

滦平盆地白垩系细粒火山物质对页岩油气形成的影响

刘晓宁,姜在兴,袁晓冬,陈晨,王成

[中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083]

摘要:滦平1井压裂试产成功地开采出工业性页岩油气,使滦平盆地中生代白垩系西瓜园组成为该地区目前勘探研究的重点层位。近期的对滦平1井的岩石学研究表明,生油层发现有细粒火山物质沉积,并与页岩油气生成和聚集存在紧密关系。因而探明火山细粒物质与页岩油气形成的关系成为新的命题。以滦平盆地西瓜园组下段为研究层位,结合岩心、薄片、测井、X衍射和地化测试数据等资料,对含凝灰质细粒沉积岩的沉积特征和有机质发育情况进行分析,旨在为该地区页岩油气的进一步勘探开发提供理论支持。西瓜园组下段受火山-湖泊作用控制,发育湖相泥页岩、受火山活动影响的含凝灰质细粒沉积岩、火山相的安山岩以及火山碎屑岩等。结果显示,泥页岩的平均总有机碳含量(TOC)为0.64%,平均 S_1+S_2 含量为0.41 mg/g;含凝灰质细粒沉积岩的平均 TOC 为1.92%,平均 S_1+S_2 含量为2.64 mg/g。含凝灰质细粒沉积岩层位有机质含量明显更富集。细粒火山物质发育的层段中大量发育草莓状黄铁矿,同时 Pr/Ph 较小, $V/(V+Ni)$ 偏大也指示了火山喷发后强还原的水体环境,及火山细粒物质沉积后快速埋藏都有利于有机质的保存。湖相碳酸盐岩发育,与纹层状富有机质泥岩、凝灰岩交互,层间裂缝利于油气的运移,凝灰岩纹层和白云岩纹层提供了储集空间。页岩油气具有源-储一体的特点,细粒火山物质的存在从有机质的富集和成烃演化到油气的储集、保存条件都产生了积极的作用。

关键词:细粒火山物质;岩石类型;页岩油气;西瓜园组;白垩系;滦平盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Influence of the Cretaceous fine-grained volcanic materials on shale oil/gas, Luanping Basin

Liu Xiaoning, Jiang Zaixing, Yuan Xiaodong, Chen Chen, Wang Cheng

[School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Industrial shale oil/gas flow was successfully tested in Well Luanye 1 after fracturing, and the Cretaceous Xiguayuan Formation in the Luanping Basin has currently been a key zone of hydrocarbon exploration and research in this area. Recent petrological studies on Well Luanye 1 show that fine-grained volcanic materials have been discovered in the source rocks and are closely related to the generation and accumulation of shale oil/gas. It has become a new proposition to explore the relationship between fine-grained volcanic materials and shale oil/gas. The lower member of Xiguayuan Formation in the Luanping Basin is the target of the study with a combination of analyses and laboratory data such as cores, microscopic thin sections observation, logging, X-ray diffraction and geochemical test. The sedimentary characteristics and organic matter development of the fine-grained tuffaceous sedimentary rocks are discussed to provide theoretical support for further exploration and development of shale oil/gas in the area. On the other hand, the development of lower member of Xiguayuan Formation is controlled by volcano-lacustrine interaction, with lacustrine shale, fine-grained tuffaceous sedimentary rocks under the effect of volcanic activities, as well as andesite and pyroclastic rocks of volcanic facies well developed within. The results show that in the shale, the average TOC content is 0.64%, and the average S_1+S_2 content is 0.41 mg/g; in the fine-grained tuffaceous sedimentary rocks, the average TOC content is 1.92%, and the average S_1+S_2 content is 2.64 mg/g, indicating that the abundance of organic matters is markedly greater in the fine-grained tuffaceous sedimentary rocks. Pyrite framboids are widely developed in the intervals

收稿日期:2021-07-02;修订日期:2022-01-18。

第一作者简介:刘晓宁(1996—),男,硕士研究生,沉积学。E-mail: 2006190019@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41772090)。

where fine-grained volcanic materials are enriched; meanwhile, Pr/Ph is smaller and V/(V+Ni) is larger, also indicating a strong reduction of water environment after volcanic eruption. The rapid deposition and burial of fine-grained volcanic materials is conducive to the preservation of organic matters. Lacustrine carbonate rocks are well developed and interbedded with laminated organic-rich mudstone and tuff. The interlayer fractures are conducive to hydrocarbon migration, while the tuff and dolomite laminae provide reservoir spaces. The fine-grained volcanic materials play a positive role in the complete process from the enrichment and hydrocarbon generation of organic matters to the storage and preservation of oil/gas.

Key words: fine-grained volcanic material, rock type, shale oil/gas, Xiguayuan Formation, Cretaceous, Luanping Basin

引用格式: 刘晓宁, 姜在兴, 袁晓冬, 等. 滦平盆地白垩系细粒火山物质对页岩油气形成的影响[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 390-406. DOI: 10.11743/ogg20220212.

Liu Xiaoning, Jiang Zaixing, Yuan Xiaodong, et al. Influence of the Cretaceous fine-grained volcanic materials on shale oil/gas, Luanping Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 390-406. DOI: 10.11743/ogg20220212.

细粒火山物质是火山活动中喷出的细粒碎屑物质,一般指直径小于2 mm的火山灰和火山尘,成分主要为玻屑、晶屑和岩屑^[1]。火山喷出的细粒火山物质可以直接沉积形成凝灰岩,或与湖相其他物质沉积形成混合细粒岩^[2]。1989年周中毅便指出,含凝灰质的岩层可以作为良好的生油岩^[3],之后多位学者研究发现作为页岩油气储层的泥页岩层中可能夹有火山岩薄层^[4-5]。近年来,随着页岩油气研究的逐步深入,在全球范围内发现多个盆地页岩油气的载体沉积过程中有火山细粒物质的参与^[6-16]。火山-热液活动提供的深源物质与油气富集在多个盆地展现出强烈的耦合关系^[17-20]。

对地球深部物质参与油气形成的机理,国内外学者已经取得一定的进展。刘全有等研究表明火山-热液活动携带的物质和能量对烃源岩发育、生烃过程、储集空间改造和页岩油驱替有正面效应^[21]。火山-热液活动为湖水提供了各类营养物质和生命必需元素,对湖泊水体生物大量繁育起到正面作用^[22]。带来的超临界CO₂对沉积物中的有机质具有萃取作用,提高了页岩油气运聚效率^[21,23]。对碳酸盐岩储集层的发育和改造使得储集层的物性得到明显改善^[24]。火山活动对碳酸盐岩形成的促进作用体现在两个方面:一是火山活动使深源物质涌入水体,湖泊中Ca²⁺和Mg²⁺等离子富集,为白云石和铁白云石的形成提供物质基础^[25-28];二是微生物大量繁殖对碳酸盐岩形成的促进作用。常温下CO₃²⁻很难突破水合层与Mg²⁺结合,火山细粒物质带来的营养物质能够促使微生物的大量发育繁殖。藻类、硫酸盐还原细菌和产甲烷细菌的生物化学作用,促进了白云石和铁白云石等矿物的生成^[29],生物过程是沉积白云石的主控因素^[30]。火山喷发带来的营养物质促进了水生微生物的勃发,生物活动又

反过来影响了地质成矿作用。

盆地的多源物质供给,使富含有机质的细粒沉积岩矿物成分复杂,岩石组分多样^[2,18]。由于自身粒度细,细粒沉积地层常被认为仅由陆源远端的沉积物和湖相内源沉积物质组成,而忽略了火山活动来源的细粒物质部分。细粒沉积岩的沉积学理论和岩石类型识别有待系统性研究。

滦页1井在滦平盆地西瓜园组下段获得了稳定的工业性页岩油气流,首次在燕山构造带中生界发现油气。其油气储集层为源-储一体的泥页岩层段,且在沉积过程中有深源物质的参与,与上述富有机质湖相细粒沉积岩相似,发育有火山热液型甜点段^[27]。过去西瓜园组的烃源岩被简单认识为泥页岩,使得目前对滦平盆地西瓜园组的石油地质研究集中在烃源岩的特征及地球化学分析评价和储层特征研究^[31-32],西瓜园组下段火山细粒物质沉积并未得到重视。近期研究发现,岩心资料显示富含页岩油气岩层段含有大量的火山碎屑物质,且与油气的分布密切相关。因此,火山细粒沉积如何影响滦平盆地西瓜园组下段的页岩油气的形成成为新的命题。本研究通过岩心和薄片观察,描述了火山细粒物质沉积的分布特征。对页岩油气细粒沉积岩载体的特征和地化分析,表明含有火山细粒物质的层段有机质富集程度更高,并阐述了凝灰质泥岩有机质来源。探究在有机质聚集、保存,到生烃和形成页岩油气的过程中,火山细粒物质沉积造成的影响,从而为整个燕山构造带其他具有相似背景的陆相断陷湖盆页岩油气寻找有利的储层提供新的思路。

1 地质概况

滦平盆地位于河北省承德市,司马台-金山岭长

城脚下,紧邻北京密云区,为燕山构造带陆相断陷湖盆中具有代表性,且地层保存完好的早白垩世伸展盆地。盆地发育在燕山构造带北缘,位于尚义-平泉断裂与丰宁-隆化断裂间楔形地带,呈NE-SW向延伸,长约40 km,宽约20 km,中生代地层残余面积约为800 km²^[31](图1)。

盆地的基底主要为太古宙变质岩以及元古宙侵入岩,中生代开始成盆并接受沉积。自成盆以来,滦平盆地经历了3次主要裂陷阶段。第一裂陷阶段为晚侏罗世早期,接受湖相和河流相沉积。第二裂陷阶段为晚侏罗世中期—早白垩世早期,盆地沿断裂大规模发育火山沉积,并在火山间歇期发育湖相沉积,火山作用结束后发育粗碎屑沉积。第三裂陷阶段为早白垩世早期—早白垩世中期,发育有构造活动引起的中酸性火山岩系,并沉积有扇三角洲-湖泊沉积体系^[31,33]。早白垩世时期,受到晚燕山期构造活动影响,滦平盆地接受沉积时伴随有多期次的火山活动。此外,燕山地区在滦平盆地附近发育了许多类型相似的盆地,如赤城盆地和承德盆地等,共同组成了中生

代陆相火山-沉积盆地群^[34]。

滦平盆地中生代地层自下而上发育有上侏罗统的九龙山组(J_3j)和髫髻山组(J_3t),下白垩统的土城子组(K_1tc)、张家口组(K_1z)、大北沟组(K_1db)、大店子组(K_1d)和西瓜园组(K_1x)^[31]。研究目的层段位于西瓜园组。结合录井资料与野外剖面,西瓜园组在滦平盆地最大残余厚度约为1 700 m。西瓜园组早期处于第三裂陷期的裂陷和扩张阶段,湖盆扩张水体加深,整体处于半深湖-深湖的环境,沉积地层主要为黑色泥页岩。由于火山活动,同时沉积有火山岩、火山碎屑岩和混源细粒沉积岩,形成了火山-湖泊沉积体系(图2)。火山-湖泊作用的沉积层位为西瓜园组下段,西瓜园组底部与下伏大店子组安山岩呈不整合接触,下部主要发育火山爆发期的安山岩、火山角砾岩和火山活动较弱时期的湖相黑色泥页岩,夹有多期火山凝灰薄层。中部主要发育受火山作用及火山伴随的热液作用影响的火山凝灰质薄层,黑色富有机质泥页岩层和白云岩薄层。上部火山活动减弱,主要发育黑色泥页岩。

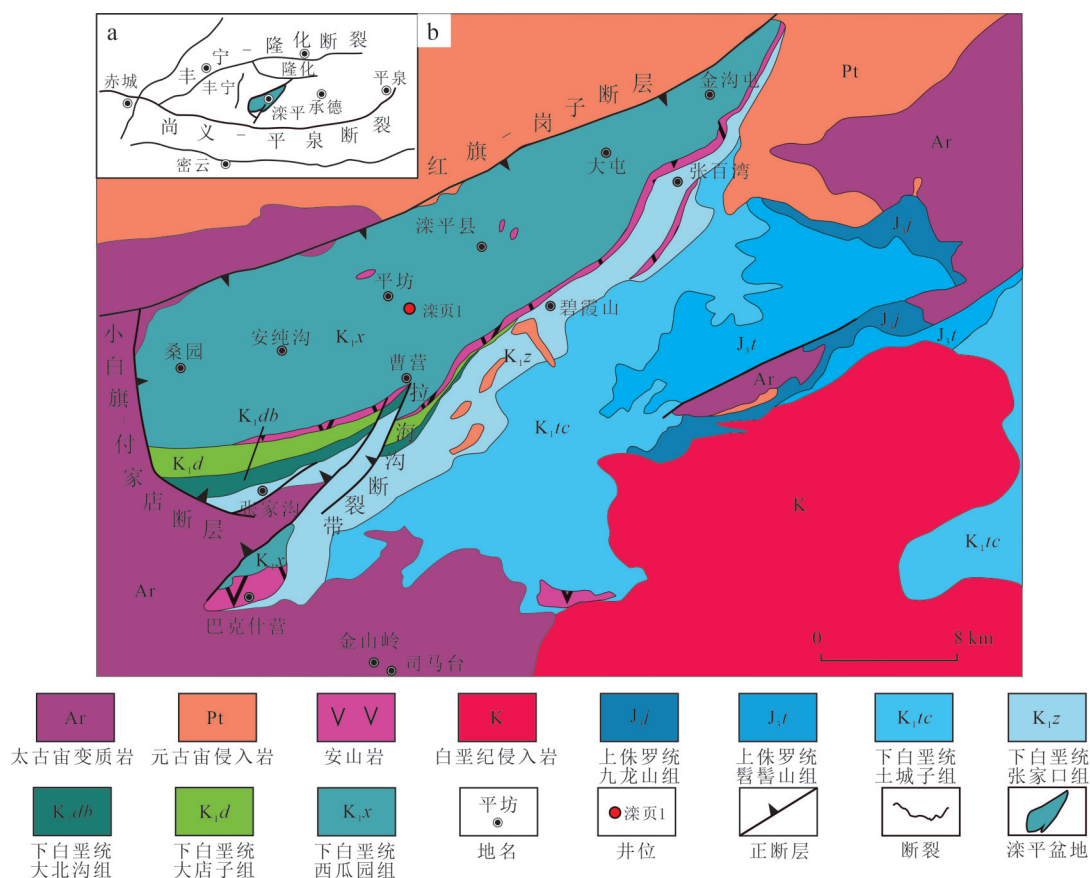


图1 滦平盆地地质概况

Fig. 1 Simplified geological map of the Luanping Basin

a. 滦平盆地区域构造位置; b. 滦平盆地地质构造示意图

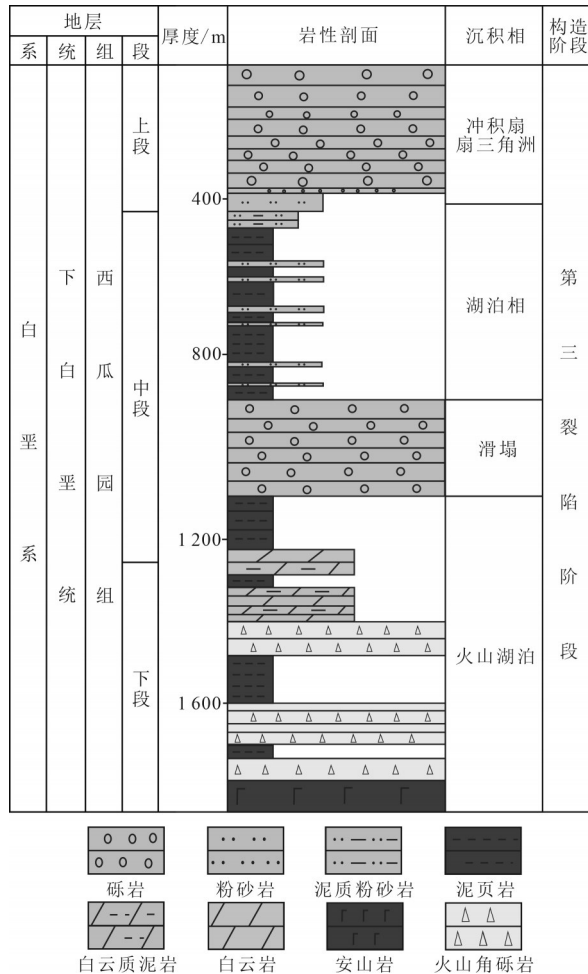


图2 滦平盆地西瓜园组地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Xiguayuan Formation in the Luanping Basin

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

西瓜园组分布非常广泛,在盆地的大部分区域均有出露。滦页1井位于滦平县平坊乡要子沟村西北部S315省道旁(图1),井深为1 308.4 m,已进行全井段取心。西瓜园组下段在滦页1井累计600 m厚,主要岩性为泥页岩、安山岩、火山角砾岩和白云岩等,含油气层段的黑色岩系夹有细粒火山碎屑物质。本研究的主要研究对象为滦页1井的岩心。在岩石组合精细研究基础上,对滦页1井埋深700~1 050 m,1 125~1 180 m和1 240~1 255 m的岩心段针对性地采集细粒沉积岩样品共68块,按照从浅到深进行编号,样品岩石类型包括泥页岩21块、粉砂岩16块、白云岩11块、凝灰岩2块和混合细粒岩18块(表1)。

2.2 研究方法

在对全井段岩心进行观察和系统性镜下薄片鉴定基础上,结合扫描电镜和地化数据、全岩衍射数据等的分析,描述了不同岩石类型的矿物成分特征、岩石沉积特征,并比较了各岩石的含油性。扫描电镜在中国地质大学(北京)生物地质与环境地质国家重点实验室观察完成。全岩衍射分析实验测试样品20块,在中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡地质研究所完成。岩石热解分析实验测试样品50块,使用OGE-II岩石热解分析仪,镜质组反射率(R_o)实验测试样品13块,测定仪器主要采用的是308-PV显微光度计,均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。微量元素分析测试实验样品10块,使用高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,在中国核工业集团有限公司核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行测试。有机碳稳定碳同位素($\delta^{13}C$)分析测试实验样品14块,由FLASH HT EA-MAT 253 IRMS稳定同位素比质谱仪测定(表1)。

3 西瓜园组下段细粒沉积岩沉积特征与地球化学特征

3.1 岩石类型划分

西瓜园组下段受火山-湖泊作用影响(图2),发育有安山岩、火山角砾岩和细粒沉积岩等。细粒沉积岩主要矿物组成有粘土矿物、长石、石英、白云石和方解石等。本研究依据姜在兴等^[35-37]的含碳酸盐细粒沉积岩成分分类方案,采用粘土、碳酸盐矿物和粉砂3个端元对研究样品进行了主要岩石类型划分。西瓜园组下段细粒沉积岩岩石类型主要发育岩性有白云岩、粉砂岩、泥页岩和混合细粒岩(图3)。混合细粒岩各矿物组成端元含量仍存在差异(表2),依据周立宏等^[38]对质量分数大于等于25%且小于50%的矿物类型以“xxx质”置于主名称之前的划分方法,将混合细粒岩进一步划分为长英质混合细粒岩、碳酸盐型混合细粒岩和粘土型混合细粒岩。

3.2 西瓜园组下段细粒沉积岩分布特征

宏观上西瓜园组含细粒沉积岩的火山细粒物质呈现出两种沉积结构。一种为纹层状,与下部的泥页岩和碳酸盐岩纹层界限常呈现出冲刷的特征,颗粒顺水平层理方向具备一定的定向性,层内可观察到正粒序

表1 滦平盆地滦页1井样品实验内容

Table 1 Experiment on samples from Well Luanye 1, Luanping Basin

样品 编号	深度/m	岩性	岩石 热解 分析	镜质体 反射率 (R_o)	全岩 衍射 分析	有机碳 稳定 同位素	微量 元素 分析	样品 编号	深度/m	岩性	岩石 热解 分析	镜质体 反射率 (R_o)	全岩 衍射 分析	有机碳 稳定 同位素	微量 元素 分析
1	704.30	泥页岩	√					35	985.30	粉砂质白云岩	√		√		
2	704.67	泥页岩	√	√				36	992.85	粉砂岩	√	√	√	√	√
3	713.55	泥页岩	√					37	999.70	白云岩			√		
4	713.75	泥页岩	√					38	1 005.70	白云质混合细粒岩					√
5	729.65	粉砂质泥页岩			√			39	1 013.15	粉砂岩	√		√		
6	773.30	泥质粉砂岩		√	√	√		40	1 016.65	粉砂岩		√	√	√	
7	777.50	泥质粉砂岩					√	41	1 022.68	白云岩			√		
8	781.60	长英质混合细粒岩	√					42	1 028.20	粉砂质白云岩	√	√		√	√
9	782.50	长英质混合细粒岩	√					43	1 032.92	粉砂岩			√		
10	798.00	泥页岩	√					44	1 041.50	粉砂岩	√		√	√	
11	799.52	泥页岩	√					45	1 046.32	白云质粉砂岩	√	√			
12	808.20	泥页岩	√					46	1 122.20	长英质混合细粒岩	√	√			
13	808.56	泥页岩	√					47	1 122.88	长英质混合细粒岩	√			√	
14	811.30	泥页岩	√		√			48	1 126.27	长英质混合细粒岩	√				
15	822.16	泥页岩	√					49	1 126.27	长英质混合细粒岩	√				
16	822.26	泥页岩	√					50	1 128.40	长英质混合细粒岩				√	√
17	831.40	长英质混合细粒岩					√	51	1 129.33	泥页岩	√				
18	837.18	粉砂岩	√					52	1 129.80	长英质混合细粒岩	√			√	
19	837.20	粉砂岩		√	√	√		53	1 135.20	粉砂质泥页岩	√				
20	847.10	泥质粉砂岩	√		√			54	1 136.70	凝灰岩	√			√	√
21	868.17	粘土型混合细粒岩	√					55	1 136.73	凝灰岩	√				
22	869.45	粘土型混合细粒岩	√					56	1 147.00	长英质混合细粒岩		√			
23	877.73	长英质混合细粒岩	√					57	1 150.19	泥页岩	√				
24	881.32	白云岩	√		√			58	1 153.67	粉砂质白云岩	√				
25	911.36	白云质混合细粒岩	√					59	1 157.88	粉砂质白云岩				√	√
26	911.40	白云质混合细粒岩	√					60	1 167.12	粉砂质泥页岩	√	√			
27	921.15	白云岩			√	√		61	1 173.01	粉砂质泥页岩	√				
28	928.60	泥质粉砂岩					√	62	1 175.04	泥页岩	√				
29	945.45	白云岩	√					63	1 175.80	泥页岩	√	√			
30	947.30	白云岩	√					64	1 176.20	粉砂质泥页岩	√				
31	956.80	粉砂岩	√		√			65	1 180.51	泥质粉砂岩	√				
32	975.90	粉砂岩	√		√			66	1 243.90	长英质混合细粒岩					√
33	976.02	粉砂质泥页岩	√					67	1 249.25	粉砂岩			√		
34	982.45	粉砂质白云岩	√	√	√	√		68	1 254.63	长英质混合细粒岩		√	√	√	

(图4a),显示出侧向牵引流沉积的特征;另一种为晶屑散乱分布在细粒沉积岩中,无明显内部结构,呈混杂堆积,显示出高密度碎屑流的沉积特征(图4b)^[39]。镜下观察显示,火山凝灰纹层存在正粒序结构(图4c),凝灰岩纹层中出现层间裂缝(图4d)。矿物成分成熟度低,棱角明显,磨圆度差,多为自形或出现鸡骨状(图4e,f)。

西瓜园组火山岩和火山碎屑岩之间发育有深湖-半深湖相的沉积夹层,形成黑色安山岩、泥页岩、长英质混合细粒岩、火山角砾岩,以及白云质混合细粒岩等

的岩石组合,表明火山喷发活动的主体应位于湖盆的水下环境中,沉积特征符合水下火山喷发的特性,西瓜园组沉积时期的火山活动为水下喷发。水下火山活动相较于陆上具有单次量少,但频繁持久且位置多变的特征,非均质性较强^[39]。这也是泥页岩与凝灰质频繁互层的成因。

依据发育层位和主要岩性特征,将西瓜园组下段的细粒沉积岩分为3个层位(图5)。层位一位于下部两套火山角砾岩之间,细粒沉积岩总厚度约60 m,主

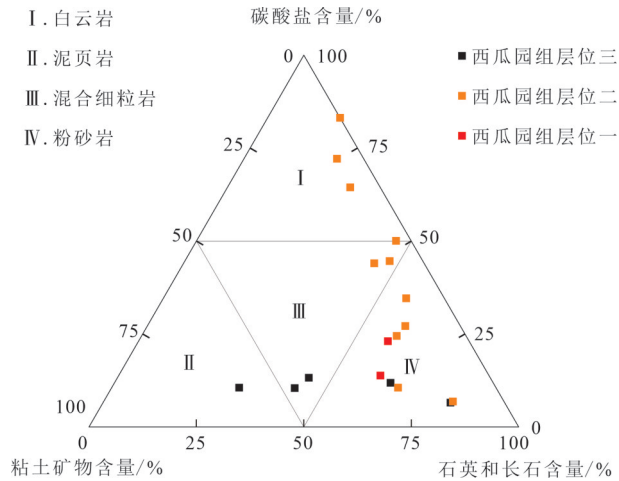


图3 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段岩石分类

Fig. 3 Petrographic classification in the lower member of Xiguayuan Formation in the Luanping Basin

要发育岩性为长英质混合细粒岩。岩心上岩性主要表现为灰白色细粒凝灰岩、黑色泥页岩和凝灰质泥页岩。结合岩心描述和镜下观察,凝灰质泥页岩表现为黑色纹层状泥岩与厘米级、毫米级纹层状凝灰岩呈互层或夹层,部分层段甚至是微米级的黑色泥岩与纹层状灰白色火山细粒物质互层。凝灰质成分夹层主要为长石和石英晶屑,成分成熟度低,磨圆度差,指示火山物质

来源。黑色泥岩富有机质。凝灰岩中矿物组成主要为晶屑,以长石和石英为主,形态为棱角状或次棱角状,部分矿物颗粒出现港湾状溶蚀边,含有少量玻屑和岩屑(图4e,f)。层位一整体表现出低自然电位(SP)和高电阻率(RILD/RILM)的测井响应特征。

层位二位于安山岩和火山角砾岩之上,细粒沉积岩厚度约165 m,主要发育白云岩、长英质混合细粒岩和白云质混合细粒岩等。岩心上主要表现为韵律型纹层状白云质泥页岩,即纹层状白云岩、纹层状黑色富有机质泥页岩与火山细粒物质纹层呈互层或夹层。镜下观察和全岩衍射结果显示矿物成分上主要为长英质和白云石,粘土矿物较少。白云质主要为泥晶白云石纹层或重结晶为亮晶的白云石纹层。层位二整体测井相应特征与层位一相似,表现为低自然电位和高电阻率。

层位三位于西瓜园组下段顶部,细粒沉积岩厚度约180 m,主要发育泥页岩和粘土型混合细粒岩。岩心上表现为泥页岩,夹有少量凝灰质层。矿物成分分析表明,层位三的粘土矿物含量较高,可达59.3%,碳酸盐矿物含量稳定在低水平,与下部层位岩石成分有明显区别。薄片观察显示,本层位细粒凝灰物质含量低,受火山作用影响相对减小,此时火山作用减弱。层位一和层位二陆源物质输入相对较少,主要为火山-

表2 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段细粒沉积岩矿物成分百分含量(%)

Table 2 Mineral compositions (%) of fine-grained sedimentary rocks in the lower member of Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

样品编号	井深/m	赤铁矿	硬石膏	方沸石	石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石	白云石	黄铁矿	斜发沸石	粘土矿物总量
5	729.65	0	0.9	0	16.4	3.7	22.1	7.2	0	3.2	0	0	46.5
6	773.30	0	0	0	37.4	8.4	18.4	9.5	0	2.4	0	0	23.9
14	811.30	0.8	0	0	14.8	6.7	7.9	8.5	0	2.0	0	0	59.3
19	837.20	0	0	0	19.1	9.3	52.4	0.4	0	6.2	0	0	12.6
20	847.10	0	0	0	18.7	7.4	18.3	8.5	0	4.7	0.3	0	42.1
24	881.32	0	0	0	2.1	3.3	11.4	0.2	0	83.0	0	0	0
27	921.15	0	0	0	11.8	6.4	28.2	0.1	0	50.0	0	0	3.5
31	956.80	0	0	0	18.4	11.5	50.7	3.1	0	3.7	0.8	0	11.8
32	975.90	0	0	0	33.4	2.5	22.4	5.5	18.6	0	1.7	0	15.9
34	982.45	0	0	0	16.9	6.3	23.5	8.5	35.3	0	1.9	0	7.6
35	985.30	0	0	0.1	14.2	6.8	22.6	9.2	34.1	0	1.6	0	11.4
36	992.85	0	0	0	8.8	6.4	39.4	1.6	31.9	0	3.3	0	8.6
37	999.70	0	0	0	9.2	5.2	12.5	1.8	59.1	0	5.6	0	6.6
39	1 013.15	0	0	0	17.9	4.0	36.1	3.7	22.6	0	3.3	0	12.4
40	1 016.65	0	0	0	24.4	15.8	23.8	5.2	0	5.0	3.9	0	21.9
41	1 022.68	0	0	0	4.2	4.3	12.8	0.1	71.0	0	1.5	0	6.1
43	1 032.92	0	0	0	14.1	15.3	26.9	11.5	10.9	0	2.9	0	18.4
44	1 041.50	0	0	0	25.5	10.2	21.3	7.9	0	5.1	4.8	1.5	23.7
67	1 249.25	0	0	0	29.2	35.8	8.6	8.3	0	1.6	5.2	0	11.3
68	1 254.63	0	0	0	24.1	6.6	13.2	29.4	0	2.9	4.1	0	19.7

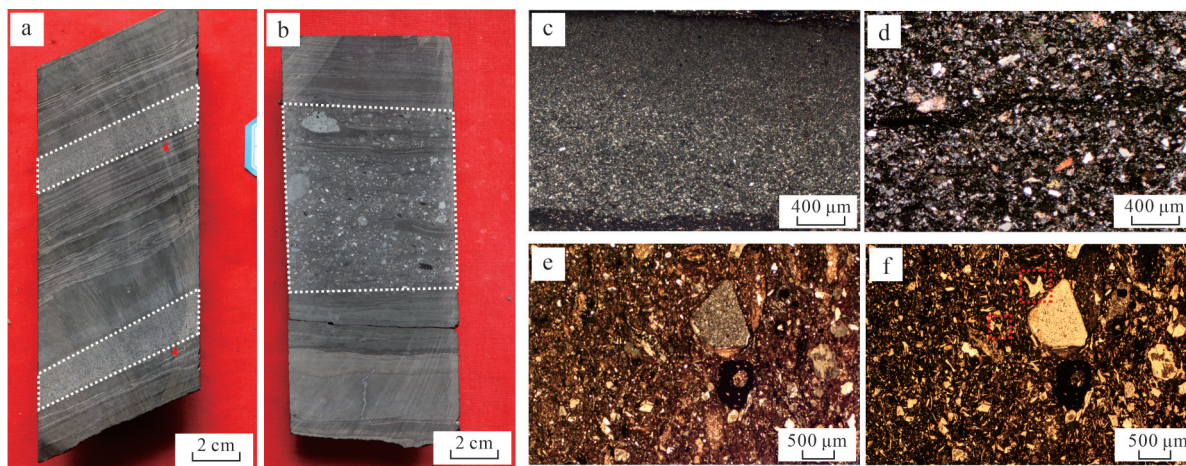


图4 滦平盆地滦页1井西瓜园组含凝灰质细粒沉积岩沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of fine-grained rocks from the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

a. 火山细粒物质夹层向上粒度变细,岩心,红色箭头处指示与底部泥岩层的冲刷面,埋深1 126.05 m; b. 凝灰物质混杂堆积,岩心,埋深1 045.96 m; c. 火山细粒物质薄层向上粒度变细,可见与底部泥岩层的冲刷面,单偏光,埋深911.36 m; d. 凝灰岩层间裂缝,正交光,埋深1 141.36 m; e. 凝灰岩,长石、石英晶屑棱角明显,可见鸡骨状碎屑,正交光,埋深1 181.15 m; f. 为e的单偏光,红色框为鸡骨状碎屑

内源湖泊沉积,粘土矿物含量低。层位三整体表现出自然电位相对较高和电阻率相对低的测井响应特征。滦平盆地西瓜园组受火山作用影响较大的地层测井响应特征表现为低自然电位和高电阻率,自然伽马因凝灰岩纹层与白云岩纹层和泥岩层交互而变化较大。

3.3 西瓜园组下段细粒沉积岩地球化学特征

3.3.1 有机质丰度

滦平盆地西瓜园组地层中各种细粒沉积岩的生烃潜力与岩石类型关系密切。层位一发育的主要为长英质混合细粒沉积岩和泥页岩,平均 TOC 为1.43%。上部夹凝灰岩纹层的层段表现出了良好的含油气性, TOC 最高可达3.00%(图5),属于好的烃源岩。层位二发育的韵律型纹层状白云质混合细粒沉积岩有机质丰度高,平均 TOC 为1.54%,最高达2.97%,属于好的烃源岩。表现为长英质凝灰和白云岩互层的细粒沉积岩层有机质丰度更高,而较纯的白云岩有机质含量较低(图5)。层位三主要发育粘土型混合细粒沉积岩,有机质丰度一般,平均 TOC 为0.63%,最大为1.47%,为差-中等的烃源岩。

对经过镜下鉴定岩性的50个细粒沉积岩样品对比分析,湖相泥岩的 TOC 在0.5%~1.81%,平均为0.64%; S_1+S_2 含量在0.01~0.95 mg/g,平均为0.41 mg/g。而含有细粒火山物质的细粒沉积岩 TOC 在0.84%~2.98%,平均为1.92%; S_1+S_2 含量在0.36~5.56 mg/g,平均为2.64 mg/g(表3)。

3.3.2 有机质成熟度

滦平盆地西瓜园组下段岩石样品的 T_{max} 数值范围为413~562℃,均值为456℃(图5),处于油气生成阶段。滦页1井下段岩石样品 R_o 数值分布在0.92%~1.32%,均值为1.1(表4),指示为烃源岩进入成熟阶段的生油期。结果显示西瓜园组下段样品的有机质成熟度随深度增大呈提高趋势(图6),受火山作用影响较大的层位一和层位二成熟度总体处于成熟阶段,而层位三处于低成熟阶段。

3.3.3 有机质来源

生物标志化合物常用来分析烃源岩的有机质母质来源、热演化程度和沉积环境。本研究通过对具有指示意义的甾类化合物和 H/C 、 O/C 的值进行分析,结合岩心和薄片发现的化石,探究滦平盆地西瓜园组下段含凝灰质细粒沉积岩的有机质母质来源。

C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷的相对分布可以反映有机质的沉积母质来源构成^[40]。 C_{27} 和 C_{28} 甾烷通常来自于低等水生生物和藻类的生源输入, C_{29} 甾烷可以来自于藻类和陆源高等植物。对西瓜园组下段发育有火山细粒物质的样品进行分析(图7), C_{27} 规则甾烷的相对含量为29.26%~55.60%,平均含量为41.11%; C_{28} 规则甾烷的相对含量为12.68%~30.8%,平均含量为25.33%; C_{29} 规则甾烷的相对含量为18.72%~45.55%,平均含量为33.56%。大多数样品的规则甾烷的分布型式为 $C_{27}>C_{29}>C_{28}$,个别样

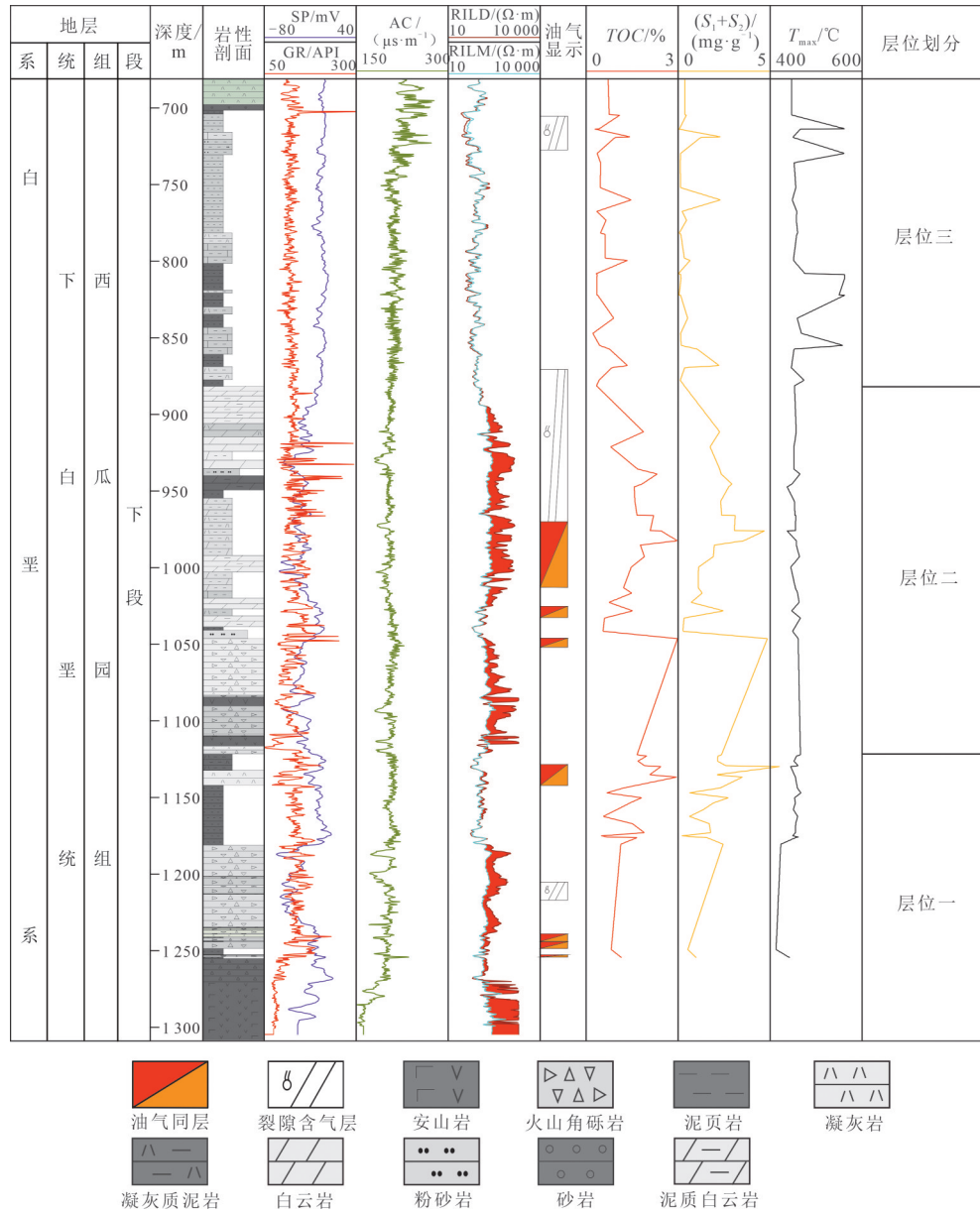


图5 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段综合特征

Fig. 5 Composite stratigraphic column of the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

品中规则甾烷 C_{28} 含量大于 C_{29} 或 C_{29} 含量大于 C_{27} (表5)。西瓜园组下段含凝灰质细粒沉积岩的规则甾烷分布显示滦平盆地西瓜园组含凝灰质细粒沉积岩的有机质主要来源于藻类和浮游植物等低等水生生物,同时存在少量的陆源高等植物输入。

有机岩石学分析结果显示,滦平盆地西瓜园组下段含有机质页岩的有机显微组分主要为壳质组的腐殖无定型,由水生生物经过生物降解形成的。同时烃源岩干酪根元素分析显示, H/C 在 $0.78 \sim 1.36$, O/C 不超过 0.10 , 根据 Tissot 等^[41] 运用干酪根有机元素研究有机质类型的标准,西瓜园组页岩油气烃源岩的原始成烃母质来源为藻类和低等水生生物。在岩心观察中发

现叶肢介化石和植物的茎叶碎屑(图8a,b),薄片可观察到富有机质泥岩纹层(图8c,d)。与有机地化分析结果一致,西瓜园组下段凝灰质细粒沉积岩的主要有机质来源为藻类和浮游植物等低等水生生物,同时存在少量的陆源高等植物输入。

4 细粒火山物质对页岩油气形成的作用机制

4.1 细粒火山物质促进微生物的繁育,提高古生产力

现代观测已经有大量实证,火山灰会促进微生物

表3 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段泥岩与含凝灰质细粒沉积岩有机质丰度

Table 3 Organic matter abundance of mudstone and fine-grained tuffaceous sedimentary rocks in the lower member of Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

样品编号	深度/m	TOC/%	(S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)	T _{max} /°C	样品编号	深度/m	TOC/%	(S ₁ +S ₂)/(mg·g ⁻¹)	T _{max} /°C
1	704.30	0.75	0.370 4	446.7	33	976.02	2.45	4.690 0	437.0
2	704.67	1.10	0.450 0	448.0	34	982.45	2.97	3.572 6	457.1
3	713.55	0.43	0.076 9	561.7	35	985.30	1.77	1.972 7	457.1
4	713.75	0.28	0.030 0	466.0	36	992.85	1.90	1.905 6	463.5
8	781.60	0.47	0.062 5	460.1	39	1 013.15	1.22	1.095 6	455.2
9	782.50	0.62	0.150 0	458.0	42	1 028.20	1.52	2.480 4	447.0
10	798.00	0.62	0.339 4	451.3	44	1 041.50	0.55	0.264 8	448.5
11	799.52	1.34	0.650 0	451.0	45	1 046.32	2.98	4.850 0	461.0
12	808.20	0.32	0.010 0	476.0	46	1 122.20	1.66	2.360 0	466.0
13	808.56	0.36	0.147 0	562.2	47	1 122.88	1.98	2.166 8	457.8
14	811.30	0.35	0.155 6	561.7	48	1 126.27	1.70	3.180 0	447.0
15	822.16	0.35	0.050 0	550.0	49	1 126.27	1.69	2.140 2	452.0
16	822.26	0.38	0.137 1	562.0	51	1 129.33	1.91	2.610 0	461.0
18	837.18	0.90	0.515 3	458.6	52	1 129.80	2.44	5.564 1	444.6
20	847.10	0.22	0.139 2	468.2	53	1 135.20	2.07	2.044 3	452.7
21	868.17	1.35	2.237 0	447.0	54	1 136.70	2.96	3.497 8	455.2
22	869.45	0.84	0.360 0	446.0	55	1 136.73	2.34	2.920 0	465.0
23	877.73	0.42	0.120 0	474.0	57	1 150.19	1.81	2.732 8	453.2
24	881.32	0.34	0.335 9	453.1	58	1 153.67	1.42	1.905 7	454.8
25	911.36	1.87	2.260 0	457.0	60	1 167.12	2.02	2.760 0	468.0
26	911.40	1.69	2.234 3	450.6	61	1 173.01	1.75	1.520 0	448.0
29	945.45	1.82	2.923 5	447.5	62	1 175.04	0.50	0.210 0	449.0
30	947.30	1.57	2.750 0	437.0	63	1 175.80	0.68	0.952 2	461.3
31	956.80	1.59	2.313 0	453.3	64	1 176.20	1.66	1.569 5	455.7
32	975.90	2.09	3.060 5	455.1	65	1 180.51	1.70	2.050 0	459.0

表4 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段R_o值

Table 4 R_o value of the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

样品编号	深度/m	R _o /%
2	704.67	0.93
6	773.30	0.92
19	837.20	1.09
34	982.45	0.97
36	992.85	1.04
40	1 016.65	1.08
42	1 028.20	1.11
45	1 046.32	1.11
46	1 122.20	1.26
56	1 147.00	1.32
60	1 167.12	1.18
63	1 175.80	1.05
68	1 254.63	1.21

的大量繁殖,甚至产生藻类勃发现象^[42-43]。研究表明火山细粒物质携带的营养元素如铁、磷和钼等,会促进

自养和异养生物的发育和大量繁殖^[44-45]。藻类勃发能在短时间内产生大量的有机质聚集,具有极高的生产力,形成的直接结果为富含藻类的沉积纹层^[46]。

西瓜园组下段样品的营养元素浓度较高,同层位指示来自火山-热液深源物质的Ni、V和Mo等微量元素浓度存在异常偏高^[32],表明滦平盆地西瓜园组细粒沉积岩沉积时期受到周期性火山运动,火山碎屑物质携带营养元素进入湖泊水体中。滦平盆地的水下火山活动,使得细粒火山物质及伴生火山热液活动携带N、P、Fe和Ca等生命所需的营养元素进入湖泊水体中,发生水解作用生成无机盐类等,转换为水生生物可以吸收的形态,从而促进滦平盆地水生生物的大量繁盛。

西瓜园组下段较厚的凝灰岩层较少,细粒火山物质多以纹层或泥页岩夹层形式存在,与黑色富有机质页岩、白云岩纹层组成交互纹层。水下火山有多次、持久和小规模喷发的特点,多次毫米级及以下的薄层火山灰沉降促使藻类勃发高频次出现,藻类勃发沉降形

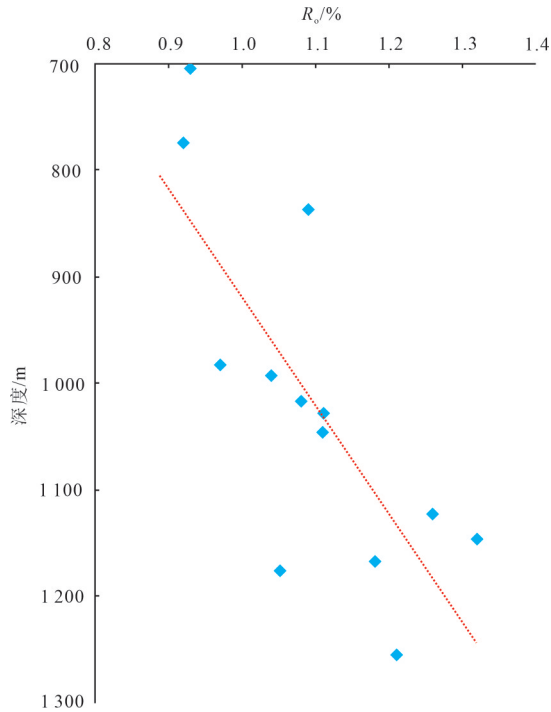


图6 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段 R_0 值随深度变化

Fig. 6 Variation of R_0 value with depth in the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

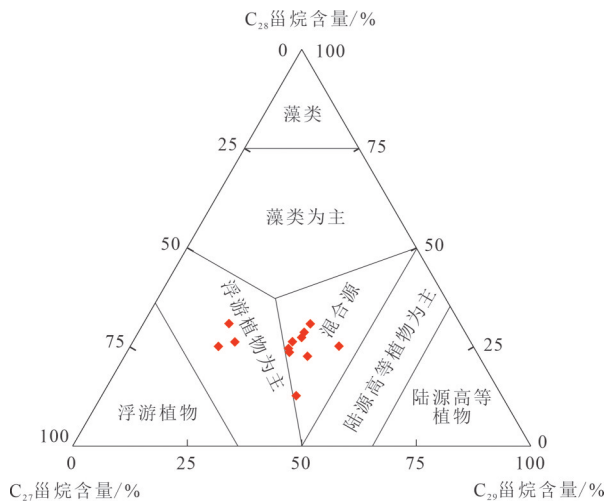


图7 滦平盆地滦页1井规则甾烷 C_{27} — C_{29} 分布三端元图

Fig. 7 Ternary plot of regular sterane C_{27} — C_{29} distribution in Well Luanye 1, Luanping Basin

成的富有机质纹层与凝灰质层互层,更有利于有机质富集与优质烃源岩的形成。

西瓜园组下段细粒沉积岩样品的有机质丰度数据表明,含有火山细粒物质参与沉积的层段有机质丰度指标更好,沉积有机质更富集(图5)。对典型的50块湖相泥页岩和含凝灰质细粒沉积岩样品进行分析,从有机质丰度来看,滦平盆地西瓜园组泥页岩的烃源岩评价为中等到差的生油岩,含凝灰质细粒沉积岩为好

表5 滦平盆地滦页1井规则甾烷 C_{27} — C_{29} 含量

Table 5 Regular sterane C_{27} — C_{29} content in Well Luanye 1, Luanping Basin

样品编号	深度/m	C_{27} 甾烷含量/%	C_{28} 甾烷含量/%	C_{29} 甾烷含量/%
6	773.30	34.19	30.62	35.19
19	837.20	48.72	29.38	21.90
27	921.15	29.26	25.19	45.55
34	982.45	55.60	25.09	19.31
36	992.85	37.40	22.61	39.99
40	1 016.65	40.83	23.64	35.53
42	1 028.20	36.33	27.36	36.31
44	1 041.50	35.09	28.65	36.25
47	1 122.88	38.87	26.29	34.84
50	1 128.40	51.44	26.21	22.35
52	1 129.80	44.84	12.68	42.48
54	1 136.70	32.71	30.80	36.49
59	1 157.88	40.58	24.55	34.87
68	1 254.63	50.41	30.86	18.72

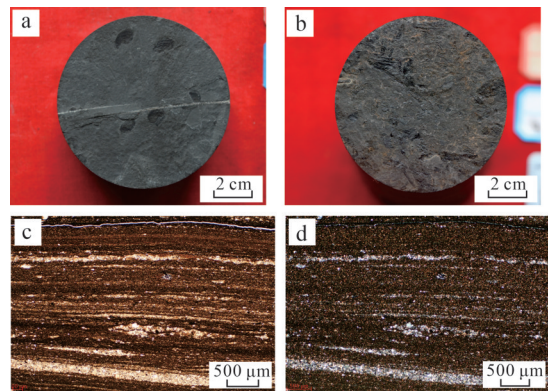


图8 滦平盆地滦页1井西瓜园组生物化石照片

Fig. 8 Biofossils from the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

a. 叶肢化石,埋深1 179.53 m,岩心; b. 植物碎屑,碳屑,埋深913.57 m,岩心; c. 富有机质泥岩纹层与白云岩纹层交互,正交光,埋深958.06 m; d. 为c的单偏光

的生油岩。可以得出,含凝灰质细粒沉积岩的有机质丰度明显大于湖相泥页岩(图9)。

4.2 形成还原的沉积环境,迅速掩埋沉积物,有利于有机质的保存

黄铁矿是一种指示还原性强度的特征矿物。在沉积环境氧化程度较强时,黄铁矿几乎不发育;在处于贫养环境时,草莓状黄铁矿发育,粒径变化大,并且有自形黄铁矿出现;在水体环境为缺氧环境时,黄铁矿发育含量较多,以草莓状黄铁矿为主,且粒径较大^[47-48]。

西瓜园组下段层位一、层位二的含凝灰质细粒沉

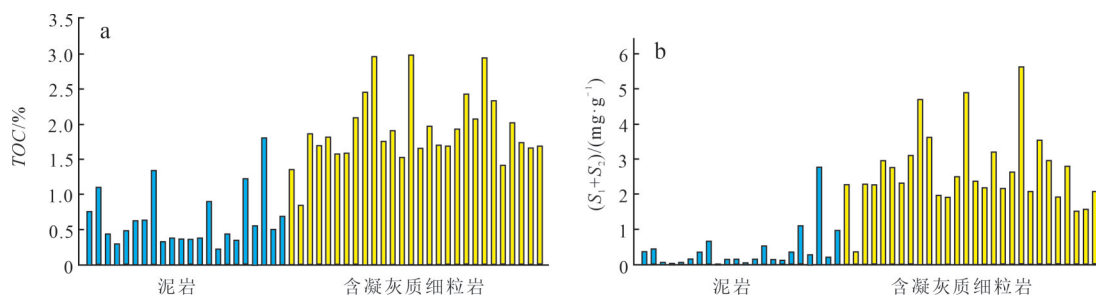


图9 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段泥岩与含凝灰质细粒沉积岩有机质丰度对比

Fig. 9 Comparison of organic matter abundance between mudstone and fine-grained tuffaceous rocks in the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

a. 泥岩与含凝灰质细粒岩 TOC 含量; b. 泥岩与含凝灰质细粒岩 S_1+S_2 含量

积岩为黑色或灰黑色,黄铁矿大量发育,主要成粒状,并以纹层状和脉状分布,部分层表现出强黄铁矿化特征(图10a—d)。扫描电镜下可观察到草莓状黄铁矿成层大量发育,形态以球形和椭球形为主。部分粒径大小在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,一般不超过 $20\ \mu\text{m}$,也存在粒径相对较大的黄铁矿。指示了湖泊贫氧-缺氧的沉积环境。

层位三主要发育灰色灰质泥岩、黑色泥岩,及夹含凝灰质细粒沉积岩层,部分层段出现指示弱氧化还原环境的灰绿色和肉红色泥岩(图10f)。层位三受火山作用影响较小,岩心和薄片观察指示黄铁矿发育相对较少,还原环境减弱。

薄片观察到,在富有机质泥岩与凝灰质、碳酸盐岩薄层互层时,泥岩层中黄铁矿呈现颗粒小但富集的特征,粒径大小一般不超过 $5\ \mu\text{m}$,部分达到 $5\sim 8\ \mu\text{m}$,随泥岩聚集成层状。而在含凝灰质碳酸盐岩薄层中黄铁

矿常呈颗粒较大,相对较少的特征,粒径可达 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,分散在薄层中。可能是富有机质泥岩沉积后被含凝灰质层迅速掩埋,隔绝了水体创造出更加缺氧的环境,促使粒径较小的草莓状黄铁矿大量发育。粒径较大的黄铁矿颗粒和粒径较小的草莓状黄铁矿均出现被有机质包裹的现象(图10b,c)。

$V/(V+Ni)$ 是无机元素分析中常用的氧化还原环境指标。西瓜园组下段的凝灰质岩中, $V/(V+Ni)$ 值在 $0.72\sim 0.78$,平均值为 74.88 。比值变化较小,指示了稳定的缺氧环境。有机地化分析中常用姥鲛烷(Pr)与植烷(Ph)的比值指示水体沉积环境,西瓜园组下段凝灰质岩Pr/Ph值在 $0.66\sim 2.29$,平均值为 1.12 (图11)。表明沉积时水体整体处于强还原-弱还原环境,其中层位一的凝灰质泥岩Pr/Ph值显著低于层位二的白云岩与火山灰互层,还原性更强,这可能与火山爆发强度更高有关。

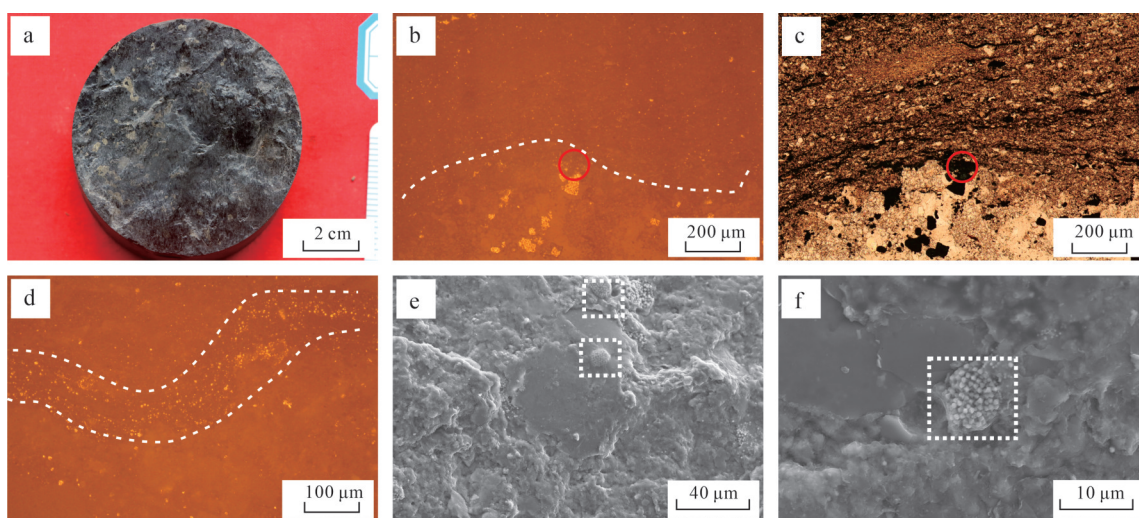


图10 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段黄铁矿发育特征

Fig. 10 Development characteristics of pyrite in the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

a. 黄铁矿与沥青质同层发育,埋深918.80 m,岩心; b. 黄色虚线为层分界面,上部泥岩中黄铁矿粒径小于 $5\ \mu\text{m}$,下部黄铁矿粒径较大,反射光,埋深1 001.06 m; c. b同视域单偏光,黄铁矿周围被有机质包裹; d. 泥岩纹层中的小颗粒黄铁矿,反射光,埋深1 241.40 m; e. 草莓状黄铁矿,球形,扫描电镜,埋深933.82 m; f. 微晶方解石周围发育 $5\ \mu\text{m}$ 大小的草莓状黄铁矿,扫描电镜,埋深792.60 m

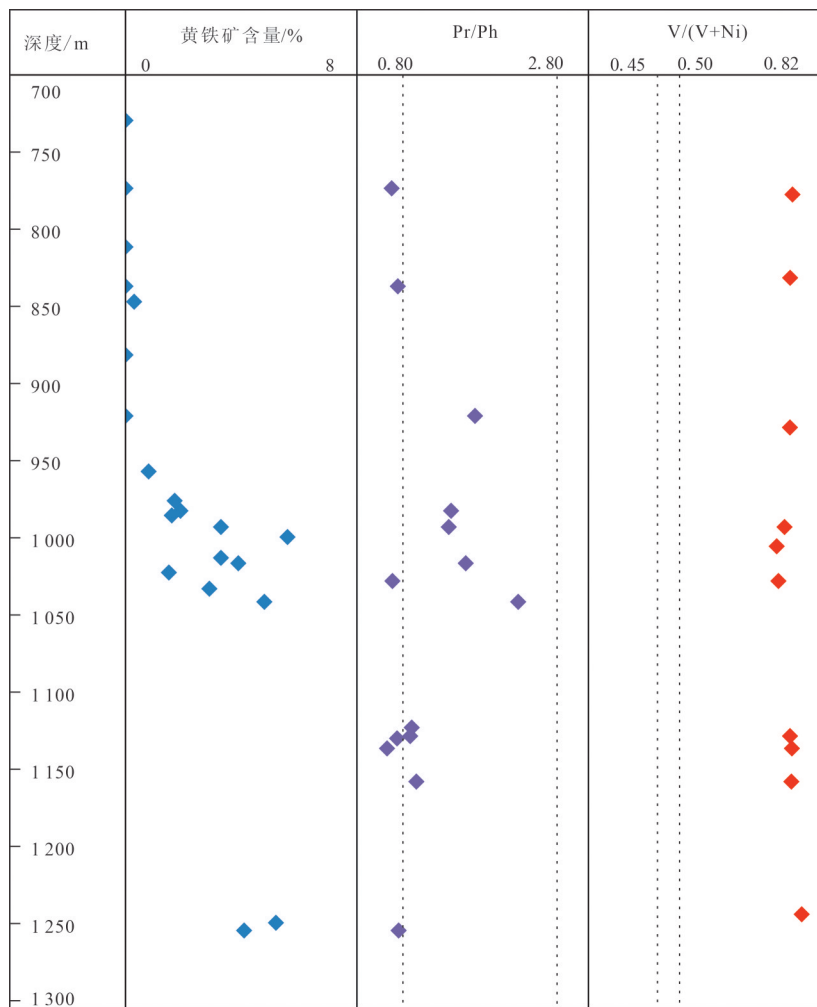


图11 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段氧化还原性指标随深度变化

Fig. 11 Redox index variation with depth in the lower member of the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

沉积环境的氧化-还原性是影响有机质保存的重要因素之一。有机质的分解主要来自于好养的细菌等微生物。深水区以缺氧环境为主,火山活动及伴生的热液活动,使水体的含盐度增加,促进水体分层。火山细粒物质促使密闭湖底环境细菌和藻类等微生物大量繁殖,在浮游植物和藻类大量消耗水体中的氧气后,湖泊水体,尤其是底部水体的还原性进一步增强^[49,13]。还原的环境下,有机质在埋藏之前被氧化、分解的损耗会减少^[40]。同时火山凝灰物质沉积使西瓜园组具有高水平沉积速率,能够快速掩埋有机质。湖相沉积环境变为缺氧环境,有机质保存在隔绝氧气的有利环境中。水体还原性的增强和有机质的快速掩埋为有机质的保存提供了良好条件^[50]。

4.3 提高地层储集物性,提供页岩层系内烃类运移通道

优质烃源岩中常见富有机质藻类纹层与碳酸盐纹

层互层,如束鹿凹陷沙三段的纹层状碳酸盐岩与泥岩互层^[51],渤海湾盆地济阳凹陷和东营凹陷的古近系沙河街组三段下亚段的油页岩,由黑色的富含有机质纹层和白色的钙质纹层组成^[52];三塘湖盆地芦草沟组云质泥岩也呈现出藻类与碳酸盐岩纹层状互层^[46]。

对滦页1井岩心观察和镜下薄片鉴定发现,西瓜园组下段层位二白云石和铁白云石等碳酸盐矿物发育较多,呈颗粒较小的自形-半自形形态。一般以泥晶白云质纹层形态出现,部分重结晶形成亮晶白云石纹层。白云石纹层常与黑色富有机质泥页岩纹层和长英质凝灰纹层交互,页理发育,共同组成了页岩油气的优质储层。滦页1井压裂试产的6号层位位于西瓜园组下段层位二,主要沉积特征为凝灰岩纹层、白云岩纹层与富有机质黑色泥页岩纹层交互,有较好的油气显示,火山灰与白云石混合同层(图12a—d)。

这些黑色富有机质泥页岩和白云质纹层互层成因与火山活动的影响有关。西瓜园组下段混合细粒岩颗

粒主要为粘土-粉砂级,成熟度低,晶屑含量较高,粘土含量很低。火山水下喷发后细粒物质以浊流的形式被湖水搬运并逐渐沉积,与内源沉积的碳酸盐岩混合,纹层状交互沉积。湖相泥页岩中富含藻类勃发后沉降的大量有机质。

火山活动输入到盆内的离子物质会在盆内微生物活动的参与下结晶生成内源自生碳酸盐岩物质,内源物质的生成是陆相断陷湖盆充填有碳酸盐物质的稳定机制^[27-29]。藻类等微生物的勃发死亡沉降后形成富有机质纹层,与火山喷发活动带来的凝灰岩纹层和碳酸盐岩纹层共同形成了交互纹层。水下火山喷发频繁和持久的特点,使得层位二长时间保持这种纹层频繁交互的特征。

对西瓜园组下段矿物成分和烃源岩有机质丰度分析时发现,在碳酸盐岩与页岩韵律型纹层状交互时,细粒沉积岩烃源岩特质最好的是碳酸盐矿物和长英质矿物含量比例相近、硅酸盐矿物和碳酸盐矿物混合程度高的岩层。这与焦鑫等在三塘湖盆地芦草沟组中混合细粒岩中的观察结果一致^[53],也符合大庆油田火石岭组三单元中碳酸盐矿物含量约占1/3的层段含油性最好^[54]。

这种韵律型纹层状白云质细粒沉积岩存在大量岩性界面,有利于形成层间裂缝。裂缝可以作为页岩油气的运移通道,也是油气的良好储集空间。部分层面裂缝残留有沥青质,可能曾作为油气运移的通道。碳酸盐岩纹层的大量发育和凝灰岩纹层的沉积,本身也可以作为良好的储层,油气储集在白云石的晶间孔和凝灰质粒间孔中(图12e,f),储集层与烃源岩空间上临近,生烃母质排出的烃类可就近富集在内源的碳酸盐岩,源-储一体^[27]。此外还提高了地层的脆性,为页岩油气开发时的压裂改造提供良好的条件。

4.4 细粒火山物质中的过渡金属元素能够催化有机质成烃演化

过渡金属元素(如Fe, Ti, V, Cr, Co, Ni, Mn和Mo等)的单质、氧化物、硫化物和其他有机化合物都具有显著的催化效果。过渡金属元素的单质、氧化物、硫化物和其他有机化合物都具有显著的催化效果^[55]。

西瓜园组的微量元素分析显示,下段受火山和伴生热液等深源物质影响,过渡金属元素含量较高,且相比上部正常湖相沉积的泥岩明显增多(图13)。研究层段Ni的含量在23.96~42.14 $\mu\text{g/g}$,平均为29.07 $\mu\text{g/g}$ (表6),而Ni元素的催化效果最强,烃源岩中具有1 $\mu\text{g/g}$ 的Ni就具有很强的催化能力,高的Ni元素含量已经具

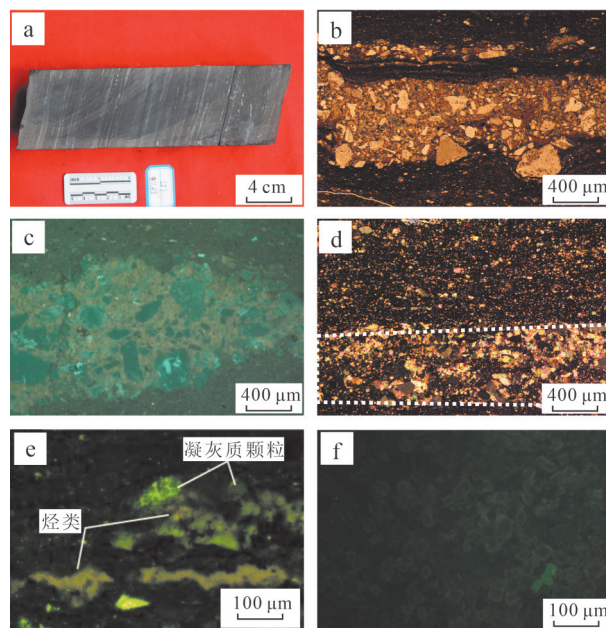


图12 滦平盆地滦页1井西瓜园组下段富有机质页岩纹层与碳酸盐岩纹层交互特征

Fig. 12 Interbedding characteristics of organic-rich shale lamina and carbonate lamina in the lower member of the

Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

a. 富有机质纹层与碳酸盐岩纹层交互岩心照片,埋深911.65 m; b. 富有机质纹层与碳酸盐岩纹层交互镜下照片,正交光,埋深911.36 m; c. 富有机质纹层与碳酸盐岩纹层交互镜下照片,白云石呈亮黄色,荧光,埋深911.36 m; d. 富有机质纹层与碳酸盐岩纹层交互镜下照片,基质为泥质和微亮晶方解石,下部为亮晶白云石颗粒与火山颗粒混杂,正交光,埋深992.85 m; e. 烃类充填在凝灰质颗粒间孔中,荧光,埋深992.20 m,来源于参考文献[27]; f. 烃类充填在白云石晶间孔中,荧光,埋深958.06 m

备促进源岩生烃的能力;其他过渡金属元素含量同样处于较高水平,V的含量在63.78~128.24 $\mu\text{g/g}$,平均为87.67 $\mu\text{g/g}$;Mo的含量变化较大,最大为12.08 $\mu\text{g/g}$;Cr的含量在35.39~190.41 $\mu\text{g/g}$,平均为74.09 $\mu\text{g/g}$ 。各种过渡金属元素通过吸附有机质和气体,改变源岩中的干酪根裂解加氢的反应机理,缩短反应时间,达到了催化的效果。

陆相页岩油气地层成熟度普遍偏低^[45],滦平盆地西瓜园组也具有同样的特点,下段的细粒沉积岩平均 R_o 为1.05%,处于成熟阶段。过渡金属元素对有机质演化的催化作用使得烃源岩提前排烃,促进页岩油气生成^[27]。

5 结论

1) 滦平盆地西瓜园组细粒沉积岩主要为泥页岩、

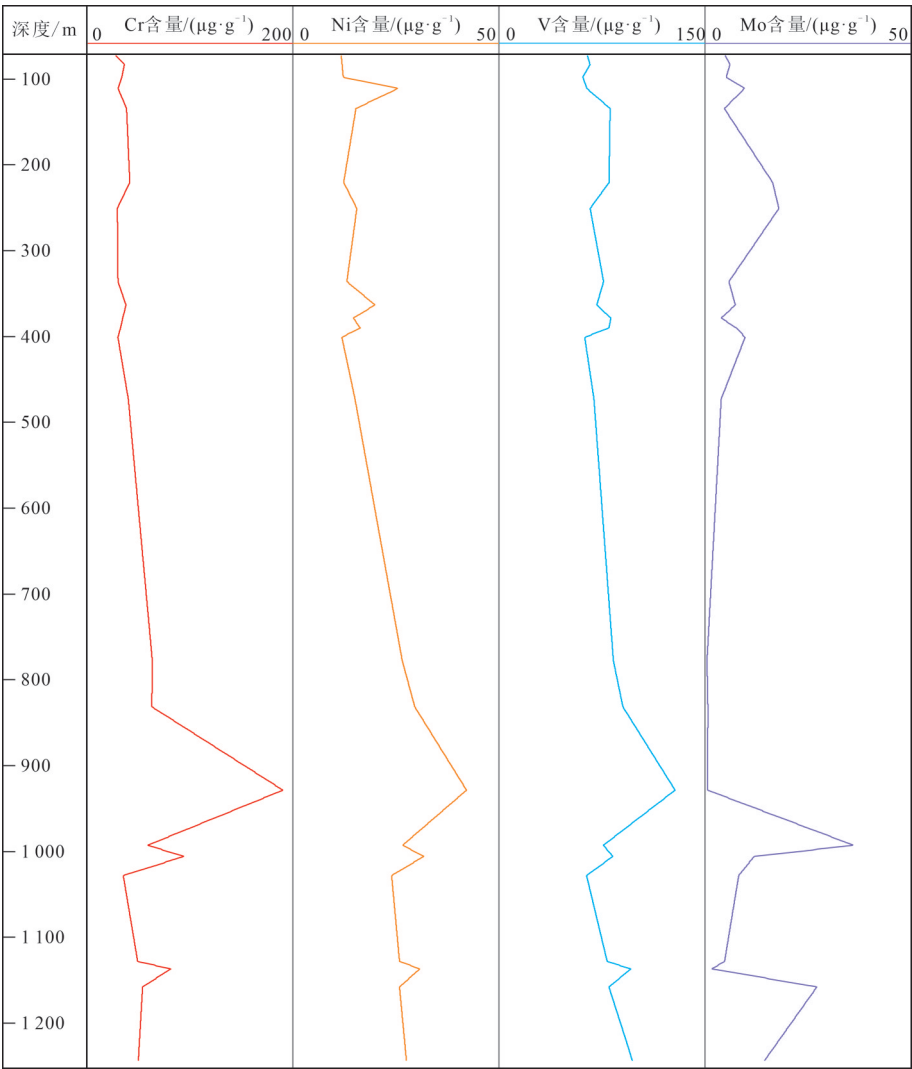


图 13 滦平盆地滦页 1 井西瓜园组过渡金属元素含量

Fig. 13 Contents of transitional metal elements changing with depth in the Xiguayuan Formation in Well Luanye 1, Luanping Basin

表 6 滦平盆地滦页 1 井西瓜园组下段微量元素含量

样品编号		微量元素含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				V/(V+Ni)
		Cr	Ni	V	Mo	
7	777.50	63.58	26.53	83.30	0.49	0.76
17	831.40	63.12	29.57	90.22	0.70	0.75
28	928.60	190.41	42.14	128.24	0.65	0.75
36	992.85	58.89	26.61	75.96	36.10	0.74
38	1 005.70	94.45	31.79	82.97	11.95	0.72
42	1 028.20	35.39	23.96	63.78	8.18	0.73
50	1 128.40	49.37	25.88	78.83	4.74	0.75
54	1 136.70	81.59	30.82	96.07	1.60	0.76
59	1 157.88	54.13	25.87	80.13	27.15	0.76
66	1 243.90	49.99	27.56	97.20	14.42	0.78

凝灰质泥岩和白云质泥岩,夹有凝灰岩和白云岩薄层。页岩油气甜点层位是有火山细粒物质沉积的层段,受到水下火山活动的影响。这些层位的岩样有机质更加

富集,TOC 多大于 1.5 %,为好的烃源岩。

2) 西瓜园组下段沉积过程中,细粒火山物质参与带来了营养物质,促使藻类和游植物等低等水生生物

大量繁育,提供了基础有机质来源,增加古生产力;湖泊水体的沉积环境向还原性变强的方向发展,同时快速掩埋有机质,为有机质的埋藏和保存提供有利条件;所携带的过渡金属元素对有机质向烃类的演化具有催化作用,加速烃源岩排烃,促进陆相页岩油气形成;通过大量的生物化学反应,沉积白云岩纹层,并与富有机质的页岩、凝灰岩纹层形成交互。纹层状凝灰岩和白云岩可以作为页岩油气良好储层,且提高了地层的脆性,便于工业开采时的压裂改造。

3) 受火山作用影响的黑色泥页岩地层有较大的勘探潜力,其中含油气性最好的层段为碳酸盐岩纹层与富有机质页岩交互层位,燕山构造带中与滦平盆地相似的沉积盆地可寻找韵律型白云质和灰质泥页岩作为油气勘探目标。

参 考 文 献

- [1] White J D L, Hughton B F. Primary volcanoclastic rocks [J]. *Geology*, 2006, 34(8): 677–680.
- [2] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 198–209.
Zhang Shaomin, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Science Frontiers*, 2018, 25(4): 198–209.
- [3] 周中毅, 盛国英, 闵育顺, 等. 凝灰质岩生油岩的有机地球化学初步研究[J]. *沉积学报*, 1989, 7(3): 3–9.
Zhou Zhongyi, Sheng Guoying, Min Yushun, et al. A primary study of tuffaceous source rock by organic geochemistry [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(3): 3–9.
- [4] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 184–196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 184–196.
- [5] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 322–331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 322–331.
- [6] 梁新平, 金之钧, 刘全有, 等. 火山灰对富有机质页岩形成的影响——以西西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 201–211.
Liang Xinping, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale: A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 201–211.
- [7] Iyer K, Schmid D W, Planke S, et al. Modelling hydrothermal venting in volcanic sedimentary basins: Impact on hydrocarbon maturation and paleoclimate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 467: 30–42.
- [8] 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 Ha, 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.
- [9] He C, Ji L M, Wu Y D. Characteristics of hydrothermal sedimentation process in the Yanchang Formation, south Ordos Basin, China: Evidence from element geochemistry [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 345: 33–41.
- [10] 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等. 松科1井南孔白垩系青山口组一段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. *地学前缘*, 2009, 16(2): 314–323.
Gao Youfeng, Wang Pujun, Cheng Rihui, et al. Description of cretaceous sedimentary sequence of the first member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-1's borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 314–323.
- [11] 商斐, 周海燕, 刘勇, 等. 松辽盆地嫩江组泥页岩有机质富集模式探讨——以嫩江组一、二段油页岩为例[J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 236–248.
Shang Fei, Zhou Haiyan, Liu Yong, et al. A discussion on the organic matter enrichment model of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: A case study of oil shale in the 1st and 2nd members of the Nenjiang Formation [J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 236–248.
- [12] 冯子辉, 柳波, 邵红梅, 等. 松辽盆地古龙地区青山口组泥页岩成岩演化与储集性能[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 72–85.
Feng Zihui, Liu Bo, Shao Hongmei, et al. The diagenesis evolution and accumulating performance of the mud shale in Qingshankou Formation in Gulong area, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 72–85.
- [13] 柳蓉, 张坤, 刘招君, 等. 中国油页岩富集与地质事件研究[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 10–28.
Liu Rong, Zhang Kun, Liu Zhaojun, et al. Oil shale mineralization and geological events in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 10–28.
- [14] 刘招君, 柳蓉, 孙平昌, 等. 中国典型盆地油页岩特征及赋存规律[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 313–325.
Liu Zhaojun, Liu Rong, Sun Pingchang, et al. Oil shale characteristics and distribution in typical basins of China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 313–325.
- [15] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1077–1087.
Wang Shurong, Song Daofu, He Dengfa. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and the evolutionary pattern of tuffaceous source rocks [J].

- Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1077-1087.
- [16] 徐雄飞, 于祥春, 卿忠, 等. 三塘湖盆地芦草沟组岩相特征及其与页岩油藏的关系[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(6): 677-684.
- Xu Xiongfei, Yu Xiangchun, Qing Zhong, et al. Lithofacies characteristics and its relationship with shale oil reservoirs of Lucaogou Formation in Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(6): 677-684.
- [17] 柳益群, 周鼎武, 焦鑫, 等. 深源物质参与湖相烃源岩生烃作用的初步研究——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系黑色岩系为例[J]. 古地理学报, 2019, 21(6): 983-998.
- Liu Yiqun, Zhou Dingwu, Jiao Xin, et al. A preliminary study on the relationship between deep-sourced materials and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks: An example from the permian black rock series in Jimusar Sag, Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(6): 983-998.
- [18] 焦鑫, 柳益群, 周鼎武, 等. 湖相烃源岩中的火山-热液深源物质与油气生成耦合关系研究进展[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 789-809.
- Jiao Xin, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Progress on coupling relationship between volcanic and hydrothermal-originated sediments and hydrocarbon generation in lacustrine source rocks [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(4): 789-809.
- [19] 曹宇森. 辽河油田大洼地区中生界基性火山岩油气成藏特征[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3): 29-32.
- Cao Yusen. Hydrocarbon accumulation characteristics of Mesozoic basic volcanic rocks in Dawa area of Liaohe oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(3): 29-32.
- [20] 宁超众, 李勇, 邓晓娟, 等. 哈拉哈塘地区热液岩溶形成演化与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 399-409.
- Ning Chaozhong, Li Yong, Deng Xiaojuan, et al. Formation and evolution of hydrothermal karst and hydrocarbon distribution in Halahatang area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4): 399-409.
- [21] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(3): 499-520.
- Liu Quanyou, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(3): 499-520.
- [22] Li J T, Cui J M, Yang Q H, et al. Oxidative weathering and microbial diversity of an inactive seafloor hydrothermal sulfide chimney [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1378.
- [23] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 698-704.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 698-704.
- [24] Zhong L R, Cantrell K, Mitroshkov J, et al. Mobilization and transport of organic compounds from reservoir rock and caprock in geological carbon sequestration sites [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(9): 4261-4272.
- [25] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614-622.
- Chen Daizhao. Structure - controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 614-622.
- [26] Carl J, Hamdy E D, Dave H, et al. Dolomitization of the Latemar Platform: Fluid flow and dolomite evolution [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 55: 43-67.
- [27] 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芄, 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.
- [28] 丁聪, 孙平昌, 热西提·亚力坤, 等. 松辽盆地青山口乡青山口组细粒沉积岩分类及其成因[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 418-427.
- Ding Cong, Sun Pingchang, Rexiti·yalikun, et al. Classification and genesis of fine-grained sedimentary rocks of Qingshankou Formation in Songliao Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4): 418-427.
- [29] 孔祥鑫. 湖相含碳酸盐细粒沉积岩特征、成因与油气聚集[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Kong Xiangxin. Sedimentary characteristics, origin and hydrocarbon accumulation of lacustrine carbonate-bearing finegrained sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [30] Fang Y, Xu H. Study of an ordovician carbonate with alternating dolomite-calcite laminations and its implication for catalytic effects of microbes on the formation of sedimentary dolomite [J]. Journal of Sedimentary Research, 2018, 88(6): 679-695.
- [31] 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.
- [32] 潘树彪. 滦平盆地地下白垩统黑色泥页岩地球化学特征与油气潜力[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Pan Shubiao. Geochemical characteristics and oil-gas potential of the Lower Cretaceous black mudrocks in Luanping Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [33] 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 Yan, 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.
- [34] 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(D辑: 地球科学), 2004(S1): 19-31.
- Liu Shaofeng, Li Zhong, Zhang Jinfang, et al. Mesozoic basin evolution and tectonic mechanism in Yanshan, China [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004(S1): 19-31.
- [35] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
- Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedi-

- mentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [36] 张文伟. 细粒沉积岩储层微观特征研究方法及应用[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(4): 11-15.
- Zhang Wenwei. Microcosmic characteristics of fine-grained sedimentary reservoirs and its application[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(4): 11-15.
- [37] 聂银兰, 谢庆宾, 朱筱敏, 等. 基于岩相表征的细粒沉积物沉积机制和研究展望[J]. *断块油气田*, 2021, 28(3): 305-310.
- Nie Yinlan, Xie Qingbin, Zhu Xiaomin, et al. The sedimentary mechanism and research prospect of fine grain sediments based on lithofacies characterization[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(3): 305-310.
- [38] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(1): 6-15.
- Zhou Lihong, Pu Xiugang, Deng Yuan, et al. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(1): 6-15.
- [39] 焦鑫, 柳益群, 杨晚, 等. 水下火山喷发沉积特征研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(9): 926-936.
- Jiao Xin, Liu Yiqun, Yang Wan, et al. Progress on sedimentation of subaqueous volcanic eruption[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(9): 926-936.
- [40] 侯读杰, 冯子辉. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- Hou Dujie, Feng Zihui. *Petroleum geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [41] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum formation and occurrence* [M]. Heidelberg: Springer-verlag, 1978.
- [42] Lin I I, Hu C M, Li Y H, et al. Fertilization potential of volcanic dust in the low-nutrient low-chlorophyll western North Pacific subtropical gyre: Satellite evidence and laboratory study[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): 1-12.
- [43] Langmann B, Zaksek K, Hort M, et al. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 3891-3899.
- [44] Zhang R, Jiang T, Tian Y, et al. Volcanic ash stimulates growth of marine autotrophic and heterotrophic microorganisms[J]. *Geology*, 2017, 45: 479-682.
- [45] 李长志, 郭佩, 柯先启, 等. 火山活动影响下的碱湖优质烃源岩成因及其对页岩油气勘探和开发的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1423-1434.
- Li Changzhi, Guo Pei, Ke Xianqi, et al. Genesis of high-quality source rocks in volcano-related alkaline lakes and implications for the exploration and development of shale oil and gas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1423-1434.
- [46] 李登华, 李建忠, 黄金亮, 等. 火山灰对页岩油气成藏的重要作用及其启示[J]. *天然气工业*, 2014, 34(5): 56-65.
- Li Denghua, Li Jianzhong, Huang Jinliang, et al. An important role of volcanic ash in the formation of shale plays and its inspiration[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(5): 56-65.
- [47] 常晓琳, 黄元耕, 陈中强, 等. 沉积地层中草莓状黄铁矿分析方法及其在古海洋学上的应用[J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 150-165.
- Chang Xiaolin, Huang Yuangeng, Chen Zhongqiang, et al. The microscopic analysis of pyrite framboids and application in paleo-oceanography[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 150-165.
- [48] David P G, Bond P B, Wignall M M. An abrupt extinction in the Middle Permian (Capitanian) of the Boreal Realm (Spitsbergen) and its link to anoxia and acidification[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(9-10): 1411-1421.
- [49] 邱振, 卢斌, 陈振宏, 等. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组-龙马溪组含气页岩为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1296-1308.
- Qiu Zhen, Lu Bin, Chen Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1296-1308.
- [50] 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 931-948.
- Qiu Zhen, Wei Hengye, Liu Hanlin, et al. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of indicative elements[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 931-948.
- [51] 孔祥鑫, 姜在兴, 韩超, 等. 束鹿凹陷沙三段下亚段细粒碳酸盐纹层特征与储集意义[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4): 19-26.
- Kong Xiangxin, Jiang Zaixing, Han Chao, et al. Laminations characteristics and reservoir significance of fine-grained carbonate in the lower 3rd member of Shahejie Formation of Shulu Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 19-26.
- [52] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 59-69.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie formation of paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *Journal of palaeogeography*, 2005, 7(1): 59-69.
- [53] Jiao X, Liu Y Q, Wan Y, et al. Fine-grained volcanic-hydrothermal sedimentary rocks in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin, NW China: Implications on hydrocarbon source rocks and accumulation in lacustrine rift basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104201.
- [54] 石万忠, 孟福林, 王晓龙, 等. 松辽盆地南部孤店断陷火石岭组烃源岩评价及预测[J]. *石油学报*, 2018, 39(12): 1344-1354, 1388.
- Shi Wanzhong, Meng Fulin, Wang Xiaolong, et al. The evaluation and prediction of source rocks in Huoshiling Formation of Gudian fault depression, south of Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(12): 1344-1354, 1388.
- [55] 翟庆龙. 火山热液活动对烃源岩生排烃的作用——以东营凹陷西部沙三段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(3): 19-21, 3.
- Zhai Qinglong. Effect of volcanic hydrothermal fluid activities on hydrocarbon generation and expulsion from source rocks-taking Es³ of the western Dongying Sag as example[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(3): 19-21, 3.