

文章编号: 1000-0747(2015)01-0034-10 DOI: 10.11698/PED.2015.01.04

湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式 ——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例

袁选俊¹, 林森虎¹, 刘群¹, 姚泾利², 王岚¹, 郭浩¹, 邓秀芹², 成大伟¹

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油长庆油田分公司)

基金项目: 国家油气重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”(2011ZX05001);

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239000)

摘要: 基于对细粒沉积学发展趋势的分析, 指出完善针对性的研究方法、重建古沉积环境、建立细粒沉积岩分类体系与成因模式是目前学科研究的前沿。以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组为例, 应用岩心描述、薄片观察、X衍射、地球化学测试、有机碳测井定量计算等方法研究湖盆细粒沉积体系分布规律及主控因素。长7油层组富有机质页岩以湖侵—水体分层沉积模式为主。“沉积相带、水体深度、缺氧环境、湖流”是富有机质页岩形成与分布的主控因素。长7₃沉积期快速湖侵, 湖水深度和范围急剧增加, 湖泊表层水体与下层水体由于温度差异导致循环受阻, 形成了深湖区大面积的缺氧环境, 有利于富有机质页岩的大规模发育。远离三角洲前缘的宁静深湖区, 富有机质页岩发育, 有机碳含量高, 干酪根以I型为主; 发育砂质碎屑流的深湖区, 富有机质页岩与砂岩互层, 富有机质页岩有机碳含量高, 干酪根以I—II₁型为主; 邻近三角洲前缘的半深湖区, 波状—块状粉砂质泥岩发育, 干酪根以II型为主。图7表2参42

关键词: 细粒沉积; 富有机质页岩; 岩石组构; 分布模式; 三叠系延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China

Yuan Xuanjun¹, Lin Senhu¹, Liu Qun¹, Yao Jingli², Wang Lan¹, Guo Hao¹, Deng Xiuqin², Cheng Dawei¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. PrteoChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: The Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin is taken as an example to study the distribution rule and major controlling factors of the fine-grained sedimentary system by core description, thin section observation, X-ray diffraction, geochemical testing and TOC well logging quantitative calculation. The main sedimentary pattern of organic-rich shale in Chang 7 Member is transgression-water layering. The sedimentary facies, water depth, anoxic condition and lacustrine flow are the major controlling factors for the formation and distribution of organic-rich shale. During the deposition of the Chang 7₃ Member, lake water invaded rapidly, lake depth and scope sharply increased. Because of the temperature difference, the circulation between upper surface water and lower water in deep lake was restrained, then large-area anoxic environment was formed in deep lake, which was favorable for the development of organic-rich shale. In silent deep lake that is far away from the delta front, organic-rich shale was well developed, with high organic carbon content and mainly type I kerogen. In deep lake where sandy debris flows developed, organic-rich shale was inter-bedded with sandstone, which contains high organic carbon content, mainly with type I-II₁ kerogen. In semi-deep lake close to the delta front, wavy-massive silty mudstone was developed, mainly with type II kerogen.

Key words: fine-grained sediment; organic-rich shale; rock texture; distribution pattern; Triassic Yanchang Formation; Ordos Basin

1 细粒沉积学研究进展与发展趋势

1.1 研究进展

细粒沉积的概念最早由Krumbein在岩石粒度分析中提出^[1], 目前已被普遍接受和广泛应用。细粒沉积岩主要指粒径小于0.1 mm的颗粒含量大于50%的沉

积岩, 主要由黏土矿物和粉砂等陆源碎屑颗粒组成, 也包含少量盆地内生碳酸盐、生物硅质、磷酸盐等颗粒^[2]。全球各类沉积岩中约70%为细粒沉积岩^[3]。

国外细粒沉积研究首先从泥岩开始。早在1747年, Hoosen就提出了泥岩的概念, 但直到1853年, Sorby才首次利用薄片来研究泥岩的微观特征^[4]。20世纪20

年代以来,随着X衍射、扫描电子显微镜等技术的引入,定量识别黏土矿物类型与颗粒形态已经实现^[5]。Picard首次较为系统地提出了细粒沉积岩的分类方法^[2],指出“细粒”的意义在于分选良好,粉砂或泥质含量必须大于50%。Potter等编写的《页岩沉积学》^[6]对细粒沉积研究具有深远影响。

20世纪80年代以来,晚第四纪或现代细粒沉积研究进一步加深,并在生物化学和沉积机理等方面取得了重要研究进展。Dean等对深海细粒沉积进行了三端元分类(钙质生物颗粒、硅质生物颗粒和非生物颗粒)^[7]。Dimberline认为半远洋沉积是以粉砂级颗粒为主的层状细粒沉积,可以夹砂级或泥级的浊流沉积(风暴影响),也可形成独立沉积相,并提出半远洋细粒层是浮游生物繁盛与粉砂充注交替进行的结果,这种交替作用一年一次或一季一次^[8]。David研究湖盆细粒沉积后认为湖平面变化、构造作用、沉积物源和盆地地形会影响细粒沉积相带分布,其中盆地地形是最关键的因素^[9]。

细粒沉积模式的研究对象主要为海相黑色页岩,已建立了海侵、门槛和洋流上涌等沉积模式^[2]。海相黑色页岩的形成主要受物源和水动力条件控制,滞流海盆、陆棚区局限盆地、边缘海斜坡等低能环境是其主要发育环境。海相富有机质的黑色页岩形成必须具备两个重要条件^[10-11]:表层水中浮游生物生产力必须十分高;沉积条件必须有利于有机质保存、聚积与转化。Macquaker等提出“海洋雪”作用和藻类爆发是海相富有机质细粒沉积物的主要成因^[12]。陆相湖盆沉积水体规模有限,水体循环能力远不及海洋,富有机质页岩主要以水体分层和湖侵两种沉积模式为主^[2]。

中国细粒沉积研究的主要成果可概括为以下4个方面:①基于石油地质认识,根据湖泊构造成因、地理位置和气候等条件,对中国中—新生代湖泊类型进行了划分,并系统研究了不同类型湖泊的沉积特征与生油能力^[13-16]。淡水湖泊一般形成于潮湿气候环境,以泥岩、页岩等细粒碎屑岩沉积为主,平面上呈环带状分布,干酪根多为腐泥型;咸水湖泊一般形成于大陆干旱气候环境,以各种蒸发类沉积为主,如湖相灰岩、白云岩、石膏、盐岩等,亦有各种碎屑岩伴生。从生油能力分析,湖水盐度过高会影响生物生长,干酪根类型多为腐殖型,不利生油,因此盐湖沉积生油质量不及淡水湖。②沉积环境与沉积特征解剖。根据沉积岩组分、颜色、结构、展布和化石等对古代湖泊沉积亚相进行划分,并预测生油岩与储集岩分布。研究认为浪基面、枯水面和洪水面是湖泊沉积亚相进一

步划分的重要依据^[13]。半深湖—深湖环境位于浪基面以下,为缺氧还原环境,以细粒沉积为主,发育黑色泥岩、页岩,常见薄层泥灰岩或白云岩夹层,生油潜力最大(指黑色泥岩、页岩)。湖湾和沼泽环境一般也以细粒沉积为主,主要发育粉砂岩和泥岩,甚至可发育黑色页岩,可形成煤成气和少量凝析油^[17]。③通过现代湖泊考察,对湖泊物理、化学、生物过程及沉积特点、富有机质页岩分布、早期成岩作用等进行了研究,深化了对湖泊相沉积的认识^[18-20]。20世纪60年代初,为了深入了解湖泊相沉积的生油能力,围绕“陆相生油理论”对青海湖进行多学科综合研究,提出湖流、水深、氧化还原环境等因素共同控制富有机质页岩的形成与分布。同时部分学者对中国渤海湾、鄂尔多斯、北部湾等盆地湖相优质烃源岩的沉积特征与发育机制进行解剖,探讨了其形成与分布的主控因素^[21-26]。④开展了以有机地球化学为主的沉积-有机相研究。有机相最早由Rogers提出,主要用于描述生油岩中有机质数量、类型与产油气率和油气性质关系^[27]。中国陆相湖盆沉积-有机相研究取得了重要进展,对陆相烃源岩的认识与评价进一步深化。陈安宁等将沉积相、生物相、有机地球化学结合起来,提出了沉积-有机相的概念^[28];郝芳提出有机相是具有一定丰度和特定成因类型有机质的地层单元,并首次提出有机亚相的概念^[29]。金奎励、朱创业等提出陆相碎屑岩和海相碳酸盐岩沉积-有机相分类方案^[30-31]。

目前陆相湖盆细粒沉积体系的研究还比较薄弱,急需进行典型细粒沉积岩组构特征解剖,揭示陆相湖盆细粒沉积岩的分布规律与主控因素,建立细粒沉积体系成因模式,从而指导岩相-沉积相-有机相工业编图,推动陆相致密油气、页岩油气的发展。

1.2 发展趋势

细粒沉积岩作为烃源岩不但控制常规油气藏的形成与分布,而且与致密油气、页岩油气等非常规油气资源紧密相关^[32-35]。细粒沉积学是目前国内外研究前沿,研究程度相对较低,急需开展典型解剖与工业化应用研究,更好地指导油气勘探与开发^[26,36]。通过系统调研与实践研究,笔者认为湖盆细粒沉积学发展需强化以下3方面研究:

①建立行之有效的细粒沉积岩研究方法体系。与砂砾岩等粗粒沉积岩不同,泥页岩等细粒沉积岩颗粒细小、成分多样、成因复杂,传统碎屑岩沉积的研究内容与方法,已不能完全满足科研与生产需求。一方面要发展和完善薄片、X衍射、地球化学、微古生物

等传统实验分析测试手段,开发数字岩心 CT 扫描、矿物组分与元素定量分析(QEMSCAN)等特色技术,重点开展细粒沉积岩微观特征研究,建立古物源、古气候、古水体介质、古生产力等沉积环境的恢复方法。另一方面要大力加强地球物理技术的开发与应用,为工业化开展岩性-岩相精细识别与空间展布规律研究提供有效手段。目前地震储集层预测、层序地层学、地震沉积学等方法技术能够有效预测砂岩等粗粒沉积岩的空间分布,但对细粒沉积岩空间分布的预测还不能满足科研与生产需求,因此需进一步发展相应技术。相关测井定量评价技术已能较好地识别岩性、定量计算烃源岩有机碳含量等,这为无取心井地区细粒沉积岩特征研究提供了一种快速有效的方法。另外还需要针对性开展细粒沉积现代考察与水槽模拟实验研究,进一步揭示不同类型细粒沉积岩的成因机理与分布规律,明确其形成与主控因素。

②加强典型盆地岩石微观组构与宏观分布规律等解剖研究,建立不同类型湖盆细粒沉积体系的成因模式。中国地质历史上发育淡水、咸水等不同类型的湖泊,形成了包括泥岩、页岩、湖相碳酸盐岩等多种细粒沉积岩,目前对其成因、分布的研究程度总体较低。一是要加强湖盆细粒沉积岩石学的科学分类体系研究;二是需要重建不同类型湖泊的沉积古环境,揭示富有机质页岩形成的主控因素,建立不同类型湖泊细粒沉积岩成因模式;三是需要应用多种资料编制岩相-沉积相-有机相等图件,预测烃源岩与有利储集相带空间展布。

③加强湖盆细粒沉积与粗粒沉积整体研究,揭示其相互控制机理,建立不同类型细粒沉积体系的分布模式,为区带评价提供地质依据。湖盆细粒沉积主要分布在湖泊环境中,黏土矿物等细粒沉积物主要由河流—三角洲或水下扇等粗粒沉积体系提供,因此湖泊周缘和湖泊内部粗粒沉积体系发育的程度与规模不但控制湖泊碎屑岩的物质来源,同时控制湖泊水动力条件和湖底底形,因而直接决定湖泊细粒沉积岩的发育类型与分布模式。湖泊中主要发育泥岩、页岩、湖相碳酸盐岩等细粒沉积岩,同时还广泛发育三角洲前缘水下分流河道、前三角洲席状砂、浅水滩坝、深水重力流等砂体,这些砂体与细粒沉积的围岩构成了成因相关的整体,是目前岩性油气藏或致密油气勘探的主要对象。

本文针对鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组开展细粒沉积体系、泥岩与页岩组构特征、古环境恢复等研究,并探讨淡水湖泊富有机质页岩分布模式与主控因素。

2 长 7 油层组细粒沉积体系

2.1 研究区概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育古生界和中生界两套含油气系统^[37]。古生界含油气系统以煤系为主要烃源岩,石炭-二叠系致密砂岩和奥陶系碳酸盐岩风化壳为主要储集层,在鄂尔多斯盆地北部斜坡带已发现苏里格等大型致密砂岩气田和靖边等大型碳酸盐岩岩溶天然气田;中生界含油气系统以三叠系延长组长 7 油层组湖相泥页岩为主要烃源岩,延长组低渗透—致密砂岩和侏罗系常规砂岩为主要储集层,在盆地南部已发现安塞等大型岩性油田和华庆等大型致密砂岩油田。截至 2012 年底,鄂尔多斯盆地累计探明石油地质储量 $21.47 \times 10^8 \text{ t}$,累计探明天然气地质储量 $3.267 5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,已形成中北部连续型大气区和中南部连续型大油区(见图 1)^[11,38]。

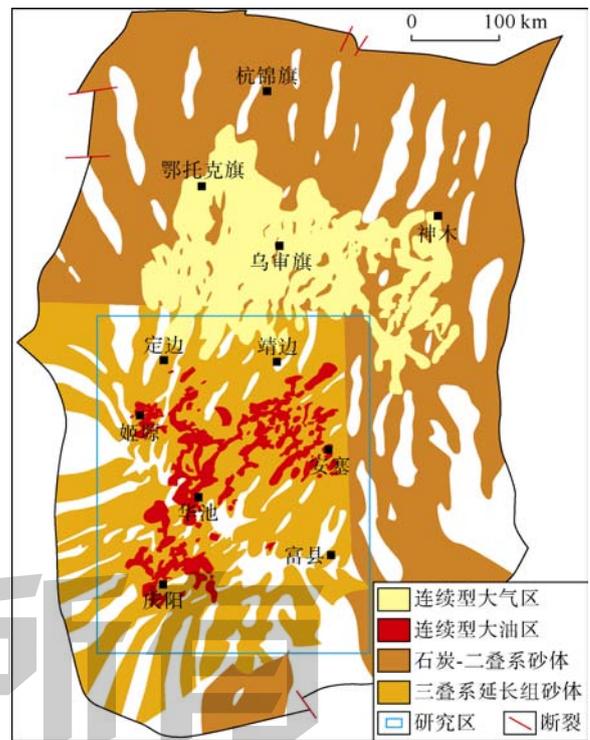


图 1 鄂尔多斯盆地油气勘探形势图^[38]

研究区位于鄂尔多斯盆地中南部,西起姬源,东至安塞,北达定边,南到庆阳,面积为 $10.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见图 1)。鄂尔多斯盆地中生界沉积上三叠统延长组、下侏罗统富县组和延安组^[39],纵向上形成两个 2 级旋回和 3 套含油气组合(见图 2)。延长组发育一套厚 800~1 200 m 的深灰色、灰黑色泥岩和灰绿色、灰色粉砂岩、中细粒砂岩互层的旋回性沉积。根据岩性、电性、含油情况,自上而下划分为 10 个油层组(长 1—长 10)。延长组经

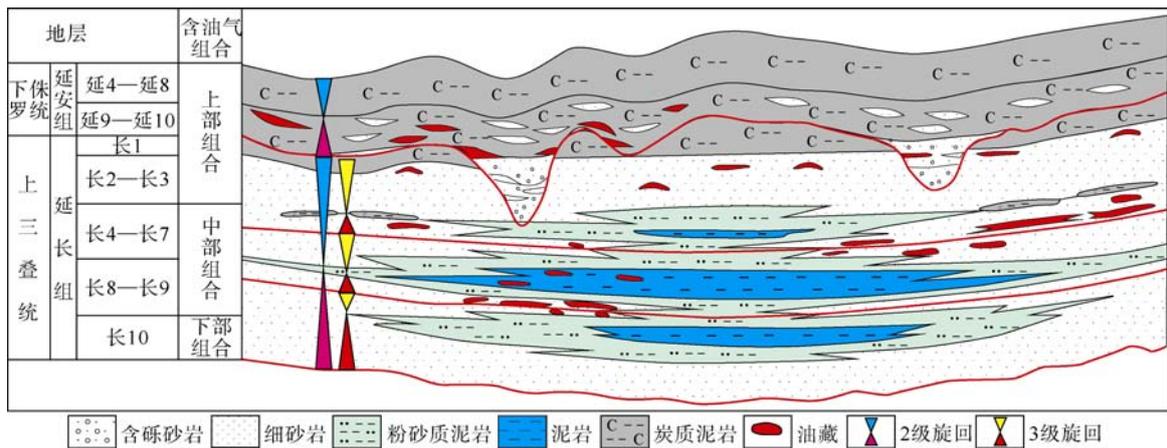


图2 鄂尔多斯盆地中生界含油气系统剖面示意图

历了湖盆初始形成阶段(长10油层组沉积期)、湖盆扩张阶段(长9—长7油层组沉积期)和湖盆萎缩消亡阶段(长6—长1油层组沉积期)^[40]。长7油层组沉积期是盆地三叠纪湖泊发育的最主要时期,湖泊面积超过 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,深湖区水深可达150 m^[41],湖盆中央以泥页岩等细粒沉积为主,形成了中生界含油气系统最重要的烃源岩,控制了中生界油气的宏观分布^[38]。

2.2 岩相展布特征

针对长7油层组湖泊细粒沉积特征进行精细研究,应用研究区295口探井的综合录井资料,分小层按细砂岩、泥质细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、钙质砂岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩、泥岩、页岩、凝灰质泥岩10

种岩性进行统计与工业编图,厘定长7油层组岩相格局,刻画长7油层组3个小层(长7₃—长7₁)的细粒沉积体系。随机选取有取心资料的11口井进行岩心观察描述,证实录井数据与取心数据平均符合度较高,为87.5%。实践表明利用综合录井资料进行细粒沉积岩分布研究的方法可行,可在勘探程度较高地区的湖盆细粒沉积研究中进行推广。

岩性分布统计表明长7油层组主要发育细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和页岩5种岩性或岩相,其总厚度约占地层厚度97%。根据各小层不同类型岩性厚度分布与岩相编图(见图3),明确了长7油层组岩相发育特征与演化。

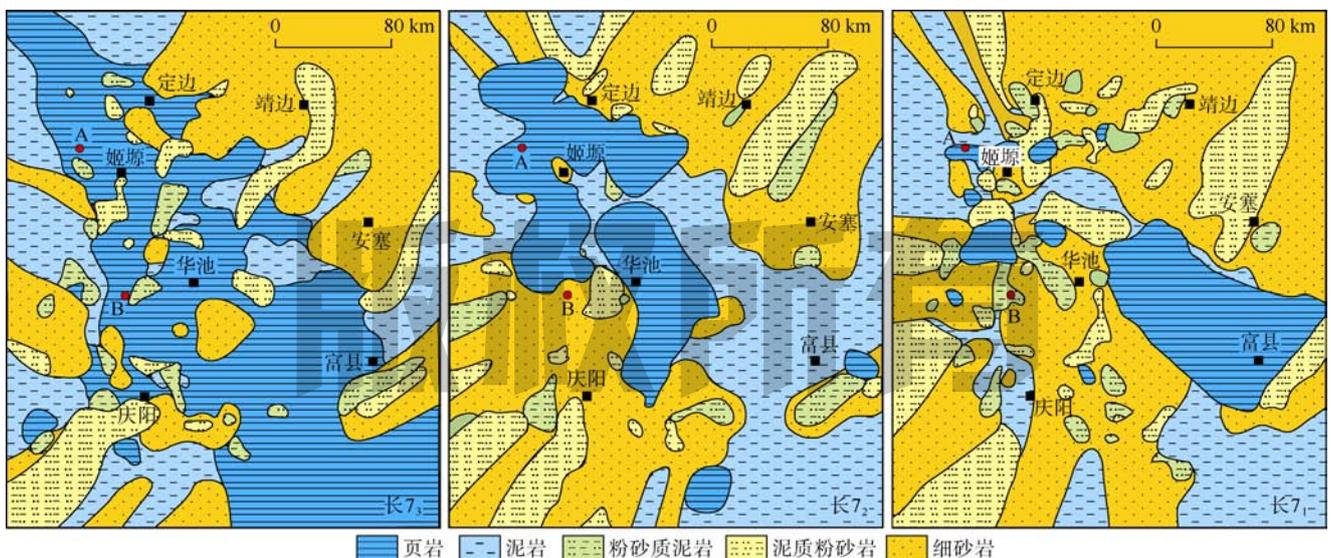


图3 鄂尔多斯盆地三叠系长7油层组3小层岩相分布

长7₃小层主要发育页岩相,细砂岩相集中在东北部;长7₂小层主要发育泥岩相和细砂岩相,湖盆中部页岩相开始萎缩,出现大规模砂质碎屑流沉积形成的细砂岩相;长7₁以细砂岩相为主,集中在东北部和西

南部,湖盆中部砂质碎屑流沉积形成的细砂岩相范围进一步扩大。

通过典型岩心观察与沉积微相分析,揭示了不同岩相的主要沉积环境:页岩相主要发育在半深湖—深

湖沉积环境；细砂岩相主要发育在三角洲分流河道和砂质碎屑流沉积环境；泥质粉砂岩相在三角洲平原最发育；粉砂质泥岩相在前三角洲最发育；泥岩相在滨浅湖最发育，分布最广泛，其向内边界反映半深湖界线。

2.3 沉积相特征

沉积相综合研究表明长 7 油层组主要发育湖泊、三角洲和砂质碎屑流等沉积相，不同小层的沉积相分布规律有明显差异（见图 4）。

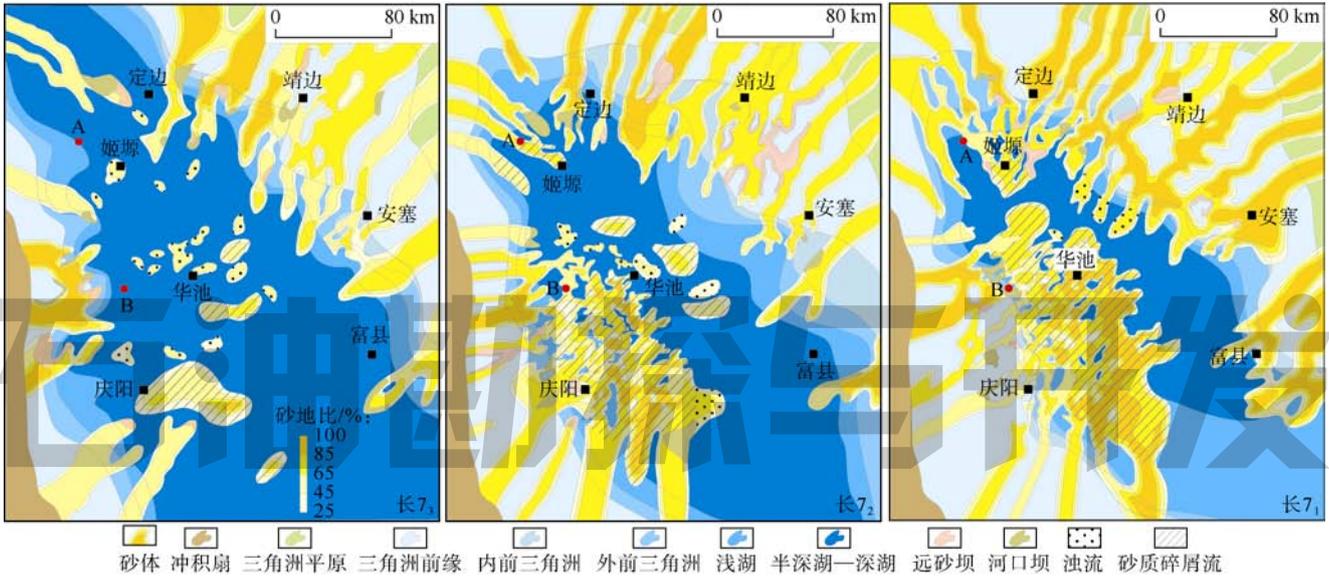


图 4 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 油层组小层沉积相

长 7₃ 沉积期，湖泊水体急剧扩大与加深，并很快达到鼎盛，此时湖泊面积最大，超过 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[38]。湖盆中心主要发育深灰色、灰黑色泥岩和油页岩，有机质丰富，是鄂尔多斯盆地中生界最主要的生油岩发育区。半深湖—深湖亚相位于庆阳、华池、姬塬、富县广大区域内，呈北西—南东向不对称展布；浅湖亚相呈环带状围绕深湖区展布，东部宽阔，湖盆边缘在安塞—靖边一带。随着湖平面快速上升，湖泊面积扩大，环湖各类三角洲体系明显向岸退缩：东北部靖边、安塞等地区曲流河三角洲范围明显缩小；西部坡度较陡，发育辫状河三角洲，前缘相带较窄，因此洪泛河水携带的沉积物可迅速注入深湖中。局部地区发育重力流沉积，在平面上零星分布，庆阳地区发育规模相对较大的砂质碎屑流沉积。

长 7₂ 沉积期，湖盆开始萎缩，半深湖—深湖亚相面积较长 7₃ 沉积期时略有缩小，湖盆中心稍向东迁移，缩小至姬塬、华池、富县地区，三角洲砂体较长 7₃ 沉积期时更发育。东北部靖边、安塞等地区曲流河三角洲范围基本不变；西南部辫状河三角洲明显向湖泊延伸，分布范围扩大。半深湖—深湖亚相沉积重力流砂体，砂质碎屑流砂体广泛分布于庆阳—华池等地区。

长 7₁ 沉积期，湖盆继续向东南缩小，深湖中心缩小至姬塬、华池、富县一带，在北西—南东向的狭窄区域内展布。此时东北部定边、靖边、安塞等地区曲流河三角洲略向湖盆延伸；西南部辫状河三角洲继续

向东北延伸入湖，分布范围扩大。西南物源的砂质碎屑流沉积最为发育，分布面积大，平行湖岸线展布，在庆阳—华池广大地区连片分布^[42]。

3 长 7 油层组泥页岩组构特征

三叠系延长组长 7 油层组是鄂尔多斯盆地中生界的主力烃源岩。前人主要从有机地球化学角度对其烃源岩特征与生油潜力进行研究与资源潜力评价，但对泥页岩组构特征、泥页岩沉积环境恢复以及与有机质的关系等方面研究较少。本文应用岩心描述、薄片观察、X 衍射、地球化学测试、有机碳测井定量计算等多种方法，对鄂尔多斯盆地长 7 油层组典型湖相泥页岩及其岩石组成、纹层结构等微观特征进行系统解剖。

通过岩心描述和薄片观察，以及 X 衍射、热解分析测试资料整理，长 7 油层组泥页岩主要由黏土矿物和石英组成，其次为长石、有机碳和黄铁矿等。通过 300 余块岩心样品（13 口井）的全岩 X 衍射分析数据统计，长 7₃ 泥页岩中有机碳、黏土矿物、黄铁矿含量较高，平均分别为 7.18%、53.20%、8.20%，长 7₂、长 7₁ 泥页岩中有机碳、黏土矿物、黄铁矿含量逐渐降低，反映湖水逐渐变浅、陆源碎屑物质供给逐渐增加的地质特征。

A 井位于研究区西北部的姬塬地区，连续取心长度达 158 m，是鄂尔多斯盆地针对长 7 油层组最为系统的 1 口取心井，取心层位包括长 8 油层组顶部与长 7

油层组(见图5)。长8油层组沉积期湖泊范围小,水体浅,发育三角洲前缘细砂岩—粉砂岩。伴随湖侵,长8油层组顶部沉积浅灰色滨浅湖相泥岩和粉砂质泥岩,并快速进入长7深湖相页岩沉积。A井长7油层组以半深湖—深湖相页岩、泥岩沉积为主,夹薄层粉砂岩或泥质

粉砂岩,反映该区受外来物源影响较小。黏土矿物含量一般为50%~70%,石英含量一般为30%~40%,长7₃—长7₂的长石含量较低,一般小于5%,长7₁长石含量较高,一般可达10%~20%;有机碳含量一般为4%~12%,黄铁矿含量一般为1%~4%,最高可达15%。

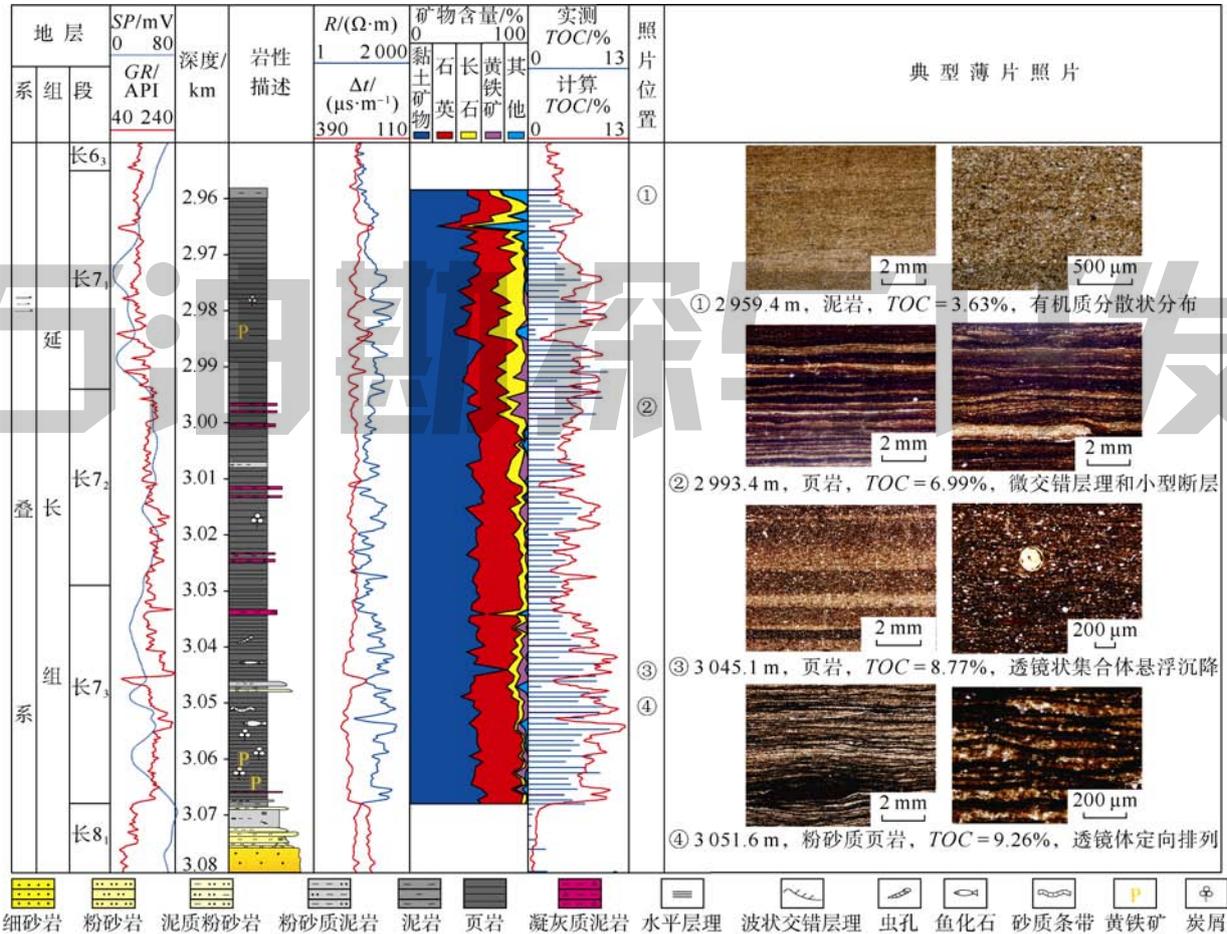


图5 鄂尔多斯盆地A井三叠系延长组长7油层组结构特征综合分析图(SP—自然电位;GR—自然伽马;R—电阻率; Δt —声波时差)

薄片观察表明A井岩性与层理构造复杂(见图5):既发育波状纹层页岩、水平纹层页岩和似块状页岩,也发育块状泥岩、粒序层理泥岩,反映沉积时湖泊水体环境变化较大,有机碳发育受其控制。泥岩有机碳含量相对较低,有机质一般分散分布;页岩有机碳含量较高,有机质一般成层分布。

B井位于研究区中部环县地区,连续取心长度达120 m,取心层位为长7₃—长7₁小层(见图6)。长7₃小层中下部发育深湖相页岩夹砂质碎屑流粉砂岩,以富有机质页岩沉积为主,页岩相发育,黏土矿物、有机碳与黄铁矿含量高;长7₃沉积晚期湖泊水体开始逐渐变浅,盆地西北部三角洲快速生长,导致B井地区处于半深湖—前三角洲过渡相带,因此长7₃上部—长7₁以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩沉积为主,并夹较厚层河口坝砂体。前三角洲—半深湖环境形成的泥岩有机碳含

量明显较低,一般小于1%。长7₃深湖亚相发育似块状页岩,镜下观察主要由压实后的有机质—黏土矿物结合体呈现的扁平状透镜体组成,可见多种结构的超微化石,有机碳含量可高达20%以上。长7₂沉积时水体受重力流沉积影响,发育半深湖亚相块状、粒序状泥岩,常见变形构造。A井和B井有机碳含量纵向分布均具有明显的旋回性,反映有机质勃发周期等特征。

4 长7油层组富有机质页岩沉积模式

关于“泥岩”和“页岩”的概念及其理论内涵在学术界还比较模糊^[26],一般认为页理发育的泥状岩称为页岩,页理不发育的泥状岩称为泥岩。本次研究通过实例解剖,揭示了长7油层组泥岩和页岩在岩石特征与结构、矿物与元素组成、有机质赋存状态与地球化学特征等方面的差异(见表1、表2)。

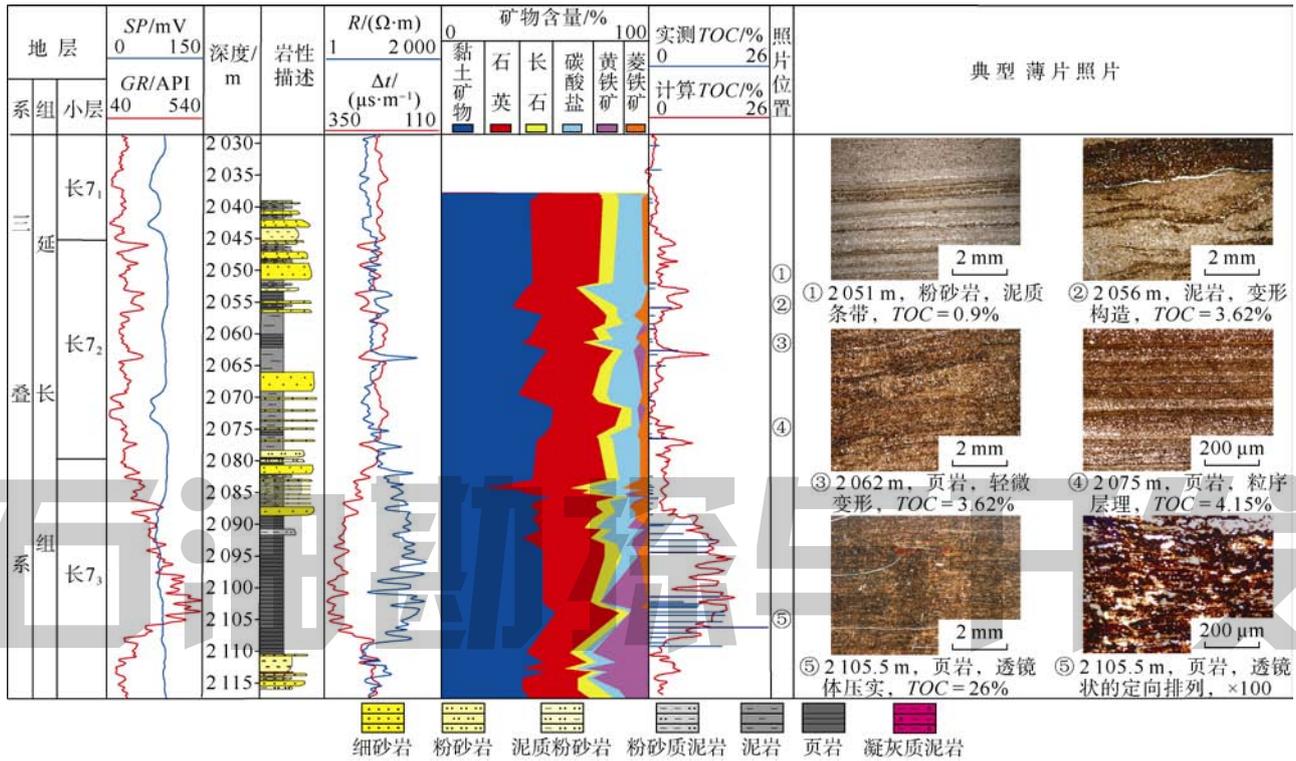


图 6 鄂尔多斯盆地 B 井三叠系延长组长 7 油层组结构特征综合分析图

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 油层组泥岩与页岩沉积结构差异

岩石类型	颜色	层理构造	含砂量	炭质、沥青含量	岩石组成	黏土矿物含量	石英、长石含量	有机碳含量	黄铁矿含量	岩石结构
泥岩	浅灰、灰色为主	块状层理为主	5%~20%	较少，不污手	黏土矿物、石英、长石、菱铁矿等	一般 小于 50%	一般 大于 40%	一般 小于 3%	一般 小于 2%	含砂质结构
页岩	深灰、黑色为主	页理构造	一般小于 5%	炭质页岩污手	黏土矿物、石英、长石、有机质、黄铁矿等	一般 大于 50%	一般 小于 40%	一般 大于 5%	一般 大于 3%	黏土质、泥质结构

表 2 鄂尔多斯盆地长 7 油层组泥岩与页岩地球化学特征差异

岩石类型	平均有机碳含量/%	干酪根类型	可溶烃 S ₁ /(mg·g ⁻¹)	热解烃 S ₂ /(mg·g ⁻¹)	产油潜率(S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)	残余碳 S ₄ /(mg·g ⁻¹)	产率指数	氢指数/(mg·g ⁻¹)	有效碳/%	降解率/%
泥岩	2.21	II ₁ —II ₂	1.41	6.88	8.29	30.83	0.19	143.96	0.66	14.47
页岩	10.63	I—II ₁	4.25	58.63	62.88	131.93	0.12	296.20	5.30	27.20

页岩比泥岩颜色深，页理构造发育，石英、长石等碎屑矿物含量较低，黏土矿物含量一般大于 50%，黄铁矿含量平均为 10%，远高于泥岩。页岩残余有机碳含量一般为 4%~20%，最高可超过 30%，平均为 10.63%，是泥岩的 5 倍。泥岩残余有机碳含量主要为 0.5%~1.5%，最高不超过 4.5%，平均为 2.21%。页岩 S₁ 平均含量是泥岩的 3 倍，产油潜率 S₁+S₂ 约为泥岩的 8 倍。薄片观察表明页岩中有机质多呈纹层状连续分布，而泥岩中有机质一般呈星点状分散分布，或者与矿物层完全混合呈絮凝状分布。页岩干酪根类型以 I—II₁ 型为主，泥岩以 II₁—II₂ 型为主。

泥岩一般形成于半深湖—深湖重力流和前三三角洲

与滨浅湖环境。由于陆源碎屑物质供给相对充分，沉积速率较快，因此其纹层构造不明显，这是与页岩在结构上的最直观差异。半深湖—深湖重力流环境形成的泥岩，粉砂质含量较高，常见递变层理和块状层理，其成因机制以浊流为主，纵向上可观察到鲍马序列。鲍马序列 C—E 段岩性细，黏土矿物与有机质含量高，也可形成优质烃源岩；而 A—B 段岩性较粗，石英、长石等含量较高，沉积快速，有机碳含量较低。由于受三角洲物源和水动力的影响，泥岩中粉砂质含量普遍较高，前三三角洲环境形成的泥岩的有机碳含量明显较低，发育受水动力和底栖生物改造的多种层理构造。

页岩主要形成于相对封闭的深湖环境，陆源碎屑

物质供给不足，沉积速率低，底栖生物不发育，从而发育季节性纹层结构，形成硅酸盐矿物与有机质的二元结构。当湖泊出现季节性分层时，可形成明暗相间的纹层。在有湖流或者浊流影响时，也能形成似波状层理，有机质呈断续分布，表明深湖区水体不是非常安静。在陆源碎屑物质供给严重不足的深湖区，由于长时间降解，有机质呈分散状分布，这种富有机质页岩一般形成于深度最大、最为安静的水体中。此外，由黄铁矿、胶磷矿透镜状定向排列分布的黏土集合体

所形成的页岩有机碳含量最高，普遍在长7₃底部出现，反映当时沉积环境具有极高的生产力和较低的陆源物质输入。

富有机质页岩是一种非常重要的细粒沉积岩，是含油气盆地最重要的烃源岩，同时也是页岩油、气的储集岩。富含有机质是其基本特征。鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组富有机质页岩的沉积模式以湖侵—水体分层模式为主（见图7），“沉积相带、水体深度、缺氧环境、湖流”是控制其分布的主要因素。

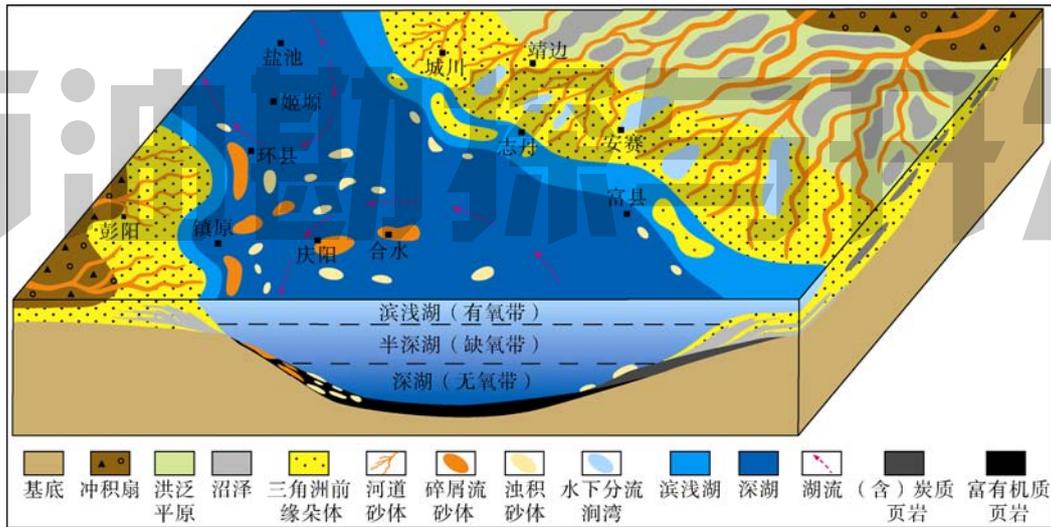


图7 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组细粒沉积体系与富有机质页岩分布模式

本次研究认为：深湖亚相宁静水体泥页岩分布区页岩有机碳含量高，干酪根以I型为主，主要受湖流作用影响；砂质碎屑流背景下深湖相泥页岩分布区以页岩、砂岩互层为主，有机碳含量高，干酪根为I—II₁型，受浊流和砂质碎屑流影响；前三角洲背景下半深湖相泥页岩分布区以泥岩、粉砂质泥岩为主，有机碳含量低，干酪根以II型为主，主要受三角洲喷流和湖流作用影响；河流—三角洲平原炭质泥页岩分布区以炭质泥岩为主，有机碳含量高，干酪根以II、III型为主。

长7油层组沉积期是鄂尔多斯盆地三叠系湖侵发育的最主要时期，长7₃小层沉积期的湖泊面积超过5×10⁴ km²，深湖区水体深度可达150 m，水体盐度一般小于1‰，为淡水环境。长7₃沉积期快速湖侵，湖水深度和范围急剧增加，深湖区表层水体与下层水体由于温度差异导致上下水体循环受阻，造就了深湖区大面积的缺氧环境，因此有利于富有机质页岩的发育。另外，火山活动对湖盆生产力的提高和缺氧环境的形成也有很大促进作用^[22-23]。

薄片观察发现，长7富有机质页岩中存在具多种

结构的微体、超微体化石。这些生物化石有多种类型，外形上有球形、椭球形等，常具有胶磷矿和黄铁矿外壳，内部为有机质。原生的厚胶磷矿外壳和生物膜壳的快速黄铁矿化是长7段有机质得以保存的主要因素。含有化石的层段多位于长7₃底部，且具有短暂的“勃发—消亡”特征，常出现在凝灰质纹层附近，因此证实火山喷发和湖底热液活动等可能是其触发机制。

5 结论

随着全球致密油气、页岩油气勘探开发需求的不断增长，细粒沉积学已成为国内外学者研究的前沿。与砾岩等粗粒沉积岩相比，泥页岩等细粒沉积岩的研究程度总体较低，目前还缺乏系统性与完整性。因此急需发展与完善针对性的研究方法体系，开展典型盆地沉积环境与细粒沉积学特征解剖，建立不同类型细粒沉积体系的分布模式，预测致密储集层与富有机质页岩的空间分布，以推动致密油气、页岩油气的勘探进程。

鄂尔多斯盆地湖相富有机质页岩主要分布于三叠

系延长组长 7 油层组,是盆地中生界最重要的烃源岩和致密油勘探目的层。通过长 7 油层组 3 个小层的岩相-沉积相工业编图,刻画了其细粒沉积体系,明确了各小层的岩相与沉积相分布特征。应用岩心描述、薄片观察、X衍射、地球化学测试、有机碳测井定量计算等方法,揭示了富有机质页岩岩石学特征、纹层结构及其有机质分布规律。通过典型井地球化学测试与有机碳测井定量计算,发现有机碳含量纵向上具有明显的旋回性特征。

建立了以湖侵—水体分层为主的湖相富有机质页岩的沉积模式,提出“沉积相带、水体深度、缺氧环境、湖流”是富有机质页岩分布的主控因素。远离三角洲前缘的深湖区,受湖流影响较小,水体相对安静,表层水中浮游生物遗体与黏土或火山喷发物混合的有机质团粒,是富有机质页岩的主要物质来源,因此岩石类型以页岩为主,干酪根以 I 型为主;发育砂质碎屑流的深湖相区,富有机质页岩与砂岩互层,有机碳含量高,干酪根以 I—II₁ 型为主,砂质碎屑流砂岩沉积有利于下伏页岩有机质的保存;邻近三角洲前缘的半深湖区,受湖流影响较大,水体相对动荡,岩石组除了浮游生物遗体与黏土外,还有三角洲带来的陆源碎屑和植物碎片等,因此岩石类型以泥岩、粉砂质泥岩为主,干酪根以 II 型为主。

致谢:本文在编写过程中得到了中国石油勘探开发研究院邹才能教授的指导与帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Krumbein W C. The dispersion of fine-grained sediments for mechanical analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1932, 2(3): 140-149.
- [2] Picard M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 179-195.
- [3] Macquaker J H S, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(5): 735-744.
- [4] Schieber J, Zimmerle W. The history and promise of shale research[C]//Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. Shales and mudstones: Vol.1: Basin studies, sedimentology and paleontology. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 1998: 1-10.
- [5] Wright A E. Three-dimensional shape analysis of fine-grained sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(3): 306-312.
- [6] Potter P E, Maynard J B, Pryor W A. Sedimentology of shale: Study guide and reference source[M]. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [7] Dean W E, Leinen M, Stow D A V. Classification of deep-sea fine-grained sediments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55: 250-256.
- [8] Dimberline A J, Bell A, Woodcock N H. A laminated hemipelagic facies from the Wenlock and Ludlow of the Welsh Basin[J]. *Journal of the Geological Society*, 1990, 147(4): 693-701.
- [9] Lemons D R, Chan M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(4): 635-665.
- [10] Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 491-498.
- [11] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2013.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [12] Macquaker J H S, Keller M A. Mudstone sedimentation at high latitudes: Ice as a transport medium for mud and supplier of nutrients[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(4): 696-709.
- [13] 吴崇筠,薛叔浩.中国含油气盆地沉积学[M].北京:石油工业出版社,1993.
Wu Chongjun, Xue Shuhao. Sedimentology of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [14] 冯增昭,王英华,刘焕杰,等.中国沉积学[M].北京:石油工业出版社,1994: 396-457.
Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Liu Huanjie, et al. Sedimentology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 396-457.
- [15] 冯增昭.中国沉积学[M].2版.北京:石油工业出版社,2013: 706-811.
Feng Zengzhao. Sedimentology of China[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 706-811.
- [16] 薛叔浩,刘雯林,薛良清,等.湖盆沉积地质与油气勘探[M].北京:石油工业出版社,2002.
Xue Shuhao, Liu Wenlin, Xue Liangqing, et al. Sedimentary geology and oil exploration in lacustrine basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [17] 胡见义,黄第藩,徐树宝,等.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.
Hu Jianyi, Huang Difan, Xu Shubao, et al. The basis of continental petroleum geology theory in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [18] 中国科学院兰州地质研究所.青海湖综合考察报告[M].北京:科学出版社,1979.
Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Comprehensive inspection report of Qinghai Lake[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [19] 中国科学院南京地理与湖泊研究所.中国湖泊概论[M].北京:科学出版社,1989.
Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences. Introduction to China's lakes[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [20] 中国科学院南京地理与湖泊研究所.云南断陷湖泊环境与沉积[M].北京:科学出版社,1989.
Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences. The environment and deposition of rift lakes in Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [21] 邓宏文,钱凯.深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J].沉积学报,1990,8(3): 1-19.
Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(3): 1-19.
- [22] 张文正,杨华,杨奕华,等.鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J].地球化学,2008,37(1): 59-64.

- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 59-64.
- [23] 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 Ping'an, 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.
- [24] 拜文华, 吴彦斌, 高智梁, 等. 浅湖—半深湖相湖湾环境油页岩成矿富集机理研究[J]. *地质调查与研究*, 2010, 33(3): 207-214.
Bai Wenhua, Wu Yanbin, Gao Zhiliang, et al. Study on the mechanism of oil shale minerogenetic enrichment in the arm of shallow to half-deep lake depositional environment[J]. *Geological Survey and Research*, 2010, 33(3): 207-214.
- [25] 黄保家, 黄合庭, 吴国璋, 等. 北部湾盆地始新统湖相富含有机质页岩特征及成因机制[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 25-32.
Huang Baojia, Huang Heting, Wu Guoxuan, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 25-32.
- [26] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积研究的几个问题[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1031-1039.
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): 1031-1039.
- [27] Jones R W. Organic facies[C]//Brooks J, Welte D. *Advances in petroleum geochemistry*. London: Academic Press, 1987: 1-90.
- [28] 陈安宁, 耿国仓, 秦仲碧, 等. 鄂尔多斯地区上古生界煤系沉积有机相及成烃能力, 煤成气研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
Chen Anning, Geng Guocang, Qin Zhongbi, et al. Organic facies and hydrocarbon generation ability of upper Paleozoic coal-bearing sediments in Ordos Basin, the study of coal generated gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987.
- [29] 郝芳, 陈建渝, 孙永传, 等. 有机相研究及其在盆地分析中的应用[J]. *沉积学报*, 1994, 12(4): 77-87.
Hao Fang, Chen Jianyu, Sun Yongchuan, et al. Organic facies studies and their use in sedimentary basin analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(4): 77-87.
- [30] 金奎励, 李荣西. 烃源岩组分组合规律及其意义[J]. *天然气地球科学*, 1998, 9(1): 23-30.
Jin Kuili, Li Rongxi. The compositional regulation of the source rock composition and its meaning[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1998, 9(1): 23-30.
- [31] 朱创业. 海相碳酸盐岩沉积有机相研究及其在油气资源评价中的应用[J]. *成都大学学报: 自然科学版*, 2000, 19(1): 1-6.
Zhu Chuangye. Sedimentary organic facies studies of marine carbonate rocks and their use in petroleum resource evaluation[J]. *Journal of Chengdu University: Natural Science Edition*, 2000, 19(1): 1-6.
- [32] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129-136.
- [33] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. *天然气工业*, 2012, 32(4): 1-5.
Kang Yuzhu. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(4): 1-5.
- [34] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics, and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 14-26.
- [35] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 14-27.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 14-27.
- [36] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 1-10.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 1-10.
- [37] 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.
Yang Junjie. Tectonic evolution and gas reservoirs distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [38] 杨华, 付金华, 何海清, 等. 鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 641-648.
Yang Hua, Fu Jinhua, He Haiqing, et al. Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huaqing, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 641-648.
- [39] 毛明陆, 李元昊, 刘联群, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆沉积演化与层序地层特征[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2006, 36(增刊): 48-54.
Mao Minglu, Li Yuanhao, Liu Lianqun, et al. Lake evolution and sequence-stratigraphic features of Yanchang Formation, Triassic system in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2006, 36(Special): 48-54.
- [40] 邓秀琴, 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.
- [41] 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.
- [42] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.
Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.

第一作者简介: 袁选俊 (1963-), 男, 四川南部人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事湖盆沉积学与岩性地层油气藏分布规律研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083, E-mail: yxj@petrochina.com.cn
收稿日期: 2014-03-20 修回日期: 2014-11-28

(编辑 林敏捷 绘图 刘方方)