

文章编号: 0253-2697(2022)02-0167-13 DOI:10.7623/syxb202202001

燕山构造带滦平盆地中生界油气形成条件与勘探发现

姜在兴^{1,2} 张元福^{1,2} 袁晓冬¹ 潘树彪³

(1. 中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)科学研究院 北京 100083;
3. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 广东广州 510640)

摘要:前人研究认为滦平盆地中生界烃源岩不发育、后期构造破坏严重,不利于油气藏的形成和保存,油气勘探一直没有突破。在野外露头发现大量暗色泥页岩的基础上,针对白垩系西瓜园组和侏罗系土城子组设计并完钻滦探 1 井、滦探 2 井和滦探 3 井,首次在西瓜园组发现页岩油气流。综合露头、岩心、测井和试油资料,对滦平盆地中生界烃源岩、储层、保存条件和油气组分等成藏特征进行系统分析。西瓜园组深湖相黑色泥页岩的总有机碳含量最高达 3.60%,干酪根类型以 II 型为主,有机质热演化成熟度达 1.32%,整体处于成熟阶段。页岩油气储集层岩性主要为黏土质页岩、粉砂质页岩、白云质页岩和混合型页岩,平均孔隙度为 1.6%,平均渗透率为 0.265 mD,属于低孔超低渗储层。分析认为,对原型盆地认识的欠缺是制约前期页岩油气研究与勘探的主要原因。滦平盆地后期构造抬升以掀斜运动为主,有利于油气保存;火山-陆源-内源相互沉积作用为盆地内寻找页岩油气甜点开辟了新思路。试采阶段,滦探 1 井原油平均产量为 3.23 t/d、天然气产量为 3600 m³/d,工业化油气流的发现填补了滦平盆地乃至燕山构造带中生界油气发现的空白。研究认识和勘探突破对于深化燕山构造带石油地质基础认识和进一步开展油气勘探具有重要理论与指导意义。

关键词:页岩油气;石油地质条件;中生界;滦平盆地;燕山构造带

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Formation conditions and exploration discoveries of Mesozoic oil and gas in Luanping Basin, Yanshan tectonic belt

Jiang Zaixing^{1,2} Zhang Yuanfu^{1,2} Yuan Xiaodong¹ Pan Shubiao³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Earth Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Guangzhou 510640, China)

Abstract: Previous studies suggest that Mesozoic source rocks are not developed in Luanping Basin, suffering serious tectonic damages in the late stage, which is not conducive to the formation and preservation of oil and gas reservoirs, and there is no breakthrough in oil and gas exploration. Based on the discovery of a large number of dark shales in the field outcrop, Well Luantan 1, Well Luantan 2 and Well Luantan 3 in the Cretaceous Xiguayuan Formation and Jurassic Tuchengzi Formation were designed and completed, and shale oil flow was discovered in Xiguayuan Formation for the first time. Based on outcrop, core, well logging and oil test data, this paper systematically analyzes the reservoiring characteristics involving Mesozoic source rocks, reservoirs, preservation conditions as well as oil and gas components in Luanping Basin. The deep lacustrine black shales are developed in Xiguayuan Formation, of which the TOC content is up to 3.60%, the dominant kerogen type is Type II, the thermal maturity of organic matters is 1.32%, suggesting that the whole of shales are at the maturity stage. The reservoir lithology of shale oil and gas is dominated by clay shale, silty shale, dolomitic shale and hybrid shale, with the average porosity of 1.6% and average permeability of 0.265 mD, indicating low-porosity and ultra-low permeability reservoirs. The analysis suggests that the lack of understanding of prototype basin is the main reason that restricts the research and exploration of shale oil and gas in the early stage. The late tectonic uplift of Luanping Basin is dominated by tilted movement, which is favorable for oil and gas preservation; the volcanic, terrestrial-sourced and intra-source deposition also provide a new way for detecting sweet spots for shale oil and gas exploration in the basin. During the pre-production phase, Well Luantan 1 yielded an average crude output of 3.23 t/d and a natural gas output of 3600 m³/d. Additionally, the discovery of industrialized oil and gas flow filled the gap in the Mesozoic oil and gas discovery in Luanping Basin and even the Yanshan tectonic belt. The researches, understandings and exploration breakthroughs are of important theoretical and reference significance for better enhancing the petroleum geology foundation of Yanshan tectonic belt and further carrying out oil and gas exploration.

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2017ZX05009-002)和国家自然科学基金面上项目(No. 41772090)资助。

第一作者及通信作者:姜在兴,男,1962年3月生,1997年获中国科学院研究生院沉积学专业博士学位,现为 中国地质大学(北京)能源学院教授、博士生导师,主要从事沉积学、层序地层学的教学和科研工作。Email:jiangzx@cugb.edu.cn

Key words: shale oil and gas; petroleum geological conditions; Mesozoic; Luanping Basin; Yanshan tectonic belt

引用:姜在兴,张元福,袁晓冬,潘树彪.燕山构造带滦平盆地中生界油气形成条件与勘探发现[J].石油学报,2022,43(2):167-179.

Cite:JIANG Zaixing,ZHANG Yuanfu,YUAN Xiaodong,PAN Shubiao. Formation conditions and exploration discoveries of Mesozoic oil and gas in Luanping Basin, Yanshan tectonic belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 167-179.

燕山构造带位于华北地块北缘的地壳变形带,内部上侏罗统一下白垩统发育且保存相对完好,是地质学家探讨燕山地区中生代构造演化的理想地区^[1-3]。中生代以来,受印支运动与燕山运动的影响,燕山构造带整体以抬升为主,内部烃源岩生烃作用终止,断裂、岩浆等构造活动发育,油气保存条件整体较差^[4-5]。前人主要从构造演化^[6-8]、火山活动^[9-10]、沉积特征^[11-15]等方面开展了燕山构造带地质研究,关于其中生界石油地质特征特别是页岩油气成藏要素研究相对较少。

滦平盆地是燕山构造带内部的典型断陷盆地,前人研究认为盆地中生界以扇三角洲、浅湖等浅水沉积为主,深水沉积欠发育^[16-19]。焦养泉等^[20]通过分析构造格局与构造演化、成岩作用过程及古热流体模式运移事件,认为滦平盆地中生界储层及输导体系遭受了严重的剥蚀破坏,油气成藏条件较差。20世纪末—21世纪初,中国石油公司在滦平盆地开展了二维地震勘探和钻探,但均无油气发现。

笔者在野外观察和部署探井基础上,系统分析了滦平盆地中生界烃源岩分布与生烃潜力、储层特征、含油气性及页岩油气成藏特征,并首次获得工业油气流,实现了燕山构造带中生界油气勘探重大突破,为深化区域石油地质认识和重新审视燕山构造带油气勘探前景提供了重要借鉴与指导。

1 区域地质概况

1.1 构造位置

燕山构造带位于华北地块北部与内蒙古地轴之间^[9],北部边界为丰宁—隆化断裂,西侧与阴山构造带相邻,西南缘与鄂尔多斯盆地相接,南部与渤海湾盆地相邻,东部与松辽盆地相邻并被郯庐断裂斜切,主体构造呈近 NEE—NNE 向的反“S”型,平面展布面积约为 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,是典型的陆内构造带^[15, 21-23] [图 1(a)]。中生代,燕山构造带沉积上三叠统杏石口组一下白垩统九佛堂组^[24]。受中生代地块古应力场转化的影响,华北地块北缘阴山—燕山造山带发生强烈的挤压隆升、褶皱冲断与构造岩浆等活动,形成了一系列火山—断陷湖盆,构成中生代陆相—火山沉积盆地群,其中滦平盆地规模较大、发育时间较长、地层层序最为齐全^[22, 25-26]。

滦平盆地位于河北省承德市境内,位于燕山构造

带尚义—平泉断裂与丰宁—隆化断裂之间的楔形地带,是典型的中生代陆相火山—沉积断陷盆地^[25] [图 1(b)]。滦平盆地呈 NE—SW 向延伸^[27],主要形成于中侏罗世—早白垩世^[25],残余面积约为 835 km^2 ,其中,白垩系出露面积约为 318 km^2 [图 1(b)]。

1.2 地层特征

滦平盆地中生界自下而上依次为侏罗系九龙山组、髫髻山组、土城子组、张家口组、大北沟组和白垩系大店子组、西瓜园组^[28] [图 1(c)、图 1(d)]。中生界湖相沉积广泛发育,累计厚度约为 2118 m 。其中,土城子组为河流—湖泊沉积,湖相沉积累计厚度约为 700 m ;大北沟组为扇三角洲—湖泊沉积,湖相沉积累计厚度约为 180 m ;大店子组为浅湖—半深湖—深湖沉积,湖相沉积累计厚度约为 398 m ;西瓜园组主要为火山—湖泊沉积,湖相沉积厚度约为 840 m 。

1.3 构造演化特征

受燕山运动影响,滦平盆地经历 3 期裂陷演化^[18] [图 1(d)],构造应力场发生两次变化,使盆地内部应力场经历了“挤压—拉张—挤压”的转变^[22]。

(1) 裂陷阶段 I (晚侏罗世早期)

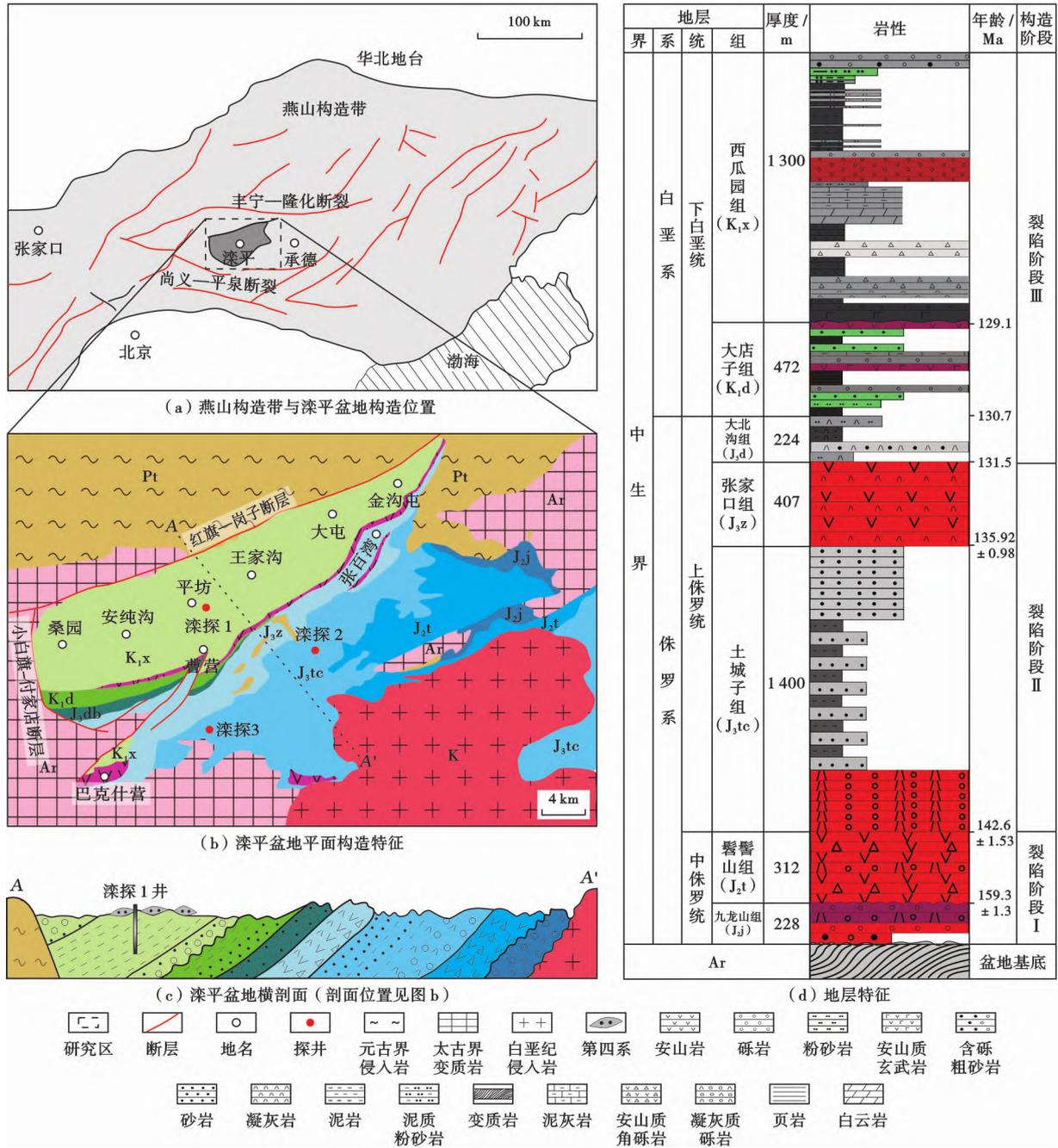
晚侏罗世之前,滦平盆地在左旋压扭机制挤压作用下产生小白旗—付家店和红旗—岗子两条控盆主断层 [图 1(b)]。晚侏罗世早期,盆地构造应力场发生第一次转变,拉张作用使两条主控断层发生张裂,盆地开始拉伸,逐渐形成断陷盆地的雏形,并开始接受湖盆沉积。

(2) 裂陷阶段 II (晚侏罗世中期—早白垩世早期)

晚侏罗世中期—早白垩世早期,盆地基底岩石圈持续拉张,地壳减薄,局部地区地幔热液大量上涌,沿断裂形成大规模火山喷发。盆地断层附近发育浅水沉积,中心区域发育湖相沉积。随着地壳持续减薄,在滦平盆地中南部形成大规模深水区。该阶段湖泊分布范围广、深度达到最大,属于盆地的拉伸—稳定演化期。

(3) 裂陷阶段 III (早白垩世中—晚期)

早白垩世中—晚期,大规模火山作用停止,滦平盆地以陆源碎屑沉积为主。盆地构造应力场发生第二次转变,由拉张环境转为挤压环境,控盆断层开始合拢,盆地抬升收缩。区域上大规模湖泊作用趋于结束,盆地不断接受浅水粗碎屑沉积,直至湖泊被填平、盆地演化结束。



注:Pt—元古界;Ar—太古界;K—白垩系;K_{1x}—白垩系西瓜园组;K_{1d}—白垩系大店子组;J_{3db}—侏罗系大北沟组;J_{3z}—侏罗系张家口组;J_{2tc}—侏罗系土城子组;J_{2t}—侏罗系髻髻山组;J_{1j}—侏罗系九龙山组。

图 1 燕山构造带滦平盆地区域地质特征

Fig. 1 Regional geological characteristics of Luanping Basin in Yanshan tectonic belt

2 方法与资料

笔者选取金沟屯、桑园和曹营等剖面对滦平盆地中生界进行系统观察与描述,在白垩系西瓜园组发现大套黑色页岩。在野外露头系统研究的基础上,部署滦探 1 井,完钻深度为 1308.4 m,并全井段取心。在安乐村和下三道沟剖面,笔者首次在侏罗系土城子组

发现暗色泥页岩,并针对性部署了滦探 2 井、滦探 3 井,共获取岩心 295 m。

笔者对典型露头和探井进行系统采样,设计镜下薄片观察、X 射线衍射、有机地球化学和储层特征等分析测试,累计 348 件次。通过滦探 1 井烃类组分分析,讨论了中生界泥页岩含油气性。并进一步分析滦平盆地页岩油气成藏主控因素,展望了燕山构造带油气勘探前景。

3 油气成藏特征

3.1 沉积特征

滦平盆地野外露头在中生界土城子组、大北沟组、大店子组及西瓜园组均观察到湖相泥页岩,以白垩系西瓜园组泥页岩最为发育。笔者以曹营剖面 and 滦探1井为例,系统分析了西瓜园组沉积特征。

曹营剖面位于滦平盆地中部[图1(b)],西瓜园组中一下部出露完好,半深湖—深湖相泥页岩广泛发育,与下伏大店子组呈角度不整合接触。曹营剖面出露厚度约为580m,对应于滦探1井489.7~1308.4m段,垂向上可划分为两期火山—湖泊沉积旋回。根据沉积特征,将西瓜园组中一下部自下而上划分为5个层段[图2(a)]。

层段I厚度为215m,底部为第一期火山沉积,岩性为凝灰岩及火山角砾岩[图2(b)];中部夹1期浅

湖—半深湖—深湖—浅湖沉积旋回,暗色泥页岩广泛发育[图2(c)];顶部为第二期火山活动沉积[图2(d)]。层段II厚度为82m,整体为火山活动间歇期的半深湖—深湖沉积,发育厚层状暗色泥页岩和白云质泥岩,其中,白云质泥页岩风化呈土黄色[图2(e)]。层段III厚度为73m,整体为火山活动间歇期的浅湖—半深湖沉积,白云质泥岩薄层不发育,凝灰质粉砂含量增加[图2(f)]。层段IV厚度为157m,整体为深水滑塌砾岩沉积,砾石成分以安山质、凝灰质为主,花岗质砾石较少[图2(g)]。层段V厚度为38m,发育浅湖相泥页岩与粉砂岩互层,粉砂岩不含凝灰质。

滦探1井位于滦平盆地中部,与曹营剖面平面直线距离约为3km,整体发育西瓜园组中一下部半深湖—深湖沉积,记录了多期火山活动[图2(h)]。根据沉积特征,将滦探1井西瓜园组中一下部自下而上划分为5个层段,与曹营剖面5个层段可一一对应。

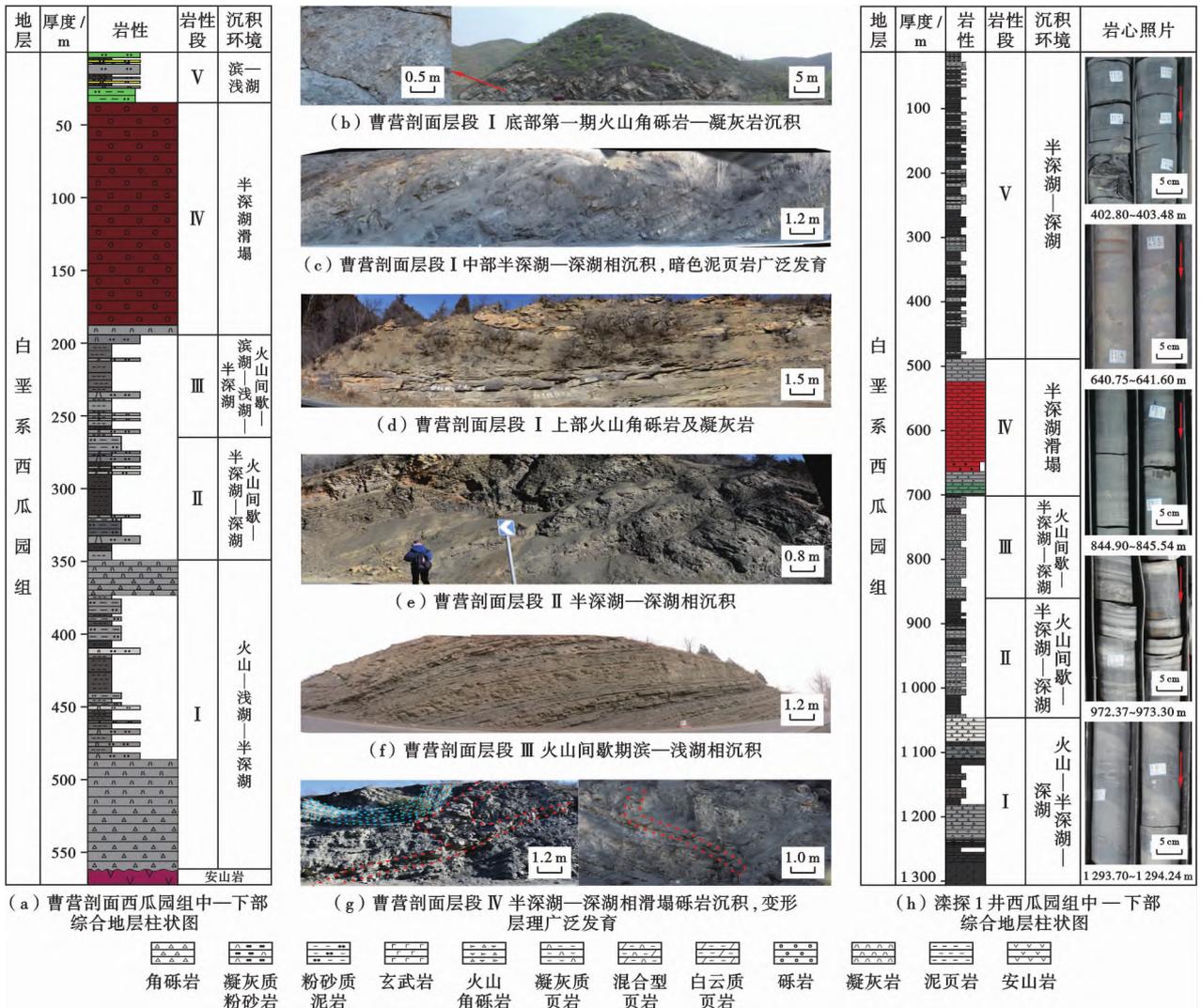


图2 滦平盆地白垩系西瓜园组中一下部沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of Middle-Lower Xiguayuan Formation of Cretaceous in Luanping Basin

层段 I 厚度为 286.9 m, 发育多期火山—湖泊沉积旋回, 自下而上表现为玄武岩—火山角砾岩—泥页岩—凝灰岩—火山角砾岩—泥页岩—火山角砾岩—凝灰岩—泥页岩的组合样式, 泥页岩以黏土质页岩和混合型页岩为主。层段 II 厚度为 138.0 m, 发育火山活动间歇期的半深湖—深湖沉积, 混合型页岩和白云质页岩发育, 其中, 白云质页岩与曹营剖面西瓜园组层段 II 的土黄色白云质页岩可横向对比。层段 III 厚度为 182.5 m, 发育半深湖—深湖相混合型页岩和黏土型页岩。层段 IV 厚度为 211.3 m, 底部为火山角砾岩、凝灰岩, 中—上部为一套深水滑塌砾岩沉积, 顶部与正常泥页岩突变接触。层段 V 厚度为 489.7 m, 为正常湖相沉积, 广泛发育半深湖—深湖相黏土质页岩, 夹少量粉砂质页岩。

3.2 烃源岩地球化学特征

笔者共采集 165 件烃源岩样品, 包括 6 件土城子组泥页岩岩心样品, 6 件大北沟组泥页岩露头样品, 9 件大店子组泥页岩露头样品; 144 件西瓜园组泥页岩样品 (132 件岩心样品和 12 件露头样品)。进行泥页岩总有机碳 (TOC) 含量测试、岩石热解分析与镜质体反射率 (R_o) 测定。

表 1 滦平盆地中生界烃源岩有机质丰度

Table 1 Organic matter abundance of Mesozoic source rocks in Luanping Basin

地层	样品来源	TOC/%	S_1 /(mg/g)	S_2 /(mg/g)	$S_1 + S_2$ /(mg/g)	氯仿沥青“A”	烃源岩评价
西瓜园组	探井	0.22~3.60/1.28	0~2.30/0.36	0~14.95/2.04	0.01~15.18/2.39	0.002~0.352/0.106	好—优质
	露头	0.26~2.78/1.33	0.26~2.78/0.12	0.05~7.18/0.12	0.05~7.37/2.38		好—优质
大店子组	露头	0.03~1.04/0.58	0~0.16/0.06	0.01~2.75/0.59	0.01~2.82/0.66		差
大北沟组	露头	0.30~0.85/0.64	0.06~0.13/0.09	0.30~1.57/0.92	0.36~1.68/1.01		中等
土城子组	探井	0.13~1.82/0.87	0.08~0.65/0.33	0.46~9.62/4.77	0.54~9.87/5.10		中等—优质

注: “/”后为平均值; S_1 —岩石残留游离烃; S_2 —岩石有机质热解烃。

(2) 生烃潜量 ($S_1 + S_2$)

西瓜园组烃源岩岩心样品生烃潜量为 0.01~15.18 mg/g, 平均为 2.39 mg/g; 露头样品生烃潜量为 0.05~7.37 mg/g, 平均为 2.38 mg/g, 均为中等—优质烃源岩。大店子组和大北沟组烃源岩生烃潜量较低, 平均值分别为 0.66 mg/g 和 1.01 mg/g。土城子组烃源岩的生烃潜量最高, 平均值达 5.10 mg/g。

TOC—生烃潜量判别图显示, 土城子组烃源岩为中等—较好品质, 大北沟组烃源岩为中等品质, 大店子组烃源岩品质较差, 西瓜园组泥页岩多为中等—好的烃源岩, 部分可达最好烃源岩的标准 (图 3)。

(3) 氯仿沥青“A”

氯仿沥青“A”含量测试结果表明, 滦平盆地西瓜园组烃源岩品质多为中等—好, 少量样品达到最好标准 (图 4)。

3.2.1 有机质丰度

(1) TOC 含量

滦平盆地侏罗系土城子组 TOC 含量为 0.13%~1.82%, 平均为 0.87%, 多为中等—优质的烃源岩。大北沟组烃源岩 TOC 含量为 0.30%~0.85%, 平均为 0.64%, 多为中等品质的烃源岩。白垩系大店子组烃源岩 TOC 含量为 0.026%~1.040%, 平均为 0.580%, 仅少数样品为优质烃源岩。西瓜园组泥页岩岩心 TOC 含量为 0.22%~3.60%, 平均为 1.28%, 泥页岩露头样品 TOC 含量为 0.26%~2.78%, 平均为 1.33%, 多为好—优质烃源岩 (表 1)。

分析认为, 侏罗系土城子组、大北沟组沉积期, 火山活动过于剧烈, 不利于烃源岩保存; 该阶段半深湖—深湖环境发育时间较短, 导致该期沉积的烃源岩品质较差。西瓜园组沉积期, 滦平盆地处于深陷扩张期, 湖盆面积较大、深水持续时间较长, 该阶段火山活动相对较弱, 对烃源岩热演化具有一定催化作用, 因此西瓜园组烃源岩品质最好。相较于西瓜园组, 大店子组沉积期火山活动不发育, 且该期湖相沉积持续时间较短, 造成同期烃源岩品质相对较差。

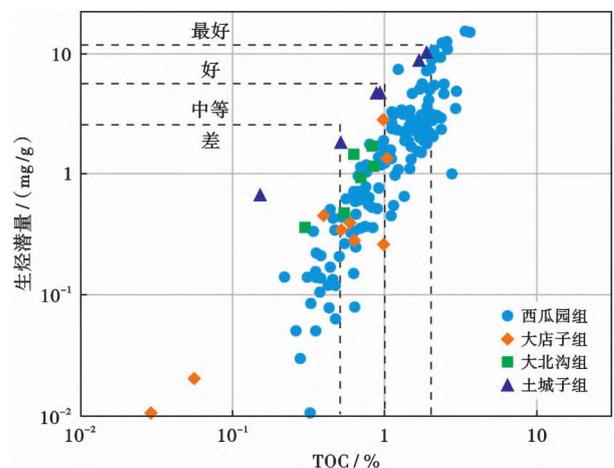


图 3 滦平盆地中生界烃源岩 TOC 含量与生烃潜量相关性

Fig. 3 Relationship between TOC content and hydrocarbon generation potential of Mesozoic source rocks in Luanping Basin

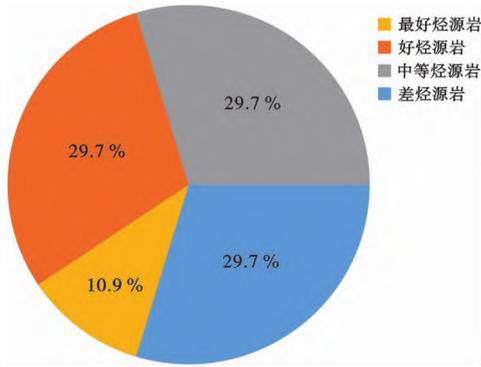


图4 西瓜园组烃源岩氯仿沥青“A”评价

Fig. 4 Chloroform bitumen “A” evaluation of source rocks of Xiguayuan Formation

3.2.2 有机质类型

侏罗系土城子组烃源岩有机质类型以 II₁ 型为主,少量为 I 型;大北沟组烃源岩整体以 II₂ 型为主,少量为 III 型。白垩系大店子组烃源岩有机质类型以 II₂—III 型为主;西瓜园组烃源岩有机质类型以 II₁、II₂ 型为主(图 5)。

3.2.3 有机质成熟度

白垩系西瓜园组烃源岩 R_o 为 0.64%~1.32%,处于热演化成熟—高成熟阶段;最高热解峰温(T_{max})为 438~458℃,平均为 444℃,指示烃源岩多为热演化成熟阶段。产率指数(I_p)是指烃源岩中的残留游离烃(S₁)与残留游离烃(S₁)和热解烃(S₂)之和的比值,即:

I_p = S₁ / (S₁ + S₂) (1)

生油岩在热演化过程中生成烃类使 S₁ 增大,相对使 S₂ 减少,因此 I_p 可视作在某成熟度下的产烃率或转化率。I_p 随成熟度的增高而增大。T_{max} 与 I_p 相关性分析显示,滦平盆地中生界烃源岩目前尚处于生油窗(图 6)。

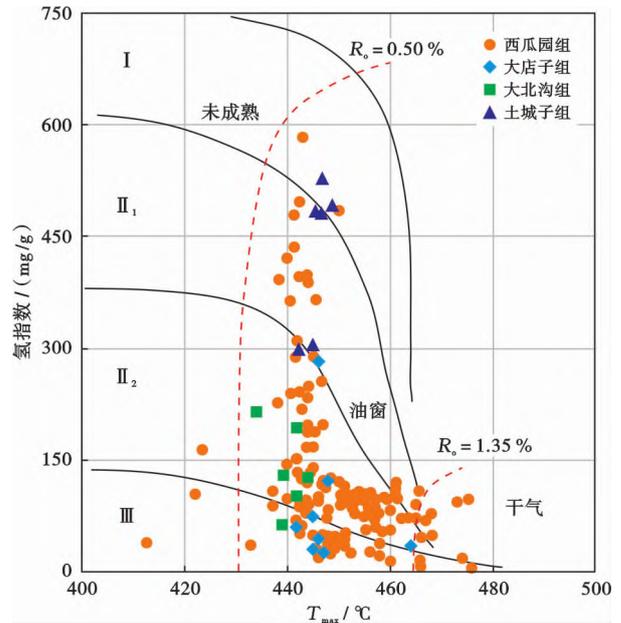
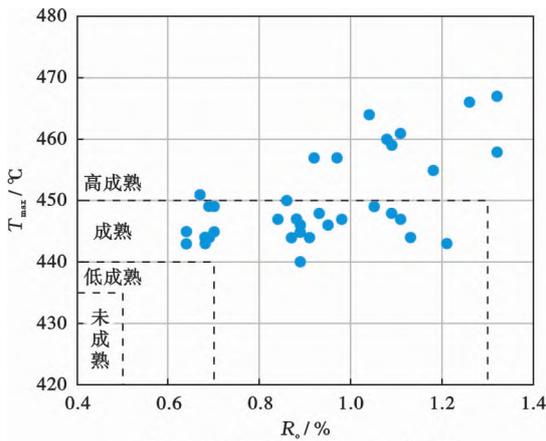
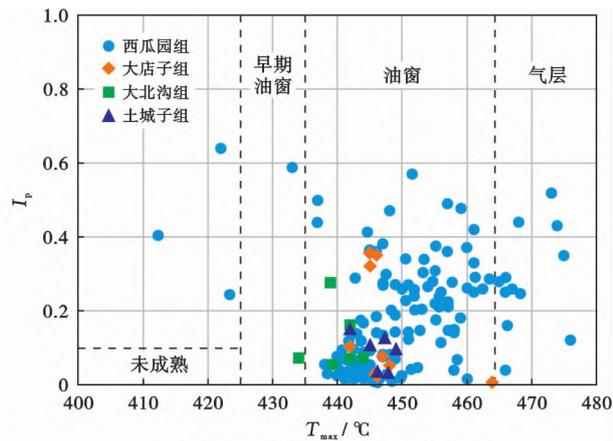


图5 滦平盆地西瓜园组干酪根类型

Fig. 5 Kerogen type discrimination of Xiguayuan Formation in Luanping Basin



(a) 西瓜园组烃源岩 R_o—T_{max} 相关性



(b) 中生界烃源岩 T_{max}—I_p 相关性

图6 滦平盆地中生界烃源岩热演化成熟度

Fig. 6 Thermal maturity of Mesozoic source rocks in Luanping Basin

3.3 页岩油气储层特征

3.3.1 储层岩石类型划分

综合泥页岩分布特征和烃源岩评价,笔者重点讨论了白垩系西瓜园组的储集岩性及其储集物性。西瓜园组泥页岩储层主要为半深湖—深湖相暗色细粒沉积,X射线衍射分析显示,其矿物组成以黏土矿物、石英、长石、方解石、白云石为主(表2)。参考前人对细粒沉积的划分方

案^[29],综合岩心特征、镜下薄片微观特征和矿物组成,将西瓜园组页岩油气储层岩石类型划分为黏土质页岩、粉砂质页岩、白云质页岩和混合型页岩4种(图7)。

黏土质页岩为灰黑色—黑色块状,显微镜下见黏土纹层与泥晶—粉晶碳酸盐纹层互层,层间缝发育[图7(a)],为正常半深湖—深湖相沉积。粉砂质页岩为灰色—灰黑色块状,部分层段夹粉砂质薄层,石英、长石颗粒形状

不规则,呈棱角状一次棱角状[图 7(b)],为正常半深湖相沉积,石英及长石为陆源供给。白云质页岩表现为灰白色白云质纹层与暗色泥质纹层互层,镜下可见白云石—泥质韵律条带[图 7(c)],为半深湖相内源热液成因沉积。混合型页岩整体呈灰色—灰黑色,碳酸盐纹层、暗色黏土纹层及火山灰纹层频繁互层[图 7(d)],为半深湖环境中陆源、内源、火山物质等多种组分混源沉积。

3.3.2 储集物性

利用 3020—062 型氦孔隙度仪、DX—07GF 型气体渗透率测定仪完成西瓜园组烃源岩孔隙度和渗透率测试。结果显示,滦平盆地西瓜园组页岩油气储层孔隙度为 0.1%~6.4%,平均为 1.6%,渗透率为 0.001~3.606 mD,平均为 0.265 mD,整体为低孔超低渗储层。其中,粉砂质页岩储集空间最为发育,孔隙度为 0.3%~6.4%、平均为 2.4%,渗透率为 0.002~3.606 mD、平

均为 0.340 mD;白云质页岩孔隙度最小,为 0.2%~1.6%、平均为 0.9%,渗透率为 0.001~0.844 mD、平均为 0.022 mD;黏土质页岩孔隙度为 0.1%~2.4%、平均为 1.3%,渗透率为 0.001~0.178 mD、平均为 0.047 mD;混合型页岩孔隙度为 0.6%~2.2%、平均为 1.6%,渗透率为 0.004~3.306 mD、平均为 0.537 mD(图 8)。

表 2 滦平盆地西瓜园组储层岩石矿物组成

Table 2 Mineral composition of reservoir in Xiguayuan Formation, Luanping Basin

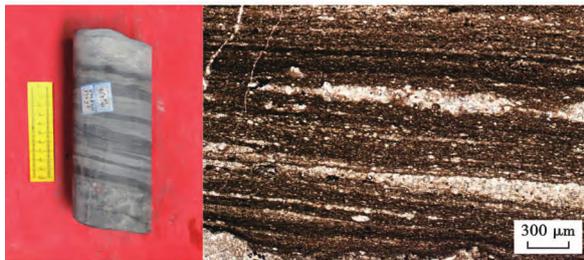
岩石类型	矿物含量/%			
	方解石	白云石	石英+长石	黏土矿物
黏土质页岩	6.7	7.7	29.3	54.8
粉砂质页岩	10.5	7.8	62.7	16.4
白云质页岩	3.3	66.8	22.4	5.5
混合型页岩	10.2	16.9	37.1	30.9



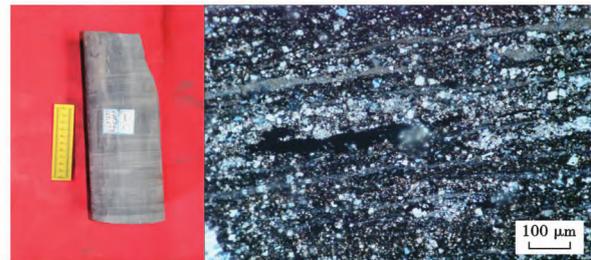
(a) 黏土质页岩,暗色黏土纹层与亮色碳酸盐纹层互层,185.40 m,正交偏光



(b) 块状粉砂质页岩,局部裂缝内见黑色油迹,212.96 m,正交偏光



(c) 白云质页岩,纹层形状不规则,972.25 m,正交偏光



(d) 混合型页岩,见碳酸盐纹层、暗色黏土纹层,亮斑为石英、长石等矿物,局部裂缝见油迹浸染,1165.50 m,正交偏光

图 7 滦平盆地滦探 1 井西瓜园组页岩类型

Fig. 7 Shale types of Xiguayuan Formation in Well Luantan 1, Luanping Basin

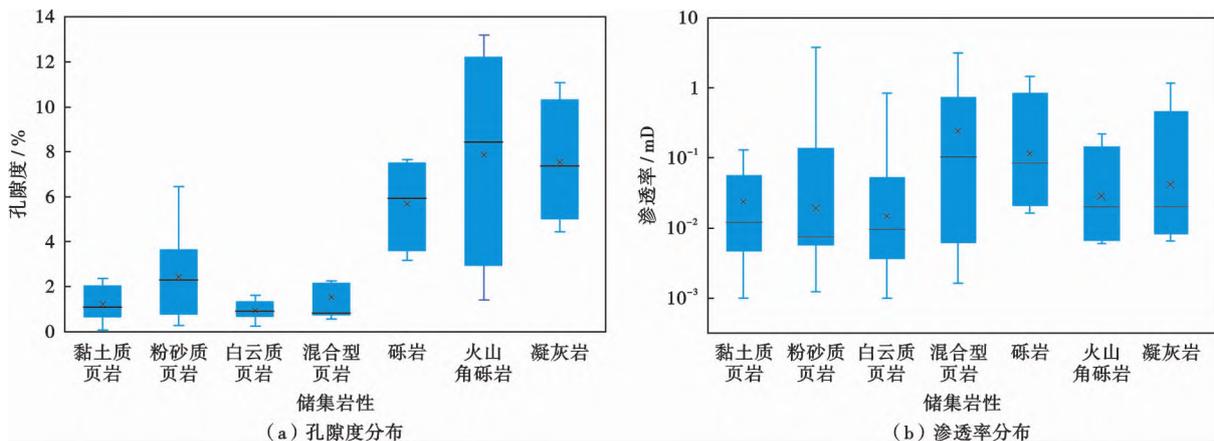


图 8 滦平盆地西瓜园组储层储集物性

Fig. 8 Reservoir property of Xiguayuan Formation, Luanping Basin

3.4 页岩油气组分特征

3.4.1 天然气组分特征

滦探1井白垩系西瓜园组泥页岩产出的天然气成分以CH₄为主(含量为74.67%~77.54%,平均为

75.44%),C₂H₆含量较少(平均为1.26%),其他类型烷烃含量均小于1%。非烃类气体以N₂为主(含量为15.81%~19.45%),其次为CO₂(含量为1.54%~6.26%),不含O₂(表3)。

表3 滦平盆地西瓜园组页岩气组分含量

Table 3 Classification of shale gas in Xiguayuan Formation, Luanping Basin

样品编号	CH ₄ /%	N ₂ /%	C ₂ H ₆ /%	CO ₂ /%	C ₃ H ₈ /%	异丁烷/%	正丁烷/%	异戊烷/%	正戊烷/%	C ₅₊ /%	相对密度
1	74.77	16.03	1.31	6.20	0.91	0.17	0.30	0.06	0.06	0.19	0.7088
2	74.67	15.81	1.30	6.26	0.89	0.16	0.29	0.06	0.06	0.50	0.7154
3	75.15	16.13	1.30	5.86	0.92	0.16	0.29	0.06	0.06	0.07	0.7028
4	77.54	17.89	1.24	1.54	0.92	0.17	0.30	0.07	0.08	0.23	0.6727
5	75.09	19.45	1.14	2.75	0.87	0.18	0.30	0.07	0.08	0.07	0.6862

注:单位为mol%。

3.4.2 原油组分特征

滦探1井西瓜园组泥页岩产出的原油组分以饱和烃为主,含量为77.26%~93.90%,平均为87.46%;沥青质含量均小于1.00%,平均为0.46%;芳烃含量为2.69%~13.21%,非烃含量为2.14%~8.02%,原油品质较好(表4)。

表4 滦平盆地滦探1井白垩系原油组分

Table 4 Oil components of Cretaceous shale oil of Well Luantan1 in Luanping Basin

样品编号	深度/m	饱和烃/%	沥青质/%	芳烃/%	非烃/%
1	982.56	82.02	0.48	6.10	4.53
2	1124.72	92.92	0.08	3.35	3.40
3	1127.11	91.21	0.42	3.65	4.61
4	1136.08	77.26	0.44	13.21	8.01
5	1175.08	93.90	0.87	2.69	2.14

4 油气勘探重大突破

4.1 储层垂向特征及含油气性

袁晓冬等^[30]将滦探1井西瓜园组页岩油气储层自下而上划分为5个层段(图9)。

层段1埋深为1247.30~1252.50m,孔隙度为0.6%~1.4%、平均为0.7%,渗透率为0.009~0.169mD、平均为0.161mD(图9),油气显示为黄绿色轻质油,同时产天然气。层段2埋深为1119.55~1181.10m,孔隙度为0.1%~5.3%、平均为1.1%,渗透率为0.001~0.844mD、平均为0.051mD,同时产黄绿色轻质油与天然气[图9、图10(a)、图10(b)]。层段3埋深为903.85~1046.32m,孔隙度为0.3%~6.4%、平均为1.3%,渗透率为0.005~0.178mD、平均为0.099mD,产出黄绿色轻质油与大量天然气[图9、图10(c)]。层段4埋深为701.65~903.85m,孔隙度为0.7%~0.9%、平均为0.8%,渗透率为0.001~0.003mD、平

均为0.002mD(图9)。层段5埋深小于500m,孔隙度为0.6%~6.4%、平均为2.5%,渗透率为0.004~3.606mD、平均为0.548mD(图9),油气显示以黑色稠油和黏稠沥青为主[图10(d)—图10(f)]。分析认为,滦探1井层段2的页岩油气储集性能最优,层段3、层段1、层段4、层段5储集性能依次变差。

4.2 试油试气求产

综合储层特征和含油气性,优选滦探1井层段2和层段3进行射孔、压裂及测试求产。地面测试分为合采阶段、封上采下、封下采上3个阶段。其中,合采阶段历时27d,平均产气量为3604.00m³/d(气相对密度为0.6862),平均原油产量为3.45t/d,平均产液量为126.66m³/d(相对密度为1.005);封上采下阶段历时10d,平均产气量为3160m³/d(气相对密度为0.6727),平均原油产量为2.54t/d,平均产液量为90.20m³/d(相对密度为1.005);封下采上阶段历时7d,平均产气量为2920m³/d(气相对密度为0.6727),平均原油产量为2.88t/d,平均产液量为100.55m³(相对密度为1.002)。综合定产,滦探1井平均原油产量为3.23t/d、平均天然气产量为3600m³/d,达到了工业化油气流的标准,实现了滦平盆地乃至燕山构造带油气勘探的突破。

5 讨论

5.1 原型盆地

滦平盆地为燕山构造带的典型残余断陷盆地,白垩系残余分布面积约为318km²。前人研究^[11,17,25]和笔者野外踏勘均证实滦平盆地白垩系的北部、西部边界分别为红旗—岗子控盆主断层和小白旗—付家店控盆主断层。前人多认为盆地南部边界分布于边营—三道沟—铃铛木沟—山洼—西台子—后院村一带^[11,16,18,20],笔者野外踏勘过程中,在上述“南部边界”未见盆地边缘相沉积,反而以半深湖沉积为主。前人研究多认为盆地中南部的曹营剖面的底部为白垩系的盆地边缘冲

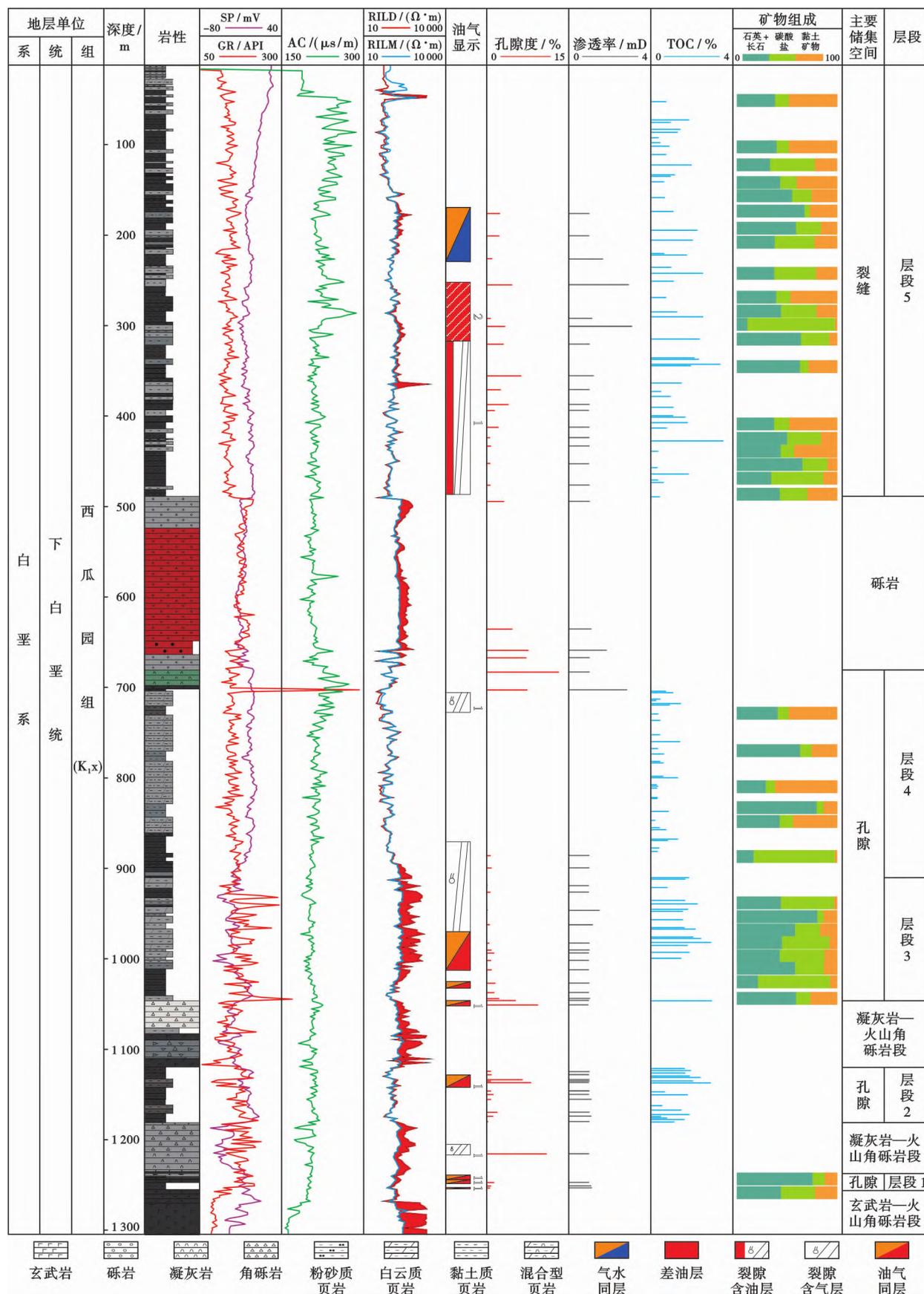


图 9 滦平盆地西瓜园组储层综合地层特征(据文献[30])

Fig. 9 Reservoir characteristics of Xiguayuan Formation in Luanping Basin



图 10 滦探 1 井西瓜园组典型油气显示(图 a 据文献[30])

Fig. 10 Oil and gas display of Xiguayuan Formation of Well Luantan 1

积扇辫状河道沉积,笔者对比研究发现其实际为西瓜园组沉积早期的半深湖环境中的火山角砾岩沉积,认为盆地现存白垩系南部边界并非其原始边界,现存盆地范围也并非原型盆地的范围与形态。刘少峰等^[22]研究认为,中生代燕山构造带内部的滦平—承德—平泉盆地为同一原型盆地,于早白垩世晚期因构造体制转变才发生分离。

滦平盆地原型盆地的展布范围不明确,导致对盆地各时期原始沉积沉降中心的认识不清,制约了盆地油气勘探进展。因此,为明确滦平盆地的油气地质背景,下一步需要开展滦平盆地的原型恢复研究。

5.2 构造演化与油气成藏

中侏罗世—早白垩世为滦平盆地主成盆期,受燕山运动影响,盆地内部应力场经历了“挤压—拉张—挤压”的转变。晚侏罗世中期—早白垩世早期,滦平盆地整体处于拉张环境,利于发育范围广、深度大、持续时间长的湖泊环境,沉积了土城子组、大北沟组、大店子组和西瓜园组烃源岩。统计发现,滦平盆地中生界埋藏沉降幅度达 3000 m 以上,较大的埋深为有机质热演化成熟和生、排烃提供了良好的条件。基于多幕含烃热流体的分析,前人研究^[20]认为滦平盆地西瓜园组扇三角洲砂砾岩体曾是油气运移的输导层,而后期构造使其暴露地表,导致古含油气系统不复存在,不利于现今油气勘探。笔者研究表明,构造作用形成的巨大埋深使中生界烃源岩深埋、热演化成熟并生成油气;盆地

后期抬升以掀斜运动为主,地层表现为单斜特征,页岩油气系统破坏有限,因此滦平盆地仍具有较好的油气保存条件。

5.3 火山-陆源-内源相互作用

笔者研究发现,中生代滦平盆地具有强烈的火山物质输入和热液物质注入,且陆源输入和生物化学沉淀物质同时作用,发育“火山-陆源-内源”相互作用的沉积模式。

滦平盆地为典型断陷盆地,靠近物源且构造活动频繁,陆源物质输入构成盆地沉积物的主要来源。同时,滦平盆地成盆期火山活动频繁,在盆地构造活跃的背景下,深层热液流体通过水下火山喷发、沿断层上涌和泉眼喷溢等形式注入湖盆,构成盆地中生界重要的物质来源。另外,生物可通过新陈代谢作用集结环境中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等,形成碳酸盐晶体,构成断陷湖盆内源物质的重要来源。特别是季节性勃发的硅藻既可以构成湖盆内自生石英的物质来源,也可以诱导碳酸盐物质结晶^[31-32]。滦探 1 井西瓜园组烃源岩生物标志化合物特征表明,其有机质母质来源以藻类等水生生物为主,层段 2 发育大量白云质页岩,推测与生物供源有关。

5.4 特殊页岩油气形成条件

相较于中国大多数盆地产出的陆相页岩油,滦平盆地地下白垩统西瓜园组页岩油具有更高的成熟度和更好的流动性,其饱和烃含量达 92.92%,芳烃占比为

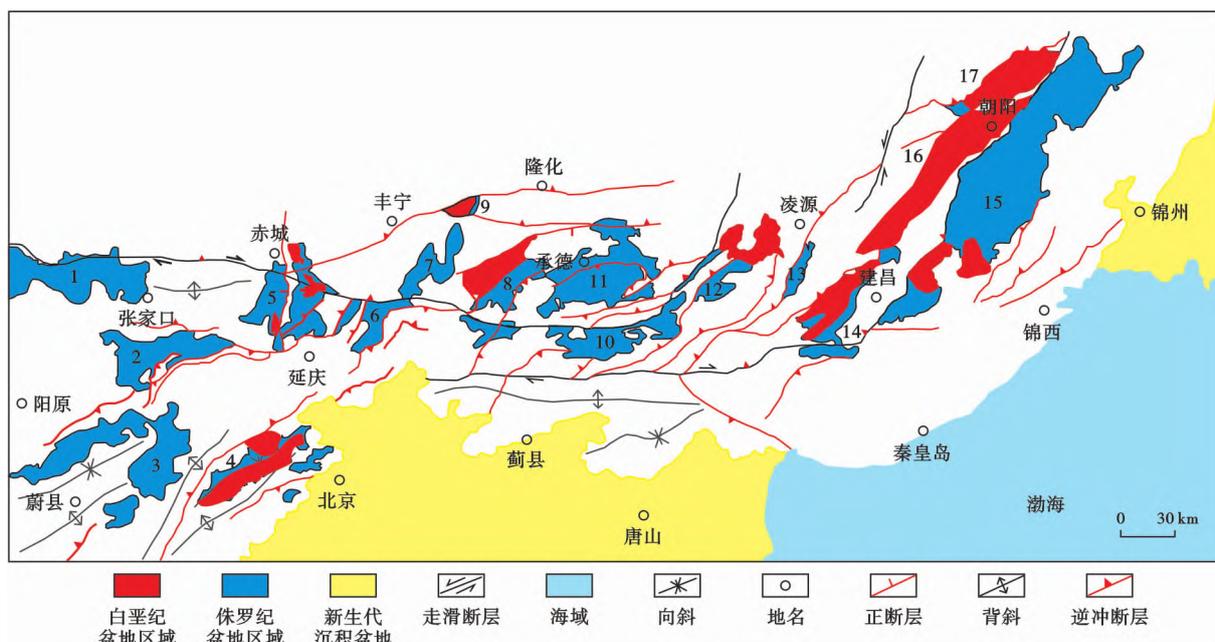
3.35%，非烃含量和沥青质含量都很低，显示出较高的成熟度，原油品质好，为中—轻质油。天然气中 CH₄ 含量为 77%~79%，C₂₊ 重烃气含量小于 5%，显示出明显的干气特征，且 N₂ 含量较高(15.81%~19.45%)，这与其成熟度(R_o 为 0.64%~1.32%，平均为 0.93%)并不吻合。考虑到滦平盆地特殊复杂的地质条件，其内部陆相页岩油的富集规律与主控因素尚不明确^[33]，因此天然气组成与其成熟度不匹配的原因有待于深入研究。

5.5 燕山构造带油气勘探前景

燕山构造带面积约为 10×10⁴km²，发育十余个中生界陆相盆地(图 11)，盆地总面积超过 2×10⁴km²。前人研究发现，除滦平盆地外，燕山构造带部分盆地也具

有较好的生烃潜力。何保等^[34]研究认为金岭寺—羊山盆地北票组烃源岩的平均 TOC 含量为 1.72%，北票盆地北票组暗色泥岩厚度最大可达 800 m，其平均 TOC 含量达 2.78%；路魏魏等^[35]报道了凤山盆地白垩系页岩气发现，表明燕山构造带具有较好的油气勘探潜力。

在滦平盆地获得的工业油气流，既实现了滦平盆地油气勘探突破，形成的针对新区、新盆地的油气资源潜力评价方法也可为燕山构造带其他盆地开展油气勘探提供借鉴与指导。当前，滦平盆地已被自然资源部纳入新的探矿权出让区块，为燕山构造带和滦平盆地开展油气地质深入研究与资源潜力评价提供了有力支撑。



注:1—尚义盆地;2—宣化—下花园盆地;3—蔚县盆地;4—京西盆地;5—赤城盆地;6—花盆地;7—石人沟盆地;8—滦平盆地;9—凤山盆地;10—大杖子盆地;11—承德盆地;12—平泉盆地;13—牛营子盆地;14—建昌盆地;15—金岭寺—羊山盆地;16—朝阳盆地;17—北票盆地。

图 11 燕山构造带中生界沉积盆地分布(据文献[15])

Fig. 11 Distribution of Mesozoic sedimentary basins in Yanshan tectonic belt

6 结论

(1) 野外踏勘与钻探实践证实，滦平盆地中生界发育厚度大、分布范围广的深水泥页岩，突破了滦平盆地为仅受陆源输入影响的浅水小型湖泊沉积的传统地质认识。中生界西瓜园组泥页岩有机质丰度较高、有机质类型以 II 型为主、处于热演化成熟—高成熟阶段，构成盆地的主要烃源岩。

(2) 滦平盆地中生界西瓜园组泥页岩储层包括黏土质页岩、粉砂质页岩、白云质页岩与混合型页岩 4 种储集岩性。页岩平均孔隙度为 1.6%，平均渗透

率为 0.265 mD，整体为低孔超低渗储层。其中，粉砂质页岩储集空间最为发育，混合型页岩孔隙连通性最好。

(3) 滦探 1 井首次在滦平盆地获得了工业油气流，突破了盆地构造活动剧烈、油气不易保存的传统认识，并首次在国内发现干气与轻质油同层产出。页岩油品质较好，饱和烃平均含量为 92.92%，天然气中甲烷平均含量为 74.77%，表现出干气特征。滦平盆地油气勘探突破填补了燕山构造带中生界油气勘探的空白，对燕山构造带和国内外油气地质条件相似的盆地开展油气勘探具有重要的借鉴与推广意义。

参 考 文 献

- [1] REN Qiang, ZHANG Shihong, WU Huaichun, et al. Further paleomagnetic results from the ~155 Ma Tiaojishan Formation, Yanshan belt, North China, and their implications for the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk suture[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35:180-191.
- [2] LI Chengming, ZHANG Changhou, COPE T D, et al. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: an example from the Mesozoic Yanshan belt, North China craton[J]. *Tectonics*, 2016, 35(9):2082-2116.
- [3] LIU Jian, ZHAO Yue, LIU Ankun, et al. Late Jurassic to Early Cretaceous sedimentary-tectonic development in the Chengde Basin, Yanshan fold-thrust belt, North China craton[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2015, 114:611-622.
- [4] 王浩, 任收麦, 周志, 等. 华北燕山地区中—新元古界油气勘查形势[J]. *地质通报*, 2019, 38(2/3):404-413.
WANG Hao, REN Shoumai, ZHOU Zhi, et al. Oil and gas exploration status analysis of the Meso-Neoproterozoic strata in Yanshan area, North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(2/3):404-413.
- [5] 刘静, 周志, 刘喜恒, 等. 燕山地区中元古界页岩气成藏地质条件[J]. *石油学报*, 2019, 40(3):268-278.
LIU Jing, ZHOU Zhi, LIU Xiheng, et al. Geological conditions of the Mesoproterozoic shale gas accumulation in Yanshan area, North China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(3):268-278.
- [6] DAVIS G A, ZHENG Yadong, WANG Cong, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China[M]// HENDRIX M S, DAVIS G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central and eastern Asia; from continental assembly to intracontinental deformation. Geological Society of America, 2001:171-197.
- [7] SHI Xiaofei, LIU Shaofeng, LIN Chengfa. Growth structures and growth strata of the Qianjiadian Basin in the western Yanshan fold and thrust belt, North China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 62(7):1092-1109.
- [8] ZHANG Changhou, WU Ganguo, WANG Genhou, et al. Northwest trending tectonic belt in the Middle Yanshan orogenic belt of northeast Hebei Province, North China: tectonic evolution and geochronology[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2004, 47(10):896-911.
- [9] 林少泽, 朱光, 赵田, 等. 燕山构造带北部喀喇沁地区晚古生代—中生代岩浆活动的构造背景分析[J]. *地质科学*, 2015, 50(1):30-49.
LIN Shaoze, ZHU Guang, ZHAO Tian, et al. Tectonic setting of Late Paleozoic-Mesozoic magmatic activities in the Kalaqin area of the northern Yanshan tectonic belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1):30-49.
- [10] 朱大岗, 吴珍汉, 崔盛芹, 等. 燕山地区中生代岩浆活动特征及其与陆内造山作用关系[J]. *地质论评*, 1990, 45(2):163-172.
ZHU Dagang, WU Zhenhan, CUI Shengqin, et al. Features of Mesozoic magmatic activities in the Yanshan area and their relations to intracontinental orogenesis[J]. *Geological Review*, 1999, 45(2):163-172.
- [11] 张英利, 孟庆任. 燕山构造带中段早白垩世盆地特征[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2008, 38(4):604-612.
ZHANG Yingli, MENG Qingren. Early Cretaceous basin characteristics in the middle segment of Yanshanian structural belt[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(4):604-612.
- [12] 魏红红, 武国利, 段亮. 燕山构造带三叠系地层分析[J]. *中国科学:地球科学*, 2015, 45(3):264-274.
WEI Honghong, WU Guoli, DUAN Liang. Revisiting Triassic stratigraphy of the Yanshan belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 45(3):264-274.
- [13] DENG Jinfu, SU Shangguo, MO Xuanxue, et al. The sequence of magmatic-tectonic events and orogenic processes of the Yanshan belt, North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1):260-266.
- [14] LIU Jian, ZHAO Yue, LIU Xiaoming, et al. Rapid exhumation of basement rocks along the northern margin of the North China craton in the Early Jurassic: evidence from the Xiabancheng Basin, Yanshan tectonic belt[J]. *Basin Research*, 2015, 24(5):544-558.
- [15] LIN Chengfa, LIU Shaofeng, SHI Xiaofei, et al. Late Jurassic- Early Cretaceous deformation in the western Yanshan fold-thrust belt: insights from syntectonic sedimentation in the Chicheng Basin, North China[J]. *Tectonics*, 2019, 38(7):2449-2476.
- [16] 李寅. 滦平盆地西瓜园组扇三角洲沉积体系构成及其特征[J]. *地球学报*, 2003, 24(4):353-356.
LI Yin. Fan-deltaic depositional systems of the Xiguayuan Formation in Luanping Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(4):353-356.
- [17] 武法东, 陈永进, 侯宇安, 等. 滦平盆地沉积-构造演化及高精度层序地层特征[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, 29(5):625-630.
WU Fadong, CHEN Yongjin, HOU Yu'an, et al. Characteristics of sedimentary-tectonic evolution and high-resolution sequence stratigraphy in Luanping Basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5):625-630.
- [18] JIA Haibo, JI Hancheng, YU Jifeng, et al. Sediment supply control on the delivery of sediments to deep-lacustrine environment: a case study from Luanping Basin, Northern China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(5):3679-3693.
- [19] DOU Luxing, HOU Jiagen, SONG Suihong, et al. Sedimentary characteristics of hyperpynites in a shallow lacustrine environment: a case study from the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation, Luanping Basin, Northeast China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(5):3344-3360.
- [20] 焦养泉, 武法东, 李思田, 等. 滦平盆地成岩作用过程及古热流体幕式运移事件分析[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4):615-622.
JIAO Yangquan, WU Fadong, LI Sitian, et al. Diagenism and thermal fluid episode migration events in Luanping Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(4):615-622.
- [21] 赵越. 燕山地区中生代造山运动及构造演化[J]. *地质论评*, 1990, 36(1):1-13.
ZHAO Yue. The Mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area[J]. *Geological Review*, 1990, 36(1):1-13.
- [22] 刘少峰, 李忠, 张金芳. 燕山地区中生代盆地演化及构造体制[J]. *中国科学:地球科学*, 2004, 34(S1):19-31.

- LIU Shaofeng, LI Zhong, ZHANG Jinfang. Mesozoic basin evolution and tectonic mechanism in Yanshan, China[J]. Science China Earth Sciences, 2004, 34(S1): 19-31.
- [23] HAO Wenxing, ZHU Rixiang, ZHU Guang. Jurassic tectonics of the eastern North China craton: response to initial subduction of the Paleo-Pacific plate[J]. GSA Bulletin, 2021, 133(1/2): 19-36.
- [24] LIN Yi, ZHANG Changhou, LI Chengming, et al. From dextral contraction to sinistral extension of intracontinental transform structures in the Yanshan and northern Taihang mountain belts during Early Cretaceous: implications to the destruction of the North China craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 189: 104139.
- [25] 武法东, 陈永进, 李寅, 等. 河北滦平盆地构造演化及对扇三角洲发育的控制作用[J]. 现代地质, 2000, 14(2): 179-184.
WU Fadong, CHEN Yongjin, LI Yin, et al. Tectonic evolutions and their control on development of fan-deltic depositional system in the Luanping Basin[J]. Geoscience, 2000, 14(2): 179-184.
- [26] 邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 等. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(2): 157-165.
DENG Jinfu, ZHAO Guochun, SU Shangguo, et al. Structure overlap and tectonic setting of Yanshan orogenic belt in Yanshan era[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(2): 157-165.
- [27] 刘策, 于炳松, 蒋锐, 等. 湖盆重力流沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地及滦平盆地为例[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 133-142.
LIU Ce, YU Bingsong, JIANG Rui, et al. Sedimentary feature and mode of gravity flow in lacustrine basin: example from Ordos Basin and Luanping Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5): 133-142.
- [28] 田树刚, 牛绍武, 庞其清. 冀北滦平盆地早白垩世陆相义县阶的重新厘定及其层型剖面[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 739-752.
TIAN Shugang, NIU Shaowu, PANG Qiqing. Redefinition of the Lower Cretaceous terrestrial Yixianian stage and its stratotype candidate in the Luanping Basin, northern Hebei, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 739-752.
- [29] 杜学斌, 刘晓峰, 陆永潮, 等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式—以东营凹陷为例[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1324-1333.
DU Xuebin, LIU Xiaofeng, LU Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: a case study of Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1324-1333.
- [30] 袁晓冬, 姜在兴, 张元福, 等. 滦平盆地白垩系陆相页岩油储层特征[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1197-1208.
YUAN Xiaodong, JIANG Zaixing, ZHANG Yuanfu, et al. Characteristics of the Cretaceous continental shale oil reservoirs in Luanping Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1197-1208.
- [31] 白莹, 李建忠, 刘伟, 等. 塔里木盆地西北部下寒武统白云岩特征及多重白云石化模式[J]. 石油学报, 2021, 42(9): 1174-1191.
BAI Ying, LI Jianzhong, LIU Wei, et al. Characteristics and multiple dolomitization mode of the Lower Cambrian dolomite reservoir, northwestern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(9): 1174-1191.
- [32] 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芑, 等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多元成因[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 26-37.
JIANG Zaixing, KONG Xiangxin, YANG Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26-37.
- [33] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [34] 何保, 付秋萍, 张亚明. 辽西金羊盆地北票组烃源岩分布及有机质丰度[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(1): 24-27.
HE Bao, FU Qiuping, ZHANG Yaming. Beipiao group hydrocarbon material distribution and organic matter abundance of Jinlingsi-Yangshan Basin in western part of Liaoning[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(1): 24-27.
- [35] 路魏魏, 高亮, 上官拴通, 等. 冀北凤山盆地白垩系九佛堂组页岩气成藏潜力研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(5): 12-17.
LU Weiwei, GAO Liang, SHANGGUAN Shuantong, et al. Study on Cretaceous Jiufotang Formation shale gas reservoir potential in Fengshan Basin, northern Hebei[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(5): 12-17.

(收稿日期 2021-09-21 改回日期 2021-12-19 编辑 肖 飞)