



引文格式: 赵飞, 韩宝, 钟磊, 等. 准噶尔盆地中拐地区致密砂岩气成藏特征及富集规律[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 142-155. DOI: 10.12401/j.nwg.2023109

Citation: ZHAO Fei, HAN Bao, ZHONG Lei, et al. Accumulation Characteristics and Enrichment Regularity of Tight Sandstone Gas Reservoirs in Zhongguai Area, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 142-155. DOI: 10.12401/j.nwg.2023109

## 准噶尔盆地中拐地区致密砂岩气成藏特征及富集规律

赵飞<sup>1,2</sup>, 韩宝<sup>3</sup>, 钟磊<sup>3</sup>, 潘越扬<sup>4</sup>, 马尚伟<sup>1,2,\*</sup>, 许海红<sup>1,2</sup>, 韩小锋<sup>1,2</sup>, 郭望<sup>1,2</sup>, 魏东涛<sup>1,2</sup>

- (1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局北方古生界油气地质重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:** 致密砂岩气作为一种清洁高效的低碳能源, 对能源消费结构转型升级和实现“双碳”目标具有重要意义。准噶尔盆地西北缘中拐地区二叠系佳木河组致密砂岩气的成藏特征及富集规律认识不清。基于钻井、测井、三维地震、岩心和实验分析测试资料, 综合分析研究区致密砂岩气成藏地质特征、富集规律及高产主控因素。研究表明: 中拐地区二叠系佳木河组致密砂岩气类型主要由油型气、煤型气及混合气组成, 气源主要来自沙湾凹陷风城组及下乌尔禾组烃源岩, 佳木河组烃源岩可能供烃, 具有多源供烃特征; 气藏类型为岩性-地层圈闭型, 具有远源运移, 多期次聚集成藏特征; 致密储层受浊沸石矿物等溶蚀作用在局部地区形成物性相对较好的储层“甜点”, 其主要分布在研究区东部, 纵向上主要发育在 4 320~4 640 m 和 4 830~4 900 m 深度段, 高产层段主要集中在上部“甜点”带。致密砂岩气藏的富集及高产受控于有利成岩相带上的储层“甜点”和局部发育的古凸起及构造裂缝。

**关键词:** 致密砂岩气; 成藏特征; 富集规律; 佳木河组; 中拐地区; 准噶尔盆地

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0142-14

### Accumulation Characteristics and Enrichment Regularity of Tight Sandstone Gas Reservoirs in Zhongguai Area, Junggar Basin

ZHAO Fei<sup>1,2</sup>, HAN Bao<sup>3</sup>, ZHONG Lei<sup>3</sup>, PAN Yueyang<sup>4</sup>, MA Shangwei<sup>1,2,\*</sup>,  
XU Haihong<sup>1,2</sup>, HAN Xiaofeng<sup>1,2</sup>, GUO Wang<sup>1,2</sup>, WEI Dongtao<sup>1,2</sup>

- (1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center of Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Paleozoic Oil and Gas Geology in North China, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China; 4. Research Institute of Experiment and Detection, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China)

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-12-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目“基于地球物理多元属性的银额盆地西部火成岩识别方法研究”(2023-JC-YB-273), 中国地质调查局项目“河西走廊盆地群油气调查评价”(DD20230261), 国家油气重大专项“准噶尔盆地致密油形成条件、资源潜力及有利区优选”(2016ZX05046-006)联合资助。

作者简介: 赵飞(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质资源调查与评价。E-mail: 66583685@qq.com。

\* 通讯作者: 马尚伟(1985-), 男, 博士, 工程师, 从事油气地质学研究。E-mail: mashangwei123@163.com。

**Abstract:** As a kind of clean and efficient low-carbon energy, tight sandstone gas is of great significance to the transformation and upgrading of energy consumption structure and the realization of the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”. The formation characteristics and enrichment laws of tight sandstone gas in the Permian Jiamuhe Formation in Zhongguai area, northwest margin of the Junggar basin, are unclear. Based on drilling, logging, 3D seismic, core and experimental analysis and testing data, the geological characteristics, enrichment laws and main controlling factors for high production of tight sandstone gas reservoirs in the study area are comprehensively analyzed. The research results show that the tight sandstone gas type of the Permian Jiamuhe Formation in Zhongguai area is mainly composed of oil type gas, coal type gas and mixed gas. The gas source is mainly from the source rock of Fengcheng Formation and Lower Wuerhe Formation in Shawan Sag. The source rock of the Jiamuhe Formation may supply hydrocarbon, which has the characteristics of multi-source hydrocarbon supply; The gas reservoir type is a lithologic stratigraphic trap type, with characteristics of distant source migration and multi-stage accumulation and accumulation; The dense reservoir is eroded by turbidite minerals and other minerals, forming relatively good physical properties in local areas as reservoir “sweet spots”. They are mainly distributed in the eastern part of the study area, and vertically, they mainly develop in the depths of 4 320~4 640 m and 4 830~4 900 m, with high yield layers mainly concentrated in the upper “sweet spots” zone. The enrichment and high production of tight sandstone gas reservoirs are controlled by the favorable diagenetic facies zones of reservoir “sweet spots” and locally developed paleo-uplift and structural fractures.

**Keywords:** tight sandstone gas reservoir; accumulation characteristics; enrichment law; Jiamuhe Formation; Zhongguai area; Junggar basin

近年来,随着世界油气需求的持续增长与常规油气产量的不断下降,非常规油气勘探逐渐成为新的勘探领域,并受到高度重视(Zou et al., 2009, 2012; 赵靖舟, 2012; 邹才能等, 2013; Liu et al., 2013; 操应长等, 2018; Wu et al., 2022)。随着“连续性”和“非连续性”油气聚集理论不断创新(Gautier et al., 1995; Schmoker, 2002; 邹才能等, 2009; 赵靖舟等, 2013; Zhao et al., 2019)、大型压裂改造技术的突破、多井平台式“工厂化”开发模式的应用(孙龙德等, 2019; 王平等, 2022),非常规油气储量和产量呈现快速增长的趋势,已成为全球油气储量、产量增长的重点领域和研究热点(邹才能等, 2012, 2013; 金之钧等, 2021)。致密砂岩气作为非常规油气资源的重要类型之一(张杰等, 2019; 张道伟等, 2022; 汪海阁等, 2022; 宋学锋等, 2022),是目前开发规模最大的非常规天然气资源(Badre et al., 2006; Jiang, 2015; 魏国齐等, 2016; 孔星星等, 2020; 蔡勋育等, 2020)。致密砂岩气的定义大多以渗透率为依据,把覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (或空气渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )的砂岩称为致密砂岩(李建忠等, 2012)。全球致密砂岩气资源丰富,资源量约为 $2.037 \times 10^{12} \text{m}^3$ (赵靖舟, 2012; 李剑等, 2017)。已发现或推测发育致密砂岩气的盆地大

约有70个,主要分布在北美、欧洲和亚太地区(魏新善等, 2017)。北美地区是全球致密气发展最快、最好的地区,美国和加拿大在致密砂岩气资源勘探开发方面处于世界领先地位。其中,美国已在23个盆地发现了900多个致密砂岩气田,可采储量 $5 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,2020年致密砂岩气产量约为 $921 \times 10^8 \text{m}^3$ ,在天然气产量构成中占有重要地位(贾爱林等, 2022)。

随着储层大型压裂改造技术的规模化应用,中国致密砂岩气勘探开发取得了重大进展,先后在鄂尔多斯盆地和四川盆地发现了一批大型致密砂岩气田(Dai et al., 2014; Zhao et al., 2014; Lü et al., 2015; 蒙晓灵等, 2020; Huang et al., 2021; 林玉祥等, 2021; 刘君龙等, 2021)。此外,在塔里木盆地、吐哈盆地、松辽盆地和渤海湾盆地均获得致密砂岩气新发现(曾凡成等, 2021; 王继平等, 2021)。截至2020年底,中国陆上致密砂岩气总资源量为 $21.85 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,探明地质储量为 $5.49 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,产量达 $470 \times 10^8 \text{m}^3$ ,约占全国天然气总产量的30%,已成为继美国、加拿大外,位居世界第三大致密砂岩气产气国(刘忠群等, 2020)。因此,加快致密砂岩气高效勘探和规模效益开发,对实现碳达峰、碳中和的“双碳”目标具有重要意义(何春蕾等, 2022; 汪海阁等, 2022)。

准噶尔盆地致密砂岩气资源潜力大,盆地南缘和腹部侏罗系已发现致密砂岩气资源。近年来在盆地西北缘中拐凸起南斜坡二叠系佳木河组致密砂岩气也取得了重要发现,完钻的新光1井、拐3井日产气达  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,特别是中佳2-H井4 mm油嘴试产,获日产油 71.5 t,日产气  $9.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业油气流,进一步证实研究区佳木河组致密砂岩气勘探潜力较大。但对于该区致密砂岩气藏的成因类型及成藏特征不同学者具有不同的观点,杨德婷等(2017)研究认为该区致密砂岩气藏气源来自于佳木河组和风城组烃源岩;王屿涛等(2015)和何文军等(2018)认为该区致密砂岩气藏气源为自源型的佳木河组高成熟的腐殖型烃源岩,并且具有源储一体,气水关系倒置的特征。该区致密砂岩气藏气源观点多样,成藏特征不明,特别是致密砂岩气藏富集规律及高产主控因素研究更为薄弱。因此,笔者以中拐凸起

南斜坡二叠系佳木河组致密砂岩气为研究对象,通过钻井、测井、三维地震、岩心和实验分析测试等资料,对致密砂岩气成藏特征及富集规律进行研究,明确高产主控因素,为该区致密砂岩气藏的勘探开发提供技术支撑,为整个盆地致密砂岩气藏的高效勘探提供理论借鉴。

### 1 区域地质概况

准噶尔盆地是中国西部大型陆内叠合富含油盆地,盆地西北缘是重要的油气富集带(于景维等, 2021; 张誉洋等, 2022; 贾春明等, 2023; 张新远等, 2024)。中拐凸起位于准噶尔盆地西北缘克百断裂带和红军断裂带的转换部位,东邻达巴松凸起,北东以斜坡向玛湖凹陷过渡,南部以单斜形式倾向沙湾凹陷和盆1井西凹陷(图1a),整体被沙湾凹陷、盆1井

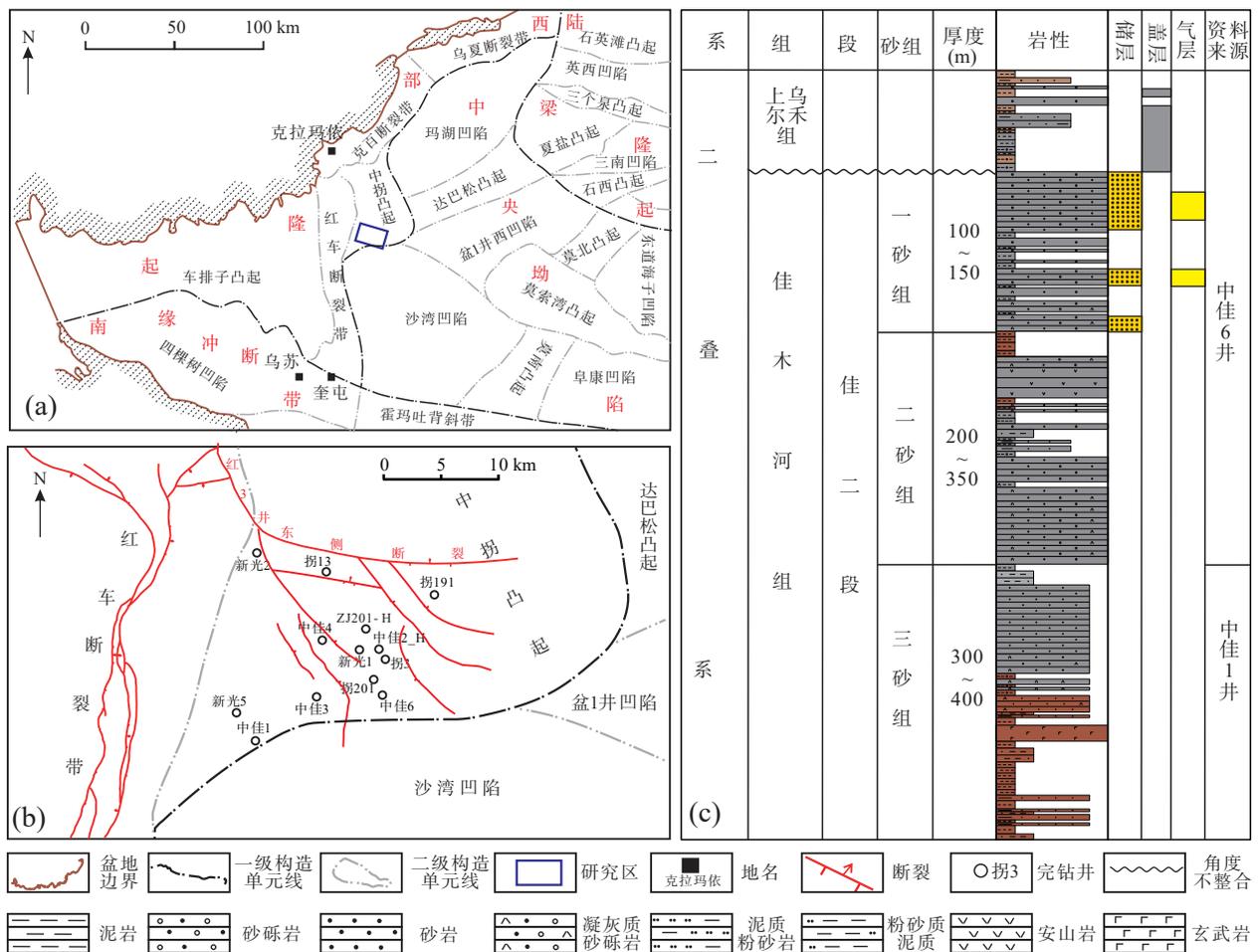


图1 研究区构造位置(a,b)及二叠系佳木河组佳二段综合柱状图(c)  
 Fig. 1 (a, b) Structural location of the study area and (c) comprehensive histogram of the 2nd member of Permian Jiamuhe Formation

西凹陷和玛湖凹陷3个富烃凹陷环绕,长期处于三大生烃凹陷的迎烃面,形态呈鼻隆,是油气有利富集区。石炭纪—二叠纪,中拐凸起及周缘构造活动强烈,地层隆起抬升,遭受剥蚀,造成二叠系佳木河组上部、风城组、夏子街组和下乌尔禾组缺失,上乌尔禾组直接填补补齐超覆沉积在佳木河组之上,形成不整合接触关系。研究区位于中拐凸起南斜坡,两侧受红车断裂带和红3井东侧断裂夹持(图1b),内部构造为一向南东倾的单斜,局部发育断层及与地层有关的鼻状构造。地层自下而上发育二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系,各层系均为区域性不整合。二叠系佳木河组自下而上分为3段,佳一段下部为深灰色凝灰质角砾岩、斑状粗面安山岩、角砾凝灰岩,上部灰色安山岩、玄武岩、粉砂质泥岩,黑色泥岩,是利烃源岩层段,由于埋藏深,区内未有井钻遇。佳二段自下而上分为3个砂层组(图1c),三砂组( $P_{j_2}^3$ )岩性主要为褐色泥岩、安山岩及浅灰色中砂岩为主;二砂组( $P_{j_2}^2$ )主要为浅灰色凝灰质砂砾岩、安山岩及褐色泥岩为主;一砂组( $P_{j_2}^1$ )主要为灰色含浊沸石砂砾岩,是研究区主要含气层段。佳三段由于构造抬升在中拐凸起南斜坡整体遭受剥蚀,造成地层缺失,与上覆上乌尔禾组呈角度不整合接触。上覆上乌尔禾组发育厚层状泥岩,分布稳定,为区域性盖层,可为致密气层提供良好的封盖条件。

## 2 致密砂岩气成藏特征

### 2.1 致密砂岩气具有多源供烃特征

中拐凸起周缘三大富烃凹陷中二叠系烃源岩是准噶尔盆地最主要的烃源岩。烃源岩主要发育于下二叠统风城组、中二叠统下乌尔禾组和下二叠统佳木河组。

根据钻井烃源岩地球化学分析数据,风城组烃源岩有机质含量平均为1.26%,氯仿沥青“A”含量平均为0.1493%,生烃母质以I、II型为主,Ro值为0.85%~1.22%,为成熟—高成熟的腐泥型烃源岩,三大生烃凹陷均有分布。其中,沙湾凹陷烃源岩厚度最大200m,以油型气为主(图2a);下乌尔禾组烃源岩有机质含量平均为1.73%,氯仿沥青“A”含量平均为0.18%,生烃母质以II<sub>2</sub>和III型为主,Ro值为0.90%~1.45%,为成熟—高成熟的混合型烃源岩,稳定分布于三大凹陷内,沙湾凹陷烃源岩厚度最大近200m(图2b)。佳木河组

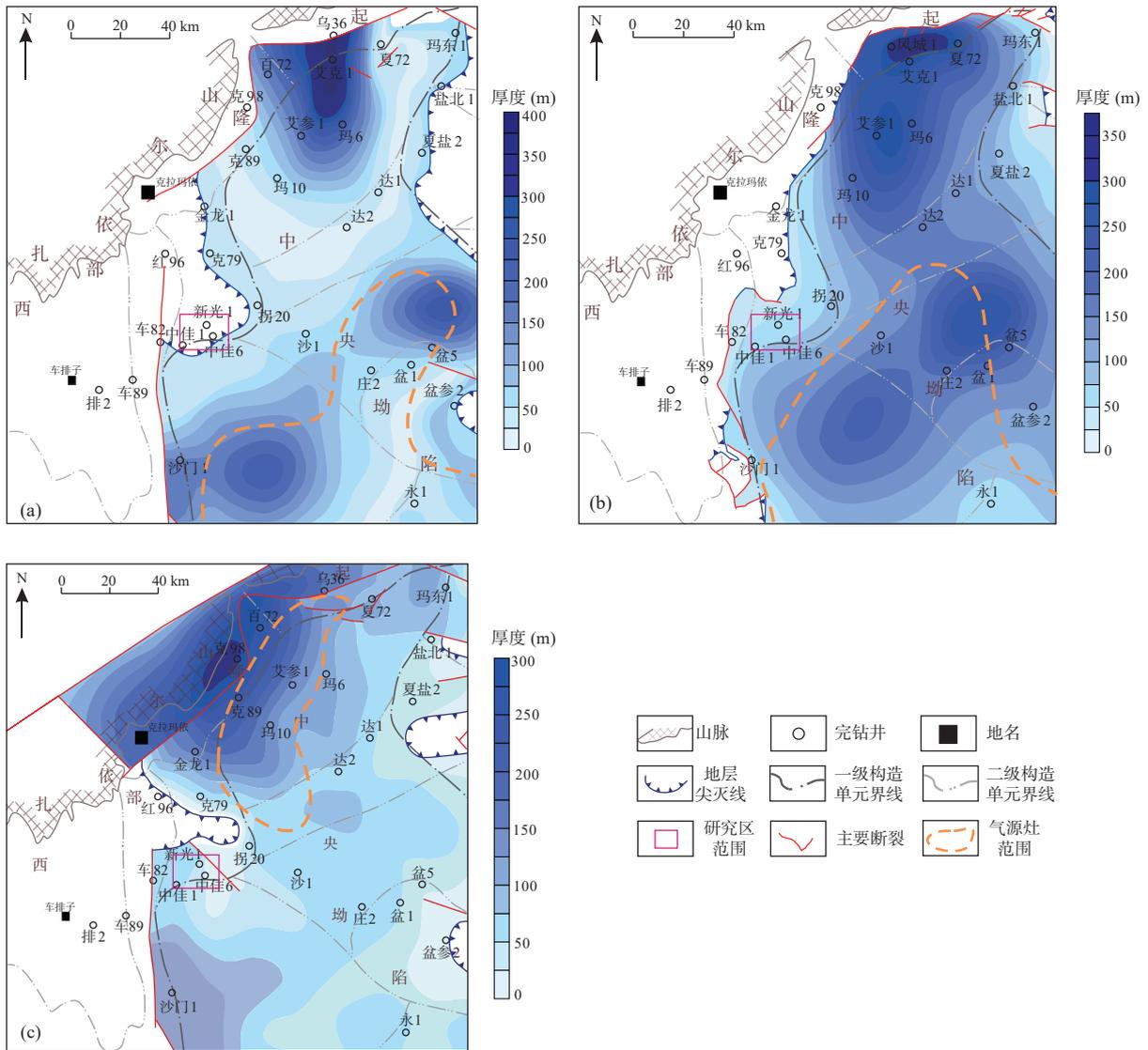
烃源岩有机质丰度较低,有机碳含量平均为0.56%,氯仿沥青“A”含量平均为0.0088%,生烃母质以III型干酪根为主,为腐殖型差—中等烃源岩,有机质热演化程度总体上较高,Ro值为1.38%~1.90%,已达到高—过成熟阶段,烃源岩主要分布在盆地西北缘克百断裂带,最大厚度300m(图2c)。

在轻烃组分中,六元环烃主要来自高等植物来源的腐殖型母质,五元环烃主要来自低等水生生物的腐泥型母质。其中,六元环烃的甲基环己烷和环己烷浓度相对较高,且在热演化过程中,具有较好的热力学稳定性。因此,甲基环己烷指数和环己烷指数可作为轻烃指纹指示气源的母质类型(胡惕麟等,1990)。中拐地区9个天然气样品甲基环己烷指数分布表明,6个样品气源为腐泥型烃源岩,可能来自于二叠系风城组烃源岩供烃;3个样品气源为腐殖型烃源岩,可能来自于中二叠统下乌尔禾组和下二叠统佳木河组供烃。环己烷三元图(图3b)以27%±2%为界,也同样表明以上观点。李二庭等(2019)对中拐地区烃源岩进行热模拟研究结果表明,下乌尔禾组烃源岩生气潜力较大,较佳木河组更有可能是该地区主力烃源岩层。

天然气稳定C同位素组成是反映气源母质类型和成熟度的重要指标,并常用来鉴别天然气的成因类型。根据天然气地球化学分析数据(表1),中拐地区佳木河组天然气中甲烷含量为92.72%~94.03%,干燥系数平均为0.96,属干气。天然气C同位素中甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值为-34.06‰~32.42‰,乙烷C同位素 $\delta^{13}C_2$ 值为-27.28‰~29.34‰,丙烷C同位素 $\delta^{13}C_3$ 值为-28.65‰~26.53‰。根据天然气C同位素成因鉴别(图4),佳木河组天然气有煤型气、油型气及混合型气多种类型。研究区近邻沙湾凹陷,气藏受风城组及下乌尔禾组气源灶影响较明显。结合轻烃指纹判别,说明佳木河组气源主要来源于风城组和上乌尔禾组烃源岩,佳木河组烃源岩也可能供烃,具有多源和混源供烃特征。

### 2.2 浊沸石矿物的发育是形成储层甜点的主要特征

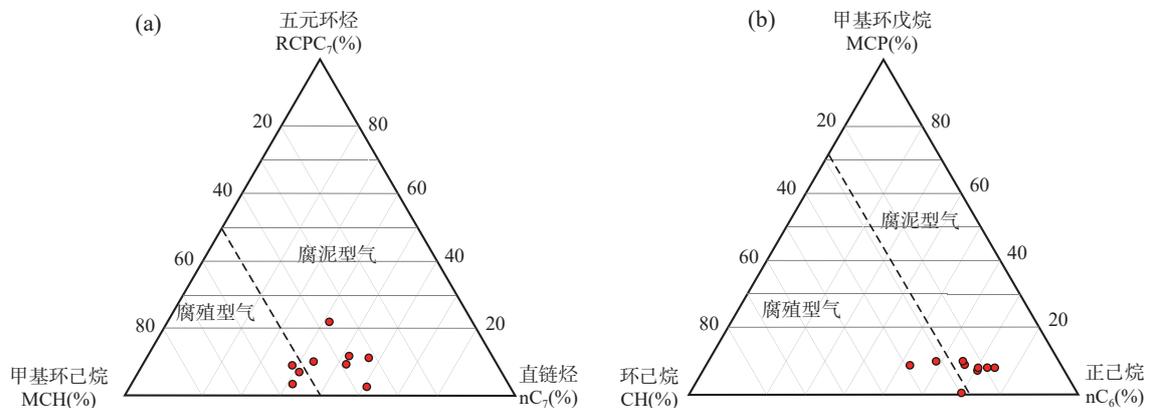
根据岩心物性数据分析,佳木河组储层孔隙度为0.5%~17.8%,平均为10.5%;空气渗透率为 $0.0110^3 \mu\text{m}^2 \sim 30.26 \times 10^3 \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.21 \times 10^3 \mu\text{m}^2$ 。压汞资料分析表明,储层以细孔隙—微喉道为主,孔隙分选较差,最大孔喉半径为0.45~5.7 $\mu\text{m}$ ,平均为2.5 $\mu\text{m}$ ;毛管半径为0.10~9.9 $\mu\text{m}$ ,平均为0.85 $\mu\text{m}$ ,储层渗流条件整体较差,属于典型致密砂岩储集层。



a. 风城组烃源岩及气源灶分布; b. 下乌尔禾组烃源岩及气源灶分布; c. 佳木河组烃源岩及气源灶分布

图2 准噶尔盆地西北缘二叠系烃源岩厚度及气源灶分布图

Fig. 2 Distribution of Permian source rocks thickness and gas kitchen in northwestern margin of Junggar basin



a. 天然气甲基环己烷指数分布图; b. 天然气环己烷指数分布图

图3 典型轻烃参数特征图

Fig. 3 Characteristics of typical light hydrocarbon parameters

表 1 研究区佳木河组天然气组分及 C 同位素组成表

Tab. 1 Natural gas composition and carbon isotope composition of Jiamuhe Formation

井号	层位	含量 (%)		天然气碳同位素 $\delta^{13}C$ (‰)		
		甲烷	$C_1/C_{1-5}$	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$
中佳2	$P_{j_2}^1$	94.03	0.96	-33.13	-27.87	-27.42
	$P_{j_2}^1$	93.39	0.95	-34.06	-29.34	-28.65
中佳6	$P_{j_2}^1$	93.88	0.96	-34.03	-28.66	-28.5
	$P_{j_2}^1$	93.46	0.95	-33.47	-28.05	-27.97
新光1	$P_{j_2}^1$	92.72	0.96	-32.60	-27.44	-26.53
	$P_{j_2}^1$	92.45	0.96	-32.42	-27.28	-26.59

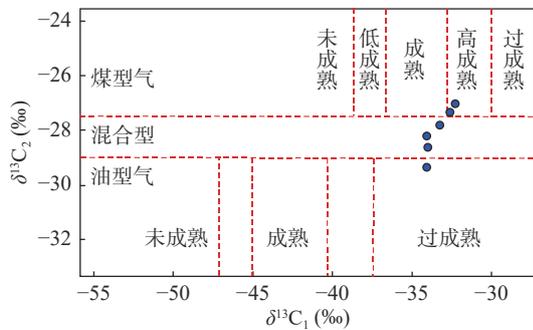


图 4 中拐地区佳木河组天然气  $\delta^{13}C_2$  与  $\delta^{13}C_1$  关系图 (底图据孙平安等, 2012)

Fig. 4 Cross plot of  $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}C_1$  of natural gas of Jiamuhe Formation in Zhongguai area

岩心物性与储层埋深关系发现(图 5a), 孔隙度和渗透率整体随储层埋藏深度的增大呈减小趋势, 但局部发育两个物性相对较好的储层甜点带, 深度主要为佳二段 4 320~4 650 m 和 4 830~4 900 m。目前, 高产层段主要集中在上部储层甜点段。从平面上来看, 储层佳二段甜点区主要分布于研究区东部(图 5b)。

研究区佳木河组佳二段储层形成于扇三角洲前缘亚相沉积环境, 为近源快速堆积的砂砾岩沉积, 砾石大小不等, 分选中等-差, 呈次棱-次圆状。颗粒间以点-线接触和线接触为主, 颗粒支撑。广泛发育沸石类矿物, 以胶结物形式充填于各类孔隙之中。其中, 浊沸石含量较高, 平均含量为 7.45%, 是最主要的胶结物。

根据储层微观结构分析, 佳木河组储层孔隙类型以次生溶蚀孔隙为主, 微裂缝较发育(图 6)。其中, 在粗粒径-中等压实-中强胶结-溶蚀成岩相形成的浊沸石溶孔是区内最主要的次生溶蚀孔类型(吴和源等,

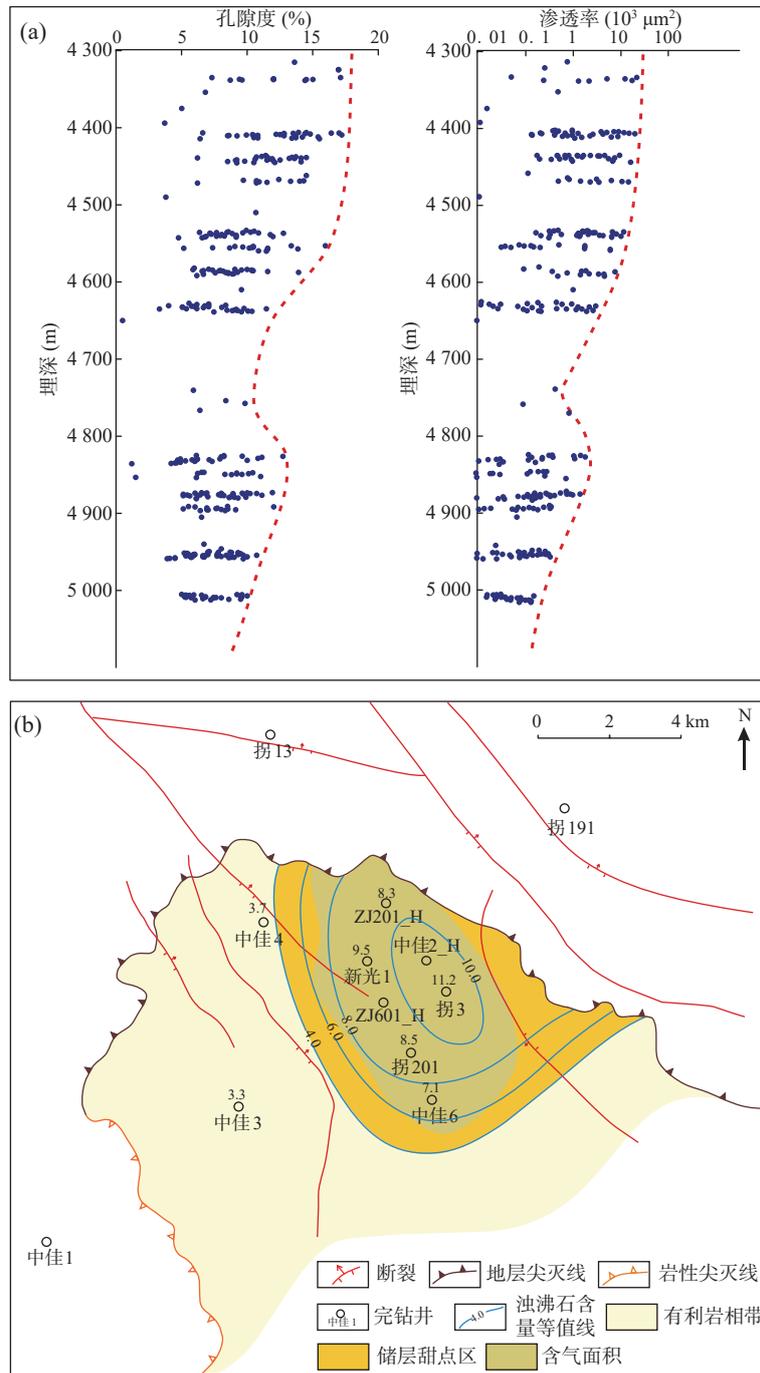
2017), 该溶蚀孔的发育程度与储层孔隙度有很好的正相关性(图 7a), 浊沸石溶蚀孔越大, 物性越高。同时, 储层中浊沸石含量与孔隙度也具有正相关性(图 7b), 浊沸石含量小于 4%, 孔隙度小于 8.5%(气藏物性下限), 当浊沸石含量大于 4% 时, 浊沸石含量越高, 储层孔隙度越高, 易形成物性相对较好的储层甜点。

在成岩作用早期, 受红 3 井东侧断裂及分支断裂的影响, 佳二段地层在沉积及后期, 大气降水沿断层不断进入地层, 加速了不稳定的富硅铝火山玻璃和长石类矿物的水解作用, 使其释放出碱质离子, 提高了水溶液的 pH 值, 使溶液呈强碱性, 在火山堆积物余热或深部热液影响下, 岩层温度升高, 促使碱性溶液与 Si、Al 等物质作用形成浊沸石(李振华等, 2014)。在碱性地层水作用下, 浊沸石矿物大量析出并充填于颗粒之间的原生粒间孔中, 使储层致密化。随后的构造抬升与再沉积降阶段, 在大气淡水淋滤及油气充注过程中伴随的有机酸液作用下浊沸石发生溶蚀作用, 产生大量的溶蚀孔隙, 从而有效改善佳木河组砂砾岩的储集性能。此外, 由于构造应力作用的影响, 储层中所发育的微裂缝也有效地提高了储层的储集性能。同时, 微裂缝可作为有机酸的通道, 促进浊沸石矿物的溶蚀作用, 形成致密背景下, 物性相对较好的储层甜点。综上所述, 浊沸石矿物的发育是形成佳二段储层甜点的主要特征。

### 2.3 多期油气充注在岩性-地层圈闭中成藏

致密砂岩的分布范围是致密砂岩气藏能否大面积分布的决定性因素。准噶尔盆地西北缘中拐凸起在二叠纪时经历了多期构造运动, 造成地层多次抬升、剥蚀、尖灭, 控制了中下二叠统、特别是佳木河组的展布。受构造抬升与沉降及佳木河组沉积体系的影响, 佳二段一砂组在凸起北部及东部剥蚀尖灭, 在西部岩性尖灭形成岩性-地层圈闭(图 8a), 圈闭的北侧和东侧由地层削蚀尖灭线控制, 西侧为岩性控制(图 8b), 整体形成一个以较平缓的构造单斜形态倾向于东南部的沙湾凹陷内的岩性-地层圈闭类型, 地层倾角为 3°~5°。

通过地层埋藏式和演化史表明(图 9), 佳木河组沉积早期, 快速埋藏阶段由于机械压实作用粒间孔隙快速减少。在二叠系中晚期, 由于构造抬升, 造成佳木河组佳二段一砂组顶部和佳三段地层缺失。在二叠系晚期, 构造沉降, 上乌禾组开始接受沉积。三叠



a. 纵向分布图; b. 平面分布图

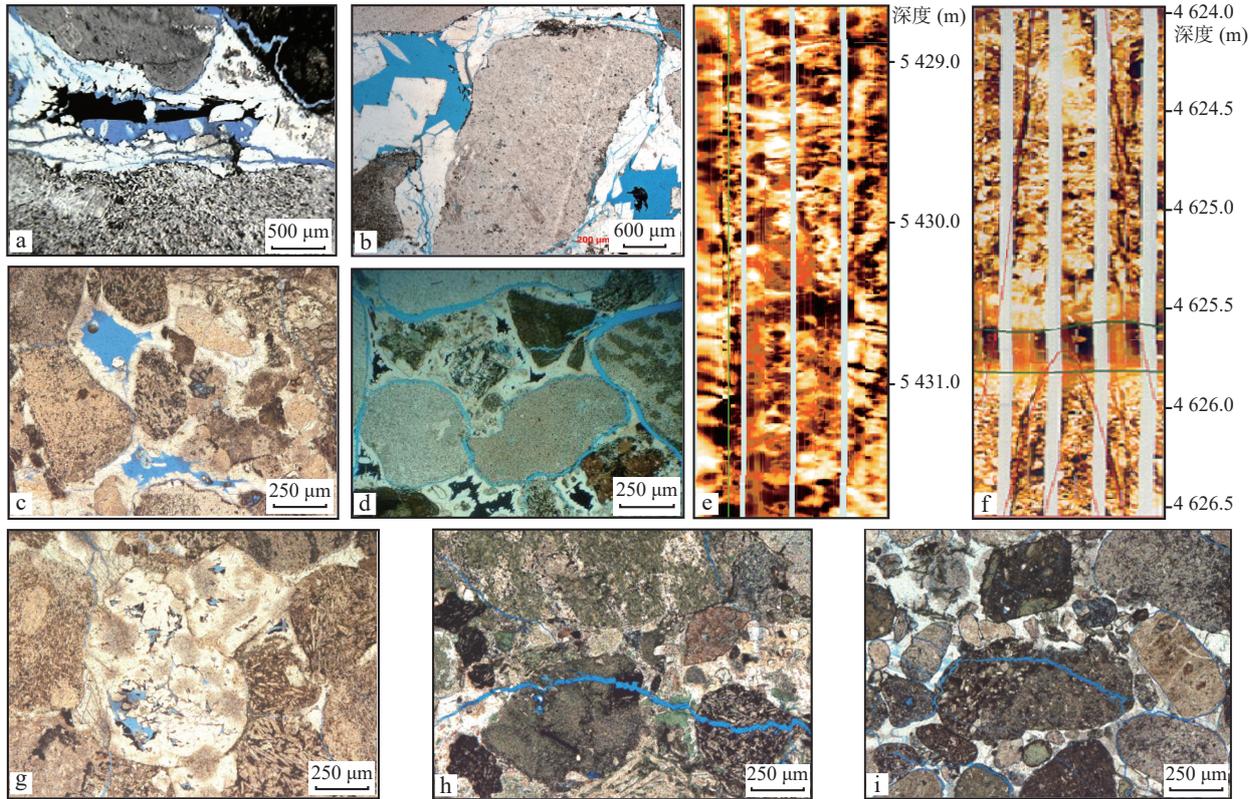
图5 佳木河组佳二段  $P_{1j_2}^1$  砂层组储层甜点分布图

Fig. 5 Distribution of sweet spot in  $P_{1j_2}^1$  sand formation of the second member of Jiamuhe Formation

纪末—早侏罗世 (228~206 Ma) 及早白垩世 (145~112 Ma) (李振华等, 2013) 来源于沙湾凹陷内风城组烃源岩、下乌尔禾组烃源岩开始大量生排烃, 天然气主要沿断裂及不整合面运移, 在佳木河组佳二段聚集成藏 (图 10), 形成了研究区多期油气充注在岩性-地层圈闭中成藏特征。

### 3 致密砂岩气富集规律

致密砂岩储层本身属于特低孔渗储层, 储层非均质性强, 油气成藏机制复杂, 但其富集程度主要受有利相带、优质储层、裂缝发育程度及局部构造等“甜



a. 浊沸石溶蚀孔, 溶蚀缝, 部分孔后期被沥青质充填, 铸体单偏光, 新光 1 井, 4 558.06 m; b. 浊沸石溶蚀孔, 溶蚀缝, 部分孔后期被沥青质充填, 铸体单偏光, 新光 1 井, 4 586.42 m; c. 浊沸石溶蚀孔, 微裂缝, 铸体单偏光, 中佳 4 井, 4 637.36 m; d. 浊沸石溶蚀孔, 后期被沥青充填, 粒缘缝发育, 铸体单偏光, 新光 1 井, 4 553.09 m; e. 微裂缝, 中佳 2 井, FMI 成像测井; f. 微裂缝, 拐 3 井, FMI 成像测井; g. 浊沸石溶蚀孔, 微裂缝, 铸体单偏光, 中佳 4 井, 4 636.61 m; h. 微裂缝, 凝灰岩岩屑溶孔, 铸体单偏光, 中佳 6 井, 4 956.53 m; i. 微裂缝, 凝灰岩岩屑溶孔, 浊沸石溶蚀孔, 铸体单偏光, 中佳 6 井, 4 873.12 m

图6 佳木河组佳二段  $P_{1j_2^1}$  砂层组储集层空间类型

Fig. 6 Reservoir space type of  $P_{1j_2^1}$  sand formation of Jiamuhe Formation

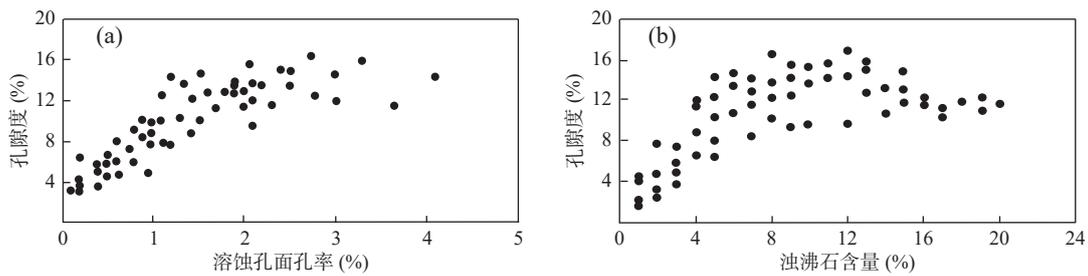


图7 佳木河组佳二段  $P_{1j_2^1}$  砂层组物性与面孔率(a)及浊沸石含量关系图(b)

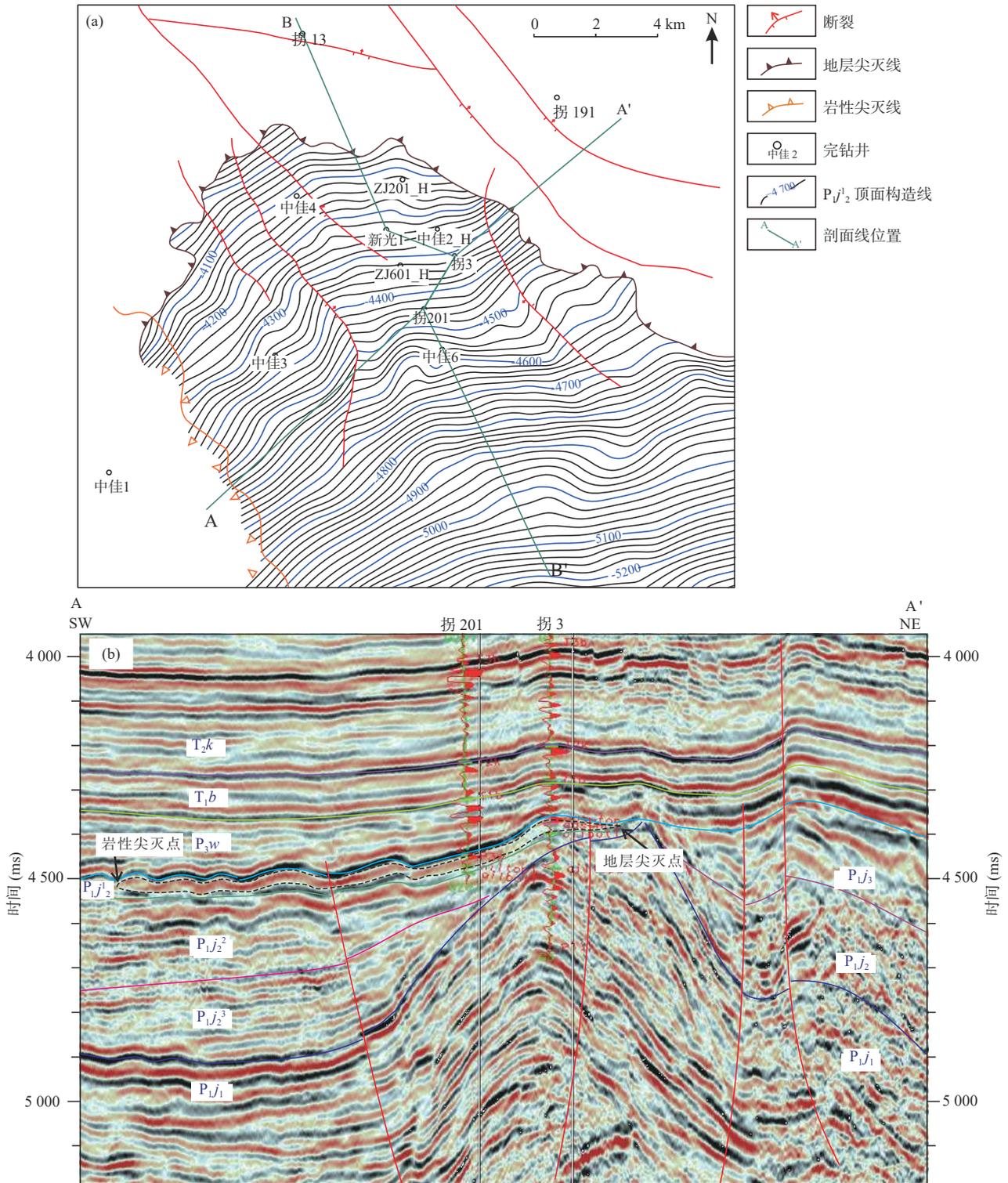
Fig. 7 The relationship between physical property and (a) plane porosity or (b) laumonite content of  $P_{1j_2^1}$  sand formation of Jiamuhe Formation

点”体控制, 呈现局部富集的特点(李建忠等, 2012; 康玉柱, 2016)。佳木河组致密砂岩气藏主要受控于有利的成岩相带的局部储层“甜点”及局部发育的古凸起构造裂缝。

### 3.1 有利成岩相带中的局部储层“甜点”控制油气富集

研究表明, 岩性岩相和成岩作用是控制研究区致

密砂砾岩储层物性发育的主要原因。特定的沉积微相决定了储层的岩石组成和孔隙类型, 机械压实作用和胶结作用控制了整体孔隙度的大小, 地层水和有机酸与不稳定矿物的溶蚀作用是储层改造的重要因素(杨升宇等, 2013)。佳木河组致密砂岩储层发育于扇三角洲前缘水下分流河道沉积背景, 储层中富含浊沸石矿物。成岩过程中, 抗压实能力差, 原生粒间孔隙



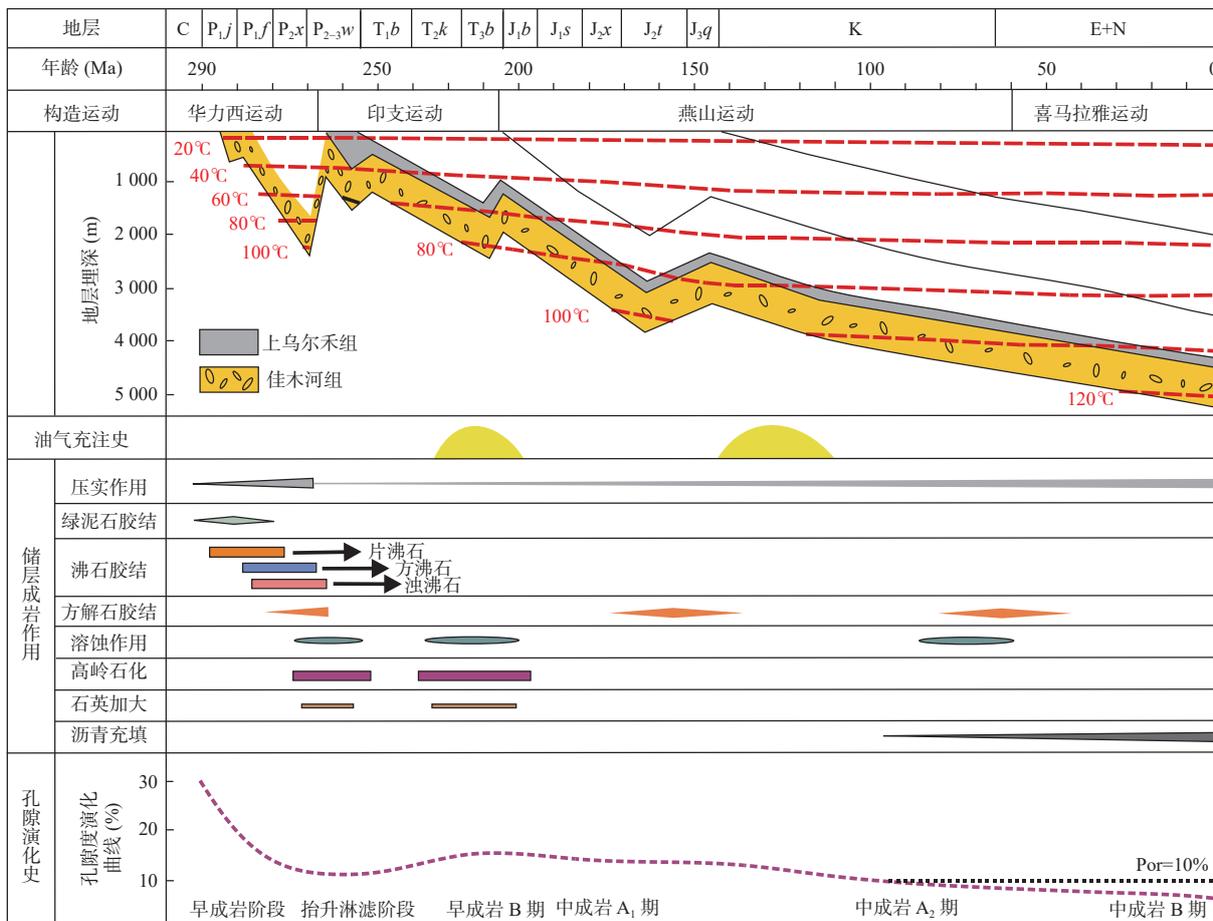
$P_{1j_1}$  佳木河组佳一段;  $P_{1j_2^3}$  佳木河组佳二段三砂组;  $P_{1j_2^2}$  佳木河组佳二段二砂组;  $P_{1j_2^1}$  佳木河组佳二段一砂组;  
 $P_{1j_3}$  佳木河组佳三段;  $P_{3w}$  上乌尔禾组;  $T_{1b}$  百口泉组;  $T_{2k}$  克拉玛依组

图8 研究区佳木河  $P_{1j_2^1}$  砂层组顶面构造图(a)及过井地震剖面(b)

Fig. 8 (a) The top structure of  $p_{j_2^1}$  sand formation and (b) seismic profile of Jiamuhe in the study area

大量损失,形成以浊沸石溶蚀孔为主的次生孔隙,改善了致密砂岩储层物性,形成了储层致密背景上物性

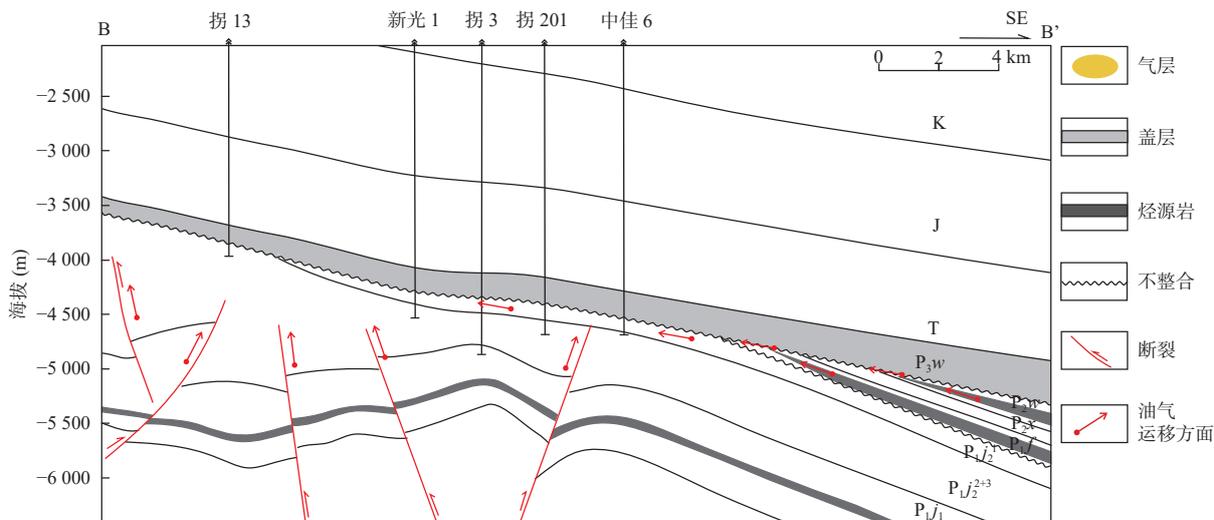
相对较好的储层甜点,控制了油气的富集与分布。已发现的气藏位于储层甜点发育区(图7a),并且浊沸石



C. 石炭系; P<sub>1j</sub> 佳木河组; P<sub>1f</sub> 风城组; P<sub>2x</sub> 夏子街组; P<sub>2-3w</sub> 下-上乌尔禾组; T<sub>1b</sub> 百口泉组; T<sub>2k</sub> 克拉玛依组; T<sub>3b</sub> 白碱滩组; J<sub>1b</sub> 八道湾组; J<sub>1s</sub> 三工河组; J<sub>2x</sub> 西山窑组; J<sub>2t</sub> 头屯河组; J<sub>3q</sub> 齐古组; K. 白垩系; E+N. 古近系和新近系

图 9 中拐地区佳木河组成藏事件与成岩演化综合图(据何文军等, 2018 修改)

Fig. 9 Accumulation event and diagenetic evolution of Jiamuhe Formation in Zhongguai area



P<sub>1j1</sub> 佳木河组佳一段; P<sub>1j2+3</sub> 佳木河组佳二段二砂组和三砂组; P<sub>1j2</sub><sup>1</sup> 佳木河组佳二段一砂组; P<sub>1f</sub> 风城组; P<sub>2x</sub> 夏子街组; P<sub>2w</sub> 下乌尔禾组; P<sub>3w</sub> 上乌尔禾组; T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系

图 10 研究区佳木河组致密砂岩气成藏模式图

Fig. 10 Reservoir forming mode of tight sandstone gas reservoir of Jiamuhe Formation in the study area

的溶蚀程度对储层产量有显著的影响。新光1井4552~4566 m井段溶蚀程度强,溶蚀孔面孔率为2%,日产气量为22230 m<sup>3</sup>,日产油为1.35 t;在4578~4592 m井段溶蚀程度弱,溶蚀孔面孔率仅为0.04%,试油结果为干层。拐3井4640~4650 m井段溶蚀孔面孔率为3%,日产气量为28090 m<sup>3</sup>,日产油为0.34 t;而在4734~4746 m井段溶蚀孔面孔率为0.4%,试油结果为干层。由此可见,有利成岩相带中的局部储层“甜点”是油气的富集区。

### 3.2 局部发育的古凸起及构造裂缝控制油气富集

早二叠世佳木河组沉积早期,由于受早华力西期构造运动影响,中拐凸起受红车断裂带EW向挤压及克百断裂带SE向挤压构造应力作用,在凸起周缘形成了一系列次一级近SN向的鼻状古凸(图11),控制着二叠系地层的展布与油气富集。目前,中拐地区已发现的油气藏与鼻状古凸关系密切。拐3井古凸控制着二叠系佳木河组致密砂岩气的富集,在古凸起部位由于应力作用不均一,断裂与微裂缝发育。前人对该区裂缝发育程度进行了预测(范存辉等,2012),沿古凸起轴向裂缝发育,斜坡区裂缝欠发育。天然形成的裂缝不仅是致密砂岩气良好的储集空间,而且是有效的渗流通道,大规模分布的天然裂缝会沟通更多的孔隙和裂缝,从而增加天然气的流动能力(杨升宇等,2013)。同时,断裂与微裂缝的发育也为弱酸性流体提供渗流通道,增强了储层中浊沸石矿物的溶蚀程度,从而改善了致密储层的物性条件,更有利于油气聚集

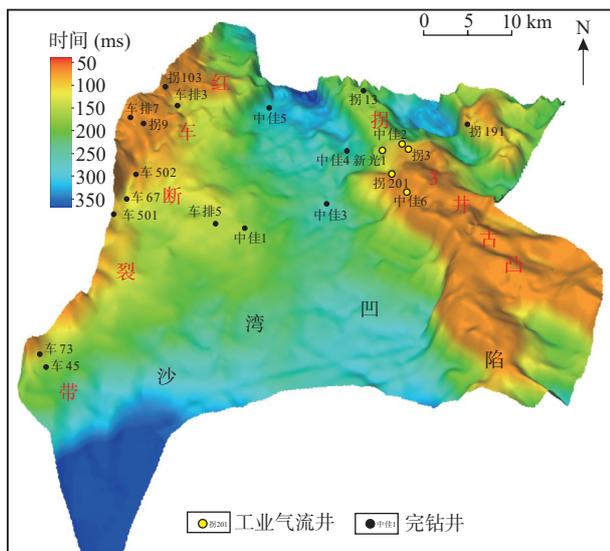


图11 佳木河组佳二段沉积前古构造图

Fig. 11 Pre-sedimentary paleostructure of the second member of Jiamuhe Formation

成藏。目前已获工业气流井均分布于古凸起带上,也进一步验证了古凸起构造及裂缝对该区致密砂岩气的富集有控制作用。

## 4 结论

(1)准噶尔盆地中拐地区二叠系佳木河组致密砂岩气的类型主要由油型气、煤型气及混合气组成,气源主要来自沙湾凹陷内高成熟的下乌尔禾组烃源岩及凤城组烃源岩,具混源特征。

(2)研究区东部佳木河组佳二段形成有效的储层“甜点”,纵向上分布在4320~4640 m和4830~4900 m深度段,高产层段主要集中在上部“甜点”带,浊沸石矿物的发育是形成该甜点的主要特征。

(3)研究区佳木河组致密砂岩气藏类型为岩性-地层圈闭。气藏主要受控于有利成岩相带中的局部储层“甜点”和局部发育的古凸起及构造裂缝,特别是构造裂缝不但提高了储层渗流能力,还增强了储层甜点的形成,有利于致密砂岩气的富集。

## 参考文献(References):

- 蔡勋育,邱桂强,孙冬胜,等.中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J].石油与天然气地质,2020,41(4):684-695.
- CAI Xunyu, QIU Guiqiang, SUN Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 684-695.
- 操应长,葱克来,刘可禹,等.陆相湖盆致密砂岩油气储层储集性能表征与成储机制—以松辽盆地南部下白垩统泉头组四段为例[J].石油学报,2018,39(3):247-265.
- CAO Yingchang, XI Kelai, LIU Keyu, et al. Reservoir properties characterization and its genetic mechanism for tight sandstone oil and gas reservoir in lacustrine basin: the case of the fourth Member of Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(3): 247-265.
- 范存辉,李虎,支东明,等.新疆小拐地区二叠系佳木河组裂缝分布规律探讨[J].矿物岩石,2012,32(3):85-93.
- FAN Cunhui, LI Hu, ZHI Dongming, et al. Study on the fracture distribution and numerical simulation of jiamuhe formation of permian in xiaoguai oilfield[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(3): 85-93.
- 何春蕾,王柏苍,辜穗,等.四川盆地致密砂岩气产业可持续高质量发展战略管理[J].天然气工业,2022,42(1):170-175.

- HE Chunlei, WANG Baicang, GU Sui, et al. Strategic management for the sustainable high-quality development of tight sandstone gas industry in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 170-175.
- 何文军, 杨海波, 费李莹, 等. 准噶尔盆地新光地区佳木河组致密砂岩气有利区资源潜力综合分析[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(3): 370-381.
- HE Wenjun, YANG Haibo, FEI Liying, et al. Comprehensive analysis of tight sandstone gas resource potential in the favorable area of Jiamuhe Formation in Xinguang area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(3): 370-381.
- 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用[J]. *石油实验地质*, 1990, (04): 375-394.
- HU Tilin, GE Baoxiong, ZHANG Yigang, et al. The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1990, (04): 375-394.
- 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 83-92.
- JIA Ailin, WEI Yunsheng, GUO Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 83-92.
- 贾春明, 潘拓, 余海涛, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷风城组储层特征及物性控制因素分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 49-61.
- JIA Chunming, PAN Tuo, YU Haitao, et al. Controlling Factors on Physical Property and Reservoir Characters of Fengcheng Formation in Shawan Depression, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 49-61.
- 金之钧, 张金川, 唐玄. 非常规天然气成藏体系[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 58-68.
- JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Unconventional natural gas accumulation system[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 58-68.
- 康玉柱. 中国致密岩油气资源潜力及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 10-18.
- KANG Yuzhu. Resource potential of tight sand oil and gas and exploration orientation in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 10-18.
- 孔星星, 肖佃师, 蒋恕, 等. 联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层—以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(3): 38-47.
- KONG Xingxing, XIAO Dianshi, JIANG Shu, et al. Application of the combination of high-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Linxing Block in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(3): 38-47.
- 李二庭, 靳军, 曹剑, 等. 准噶尔盆地新光地区佳木河组天然气地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1362-1369.
- LI Erting, JIN Jun, CAO Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in Jiamuhe Formation in Xinguang area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(9): 1362-1369.
- 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 607-615.
- LI Jianzhong, GUO Bincheng, ZHENG Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 607-615.
- 李剑, 姜晓华, 王秀芹, 等. 裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律—以松辽盆地与渤海湾盆地为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1005-1018.
- LI Jian, JIANG Xiaohua, WANG Xiuqin, et al. Mechanisms for gas accumulation and enrichment in tight sandstone reservoir in rift basins: Cases from the Songliao Basin and the Bohai Bay[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1005-1018.
- 李振华, 邱隆伟, 师政, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组二段沸石类矿物成岩作用及其对油气成藏的意义[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(1): 1-7.
- LI Zhenhu, QIU Longwei, SHI Zheng, et al. Diagenesis of zeolite minerals and its significance for hydrocarbon accumulation in the second member of Jiamuhe Formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences*, 2014, 38(1): 1-7.
- 李振华, 邱隆伟, 孙宝强, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 931-939.
- LI Zhenhua, QIU Longwei, SUN Baoqiang, et al. Characteristics of fluid inclusion and charging events of natural gas in Permian Jiamuhe Formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 931-939.
- 林玉祥, 余志勇, 刘冬. 临兴地区致密砂岩气藏形成机理与成藏模式[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(1): 210-221.
- LIN Yuxiang, YU Zhiyong, LIU Dong. Formation mechanism and model of tight sandstone gas reservoirs in the Linxing area of Ordos Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(1): 210-221.
- 刘君龙, 胡宗全, 刘忠群, 等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 852-862.
- LIU Junlong, HU Zongquan, LIU Zhongqun, et al. Gas pool sweet spot models and their forming mechanism in the Xu 2 Member in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 852-862.
- 刘忠群, 徐士林, 刘君龙, 等. 四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 31-40.
- LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 31-40.
- 蒙晓灵, 兰义飞, 张宏波, 等. 鄂尔多斯盆地南部深层致密砂岩气藏成藏特点及产能主控因素[J]. *西安石油大学学报 (自然科学版)*, 2020, 35(5): 9-13.

- MENG Xiaoling, LAN Yifei, ZHANG Hongbo, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and main productivity control factors of deep tight sandstone in the South of Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2020, 35(5): 9-13.
- 宋学锋, 魏慧蕊, 李文杰, 等. 塔里木盆地M区块致密砂岩气藏水锁损害影响因素评价[J]. *断块油气田*, 2022, 29(2): 224-228.
- SONG Xuefeng, WEI Huirui, LI Wenjie, et al. Evaluation on influencing factors of water lock damage of tight sandstone gas reservoir in block M of Tarim Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(2): 224-228.
- 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1015-1026.
- SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1015-1026.
- 孙平安, 王绪龙, 唐勇, 等. 准噶尔盆地浅层天然气多种成因地球化学研究[J]. *地球化学*, 2012, 41(2): 109-121.
- SUN Ping'an, WANG Xulong, TANG Yong, et al. Geochemical constraints on the multiple origins of shallow-buried natural gases in the Junggar basin[J]. *Geochimica*, 2012, 41(2): 109-121.
- 汪海阁, 周波. 致密砂岩气钻井技术进展及展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 159-169.
- WANG Haige, ZHOU Bo. Progress and prospect of tight sandstone gas well drilling and completion technologies[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 159-169.
- 王继平, 张城玮, 李建阳, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏开发认识与稳产建议[J]. *天然气工业*, 2021, 41(2): 100-110.
- WANG Jiping, ZHANG Chengwei, LI Jianyang, et al. Tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field: Development understandings and stable-production proposals[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(2): 100-110.
- 王平, 沈海超. 加拿大M致密砂岩气藏高效开发技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(1): 97-102.
- WANG Ping, SHEN Haichao. High-efficient development technologies for the M tight sandstone gas reservoir in Canada[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(1): 97-102.
- 王屿涛, 吕纯刚, 姚爱国, 等. 准噶尔盆地致密砂岩气资源潜力及勘探前景[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 855-860.
- WANG Yutao, LYU Chungang, YAO Aiguo, et al. Tight Sandstone Gas Resource Potential and Exploration Prospect in the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 855-860.
- 魏国齐, 张福东, 李君, 等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 199-210.
- WEI Guoqi, ZHANG Fudong, LI Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 199-210.
- 魏新善, 胡爱平, 赵会涛, 等. 致密砂岩气地质认识新进展[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 11-20.
- WEI Xinshan, HU Aiping, ZHAO Huitao, et al. New geological understanding of tight sandstone gas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(1): 11-20.
- 吴和源, 唐勇, 常秋生. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组沸石类胶结砂砾岩储集层成因机理[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(3): 281-288.
- WU Heyuan, TANG Yong, CHANG Qiusheng. Genesis of Sandy Conglomerate Reservoirs Cemented by Zeolites in Jiamuhe Formation of Zhongguai Swell, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(3): 281-288.
- 杨升宇, 张金川, 黄卫东, 等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. *石油学报*, 2018, 34(2): 272-282.
- YANG Shengyu, ZHANG Jinchuan, HUANG Weidong, et al. “Sweet spot” types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan Hami Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2018, 34(2): 272-282.
- 杨懿婷, 陈群福, 陈磊, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组致密砂岩气成因类型及气源[J]. *新疆石油天然气*, 2017, 13(3): 6-10.
- YANG Yiting, CHEN Qunfu, CHEN Lei, et al. Tight sandstone gas genetic type and gas source in the Jiamuhe Formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Oil and Gas*, 2017, 13(3): 6-10.
- 于景维, 季汉成, 史燕青, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡区三叠系韭菜园子组成岩作用特征及其对储层物性影响[J]. *西北地质*, 2021, 54(2): 99-110.
- YU Jingwei, JI Hancheng, SHI Yanqing, et al. Diagenesis and Its Effects on the Reservoir Property of the Triassic Jiucaiyuanzi Formation of Fudong Slope, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 99-110.
- 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 1-11.
- ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 1-11.
- 张杰, 李熙喆, 高树生, 等. 致密砂岩气藏产水机理及其对渗流能力的影响[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(10): 1519-1530.
- ZHANG Jie, LI Xizhe, GAO Shusheng, et al. Water production mechanism of tight sandstone gas reservoir and its influence on percolation capacity[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(10): 1519-1530.
- 张新远, 李永军, 刘凯, 等. 克拉玛依油田K82井区上乌尔禾组油气成藏特征研究[J]. *西北地质*, 2024, 57(2): 14-23.
- ZHANG Xinyuan, LI Yongjun, LIU Kai, et al. Hydrocarbon Accumulation Characteristics of Upper Wuerhe Formation in Well Block K82, Karamay Oilfield[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(2): 14-23.
- 张誉洋, 李永军, 郑孟林, 等. 新疆车排子油田车探1井3538~3774 m井段孢粉组合及地质意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(2): 157-165.

- ZHANG Yuyang, LI Yongjun, ZHENG Menglin, et al. Sporopollen Assemblage and Geological Significance of 3 538~3 774 m Section in Well Chetan 1, Chepaizi Oilfield, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 157-165.
- 赵靖舟, 李军, 曹青, 等. 论致密大油气田成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 573-583.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, CAO Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 573-583.
- 赵靖舟. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(3): 393-406.
- ZHAO Jingzhou. Conception, classification and resource potential of unconventional hydrocarbons[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 393-406.
- 曾凡成, 张昌民, 魏兆胜, 等. 火山活动影响下的致密砂岩气储层特征及气藏富集主控因素[J]. *地质学报*, 2021, 95(3): 895-912.
- ZENG Fancheng, ZHANG Changmin, WEI Zhaosheng, et al. Main enrichment controlling factors and reservoir characteristics of tight sandstone gas under the influence of volcanic activity[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(3): 895-912.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术—兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-399.
- ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon; on unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.
- 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性成藏、分布与评价[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(6): 669-682.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: accumulation, distribution and evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(6): 669-682.
- 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.
- ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- Badre S, Cristiane C G, Koyo N, et al. Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen[J]. *Fuel*, 2006, 85(1): 1-11.
- Dai J, Ni Y, Hu G, et al. Stable carbon and hydrogen isotopes of gases from the large tight gas fields in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 88-103.
- Gautier D L, Mast R F. US geological survey methodology for the 1995 national assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 78(1): 1-10.
- Huang Y, Tang Y, Li M, et al. Quantitative evaluation of geological fluid evolution and accumulated mechanism: in case of tight sandstone gas field in central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(2): 416-429.
- Jiang Z, Li Z, Li F, et al. Tight sandstone gas accumulation mechanism and development models[J]. *Petroleum Science*, 2015, 12(4): 587-605.
- Liu G, Sun M, Zhao Z, et al. Characteristics and accumulation mechanism of tight sandstone gas reservoirs in the Upper Paleozoic, northern Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2013, 10(4): 442-449.
- Lü Z, Ye S, Yang X, et al. Quantification and timing of porosity evolution in tight sand gas reservoirs: an example from the Middle Jurassic Shaximiao Formation, western Sichuan, China[J]. *Petroleum Science*, 2015, 12(2): 207-217.
- Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. *AAPU Bulletin*, 2002, 86(11): 1993-1999.
- Wu W, Zhao J, Wei X, et al. Evaluation of gas-rich “sweet-spot” and controlling factors of gas-water distribution in tight sandstone gas provinces: an example from the Permian He8 Member in Sulige Gas Province, central Ordos Basin, Northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 227: 105098.
- Zhao J, Li J, Cao Q, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: An alternative model for the formation of large tight oil and gas accumulations[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174: 25-39.
- Zhao J, Zhang W, Li J, et al. Genesis of tight sand gas in the Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74: 76-84.
- Zou C, Tao S, Zhang X, et al. Geologic characteristics, controlling factors and hydrocarbon accumulation mechanisms of China's Large Gas Provinces of low porosity and permeability[J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, 52(8): 1068-1090.
- Zou C, Zhu R, Liu K, et al. Tight gas sandstone reservoirs in China: characteristics and recognition criteria[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 88-89: 82-91.