

引用格式:赵俊峰,刘池洋,张东东,等.鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组长7段剖面及其油气地质意义[J].油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 233-245.

ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, ZHANG Dongdong, et al. Description and its hydrocarbon geological implications of outcrop sections of Triassic Chang-7 Member in southern Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 233-245.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.020

鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组长7段剖面及其油气地质意义

赵俊峰¹, 刘池洋¹, 张东东¹, 郭懿萱², 齐亚林², 吕奇奇³, 张龙^{1,4}, 马焕焕^{1,5}

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 3. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 4. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 5. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司长庆物探处, 陕西 西安 710200)

摘要:三叠系延长组长7段为鄂尔多斯盆地中生界石油的主力烃源岩,也是页岩油勘探与开发的重要对象。长7段沉积期为延长组湖盆鼎盛阶段,沉积了一套厚度100~120 m以泥页岩类为主的细粒碎屑岩建造,可划分为3个亚段,长7₁、长7₂为当前页岩油重点勘探开发层系。为了加深对长7段沉积环境和油气地质特征的理解,在野外剖面实测基础上,结合前人工作,重点对渭北铜川地区衣食村、背阴村、瑶曲、霸王庄、淌泥河长7段典型露头进行了描述,并讨论了中一晚三叠世延长组富烃凹陷形成的地质背景。结果表明,从长7₃到长7₁,湖盆经历了由鼎盛逐渐收缩、湖平面下降的过程,砂岩含量向上部逐渐增多。研究剖面处于延长组湖盆沉积的深水区,长7段沉积类型既有正常深水细粒沉积岩,也发育类型丰富的深水重力流沉积以及异地搬运形成的火山凝灰岩、具有深部流体成因特征的碳酸盐岩结核等。这些重要现象记录了延长组沉积期富烃坳陷形成的特殊地质背景和过程,对理解陆相盆地烃类生成和富集机理、页岩油勘探开发具有重要的启示。

关键词:露头剖面;页岩油;富烃坳陷;长7段;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121

文献标识码: A

Description and its hydrocarbon geological implications of outcrop sections of Triassic Chang-7 Member in southern Ordos Basin

ZHAO Junfeng¹, LIU Chiyang¹, ZHANG Dongdong¹, GUO Yixuan², QI Yalin², LYU Qiqi³, ZHANG Long^{1,4}, MA Huanhuan^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 4. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 5. Changqing Geophysical Prospecting Section, BGP INC., China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi 710200, China)

Abstract: Chang-7 Member in the Triassic Yanchang Formation served as the most important source rock of oil in the Mesozoic Ordos Basin, and it is also the realistic interval for the exploration and development of shale oil. The Chang-7 Member represents the climax depositional period of the Triassic lake basin. It is composed of a set of fine-grained clastic rocks, including mudstone and oil shale etc. The thickness of the Chang-7 Member is 100~120 m, which can be divided into three sub-members. Among them, the Chang-7₁ and Chang-7₂ sub-members have been proved as the key intervals for exploration and development of shale oil. To deepen the understanding of the sedimentary environment and oil and gas geological characteristics of the Chang-7 Member, measurement of the field sections are combined with the previous work. The well-exposed sections of the Chang-7

收稿日期: 2021-05-31。

第一作者简介: 赵俊峰(1975—),男,博士,副教授,主要从事盆地分析与沉积学方面的教学、科研工作。地址: 陕西省西安市太白北路229号, 邮政编码: 710069。E-mail: zjf@nwu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金“坳陷湖盆斜坡生长对砂质沉积物分散样式的指示——以鄂尔多斯盆地为例”(42172123); 西北大学地质学系科研团队基金“坳陷湖盆斜坡差异生长的沉积学响应”(DZX-2020-T-3)。

Member in Yishicun, Beiyincun, Yaoqu, Bawangzhuang and Tangnihe in Tongchuan area are described in detail. Furthermore, the geological background of the formation of hydrocarbon-rich depression in the middle-late Triassic stages is discussed. Our results show, the lake basin went through gradual shrinkage and declining lake level from Chang-7₃ sub-member to Chang-7₁ sub-member, and the sandstone content gradually increase to the upper part. The study area is located in the deep lake area of the Yanchang Formation deposition. The sedimentary types in the Chang-7 Member include not only normal deep-water fine-grained sedimentary rocks, but also diverse deep-water gravity flow deposits, volcanic tuff, and carbonate rocks which might source from hydrothermal fluid in the deep part. These important phenomena record the special process of the formation of the hydrocarbon-rich depression, and have important implications for understanding the hydrocarbon formation and enrichment mechanism, as well as the exploration and development of shale oil.

Keywords: outcrop section; shale oil; hydrocarbon-rich depression; Chang-7 Member; Yangchang Formation; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省(区),面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国第二大沉积盆地,盆地内石油、天然气、煤及铀等多种能源矿产富集(图1a)^[1]。该盆地是中国陆上最早开展石油勘探的地区,但直至上世纪末期,才实现油气勘探和产量的重大突破,目前已建成中国最大的油气生产基地。该盆地石油资源主要分布在三叠系延长组和下、中侏罗统富县组、延安组碎屑岩中,勘探开发对象主要为低渗透一致密油藏。

延长组长7段页岩是鄂尔多斯盆地中生界石油的主力烃源岩,俗称“张家滩页岩”。随着勘探开发的深入,长7段也成为页岩油勘探开发的重点层段(图1b)。针对长7段烃源岩内的大规模勘探开发始于2011年,2014年长庆油田在长7₂亚段内探明了石油地质储量达 $1 \times 10^8 \text{ t}$ 的新安边油田。2019年,在长7段生油层内发现了中国最大的页岩油田—庆城油田,新增探明地质储量 $3.58 \times 10^8 \text{ t}$,证实了长7段页岩油的巨大潜力^[2,10,21]。

铜川地区位于盆地南部渭北隆起中部,处于中一晚三叠世延长组湖盆沉积中心位置(图1b,图2)。受燕山—喜山期构造挤压抬升作用,该地区延长组广泛出露地表。近年来,不少学者从页岩油的开发和利用等角度,对该区延长组“张家滩页岩”开展了研究^[3-4]。为了更好地理解长7段油页岩赋存段的沉积环境和油气地质特征,在野外剖面实测的基础上,结合前人工作,重点介绍了盆地南缘铜川地区的延长组长7段典型露头剖面,并简要分析了其油气地质意义。

1 区域地质概况

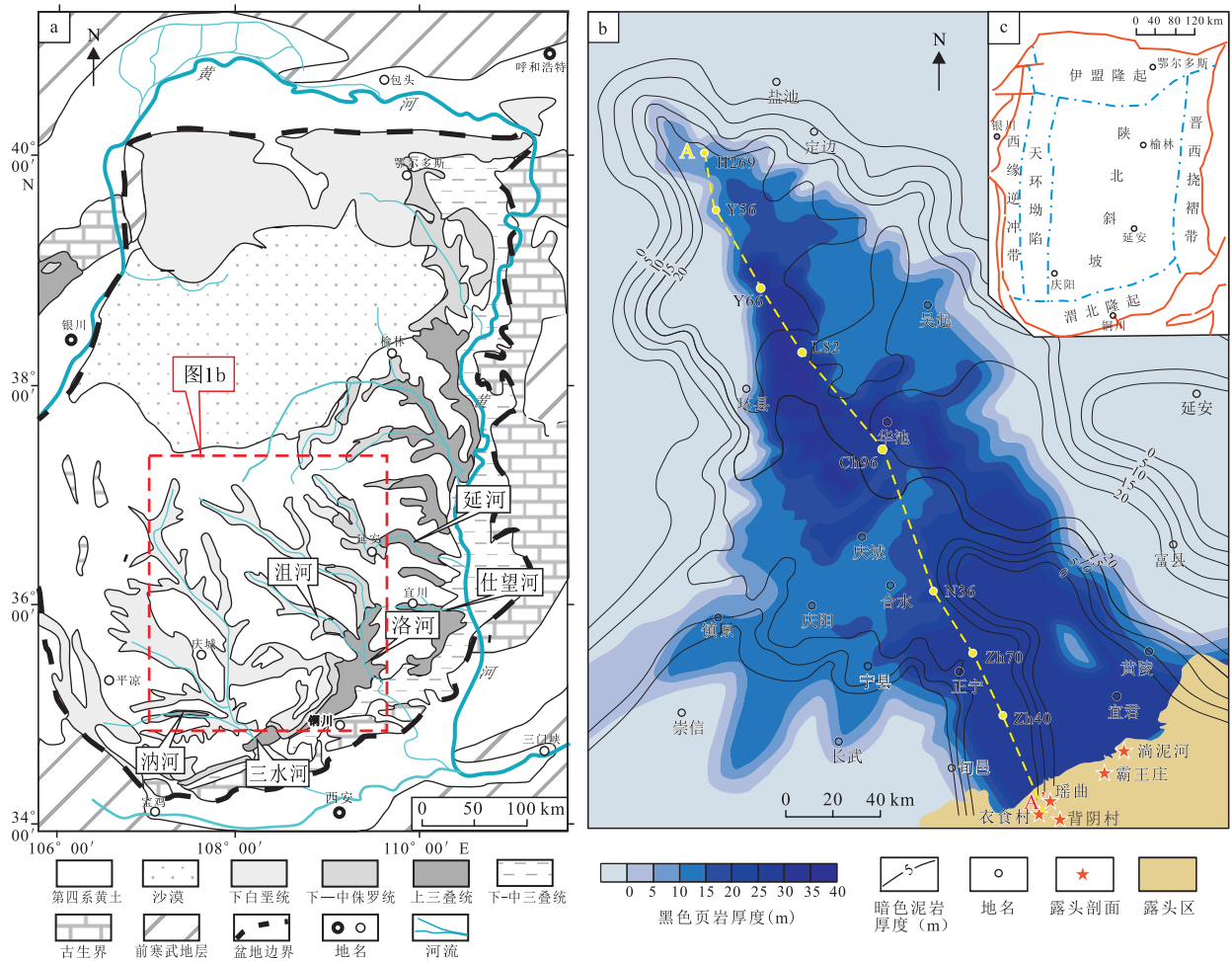
鄂尔多斯盆地是一个中生代大型内陆坳陷型湖

盆,现今残留范围呈矩形(图1a、图1b)。根据基底性质,结合现今构造形态特征,可分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、陕北斜坡、天环坳陷和西缘逆冲带6个二级构造单元(图1c)^[5]。石油资源主要分布在陕北斜坡及渭北隆起构造带内。

中一晚三叠世,受华北板块与扬子板块拼合、秦岭造山挤压作用的控制,华北西部发育了大型内陆坳陷湖盆,形成1000多米的延长组陆相碎屑岩沉积建造,其自下而上可划分为长10—长1,共10个段(油层组)。延长组沉积期,湖盆经历了形成、发展和消亡的全过程(图3a)。其中,长10~长8期为湖盆形成阶段,水体较浅,三角洲进积作用较强,砂体较为发育。长7段厚度为100~120 m,其早期为最大湖侵期,代表延长组湖盆发育的鼎盛阶段,半深湖—深湖亚相面积超过 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育黑色页岩、暗色泥岩和粉—细砂岩混积层系,泥页岩厚度可达15~50 m,局部地区超过60 m(图1b)^[6-7]。长6期进入湖退阶段,主要发育进积型三角洲沉积,为延长组最主要储集层段。之后,湖盆经历多次收缩与扩张作用,最终在长1沉积期以退缩消亡而告终^[8-13]。

2 剖面资料来源

渭北铜川地区延长组长7段露头零散分布在西南起照金、聂家河、瑶曲,向东北至金锁关北部的何家坊、烈桥、霸王庄、淌泥河等地(图2)。该区域构造属向西缓慢倾斜的单斜构造,倾角一般小于 10° 。但受瑶曲—五里走滑断层及其两侧近东西向正断层影响,在烈桥、淌泥河剖面,长7段产状较陡,可见断层和褶皱构造,部分地层近于直立^[14]。长期以来,相关高校、油田等单位对铜川地区长7段露头剖面开展了



注:a.鄂尔多斯盆地地质简图^[9];b.延长组长7段烃源岩厚度分布(改编自文献[7]),附野外剖面、钻井对比剖面位置;c.鄂尔多斯盆地构造单元划分。

图1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area



图2 铜川北部延长组长7页岩油剖面交通位置
Fig. 2 Traffic location of surveyed sections of Chang-7 Member in Yanchang Formation, northern Tongchuan area

砂岩;长 7_2 主要为灰黑色—黑色的泥岩、油页岩夹薄层深灰色粉—细砂岩;长 7_1 主要为深灰色泥岩、粉砂质泥岩、中层状粉—细砂岩。

4 重点剖面描述

4.1 衣食村—瑶曲剖面

衣食村—背阴沟—瑶曲剖面位于铜川市耀州区瑶曲镇,由衣食村(长 7_3 亚段)(北 $35^{\circ}11'37''$,东 $108^{\circ}50'51''$)、背阴村(长 7_2 亚段)(北 $35^{\circ}10'17.97''$,东 $108^{\circ}52'32.94''$)和瑶曲村(长 7_1 亚段)(北 $35^{\circ}11'32.31''$,东 $108^{\circ}52'50.34''$)3段剖面组成,根据吕奇奇等(2017)的实测,长7总厚度90.26 m(图4)^[19],分3个亚段,75个小层,实测比例尺为1:50^[19]。该剖面地层出露较好,地层产状平缓,对比标志层明显,沉积现象典型(图4、图5)。下部以凝灰岩与泥页岩互层为主,上部主要发育湖泊重力流沉积,可识别出砂质碎屑流沉积、浊流沉积、滑塌沉积、深水原地沉积、火山碎屑沉积等5种沉积类型^[19]。

4.1.1 衣食村剖面

该剖面位于耀州区瑶曲镇西南2 km去衣食村沟口公路边。公路东侧河沟称摩天沟,前人亦称之为摩天沟剖面,现在一般称为衣食村剖面。该剖面出露长段 7_3 亚段和长 7_2 亚段,其中长 7_3 (第1~39层)总厚约41.48 m,岩性为黑色油页岩与褐灰、灰黑色凝灰岩互层,夹少量碳酸盐岩条带或结核,与下伏延长组长8段灰绿色三角洲前缘亚相砂泥岩互层连续沉积。长 7_3 亚段主要发育湖泊相、半深湖—深湖亚相深水原地沉积和火山碎屑沉积2种微相,凝灰岩厚度从数毫米到1 m以上,其横向展布较为稳定,指示当时周邻地区有较为强烈火山活动;长 7_2 亚段下部为黑色油页岩与毫米级凝灰岩频繁互层,上部黑色油页岩夹薄条带状凝灰岩和小型砂岩脉^[14]。

4.1.2 背阴村剖面

该剖面位于瑶曲镇西南4 km乡村公路边,该观察点仅出露长 7_2 亚段。长 7_2 亚段(第40~51层)总厚21.21 m,主要发育水道型重力流沉积和湖泊2类相,含深水原地沉积和砂质碎屑流沉积、浊流沉积、滑塌沉积4种微相。岩性以深灰褐色、灰黑、黑色泥(页)岩为主,其次为灰黑色、灰色泥质粉砂岩和细砂岩,

局部可见少量毫米级厚度的凝灰岩层^[14]。

4.1.3 瑶曲剖面

该剖面位于瑶曲镇东侧往石柱路口河边陡崖处,该观察点仅出露长 7_1 亚段,且未见长 7_1 底,上覆为长6段,为一套典型的深水沉积序列,发育多种类型深水沉积。长 7_1 亚段(第52~75层)总厚27.97 m,主要发育水道型重力流沉积和湖泊2个相,含深水原地沉积、浊流沉积、砂质碎屑流沉积3种微相。与长 7_3 亚段、长 7_2 亚段相比,长 7_1 亚段泥(页)岩颜色稍微变浅,以深灰色、灰黑色为主,黑色、灰绿色次之;砂岩厚度变大,以灰色、浅灰色细砂岩、粉砂岩为主,凝灰岩不发育。观察点揭露的地层厚度尽管几十米,却可见正常深水沉积、砂质碎屑流沉积、浊流沉积以及同沉积变形及后期构造变形集于一处。加之交通方便,易于观察和采样,是研究长7段深水沉积和砂质碎屑流成因以及延长组沉积期构造活动等的理想场所^[14]。

4.2 霸王庄剖面

霸王庄剖面位于铜川市印台区金锁关镇半山腰处,在霸王庄采石场一带,断续见长 7_3 和长 7_2 地层出露,下伏长8,长 7_2 未见顶(图6—图8)。该地区的油气勘探历史,可追溯至1911年中美合资开采的霸王庄和金牛庄石油,曾钻井深300 m,日出油350 kg。后因战乱停产^[14]。

霸王庄剖面实测厚度31.70 m(图6),比例尺为1:200,实测剖面沿山坡地形分布,由东、西两部分组成,共47层。西部剖面(层位靠下)分为15层(图8a),起点地理坐标:北 $35^{\circ}14'18.49''$,东 $109^{\circ}01'56.51''$, $H=1\ 220$ m,终点坐标:北 $35^{\circ}14'6.88''$,东 $109^{\circ}02'17.16''$, $H=1\ 241$ m。地层倾向 $250^{\circ}\sim 355^{\circ}$,地层倾角 $17^{\circ}\sim 27^{\circ}$ 。东部剖面(层位靠上)分为32层(图8b),起点坐标:北 $35^{\circ}14'02.09''$,东 $109^{\circ}02'10.75''$, $H=1\ 234$ m,终点坐标:北 $35^{\circ}14'6.88''$,东 $109^{\circ}02'17.16''$, $H=1\ 241$ m。地层倾向主体向北,地层倾角 $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。

长 7_3 亚段(第1~37层)厚度20.33 m。主要发育厚层黑色泥页岩以及薄层砂岩,夹有1~3 cm厚的土黄色凝灰岩薄层,黑色页岩中富集植物化石、介形虫等化石。发育湖泊、重力流两种沉积体系,鲍马序列、槽模、沟模、块状层理等沉积特征和沉积构造在

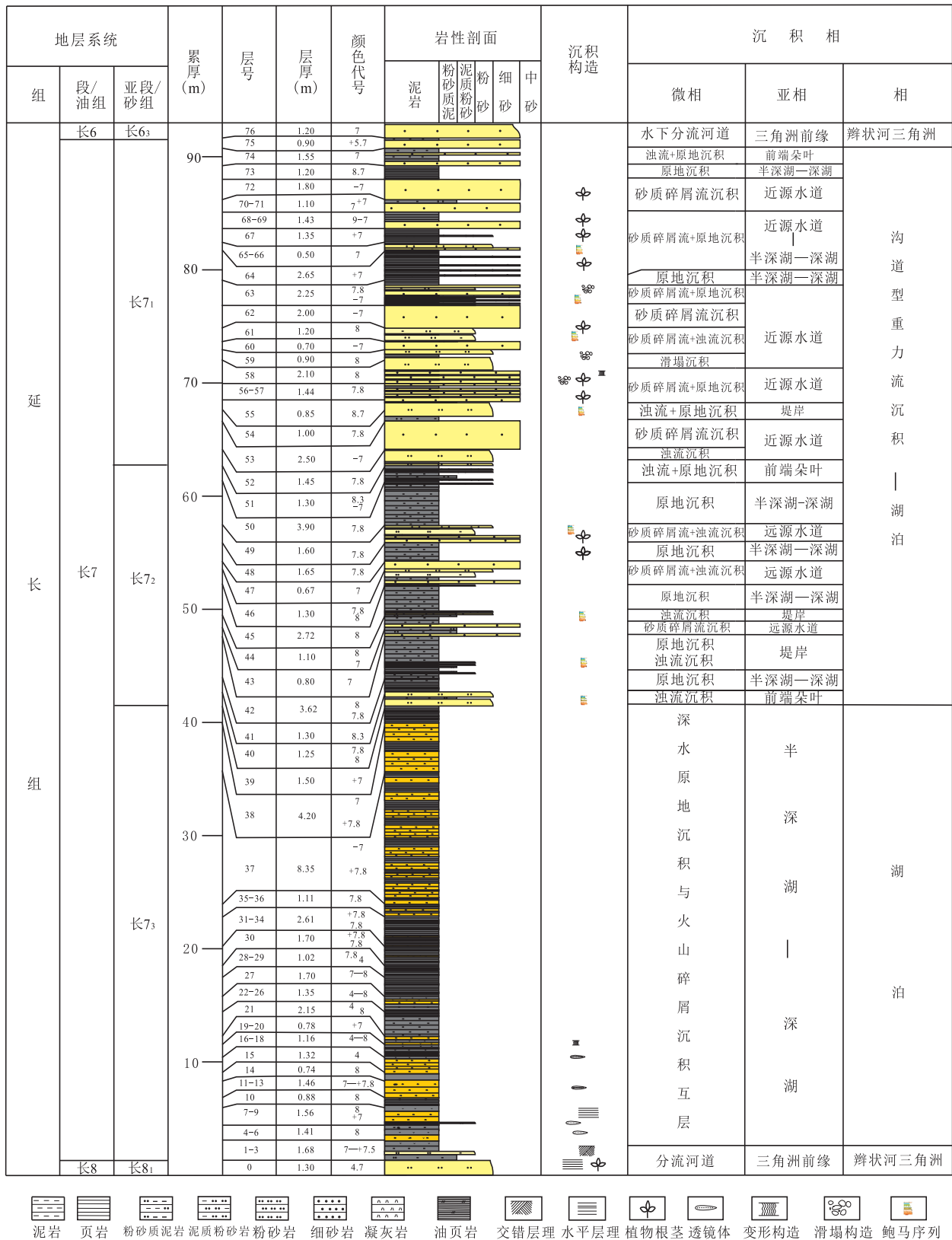
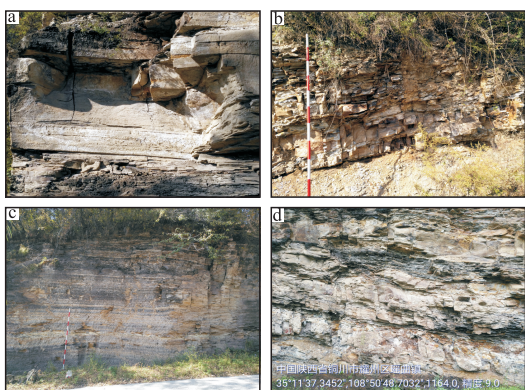


图4 衣食村—瑶曲剖面长7段实测柱状图(修编自文献[19])

Fig. 4 Measured lithological column of Chang-7 Member in Yishi Village-Yaoqu section (Modified from reference[19])



注:a.长7下伏长8段的顶部三角洲前缘沉积砂岩;b、c.长73底部油页岩夹多层凝灰岩;d.长7₃顶部油页岩与粉砂岩互层。

图5 衣食村—瑶曲剖面长7段典型野外照片

Fig. 5 Photographs of representative lithofacies and typical sedimentary characteristics of the Chang-7 Member in Yishi Village-Yaoqu section

砂岩中广泛存在。长7₂亚段(第38~47层)厚11.37 m。岩性主要为黑色厚层粉砂岩、黑色页岩夹深灰色粉砂岩,页岩层内可见碳酸盐结核,黑色页岩的占比较长7₃亚段降低。虽然长7段沉积环境整体属于较为稳定的半深湖—深湖环境,然而在地层内部仍可见微型构造,如断裂、褶皱、错动等现象,同时发育一些同沉积构造作用引起的液化变形砂岩脉,或水平状分布于母岩层,或向上沿泥页岩破裂缝穿入并逐渐变薄至尖灭,指示沉积环境和水动力状态具有一定的活动性。另外,在该剖面泥页岩中可见灰色、灰黑色、褐黄色的“钙质结核”,直径2~95 cm,顺层分布,与围岩呈包绕接触关系(图6—图7)^[20]。

4.3 淌泥河剖面

剖面出露于宜君县哭泉乡淌泥河村南端民房东侧山坡陡崖处,地理坐标:北35°16′25″,东109°04′12″,海拔1314 m。根据岩性特征和岩矿分析资料,将淌泥河出露的长7页岩划归长73亚段(顶、底均未见)。与相邻剖面对比,该观察点长73凝灰岩夹层较少,以页岩层中出现大型垂直或斜穿层理的不规则砂岩层而引人注目^[14],可见鱼类化石。该剖面地层倾角为60°左右,倾向北北东向,在剖面南侧发育逆断层。据耳闯等(2015)实测,测量段厚度约为20 m,从底到顶发育11个沉积旋回,每个旋回由底到顶,均呈黑色页岩—深灰色泥质粉砂岩的岩性组合,反映深湖环境下原地细粒悬浮沉积与异

地重力流沉积的交替过程(图9)^[18]。

5 长7段沉积演化及其油气地质意义

5.1 长7段沉积相演化

长7段沉积期,鄂尔多斯盆地周缘区域构造较活跃,受西南方向秦岭造山带强烈挤压和东北方向垂向隆升的影响,发生了南北不平衡、不对称的快速拗陷沉降作用,导致湖盆基底具“南陡北缓”的分布格局,主要接受来自东北和西南两个方向的物源供给。长7段沉积期是延长组湖盆最大的扩张期,湖水深、水域广,形成了面积达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的半深湖—深湖区(图1b),沉积了一套以暗色泥岩、黑色页岩为主的,厚度达100 m以上的生油岩系,奠定了中生代陆相湖盆生油的基础(图10)。位于盆地中南部的铜川地区长7段以半深湖—深湖亚相沉积为主(图11),以长7₃亚段“张家滩页岩”为代表的最大湖侵期之后,长7₂亚段沉积期和长7₁亚段沉积期随着湖盆的萎缩,因河流注入,受重力流沉积作用,在深湖区建造了一套以砂质碎屑流和浊流为主的细粒沉积砂体,广覆式分布的泥页岩与大面积粉砂—细砂岩紧密接触或呈互层,源—储配置关系好,形成有利的油气聚集场所^[2]。

5.2 长7段页岩油赋存特征

延长组长7段在湖盆中部主要发育细砂岩、粉砂岩和暗色泥岩、页岩等,总体以泥质岩类为主,砂岩厚度薄,砂地比值低。黑色页岩有机质类型主要为II₁型和I型,有机质丰度平均值为13.81%,暗色泥岩有机质类型主要为II₁型和II₂型,有机质丰度平均值为3.74%。长7烃源岩的干酪根实测R_o为0.61%~0.98%,达到生油高峰阶段^[2,10]。

根据岩性组合、砂地比、砂体厚度等因素,可将长7段页岩油划分为3类,即多期叠置砂岩发育型(I类)、厚层泥页岩夹薄层粉—细砂岩型(II类)和纯页岩型(III类)^[7,11-12]。I类页岩油发育多期叠置薄砂岩,单砂体厚度一般小于5 m,是目前勘探开发的主要对象;II类页岩油以厚层泥页岩层系内发育厚度2~4 m的薄层粉—细砂岩,是目前风险勘探攻关的主要目标;III类页岩油以厚层富含有机质的页岩发育为特征,砂岩不发育,适合于地下原位加热转化开发^[2]。I类和II类页岩油主要分布在长7₁和长7₂亚

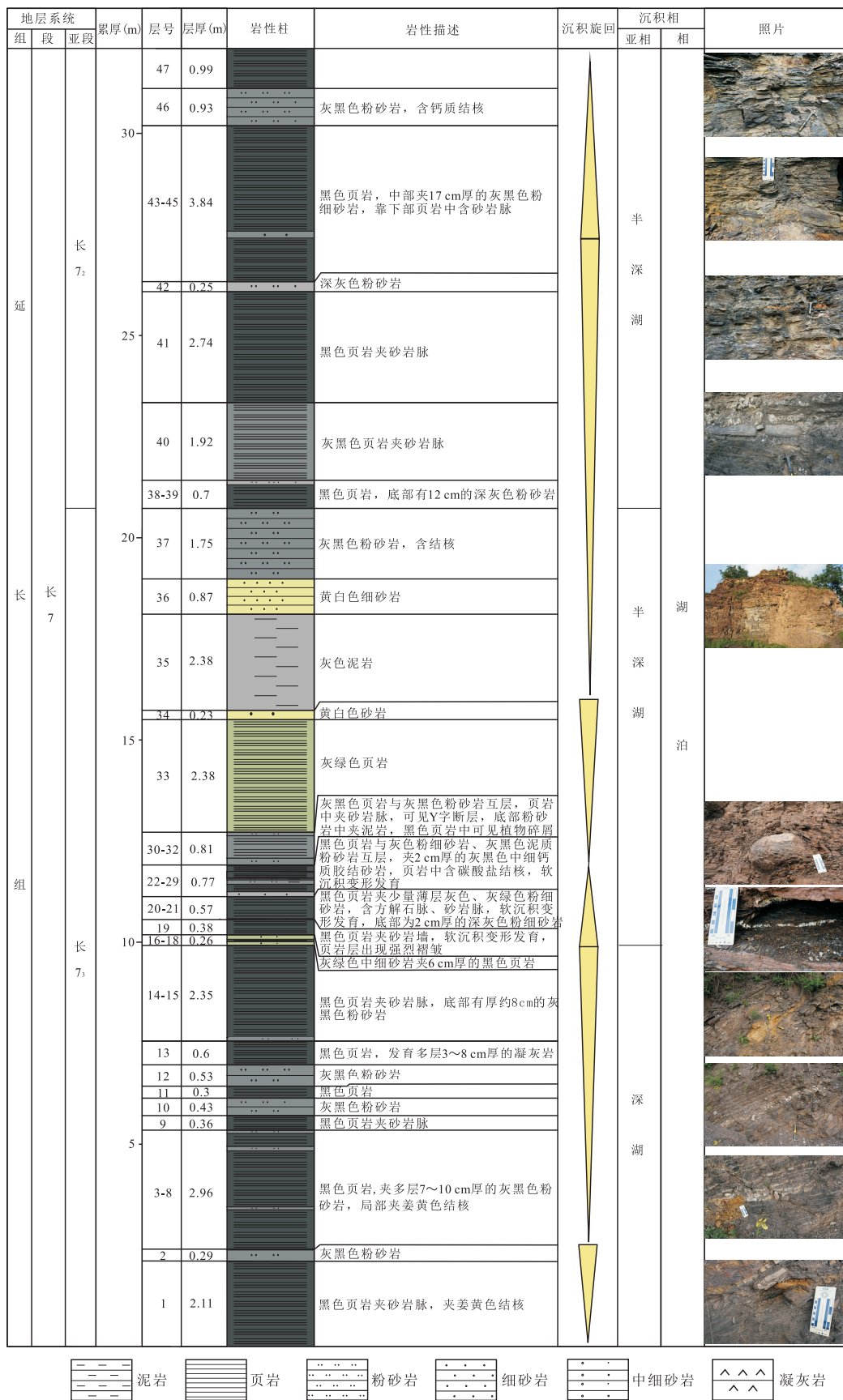
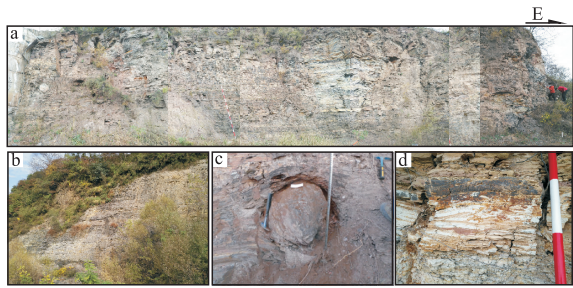


图6 霸王庄剖面长7段实测柱状图

Fig. 6 Measured lithological column of Chang-7 Member in Bawangzhuang section

段,III类页岩油主要分布在长7₃亚段。长7段页岩油是以吸附与游离状态赋存于生油层系内的砂岩和泥质砂岩中,未经过大规模长距离运移而形成的石油聚集^[13],主要为受物性差异控制的岩性遮挡形成的岩性油藏。储集层改造前无自然工业产量,目前多采用水平井体积压裂改造进行开发^[2,12]。



注:a,c.长7₃下部油页岩沉积,夹凝灰岩和碳酸盐岩结核;b.长7₃上部油页岩沉积;d.长7₃顶部泥岩中发育的软沉积物褶皱变形构造。

图7 霸王庄剖面长7油层组露头特征

Fig. 7 Photographs of representative lithofacies and typical sedimentary characteristics of Chang-7 Member in Bawangzhuang section

5.3 对富烃坳陷形成的指示

在盆地中—南部长7段露头剖面和钻井岩心,均可见多层凝灰岩夹层(图4—图7)。在露头新鲜剖面或岩心中,凝灰岩夹层的颜色与其间互出现的砂、泥岩层差别较大,易于识别,其颜色以灰黄色、灰褐色等为主;凝灰岩夹层单层厚度从5~500 mm不等。前人对长7段烃源岩凝灰岩夹层中的锆石已进行了多种方法的年代学分析和研究。LA-ICP-MS U-Pb法测试所获得的年龄大致可分为3组:221±2.0Ma^[22]、226.5±1.6Ma~229.7±2.2Ma(3个年龄)^[22-23]和234.3±2.8Ma~236.1±2.7Ma(3个年龄)^[24]。另有2个长7段底部凝灰岩夹层的SHRIMP U-Pb年龄,分别为241.3±2.4Ma和239.7±1.7Ma^[25]。虽然不同学者测得的具体年龄值尚有争议,但均认为归属于中三叠世晚期或晚三叠世早期,是秦岭造山带在三叠纪晚期碰撞造山活动的岩浆作用记录。

近年来,在铜川地区多个露头长7段有机页岩中,均发现了若干“钙质结核”,其顺层分布于长7段

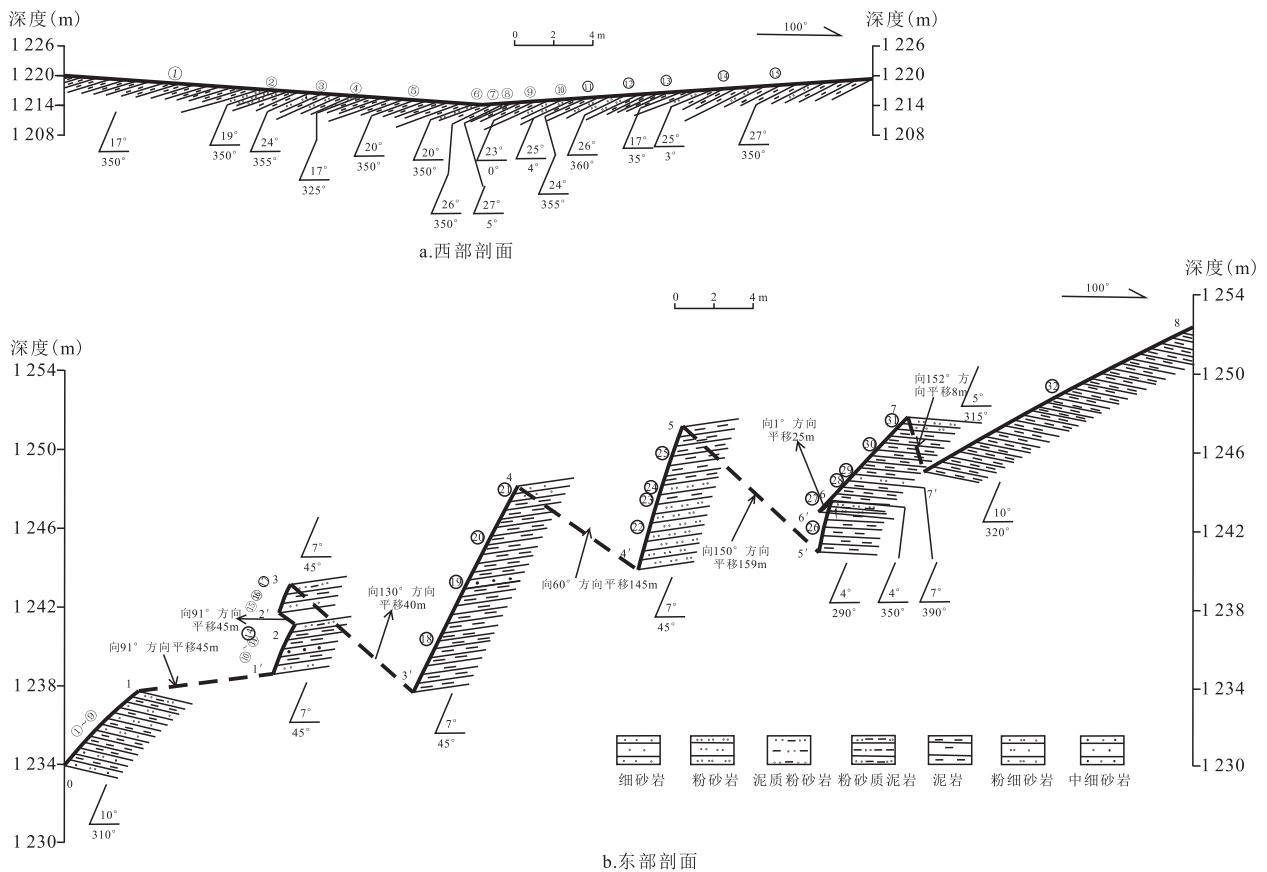


图8 霸王庄地区长7段实测剖面

Fig. 8 Measured lithological section of Chang-7 Member in Bawangzhuang area

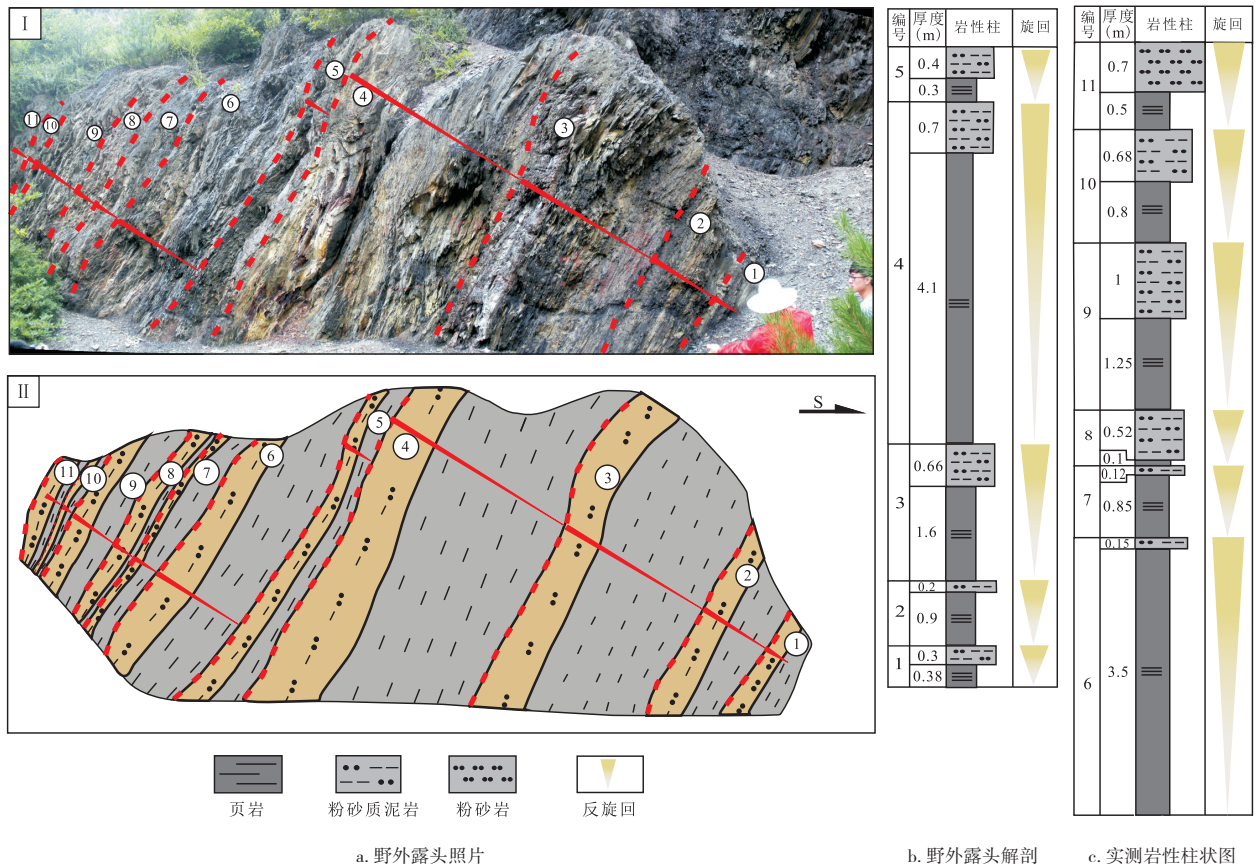
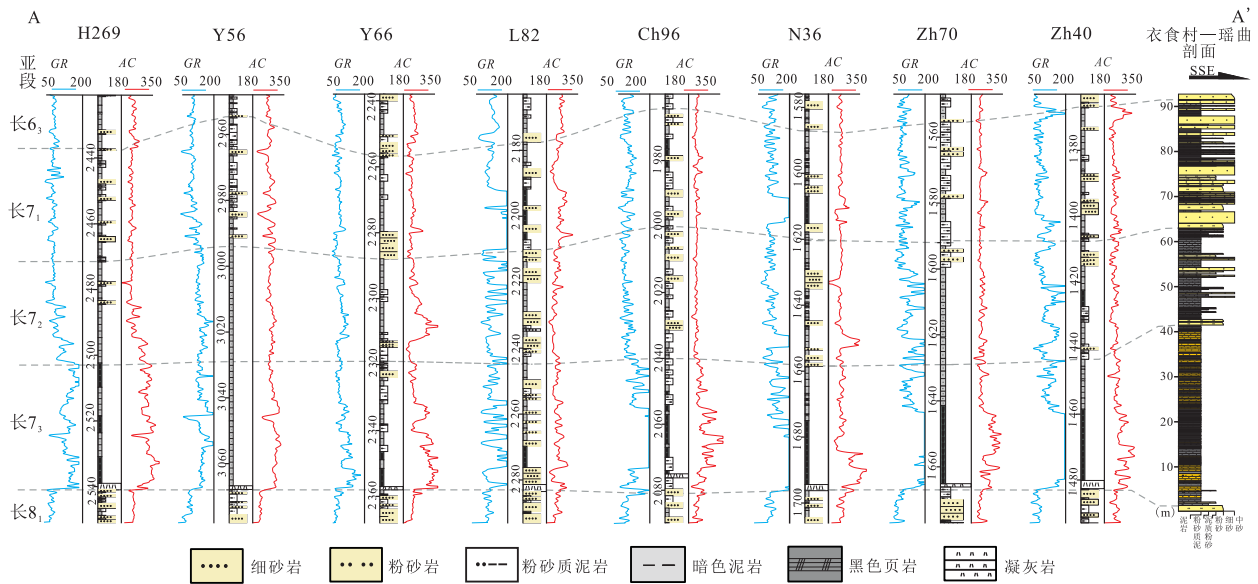


图9 淌泥河剖面长7₃亚段露头特征

Fig. 9 Feature of outcrop of Chang-7₃ sub-member in Tangnihe section



注:剖面位置见图1b;GR为自然伽马,API;AC为声波时差,μs/m。

图10 鄂尔多斯盆地H269井—衣食村—瑶曲井长7段对比^[2]

Fig. 10 Correlation cross section of the Chang-7 Member of Well-H269 to Yishi Village-Yaoqu section in Ordos Basin^[2]

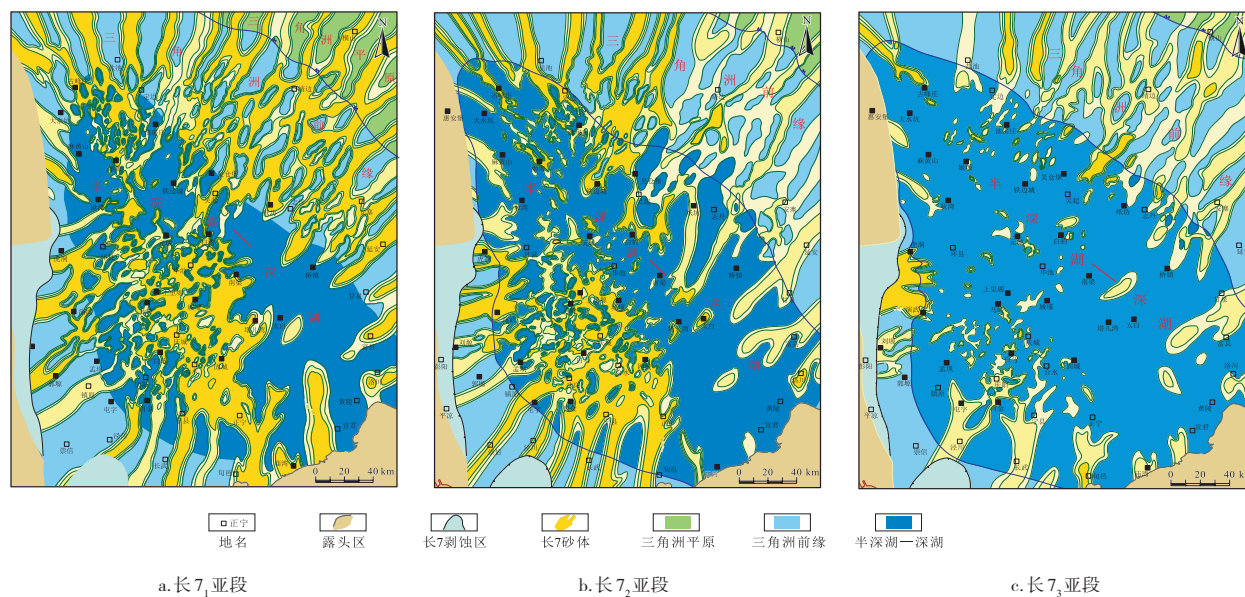


图 11 鄂尔多斯盆地长7段沉积相分布^[2]

Fig. 11 Sedimentary facies distribution of Chang-7 Member in Ordos Basin^[2]

有机页岩中,形态呈“透镜状”“椭球状”等,直径约为10~70 cm^[26]。对霸王庄和宜君套滩剖面的“钙质结核”岩石学分析表明,其主要成分为重结晶方解石和晶粒方解石,镜下具球粒状结构,岩石类型为灰岩;瑶曲聂家河剖面结核体的主要岩石类型为泥—粉晶白云岩。结合野外产状和岩石成分分析,认为这些“钙质结核”符合热水沉积碳酸盐岩和受热液活动影响的特征,初步将其解释为湖底热液活动成因的湖相碳酸盐岩^[26]。

如上所述,延长组沉积期,特别是长7段沉积期间,除了发育正常的碎屑沉积外,还广泛发育多层凝灰岩夹层,发育各类深部物质上拱挤入构造和产物(如砂岩墙(脉)、泥岩脊和碳酸盐岩结核)、事件沉积(如浊积岩、震积岩及湖底扇等),且主要分布在富烃坳陷深湖—较深湖区。在长7烃源岩等层段内,检测出多种指示深部热流体活动的岩石矿物和地球化学异常^[27]。深部探测显示,在富烃坳陷深部400 km以上壳幔各界面呈上拱的结构特征^[28]。这表明延长组沉积期富烃坳陷及其优质烃源岩是在周邻构造活动较强、同时深部作用较活跃的地球动力学环境中形成的。其背景可能受控于同期华北与扬子两大板块汇聚碰撞作用所引起的岩浆活动和板内深部物质、能量向浅部的释放效应^[27]。

6 结论

1) 三叠系延长组长7段为鄂尔多斯盆地中生界油气的主力烃源岩,也是页岩油勘探与开发的重点层段。长7段代表延长组沉积期湖盆鼎盛阶段沉积,是一套以泥页岩类为主的细粒碎屑岩建造,厚100~120 m,可划分为长7₃、长7₂和长7₁共3个亚段。在铜川地区衣食村、背阴村、瑶曲、霸王庄、淌泥河等地有较好出露。

2) 从长7₃到长7₁,湖盆经历了由鼎盛逐渐收缩、湖平面下降的过程,砂岩含量向上部逐渐增多。长7₁和长7₂为当前页岩油重点勘探开发层系;长7₃是未来攻关领域。

3) 研究区处于延长组盆地深水区,长7段既有正常深水细粒沉积岩,也包括了类型丰富的深水重力流沉积以及异地搬运形成的火山凝灰岩、具有深部流体成因特征的碳酸盐岩结核等。这些重要现象表明延长组沉积期富烃坳陷及其优质烃源岩是在周邻构造活动较强、同时深部作用较活跃的地球动力学环境中形成的,对理解陆相盆地烃类生成和富集机理、页岩油勘探开发具有重要的启示。

参考文献

- [1] LIU C Y, ZHAO H G, ZHAO J F, et al. Temporal-spatial coordinates of evolution of the Ordos Basin and its mineralization responses[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2008, 82(6): 1229-1243.
- [2] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 870-883.
- FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 870-883.
- [3] 白云来, 赵应成, 徐东, 等. 陕西铜川-黄陵地区油页岩地质特征及利用前景[J]. *现代地质*, 2010, 24(1): 158-166.
- BAI Yunlai, ZHAO Yingcheng, XU Dong, et al. Geological characteristics and developing-prospecting prospects of oil shale in Tongchuan-Huangling district, Shaanxi province[J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 158-166.
- [4] 李玉宏, 张文, 武富礼, 等. 陕西省铜川-黄陵地区延长组长7油页岩特征及资源潜力[J]. *西安科技大学学报*, 2016, 36(6): 647-656.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WU Fuli, et al. Characteristics and resource potential of oil shale in Chang 7 of Yanchang Formation in Tongchuan-Huangling area, Shaanxi provinces[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2016, 36(6): 647-656.
- [5] 何自新. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 88-105.
- HE Zixin. *Tectonic evolution and oil-gas in Ordos Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 88-105.
- [6] 惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(2): 14-22.
- HUI Xiao, ZHAO Yande, SHAO Xiaozhou, et al. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(2): 14-22.
- [7] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 719-729.
- LI Shixiang, NIU Xiaobing, LIU Guangdi, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 719-729.
- [8] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. *古地理学报*, 2011, 13(4): 443-455.
- DENG Xiuqin, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(4): 443-455.
- [9] ZHAO J F, MOUNTNEY N P, LIU C Y, et al. Outcrop architecture of a fluvio-lacustrine succession: Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015(68): 394-413.
- [10] 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.
- [11] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 601-614.
- FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 601-614.
- [12] 付锁堂, 姚泾利, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 698-710.
- FU Suotang, YAO Jingli, LI Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 698-710.
- [13] 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.
- [14] 杨华, 付金华, 袁效奇. 鄂尔多斯盆地南缘地质剖面图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 1-503.
- YANG Hua, FU Jinhua, YUAN Xiaoqi. *Atlas of the outcrop sections in the southern Ordos Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 1-503.
- [15] 何自新, 杨华, 袁效奇. 鄂尔多斯盆地地质剖面图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 1-422.
- HE Zixin, YANG Hua, YUAN Xiaoqi. *Atlas of the outcrop sections in the Ordos Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 1-422.
- [16] 李玉宏, 李文厚, 张倩. 鄂尔多斯盆地及周缘沉积相图册[M]. 北京: 地质出版社, 2020: 1-154.
- LI Yuhong, LI Wenhui, ZHANG Qian. *Atlas of sedimentary facies distribution in the Ordos Basin and its neighboring areas* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 1-154.
- [17] 王香增. 鄂尔多斯盆地东南部中生界野外露头剖面(图册)及其地质解释[M]. 西安: 西北大学出版社, 2012: 1-188.
- WANG Xiangzeng. *Atlas of Mesozoic field outcrop of section and its geological interpretation in southern of Ordos Basin*[M]. Xi'an: Northwest University Press, 2012: 1-188.
- [18] 耳闯, 赵靖舟, 王芮, 等. 沉积环境对富有机质页岩分布的控制作用—以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 823-832.
- ER Chuang, ZHAO Jingzhou, WANG Rui, et al. Controlling role of sedimentary environment on the distribution of organic-rich shale: A case study of the Chang 7 Member of the Triassic

- Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 823-832.
- [19] 吕奇奇,罗顺社,付金华,等.湖泊深水重力流沉积露头精细解剖—以鄂尔多斯盆地瑶曲剖面长7油层组为例[J]. *地质学报*, 2017, 91(3): 617-628.
- LYU Qiqi, LUO Shunshu, FU Jinhua, et al. Outcrop-based analysis of a deep-water gravity flow sediments in lake: A case study from the Chang 7 of Yaoqu section, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3): 617-628.
- [20] 马奂奂,刘池洋,张龙,等.鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积岩元素地球化学特征及沉积环境分析[J]. *现代地质*, 2019, 33(4): 872-882.
- MA Huanhuan, LIU Chiyang, ZHANG Long, et al. Geochemical characteristics and depositional environment implications of sedimentary rocks in the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2019, 33(4): 872-882.
- [21] 李森,朱如凯,崔景伟,等.古环境与有机质富集控制因素研究——以鄂尔多斯盆地南缘长7油层组为例[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(1): 87-95.
- LI Sen, ZHU Rukai, CUI Jingwei, et al. Paleoenvironment and controlling factors of organic matter enrichment: A case of Chang 7 oil reservoir in southern margin of Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(1): 87-95.
- [22] 邓秀芹,罗安湘,张忠义,等.秦岭造山带与鄂尔多斯盆地印支期构造事件年代学对比[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 939-953.
- DENG Xiuqin, LUO Anxiang, ZHANG Zhongyi, et al. Geochronological comparison on Indosinian tectonic events between Qinling orogeny and Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 939-953.
- [23] 王建强,刘池洋,李行,等.鄂尔多斯盆地南部延长组长7段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(4): 691-704.
- WANG Jianqiang, LIU Chiyang, LI Hang, et al. Geochronology, potential source and regional implications of tuff intervals in Chang-7 member of Yanchang Formation, south of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 691-704.
- [24] 张辉,彭平安,张文正.鄂尔多斯盆地延长组长7段凝灰岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 565-575.
- ZHANG Hui, PENG Ping'an, ZHANG Wenzheng. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characterization and their geological significance of Chang 7 tuff of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(2): 565-575.
- [25] 王多云,辛卜社,杨华,等.鄂尔多斯盆地延长组长7底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. *中国科学(地球科学)*, 2014, 44(10): 2160-2171.
- WANG Duoyun, XIN Bushe, YANG Hua, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age and geological implications of tuff at the bottom of Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2014, 44(10): 2160-2171.
- [26] 马瑶,李文厚,刘江斌,等.鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组油页岩中“钙质结核”的成因初探[J]. *地质科学*, 2018, 53(2): 458-469.
- MA Yao, LI Wenhui, LIU Jiangbin, et al. A preliminary discussion on the origin of “calcareous concretion” in oil shale of Yanchang Formation in Tongchuan area, southern Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2018, 53(2): 458-469.
- [27] 刘池洋,王建强,邱欣卫,等.鄂尔多斯盆地延长期富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1913-1930.
- LIU Chiyang, WANG Jianqiang, QIU Xinwei, et al. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon-rich sag in Yanchang Period of Middle-Late Triassic, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1913-1930.
- [28] 王良书,徐鸣杰,刘绍文,等.鄂尔多斯盆地及邻区地球物理场与深部结构.见:刘池洋,吴柏林主编.油气煤铀同盆共存成藏(矿)机理与富集分布规律[M].北京:科学出版社,2016: 181-213.
- WANG Liangshu, XU Mingjie, LIU Shaowen, et al. Geophysical field and deep structure in the Ordos basin and its adjacent areas. In: LIU Chiyang and WU Bailin. *Accumulation (Mineralization) mechanism and spatial enrichment law of oil/gas, coal and uranium coexisting in the same basin*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 181-213.
- (编辑 徐佩)

(上接第 232 页)

- BAI Fan. Characteristics and controlling factors of natural gas source rocks of Middle Permian Gufeng Formation in western part of Lower Yangtze Platform, China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 468-475.
- [20] 耿梓傲,韦恒叶.下扬子巢湖地区中二叠统孤峰组富有机质硅质岩有机地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(6): 823-837.
- GEN Ziya, WEI Hengye. Organic geochemistry of organic-rich cherts in the Middle Permian Gufeng Formation in Chaohu, Lower Yangtze Area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(6): 823-737.
- [21] 廖志伟,胡文瑄,曹剑,等.皖南大隆组黑色岩系发育特征及油气资源潜力初探[J]. *高校地质学报*, 2016, 22(1): 1-14.
- LIAO Zhiwei, HU Wenxuan, CAO Jian, et al. A preliminary investigation of the development and hydrocarbon potential of the black shales in the Upper Permian Dalong Formation, Southern Anhui Province in the Lower Yangze Region, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(1): 1-14.
- (编辑 尹淑容)