

引用: 张璐, 李剑, 宋永, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩天然气成藏特征及勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 141-151.

Zhang Lu, Li Jian, Song Yong, et al. Gas accumulation characteristics and exploration potential of the Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 141-151.

准噶尔盆地石炭系火山岩天然气成藏特征及勘探潜力

张璐^{1,2} 李剑^{1,2} 宋永³ 陈世加⁴ 路俊刚⁴ 国建英^{1,2} 曾源⁴ 崔会英^{1,2}

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油天然气集团有限公司天然气成藏与开发重点实验室;

3 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院; 4 西南石油大学地球科学与技术学院)

摘要: 准噶尔盆地油气发现程度差别大, 天然气探明率较低。石炭系火山岩是盆地内目前天然气储量最多的层系, 勘探证实天然气成藏特征非常复杂。依据盆地内克拉美丽气田、五彩湾气田、阜康凹陷、滴北凸起等地区井的岩心、薄片鉴定及分析化验数据, 在重点研究主力烃源岩松喀尔苏组 b 段特征的基础上, 结合盆地内火山岩储层特征及天然气来源, 分析石炭系火山岩天然气的成藏特征及勘探潜力。结果表明: 石炭系烃源岩在五彩湾凹陷、滴水泉凹陷及东道海子凹陷等地区广泛分布, 其中泥岩有机碳含量平均为 1.58%; 石炭系烃源岩有机质类型以Ⅲ型为主, 大部分达到高成熟阶段, 且火山活动增加了有机质的生烃能力。优质储集体以爆发相和溢流相为主, 孔隙和裂缝发育, 与上覆二叠系或石炭系内部致密层段形成良好的储盖组合, 靠近凹陷深部地区具备形成规模气藏的成藏条件, 滴南凸起、滴北凸起、北三台凸起和车拐地区具有较大勘探潜力。

关键词: 准噶尔盆地; 石炭系; 火山岩; 天然气

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.06.010

Gas accumulation characteristics and exploration potential of the Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin

Zhang Lu^{1,2}, Li Jian^{1,2}, Song Yong³, Chen Shijia⁴, Lu Jungang⁴, Guo Jianying^{1,2}, Zeng Yuan⁴, Cui Huiying^{1,2}

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 CNPC Key Laboratory of Natural Gas Reservoir Formation and Development; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company; 4 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University)

Abstract: The degree of oil and gas discovery varies greatly in Junggar Basin and the proven rate of natural gas is low. Till now, the Carboniferous volcanic rock has the largest natural gas reserves of the basin, however, it shows complex gas accumulation characteristics indicated by exploration practice. Based on the core, thin section observation and lab test data of wells in Kelameili Gas Field, Wucuiwan Gas field, Fukang Sag and Dibe Bulge, characteristics of the main source rocks of section b of Songkalsu Formation are studied, and the gas accumulation characteristics and exploration potential of the Carboniferous volcanic rocks are analyzed by combining with the studies on reservoir properties and gas sources. The results show that the source rocks of the Carboniferous are widely deposited in Wucuiwan Sag, Dishuiquan Bulge and Dongdaohaizi Sag, with an average TOC of 1.58%, organic matter type of mainly Type III, and mostly in high mature stage. In addition, volcanic activity has promoted the hydrocarbon generation capacity of organic matter. High quality reservoirs are dominated by volcanic rocks of explosive and overflow facies, with pores and fractures developed, forming a good reservoir-caprock assemblage with the overlying the Permian or internal the Carboniferous tight layers. The gas accumulation conditions in the deep sag area are favorable for forming large-scale gas reservoirs. The exploration potential is promising in Dinan Bulge, Dibe Bulge, Beisantai Bulge and Cheguai area.

Key words: Junggar Basin, Carboniferous, volcanic rock, natural gas

基金项目: 国家科技重大专项“大型气田成藏机制、富集规律与勘探新领域”(2016ZX05007-003); 中国石油天然气股份有限公司科技项目“复杂气藏成藏演化过程与定量表征”(2019B-0605)。

第一作者简介: 张璐(1988-), 女, 山东东营人, 硕士, 2013年毕业于山东科技大学, 工程师, 主要从事油气成藏研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区万庄44号信箱, 邮政编码: 065007。E-mail: zhanglu812@petrochina.com.cn

通信作者简介: 国建英(1971-), 男, 河北怀安人, 博士, 2009年毕业于中国矿业大学(北京), 高级工程师, 现从事石油、天然气地球化学及成藏研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100086。E-mail: gjy_17711224@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-08-02; 修改日期: 2021-10-25

0 引言

准噶尔盆地石炭系火山岩是盆地内目前天然气储量最多的层系,随着五彩湾、克拉美丽等气田的发现,石炭系天然气探明地质储量为 $1137 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1], 占总探明天然气地质储量的 54.3%, 是重要天然气勘探领域^[2]。从勘探程度看,天然气的探明率非常低^[1,3], 油气发现程度差别较大。勘探前期将石炭系作为盆地的“基底”, 勘探对象主要集中在盆地西北缘的“新生古储”型火山岩油气藏^[4]。随后勘探对象逐渐转变为以石炭系为烃源的火山岩油气藏^[5-6], 并证实了石炭系天然气成藏具有明显的源控特征^[7-8], 因此有效烃源岩的分布范围是勘探中需要研究的重点。

由于石炭系原始沉积构造复杂、后期改造强烈、地层埋深大及资料受限等影响,前期的研究工作主要集中在局部地区或露头剖面^[8-14], 缺乏对石炭系烃源岩平面分布的研究,以及不同凹陷内烃源岩生烃能力的评价。此外,部分气藏的气源问题存在争议,不同地区油气类型差异的原因等关键性问题上认识不够深入^[15]。为此,本文结合实际的钻井资料及前人的研究成果,重点对准噶尔盆地石炭系火山岩气藏的相关烃源岩展布、生烃特征等方面进行综合评价,并研究

不同区域天然气成因及来源,分析成藏的主控因素及油气富集的差异性,预测有利的勘探区带,为下部火山岩天然气勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

准噶尔盆地是一个由多类型盆地叠合而成的大型复合性含油气盆地,具有下部前寒武系结晶基底和上部古生界浅变质基底构成的双层基底^[16]。盆地受周缘造山带构造运动影响,经历了复杂的地体拼贴、盆地消减等构造演化过程,形成了复杂的构造格局^[17]。现今盆地可划分为两大拗陷、三大隆起和一个山前冲断带共 6 个一级构造单元^[18] (图 1)。

准噶尔盆地石炭系岩性横向变化较大,由于经历多期改造和长期分化作用,火山岩多旋回叠置,厚度大,分布范围广^[8]。石炭系分为上石炭统和下石炭统,下石炭统以深灰色泥岩、凝灰质泥岩及火山岩为主,横向上岩相存在巨大的变化,岩性可变化为红色泥岩和砂岩,地层包括滴水泉组 (C_1d) 和松喀尔苏组 (C_1s)。上石炭统以巴塔玛依内山组发育较广,钻遇井位较多,岩性以中基性—酸性火山熔岩和火山碎屑岩为主,发育少量沉积岩,整体厚度较大,颜色较杂 (图 1)。

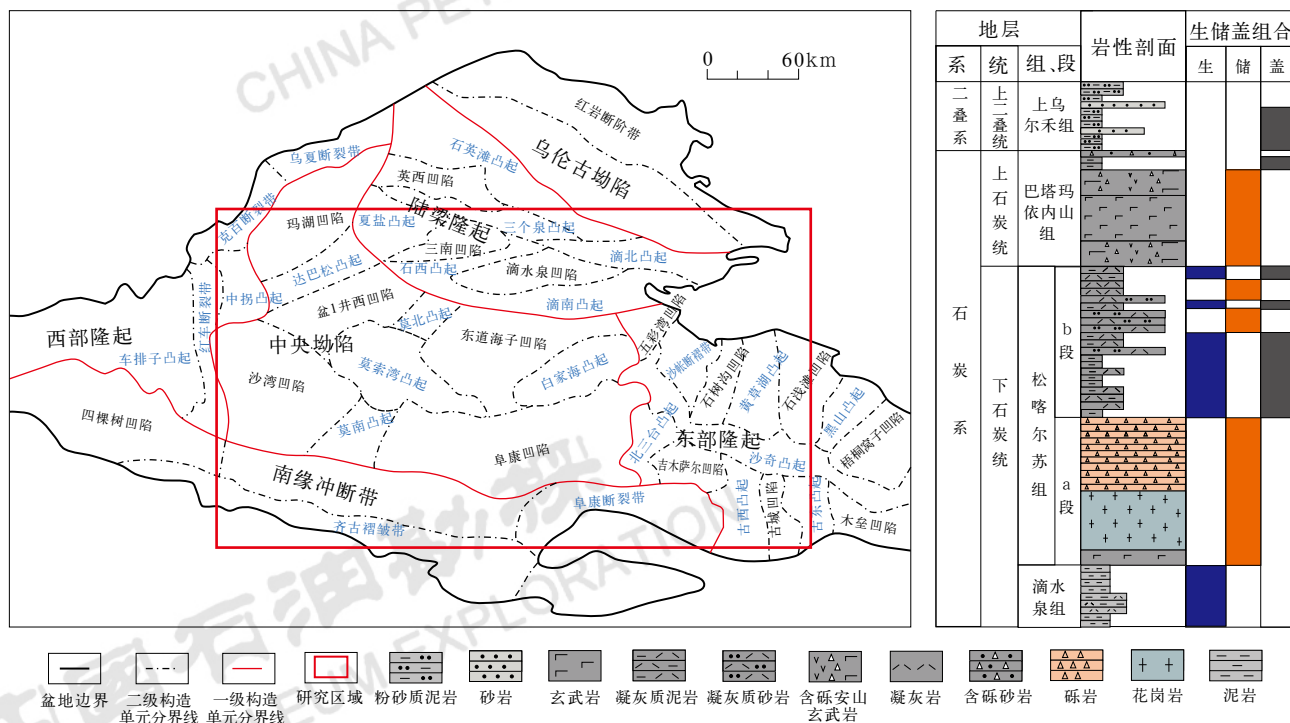


Fig.1 Division of structural units and comprehensive stratigraphic column of the Carboniferous-Permian in Junggar Basin (the left map is modified after reference [19])

2 石炭系火山岩气藏成藏条件

2.1 烃源岩特征

2.1.1 烃源岩分布

准噶尔盆地石炭系烃源岩主要为下石炭统滴水泉组和松喀尔苏组 b 段。滴水泉组烃源岩以泥岩为主, 由于钻揭程度相对较低, 目前认为其主要分布在早石炭世早期裂隙中, 分布较为局限。下石炭统松喀

尔苏组 b 段烃源岩以泥岩、凝灰质泥岩为主, 夹火山岩沉积, 是目前钻井证实的石炭系最有利的烃源岩层。松喀尔苏组 b 段烃源岩在滴水泉凹陷、东道海子凹陷、五彩湾凹陷、阜康凹陷内稳定分布, 属弧后盆地沉积产物; 在白家海凸起—滴南凸起南带呈条带状分布, 属岛弧带沉积产物^[8]。其中, 滴水泉凹陷、东道海子凹陷和五彩湾凹陷松喀尔苏组 b 段烃源岩厚度最大, 超过 200m, 其他地区为 0~150m (图 2)。

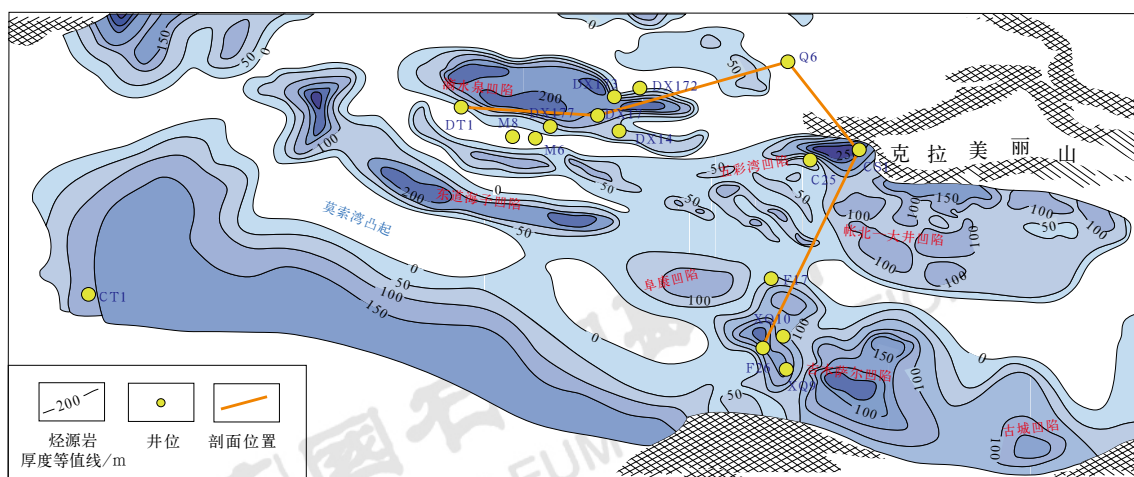


图 2 准噶尔盆地下石炭统松喀尔苏组 b 段烃源岩厚度分布图

Fig.2 Thickness map of source rocks of section b of the Lower Carboniferous Songkalsu Formation in Junggar Basin

2.1.2 有机质丰度

从层位来看, 松喀尔苏组 b 段烃源岩有机质丰度明显高于滴水泉组烃源岩 (表 1)。松喀尔苏组 b 段烃源岩有机碳含量 (TOC) 分布在 0.03%~27.87%, 有机碳含量大于 1% 的样品占 43.28%, 评价为好烃源岩。从区域来看, 准噶尔盆地不同凹陷石炭系烃源岩有机质丰度差异较大, 其中滴水泉凹陷泥岩有机碳含量平均大于 2%, 氯仿沥青“A”含量平均接近 0.22%, 为好烃源岩。阜康凹陷石炭系泥岩有机碳含量平均为 1.73%, 70% 暗色泥岩样品有机碳含量大于 2%, 氯仿沥青“A”含量平均大于 0.1%, S_1+S_2 平均为 16.07mg/g, 为好烃源岩。大井地区泥岩有机碳含量及氯仿沥青“A”含量相对较低, 总体属于中等烃源岩。五彩湾凹陷烃源岩有机质丰度相对较低, 松喀尔苏组 b 段泥岩氯仿沥青“A”含量平均为 0.0881%, 属于中等—好烃源岩。沙帐断褶带烃源岩属于较差烃源岩, 生烃能力非常有限。

从岩性来看, 由于火山活动形成的火山灰中富含的营养物质可以促进藻类底栖生物和细菌的大量繁殖^[20-24], 同时火山灰的迅速广泛覆盖可以保护刚刚富集的有机质, 对有机质的形成有富集效应^[25-26], 沉凝灰岩和凝灰岩有机碳含量虽不如泥岩, 但大部分都达到了生烃下限, 平均为 1.39% 和 0.81%^[4]。

2.1.3 有机质类型

准噶尔盆地石炭系烃源岩干酪根 H/C 值主要分布区间为 0.34~1.10, 平均为 0.83; O/C 值主要分布在 0.02~0.35, 平均为 0.15。结合烃源岩显微组分, 盆地内石炭系烃源岩有机质类型主要为Ⅲ型, 部分为Ⅱ型, 但是不同地区和不同层位存在一些差异 (表 2)。滴南凸起北分支和南分支“凹槽”处的烃源岩干酪根碳同位素普遍较轻, Ⅱ型有机质比例高于其他地区。从层位看, 滴水泉组和松喀尔苏组 b 段烃源岩差别不大, 均以Ⅲ型有机质占比更高。

表1 准噶尔盆地石炭系烃源岩有机质丰度及镜质组反射率统计表
Table 1 Statistics of TOC and R_o of the Carboniferous source rocks in Junggar Basin

地区	层位	岩性	有机质丰度			$R_o/\%$	数据来源
			TOC/%	氯仿沥青“A”/%	$S_1+S_2/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$		
滴水泉 凹陷	C_1S^b	泥岩	$\frac{0.03\sim 27.87^*}{2.74(122)}$	$\frac{0.0098\sim 1.0444}{0.2177(15)}$	$\frac{0.06\sim 71.41}{5.54(113)}$	$\frac{0.70\sim 1.80}{1.21(33)}$	文献[4]
		凝灰岩	$\frac{0.16\sim 1.27}{0.77(28)}$	$\frac{0.0034\sim 0.0090}{0.0065(3)}$	$\frac{0.01\sim 1.79}{0.41(28)}$	$\frac{0.66\sim 1.80}{1.37(21)}$	
		沉凝灰岩	$\frac{0.03\sim 4.19}{1.39(25)}$	$\frac{0.0066\sim 0.2545}{0.0367(22)}$	$\frac{0.05\sim 3.97}{0.97(49)}$	$\frac{0.81\sim 1.75}{1.49(7)}$	
五彩湾 凹陷	C_1S^b	泥岩	$\frac{0.03\sim 3.36}{0.92(113)}$	$\frac{0.0014\sim 1.4663}{0.0881(96)}$	$\frac{0.02\sim 8.62}{2.65(115)}$	$\frac{0.52\sim 2.38}{1.28(43)}$	文献[4]
		凝灰岩	$\frac{0.13\sim 2.48}{0.74(16)}$	$\frac{0.0009\sim 0.9679}{0.0745(21)}$	$\frac{0.07\sim 9.10}{2.00(15)}$	$\frac{0.70\sim 1.27}{1.06(4)}$	
	C_{1d}	泥岩	$\frac{0.18\sim 2.48}{0.85(9)}$	$\frac{0.0099\sim 1.3041}{0.2758(5)}$	$\frac{0.15\sim 10.87}{2.68(9)}$	$\frac{0.60\sim 2.00}{1.41(9)}$	
		凝灰岩	$\frac{0.23\sim 2.10}{0.71(7)}$	$\frac{0.0009\sim 0.0083}{0.0943(4)}$	$\frac{0.17\sim 6.60}{2.33(7)}$		
大井地区	C_1S^b	泥岩	$\frac{0.03\sim 2.52}{0.70(12)}$	$\frac{0.0024\sim 0.0112}{0.0056(3)}$	$\frac{0.02\sim 15.00}{1.49(12)}$	$\frac{0.64\sim 1.61}{1.32(3)}$	本文
沙帐断 褶带		泥岩	$\frac{0.05\sim 3.12}{0.57(54)}$	$\frac{0.0005\sim 0.1230}{0.0305(25)}$	$\frac{0.02\sim 4.56}{0.62(53)}$	$\frac{1.00\sim 2.00}{1.60(5)}$	
阜康凹陷		泥岩	$\frac{0.04\sim 4.40}{1.73(34)}$	$\frac{0.0025\sim 0.5852}{0.1666(20)}$	$\frac{0.01\sim 121.37}{16.07(34)}$	$\frac{0.48\sim 2.20}{0.94(22)}$	
		凝灰岩	$\frac{0.21\sim 3.68}{0.90(31)}$	$\frac{0.0004\sim 0.3167}{0.0422(27)}$	$\frac{0.03\sim 6.69}{1.29(31)}$	$\frac{0.68\sim 0.91}{0.71(6)}$	

* $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值 (样品数)}}$, 下同。

表2 准噶尔盆地不同地区石炭系烃源岩有机质类型参数统计表

Table 2 Statistics of organic matter type parameters of the Carboniferous source rocks in different areas of Junggar Basin

地区	层位	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	类型指数	有机质类型
滴水泉凹陷	C_{1s}^b	泥岩	$\frac{-26.2 \sim -21.28}{-24.26 (43)}$	$\frac{-79 \sim 58}{-31.7 (21)}$	Ⅱ ₁ —Ⅲ型
五彩湾凹陷	C_{1s}^b	泥岩	$\frac{-27.21 \sim -22.46}{-24.74 (31)}$	$\frac{-39 \sim -6}{-15.9 (10)}$	Ⅲ型
		凝灰岩	$\frac{-23.68 \sim -21}{-22.93 (4)}$	$\frac{-68 \sim -15}{-40.8 (6)}$	Ⅲ型
	C_{1d}	泥岩	-24.33 (1)	—	Ⅲ型
		凝灰岩	-23.51 (1)	—	Ⅲ型
沙帐断褶带	C_{1s}^b	泥岩	$\frac{-23.17 \sim -21.64}{-22.46 (7)}$	$\frac{-67 \sim 74}{-7.5 (8)}$	Ⅱ ₁ —Ⅲ型
大井地区	C_{1s}^b	泥岩	$\frac{-21.31 \sim -21.26}{-21.29 (2)}$	-6 (1)	Ⅲ型

2.1.4 有机质成熟度

从层位看,滴水泉组烃源岩成熟度最高, R_o 分布区间为 0.6%~2.0%, 大部分样品处于高一过成熟阶段; 其次为松喀尔苏组 b 段, R_o 主体分布在 0.48%~2.38%, 处在成熟—过成熟阶段。从典型井烃源岩深度与成熟度关系看, 埋深在 2000~3500m 的烃源岩 R_o 在 0.70%~1.3%, 处于成熟阶段; 埋深大于 3500m 的烃源岩多处在高成熟生油气阶段 (图 3)。

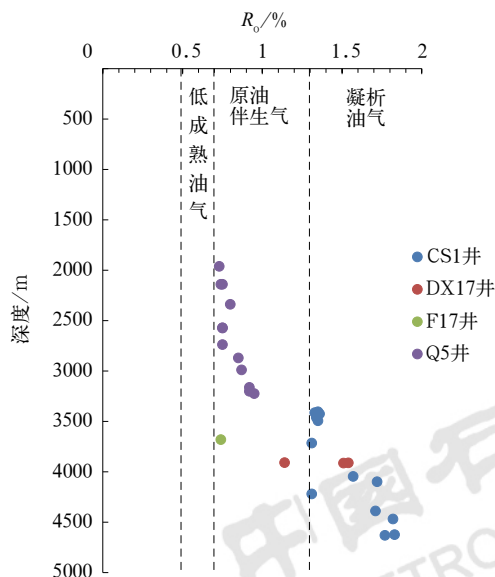


图3 准噶尔盆地典型井石炭系烃源岩埋深与 R_o 及产物关系图

Fig.3 Relationship between burial depth of the Carboniferous source rocks and R_o & products in typical wells

盆地内不同凹陷石炭系烃源岩成熟度差异较大。滴水泉凹陷、沙帐断褶带和大井地区石炭系烃源岩演化程度普遍较高 (图 4), R_o 主体分布在大于 1.3% 的范围内, 其中少数样品超过 2%; 乌伦古坳陷内石炭系烃源岩 R_o 在 1.3% 以上^[8]。五彩湾凹陷、阜康凹陷石炭系烃源岩演化程度相对较低, 尤其是阜康凹陷烃源岩 R_o 小于 1.0% 的样品占 70%, 尚处于成熟阶段 (图 4)。车排子凸起、三个泉—滴北凸起及白家海凸起等地区烃源岩热演化程度较低, 处于低成熟—成熟阶段^[8]。

2.2 储层特征

石炭系沉积时期, 火山活动频繁, 具有多期、多喷发和相互叠置的特点。火山口主要分布在断裂交会处, 火山活动多表现为裂隙式点喷发和多次喷发。平面上, 构造作用形成的深大断裂控制火山岩的空间分

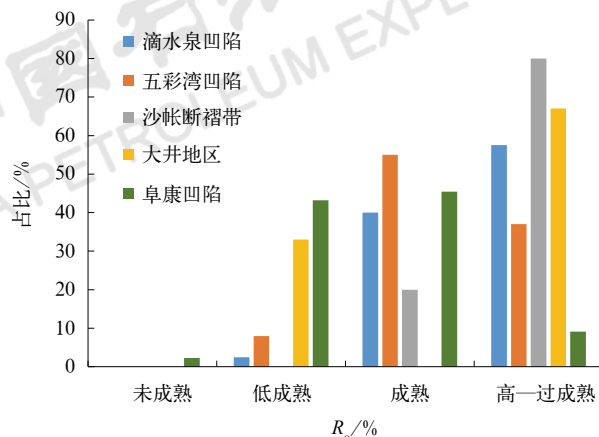


图4 准噶尔盆地不同地区石炭系松喀尔苏组烃源岩 R_o 分布柱状图

Fig.4 R_o distribution diagram of source rocks of the Carboniferous Songkalsu Formation in different areas of Junggar Basin

布, 火山岩相基本沿断裂带呈带状、对称分布。各个岩相类型均有发育, 以爆发相、溢流相为有利储层发育带。火山爆发相中的近火山口相主要发育火山角砾岩, 物性最好, 如 DX17 井。溢流相的岩石性脆, 受构造应力作用易产生裂缝, 且发育气孔、溶蚀孔等, 同样具有优良的储集性能, 而远离火山口相的火山岩一般物性较差。

准噶尔盆地石炭系油气富集区域火山岩储层变化快、岩性种类多, 岩浆性质以中基性为主, 部分为酸性, 主要发育玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、流纹岩、凝灰岩等。针对准噶尔盆地滴西地区 47 口井石炭系部分层段的孔隙度、渗透率进行统计分析, 石炭系火山岩储层较为发育, 局部物性好, 孔隙度分布于 0.4%~28.9%, 平均孔隙度为 11.11%; 渗透率分布于 0.01~142mD, 平均渗透率为 19.24mD。火山碎屑岩的孔隙最发育, 平均孔隙度为 14.8%; 其次为熔岩, 平均孔隙度为 12.8%, 属于高孔型储层; 浅成侵入岩的孔隙度最低, 平均孔隙度为 9.8%。

按照构成要素, 火成岩储集空间以孔隙和裂缝为主 (图 5), 粒间溶孔及溶蚀缝常见。准噶尔盆地东部火山喷发环境为海陆交互相的浅水喷发, 溶解于熔浆中的挥发组分可以大量逃逸形成原生气孔, 除此之外, 炽热岩浆突遇水体发生的淬火作用可形成大量原生冷凝收缩缝, 并把原生气孔很好地连通起来。各类储集空间一般不单独存在, 而是组合出现, 成为良好的储集空间。

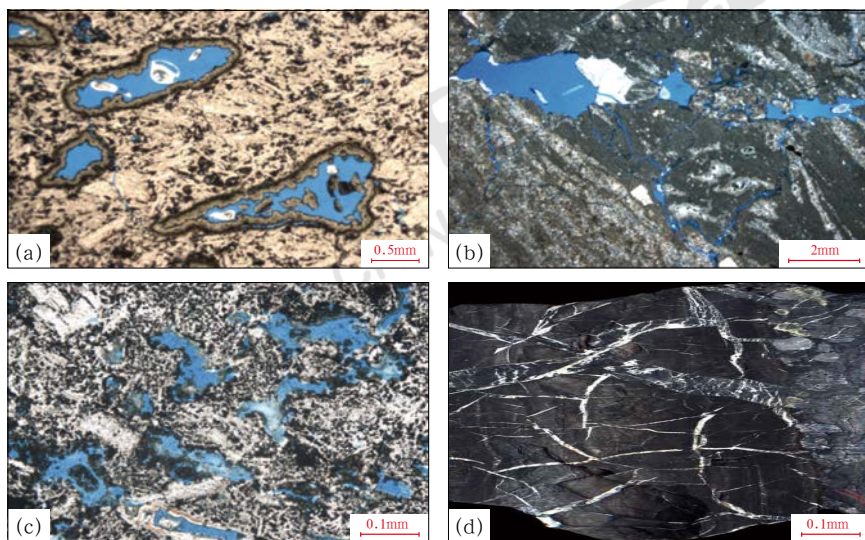


图5 准噶尔盆地石炭系火山岩储层储集空间类型

Fig.5 Types of reservoir space of the Carboniferous volcanic rock reservoirs in Junggar Basin

(a) 半充填气孔, 气孔状玄武岩, DX17 井, 3635.81m; (b) 裂缝—气孔型, 气孔状玄武岩, DX173 井, 3665.21m; (c) 基质溶孔及微裂缝发育, 玄武岩, DX172 井, 3499.78m; (d) 冷凝收缩缝, 角砾凝灰岩, DX14 井, 3960.35m

除岩性、岩相等控制因素外^[27-30], 二叠纪及其之后的风化淋滤和构造作用, 改善了火山岩储层的储集性能, 提供了油气储集空间及运移通道。火山岩风化壳储层主要分布于古地貌高部位、斜坡带和断裂发育处^[30], 如盆地西南缘、东部和陆梁隆起区^[1]。距离风化壳顶面越近, 储层储集能力越好, 在盆地西北缘和陆东—五彩湾地区, 油气层段主要分布在石炭系风化壳之下 200m 以内^[31]。

2.3 储盖组合特征

盖层条件也是火山岩气藏成藏的重要条件之一。准噶尔盆地内盖层岩性相对单一, 以泥岩为主。石炭系上覆的二叠系泥岩, 是石炭系巴塔玛依内山组断层—地层圈闭很好的顶板, 上乌尔禾组褐色、灰褐色泥岩, 在盆地中央坳陷区广泛分布, 向隆起带超覆减薄至尖灭, 厚度在 50~350m^[1]。

以克拉美丽气田为例, 共发育 3 种生储盖组合 (图 1): (1) 以下石炭统松喀尔苏组 b 段为主要烃源岩, 上石炭统巴塔玛依内山组火山岩为储层, 二叠系泥岩为盖层的生储盖组合; (2) 以松喀尔苏组 b 段为主要烃源岩, 其内部火山岩体为储层, 自身烃源岩为盖层的生储盖组合; (3) 以松喀尔苏组 b 段为主要烃源岩, 松喀尔苏组 a 段为储层, b 段致密岩体为盖层的生储盖组合。这些储盖组合为石炭系火山岩天然气成藏提供了良好的储集和保存条件。

3 典型气藏天然气成因与成藏模式

3.1 天然气成因及来源

目前, 把天然气组分特征和天然气碳同位素比值作为判识其成因信息的主要证据来源。滴南凸起南带断阶区相较于其他地区, 烃类气体特征最为明显, 甲烷含量平均占 95.36%, 干燥系数均达到 0.97, 属于典型的干气, 说明其演化程度很高; 其次为滴北凸起 Q6 井, 甲烷含量占 91.52%, 干燥系数达到 0.95, 属于干气且具有高成熟度; 克拉美丽气田及阜康凹陷西泉地区天然气干燥系数分布区间较大, 为 0.86~0.98, 大部分大于 0.9, 整体表现为干气与少量凝析气共存的格局; 五彩湾地区石炭系天然气干燥系数最小, 分布在 0.81~0.84, 属于典型的湿气 (图 6)。

除滴北凸起 Q6 井及阜康凹陷外, 准噶尔盆地其他地区石炭系天然气碳同位素普遍较重 (图 7)。克拉美丽气田石炭系天然气碳同位素分布范围较为集中, 甲烷碳同位素值普遍较高, 平均为 -29.88‰ , 乙烷碳同位素值主体分布在 $-27.8\text{‰} \sim -26.1\text{‰}$, 平均为 -26.92‰ , 说明其以腐殖型有机质来源为主, 为烃源岩高一过成熟阶段的产物, 应主要来自滴水泉凹陷石炭系烃源岩。

滴南凸起南带断阶区天然气碳同位素特征与克拉美丽气田特征一致, 为烃源岩高一过成熟阶段的

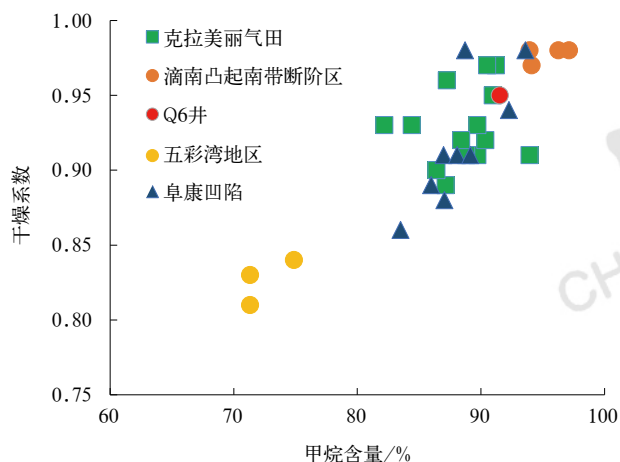


图6 准噶尔盆地石炭系火山岩气藏天然气甲烷含量与干燥系数关系图

Fig.6 Relationship between methane content and dry coefficient of the Carboniferous volcanic gas reservoir in Junggar Basin

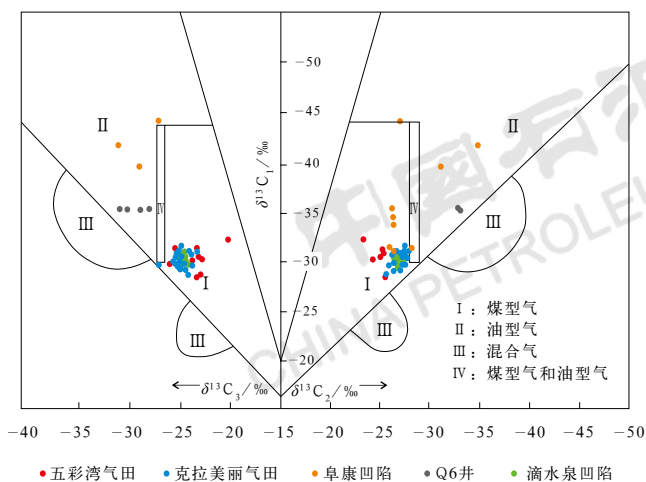


图7 准噶尔盆地不同地区天然气成因识别图

Fig.7 Genetic identification plate of natural gas in different areas of Junggar Basin

产物,是典型腐殖型有机质来源,可判识为石炭系来源,存在不同来源天然气混合的可能较小。Q6井天然气乙烷碳同位素值为 -32.72‰ ,小于滴北凸起其他井天然气。Q6井石炭系和侏罗系储层抽提物甾烷成熟度均较高,与乌伦古坳陷石炭系烃源岩特征一致^[32],说明Q6井储层抽提物不是构造上烃源岩提供的,应该来自乌伦古坳陷深部烃源岩。五彩湾气田甲烷碳同位素、乙烷碳同位素均较重,甲烷碳同位素值分布在 $-32.08\text{‰} \sim -28.27\text{‰}$,乙烷碳同位素值分布在 $-26.60\text{‰} \sim -23.28\text{‰}$,演化程度较高,属于典型的腐殖型有机质来源的高一过成熟阶段天然气,来源于五彩湾凹陷石炭系烃源岩。但五彩湾气田天然气组成特征与碳同位素特征存在矛盾,与周缘构造对比,其干燥系数明显较低,甲烷碳同位素较重的原因可能与保存条件有关。

3.2 典型气藏成藏模式

准噶尔盆地石炭系天然气成藏主要受断裂和不整合面控制,天然气由断裂纵向运移后主要集中在石炭系不整合面之下^[1]。通过不同地区典型火山岩气藏的解剖,分析盆地内不同的成藏模式(图8)。

滴南凸起石炭系火山岩成藏模式以自生自储为主,圈闭类型主要为构造圈闭或构造—岩性圈闭。滴水泉凹陷石炭系烃源岩在三叠纪进入成熟阶段,烃类产物以轻质油和湿气为主,气油比很低,这些产物沿周缘断裂运移至克拉美丽气田火山岩储层中,圈闭捕获以油为主^[4,33]。燕山中晚期,石炭系腐殖型有机质进入高成熟阶段,随着演化程度增加,第二次充注以气为主,主体干燥系数为 $0.90 \sim 0.96$ 。克拉美丽气田石炭系储层捕获该期产物,与早期成藏油气混合形成大规模油气藏。

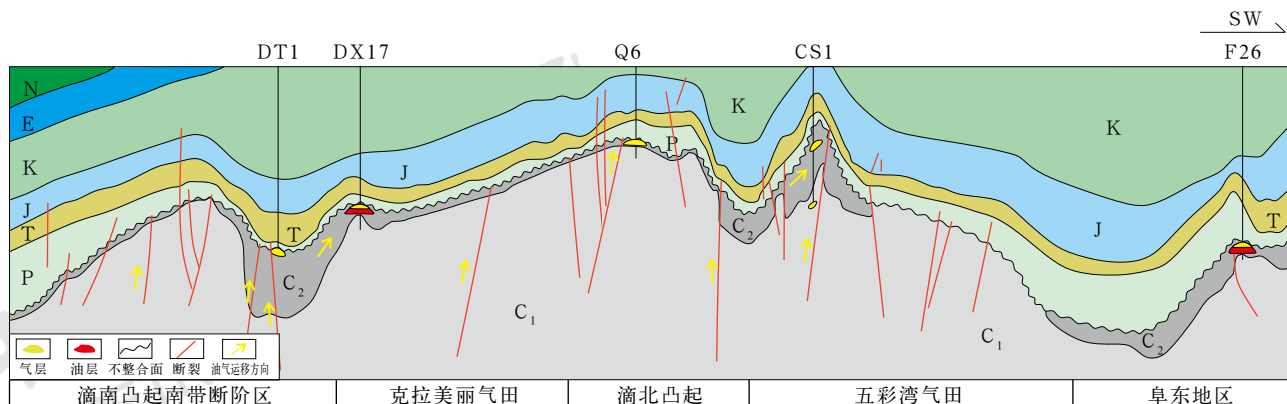


图8 准噶尔盆地典型气藏成藏模式图

Fig.8 Gas accumulation pattern of typical gas reservoirs in Junggar Basin

在滴南凸起南带断阶区, 由于巴塔玛依内山组和松喀尔苏组良好的源储匹配关系, 烃源岩生成的油气可沿断裂及不整合面运移至储层成藏, 构成良好的下生上储的成藏模式。区域内部巴塔玛依内山组尖灭线、上覆二叠系泥岩盖层及断层构成了多个断层—地层型圈闭。但该地区发现的均为干气藏, 天然气产量明显低于克拉美丽气田。从圈闭形成过程来看^[35], 克拉美丽气田断裂活动伴随地层尖灭产生, 控圈断裂断至三叠系下部, 说明圈闭形成时间在印支中晚期之前, 早于DT1井构造格局定型时间。结合烃源岩生烃演化史来看^[34], 松喀尔苏组b段烃源岩在三叠纪达到生烃高峰, 侏罗纪早期进入高成熟阶段, 克拉美丽气田DX17井构造形成时间早, 可捕获多个成熟阶段的烃源岩产物, 导致油气同出, 富集规模较大。而滴南凸起南带断阶区DT1井区圈闭在三叠纪时未形成, 未捕获到早期产物。因此, 同源不同期是导致二者油气藏类型不同的主要原因。

五彩湾地区石炭纪经历了多个成藏过程^[35-36], 海西期火山岩气藏良好的生储盖配置已经定型^[37], 印支晚期烃源岩达到成熟阶段, 天然气沿断裂向火山岩储层充注。燕山早期由于强烈的构造运动, 前期聚集的天然气遭到破坏而发生逸散。燕山中期, 由于地层沉降, 石炭系烃源岩达到高成熟甚至过成熟阶段, 但由于该时期五彩湾断鼻构造发生变化^[38], 圈闭的溢出点抬高, 天然气藏遭到破坏, 甲烷散失速度快, 导致形成湿气。

滴北凸起Q6井气藏由于天然气呈现腐泥型特征, 推测乌伦古坳陷深部存在腐泥型烃源岩。晚白垩世之后, 烃源岩进入成熟—高成熟阶段, 形成油藏或带气顶的油藏, 气顶的天然气扩散运移或原油裂解生气运移至石炭系上部储层中聚集成藏。阜东地区石炭系油气藏具有“泥包火”结构, 为岩性油气藏, 由于阜康凹陷目前本地的烃源岩演化程度较低, 主要处于成熟阶段, 推测该区天然气不是本地来源的产物, 应为凹陷深部的烃源岩产物经断裂和不整合面运移而成藏。

4 勘探潜力

准噶尔盆地石炭系烃源岩是大型火山岩天然气成藏的基础。石炭系沉积时期, 准噶尔盆地玛湖凹陷、沙湾凹陷、阜康凹陷、东道海子凹陷、滴水泉凹陷、五彩湾凹陷发育厚度较大、分布稳定的烃源岩。不同地区石炭系烃源岩生烃特征存在明显差异, 滴水泉凹陷和阜康凹陷石炭系烃源岩有机质丰度较高, 具有较

强的生排烃能力。勘探实践表明, 油气主要分布在烃源岩厚度较大的地区, 包括位于北部烃源槽克拉美丽气田、滴南凸起南分支北侧断阶区、五彩湾气田及阜康凹陷等^[39], 目前获得突破的地区均是在烃源岩厚度大于100m的供烃范围内; 在烃源岩厚度较小、生烃能力较弱的地区, 如大井地区, 石炭系烃源岩生烃能力较差, 天然气勘探效果较差。

与中国东部火山岩气藏成藏主控因素不同的是, 西部地区火山岩油气藏以地层不整合油气藏为主, 其分布受到区域不整合面的影响很大^[40-41]。准噶尔盆地内火山岩体在距风化壳400m范围内广泛发育^[1], 分布于三大隆起区, 长期遭受风化剥蚀, 储层储集空间主要为溶蚀孔和裂缝, 具有较好的储集渗流能力。优质储层与二叠系上乌尔禾组广泛分布的泥岩形成有效的储盖组合, 天然气成藏条件优越。根据第四次资源评价相关参数, 以及石炭系烃源岩最新的面积及厚度等研究结果, 估算石炭系天然气资源量为 $1.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 勘探潜力巨大。

结合成藏解剖, 准噶尔盆地石炭系火山岩气藏主要受烃源岩、储盖组合、构造演化及保存条件等因素综合控制。烃源岩分布及其生烃特征是大型火山岩气藏成藏的基础, 构造演化与烃源岩演化之间的时间匹配关系控制油气藏烃类类型及富集规模, 储盖组合和保存条件对该区油气富集具有重要的影响。对于火山岩气田的勘探, 应首先重点考虑烃源问题, 靠近凹陷深部地区烃源岩高一过成熟阶段的产物供烃丰富, 是形成火山岩气田的重要因素, 靠近凹陷深部地区的火山岩成藏更为有利。综合以上分析, 划定了石炭系有利勘探区块: 滴南凸起、滴北凸起、北三台凸起和车拐地区。

滴南凸起紧邻东道海子凹陷和滴水泉凹陷, 位于两大生烃中心的凸起带, 是油气运移的有利指向区, 尤其是北断阶区, 构造形成时间早, 可以捕获成熟—过成熟阶段油气, 勘探潜力大, 如克拉美丽气田。滴北凸起紧邻滴水泉凹陷和乌伦古坳陷, 乌伦古坳陷石炭系发育腐泥型烃源岩, 供烃能力充足, 有利于形成构造—岩性油气藏, 如Q6井。北三台凸起是阜康凹陷石炭系烃源岩生成的油气运移的有利指向区, 北三台凸起靠近阜康凹陷的斜坡区, 局部发育物性较好的火山岩储集体, 保存条件好, 有利于形成自生自储的岩性油气藏, 如F26井。车拐地区靠近沙湾凹陷, 沙湾凹陷石炭系烃源岩厚度大, 有机质丰度高, 处于过成熟阶段, 断裂带的下盘保存条件好, 成藏条件优

越, 同样是石炭系火山岩气藏勘探的有利区块, 如CT1井。

5 结论

(1) 通过系统性开展对准噶尔盆地下石炭统烃源岩生烃潜力评价, 指出下石炭统松喀尔苏组b段是石炭系主力烃源岩。准噶尔盆地下石炭统松喀尔苏组b段烃源岩分布广泛, 厚度为50~250m, 有机质含量高, 以Ⅲ型干酪根为主, R_o 主体分布在大于1.3%的范围内, 演化程度高, 为准噶尔盆地大型火山岩气藏形成奠定了物质基础。

(2) 准噶尔盆地火山岩气藏除了受烃源岩、储盖组合、构造演化及保存条件等宏观因素联合控制之外, 能否形成大型火山岩气藏主要与天然气的捕获阶段有关。对于腐殖型有机质而言, 晚期干酪根生气量有限, 若圈闭形成时间晚, 只能够捕获晚期过成熟阶段天然气, 难以形成大型火山岩气藏。

(3) 不同凹陷、不同层位烃源岩发育机制、生烃潜力与产物特征是准噶尔盆地火山岩气藏下一步研究的重点和难点。石炭系烃源岩非均质性较强, 部分区块烃源岩有机质丰度高, 演化程度也明显偏高, 火山活动对烃源岩有机质富集和演化的影响机理较为复杂。下石炭统滴水泉组和松喀尔苏组b段烃源岩有机质类型相似, 明确不同层位、不同热演化阶段烃源岩产物特征, 对于石炭系精细气源对比研究和资源潜力预测具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 胡素云, 王小军, 曹正林, 等. 准噶尔盆地大中型气田(藏)形成条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 247-259.
Hu Suyun, Wang Xiaojun, Cao Zhenglin, *et al.* Formation conditions and exploration direction of large and medium gas reservoirs in the Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 247-259.
- [2] 刘宝鸿, 张斌, 郭强, 等. 辽河拗陷东部凹陷深层火山岩气藏的发现与勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 33-43.
Liu Baohong, Zhang Bin, Guo Qiang, *et al.* Discovery and exploration inspiration of deep volcanic gas reservoirs in the eastern sag of the Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 33-43.
- [3] 杨海波, 王屿涛, 郭建辰, 等. 准噶尔盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1518-1530.
Yang Haibo, Wang Yutao, Guo Jianchen, *et al.* Geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1518-1530.
- [4] 曾源. 准噶尔盆地滴水泉凹陷周缘石炭系大型火山岩气田油气来源及成藏研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
Zeng Yuan. Study on hydrocarbon source and accumulation of Carboniferous large volcanic gas field around Dishuiquan Sag in Junggar Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [5] 匡立春, 吕焕通, 齐雪峰, 等. 准噶尔盆地岩性油气藏勘探成果和方向[J]. 石油勘探开发, 2005, 32(6): 32-38.
Kuang Lichun, Lv Huantong, Qi Xuefeng, *et al.* Exploration and targets for lithologic reservoirs in Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 32-38.
- [6] 余琪祥, 曹倩, 路清华, 等. 准噶尔盆地非常规油气资源分布特征及勘探前景[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(4): 66-72.
Yu Qixiang, Cao Qian, Lu Qinghua, *et al.* The distribution characteristics and exploration prospect of the unconventional hydrocarbon resources in Junggar Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2011, 1(4): 66-72.
- [7] 贺凯, 王菁, 谭强. 五彩湾凹陷石炭系油气成藏控制因素及勘探建议[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(4): 4-7.
He Kai, Wang Jing, Tan Qiang. The controlling factors of the oil and gas reservoir forming in Carboniferous, Wucuiwan Depression and some suggestions for exploration[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2002, 14(4): 4-7.
- [8] 王圣柱, 王千军, 张关龙, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 13-25.
Wang Shengzhu, Wang Qianjun, Zhang Guanlong, *et al.* Development mode and geochemical characteristics of Carboniferous source rocks in Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 13-25.
- [9] 王绪龙, 赵孟军, 向宝力, 等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系烃源岩[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 523-530.
Wang Xulong, Zhao Mengjun, Xiang Baoli, *et al.* Carboniferous source rocks in the Ludong-Wucuiwan area, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 523-530.
- [10] 贺凯, 庞瑶, 何治亮, 等. 准东地区石炭系烃源岩评价及重要意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 41-45.
He Kai, Pang Yao, He Zhiliang, *et al.* The evaluation and significance of the Carboniferous source rocks in the east Junggar area[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(6): 41-45.
- [11] 曲彦胜, 王圣柱, 李艳丽, 等. 乌伦古地区石炭系烃源岩生烃潜力评价[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 31-35.
Qu Yansheng, Wang Shengzhu, Li Yanli, *et al.* Hydrocarbon

- potential evaluation of Carboniferous source-rocks in Wulungu[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016,23(2):31-35.
- [12] 程世伟, 林会喜, 李艳丽, 等. 新疆北部石炭系烃源岩发育模式及潜力研究[J]. *特种油气藏*, 2018,25(6):55-59.
- Cheng Shiwei, Lin Huixi, Li Yanli, *et al.* Development patterns and potential of the Carboniferous source-rock in northern Xinjiang[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(6): 55-59.
- [13] 秦黎明, 张枝焕, 刘洪军, 等. 准噶尔盆地东北部恰库尔特草原北下石炭统南明水组烃源岩有机地球化学特征及其地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2008,19(6):761-769.
- Qin Liming, Zhang Zhihuan, Liu Hongjun, *et al.* Geochemical characteristics of Lower Carboniferous Nanmingshui Formation source rock and their geologic implications, Qiakuerte prairie, northeastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6):761-769.
- [14] 代春萌, 曾庆才, 李波, 等. 准噶尔盆地滴南凸起石炭系古火山机构地震特征及有利区预测[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(6):739-749.
- Dai Chunmeng, Zeng Qingcai, Li Bo, *et al.* Seismic characteristics of Carboniferous ancient volcanic edifices and prediction of favorable zones in the Dinan bulge of the Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(6):739-749.
- [15] 杨帆, 宋永, 陈洪, 等. 准噶尔盆地阜东地区石炭系松喀尔苏组烃源岩评价及气源对比[J]. *天然气地球科学*, 2019,30(7):1018-1026.
- Yang Fan, Song Yong, Chen Hong, *et al.* Evaluation of Carboniferous Songkaersu Formation source rocks and gas-source correlation in the Fukang Sag of eastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019,30(7):1018-1026.
- [16] 戴金星. 中国煤成大气田及气源[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Dai Jinxing. Coal-formed giant gas fields and gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [17] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018,39(5):845-861.
- He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, *et al.* Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018,39(5):845-861.
- [18] 龚德瑜, 王绪龙, 周川闽, 等. 准噶尔盆地东南部石炭系规模烃源岩的发现及天然气勘探潜力[J]. *石油学报*, 2021,42(7):836-852.
- Gong Deyu, Wang Xulong, Zhou Chuanmin, *et al.* Discovery of large-scale Carboniferous source rocks and natural gas exploration potential in the southeast of Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(7):836-852.
- [19] 王小军, 宋永, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地复合含油气系统与复式聚集成藏[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(4):29-43.
- Wang Xiaojun, Song Yong, Zheng Menglin, *et al.* Composite petroleum system and multi-stage hydrocarbon accumulation in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(4): 29-43.
- [20] Frogner P, Gislason S R, Oskarsson N. Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water[J]. *Geology*, 2001,29(6): 487-490.
- [21] 迟光宇, 陈欣, 史奕, 等. 铁对藻类生长的影响及其光谱识别研究展望[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009,29(12):3344-3347.
- Chi Guangyu, Chen Xin, Shi Yi, *et al.* Advance in study on the effects of iron on algal growth and spectral recognition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009,29(12):3344-3347.
- [22] 张文正, 杨华, 彭平安, 等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J]. *地球化学*, 2009,38(6):573-582.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, *et al.* The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2009,38(6):573-582.
- [23] 姚波, 席北斗, 胡春明, 等. 铁限制对浮游植物生长和群落组成的影响研究综述[J]. *生态环境学报*, 2010,19(2):459-465.
- Yao Bo, Xi Beidou, Hu Chunming, *et al.* A review of iron limitation on the growth and competition of phytoplankton[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010,19(2):459-465.
- [24] 金强. 裂谷盆地火山活动与油气藏的形成[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2001,25(1):27-29.
- Jin Qiang. Volcanic activities and oil/gas accumulation in the rift basins of the eastern China[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2001,25(1):27-29.
- [25] 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.
- [26] Luo Xia, Gong Se, Sun Fenjin, *et al.* Effect of volcanic activity on hydrocarbon generation: examples in Songliao, Qinsui, and Bohai Bay Basins in China[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2017,38:218-234.
- [27] 李治, 秦启荣, 李朋波, 等. 准噶尔腹部火山岩风化壳储层特征及其影响因素[J]. *地质找矿论丛*, 2018,33(4):589-596.
- Li Zhi, Qin Qirong, Li Pengbo, *et al.* Reservoir characteristics and influence factor of weathering volcanic crust: a case study of Carboniferous system of Shixi Oilfield in the center of Junggar Basin[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2018,33(4):589-596.
- [28] 石新朴, 覃建强, 丁艳雪, 等. 准噶尔盆地滴南凸起火山岩气藏成藏主控因素与成藏模式[J]. *天然气地球科学*, 2018,29(12):1706-1714.
- Shi Xinpu, Qin Jianqiang, Ding Yanxue, *et al.* Models and controlling factors of volcanic gas reservoirs forming in Dinan salient in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(12):1706-1714.
- [29] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石

- 油勘探与开发, 2012, 39(2): 129–136.
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129–136.
- [30] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义: 以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 257–265, 274.
- Hou Lianhua, Luo Xia, Wang Jinghong, *et al.* Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: a case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 257–265, 274.
- [31] 柳双权, 曹元婷, 赵光亮, 等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩油气藏成藏影响因素研究[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(5): 23–29.
- Liu Shuangquan, Cao Yuanting, Zhao Guangliang, *et al.* Influencing factors of Carboniferous volcanic reservoir in Ludong–Wucuiwan area, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(5): 23–29.
- [32] 陈世加, 陈雪, 路俊刚, 等. 准噶尔盆地滴北凸起天然气来源及成藏特征[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(1): 97–101.
- Chen Shijia, Chen Xue, Lu Jungang, *et al.* Characteristics of natural gas sources and accumulation in Dibe Uplift of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 97–101.
- [33] 黄志平. 准噶尔盆地克拉美丽气田天然气成因类型及成藏过程研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Huang Zhiping. Genetic types and accumulation process of natural gas in Kelameili Gas Field, Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [34] Lu Jungang, Luo Zhaoyang, Zou Hongliang, *et al.* Geochemical characteristics, origin, and mechanism of differential accumulation of natural gas in the Carboniferous Kelameili Gasfield in Junggar Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108658.
- [35] 王伟峰, 张仲达. 准噶尔盆地五彩湾地区石炭系烃源岩演化及油气成藏过程[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(4): 447–455.
- Wang Weifeng, Zhang Zhongda. Evolution of Carboniferous source rocks and hydrocarbon accumulation process in the area of the Wucuiwan area in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(4): 447–455.
- [36] 赵孟军, 王绪龙, 达江, 等. 准噶尔盆地滴南凸起—五彩湾地区天然气成因与成藏过程分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 595–601.
- Zhao Mengjun, Wang Xulong, Da Jiang, *et al.* Genetic origin of natural gas and its filling history in Dinan Uplift–Wucuiwan of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 595–601.
- [37] 吴小奇, 刘德良, 李振生. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区火山岩中天然气富集的主控因素[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(2): 318–327.
- Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng. The main controlling factors on the enrichment of natural gas in volcanic rocks in Ludong–Wucuiwan area, Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(2): 318–327.
- [38] 张明洁, 杨品. 准噶尔盆地石炭系(油)气藏特征及成藏条件分析[J]. *新疆石油学院学报*, 2020, 12(2): 8–13.
- Zhang Mingjie, Yang Pin. The characteristic and analysis of reservoir-forming conditions of the Carboniferous oil and gas pools in Junggar Basin[J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 2020, 12(2): 8–13.
- [39] 龚德瑜, 蓝文芳, 向辉, 等. 准噶尔盆地东部地区天然气地化特征与成因来源[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 142–152.
- Gong Deyu, Lan Wenfang, Xiang Hui, *et al.* Genetic types and origins of natural gases from the eastern Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 142–152.
- [40] 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(1): 1–11.
- Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Li Jianzhong, *et al.* Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 1–11.
- [41] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 403–417.
- Li Jian, She Yuanqi, Gao Yang, *et al.* Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 403–417.