

断块型沉火山碎屑岩致密气藏有效储层 控制因素及分布规律

——以松辽盆地南部王府气田白垩系沙河子组为例

曾凡成^{1,2}, 张昌民¹, 李忠诚², 张国一², 张驰^{2,3}, 王拥军⁴, 孙文铁^{1,2}, 邓庆杰¹

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 434100; 2. 中国石油 吉林油田公司 勘探开发研究院, 吉林 松原 138000;
3. 中国石油 吉林油田公司 长春采油厂, 吉林 长春 130000; 4. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 沉火山碎屑岩致密气属于特殊的复杂岩性非常规气藏, 目前研究程度和勘探开发程度低。松辽盆地王府断陷沙河子组发育断块控制的沉火山碎屑岩致密气藏, 由于兼具断块、沉火山碎屑岩、致密气藏的复杂性, 对储层发育控制因素认识不清导致气藏勘探开发难度极大。采用多种技术手段, 在评价沉火山碎屑岩致密气藏特殊性和储层岩性、储集空间、孔隙结构、物性和有效性特征基础上, 分宏观气藏、中观砂体及微观储层3个层次, 揭示了研究区源-储关系、成藏要素、层间非均质、层内非均质和微观成岩作用对有效储层发育特征的影响, 形成了构造控制成藏圈闭、断层控制运移通道、砂体控制气藏分布、非均质性控制层内气水关系、成岩作用控制甜点富集的认识。在此基础上进一步揭示有效储层平面上沿缓坡带由东向西整体呈树枝状发散分布, 垂向上为丘状岩体控制下的块状、反韵律分布等规律。研究成果在城深6井区开发井位部署、老井复查中取得较好效果, 为类似复杂致密气藏的勘探部署和分类精细开发提供参考。

关键词: 控制因素; 分布规律; 有效储层; 致密气; 断块型; 沉火山碎屑岩; 沙河子组; 松辽盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Controlling factors and distribution pattern of effective tight gas pools in blocky pyroclastic rocks in the Cretaceous Shahezi Formation in Wangfu gas field, southern Songliao Basin

Zeng Fancheng^{1,2}, Zhang Changmin¹, Li Zhongcheng², Zhang Guoyi², Zhang Chi^{2,3},
Wang Yongjun⁴, Sun Wentie^{1,2}, Deng Qingjie¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 434100, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Jilin Oil Field Company, PetroChina, Songyuan, Jilin 138000, China;

3. Changchun Oil Production Plant of Jilin Oil Field Company, PetroChina, Changchun, Jilin 130000, China;

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Tight gas pyroclastic rock reservoirs are special unconventional gas reservoirs with complex lithology that call for in-depth research and more exploration. Those developed in the Shahezi Formation of Wangfu Fault Depression, Songliao Basin, are found to be challenging with fault blocks as their major control coupled with confusing features of sedimentary pyroclastic rocks and tight gas reservoirs. Limited understanding of the controlling fault blocks has hindered the exploration of the reservoirs. In this study, various techniques were used to evaluate the unique features of the reservoirs, including lithology, storage space, pore structure, physical properties and reservoir effectiveness, with a view to revealing the impact of source rock-reservoir interaction, hydrocarbon pooling elements, interlayer and intra-layer heterogeneities, and micro-diagenesis on the development of effective reservoirs from macroscopic (i. e. gas pools), mesoscopic (i. e. sand bodies), and microscopic (i. e. reservoirs) perspectives. We concluded that the traps, migration channels, gas pool distribution, gas-water contact and sweet spot distribution of the reservoirs in the area are conditioned

收稿日期: 2020-03-20; 修订日期: 2021-01-20。

第一作者简介: 曾凡成(1983—), 男, 博士研究生、高级工程师, 致密气藏地质研究及开发。E-mail: zengfc@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05047005-006, 2016ZX05047)。

by structures, faults, sand bodies, intra-layer heterogeneity and diagenesis, respectively. In addition, the lateral distribution of the reservoirs can be likened to branches of a tree along gentle slope zones from east to west; while vertically, the reservoirs are blocky and anti-rhythm distributed under the control of some hummocky rocks. The conclusion was applied to the well emplacement and mature well reevaluation in the Chengshen 6 well-block and yielded positive results, thus can be used for reference for the exploration, deployment, and classification of similar tight gas reservoirs in other areas.

Key words: controlling factor, distribution pattern, effective reservoir, tight gas, block-type, sedimentary pyroclastic rock, Shahezi Formation, Songliao Basin

随着油气资源劣质化程度加深,致密油气研究及开发日益重要。国内各大油气区顺应发展趋势,均开展了大量的致密油气研究工作,也投入了大量的勘探开发实物工作量^[1-9]。沉火山碎屑岩是一种特殊的复杂岩性储层,国内外许多盆地都发现了沉火山碎屑岩油气藏,如美国 Middle Park、新西兰 Northern Taranaki、土耳其 East Anatolia 等盆地^[10-12],国内的渤海湾、海拉尔、二连等盆地^[13-15],这些盆地的沉火山碎屑岩油气藏具有较好的储渗性能和油水(或气水)关系,作为常规油气资源都取得了较好的勘探开发效果,但沉火山碎屑岩致密气作为一种特殊的致密气藏,目前在国内外的研究程度和勘探开发程度均比较低。

松辽盆地深层属于特殊的内陆型断陷湖盆,发育各种类型致密气资源,其中沉火山碎屑岩气藏普遍发育。已有重大发现并投入评价开发的英台断陷和王府断陷发育典型的扇三角洲或深湖-半深湖再搬运成因的沉火山碎屑岩气藏^[16]。其储层成因、岩石特征与国内外其它沉火山碎屑岩油气藏具有一定的相似性,但气藏分布受断陷湖盆断块控制、储层岩石致密、储渗性能差、气水关系极其复杂,具有典型的断陷湖盆断块控制的致密气特征。由于兼具断块、沉火山碎屑岩、致密气藏的复杂性,难以借鉴其它类型致密气的研究成果和勘探开发经验,在没有搞清有效储层成因和发育控制因素的情况下,气藏勘探开发部署及分层系精细开发难度极大。

本文针对松辽盆地王府断陷沉火山碎屑岩致密气藏的研究和评价现状,拟通过分析气田断块成因和沉火山碎屑岩储层特征,揭示气藏源储关系、层间及层内非均质和微观成岩作用等对有效储层的影响机制,明确有效储层发育主控因素,揭示有效储层分布规律。

1 地质背景及断块特征

王府气田位于松辽盆地东部断陷带南部(图1a)。气田从下至上依次发育下白垩统火石岭组和沙河子组、营城组、登娄库组及泉头组;其中下白垩统沙河子

组为断陷鼎盛时期,由于盆地快速沉降,水体快速变深,早期火山岩在风化作用下转而成为沉积物质重要来源,加上新喷出火山物质的不断加入,沉积了一套深湖-半深湖相背景下的扇三角洲、火山沉积相地层,与下伏地层呈不整合-整合接触(图1b),埋深2 100~2 700 m,厚度400~500 m^[17-25]。

王府断陷在沙河子组沉积时期受燕山运动第Ⅱ、Ⅲ幕影响,强烈的隆起作用造成区域性拉张破裂,派生出一系列北北西走向的张性断裂,形成东断西超的箕状断陷构造格局;断陷内发育数量众多的活动性断块,形成断层-岩性圈闭,断块的坡度大小和面积控制了沉积相分布,断块与烃源岩源的时空配置关系则控制了油气成藏。沙河子组构造整体表现为北西低南东高,被近南北向断层复杂化,形成垒堑相间的构造形态,发育多个断鼻、断块圈闭,构造幅度10~50 m(图1c)。重点气区城深6井区发育3条东、西倾向的正断层,延伸长度4.1~10.9 km、断距10~150 m。

2 致密气储层特征

2.1 沉火山碎屑岩致密气储层的特殊性

沉火山碎屑岩特殊的形成机制导致其致密储层不同于致密碎屑岩和致密火山熔岩^[26-34](表1)。岩石类型包括沉凝灰岩和沉火山角砾岩,岩石成分也同时具有沉积岩和火山岩的成分特征。沉火山碎屑岩储层致密化成因复杂,既有火山成因破坏作用的影响,如弱挥发分逸散、强焊接、缓慢结晶、弱溶蚀,也有再搬运沉积破坏作用的影响,如压实作用、胶结作用等。同时,复杂岩性特征也是致密化重要成因,如泥质充填、弱抗压实性等。沉火山碎屑岩原生孔缝发育程度低,储集空间以沉积岩的粒间(内)溶孔和火山岩的脱玻化微孔、残余气孔、微裂缝为主,孔-喉-缝组合关系复杂,喉道发育微细孔隙缩小型和微裂缝型两种,孔喉分选性和连通性极差。因此在相同条件下,沉火山碎屑岩比沉积岩和火山岩更为致密,其孔隙度多小于10%,而基质渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

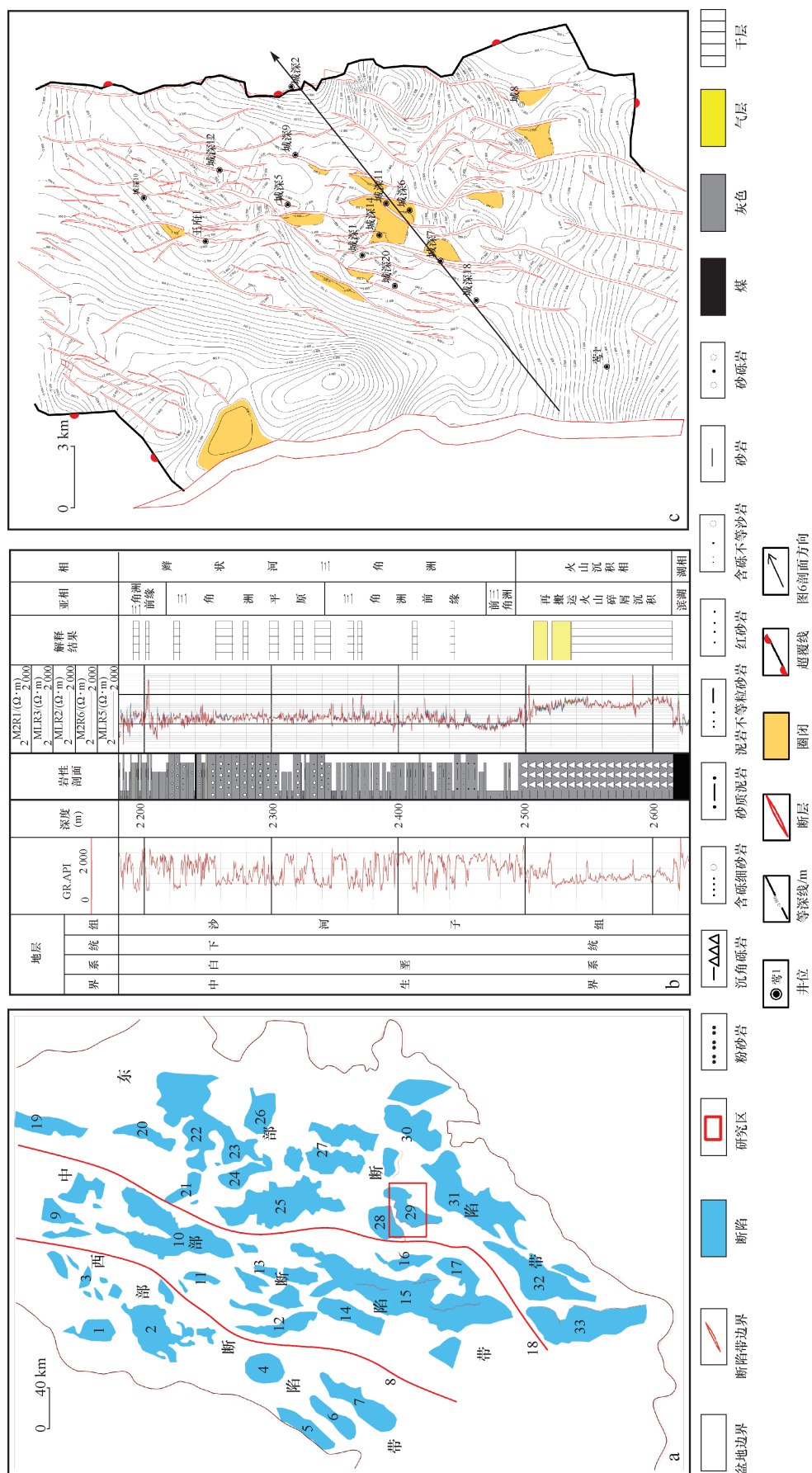


图1 王府断陷区域构造位置、地层及沙河子组顶面构造图

Fig. 1 The structural location, stratum and top surface structure map of the Shahezi Formation in the Wangfu Fault Depression area

- a. 工府断裂带区域构造位置; b. 工府断裂带沙湾组顶部构造位置; c. 工府断裂带沙湾组底部构造位置
1. 宝山断裂; 2. 梅里斯断裂; 3. 富裕断裂带; 4. 镇赉断裂; 5. 平安断裂; 6. 白城断裂; 7. 洮南断裂; 8. 通榆断裂; 9. 洮安断裂; 10. 林甸断裂; 11. 小林克断陷; 12. 英台断陷; 13. 古龙断陷; 14. 大安断陷; 15. 长岭断陷; 16. 孤店断陷; 17. 伏龙泉断陷; 18. 双辽西断陷; 19. 北安断陷; 20. 兴安断陷; 21. 中甸断陷; 22. 绥化断陷; 23. 兰西断陷; 24. 任民镇断陷; 25. 徐家围子断陷; 26. 呼兰北断陷; 27. 双城断陷; 28. 增盛断陷; 29. 王府断陷; 30. 榆树断陷; 31. 德惠断陷; 32. 梨树断陷; 33. 双辽东断陷

表 1 王府断陷火山碎屑岩与其他类型致密储层特征对比

Table 1 Characteristic comparison of sedimentary pyroclastic rocks with other types of tight reservoirs in the Wangfu Fault Depression

储层类别	沉积成因	岩石学特征		致密化成因	储集空间类型	孔隙结构	基质物性	典型实例
		类型	成分					
致密碎屑岩	剥蚀、搬运、快速堆积	砂岩、砂砾岩	石英、长石、岩屑、粘土矿物	分异差,压实、充填、胶结、自生粘土矿物、石英次生加大等	少量原生粒间孔,粒内熔孔、粒边缘溶蚀等次生孔隙为主,微裂隙	小孔隙、微细孔隙缩小型喉道、中等分选、中等连通性	孔隙度: 5% ~ 10% 渗透率: $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	长岭气田(登娄库组)、苏里格气田(石河子组)、新场气田(须家河组)等
致密火山熔岩	火山喷发、岩浆浅层侵入	火山熔岩、火山碎屑岩	石英、长石、辉石、角闪石、黑云母等	弱挥发分逸散;强焊接、缓慢结晶;弱溶蚀	气孔、粒间孔、溶蚀孔、裂缝	多尺度孔隙、微细孔隙缩小型+裂缝型喉道、极差分选、差连通性	孔隙度: $<10\%$ 渗透率: $<0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	长岭气田(营城组)、王府气田(火石岭组)、徐深气田等
沉火山碎屑岩	火山喷出物直接进入湖、火山岩形成后再搬运、火山岩体破坏后再搬运	沉火山角砾岩、沉凝灰岩	石英、长石、岩屑、粘土矿物、晶屑、玻屑、凝灰质等	火山成因破坏作用、再搬运沉积破坏作用、复杂岩性影响(泥质充填、抗压能力弱)	粒间(内)溶孔、脱玻化微孔隙、残余气孔、微裂隙	复杂孔隙、微细孔隙缩小型+裂缝型喉道、极差分选、极差连通性	孔隙度: 3% ~ 10% 渗透率: $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	王府气田(沙河子组)、克拉美丽气田、徐深气田等

表 2 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩全岩矿物及粘土矿物成分分析

Table 2 Statistics of whole rock mineral analysis and clay mineral composition analysis of sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression

井号	全岩矿物/%						粘土矿物相对含量/%					
	石英	钾长石	钠长石	方解石	浊沸石	粘土矿物	蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	绿蒙混层
城深 12	26.70	10.45	28.50	0.10	—	34.25	—	65.50	11.50	—	23.00	—
城深 6	30.18	15.98	33.70	2.53	2.53	15.03	—	—	—	—	100.00	—
城深 601	18.15	9.05	43.25	—	—	29.55	—	50.00	6.00	—	44.00	—
平均	25.01	11.83	35.15	0.89	0.84	26.28	—	38.50	5.83	—	55.67	—

注:“—”代表未检测出矿物含量。

2.2 沉火山碎屑岩储层特征

研究区沉火山碎屑岩形成于断陷湖盆火山活动时期,在湖盆快速沉降下,大量火山物质的加入使得储层分选差、粘土矿物含量高,储层抗压能力弱并受强胶结成岩影响,岩石致密。根据 3 口井钻井取心及 10 口井井壁取心资料,开展了薄片鉴定、扫描电镜、XRD 全岩测试、物性、压汞、核磁等多项分析化验项目,分析化验样品 2 065 块,在此基础上开展储层特征研究。

2.2.1 储层岩性特征

取心井资料及大量薄片分析表明,沉火山碎屑岩中火山碎屑物质占比 50% ~ 90%,正常沉积碎屑物占比小于 50%,根据碎屑大小可划分为沉集块岩(粒径 $>64 \text{ mm}$)、沉火山角砾岩(粒径介于 $2 \sim 64 \text{ mm}$)、沉凝灰岩(粒径小于 2 mm) 3 种^[35],研究区以灰色安山质沉火山角砾岩为主,角砾呈次棱角状—次圆状,颗粒

定向性不明显、分选差、颗粒支撑—杂基支撑,杂基多为粗颗粒的凝灰,应为近距离搬运和快速堆积的产物。

矿物成分主要为石英(18.15% ~ 30.18%,平均 25.01%)、钾长石(9.05% ~ 15.98%,平均 11.83%)、钠长石(28.55% ~ 43.25%,平均 35.17%)为主,粘土矿物含量高(15.05% ~ 34.25%,平均 26.28%),主要由绿泥石(23% ~ 100%)、伊/蒙混层(50% ~ 65.5%)、伊利石(6% ~ 11.5%)组成(表 2)。

2.2.2 储集空间类型

通过岩心宏观描述和铸体薄片镜下鉴定,沉火山角砾岩普遍发生碳酸盐交代作用,常见安山岩岩屑绿泥石化、斑晶绿泥石化及凝灰岩岩屑脱玻化微孔隙,少见溶蚀孔、安山岩杏仁微孔隙、流纹岩岩屑脱玻化微孔隙、凝灰岩角砾脱玻化微孔隙、少量微裂隙(图 2)。前人针对该区此类储层储集空间类型做过详细研究^[36],本次不再复述。

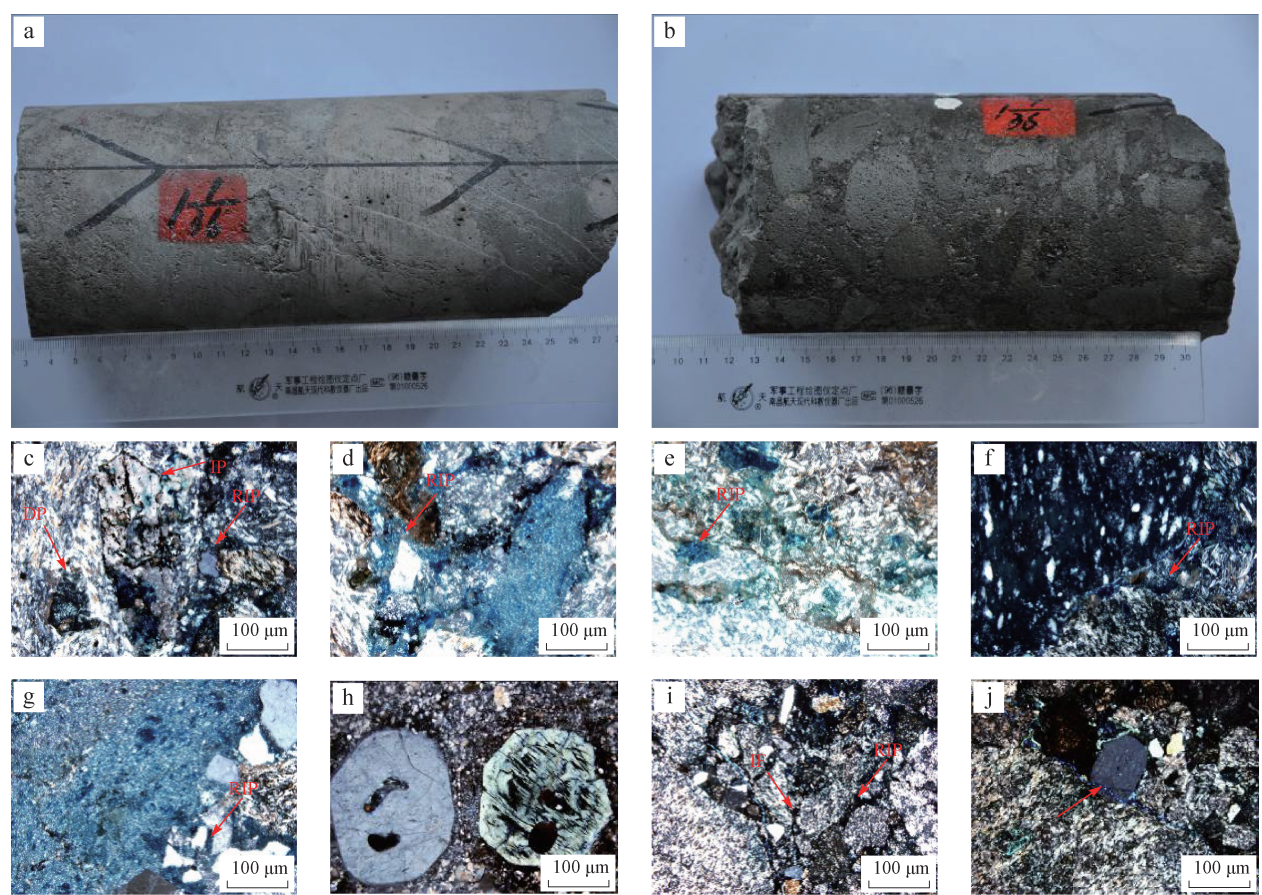


图 2 王府断陷城深 6 井沙河子组沉火山碎屑岩典型岩心照片及镜下薄片
Fig. 2 Images showing the typical cores and thin sections of sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation of Well CS 6, Wangfu Fault Depression

a. 沉火山角砾岩,埋深 2 522.7 m;b. 沉火山角砾岩,埋深 2 524.1 m;c. 灰色安山质沉火山角砾岩,发育粒间孔(RIP)、斑晶绿泥石化微孔隙(IP)、碳酸盐交代晶间微孔、溶蚀孔(DP),埋深 2 522.85 m,10(+);d. 灰色安山质沉火山角砾岩,发育粒间孔(RIP)、凝灰岩岩屑脱玻化微孔隙,埋深 2 522.85 m,10(+);e. 灰色安山质沉火山角砾岩,见粒间孔(RIP)及安山岩杏仁内微孔隙,埋深 2 523.50 m,10(+);f. 灰色安山质沉火山角砾岩,发育粒间孔(RIP)及流纹岩岩屑脱玻化微孔隙,埋深 2 523.50 m,10(+);g. 灰色安山质沉火山角砾岩,发育粒间孔(RIP)及凝灰岩角砾脱玻化微孔隙,埋深 2 526.75 m,10(+);h. 灰色安山质沉火山角砾岩,埋深 2 527.75 m,10(+);i. 灰色安山质沉火山角砾岩,发育微裂隙(IF)及粒间孔(RIP),埋深 2 528.93 m,4(+);j. 灰色安山质沉火山角砾岩,埋深 2 529.95 m,4(+)

2.2.3 储层孔隙结构特征

根据压汞实验数据分析,沉火山碎屑岩以微细孔喉为主,孔喉呈多峰态分布特征,储层孔隙结构复杂,孔喉直径分布于 0.04 ~ 13.2 μm,平均 1.73 μm,最大孔喉半径平均 0.71 μm,中值半径平均 0.007 μm;排驱压力 0.52 ~ 9.31 MPa,平均 2.84 MPa;中值压力 4.6 ~ 112 MPa,平均 33.7 MPa;最大进汞饱和度 25% ~ 72%,平均 48%。根据压汞曲线反应特征将储层孔隙结构分为 I、II、III 3 种类型^[37-40](图 3),沉火山碎屑岩储层以 II、III 型孔隙结构为主,分别占比 33.3%、66.7%。

II 型孔隙结构:毛细压力曲线形态表现为近 45° 直线,不发育平台段,表明歪度、分选中等;孔隙结构参

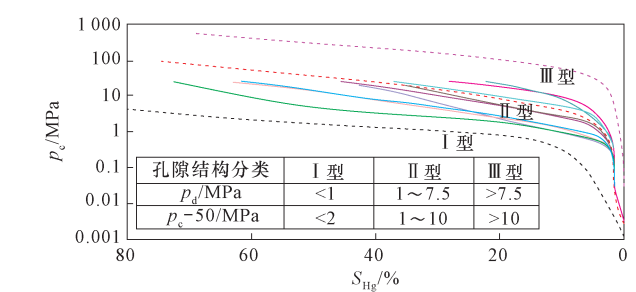


图 3 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩压汞曲线形态分类
Fig. 3 Classification of mercury pressure curves of sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression

数表现为排驱压力较高(1 ~ 7.5 MPa)、汞饱和度中值压力较高(1 ~ 10 MPa)、最大汞饱和度值较低的特点;储集空间以溶蚀孔、晶间孔、粒间孔为主,裂缝较发育,

孔缝组合模式较多,储渗能力中等;储层有效性中等,气井中产但稳产能力差。

Ⅲ型孔隙结构:毛管压力曲线形态向右上靠拢,凹向左下,无平台段发育,表明歪度极细,分选差;孔隙结构参数表现为排驱压力高(>7.5 MPa)、汞饱和度中值压力高(>105 MPa)、最大汞饱和度值低的特点;储集空间以微孔、粒内孔、基质溶孔、粒内溶孔、粒间溶孔为主,裂缝不发育,孔缝组合模式单一,储渗能力差;储层有效性差,气井低产基本无稳产能力。

2.2.4 储层物性特征

王府气田沉火山碎屑岩在覆压条件下的物性数据统计分析表明,储层有效孔隙度主要分布于3%~10%,平均6.5%;储层渗透率主要分布于 $(0.001 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的致密储层(图4)。

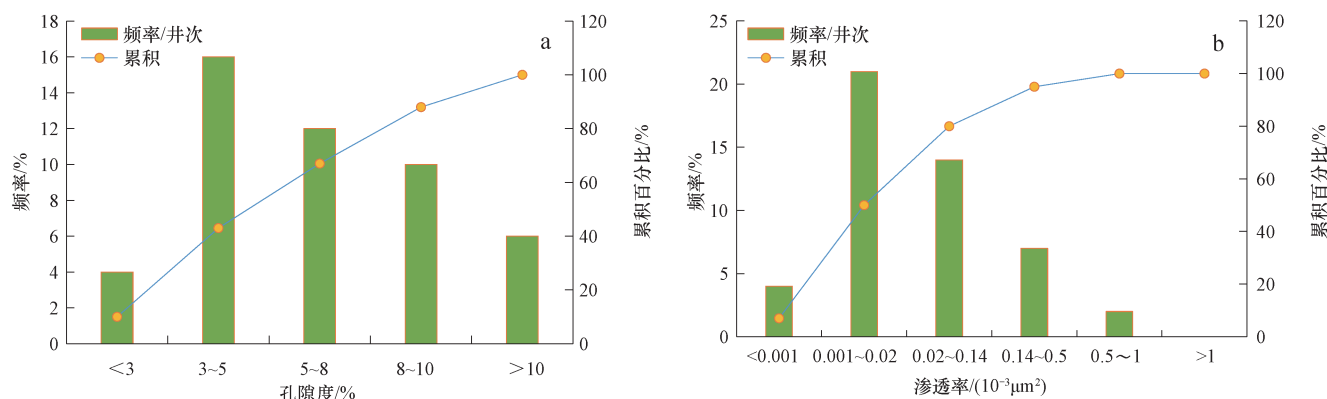


图4 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩物性分布柱状图

Fig. 4 Histograms showing the distribution of physical properties of sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression
a. 孔隙度; b. 渗透率

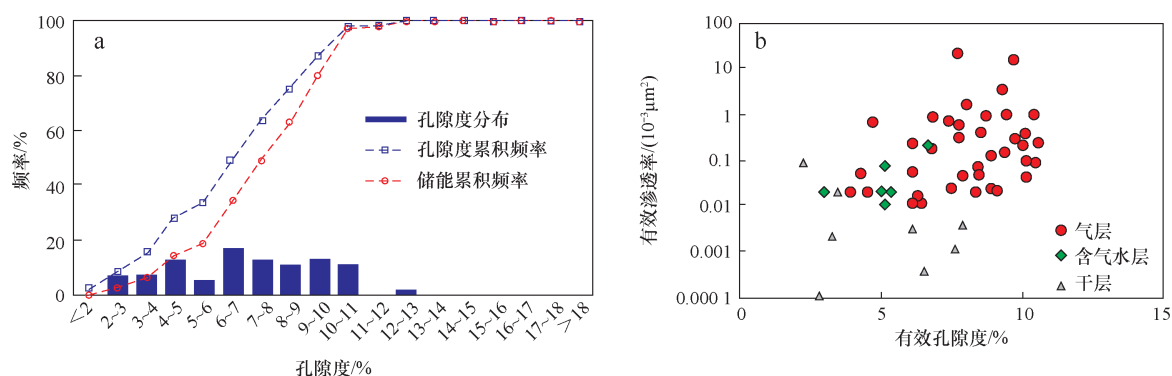


图5 两种方法确定王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩有效储层物性下限

Fig. 5 Two methods used to determine the lower limit of physical properties of effective reservoirs in sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression
a. 基于储能累积频率法; b. 基于生产动态约束法

2.2.5 储层有效性及有效储层特征

有效储层是指具有连通孔隙,允许油气在其中储存和渗滤的岩层,一般是在低孔隙度、低渗透率背景下物性相对优质的储层^[41]。从生产角度考虑,有学者定义在现有工艺技术条件下能够采出具有工业价值产液量(烃类或与烃类同体积的水)的储集层为有效储层^[42]。以上两方面综合考虑,可以更加准确定义有效储层。

根据研究区气藏的资料采集情况,以试气、试采产能为约束,综合应用岩石物理实验和测井资料,采用经验统计和动态产能约束方法,建立沉火山碎屑岩有效储层下限标准。如图5所示,以储能损失5%为条件^[43],结合试气、试采井生产动态约束法,确定沙河子组沉火山碎屑岩储层有效储层基质孔隙度下限为4%、基质渗透率下限为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 有效储层发育控制因素

有效储层发育控制因素是揭示有效储层成因和分布规律,预测有效储层分布的基础^[44-45]。由于特殊的源储关系和储层成因特征,沉火山碎屑岩气藏显示出不同于常规构造型气藏和层状气藏的特点,表现为复杂的气水关系和有效储层分布特征。以下主要从宏观-气藏级别、中观-砂体级别以及微观-储层级别3个尺度进行分析,主要控制因素包括源储关系及成藏要素、层间、层内非均质和微观成岩作用3大方面(表3)。

3.1 宏观-气藏级别:成藏要素控制

宏观成藏要素中,气源对有效储层发育有控制作用,构造是控制有效储层发育的核心,时空配置是控制有效储层发育的关键。

首先,王府断陷为小型断陷湖盆,烃源岩发育但是平面变化快,研究区发育断陷深部的火石岭组、沙河子组和区域煤层3套烃源岩,城深6井区处于这3套烃源岩运移最有利的指向带(图6)(剖面方向见图1c)。

其次,斜坡带为有利的构造背景,为沉火山碎屑岩储层发育提供了沉积空间,东部城深2井区在火石岭组末期发育大量爆发相火山岩,根据沙河子早期区域煤层发育特征,可以证实后期该区一直出露地表遭受风化作用,提供了沉积物质,形成了沉火山碎屑岩储层。另一方面该区受到断层切割形成多个断块、断鼻构造圈闭,为油气的保存提供了保障。

表3 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩气藏有效储层发育控制因素

Table 3 Controlling factors of effective reservoirs in sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression			
尺度	控制因素	主要控制机理	主要类型及特征
宏观-气藏级别	源储关系	控制气藏的形成	源内原生气藏
	构造特征	控制次生气藏分布	近源次生气藏
中观-砂体级别	沉积分异	层间非均质控制层间气水关系	砂为主,储层有效性最关键
		层内非均质控制层内气水分布的复杂性	两种模式,气水关系复杂化
微观-储层级别	成岩作用	控制储层储渗特征及品质	压实、溶蚀、脱玻化是关键

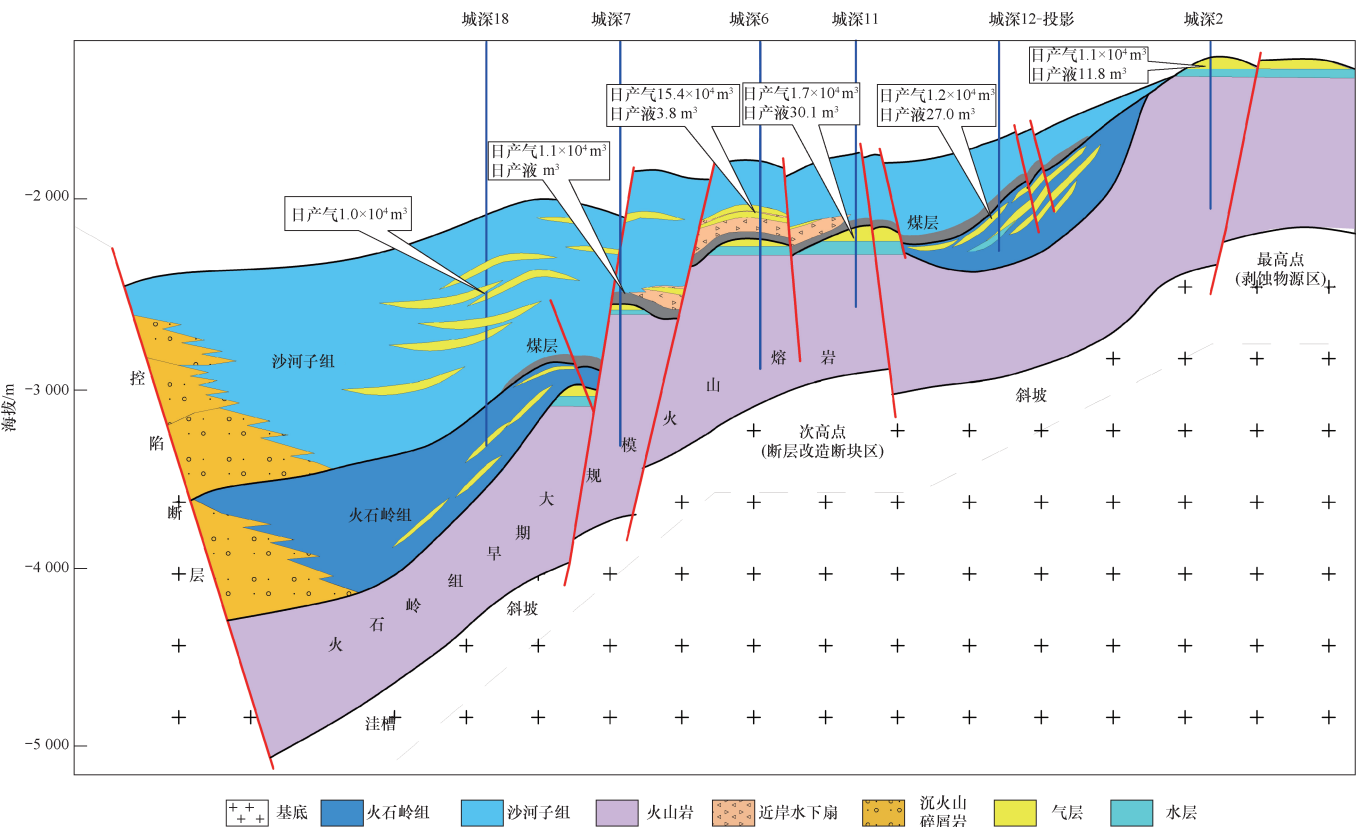


图6 王府断陷沙河子组-火石岭组成藏模式

Fig. 6 Accumulation pattern of the Shahezi-Huoshiling Formations, Wangfu Fault Depression

根据气藏总体发育特征分析,王府地区深层发育源内原生致密砂岩气藏、火山岩单体气藏和近源次生沉火山碎屑岩致密气藏。其中源内原生气藏主要分布于烃源岩内部的沉积岩储层,但是钻井显示较差,试气产量低,一般只有 $(0.5 \sim 1.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。分析原因主要是储层物性差,孔隙度一般都低于 6%,而且储层主要分布在火石岭组内部和沙河子组中后期,仅能接受单套烃源岩供烃。火山岩单体气藏储层基质物性更差,一般低于 5%,主要依靠部分裂缝和顶部风化壳的改善,能够形成小气顶型气藏,试气产量也较低,一般只有 $(0.5 \sim 1.2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。沉火山碎屑岩属于近源次生气藏,有着更加有利的成藏时空配置。现今构造格架和隆凹分布格局控制了烃类运移方向和气藏的分布。城深 6 井区为区域局部高点,发育有利的断块圈闭,同时存在有效的储集空间。沉火山碎屑岩砂体与断块有利配置形成圈闭,气源通过断层、地层界面和烃原岩排烃压力运移,最终在该区形成侧生侧储、上生下储气藏,气层主要发育在构造的高部位和储层段的顶部。有利的源储关系、成藏要素、成藏过程中的烃类充注有效改善了储层,使得致密沉火山碎屑岩储层也能够成藏,单井日产量能够达到 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,从而形成致密储层下的有效储层和“甜点”。

3.2 中观 - 砂体级别:储层沉积控制

中观储层沉积对有效储层的控制主要包括层间砂体非均质性和砂体内部非均质性,前者控制层间气水

关系,后者控制层内气水分布的复杂性。

研究区发育断陷湖盆扇三角洲沉积体系,陡坡带发育近岸水下扇,缓坡带发育扇三角洲。沉积相带横向变化快,导致砂体横向快速变化、砂体叠置关系复杂、连通性差。研究区沉火山碎屑岩储层来源于东部火山岩形成后的再搬运或者火山岩体被破坏后的再搬运,具有一定分选,物性要远好于原生的火山熔岩和火山喷出物直接入湖形成的火山碎屑岩。有利砂体以扇三角洲前缘亚相沉火山碎屑岩为主,向湖盆方向呈树枝状发散分布,同时受近垂直方向断层切割,构成断块型砂体,研究区共计发育 5 支扇体,控制了储层在平面上的分布特征,单支扇体面积 $16 \sim 47 \text{ km}^2$,扇体的变化控制了层间非均质性。

沉积产物的韵律性变化或快速堆积的沉积作用导致有效储层内部显示出较强的非均质性特征,前者控制层间非均质性,后者控制层内非均质性。有效储层仅仅是储层的一部分,在气源不足的条件下选择性充注导致储层内部含气性变化快、差异大,有效储层在砂体内部表现出强烈的非均质性,气藏内部气水关系复杂,表现为气层、干层交替出现。研究区发育两种内部非均质性变化模式(图 7)。模式一为内部夹层型,发育于中 - 厚层中,整体物性较好,局部砂体叠置部位发育岩性干层或物性干层;模式二为内部改善型,发育于厚层和巨厚沉火山碎屑岩中,岩石整体致密,局部物性改善形成薄层有效储层。分析主要受到岩性和成分变化的影响,沉集块岩和沉凝灰岩的物性稍差一些,沉火

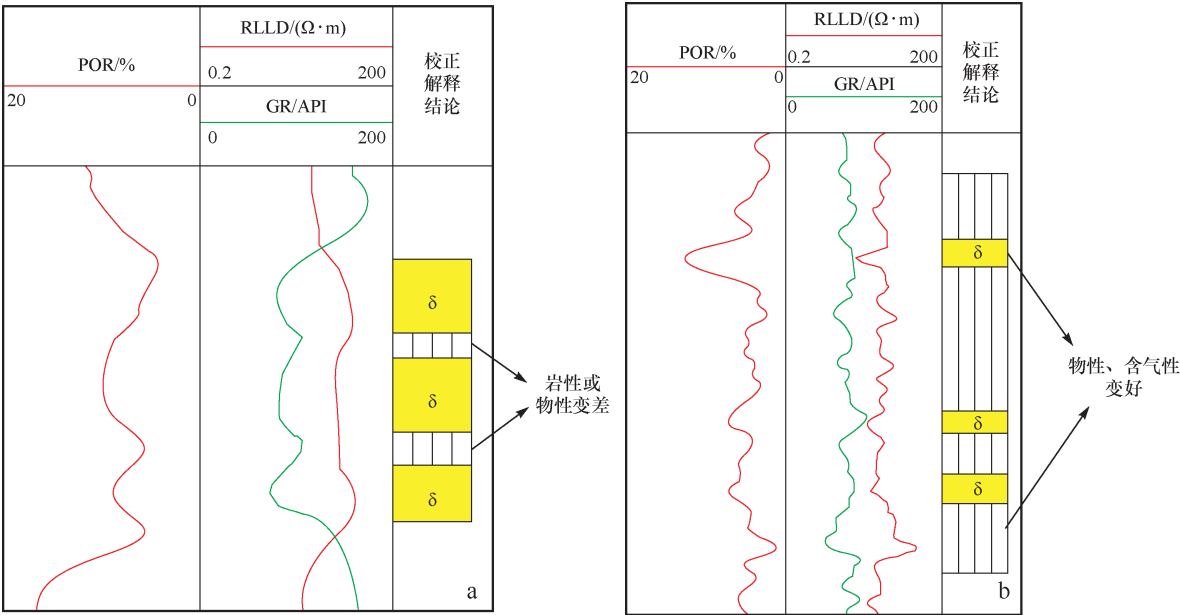


图 7 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩层内非均质性模式示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the intra-layer heterogeneity of Shahezi Formation in the Wangfu Fault Depression

a. 模式一,内部夹层型;b. 模式二,内部改善型

山角砾岩粒度适中,分选更好,同时火山碎屑的成分太高,物性也变差,火山碎屑成分太少,以沉积岩碎屑为主的储层也变得更加致密,导致储层内部非均性的出现。

3.3 微观-储层级别:储集岩成岩控制

差异化成岩作用是决定储层品质的微观控制因

素。储集岩的成岩作用主要是针对孔隙空间和渗透性的破坏作用和建设作用,前者以压实和硅泥质胶结作用为主,后者以交代、溶蚀和溶解以及微裂缝发育为主。研究区沉火山碎屑岩储经历了挥发分逸散、炸裂、压溶、溶蚀、脱玻化、构造等成岩作用类型,其中挥发分逸散和炸裂作用有利于原生气孔和炸裂缝发育,溶蚀、构造作用有利于次生溶蚀孔和构造缝发育,脱玻化作

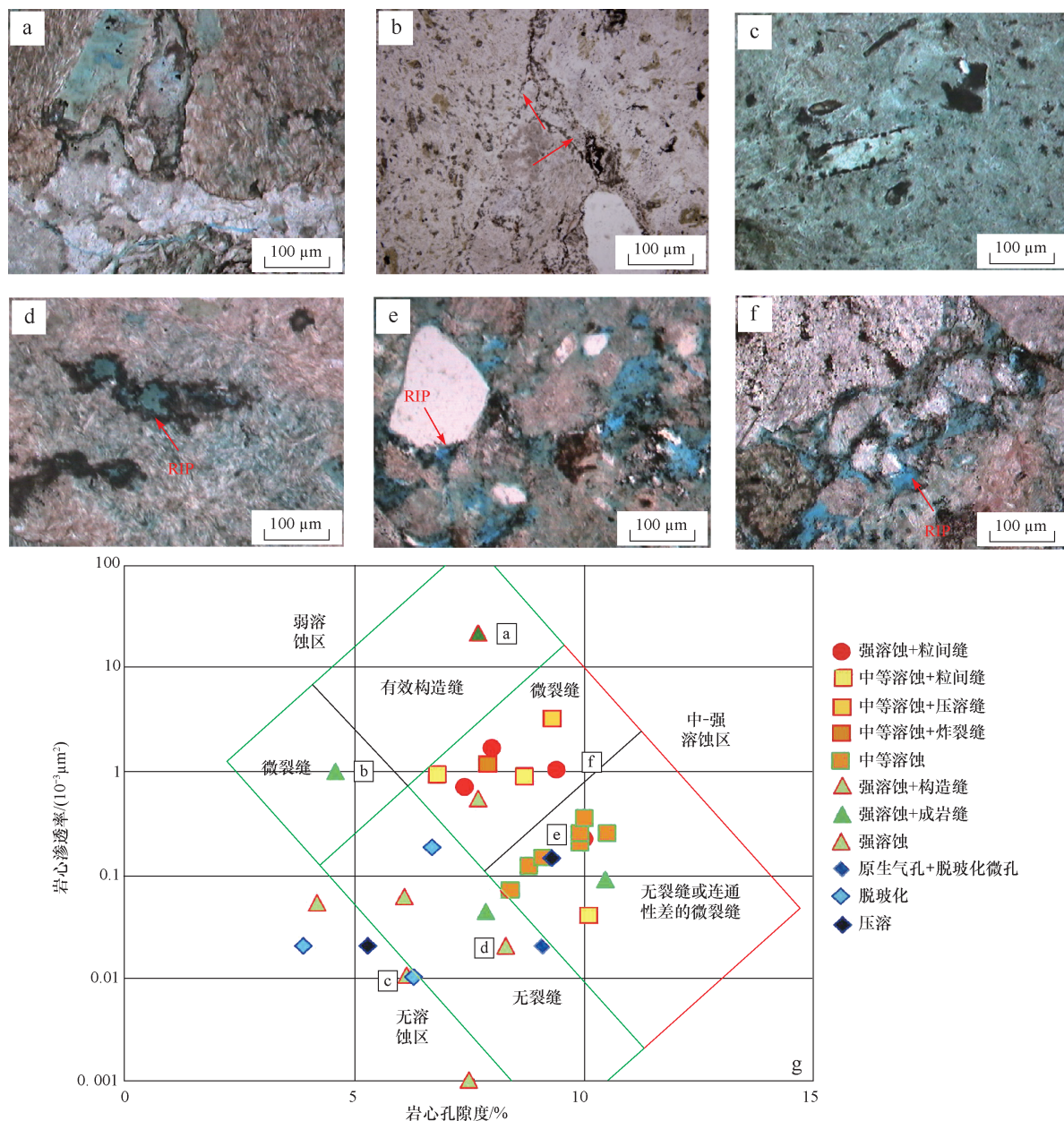


图8 王府断陷城深6井沙河子组沉火山碎屑岩有效储层发育的成岩作用主控因素分布

Fig. 8 Main factors controlling the diagenesis for effective reservoir development in sedimentary pyroclastic rocks in the Shahezi

Formation of Well CS 6, Wangfu Fault Depression

a. 灰色安山质沉火山角砾岩, 基质内弱溶蚀孔隙, 构造缝, 埋深 2 528.23 m, 10(+); b. 微裂缝, 埋深 2 559.00 m; c. 基质内溶孔不发育, 城深 602 井, 埋深 2 670.00 m, 再搬运; d. 灰色安山质沉火山角砾岩, 粒间孔隙 (RIP)、凝灰岩岩屑脱玻化微孔隙, 埋深 2 522.85 m, 10(+); e. 灰色安山质沉火山角砾岩, 粒间孔 (RIP) 及安山岩杏仁微孔隙, 埋深 2 523.50 m, 10(+); f. 灰色安山质沉火山角砾岩, 粒间孔 (RIP) 及流纹岩岩屑脱玻化微孔隙, 埋深 2 523.50 m, 10(+); g. 研究区沉火山碎屑岩有效储层发育的成岩作用主控因素分布图版

用多发生在成岩后期,产生脱玻化微孔、增储不增渗,为建设性成岩作用;压溶作用本身反映储层遭受较强的压实作用,但在岩石薄弱面产生的压溶缝在一定条件下起着渗流通道的作用。沉火山碎屑岩有效储层发育特征明显受成岩作用控制,表现为储层物性与储集空间类型及成岩作用有较好的正相关对应关系,如图8所示,沉火山碎屑岩孔、渗交会图可以划分为6个分布区间,其中有效构造缝发育的弱溶蚀区表现为中孔、高渗,通过面孔率分析在7.6%左右;微裂缝发育的中-强溶蚀区表现为中孔、中渗,面孔率分析在8.6%左右;无裂缝或连通性差的微裂缝中-强溶蚀区表现为高孔、中低渗,面孔率最高能达到9.1%;微裂缝发育的弱溶蚀区表现为低孔、中渗,面孔率分析在3.8%左右;裂缝不发育的弱溶蚀区表现为中低孔、低渗3.0%,无溶蚀区表现为低孔、低渗,面孔率极低。

从目前研究成果来看,可以肯定微观储集层成岩作用对有效储层的控制作用,但受资料数量局限和采样点的限制,难以找到其在平面和纵向上的变化特征。基于微裂缝发育对有效储层的建设性控制作用,可以得出断块部位由于构造较高、断裂发育,储层微裂缝也明显发育,而斜坡部位平缓,断裂不发育,储层微裂缝也不发育。

4 有效储层分布规律及生产应用

在有效储层发育控制因素认识指导下,形成了宏观成藏要素、中观储层沉积、微观储集层成岩三级控制有效储层的认识。

基于宏观成藏要素上,断层、构造圈闭、成藏模式或源储关系研究,揭示研究区东部缓坡带由东向西发育树枝状扇三角洲沉火山碎屑岩体,在近南北向断层切割下,构成断块型砂体有利储集空间,同时与西部烃源岩和自身烃源岩有机配置,形成了当前的气藏宏观分布格局。

基于中观储层沉积上,砂体及层间、层内非均质性分析,揭示研究区有利岩性主要为扇三角洲前缘亚相下的沉火山角砾岩,沉积相带的横向快速变化导致砂体间连通性差,砂体内部非均质性强。在气源不足的情况下,气藏内部储层具有选择性充注特征,孔、渗较高的储层含气性较好,从而造成气藏内部气水关系复杂。沉积产物的韵律性变化控制层间非均质性,快速堆积的沉积作用控制层内非均质性。

基于微观储集层成岩上,储层发育的断块高部位压实作用相对较弱,溶蚀作用较强,构造断裂发育导致裂缝相对发育,由高到低发育程度减弱,形成纵向上的物性反韵律特征;受到断层影响发育微裂缝,且烃源岩附近区域受有机酸溶蚀物性会有明显改善。其中有效构造缝及微裂缝发育、强溶蚀区主要为有效储层发育区。

基于3个层次的分布规律分析,可以将研究区在平面上进一步分为3种类型有利区,I型-北部斜坡型沉火山碎屑岩储层、II型-中部断块型、III型-南部断块-斜坡过渡型。中部断块型是有利储层发育最为有利目标区,预测有利面积54 km²(图9)。目前在城深6井区钻井及测试获得突破,钻井揭示单井有效储层厚度一般30~80 m,垂向上储层顶部有效性好,向下变差,不发育边底水;城深6井试气获得日产15×10⁴ m³高产工业气流,已落实含气面积20 km²。针对这一断块,连续部署1口水平井和3口开发井,也取得较好开发效果。同时,该区块完成了3口老井复查的任务,发现了多个II型-南部断块-斜坡过渡型潜力层,提出了相应的挖潜措施。

5 结论

1) 松辽盆地王府断陷沉火山碎屑岩致密气藏兼具断块、沉火山碎屑岩、致密气藏的复杂性,储层岩性以沉火山角砾岩为主,分选较差,填隙物以粘土矿物为主且含量高;储集空间以基质溶孔、脱玻化微孔、粒间残余孔、构造缝、压溶缝等为主,储层品质取决于溶蚀孔隙和裂缝发育程度;孔隙结构以III型为主,II型次之,I型不发育;有效储层下限为基质孔隙度大于4%、基质渗透率大于0.01×10⁻³ μm²。

2) 有效储层发育受宏观成藏要素、中观储层沉积、微观储集层成岩三级控制。宏观上气源是控制有效储层发育的根本,构造是控制有效储层发育的核心,时空配置是控制有效储层发育的关键。中观上沉积产物的韵律性变化控制层间非均质性,快速堆积的沉积作用控制层内非均质性。

3) 有效储层平面上沿缓坡带由东向西整体呈树枝状发散分布,进一步分为中部断块型、南部断块-斜坡过渡型、北部斜坡型3种类型。其中中部断块型是有利储层发育最有利目标区;垂向上储层顶部有效性好,向下变差,为具有丘状岩体控制下的块状、反韵律分布特征。

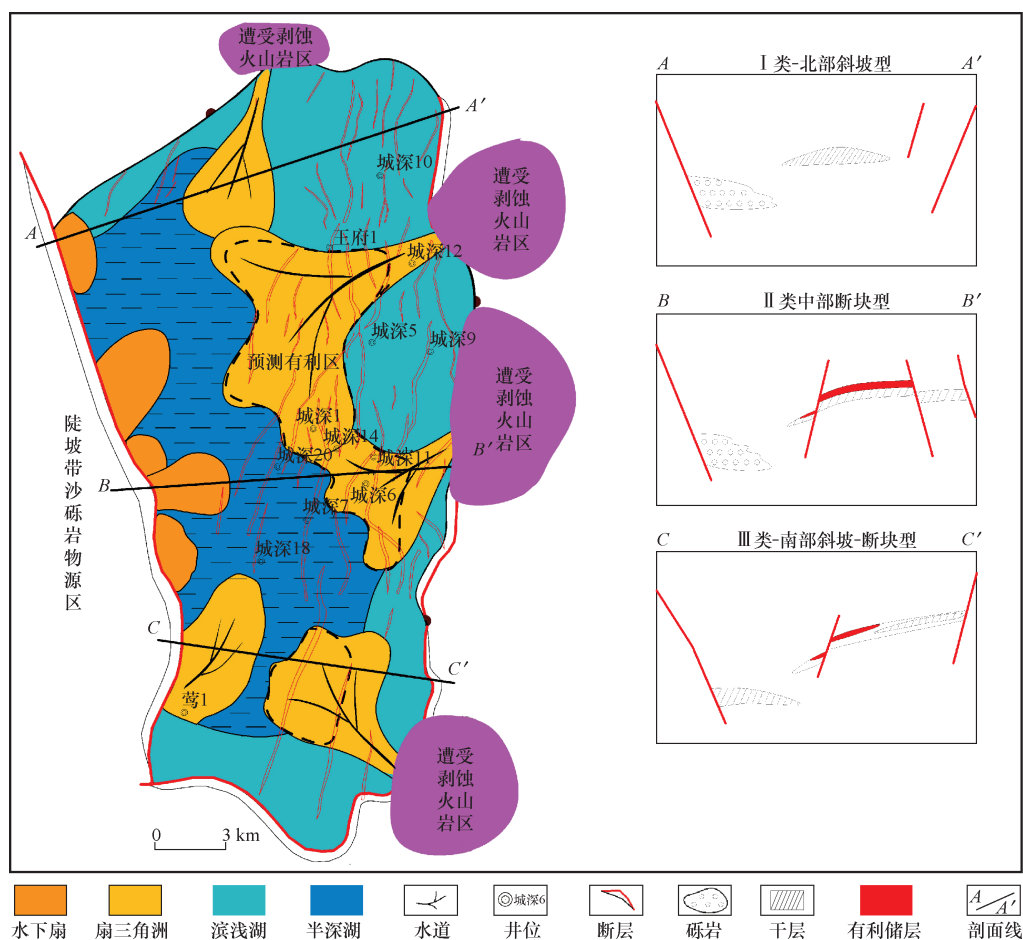


图9 王府断陷沙河子组沉火山碎屑岩有利目标区预测及有利储层分类

Fig. 9 Prediction of potential target areas and classification of reservoirs in sedimentary pyroclastic rocks, Shahezi Formation, Wangfu Fault Depression

参 考 文 献

- [1] 邹才能,赵群,陈建军.等.中国天然气发展态势及战略预判[J].天然气工业,2018,38(4):1-11.
Zou Caineng,Zhao Qun,Chen Jianjun,et al. Natural gas in China: Development trend and strategic forecast[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(4):1-11.
- [2] 邱振,邹才能,李建忠.等.非常规油气资源评价进展与未来展望[J].天然气地球科学,2013,24(2):238-246.
Qiu Zhen,Zou Caineng,Li Jianzhong,et al. Unconventional petroleum resources assessment:progress and future prospects[J]. Natural Gas Geoscience. 2013,24(2):238-246.
- [3] 孙龙德,方朝亮,李峰.等.中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J].石油勘探与开发,2010,37(4):385-396.
Sun Longde,Fang Chaoliang,Li Feng,et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology[J]. Petroleum Exploration and Development,2010,37(4):385-396.
- [4] 孙龙德,邹才能,朱如凯.等.中国深层油气形成、分布与潜力分析[J].石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.
Sun Longde,Zou Caineng,Zhu Rukai,et al. Formation,distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(6):641-649.
- [5] 徐春华,王亚琳,杨贵丽.渤海湾盆地济阳坳陷冶里—亮甲山组层状储层成因及其影响因素[J].石油实验地质,2009,31(4):362-365.
Xu Chunhua,Wang Yalin,Yang Guili. The genesis and influential factors of layered reservoir of Yeli-Liangjiashan Formation in the Jiyang Depression of The Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2009,31(4):362-365.
- [6] 斯春松,刘占国,寿建峰.等.柴达木盆地昆北地区路乐河组砂砾岩有效储层发育主控因素及分布规律[J].沉积学报,2014,32(5):966-972.
Si Chunsong,Liu Zhanguo,Shou Jianfeng,et al. Dominant factors and distribution of effective reservoir in sandy conglomerate bodies of Lulehe Formation in Kunbei Area,Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2014,32(5):966-972.
- [7] 蒋宜勤,罗静兰,王乃军.等.歧口凹陷新生界火山岩储层特征及储层发育的控制因素[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(6):902-912.
Jiang Yiqin,Luo Jinglan,Wang Naijun,et al. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoirs in Cenozoic Group,Qikou Depression[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012,48(6):902-912.

- [8] 王艳忠,操应长,李永新.等.渤南洼陷古近系深层有效储层控制因素研究[J]. 天然气地球科学,2012,23(6):996-1003.
Wang Yanzhong, Cao Yingchang, Li Yongxin, et al. Controlling factors on the paleogene deep effective reservoirs in the Bonan Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6):996-1003.
- [9] 卢炳雄,文华国,淡永.等.准噶尔盆地阜康凹陷阜东斜坡齐古组储层控制因素及有利区预测[J]. 石油与天然气地质,2018,39(3):549-557.
Lu Bingxiong, Wen huaguo, Dan Yong, et al. Favorable accumulation region prediction and controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Qigu Formation in the Fudong slope, Fukang Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3):549-557.
- [10] Remy R R. Porosity reduction and major controls on diagenesis of Cretaceous-Paleocene volcanoclastic and arkosic sandstone, Middle Park basin, Colorado[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(4):797-806.
- [11] Bergman S C, Talbot J P, Thompson P R. The Kora Miocene sub-marine andesite stratovolcano hydrocarbon reservoir, northern Taranaki basin, New Zealand [C]//Ministry of Commerce. New Zealand Oil Exploration Conference, proceedings. Wellington: Ministry of Commerce, 1992:178-206.
- [12] Gecer B A. The diagenesis of the upper Oligocene and Mio-Pliocene sandstones and its relevance to hydrocarbon exploration in the East Anatolia Basin, Turkey [J]. Journal of the Geological Society of India, 2005, 65(4):468-478.
- [13] 赵澄林. 火山岩储层储集空间形成机理及含油性[J]. 地质论评, 1996, 42(增刊):38-43.
Zhao Chenglin. Formation mechanism of reservoir space and oil possibility of volcanic reservoirs [J]. Geological Review, 1996, 42(S):38-43.
- [14] 于振峰. 海一塔盆地火山碎屑岩复杂岩性的岩石学机理及其测井响应[D]. 长春:吉林大学, 2013.
Yu Zhenfeng. Petrologic mechanism and Logging response of complex lithology of Volcanoclastic rock in Hailaer-Tamtsag basin[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [15] 郭欣欣. 火山碎屑岩储层的岩石学特征与储层评价[D]. 长春:吉林大学, 2013.
Guo Xinxin. Study on the Petrologic Characteristics and Evaluation of the Pyroclastic Rock Reservoir [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [16] 修昊,唐华风,黄露玫. 松辽盆地英台断陷沉火山碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3):33-39.
Xiu Hao, Tang Huafeng, Huang Lumei. Characteristics and influential factors of sedimentary pyroclastic rocks in Yingtai faulted depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3):33-39.
- [17] 蒋飞,李忠诚,程日辉.等.王府断陷小城子气田火山岩组气藏天然气成藏模式及富集规律[J]. 天然气工业, 2016, 36(10):46-55.
Jiang Fei, Li Zhongcheng, Cheng Rihui, et al. Natural gas accumulation models and enrichment patterns of the Huoshiling Fm reservoirs in the Xiaochengzi gas field, Wangfu fault depression, Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10):46-55.
- [18] 宋鹏. 王府断陷火山岩组火山岩储层裂缝特征与分布规律[J]. 世界地质, 2015, 34(3):716-725.
Song Peng. Fracture characteristics and distribution of volcanic reservoir of Huoshiling Formation in Wangfu fault depression[J]. Global Geology, 2015, 34(3):716-725.
- [19] 周翔,舒萍,于士泉.等.松辽盆地徐深9区块营一段火山岩气藏储层特征及综合评价[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1):62-72.
Zhou Xiang, Shu Ping, Yu Shiquan, et al. Reservoir characteristics and integrated evaluation of volcanic rock in member 1, Yingcheng Formation, Xushen 9 block, Songliao Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1):62-72.
- [20] 焦贵浩,罗霞,印长海.等.松辽盆地深层天然气成藏条件与勘探方向[J]. 天然气工业, 2009, 29(9):28-31.
Jiao Guihao, Luo Xia, Yin Changhai, et al. Gas pooling conditions and exploration direction in deep Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9):28-31.
- [21] 张晓东,于晶,张大智.等.徐家围子断陷沙河子组致密气成藏条件及勘探前景[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5):86-91.
Zhang Xiaodong, Yu Jing, Zhang Dazhi, et al. Accumulation conditions and exploration prospects for Shahezi Formation tight sandstone gas in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Petroleum Geology and Oil-field Development in Daqing, 2014, 33(5):86-91.
- [22] 王志宏,李剑,夏利.松辽盆地深层断陷沙河子组烃源岩分布预测与生气潜力[J]. 世界地质, 2014, 33(3):630-639.
Wang Zhihong, Li Jian, Xia Li. Distribution forecast of source rocks and gas generation potential of Shahezi Formation in deep fault depressions of Songliao Basin [J]. Global Geology, 2014, 33(3):630-639.
- [23] 李赫. 松辽盆地小城子地区沙河子组一泉头组一段沉积相特征研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
Li He. Study of Sedimentary Facies Characteristic of Shahezi Formation-the First Section of Quantou Formation in Xiaochengzi Area of Songliao [D]. Jilin University: Changchun of China, 2013.
- [24] 付新. 松辽盆地南部东部断陷带沙河子组地层特征研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2013.
Fu Xin. Research on stratigraphic characteristics of Shahezi formation in the east fault depression, Songliao Southern Basin [D]. Northeast Petroleum University: Daqing in China, 2013.
- [25] 周传臣. 徐家围子断陷沙河子组层序特征研究[D]. 黑龙江:东北石油大学, 2013.
Zhou Chuanchen. Research on sequences characteristics of Shahezi formation in Xujiaweizi depression [D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2013.
- [26] 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.
- [27] 邹才能,陶士振,张响响.等.中国低孔渗大气区地质特征、控制因素和成藏机制[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2009, 39(11):1607-1624.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhang Xiangxiang, et al. The geological characteristics, controlling factors and mechanism of the low permea-

- bility atmosphere in China[J]. Science China Ser D-Earth Science, 2009,39(11):1607-1624.
- [28] 侯启军. 松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J]. 石油学报, 2011,32(5):749-756.
- Hou Qijun. Main controlling factors of volcanic reservoirs in the southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(5):749-756.
- [29] 贾利春,陈勉,张伟. 等. 火山岩力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014,14(5):13-16.
- Jia Lichun, Chen Mian, Zhang Wei, et al. Experimental study on rock mechanics of volcanic rock[J]. Science Technology and Engineering, 2014,14(5):13-16.
- [30] 高帅, 巩磊, 刘小波. 等. 松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020,41(3):503-512.
- Gao Shuai, Gong Lei, Liu Xiaobo, et al. Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):503-512.
- [31] 阮宝涛, 张菊红, 王志文. 等. 影响火山岩裂缝发育因素分析[J]. 天然气地球科学, 2011,22(2):287-292.
- Ruan Baotao, Zhang Juhong, Wang Zhiwen, et al. The affected factor for volcanic fracture development[J]. Natural Gas Geosciences, 2011,22(2):287-292.
- [32] 高帅, 巩磊, 刘小波. 等. 松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020,41(3):503-512.
- Gao Shuai, Gong Lei, Liu Xiaobo, et al. Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):503-512.
- [33] 周翔, 于世泉, 张大智. 等. 松辽盆地徐深气田致密火山岩气藏气水分布特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(5):1038-1047.
- Zhou Xiang, Yu Shiquan, Zhang Dazhi, et al. Characteristics and major controlling factors of gas-water distribution in tight volcanic gas reservoir in Xushen gas field, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(5):1038-1047.
- [34] 张喜龙, 侯文锋, 朱国涛. 等. 金龙2井区火山岩储层特征及影响因素[J]. 特种油气藏, 2019,26(1):18-23.
- Zhang Xilong, Hou Wenfeng, Zhu Guotao, et al. Characteristics and influential factors of volcanic reservoir in Wellblock Jinlong 2[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019,26(1):18-23.
- [35] 冯增昭. 中国沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2013.
- Feng Zengzhao. Sedimentology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [36] 唐华凤, 孔坦, 刘祥. 等. 松辽盆地白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2016,37(5):631-643.
- Tang Huafeng, Kong Tan, Liu Xiang, et al. Characteristics and formation mechanisms of high quality reservoir of volcanoclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(5):631-643.
- [37] 邸世祥. 等. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构[M]. 西安:西北大学出版社, 1991.
- Di Shixiang, et al. Pore textures in clastic reservoirs of China eng[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1991.
- [38] 霍建峰, 高健, 郭小文. 等. 川东地区龙马溪组页岩不同岩相孔隙结构特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2020,41(6):1162-1175.
- Huo Jianfeng, Gao Jian, Guo Xiaowen, et al. Characteristics and controlling factors of pore structures of various lithofacies in shales of Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(6):1162-1175.
- [39] 王艳忠, 操应长. 车镇凹陷古近系深层碎屑岩有效储层物性下限及控制因素[J]. 沉积学报, 2010,28(4):752-761.
- Wang Yanzhong, Cao Yingchang. Lower property limit and controls on deep effective clastic reservoirs of Paleogene in Chezhen Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(4):752-761.
- [40] 张驰, 王峰, 田景春. 等. 鄂尔多斯盆地马岭地区延长组长8段储层特征及综合评价[J]. 石油地质与工程, 2015,29(2):45-48.
- Zhang Chi, Wang Feng, Tian Jingchun, et al. Characteristics and comprehensive evaluation of Chang 8 Section of Reservoir Stratum Yanchang Formation of reservoir in Maling Areas, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015,29(2):45-48.
- [41] 李易隆, 贾爱林, 何东博. 等. 致密砂岩有效储层形成的控制因素[J]. 石油学报, 2013,34(1):71-82.
- Li Yilong, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Control factors on the formation of effective reservoirs in tight sands; examples from Guang'an and Sulige gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):71-82.
- [42] 刘红光, 刘波, 曹鉴华. 等. 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统储层发育特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2018,39(1):107-118.
- Liu Hongguang, Liu Bo, Cao Jianhua, et al. Characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(1):107-118.
- [43] 杨通佑, 范尚炯, 陈元千. 等. 石油及天然气储量计算方法(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- Yang Tongyou. Oil and natural gas reserve calculating method 2nd Edition; Beijing in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [44] 王亚, 杨少春, 路研. 等. 渤海湾盆地东营凹陷高青地区中生界低渗透碎屑岩有效储层特征及发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(2):271-283.
- Wang Ya, Yang Shaochun, Lu Yan, et al. Characteristics and controlling factors of effective reservoirs of Mesozoic low permeability clastic rocks in Gaoqing Region, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(2):271-283.
- [45] 邵翌一, 吴朝东, 张大智. 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(1):101-108.
- Shao Zhaoyi, Wu Chaodong, Zhang Dazhi, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(1):101-108.