



地学前缘
Earth Science Frontiers
ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

题目: 乌伦古地区石炭系火山岩成岩作用及其对储层发育的影响
作者: 谷文龙, 牛花朋, 张关龙, 王圣柱, 于洪洲, 焦小芹, 熊峥嵘, 周健
DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.2.65
网络首发日期: 2022-04-28
引用格式: 谷文龙, 牛花朋, 张关龙, 王圣柱, 于洪洲, 焦小芹, 熊峥嵘, 周健. 乌伦古地区石炭系火山岩成岩作用及其对储层发育的影响[J/OL]. 地学前缘.
<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2022.2.65>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

乌伦古地区石炭系火山岩成岩作用及其对储层发育的影响

谷文龙^{1,2} 牛花朋^{1,2,✉} 张关龙³ 王圣柱³ 于洪洲³ 焦小芹^{1,2} 熊峥嵘³
周健³

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015

*通信作者 牛花朋, (1979—), 女, 博士, 教授, 从事矿物岩石学与储层地质学相关研究。E-mail: niuhuapeng@126.com

摘要 准噶尔盆地石炭系具有广阔的油气勘探前景, 但勘探效果一直不理想。本文通过岩心观察、薄片鉴定、阴极发光以及扫描电镜、微米 CT 等多种分析结果, 重点对准东北缘乌伦古地区火山岩储层的成岩作用及其对储层发育的影响进行了研究。研究表明: 研究区火山岩先后经历了冷凝固结、岩浆期后热液作用、风化剥蚀淋滤作用和埋藏成岩作用四个成岩阶段, 主要发育冷凝固结作用、压实作用、溶蚀作用、充填胶结作用、蚀变作用和交代作用六种成岩作用。冷凝固结作用和溶蚀作用可以形成原生孔隙、溶蚀孔和溶蚀裂缝, 对改善储层质量起关键性作用; 压实作用、充填胶结作用、蚀变作用及交代作用大大减少了原有储集空间。CT 扫描成像、测井解释等定量化分析结果表明上石炭统储层储集性能略优于下石炭统, 研究区有利储层发育区主要位于上石炭统储层。

关键词 准噶尔盆地; 乌伦古地区; 火山岩储层; 成岩作用; 成岩阶段

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.2.65

Diagenesis of Carboniferous volcanic rocks in Wulungu Area and its implications for the reservoir development

Gu Wenlong^{1,2} Niu Huapeng^{1,2,✉} Zhang Guanlong³ Wang Shengzhu³ Yu Hongzhou³ Jiao Xiaoqin^{1,2} Xiong Zhengrong³ Zhou Jian³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China)

Abstract The Carboniferous in Junggar Basin has broad prospects for oil and gas exploration, but the exploration effect has not been ideal. Through core observation, thin section identification, cathodoluminescence, scanning electron microscope, micron CT and other analysis results, this paper focuses on the diagenesis of volcanic reservoir in Wulungu area of Junggar Basin and its implications for the reservoir development. Our study shows that the diagenesis stages in the study area are divided into four diagenesis stages: condensation consolidation diagenesis stage, post magmatic hydrothermal stage, weathering denudation-leaching stage and buried diagenesis stage. There are mainly six diagenesis in the study area: condensation consolidation, compaction, dissolution, filling cementation, alteration and metasomatism. Condensation consolidation and dissolution can form primary pores, dissolution pores and dissolution fractures, which plays a key role in improving reservoir quality. Compaction, filling cementation, alteration and metasomatism have greatly reduced the primary reservoir space. The quantitative analysis results of micron CT and logging interpretation show that the reservoir quality of the Upper Carboniferous is slightly better than that of the Lower Carboniferous, but they all show strong heterogeneity.

Key words Junggar basin; Wulungu area; Volcanic rock reservoir; Diagenesis; Diagenetic stage

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05063002-006)、北京高等学校青年英才计划项目(YETP0669)联合资助

作者简介: 谷文龙(1996—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: wlgu163@163.com

网络首发时间: 2022-04-28 09:18:05 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3370.P.20220427.1446.001.html>

0 引言

随着油气勘探的不断深入,火山岩储层逐渐成为全球油气勘探开发的重要领域^[1,2]。据不完全统计,火山岩油气储层在全球范围内广泛分布,如阿根廷的 Neuquen 盆地、古巴的 North Cuba 盆地、印度尼西亚的 Jawa 盆地、日本的 Niigata 盆地^[3-5],以及我国的松辽盆地和准噶尔盆地^[6,7]。从全球范围来看,从基性岩到酸性岩、从熔岩到火山碎屑岩,几乎所有类型的火山岩都具有形成有效储层的潜力^[2],储集空间主要包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝,储层质量则主要受岩性岩相、构造作用、风化淋滤作用和各种成岩作用等因素所控制^[8,9]。

近年来,随着五彩湾气田、石西油田、克拉美丽气田等石炭系火山岩油气田逐渐被发现,准噶尔盆地石炭系已成为油气勘探的重点层系^[10]。但在准噶尔盆地东北缘乌伦古地区部署的 ZB1、ZB101 等 6 口关键探井,仅在三叠系见到丰富的油气显示,石炭系勘探效果不理想,火山岩储层发育规律认识不清楚,严重制约了石炭系的进一步勘探。本文以乌伦古地区石北凹陷、石西凹陷和石英滩凸起石炭系火山岩储层为例,利用岩心观察、薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜和微米 CT 等多种分析测试方法,对火山岩成岩作用及其对储层发育的影响进行分析研究,以期对火山岩油气藏勘探开发提供参考依据。

1 区域地质概况

乌伦古地区位于准噶尔盆地东北缘,包括乌伦古坳陷和陆梁隆起两个构造单元^[11-14]。早石炭世早—中期,乌伦古地区处于水下岛弧和多岛弧弧后盆地结合的复杂背景,发育浅海相、海—陆过渡相环境。早石炭世晚期,克拉美丽洋盆闭合,在克拉美丽缝合带南侧五彩湾及邻区形成残余的陆缘海。晚石炭世,火山活动强烈,火山岩十分发育,乌伦古地区主要处于大陆裂谷环境,以陆相沉积为主。乌伦古地区石炭系自下而上可分为下石炭统黑山头组、姜巴斯套组和上石炭统巴塔玛依内山组。下石炭统主要发育中—基性火山碎屑岩、中—酸性熔结火山碎屑岩,上石炭统主要由中性火山熔岩及中—酸性火山碎屑岩组成。研究区位于乌伦古坳陷石英滩地区,主要包括石北凹陷、石西凹陷和石英滩凸起^[15-17](图 1)。

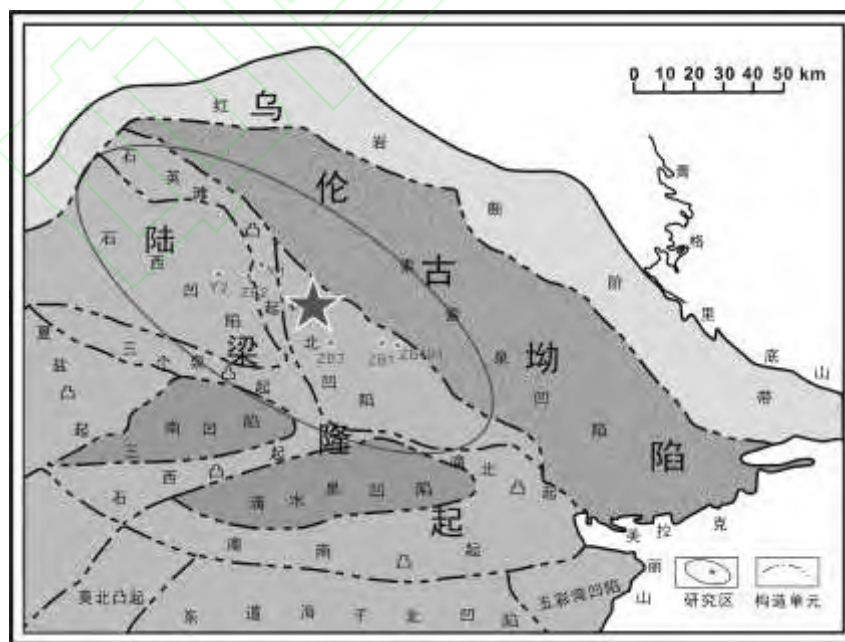


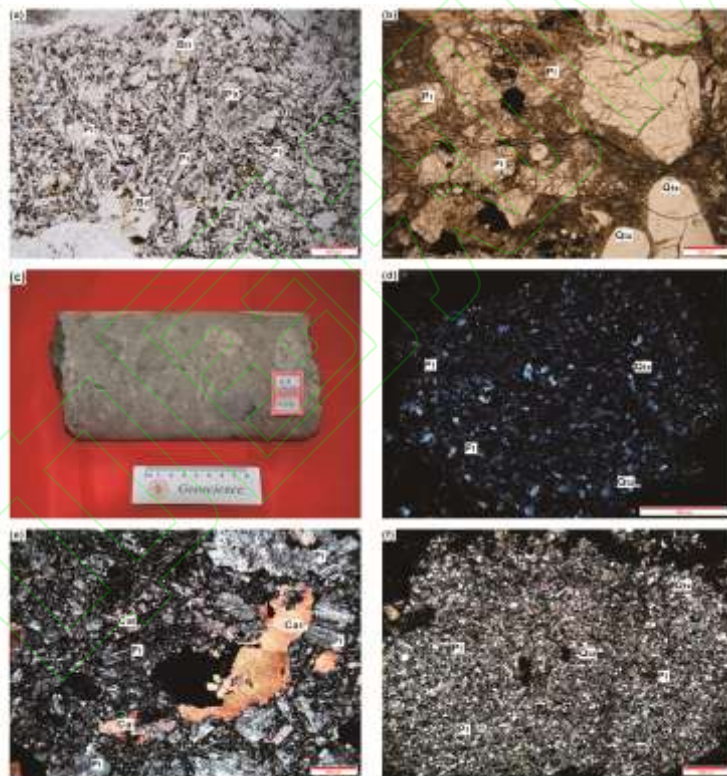
图 1 研究区构造位置(据文献[17]修改)

Fig. 1 Structure location map of the study area. Modified after [17].

2 火山岩储层特征

2.1 岩石学特征

基于岩心观察和薄片鉴定, 根据火山碎屑岩分类方案^[18-21], 研究区火山岩可分为 4 类 11 小类, 主要发育安山岩、熔结火山角砾岩、熔结凝灰岩、火山角砾岩、凝灰岩和沉凝灰岩, ZB1 井发育辉长岩侵入岩体。安山岩常见斑状结构(图 2a), 斑晶矿物成分主要为中性斜长石(约 40%), 平均粒径 1mm 左右, 其次为辉石(约 3%)、暗化的角闪石和黑云母(约 4%), 基质具玻基交织结构。熔结火山角砾岩和熔结凝灰岩发育熔结结构(图 2b)和假流纹构造^[22,23]。火山角砾岩以玄武安山质、安山质为主, 块状构造, 火山角砾结构(图 2c)。角砾大小 2mm~6mm, 呈棱角一次棱角状, 成分主要为长石晶屑(约 18%)、安山质岩屑(约 65%), 部分被方解石交代, 可见绿泥石化或高岭土化。凝灰岩多为酸性或中性凝灰岩, 火山碎屑含量占 90%以上, 颗粒由晶屑(主要为石英、碱性长石, 少量斜长石和黑云母晶屑)、玻屑和岩屑组成, 粒径大小 0.05mm~2mm。填隙物主要是火山灰, 含少量陆源长石和石英碎屑(图 2d)。其中, 玻屑晶屑凝灰岩的碳酸盐化较为严重, 可见方解石交代于长石颗粒之上(图 2e)。沉凝灰岩发育层状结构, 火山碎屑物含量 50%~90%, 碎屑颗粒可见不同程度的磨圆。火山碎屑物质主要为长石、石英晶屑及少量黑云母晶屑, 岩屑、玻屑含量较少(图 2f)。



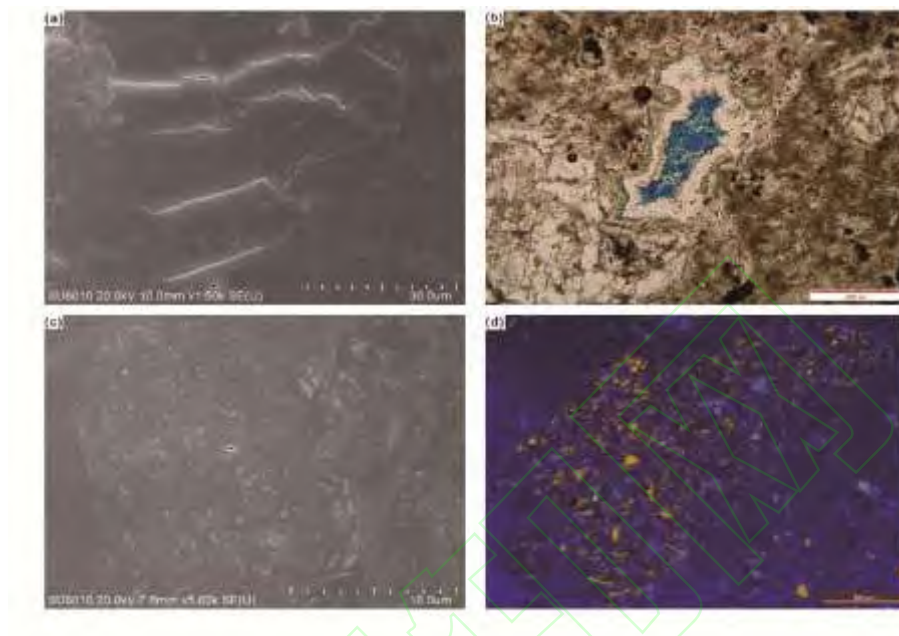
(a) 安山岩, 斑状结构, ZB2 井, 3967m, (-) ×50; (b) 熔结火山角砾岩, 熔结结构, Y1 井, 2742.15m, (-) ×50; (c) 火山角砾岩, 角砾结构, Y1 井, 2663.96 m, 岩心照片; (d) 凝灰岩, 凝灰结构, ZB101 井, 4188m, (+) ×100; (e) 玻屑晶屑凝灰岩, 方解石交代长石, Y2 井, 4720.97m, (+) ×50; (f) 沉凝灰岩, ZB101 井, 碎屑颗粒有磨圆, 3859m, (+) ×50。Qtz—石英; Pl—斜长石; Px—辉石; Bit—黑云母; Cal—方解石。

图 2 乌伦古地区主要发育的火山岩
Fig. 2 Volcanic rocks mainly developed in Wulungu area

2.2 储集空间特征

根据薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜、微米 CT 扫描成像等资料综合分析认为, 研究区火山岩储

层储集空间可分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝三大类。根据成因等又将原生孔隙进一步细分为原生气孔（图 3a;图 6a）、剩余气孔（图 3b）和颗粒间（内）孔（图 3c）；次生孔隙分为颗粒溶蚀孔（图 6c）和基质溶孔（图 3d）；裂缝主要分为冷凝收缩缝（图 3a）、溶蚀缝（图 6b）和构造裂缝。对提高孔隙度贡献率最大的是原生孔隙、颗粒溶蚀孔和溶蚀缝。

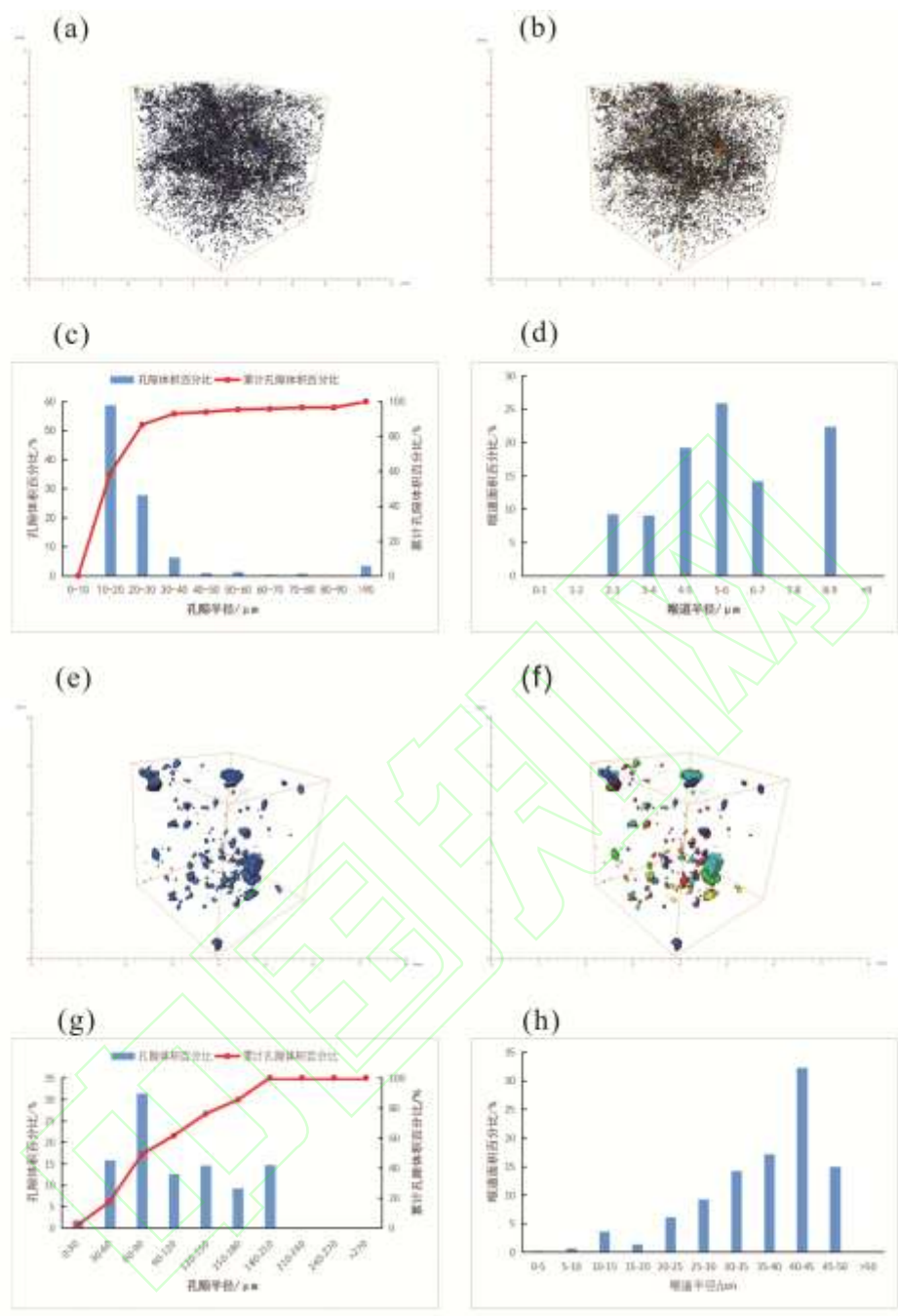


（a）冷凝收缩缝、原生气孔，Y1 井，2664.26m，扫描电镜；（b）剩余气孔，Y2 井，3478.1m，（-） $\times 200$ ；（c）颗粒间（内）孔，Y2 井，4723.46m，扫描电镜；（d）基质溶孔，ZB101 井，3859m，阴极发光。

图 3 乌伦古地区火山岩储集空间类型
Fig. 3 Classification of volcanic reservoir spaces in Wulungu area

2.3 物性特征

研究区石炭系火山岩储层储集性能较差，且孔渗数据较少，基于测井孔隙度、渗透率、扫描电子显微镜（SEM）、微米 CT 扫描成像等解释成果，根据火山岩储层评价分类标准^[24]，孔隙度介于 10%-15%、渗透率介于 5mD-10 mD 的为 II 类储层，孔隙度介于 5%-10%、渗透率介于 1mD-5mD 的为 III 类储层，孔隙度介于 3%-5%、渗透率介于 0.1mD-1mD 的为 IV 类储层，经分析研究得出上石炭统火山岩储层孔隙度为 1.41%-10.9%，平均 3.98%，渗透率 0.002mD-6.28mD，平均 0.59mD，安山岩样品微米 CT 分析结果得出主要发育 10 μ m-30 μ m 的颗粒间（内）孔和溶蚀孔，喉道半径主要分布在 4 μ m - 9 μ m；下石炭统孔隙度为 1.24%-8.53%，平均 3.58%，渗透率 0.01mD-4.64mD，平均 0.33mD，熔结火山角砾岩样品微米 CT 分析结果得出主要发育 60 μ m-90 μ m 的颗粒间（内）孔和气孔，喉道半径主要分布在 30 μ m-50 μ m（图 4）。其中，Y2 井上石炭统共发育 22.3m 的 II 类储层，该 II 类储层的孔隙度平均为 10.45%，渗透率平均为 6.27 mD，另外还发育 25.1m 的 III 类储层，该 III 类储层的孔隙度平均为 9.05%，渗透率平均为 3.87 mD。ZB2 井下石炭统共发育 5.5m 孔隙度平均为 7.5%的 III 类储层。综合分析认为，上石炭统储层储集性能略优于下石炭统，有利储层发育区主要位于上石炭统储层，研究区石炭系火山岩广泛发育 IV 类储层，可见小规模 II 类或 III 类储层。



(a) Y2 井, 3478.1m, C₂b, 孔隙提取图, 安山岩; (b) Y2 井, 3478.1m, C₂b, 孔隙连通性图, 安山岩; (c) Y2 井, 3478.1m, C₂b, 孔隙体积与半径分布图, 安山岩; (d) Y2 井, 3478.1m, C₂b, 喉道面积与半径分布图, 安山岩; (e) Y1 井, 2742.15m, C_{1j}, 孔隙提取图, 熔结火山角砾岩; (f) Y1 井, 2742.15m, C_{1j}, 孔隙连通性图, 熔结火山角砾岩; (g) Y1 井, 2742.15m, C_{1j}, 孔隙体积与半径分布图, 熔结火山角砾岩; (h) Y1 井, 2742.15m, C_{1j}, 喉道面积与半径分布图, 熔结火山角砾岩。

图 4 微米 CT 三维重构与孔喉半径体积分布特征
Fig. 4 3D reconstruction by micron CT and volume distribution characteristics of pore-throat radius

3 火山岩储层成岩作用

根据火山岩成岩阶段划分方案^[8,25,26,27], 研究区火山岩先后经历了凝固成岩阶段、岩浆期后热液作用阶段、风化剥蚀淋滤作用阶段、埋藏成岩阶段 4 个大的成岩阶段, 其中, 埋藏成岩阶段又分为浅埋成岩阶段和深埋成岩阶段(图 5)。成岩作用类型主要包括: 凝固成岩作用、压实作用、溶蚀

作用、充填胶结作用、蚀变及交代作用。

凝固固结阶段是指岩浆从地下深处喷出地表直至凝固固结成岩的阶段^[28]。该阶段经历的成岩作用类型有凝固固结作用、压实作用和脱玻化作用，主要形成原生气孔、颗粒间（内）孔、残余气孔、冷凝收缩缝等储集空间，气孔大多为岩浆凝固固结过程中易挥发组分溢出而形成^[29,30]。该成岩阶段中火山碎屑熔岩主要由熔浆凝固固结成岩，火山碎屑岩则是火山碎屑物压实胶结方式成岩。

岩浆期后热液作用阶段主要以热液充填、热液交代蚀变作用为主。当火山岩中不稳定矿物含量较高时，容易发生蚀变。交代作用是在成岩后期成岩流体对已存在矿物的化学作用，是影响火山岩储层物性的重要因素^[27]。热液渗入孔隙和裂缝中冷凝沉淀，发生充填胶结作用，充填胶结物以方解石、绿泥石为主，原生储集空间遭受破坏。由于热液的作用，富 **Mg**、**Fe** 的矿物及长石等易发生矿物交代蚀变作用。镜下观察发现，研究区普遍存在长石高岭土化，还可见长石发生绢云母化和碳酸盐化（图 6f）。

研究区石炭系火山岩出露地表遭受风化淋滤，该阶段典型的储集空间类型为大气降水等流体溶蚀作用形成的溶蚀孔、溶蚀缝，为溶蚀作用的主要发生期，同时在该阶段也由于风化作用、蚀变作用开始生成蒙脱石等一些粘土矿物。绿泥石、高岭石等矿物在此阶段演变程度较低，新生成的矿物含量远不如岩浆期后热液作用阶段。在具有一定流通性条件的情况下，火山岩遭受地层水、有机酸等流体的溶蚀作用^[31,32]，黑云母、角闪石以及钾长石等矿物受风化淋滤作用的影响程度较大，主要发生溶蚀作用。

埋藏成岩阶段以机械压实作用、充填胶结作用、溶蚀作用、蚀变及交代作用为主。进入浅埋阶段后期，研究区烃源岩进入成熟期并开始大量排烃，形成有机酸性流体，加上随埋深增大与温度升高，水—岩反应活跃而形成无机酸性流体，研究区火山岩遭受地层水、酸性流体的溶蚀形成溶蚀孔、缝或改造原有储集空间，次生矿物充填部分孔隙和裂缝。随埋深加深，偏光显微镜下可见颗粒间的缝合线接触和凹凸接触（图 6d），以及早期生成的蒙脱石向绿泥石和伊利石转化。



图 5 乌伦古地区石炭系火山岩储层成岩演化
Fig. 5 Diagenetic evolution of Carboniferous volcanic reservoir in Wulungu area

4 成岩作用对储层的影响

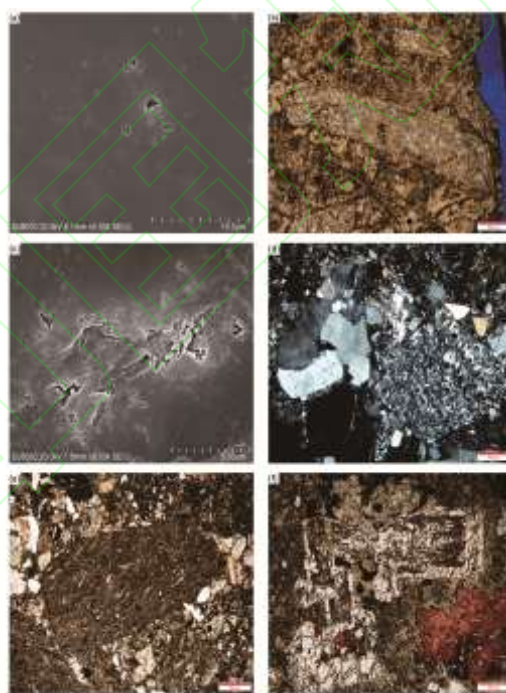
火山岩储层的储集性能主要受岩性、岩相、构造断裂、风化淋滤作用等因素控制。成岩作用是上述储层主控因素的微观体现，分析不同成岩作用下火山岩储层的演化过程，以及其对储集性能的控制作用，有利于进一步分析火山岩成储机制^[33,34]。

4.1 冷凝固结作用

岩浆从地下深处喷出地表冷凝固结成岩, 往往形成原生气孔(图 6a)、冷凝收缩缝(图 3a)、晶间和晶内孔缝(图 3c)等原生储集空间, 该类原生储集空间常见于流纹质熔结火山角砾岩、玄武安山质火山角砾岩、安山岩。

4.2 溶蚀作用

火山岩遭受地层水、有机酸等流体的溶蚀作用, 形成储集层最主要的储集空间。主要分为三类: 第一类发生在火山喷发间歇期, 地表或近地表条件下, 火山岩中气孔、颗粒内孔、原生裂缝因风化淋滤作用而被溶蚀, 发育溶蚀孔、溶蚀缝(图 6b)。第二类是沿构造裂缝发生强烈溶蚀作用形成的构造溶蚀缝、溶蚀孔, 同时被碳酸盐胶结物所充填。根据 CT 扫描成像解释成果, 熔结火山角砾岩中发育有气孔和风化溶蚀成因的溶蚀孔, 且该岩类发育部位靠近断裂带, 一定程度上增加了地表流体向地层深部的溶蚀作用, 在原有构造裂缝的基础上, 还发育有溶蚀裂缝, 进而增强了孔隙间的连通性, 故孔隙半径相对较大, 半径在 $60\ \mu\text{m}$ - $90\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占比 31%, 最大孔隙半径可达 $180\ \mu\text{m}$, 喉道半径在 $30\ \mu\text{m}$ - $50\ \mu\text{m}$ 之间的喉道面积占比约 80%, 孔喉连通性相对较好(图 4)。溶蚀作用和裂缝发育对孔喉大小及孔隙连通性有着重要建设性作用。第三类是地下酸性流体造成的溶蚀作用, 形成溶蚀孔和溶蚀缝, 可见安山质凝灰岩因溶蚀作用形成的一些溶蚀缝和溶蚀孔(图 6c)。研究区玻屑晶屑凝灰岩、安山质凝灰岩、沉凝灰岩、安山岩中的长石晶体多在遭受风化剥蚀后发生溶蚀作用, 安山岩中的黑云母、角闪石、辉石等铁镁质矿物成分受溶蚀作用的影响程度更大, 主要发育溶蚀孔、溶蚀缝等储集空间, 从而较大的提升了储层质量。



(a) 冷凝固结作用形成原生气孔,安山岩,Y2 井,4627.39m, 扫描电镜; (b) 溶蚀作用形成溶蚀缝,安山岩,Y2 井,4626.97m, (-) $\times 50$; (c) 溶蚀作用形成溶蚀孔,安山质凝灰岩,Y2 井,4723.46m, 扫描电镜; (d) 压实作用形成缝合线接触和凹凸接触,玄武安山质火山角砾岩,Y1 井,2664.26m, (+) $\times 50$; (e) 长石蚀变为高岭石,玄武安山质火山角砾岩,Y1 井,2663.80m, (-) $\times 50$; (f) 方解石交代长石,安山岩,Y2 井,3478.1m, (-) $\times 50$ 。

图 6 乌伦古地区火山岩储层成岩作用薄片照片
Fig. 6 Thin sections showing diagenesis of volcanic reservoir in Wulungu area

4.3 压实作用

火山碎屑岩为火山喷发崩解产生的各种火山碎屑物质堆积、固结而形成的火山岩类，属于压实胶结方式成岩。镜下观察发现，压实作用对原生孔隙破坏作用强烈（图 6d），但同时随着压实作用的进行，刚性火山碎屑物质的存在也限制了压实作用，一定程度上使得原始储集空间得以保留，分选相对较好的火山角砾岩相对抗压能力较强，可以保留一定的颗粒间孔。

4.4 充填胶结作用

充填胶结作用对储集层空间起主要破坏作用，是导致研究区火山岩储层物性变差的主要因素之一。火山物质蚀变、火山热液在一定条件下结晶析出，研究区储层主要为高岭石充填，其次为方解石充填，还可见沸石、绿泥石等矿物充填。镜下观察发现，研究区胶结物类型主要为方解石和绿泥石，以孔隙式、基底式胶结为主，胶结作用多沿裂缝、颗粒间孔和溶蚀孔进行（图 3d）。充填胶结作用严重阻碍孔喉连通性，破坏储层储集性能。

4.5 蚀变及交代作用

研究区内长石蚀变为高岭石普遍存在（图 6e），方解石是最主要的交代物（图 6f）。蚀变及交代对储层物性的影响是双向的，一方面矿物水化膨胀蚀变使孔隙度相对降低，另一方面矿物蚀变可以使矿物碱性和细粒化，从而更容易被带走或者被有机酸溶蚀。镜下可见安山质凝灰岩、玄武安山质火山角砾岩内长石高岭土化及碳酸盐化，辉石和角闪石绿泥石化。受长石高岭土化以及方解石交代等作用的影响，研究区火山岩储层更容易受地层水、有机酸等流体溶蚀作用而形成溶蚀孔缝或改造原有储集空间（图 6c）。

5 结论

1) 乌伦古地区石炭系火山岩主要发育火山熔岩类、火山碎屑熔岩类、火山碎屑岩类、沉火山碎屑岩类四类组合，中—基性火山岩类为主，主要包括安山岩、熔结火山角砾岩、熔结凝灰岩、火山角砾岩、凝灰岩和沉凝灰岩，ZB1 井发育辉长岩侵入岩体。

2) 研究区火山岩储层储集空间类型多样，可分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝三大类。根据成因等又可细分为原生气孔、剩余气孔、颗粒间（内）孔、颗粒溶蚀孔、基质溶孔、冷凝收缩缝、构造裂缝和溶蚀缝 8 个小类。上石炭统火山岩储层平均孔隙度为 3.98%，平均渗透率为 0.59mD；下石炭统平均孔隙度为 3.58%，平均渗透率为 0.33mD。综合分析认为，上石炭统储层储集性能略优于下石炭统，有利储层发育区主要位于上石炭统储层，研究区石炭系火山岩广泛发育Ⅳ类储层，可见小规模Ⅱ类或Ⅲ类储层。

3) 研究区火山岩先后经历了冷凝固结成岩阶段、岩浆期后热液作用阶段、风化剥蚀淋滤作用阶段、埋藏成岩阶段 4 个大的成岩阶段。成岩作用类型主要包括：冷凝固结作用、压实作用、溶蚀作用、充填胶结作用、蚀变及交代作用。冷凝固结成岩阶段和岩浆期后热液作用阶段以冷凝固结作用、脱玻化作用和早期压实作用为主，同时也有充填胶结作用、蚀变及交代作用发生，主要形成原生气孔、颗粒间（内）孔、残余气孔、冷凝收缩缝等原生储集空间。风化剥蚀淋滤作用阶段以溶蚀作用为主，同时伴有充填胶结作用、压实作用、蚀变及交代作用发生，主要形成溶蚀缝、颗粒溶蚀孔、基质溶孔等次生储集空间。埋藏成岩阶段以压实作用、溶蚀作用、充填胶结作用、蚀变及交代作用为主，主要由有机酸、地层水等流体形成溶蚀孔缝、构造溶蚀缝等储集空间。

冷凝固结作用和溶蚀作用可以形成和改善储集空间，对储层储集性能起建设性作用；压实作用、充填胶结作用会减少原有储集空间，对储层储集性能起破坏性作用；蚀变及交代作用更多对储层储集性能起破坏作用。

参考文献

- [1] 张子枢， 吴邦辉. 国内外火山岩油气藏研究现状及勘探技术调研[J]. 天然气勘探与开发， 1994， 16（1）： 1-26.
- [2] 王洛， 李江海， 师永民， 等. 全球火山岩油气藏研究的历程与展望[J]. 中国地质， 2015， 42（5）： 1610-1620.

- [3] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115-129.
- [4] Schutter S R. Occurrences of Hydrocarbons in and around Igneous Rocks[J]. Geological Society London Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [5] Ukai M, Katahira T, Kume Y, et al. Volcanic Reservoirs, Their Characteristics of the Development and Production[C]. Tokyo: Joint Aime-mmij Meeting, 1972, SPE(4296): 1-16.
- [6] 冯志强, 金成志, 梁江平, 等. 大庆油田勘探技术现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 58-62.
- [7] 匡立春, 吕焕通, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地天然气勘探实践与克拉美丽气田的发现[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 1-6.
- [8] 罗静兰, 邵红梅, 张成立. 火山岩油气藏研究方法与勘探技术综述[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 31-38.
- [9] 张萌, 林会喜. 春晖油田石炭系火成岩储层特征及形成机理[J]. 特种油气藏, 2016, 23(5): 52-55.
- [10] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 1-11.
- [11] 赵白. 准噶尔盆地构造特征与构造划分[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(3): 209-215.
- [12] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 431-440.
- [13] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 77-89.
- [14] 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 686-688.
- [15] 任新成. 准噶尔盆地乌伦古坳陷中生代构造单元划分[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(14): 129-131.
- [16] 王屿涛. 乌伦古地区伦2、伦3井生油岩评价和油源对比[J]. 新疆石油地质, 1987, 8(1): 29-34.
- [17] 何胜. 准噶尔盆地乌伦古地区石炭系油气源特征及潜力探讨[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 162-167.
- [18] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1989: 3-12.
- [19] 邱家骥. 国际地科联火成岩分类学分会推荐的火山岩分类简介[J]. 现代地质, 1991, 5(4): 457-468.
- [20] 王璞珺, 缴洋洋, 杨凯凯, 等. 准噶尔盆地火山岩分类研究与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1056-1070.
- [21] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 313-317.
- [22] 边伟华. 准噶尔盆地巴塔玛依内山组火山岩储层地质学研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011: 24-28.
- [23] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 17-22.
- [24] 任延广, 王成, 吴海波, 等. SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 4-11.
- [25] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1251-1258.
- [26] 应凤翔, 何东博, 龙玉梅, 等. SY/T 5477-2003 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-9.
- [27] 王岩泉, 王金铎, 王千军, 等. 火山碎屑岩成岩作用及对储层储集性能的影响-以准噶尔盆地车排子地区石炭系为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 405-414.
- [28] 熊益学, 郝爱华, 冉启全, 等. 火山岩原生储集空间成因及其四阶段演化-以准噶尔盆地滴西地区石炭系为例[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 146-155.
- [29] 赵澄林. 火山岩储层储集空间形成机理及含油气性[J]. 地质论评, 1996, 42(S1): 37-43.
- [30] 李学良, 张奎华, 林会喜, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组储层发育特征及油气富集因素[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 37-44.
- [31] 刘为付, 朱筱敏. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩储集空间演化[J]. 石油实验地质, 2005, 27(1): 44-49.
- [32] 刘小洪, 冯明友, 郝爱华, 等. 次火山岩储层储集空间形成及演化-以克拉美丽气田滴西18井区为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 278-288.
- [33] 韩刚, 张文婧, 任延广, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩储层成因机制[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2114-2121.
- [34] 冯子辉, 邵红梅, 童英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 760-768.