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(3): 33-40.
- [11] 张国伟,周鼎武,于在平,等.秦岭造山带岩石圈组成、结构和演化特征[C]//秦岭造山带学术讨论会论文集.西安:西北大学出版社,1991:121-138.
ZHANG Guowei, ZHOU Dingwu, YU Zaiping, et al. Lithospheric composition, structure and evolution characteristics of the Qin-

- ling Orogenic Belt [C]//Selected Papers of the Qinling Orogenic Belt Symposium. Xi'an: Northwest University Press, 1991: 121-138.
- [12] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 20-45.
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 20-45.
- [13] 李文厚, 庞军刚, 曹红霞, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长长期沉积体系及岩相古地理演化 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2009, 39(3): 501-506.
LI Wenhou, PANG Jungang, CAO Hongxia, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the Late Triassic Yanchang stage in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 501-506.
- [14] 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 沉积相分析 [J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 254-263.
YANG Hua, DOU Weitan, LIU Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254-263.
- [15] 曹红霞. 鄂尔多斯盆地晚三叠世沉积中心迁移演化规律研究 [D]. 西安: 西北大学, 2008.
CAO Hongxia. Research on the rule of depocenter migration and evolution of Late Triassic in the Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [16] CROSS T A, GARDNER M H. Base-level concepts and sequence stratigraphy [R]. Research Program in Finance Working Papers, 1991.
- [17] VAIL P R, MITCHUM R M JR, THOMPSON III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: relative changes of sea level from coastal onlap [M]//PAYTON C E. Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 63.
- [18] MILANKOVITCH M K. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem [J]. Royal Serbian Academy Special Publication, 1941, 133: 1-633.
- [19] HAYS J D, IMBRIE J, SHACKLETON N J. Variations in the Earth's Orbit: pacemaker of the ice ages [J]. Science, 1976, 194(4270): 1121-1132.
- [20] 汪品先. 地质计时的天文“钟摆” [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 1-7.
WANG Pinxian. Astronomical “pendulum” for geological clock [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(1): 1-7.
- [21] FISCHER A G, PREMOLI SILVA I, DE BOER P L. Cyclostratigraphy [M]//GINSBURG R N, BEAUDOIN B. Cretaceous Resources, Events and Rhythms. Dordrecht: Springer, 1990: 139-172.
- [22] 姚益民, 徐道一, 张海峰, 等. 山东东营凹陷新生代天文地层表简介 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(S2): 423-429.
YAO Yimin, XU Daoyi, ZHANG Haifeng, et al. A brief introduction to the Cenozoic astrostratigraphic time scale for the Dongying Depression, Shandong [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(S2): 423-429.
- [23] 陈留勤. 从准层序到米级旋回: 层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带 [J]. 地层学杂志, 2008, 32(4): 447-454.
CHEN Liuqin. From parasequences to meter-scale cycles: the connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(4): 447-454.
- [24] 闫建平, 言语, 彭军, 等. 湖相泥页岩天文地层旋回测井识别在沾化凹陷沙三下亚段的应用 [J]. 测井技术, 2017, 41(6): 701-707.
YAN Jianping, YAN Yu, PENG Jun, et al. Log identification of astronomical cycle in lacustrine facies mud shale and its application in the lower 3rd member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(6): 701-707.
- [25] 吴怀春, 房强. 旋回地层学和天文时间带 [J]. 地层学杂志, 2020, 44(3): 227-238.
WU Huaichun, FANG Qiang. Cyclostratigraphy and astrochronozones [J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(3): 227-238.
- [26] LI Mingsong, HUANG Chunju, HINNOV L, et al. Astrochronology of the Anisian stage (Middle Triassic) at the Guandao reference section, South China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 482: 591-606.
- [27] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状 [J]. 地质学前沿, 2014, 21(2): 48-66.
HUANG Chunju. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66.
- [28] 田军, 吴怀春, 黄春菊, 等. 从 405 万年长偏心率周期看米兰科维奇理论 [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3543-3568.
TIAN Jun, WU Huaichun, HUANG Chunju, et al. Revisiting the Milankovitch theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle [J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3543-3568.
- [29] WU Huaichun, ZHANG Shihong, SUI Suwen, et al. Recognition of Milankovitch cycles in the natural gamma-ray logging of Upper Cretaceous terrestrial strata in the Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2007, 81(6): 996-1001.
- [30] 王起琮. 天文周期与地层基准面旋回及其识别技术 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31(4): 24-30.
WANG Qicong. Astronomical periods and stratigraphic base-level cycles and its identification technology [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(4): 24-30.
- [31] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组 7 段 3 亚段页岩油勘探前景探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 558-570.
LI Zhiming, TAO Guoliang, LI Maowen, et al. Discussion on prospecting potential of shale oil in the 3rd sub-member of the Triassic Chang 7 member in Binchang block, southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 558-570.
- [32] 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2011, 36(3): 409-428.
WU Huaichun, ZHANG Shihong, FENG Qinglai, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(3): 409-428.
- [33] 谢灏辰. 鄂尔多斯盆地南部延长组高分辨率层序地层格架研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2014.
XIE Haochen. Study on high-resolution stratigraphy framework to Yanchang Formation of southern Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.