

引用本文:夏祥,马晓东,胡文瑄,等.苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩岩石学特征及其储集性与含油性研究[J].石油实验地质,2024,46(1):87-97.DOI:10.11781/sydz202401087.

XIA Xiang, MA Xiaodong, HU Wenxuan, et al. Petrological characteristics, reservoir property and oil-bearing potential of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 87-97. DOI: 10.11781/sydz202401087.

苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩 岩石学特征及其储集性与含油性研究

夏祥¹, 马晓东², 胡文瑄¹, 臧素华²

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210008;

2. 中国石化 华东油气分公司, 南京 210019

摘要:火成岩油气藏逐渐成为重要的油气藏类型,但火成岩储层非均质性很强,储集性能变化很大,储层成因机制研究非常薄弱,成为制约火成岩储层评价的主要瓶颈。以苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段侵入岩为研究对象,通过系统的岩心观察、薄片鉴定、电子探针分析测试和测井解释等,剖析了溱潼凹陷沙埭 1 井阜宁组二段侵入岩岩性、岩相特征、储层特征和储层发育主控因素。结果表明:该区侵入岩的岩性纵向变化显著,由多期侵入岩叠加组成,顶部为辉绿岩,中部为辉石二长岩,下部为橄榄辉长岩;孔隙发育程度不均一,辉绿岩和辉石二长岩孔隙发育程度低,而橄榄辉长岩孔隙发育程度较高;由于多期侵入作用的叠加以及热液蚀变的改造,发育了较好的储集空间。孔隙类型主要为溶蚀孔和构造裂缝,还发育收缩裂缝。影响储层物性的主要因素是岩性和热液流体活动,其中橄榄辉长岩中辉石等暗色矿物最易蚀变,溶蚀孔发育程度高;此外,区域性的断裂构造在许多致密的火成岩中产生了大量的构造裂缝,有效沟通了侵入岩储层的孔隙系统,且为后期的溶蚀作用提供了岩浆热液流动的通道。沙埭 1 井钻遇的侵入岩总体上含油性差,下部侵入岩层中可见零星荧光显示,上部侵入岩层中基本不含油。

关键词:侵入岩储层特征;含油性;阜宁组二段;溱潼凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

DOI:10.11781/sydz202401087

Petrological characteristics, reservoir property and oil-bearing potential of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

XIA Xiang¹, MA Xiaodong², HU Wenxuan¹, ZANG Suhua²

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

2. SINOPEC East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China

Abstract: Igneous rock oil and gas reservoir has gradually become an important type of oil and gas reservoir, but the igneous rock reservoir is highly heterogeneous, the reservoir property varies greatly, and the study of reservoir genetic mechanism is unsubstantial, which has become the main bottleneck of igneous rock reservoir evaluation. Taking the intrusive rocks in the second member of Paleogene Funing Formation in the Qintong Sag, Subei Basin as the research object, through systematic core observation, thin section identification, electron probe analysis and testing and logging interpretation, the lithologic and lithofacies characteristics, reservoir characteristics and main controlling factors of reservoir development of the intrusive rocks in the second member of Funing Formation in well Shaduo 1 in the Qintong Sag were analyzed. The results show that the lithology of the intrusive rocks varies remarkably longitudinally, and the intrusive rock body is composed of multiphase intrusive rock, with diabase on the top, pyroxene monzonite in the middle and olivine gabbro at the bottom. The development of porosity varies, with diabase and pyroxene monzonite exhibiting low porosity, while olivine gabbro showing relatively higher porosity. Due to the superimposition of multiple intrusions and hydrothermal alteration, good reservoir spaces are formed, with predominant pore types being dissolution pores and structural fractures, accompanied

收稿日期 (Received): 2023-04-07; 修订日期 (Revised): 2023-12-06; 出版日期 (Published): 2024-01-28.

作者简介: 夏祥 (1997—), 男, 硕士生, 从事石油地质研究。E-mail: xiexiang@smail.nju.edu.cn.

基金项目: 中国石化华东油气分公司横向项目“溱潼凹陷辉绿岩形成期次与储集性研究”(34600000-21-ZC0699-0003)资助。

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

by the development of shrinkage fractures. The main factors affecting the reservoir physical properties are lithology and hydrothermal fluid activity. Among them, dark minerals such as pyroxene in olivine gabbro are most easily altered, so dissolution pores are highly developed. Additionally, regional fault structures generate numerous structural fractures in many dense igneous rocks, effectively connecting the pore-fracture system of intrusive rock reservoir and providing channels through which magmatic hydrothermal fluids flow in the subsequent dissolution processes. Generally, the overall oil-bearing potential of the intrusive rocks encountered in well Shaduo 1 is poor. Sporadic fluorescence is observed in the lower intrusive rock layers, while the upper intrusive rock layers are essentially devoid of oil.

Key words: intrusive rock reservoir; oil-bearing potential; second member of Funing Formation; Qintong Sag; Subei Basin

中国东部油气形成过程中大多伴随着火山—岩浆作用的发生,火成岩是沉积盆地充填系列的重要组成部分^[1-4]。传统观点认为,岩浆侵入作用会使储层储集条件变差。但随着油气勘探实践的进行,发现火成岩也是一种重要的油气储层类型。近年来,在渤海湾盆地^[5]、辽河盆地^[6-10]、塔里木盆地^[11-12]和准噶尔盆地^[13-18]等火山岩层系中取得了重大突破,发现了一些大型油气藏。火山岩层系已经成为重要的油气勘探目标,越来越受到人们的重视^[19-22]。

从目前的研究现状来看,侵入岩成为油气储层的成因非常复杂,有些为隐爆角砾岩成因^[23],有些为热液流体溶蚀—蚀变成因^[24-25],不同地区、不同岩体差异很大。近年来苏北盆地也发现了一些火成岩油气藏(或油气显示),显示了较好的勘探潜力。初步调查发现^[26-27],侵入岩储集性变化很大,储层非均质性很强,但其控制因素研究薄弱,存在很大争议,亟待开展深入研究,查明侵入岩储集空间发育特征,揭示其成因机制,为油气勘探提供理论依据。

溱潼凹陷作为苏北盆地重要产油凹陷之一,侵入岩也非常发育,有些侵入岩显示了良好含油性。因此,本文主要以溱潼凹陷阜二段沙垛 1 井侵入岩为例,开展系统的岩石学和储层地质学研究,以期查明影响侵入岩储集性的岩石学背景和储集空间形成的主要机制,为该區侵入岩油藏勘探提供指导。

1 地质概况

苏北盆地是太平洋板块俯冲及郯庐断裂平移等活动共同作用的结果,是在前陆盆地的基础上发育的白垩纪—新生代裂陷伸展盆地^[28-30],经历了三期构造运动,分别为泰州组沉积前的仪征运动、阜宁组沉积后的吴堡运动和三垛组沉积后的三垛运动^[31]。苏北盆地内部被建湖隆起一分为二,南部为东台拗陷,北部与滨海凸起、鲁苏隆起夹持形

成盐阜拗陷,两拗陷中各凹陷均呈现右行雁式排列^[32],主要有高邮、金湖、溱潼、海安、盐城等凹陷^[30]。盆地基底由三大套层系组成,即中元古界变质岩结晶基底、(下)扬子地台海相中—古生界基底和中上三叠统一白垩统活动陆缘型海陆过渡相及陆相碎屑岩类与中酸性火山岩基底^[33],古近系以断陷沉积为主,新近系为拗陷沉积。

研究区溱潼凹陷位于东台拗陷中东部,为东台拗陷中的一个亚一级构造单元。该凹陷是呈北东向展布的不对称半地堑沉积凹陷,东南侧、东北侧分别以泰州凸起、梁垛低凸起为界,西侧与吴堡低凸起相分隔(图 1)。自下而上发育的新生界包括^[34]:泰州组(E_1t)、阜宁组(E_1f)、戴南组(E_2d)、三垛组(E_2s)、盐城组(N_1y)和东台组(Q_2d)。

2 侵入岩岩石学特征

溱潼凹陷阜宁组中发育多层基性侵入岩层,产状呈岩脉和岩床状,沿地层顺层侵入阜二、阜三段或者穿层侵入于阜三、阜四段和戴南组,岩体长度分布从几百到几千米不等。钻遇侵入岩的钻井多达十几口,其中以沙垛 1 井最为典型。该钻孔在深部 3 547 m 以下阜二段泥质岩层段中钻遇基性侵入岩约 70 m,并进行了取心,本次工作进行了系统取样 14 件(图 2)。早期将这层侵入岩定为辉绿岩,认为是一次侵入形成,本次研究发现岩性变化很大,自上而下由 3 种岩石类型组成,是由三次或更多次侵入作用形成的。

2.1 岩性特征

2.1.1 辉绿岩

主要发育在侵入岩层上部。镜下可见典型的辉绿结构,主要由斜长石和辉石组成,含少量石英以及暗色矿物黄铁矿、钛铁矿,次生矿物为绿泥石、绢云母,但是蚀变程度低,致密块状构造(图 3a-c)。其中斜长石含量 65%,呈半自形到自形,柱状、长

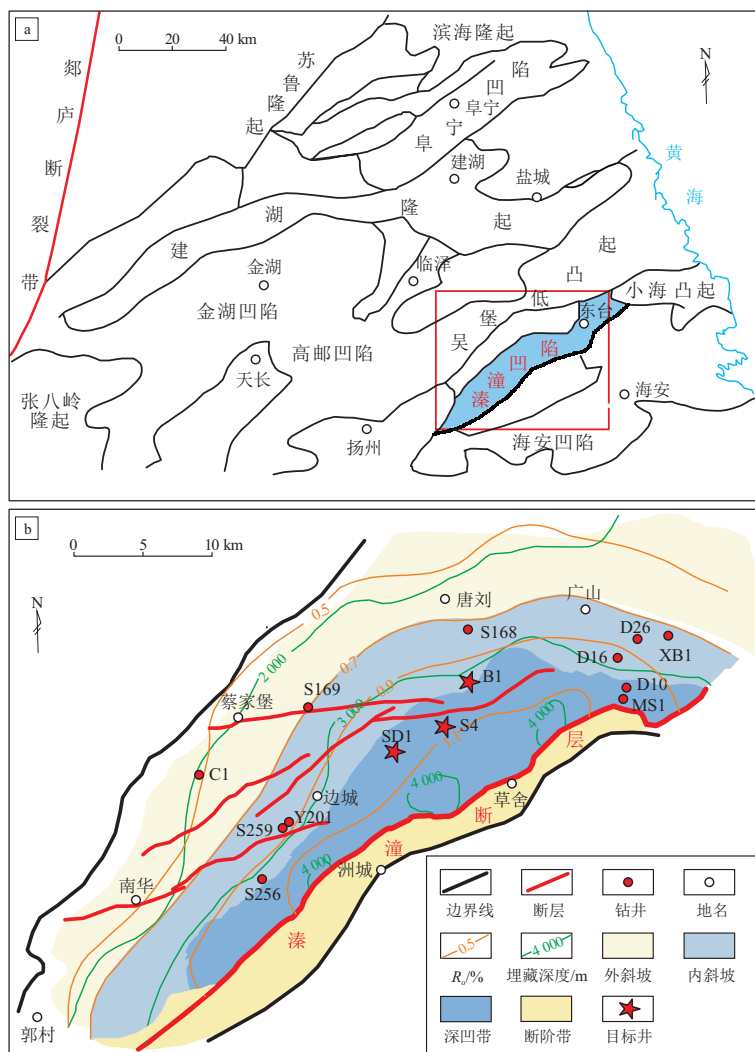


图 1 苏北盆地和研究区地质构造

a. 苏北盆地构造单元; b. 溱潼凹陷阜宁组二段构造单元。据参考文献 [35] 修改。

Fig.1 Geological sketch map of Subei Basin and the research area

条状,具有聚片双晶,发生小规模绢云母化蚀变,粒径为 0.1~0.9 mm。辉石有两种,一种为单斜辉石,其特点是短柱状,无色,干涉色为二级,斜消光,少部分可见裂纹;另一种为斜方辉石,短柱状,无色,干涉色为一级,平行消光。

2.1.2 辉石二长岩

发育在辉绿岩之下 3 549.5~3 563.0 m 之间。典型特征是长石含量增多,可达 60%~75%,既有偏碱性长石,也有短柱状偏酸性的正长石,大部分长石发生不同程度的绢云母化蚀变(图 3d)。辉石含量明显减少,约为 20%~25%,另有少量石英以及暗色矿物黄铁矿和钛铁矿等,次生矿物为绿泥石、绢云母。

2.1.3 橄榄辉长岩

发育在辉石二长岩之下,取心未见底,测井资料显示厚度超过 45 m。突出特点是辉石含量多,

接近 50%左右,并见橄榄石(图 3e),长石主要为长柱状钙长石系列,含少量暗色矿物黄铁矿、钛铁矿,次生蚀变严重,大部分橄榄石和辉石都发生了严重的绿泥石化(图 3f),长石发生绢云母化。橄榄石裂理发育,并顺着裂理发生蚀变。由于蚀变作用严重,原始岩石结构被破坏,因此岩性比较松散。

2.2 岩石化学特征

电子探针测试分析表明,该侵入岩中斜长石的成分变化较大,斜长石 An 牌号 29.2~67.28,从侵入体顶部的拉长石,到中部的中长石、奥长石,再到底部的拉长石(表 1,图 4)。辉石成分变化也很大,En 牌号 28.32~72.45,各样品分布相对均匀,广泛分布的单斜辉石和斜方辉石不具有明显指示性(表 2,图 4)。

对侵入岩主量成分的测试表明,岩石化学组成变化较大,SiO₂ 含量为 40.37%~74.03%,平均为

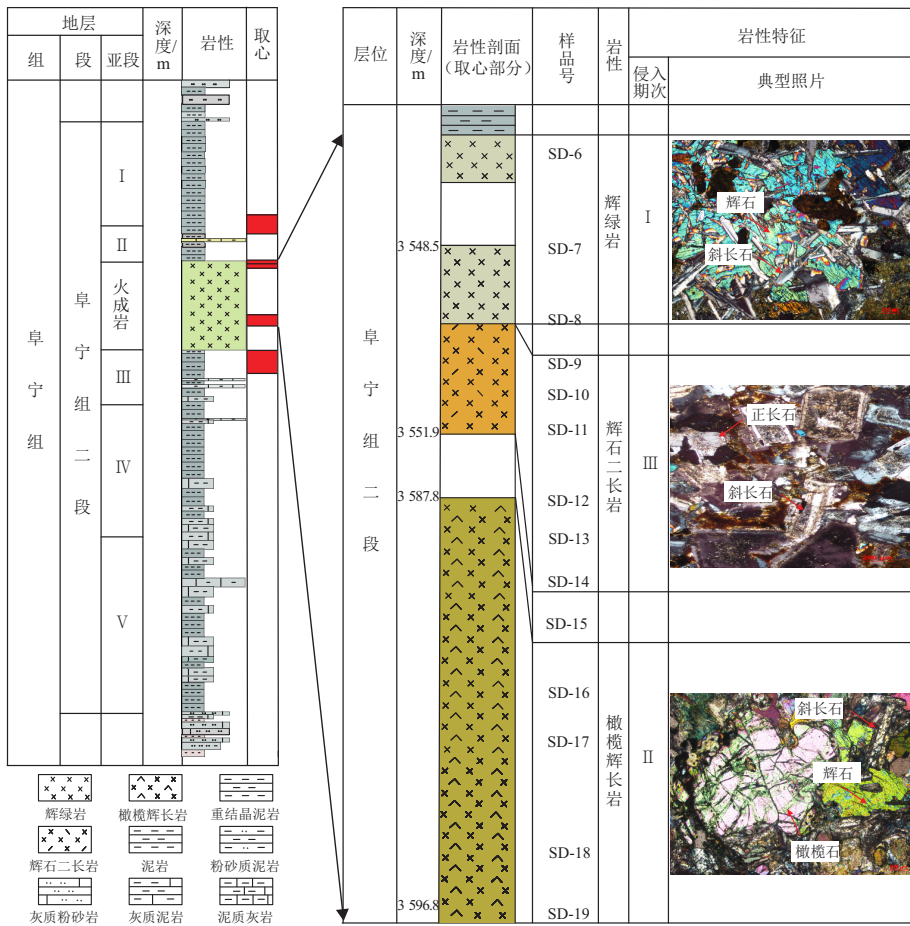


图 2 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩发育情况及采样位置

Fig.2 Development and sampling location of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

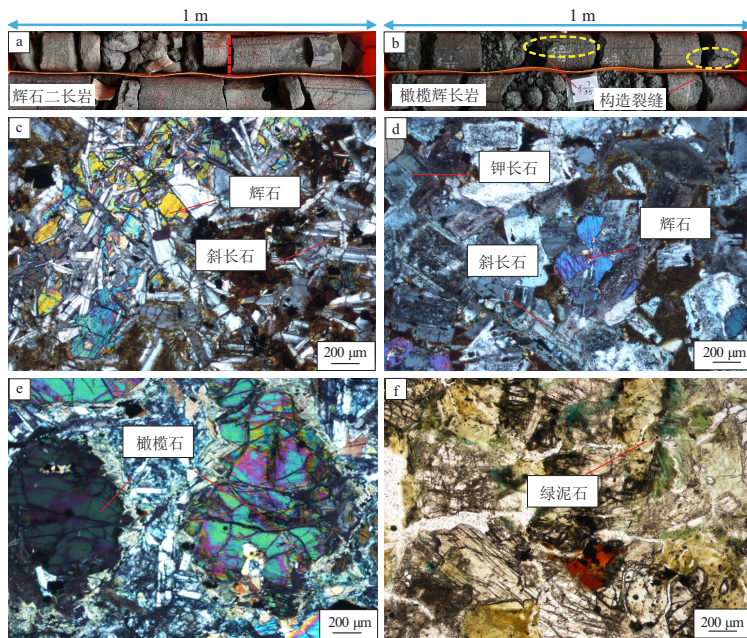


图 3 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩不同岩石类型的岩相学特征

a. 辉石二长岩岩心, 新鲜呈块状构造, 稍蚀变; b. 橄榄辉长岩岩心, 岩石晶体颗粒变大, 非常破碎, 蚀变程度较大; c. 辉绿岩, 辉绿结构, 斜长石杂乱排列, 斜长石格架中充填辉石, 3 548.5 m, 正交偏光; d. 辉石二长岩, 长石含量占主导, 长柱状斜长石和短柱状正长石均有分布, 并含有辉石, 3 551.3 m, 正交偏光; e. 橄榄辉长岩, 辉石与斜长石为主, 含有较多橄榄石, 裂理发育, 3 589.5 m, 正交偏光; f. 橄榄辉长岩, 收缩裂缝边缘多发生绿泥石化, 3 587.8 m, 单偏光。

Fig.3 Petrographic characteristics of different types of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

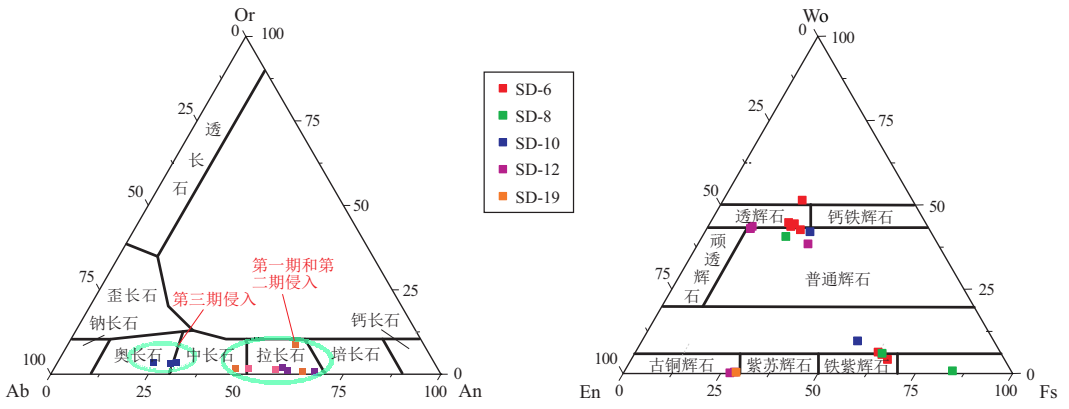


图 4 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩中长石 An-Ab-Or 图解和辉石 Wo-En-Fs 图解

Fig.4 Diagrams of An-Ab-Or of feldspar and Wo-En-Fs of pyroxene in intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

表 1 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井长石矿物电子探针值

Table 1 Electron probe values of feldspar minerals in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

样品	TiO ₂	Na ₂ O	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	合计
SD-6	0.10	4.00	0.90	0.30	1.90	0.10	10.60	27.10	49.43	94.30
	0.09	4.54	0.71	0.20	0.11	0.01	12.73	29.58	52.44	100.40
	0.08	3.74	0.56	0.12	0.14	0.01	14.21	30.98	50.82	100.66
SD-8	0.10	5.55	0.73	0.31	0.13	0.01	10.39	28.33	55.07	100.61
	0.06	4.80	1.09	0.25	0.15	0.01	11.89	30.07	53.89	102.20
SD-10	0.00	8.42	0.60	0.60	0.07	0.02	5.20	24.80	62.54	102.24
	0.04	8.05	0.28	0.55	0.01		6.28	25.53	61.50	102.24
	0.03	7.84	0.33	0.64	0.03		6.56	25.17	58.94	99.52
SD-12	0.05	4.06	1.05	0.16	0.03	0.01	13.50	31.41	52.00	102.27
	0.08	5.95	0.70	0.28	0.11		9.72	27.90	55.90	100.63

表 2 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井辉石矿物电子探针值

Table 2 Electron probe values of pyroxene minerals in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

样品	TiO ₂	Na ₂ O	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	合计
SD-6	1.13	0.35	11.20	0.01	8.77	3.25	22.13	2.57	48.86	98.25
	2.30	0.41	13.09	0.01	11.38	0.27	20.81	4.72	46.67	99.65
	1.30	0.36	12.41	0.01	12.13	0.27	21.52	3.01	49.81	100.81
	0.20	0.03	37.81	0.01	10.68	0.85	3.00	0.21	49.57	102.37
	2.06	0.46	12.70	0.01	11.77	0.26	20.36	4.02	46.71	98.34
	2.00	0.44	12.87	0.01	11.87	0.27	20.61	4.13	48.44	100.63
	0.08	0.03	39.30	0.03	10.05	0.74	1.92	0.09	49.60	101.84
	0.11	0.03	37.39	0.00	10.14	0.94	2.57	0.10	49.61	100.89
	0.61	0.33	15.19	0.01	11.68	0.35	20.86	1.80	52.13	102.96
SD-8	1.29	0.36	13.00	0.00	12.87	0.31	19.18	2.54	47.80	97.36
	36.87	0.23	38.41	0.31	3.86	3.29	0.27	2.95	10.41	96.60
	0.07	0.05	38.02	0.02	10.23	0.85	2.79	0.28	48.71	101.02
SD-10	0.46	0.35	16.93		10.90	0.54	20.59	0.80	51.09	101.64
	0.02	0.44	25.99	0.39	9.21	0.31	3.54	7.14	41.36	88.42
SD-12	0.92	0.36	7.07	0.00	15.73	0.15	21.21	2.98	50.82	99.24
	0.06	5.24	6.37	0.15	4.20	0.16	6.75	27.08	49.93	99.94
	0.66	0.32	6.92	0.02	15.88	0.15	20.75	3.28	50.52	98.49
	0.03	0.07	24.88		36.95	0.33	0.13	0.02	37.69	100.09
SD-19	0.05	0.05	24.93	0.03	35.03	0.35	0.27	0.04	39.63	100.32
	0.03	0.03	27.06	0.03	37.26	0.40	0.24	0.02	38.39	103.45
	8.86	3.59	0.15	3.41	0.08	0.87	20.86	66.90	104.70	

48.52%, Al_2O_3 含量为 9.27%~15.39%, 平均为 13.51%。根据采样深度绘制了主元素在纵向上的变化规律, 不难发现明显分为三个层段, 即 SD-8 以上的辉绿岩层段, 其下至 SD-11 的辉石二长岩层段, 以及下部的橄榄辉长岩层段, 表明沙埭 1 井侵入岩发生三期侵入(图 5)。最早应该是下部偏基性的橄榄辉长岩侵入, 其后为上部的辉绿岩侵入, 最后偏酸性的辉石二长岩侵入在前二者之间, 并对其上下侵入岩层产生破坏和热液蚀变作用。

3 储层

3.1 储集空间类型

一般来说, 火成岩(特别是侵入岩)都比较致

密坚硬, 孔隙不发育, 很难成为油气储层。但在一些特定情况下, 隐爆作用、构造破碎和热液蚀变等, 也会形成各种储集空间, 成为特殊的油气储层。该区沙埭 1 井侵入岩, 由于多期侵入作用的叠加, 以及热液蚀变的改造, 也发育了较好的储集空间, 但分布很不均匀, 主要发育在下部的橄榄辉长岩中。

3.1.1 收缩裂缝

收缩微缝是岩浆冷凝结晶过程中因体积收缩而形成的不规则缝隙。收缩缝在形态上呈“树根状”分布, 缺乏方向性, 宽窄变化较大, 且无平直的边缘(图 6a, b)。常分布于不同矿物颗粒之间, 也可以穿过矿物晶体。此外, 这些收缩裂缝的存在, 也为后期的流体活动提供了条件, 因此, 大部分收

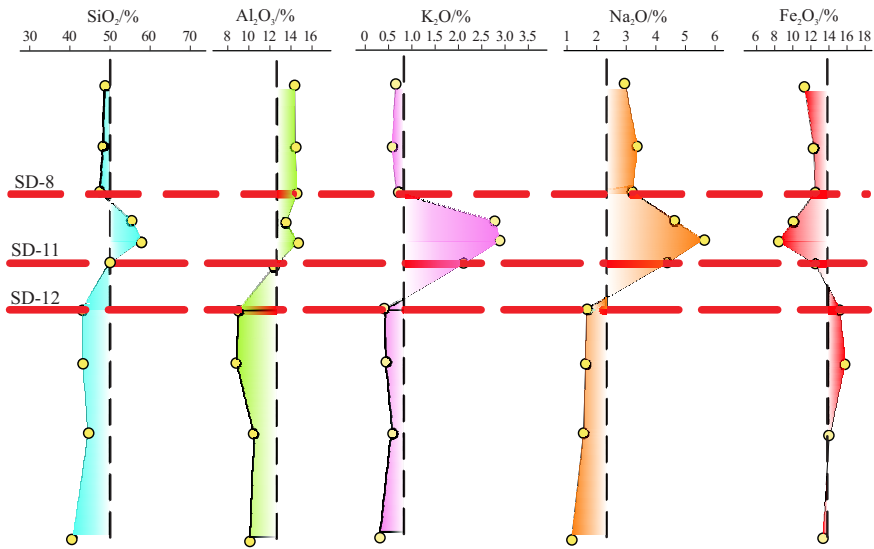


图 5 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩主量元素变化

Fig.5 Variation of major elements of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

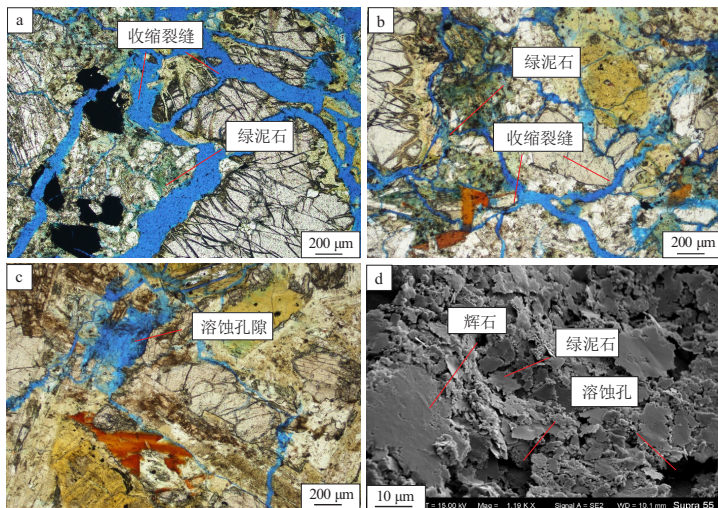


图 6 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩储集空间

a. 收缩微缝, 呈“树根状”不规则分布, 蓝色铸体薄片, 单偏光, 3 590.3 m; b. 收缩微缝, 裂缝边缘发生溶蚀, 有次生绿泥石形成, 蓝色铸体薄片, 单偏光, 3 592 m; c. 溶蚀孔隙, 辉石发生溶蚀形成次生孔隙, 蓝色铸体薄片, 单偏光, 3 598 m; d. 溶蚀孔洞, 辉石矿物绿泥石化(片状矿物), 扫描电镜。

Fig.6 Reservoir space of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

缩裂缝附近都发生了不同程度的溶蚀,并形成了次生矿物绿泥石(图 6a-c)。

3.1.2 溶蚀孔隙

溶蚀孔隙是热液流体溶蚀矿物颗粒而形成的,是该区侵入岩的主要孔隙类型。显微镜观察表明,辉石和橄榄石矿物最易溶蚀(图 6),大部分铁镁矿物都发生了不同程度的溶蚀,形成的溶蚀孔隙与次生矿物绿泥石并存。溶蚀作用常常沿着收缩裂缝和矿物的解理缝进行,在缝隙交叉或密布的位置溶蚀最强,形成较大的溶蚀孔隙(图 6a,b)。整体上看,第一期侵入的橄榄辉长岩遭受溶蚀最强,一是因为含有丰富的铁镁暗色矿物,二是因为侵入较早,遭受了后期多次热液流体的作用。由于遭受的溶蚀作用较强,较多层段的橄榄辉长岩岩心结构松散,体积孔隙度一般都在 10% 以上,是最好的储集层(图 3b)。

3.1.3 构造裂缝

由于侵入岩脆性大,在后期构造应力作用下极容易破碎形成不同程度的裂缝。整体上看,研究层段的构造裂缝发育程度较低,但也常出现,规模不大,一般为毫米级缝隙,具有较好的方向性,走向比

较平直,常呈断续状(图 3b)。

3.2 储层物性特征

沙埭 1 井侵入岩发育在 3 547~3 615 m 之间,总厚度约为 70 m。总体上看,孔隙发育很不均一,主要发育在下部的橄榄辉长岩层段。显微镜观测表明,以溶蚀孔隙为主,约占 80%,微缝约占 15%。根据测井资料和对部分岩心物性测量,该段岩石总孔隙度为 11.5%~26.5%,峰值在 13%~22% 之间,有效孔隙度为 9.0%~26.5%,可动孔隙度为 2.5%~25.0%,主要分布在 2.5%~17.0%(图 7)。渗透率主要为 $(0.05 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层裂缝发育,孔洞连通性好。根据常规测井曲线解释发现,在 3 569 m 之下,有效孔隙度陡增,中子孔隙度变高,孔渗条件普遍比较好,该段正是橄榄辉长岩段分布层段,表明橄榄辉长岩的物性显著高于其上部的辉石二长岩和辉绿岩(图 8)。

4 储层发育主控因素

4.1 侵入岩类型与矿物组成

对比沙埭 1 井三期侵入岩孔隙发育程度可知,早期的橄榄辉长岩物性最好,孔隙度可达 10% 以

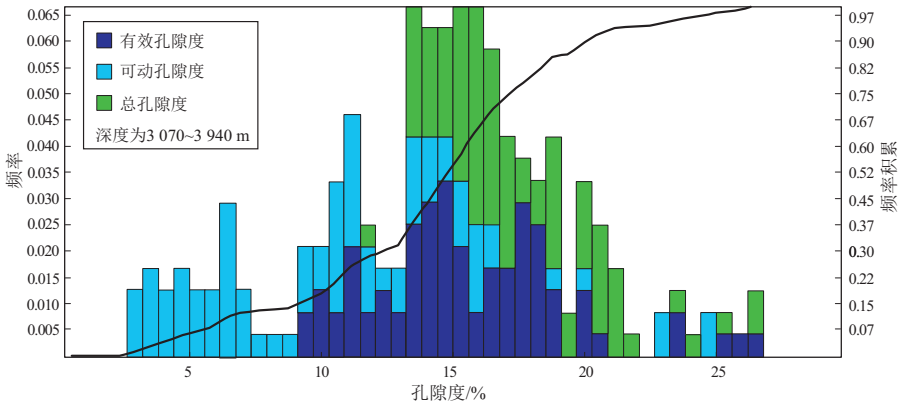


图 7 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井孔隙度分布

Fig.7 Porosity distribution of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

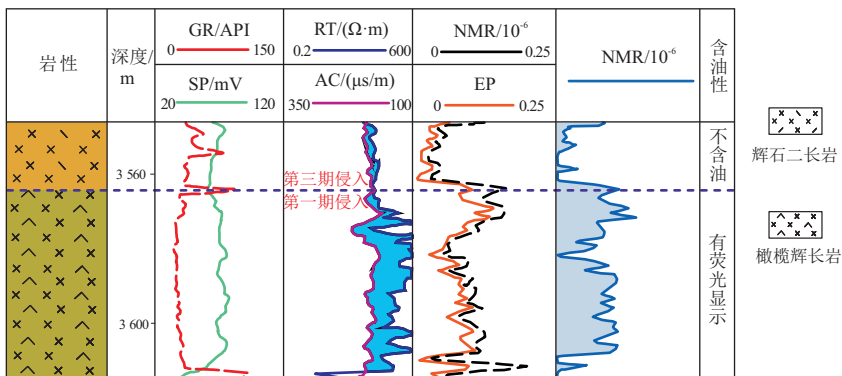


图 8 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩部分测井曲线

Fig.8 Logging curves of intrusive rocks in well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

上,而辉绿岩和辉石二长岩的物性很差,孔隙很不发育。究其原因,是橄榄辉长岩含有较多的辉石和橄榄石等铁镁暗色矿物,在后期热液流体作用下极易发生溶蚀和交代作用。这些矿物中的 Fe 可以形成绿泥石等蚀变矿物,但 Mg 元素等为易溶组分,随着流体运动而迁移,同时还伴随着部分 SiO₂ 的流失,从而产生了较多的次生溶蚀孔隙。加之橄榄辉长岩中的收缩裂缝比较发育,橄榄石还非常容易产生裂理,也为流体活动提供了良好条件,致使橄榄辉长岩成为次生孔隙最发育的岩石类型(图 8)。

4.2 多期次岩浆—热液活动

溱潼凹陷钻遇火成岩侵入体的钻井较多,但大部分侵入岩厚度较薄,多为单一期次侵入形成,其中的溶蚀孔隙和裂缝等都不发育。但沙埭 1 井为多期侵入活动叠加形成的“复合”侵入岩体,在早期橄榄辉长岩侵入之后,又发生了两期侵入,即第二期的辉绿岩和第三期的辉石二长岩。后期的岩浆侵入活动,必然会对早期已经固结的橄榄辉长岩产生一定的机械破坏作用,以及多次的热液流体溶蚀。机械破碎与热液溶蚀交替,多次叠加,就造成了早期侵入岩遭受多期次溶蚀改造,形成了比较丰富的溶蚀孔隙以及部分改造裂隙,这是橄榄辉长岩孔隙发育的关键因素。

此外,从橄榄辉长岩到辉绿岩,再到辉石二长岩,是一个跨越不同岩石类型的演化历程,经历了从偏基性岩浆到偏酸性岩浆的长期演化过程。这表明,沙埭 1 井深部岩浆房的演化与活动历史很长,并多次有岩浆侵入到浅部。在比较漫长的演化过程中,除了岩浆侵入外,还会有长期的热液流体活动,是造成橄榄辉长岩等早期侵入岩发生严重热液蚀变的重要因素。

4.3 区域性断裂构造的控制作用

溱潼凹陷紧邻西北方向的郟庐断裂,受白垩纪以来区域拉张—剪切作用及岩浆活动的影响,形成大量断层,是侵入岩有利储层形成的关键。与火山喷发同时期的断裂为岩浆活动提供通道,侵入岩形成之后的断裂活动在许多致密的火成岩中产生了大量的构造裂缝(图 3b),这些裂缝有效地沟通了侵入岩储层的孔缝系统。不但使孤立的原生储集空间连通起来,使其变为有效孔隙,而且为后期的溶蚀作用提供了岩浆热液流动的通道。而裂缝作为良好的储集空间,增加了侵入岩的孔隙度和渗透率。

沙埭 1 井所在区域紧邻次级主断裂。根据区域研究资料,该断裂具有多期活动特征,地球物理资料显示为火山通道,为沙埭 1 井的多期岩浆—热

液活动提供了有利的构造背景。正是该区域性断裂的控制与多期活动,导致了岩浆—热液的多期侵入与长期影响,从而使早期侵入的橄榄辉长岩遭受显著的构造破坏和严重的热液蚀变改造,形成了丰富的次生孔隙和裂隙。

5 储层含油性

苏北盆地构造—沉积演化史研究表明,溱潼凹陷阜二段经历了两次短暂的抬升,即在阜宁组沉积后期和三垛早期,与区域构造的三次运动的后两期相一致。对阜宁组烃源岩的研究揭示,埋深超过 2 000 m 时进入低成熟阶段, R_o 达到 0.5%~0.7%,埋深超过 2 500 m 后烃源岩逐渐达到成熟阶段, R_o 达到 0.7%~1.0% 时,开始进入生油高峰期,大致时间在 32.4 Ma^[35-36],目前研究区发现的大部分油藏主要来源于阜宁组烃源岩。

溱潼凹陷已经在个别侵入岩中发现了较好的油气聚集,但沙埭 1 井钻遇的侵入岩含油性比较差,尽管已处在 3 500 m 以下较高成熟阶段。根据荧光观测研究结果^[37-38],沙埭 1 井侵入岩不同部位在显微荧光上显示特征存在明显差异,岩体中上部荧光显示很少,局部仅见非常细小的零星荧光(图 9a)。在侵入体下部的橄榄辉长岩中,局部见到较强的荧光显示,孔隙喉道内能够观察到烃类的局部聚集(图 9b,c)。由此可见,虽然侵入岩层段整体含油性很差,但储层物性与含油性之间的正相关关系还是非常明显的。

从地质条件分析,该侵入岩正好侵入在阜宁组泥页岩中,但围岩中泥页岩有机质含量低,不是良好的烃源岩,生油条件比较差,即便有一些液态烃生成,也还没有达到初次运移的水平,因此进入侵入体的烃类很少。其次,由于侵入体周围泥岩的阻碍,附近油气烃源岩生成的烃类,也难以进入到侵入体中,没有接受规模性的充注。再次,锆石年代学研究揭示橄榄辉长岩的侵位年龄约为 54 Ma,与这套泥页岩(含烃源岩)的形成时期接近,即侵入岩形成与烃源岩沉积几乎同步,而到烃源岩生烃时,侵入体周围被泥质岩围绕,油气也就难以进入其中。因此,只有存在沟通烃源岩与侵入岩的良好通道(如断裂构造)时,侵入体才能够成为储集油气的良好场所。

6 结论

(1) 苏北盆地溱潼凹陷沙埭 1 井侵入岩岩性自下向上存在显著变化,是多期侵入作用复合叠加

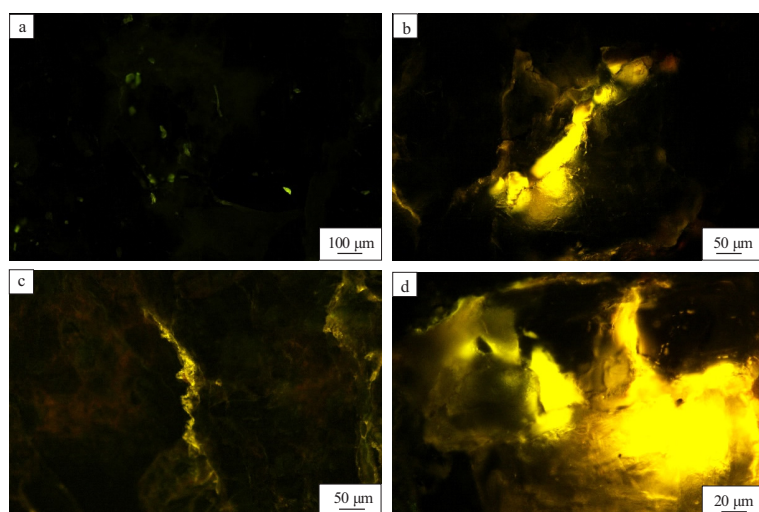


图9 苏北盆地溱潼凹陷沙埭1井侵入岩不同部位荧光显微照片

a.3 943 m, 不含油;b.3 592 m, 荧光沿孔隙呈条状分布;

c.3 595.8 m, 微弱荧光沿孔隙呈条状分布;d.3 598 m, 荧光呈团簇状分布。

Fig.9 Fluorescence micrographs of intrusive rocks from well Shaduo 1, Qintong Sag, Subei Basin

的结果。从下到上岩性由偏基性橄榄辉长岩向辉绿岩过渡,最后向偏酸性辉石二长岩演化,晚期侵入作用对早期橄榄岩体具有一定的破坏及流体溶蚀作用。

(2)侵入岩中孔隙发育程度不均,辉绿岩和辉石二长岩孔隙发育程度低,而橄榄辉长岩孔隙发育程度较高。储集空间发育程度主要受岩性和热流体溶蚀作用控制,主要表现为第二期和第三期的岩浆—热液作用对第一期侵入体的改造和溶蚀,其中橄榄石和辉石等铁镁暗色矿物容易发生次生蚀变和溶蚀,形成了较多的溶蚀孔以及次生绿泥石。加之该钻孔位于断裂带附近,为岩浆—热液的多期活动提供了良好条件,是橄榄辉长岩形成良好孔隙的主要机制。

(3)虽然侵入体下部储集性较好,但整体上含油性差,顶部无荧光或显示较弱,底部储集性好的部位见有微弱的荧光显示,没有发现规模性充注现象。其原因可能是沙埭1井侵入岩形成时间较早,周围被泥页岩所包围,埋藏至深部到达烃源岩生烃阶段时,油气难以进入侵入体。如果发育烃源岩与侵入体的良好沟通条件,有可能成为油气聚集的良好场所。因此,侵入体与烃源岩之间的输导条件是控制侵入体是否成为油气储集场所的重要条件之一。

致谢:中国石化华东油气分公司在样品方面提供了很大的帮助,在此致以衷心感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

夏祥和胡文瑄完成论文的构思;夏祥、马晓东、胡文瑄、臧素华参与论文写作修改。所有作者阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by XIAO xiang and HU Wenxuan. The manuscript was drafted and revised by XIA Xiang, MA Xiaodong, HU Wenxuan and ZANG Suhua. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [2] 黄赞,陈清华. 苏北盆地火成岩分布及其与走滑构造的关系 [C]//2016 中国地球科学联合学术年会论文集(十五)——专题 32: 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题 33: 盆地动力学与能源. 北京: 中国和平音像电子出版社, 2016: 68-71.
HUANG Yun, CHEN Qinghua. The distribution of igneous rocks in the Northern Jiangsu Basin and their relationship with strike slip structures [C]//Proceedings of the 2016 China Geoscience Joint Academic Annual Meeting (Tenth Five Year) -Topic 32: Research and application of electromagnetic geophysics and its new progress, Topic 33: Basin dynamics and energy. Beijing: China Heping Audio Video Electronic Publishing House, 2016: 68-71.
- [3] 张啸,陈国军,李俊飞,等. 准噶尔盆地石西凸起风化型火山岩储层相态发育模式[J]. 特种油气藏, 2023, 30(3): 47-55.
ZHANG Xiao, CHEN Guojun, LI Junfei, et al. Phase development pattern of weathered volcanic reservoirs in Shixi high, Junggar Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(3): 47-55.
- [4] 马奎前,李超,原建伟,等. 火山岩对砂岩储层物性影响的定

- 量表征及应用[J].特种油气藏,2023,30(5):91-97.
- MA Kuiqian,LI Chao,YUAN Jianwei, et al.Quantitative characterization of the influence of volcanic rocks on the physical properties of sandstone reservoirs and its application[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2023,30(5):91-97.
- [5] 张莹,曲丽丽,朱露,等.SVM算法在渤海湾盆地南堡凹陷火山岩储层流体预测中的应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):181-189.
- ZHANG Ying,QU Lili,ZHU Lu, et al.Application of SVM algorithm in fluid prediction of volcanic reservoirs in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J].Petroleum Reservoir Evaluation and Development,2023,13(2):181-189.
- [6] 郭克园,蔡国刚,罗海炳,等.辽河盆地欧利坨子地区火山岩储层特征及成藏条件[J].天然气地球科学,2002,13(3/4):60-66.
- GUO Keyuan,CAI Guogang,LUO Haibing, et al.Characteristics and reservoir forming conditions of volcanic reservoir in Oulituozhi area of Liaohe Basin[J].Natural Gas Geoscience,2002,13(3/4):60-66.
- [7] 王金友,张世奇,赵俊青,等.渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征[J].石油实验地质,2003,25(3):264-268.
- WANG Jinyou,ZHANG Shiqi,ZHAO Junqing, et al.Characteristics of volcanic rock reservoirs in the Linshang area of the Huimin Sag[J].Petroleum Geology & Experiment,2003,25(3):264-268.
- [8] 叶涛,韦阿娟,彭靖淞,等.渤海海域白垩系义县组火山岩岩相特征及成储差异[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):1081-1091.
- YE Tao,WEI Ajuan,PENG Jingsong, et al.Characteristics and reservoir-forming differences of volcanic lithofacies in Yixian Formation of Cretaceous in Bohai Bay area[J].Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(5):1081-1091.
- [9] 杨庆宁.辽河东部凹陷南部沙三段火山岩储层特征[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(24):121.
- YANG Qingning.Characteristics of volcanic rock reservoirs in the southern Shasan Formation of the Liaohe Eastern Depression[J].China Petroleum and Chemical Standard and Quality,2018,38(24):121.
- [10] 李军,邵龙义,时林春,等.辽河拗陷东部凹陷辉绿岩油气藏储集特征[J].地质科技情报,2013,32(1):119-124.
- LI Jun,SHAO Longyi,SHI Linchun, et al.Features of diabase reservoirs in the eastern sag of Liaohe Depression[J].Geological Science and Technology Information,2013,32(1):119-124.
- [11] 朱毅秀,金之钧,林畅松,等.塔里木盆地塔中地区早二叠世岩浆岩及油气成藏关系[J].石油实验地质,2005,27(1):50-54.
- ZHU Yixiu,JIN Zhijun,LIN Changsong, et al.Relations between the Early Permian magmatic rocks and hydrocarbon accumulation in the central Tarim[J].Petroleum Geology & Experiment,2005,27(1):50-54.
- [12] 魏翔宇,高有峰,魏琴,等.蚀变对中基性火山岩储层的控制作用:以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J].世界地质,2017,36(2):541-551.
- WEI Xiangyu,GAO Youfeng,WEI Qin, et al.Controlling of alteration on intermediate and basic volcanic reservoirs;a case study of Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi Fault Depression,Songliao Basin[J].Global Geology,2017,36(2):541-551.
- [13] 熊伟,王越,熊峥嵘,等.准噶尔盆地石北凹陷岛弧环境下火山—沉积建造特征及源储发育模式:以石炭系姜巴斯套组为例[J].石油实验地质,2023,45(4):656-666.
- XIONG Wei,WANG Yue,XIONG Zhengrong, et al.Characteristics of volcanic-sedimentary formations and developmental patterns of source and reservoir rocks in an island arc environment of Shibe Sag,Junggar Basin:taking the Carboniferous Jiangbasitao Formation as an example[J].Petroleum Geology & Experiment,2023,45(4):656-666.
- [14] 李宗浩,侯磊,李卉,等.准噶尔盆地石西凸起晚石炭世火山岩储层发育影响因素[J].油气地质与采收率,2023,30(4):33-45.
- LI Zonghao,HOU Lei,LI Hui, et al.Influencing factors of Late Carboniferous volcanic reservoir development in Shixi Uplift, Junggar Basin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2023,30(4):33-45.
- [15] 杨虎,薛晓军,陈向辉,等.克拉美丽气田火成岩天然裂缝漏失压力模型[J].新疆石油地质,2023,44(1):93-99.
- YANG Hu,XUE Xiaojun,CHEN Xianghui, et al.Leakage pressure model of natural fractures in igneous rocks in Kelameili gas field[J].Xinjiang Petroleum Geology,2023,44(1):93-99.
- [16] 陈俊,王剑,雷海艳,等.火成岩风化壳储集层特征与油气产能关系研究:以准噶尔盆地红山嘴石炭系油藏为例[J].现代地质,2022,36(4):1009-1021.
- CHEN Jun,WANG Jian,LEI Haiyan, et al.Characteristics of igneous weathering crust reservoir and its relation with oil and gas productivity;a case study of the Carboniferous Hongshanzui reservoir, Junggar Basin[J].Geoscience,2022,36(4):1009-1021.
- [17] 孔垂显,邱子刚,秦军,等.准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩储层特征研究[J].特种油气藏,2017,24(6):28-32.
- KONG Chuixian,QIU Zigang,QIN Jun, et al.Study on the characteristics of Carboniferous volcanic reservoir along the northwestern margin of Junggar Basin[J].Special Oil and Gas Reservoirs,2017,24(6):28-32.
- [18] 王小军,赵飞,张琴,等.准噶尔盆地金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙类型及特征[J].石油与天然气地质,2017,38(1):144-151.
- WANG Xiaojun,ZHAO Fei,ZHANG Qin, et al.Pore types and characteristics of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong Oilfield,Junggar Basin[J].Oil & Gas Geology,2017,38(1):144-151.
- [19] 付茜.中国火成岩油气勘探发现现状及展望[J].石油钻采工艺,2017,39(1):25-32.
- FU Qian.Status and prospect of igneous oil and gas exploration and development in China[J].Oil Drilling Production Technology,2017,39(1):25-32.
- [20] 邹才能,赵文智,贾承造,等.中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J].石油勘探与开发,2008,35(3):257-271.
- ZOU Caineng,ZHAO Wenzhi,JIA Chengzao, et al.Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J].Petroleum Exploration and Development,2008,35(3):257-271.

- [21] 刘嘉麒,孟凡超.火山作用与油气成藏[J].天然气工业,2009,29(8):1-4.
LIU Jiaqi, MENG Fanchao. Hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous activity [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8):1-4.
- [22] 刘凯,邹正银,王志章,等.基于机器学习的火山岩岩性智能识别及预测[J].特种油气藏,2022,29(1):38-45.
LIU Kai, ZOU Zhengyin, WANG Zhizhang, et al. Intelligent identification and prediction of lithology of volcanic reservoirs based on machine learning [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1):38-45.
- [23] WU Changzhi, GU Lianxing, ZHANG Zunzhong. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and sub-volcanic intrusive rocks; examples in Mesozoic-Cenozoic basins of Eastern China [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(1):137-147.
- [24] 刘君兰,张金川,王胜,等.辉绿岩床侵入对围岩有机质热演化影响的模拟研究:以赵家山下马岭组剖面为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):255-264.
LIU Junlan, ZHANG Jinchuan, WANG Sheng, et al. Numerical simulation of influence of diabase bed intrusion on thermal evolution of organic rich host rock: a case study of Zhaojiashan Xiamaling Formation [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1):255-264.
- [25] 陈庆春,朱东亚,胡文瑄,等.试论火山岩储层的类型及其成因特征[J].地质论评,2003,49(3):286-291.
CHEN Qingchun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Classification and characteristics of oil and gas reservoir beds of volcanic rocks [J]. Geological Review, 2003, 49(3):286-291.
- [26] 李鸿儒,牛佳文,韩明刚,等.高邮凹陷北斜坡辉绿岩及其接触带储层发育特征与有利油气藏条件[J].地质科技情报,2019,38(2):117-129.
LI Hongru, NIU Jiawen, HAN Minggang, et al. Reservoir characteristics and hydrocarbon entrapment of diabase and its contact metamorphic rocks in northern slope of Gaoyou Sag [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2):117-129.
- [27] LIU Chao, XIE Qingbin, WANG Guiwen, et al. Reservoir properties and controlling factors of contact metamorphic zones of the diabase in the northern slope of the Gaoyou Sag, Subei Basin, Eastern China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35:392-411.
- [28] 李坚.苏北盆地溱潼凹陷帅垛地区火山机构分析[D].荆州:长江大学,2019.
LI Jian. Analysis of volcanic mechanism in Shuaiduo area of Qintong Depression, Subei Basin [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2019.
- [29] 邱海峻,许志琴,乔德武.苏北盆地构造演化研究进展[J].地质通报,2006,25(9/10):1117-1120.
QIU Haijun, XU Zhiqin, QIAO Dewu. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei Basin, Jiangsu, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9/10):1117-1120.
- [30] 王玺,陈清华,朱文斌,等.苏北盆地高邮凹陷边界断裂带构造特征及成因[J].大地构造与成矿学,2013,37(1):20-28.
WANG Xi, CHEN Qinghua, ZHU Wenbin, et al. Structural characteristics and origin of boundary fault belts of the Gaoyou Sag in the Subei Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(1):20-28.
- [31] 邱旭明,陈伟,李鹤永,等.苏北盆地走滑构造与复杂断块油气成藏[J].石油实验地质,2023,45(3):393-401.
QIU Xuming, CHEN Wei, LI Heyong, et al. Strike-slip structures and hydrocarbon accumulation in complex fault blocks in Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(3):393-401.
- [32] 杨力.苏北盆地中生代构造演化及其与油气的关系[D].荆州:长江大学,2015.
YANG Li. The structural evolution in the Cenozoic of Subei Basin and its relationship with oil and gas [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015.
- [33] 刘寅,陈清华,胡凯,等.渤海湾盆地与苏北—南黄海盆地构造特征和成因对比[J].大地构造与成矿学,2014,38(1):38-51.
LIU Yin, CHEN Qinghua, HU Kai, et al. Comparison of the Bohai Bay Basin and Subei-South Yellow Sea Basin in the structural characteristics and forming mechanism [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(1):38-51.
- [34] 陈艳,张景发,姜文亮,等.苏北盆地重力场及地壳结构特征[J].地球物理学进展,2017,32(6):2295-2303.
CHEN Yan, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. Gravity field and characteristics of crustal structure in Subei Basin [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6):2295-2303.
- [35] 咎灵,骆卫峰,印燕铃,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油形成条件及有利区评价[J].石油实验地质,2021,43(2):233-241.
ZAN Lin, LUO Weifeng, YIN Yanling, et al. Formation conditions of shale oil and favorable targets in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2):233-241.
- [36] 咎灵,白鸾羲,印燕铃,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油基本特征及成因分析[J].石油实验地质,2023,45(2):356-365.
ZAN Ling, BAI Luanxi, YIN Yanling, et al. Basic characteristics and genesis analysis of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2):356-365.
- [37] 郭瑞超,王浩,蒲娅琳,等.显微荧光确定砂岩含气性与物性下限探讨:以蜀南地区须家河组为例[J].石油地质与工程,2020,34(5):34-38.
GUO Ruichao, WANG Hao, PU Yalin, et al. Determination of gas bearing property and lower limit of physical property of sandstone by microscopy fluorescence: by taking Xujiahe Formation in Shunan area as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(5):34-38.
- [38] 郭舜玲,孙玉善,尚李平,等.荧光显微镜技术[M].北京:石油工业出版社,1994.
GUO Shunling, SUN Yushan, SHANG Liping, et al. Fluorescence microscopy technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.