

# 火山碎屑岩的储层物性 ——以松辽盆地营城组为例

黄玉龙<sup>1</sup>, 王璞珺<sup>1</sup>, 邵锐<sup>2</sup>

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712

**摘要:** 对松辽盆地营城组 35 口盆内深层钻井和 2 口剖面浅钻全取心井的对比研究揭示: 在浅层(埋深 < 500 m), 火山碎屑岩储层物性(平均孔隙度 18.7%、渗透率  $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 好于熔岩(14.0%,  $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ); 在深层(埋深 > 2 800 m), 火山碎屑岩物性(2.6%,  $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 明显差于熔岩(7.3%,  $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。熔岩和火山碎屑岩的储层物性总体上随埋深增加而变差, 但火山碎屑岩的变化率显著大于熔岩; 所以当大于一定埋深(2 500~3 000 m)时, 熔岩的物性优于火山碎屑岩而成为主力储层。熔岩与火山碎屑岩物性随埋深变化的差异主要源于它们成岩方式的不同: 前者冷凝固结, 骨架体积受压实影响很小; 后者压实固结成岩, 其特点同沉积岩。在中浅层勘探中(埋深小于 2 500 m)火山碎屑岩可作为重点目标。

**关键词:** 松辽盆地; 白垩系营城组; 火山碎屑岩; 孔隙度; 渗透率

中图分类号: P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1671-5888(2010)02-0227-10

## Porosity and Permeability of Pyroclastic Rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin

HUANG Yu-long<sup>1</sup>, WANG Pu-jun<sup>1</sup>, SHAO Rui<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Exploration & Development Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China

**Abstract:** Correlation among 35 in-basin boreholes and 2 continuous field coring sections resulted that porosity and permeability of pyroclastic rocks (mean 18.7%,  $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) are higher than that of volcanic lava rocks (mean 14.0%,  $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) in the shallow part of basin with burial depth less than 500 meters, while contrarily in the deep part of basin with burial depth more than 2 800 meters, porosity and permeability of pyroclastic rocks (mean 2.6%,  $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) are rather poor than volcanic lava rocks (mean 7.3%,  $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ). Generally, porosity and permeability of both two types of rocks decrease with increasing burial depth, however, the changing rate of pyroclastic rocks is remarkably larger than that of volcanic lava rocks. Therefore, volcanic lava rocks become primary reservoir due to higher porosity and permeability than pyroclastic rocks when burial depth range is below 2 500 to 3 000 meters. This is mainly contributed by their differences in diagenesis as volcanic lavas are concreted by cooling so that their framework volume is hardly affected by compaction, while pyroclastic

收稿日期: 2009-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB209507, 2009CB219303)

作者简介: 黄玉龙(1982—), 男, 江苏六合人, 博士研究生, 主要从事油气地质和火山岩储层研究, E-mail: hyl1982@yahoo.cn

通讯联系人: 王璞珺(1959—), 男, 黑龙江绥滨人, 教授, 博士生导师, 主要从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学, Tel: 0431-88502620, E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

rocks are consolidated by compaction, similarly to sedimentary rocks. Therefore, petroleum exploration in the middle and shallow part of basin (burial depth less than 2 500 meters) could attentively aim at pyroclastic rocks.

**Key words:** Songliao basin; Cretaceous Yingcheng Formation; pyroclastic rocks; porosity; permeability

## 0 前言

盆地中下部地层中发育的火山碎屑岩因压实作用和自生胶结作用而具有较低的孔隙度和渗透率<sup>[1]</sup>, 曾被认为难以成为油气的有效储集层。然而, 自 20 世纪 80 年代以来, 美国(Middle Park 盆地)、古巴、阿根廷、格鲁吉亚(Samgori 和 Teleti 油田)、日本、菲律宾(Cotabato 盆地)、土耳其(Thrace 盆地)、印度尼西亚、新西兰(Taranaki 盆地)等陆续于火山碎屑岩中获得了工业规模的油气产能。其储集岩主要为凝灰岩、火山角砾岩和凝灰质砂岩, 形成时代以古近纪居多, 现今埋藏深度普遍小于 3 000 m, 储集物性优者孔隙度可达 30%、渗透率可达数百毫达西<sup>①</sup>, 有效储集空间包括粒间孔、次生溶蚀孔隙和裂缝, 埋藏压实作用导致储集物性急剧变差, 次生溶蚀和裂缝作用可显著改善储层性能<sup>[2-8]</sup>。

国内火山岩油气藏勘探开发起步相对较晚, 目前在多个盆地中发现火山岩储层并取得了油气勘探突破<sup>[9]</sup>。总体上熔岩类在火山岩储层中所占比重较大, 而火山碎屑岩作为主力储层的情况较少, 如二连盆地(阿南油田、哈南油田)、渤海湾盆地(惠民凹陷临商地区、辽河拗陷大洼油田)和海拉尔盆地(乌尔逊和贝尔凹陷); 储集岩以凝灰岩、火山角砾岩、沉凝灰岩和凝灰质砂岩为主, 形成时代跨度大、从古生代至新生代都有, 现今埋深普遍小于 2 500 m, 储集物性优者孔隙度为 10%~25%, 渗透率可达几十至几百毫达西, 有效储集空间以粒间孔、溶蚀孔和构造缝为主, 火山碎屑物质对孔隙的保存及其溶解作用形成的次生孔隙、碎屑颗粒包壳对原生孔隙的保存以及大气水淋滤和有机酸溶蚀形成次生孔隙, 是形成异常高孔隙发育带的主要因素<sup>[10-18]</sup>。此外, 松辽、准噶尔、塔里木和三塘湖等盆地中的火山碎屑岩储层也初步展现出一定的勘探潜力。

纵观国内外已发现的火山碎屑岩储层, 由于形成环境、矿物和化学组分、结构构造以及后期成岩过程等方面的差异, 火山碎屑岩在岩石物理性质和储层物性上具有很强的非均质性。构成油气储层的火

山碎屑岩形成时代以新生代居多, 埋藏压实作用、粘土矿物和沸石的充填作用以及次生溶蚀作用是引起火山碎屑岩储层物性发生显著变化的主要因素, 而其作用程度和发生机理在不同地区、不同类型的火山碎屑岩中存在很大差别。

松辽盆地下白垩统营城组火山岩储层发育<sup>[19]</sup>, 流纹岩和流纹质熔结凝灰熔岩是目前深层气藏开发的主力储层<sup>[20-21]</sup>; 火山碎屑岩亦是重要的储层岩石类型之一, 可作为松辽盆地气藏勘探的潜在对象和有益补充。针对火山碎屑岩的基础性研究有助于进一步了解其储层发育特征与分布规律。松辽盆地火山碎屑岩的岩相类型、储集空间和火山机构特征在以往研究中多有论述<sup>[22-24]</sup>。本文以露头 and 钻井资料为基础, 通过显微镜观测、孔渗测试和面孔率分析, 总结松辽盆地火山碎屑岩类型及特征, 分析储集物性与岩性、岩相对应关系以及随深度变化特征, 并与熔岩类储层进行对比, 最后探讨火山碎屑岩物性随深度变化的机理以及火山碎屑岩储层的勘探潜力。

## 1 火山碎屑岩特征与分布

### 1.1 岩性特征

火山碎屑岩指火山作用形成的各种火山碎屑物经压实固结而成的岩石, 包括火山碎屑岩和沉火山碎屑岩两大类。火山碎屑岩由碎屑和基质两部分构成, 碎屑包括晶屑、玻屑、浆屑和岩屑, 基质为火山灰(尘)或相对较细的火山碎屑。火山碎屑岩的搬运方式有空落(弹道状坠落和自由落体)、载屑蒸汽流(碎屑与气体形成的固-气混合物的重力流或扩散流)和崩塌(雪崩式搬运)等; 沉火山碎屑岩的搬运方式同沉积岩。两类碎屑岩的共性是成岩方式相同, 即压实固结成岩。火山碎屑岩常构成向熔岩或正常沉积岩过渡的岩石类型, 实际工作中对过渡类型的岩石采用“优势类型”原则, 即以谁为主就定名为谁。笔者根据我国近年火山碎屑岩勘探的实际情况并结合

① 毫达西(md)为非法定计量单位,  $1 \text{ md} = 9.869 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$

相关国内外分类系统<sup>[22-25-27]</sup>,提出我国盆地火山碎屑岩分类意见(表1)。图版中展示了松辽盆地钻井和盆缘露头所揭示的下白垩统营城组代表性火山碎屑岩和沉火山碎屑岩,可见各种沉积构造,如粒序层理(图版-1)、平行层理(图版-2)和韵律层理(图版-8)及条带状层理(图版-12),但块状构造更常见(图版-3, 5, 6, 9, 13)。

## 1.2 分布特征

火山碎屑岩(包括沉火山碎屑岩)的分布主要受其搬运方式及古地形和剥蚀改造等因素控制,其中搬运方式是主控因素。然而,搬运方式在盆地火山碎屑岩的研究中往往难以找到恰当的切入点。另一方面,火山岩岩相作为各种地质作用反映在岩性和

结构构造及其序列关系方面的综合地质实体,也主要控制搬运方式。通过长期的地质建模和地质-地球物理综合研究,在盆地火山岩岩相方面已经积累了一些研究成果<sup>[19, 28-30]</sup>;因此,就目前而言在实际工作中主要是通过岩相来研究火山碎屑岩的分布特征。对松辽盆地东南隆起区营城组标准剖面的大比例尺火山岩岩相和储层物性填图研究的结果表明:火山碎屑岩主要出现在爆发相中的空落亚相和热基浪亚相(此处是广义的热基浪,包括所有类型的载屑蒸汽流沉积);沉火山碎屑岩主要见于火山沉积相,它们在松辽盆地营城组火山机构中占岩石体积的比例通常在10%以下。

表1 盆地火山碎屑岩分类和主要类型

Table 1 Classification and differentiating characteristics of pyroclastic rocks in basins of China

结构大类	成分大类	成分名称	碎屑组分	基本类型	特征矿物组合或碎屑组分
火山碎屑岩类 (火山碎屑体积 分数大于90%, 压实固结) 火山碎屑结构	基性: SiO <sub>2</sub> 质量分数为 45% ~ 52%	玄武质	晶屑	凝灰岩	碎屑中: 基性斜长石、辉石、橄榄石
	中基性: SiO <sub>2</sub> 质量分数为 52% ~ 57%	玄武安山质	玻屑	角砾岩	碎屑中: 中基性斜长石、辉石、角闪石
	中基性: SiO <sub>2</sub> 质量分数为 52% ~ 63%	安山质	浆屑	集块岩	
	中酸性: SiO <sub>2</sub> 质量分数为 63% ~ 69%	英安质	岩屑		碎屑中: 中性斜长石、角闪石、黑云母、辉石
	酸性: SiO <sub>2</sub> 质量分数为 > 69%	流纹质			碎屑中: 中酸性斜长石、石英、碱性长石、黑云母、角闪石
蚀变火山灰: 通常 SiO <sub>2</sub> 质量分数为 > 63%		沸石岩、伊利石岩、蒙脱石岩/膨润土(粒度以小于 2 mm 的凝灰质为主, 成分以粘土矿物为主)			碎屑中: 碱性长石、石英、酸性斜长石、黑云母、角闪石 沸石、伊利石、蒙脱石
沉火山碎屑岩类 (火山碎屑体积分 数为 90% ~ 50%, 压实固结) 沉火山碎屑结构		沉凝灰岩			火山灰(岩屑、晶屑、玻屑、火山尘), 外碎屑(石英、长石)
		沉火山角砾			火山弹、火山角砾、火山集块, 外来岩屑
		沉火山集块岩			

注: 凝灰岩、角砾岩和集块岩是指凝灰(< 2 mm)、角砾(2 ~ 64 mm)、集块(> 64 mm)某一粒级为主(大于岩石体积50%);若无一粒级大于50%则采用“少前多后”的原则定为××质××岩(如凝灰质角砾岩)。碎屑组分:(a) 晶屑(crystal fragment),指晶体碎屑,多见长石和石英,为岩浆于深部岩浆房及其向上运移过程中结晶出的矿物;由于与之共存的岩浆温压条件的不断变化导致多相体系物化平衡不断破坏,为适应新的物化条件晶体会出现各种变化,表现为熔蚀、反应边、交代、碎裂等,其中炸裂纹通常代表岩浆喷出地表时压力骤减的结果,而暗化边是岩浆遇氧使矿物边缘氧化的结果;(b) 玻屑(vitric shard, glass fragment)指玻璃质多孔或无孔火山碎屑,种类繁多,是气泡化炸裂作用(vesiculation)与快速冷凝淬火共同作用的结果,多呈鸡骨状、钩状、刀状等尖棱角状,浮岩也属玻屑类;(c) 浆屑(juvenile fragment, magma fragment),指塑性岩浆碎屑,其特点是塑变拉长、绕刚性颗粒流变,含或不含气孔,火山弹和熔岩滴等也属浆屑类;(d) 岩屑(rock debris, rock fragment),包括同源火山岩屑、非同源火山岩屑和非火山岩屑共3类。同源火山岩屑(cognate fragment)指与岩浆同源的已固结刚性碎屑,往往是岩浆中先期冷凝固结的岩块,与岩浆同源、同成分;非同源或附属火山岩屑(accessory fragment)指岩浆期碎屑带出或裹挟的先期火山岩碎屑,与岩浆非同源,成分可相同或不同;非火山岩屑(accidental fragment)指下伏岩石或围岩被炸裂并被带出的非火山碎屑。命名原则:(a) 成分名称+碎屑组分+结构名称;(b) 少前多后、较多者作为基本名称。如:流纹质晶屑凝灰岩,玄武质晶屑岩屑凝灰岩角砾岩等。

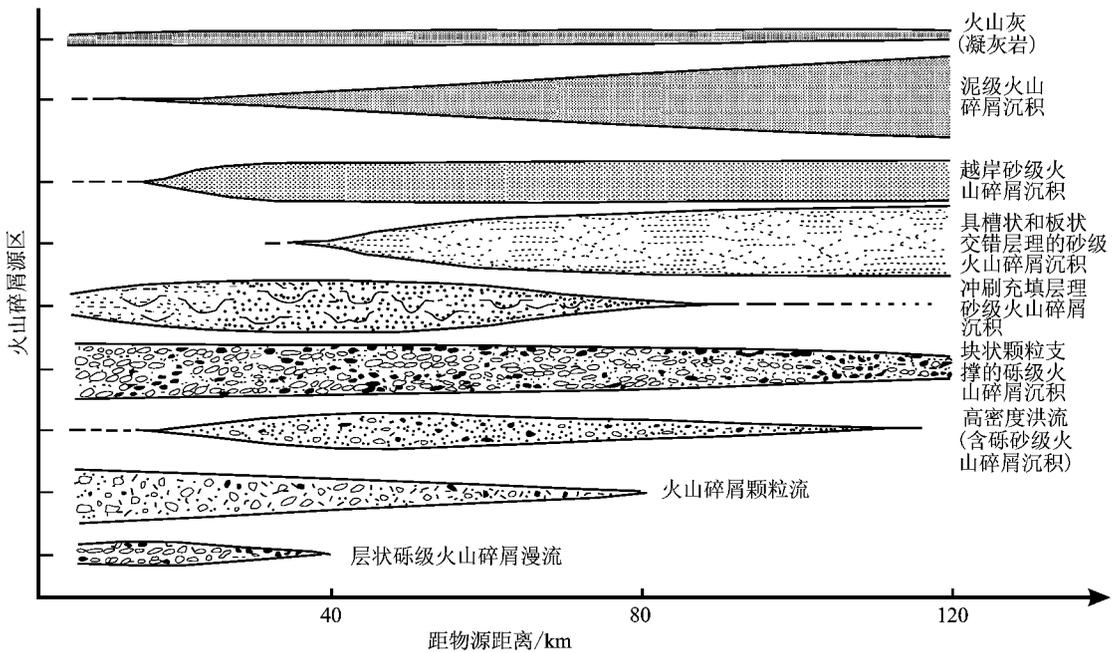


图 1 陆相火山碎屑(沉积)岩厚度分布与物源距离的对应关系(据文献[31])

Fig. 1 Relative abundance (thicknesses of horizontal bars) of continental volcanoclastic facies in relation to distance from the source(after reference[31])

Einsele<sup>[31]</sup>系统总结了北美地区中新世各种火山碎屑岩在搬运过程中的相对厚度变化(图 1),其结果有助于理解火山碎屑岩的分布特征及其与松辽盆地中这样更古老的火山岩类的对比分析。从图中可以看出:火山碎屑沉积延伸范围总体上与粒度呈负相关,火山灰在相当范围内近于等厚沉积;随着相对物源区(喷发中心)距离的增加,细粒火山碎屑沉积厚度逐渐增加,而粗粒火山碎屑沉积厚度递减。

## 2 火山碎屑岩物性及其变化规律

### 2.1 储层物性特征及其与岩性、岩相的关系

爆发相类火山碎屑岩由火山爆发作用直接形成,以陆上喷发-陆上堆积为主;火山沉积相类则是火山物质(主要是火山碎屑)形成后经过外力搬运(风力、水流作用等)异地沉积,在此过程中经历分选、磨圆,并有陆源碎屑混入(体积分数<50%)。露头岩石物性统计分析表明:爆发相类火山碎屑岩总面孔率总体略高于火山沉积相类,差别主要在于前者裂缝相对较为发育;两者总面孔率均主要由裂缝面孔率提供,而宏观可见的孔隙相对较少。就爆发相自身而言,热基浪亚相储层物性略好于空落亚相;前者具有较高的裂缝面孔率,后者孔隙面孔率相对较大。再搬运与含外碎屑火山沉积岩相比,后者搬

运距离远、改造作用更强,裂缝和孔隙面孔率均为低值。

近年于松辽盆地东南缘火山岩露头区实施的两口浅钻井 Y<sub>1</sub>D<sub>1</sub>井(自地表向下 207 m)<sup>[32]</sup>和 Y<sub>3</sub>D<sub>1</sub>井(自地表向下 255 m)<sup>[33]</sup>,从整体上揭示了营城组火山岩喷发序列。其中, Y<sub>1</sub>D<sub>1</sub>井中下部和 Y<sub>3</sub>D<sub>1</sub>井下部分别为一套厚约 100 m 和 50 m 的火山碎屑岩,常规物性分析采样间距平均为 2 m 左右。井孔揭示的火山碎屑岩包括含角砾凝灰岩、晶屑凝灰岩、火山角砾岩以及沉凝灰岩。因位于浅层、受压实作用影响小,碎屑骨架间的粒间孔隙保存较好,普遍具有相对较高的孔隙度和渗透率(沉凝灰岩除外),而且火山碎屑岩物性普遍优于熔岩和火山碎屑熔岩(表 2)。晶屑凝灰岩、火山角砾岩和含角砾凝灰岩均属于高孔、低渗储层<sup>①</sup>。三者孔隙度均值相差不大,但变化偏差由大到小依次为火山角砾岩、含角砾凝灰岩和晶屑凝灰岩,可见火山碎屑物的分选性和粒度与其孔隙发育的均质程度存在一定的相关性(分选好、粒度小,孔隙偏均质);而渗透率变化情况恰恰相反,三者中晶屑凝灰岩渗透率变化偏差最大。

① 参照 SY/T 5830-93 中华人民共和国石油天然气行业标准 1994。

沉凝灰岩为中高孔、特低渗储层, 尤其基质渗透性能差。

### 2.2 储层物性随埋深变化关系

火山熔岩和火山碎屑岩在孔隙度和渗透率随埋深变化方面具有显著性差别。它们的储层物性总体上都具有随埋深增加而变小或变差的趋势, 但熔岩变化速率小, 而火山碎屑岩的孔隙度和渗透率随埋深增加会迅速变差。在浅层, 火山碎屑岩的孔隙度和渗透率往往高于熔岩。当埋深超过一定深度时(2 500~3 000 m), 火山熔岩的储层物性就会好于火山碎屑岩。这是火山熔岩在深层成为主力储层的主要原因。笔者通过对松辽盆地营城组 35 口盆内钻井和 2 口剖面浅钻全取心井的对比研究, 统计分

析其中的火山熔岩和火山碎屑岩在不同深度的孔隙度和渗透率, 得到不同岩性(尤其火山碎屑岩)物性随埋深的变化关系(表 3)。火山熔岩类物性, 埋深从 250 m 增加到 3 000 m, 浅层岩石的孔隙度为深层岩石的 1.9~2.0 倍(分别以中值和算术平均值计算), 渗透率为深层岩石的 2.8~3.8 倍(分别以中值和几何平均值计算)。而火山碎屑岩, 埋深从 250 m 增加到 3 000 m, 浅层岩石的孔隙度为深层岩石的 7.2~8.5 倍, 渗透率为深层岩石的 6.2~11.3 倍。对比结果还揭示, 无论是熔岩还是火山碎屑岩, 对原本就具有低孔渗的岩石而言, 其物性随埋深增加变化率小或不变(如表 3 中渗透率最小值的变化率趋于 0)。

表 2 松辽盆地东南隆起区火山岩储集空间与物性统计

Table 2 Pore space and fracture assemblages of volcanic rocks with their porosity and permeability taken by core analysis from two field boreholes in southeast uplift zone, Songliao basin

岩性	储集空间 类型组合	孔隙度/%				渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$				样本数
		最小值	最大值	中值	算术均值	最小值	最大值	中值	几何均值	
气孔玄武岩	杏仁体内孔、隐爆缝	7.3	34.8	22.1	21.5	0.03	16.1	0.19	0.21	55
块状玄武岩	构造缝、隐爆缝	0.3	23.0	5.4	7.2	0.02	4.94	0.09	0.14	40
气孔流纹岩	原生气孔、构造裂缝	5.2	16.4	12.0	11.4	0.05	670.00	0.18	0.76	12
流纹构造流纹岩	流纹理间孔、构造缝	2.0	7.2	3.3	3.9	0.01	0.20	0.02	0.03	5
块状流纹岩	构造裂缝	4.1	22.6	12.6	12.8	0.01	0.27	0.02	0.04	7
角砾熔岩	粒间孔、基质收缩缝	12.7	16.8		14.8	0.37	0.83		0.55	2
凝灰熔岩	粒间孔、基质收缩缝	10.9	25.2	19.7	19.8	0.05	7.29	0.31	0.37	8
火山角砾岩	粒间孔	11.8	32.8	19.6	19.0	0.05	8.26	1.16	0.82	5
角砾凝灰岩	粒间孔、基质收缩缝	13.0	26.8	19.9	19.7	0.06	2.43	0.85	0.59	19
晶屑凝灰岩	粒间孔、基质收缩缝	12.0	24.9	22.0	21.3	0.02	75.50	0.19	0.44	14
沉凝灰岩	层间缝、基质收缩缝	2.2	22.9	19.0	14.7	0.01	3.93	0.06	0.07	12

表 3 盆缘和盆内火山岩储层物性对比

Table 3 Correlation of volcanic reservoirs between outcrop and deep basin boreholes showing their changes in porosity and permeability according to burial depth

岩石类型	样品来源	埋深范围	样本数	孔隙度/%				渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			
				最小值	最大值	中值	算术均值	最小值	最大值	中值	几何均值
熔岩	盆缘	0~250m	148	0.3	34.8	13.7	14.0	0.01	670.00	0.15	0.18
		盆内	>3 000m	365	0.9	15.2	6.9	7.3	0.01	122.00	0.04
	相对比值			0.3	2.3	2.0	1.9	1.0	5.5	3.8	2.8
	相对变化率/%				78	66	63	0	138	116	94
火山碎屑岩	盆缘	0~250m	54	2.2	32.8	19.9	18.7	0.01	75.50	0.34	0.32
		盆内	>3 000m	126	0.2	7.8	2.3	2.6	0.01	19.20	0.03
	相对比值			11.0	4.2	8.5	7.2	1.0	3.9	11.3	6.2
	相对变化率/%			167	123	158	151	0	119	168	144

注: 盆缘样品来源为松辽盆地东南隆起区 2 口剖面浅层钻井, 盆内样品来源于松辽盆地北部徐家围子断陷 35 口深层钻井; 相对比值=浅层物性值/深层物性值, 相对变化率=(浅层物性值-深层物性值)/ $0.5 \times (\text{浅层物性值} + \text{深层物性值})$ ; 平均孔隙度采用算术均值= $\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$ , 平均渗透率采用几何均值= $\sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$ , 以减小因少数极大值造成的偏差。

### 3 问题讨论

#### 3.1 火山碎屑岩储层物性变化机理

熔岩与火山碎屑岩物性随埋深变化的差异主要源于它们成岩方式的不同。熔岩冷凝固结,其骨架体积受压实影响很小,所以深埋情况下储层物性变化不大。而火山碎屑岩为压实固结成岩,其特点同沉积岩,成岩过程包括:①压实和孔隙度减小,压实作用的影响持续至自生矿物形成之前,因压实作用而减少的孔隙可达30%~80%;②部分非稳定组分溶解,形成粘土和沸石类矿物,充填粒间孔和基质孔隙并堵塞喉道,从而降低储层孔隙度和连通性;③新矿物析出和胶结,进一步减少了压实作用下的残留孔隙,同时压实作用对孔隙的影响逐渐减小;④适应于新温压条件的重结晶,压实作用的影响逐渐消失。因而,机械压实是导致火山碎屑岩孔隙度降低的直接因素。

火山碎屑岩还有两个重要特点:①玻璃质等不稳定组分含量高;②成岩条件变化大,成岩产物类型多,包括蒙脱石类、沸石类和多种类型的硅质同质异像。这些玻璃质和不稳定成岩组分在温度超过100℃(压力0.5 GPa)将发生一系列矿物相转变,例如,沸石变为富钙浊沸石,相变的结果总体上使胶结程度增加、孔隙度变小。而相变的温压条件 $\triangleright 100^\circ\text{C}$ 和0.5 GPa<sup>[25]</sup>)与2 500 m深度相对应(松辽盆地地温梯度3~4℃/100 m)。

机械压实和矿物相转变是导致火山碎屑岩孔隙度降低的主要因素。这两种作用都随上覆岩层厚度的增大而增加,从而致使孔隙度随埋深迅速降低。当温压条件超过相当于2 500 m埋深 $\triangleright 100^\circ\text{C}$ 和0.5 GPa)时,矿物相转变会出现骤然增加(储层物性迅速变差),这就使得该深度(2 500~3 000 m)成为火山碎屑岩的有效储层下限深度。超过该深度,火山熔岩成为主要储层。

#### 3.2 关于火山碎屑岩储层勘探

由于机械压实和矿物相转变等成岩作用的共同影响,使得火山碎屑岩在深层成为致密储层(孔隙度 $< 5\%$ );但在中浅层( $< 2 500\text{ m}$ ),火山碎屑岩的孔隙度和渗透率都好于相应的熔岩,所以中浅层勘探应以火山碎屑岩为重点目标。其实,国外早期的与火山岩类有关的油气发现主要是指火山碎屑岩类,如日本的新近系中酸性集块岩、古巴的白垩系凝灰岩、原苏联的中新生代中酸性凝灰岩等<sup>[34]</sup>。

近年于松辽盆地北部徐家围子断陷安达地区营城组火山碎屑岩中也发现日产超过5万 $\text{m}^3$ 的工业气藏,深度超过3 200 m,储集岩为安山质角砾岩,储集空间主要为砾内孔和基质溶孔(图版-9, 12)。气层位于该井火山岩喷发序列的顶部,储层厚度约40 m,平均孔隙度17.4%、渗透率 $5.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其上部发育一套约10 m厚的致密玄武岩,提供了局部封盖条件;与下伏沙河子地层被后期构造运动掀斜、与营城组火山岩地层呈角度不整合接触,紧邻其下为一套约50 m厚的深灰色泥岩,是气藏形成的主要烃源条件。粗面岩和玄武岩角砾内部原生气的保留和角砾间孔隙早期充填的沸石对压实作用影响的减小及其后期溶解产生次生溶孔是形成有效储层的两个主要因素。

此外,在徐家围子断陷的徐深21井区,沉火山碎屑岩发育于其它类型(主要为熔岩和火山碎屑熔岩)储层之上,因其较低的孔隙度( $< 2\%$ )和渗透率( $< 0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )而具备局部封盖能力。此类岩石通常不具备形成气藏的条件,原因在于:一方面,沉火山碎屑岩经过搬运改造和再次沉积作用,其储集性能通常会变得很差,难以成为有效储层;另一方面,其沉积并得以保存于远离火山口的低洼部位,并非油气聚集的有利指向。

因此,火山碎屑岩储层的勘探思路应是:中浅层可作为重点目标,深层侧重于识别未有显著搬运的原始相带和寻找次生孔隙发育带。

本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和2009年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持。白雪峰、张斌、闵飞琼、李喆、吴颜雄和任利军等参加了野外和资料整理工作,岳翠帮助进行了文稿校正,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Schutter S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214: 35-68.
- [3] French D E, Freeman K J. Tertiary volcanic stratigraphy and reservoir characteristics of Trap

- Spring Field Nye County, Nevada [ C ] // Basin and range symposium. Denver; Utah Geological Association, 1979; 487-502.
- [ 4 ] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcaniclastic sequences [ J ]. AAPG Bull, 1990, 74: 830-836.
- [ 5 ] Bergman S C, Talbot J P, Thompson P R. The Kora Miocene submarine andesite stratovolcano hydrocarbon reservoir, northern Taranaki basin, New Zealand [ C ] // New Zealand Oil Exploration Conference, proceedings. Wellington; Ministry of Commerce, 1992; 178-206.
- [ 6 ] Levin L E. Volcanogenic and volcaniclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: examples from the Caucasus and the NW Pacific [ J ]. J Petroleum Geol, 1995, 18: 267-288.
- [ 7 ] Cutiongco E, Warren J. Porosity and permeability controls in volcaniclastic sediments and their relationship to wireline data from the Sultan-Sarongis prospect, Mindanao, Phillipines [ C ] // AAPG International Conference, Meeting Abstract. Barcelona; [ s. n ], 2003.
- [ 8 ] Gecer B A. Diagenesis of Upper Eocene volcaniclastic rocks and its relevance to hydrocarbon exploration in the Thrace basin, Turkey [ J ]. Energy Sources, 2006, 28(9/12): 1039-1049.
- [ 9 ] Huang Y L, Wang P J, Chen S M. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China [ J ]. Global Geology, 2009, 12(2): 64-79.
- [ 10 ] 王留奇, 赵澄林, 刘孟慧. 二连盆地阿南油田阿三油组火山碎屑沉积成因探讨 [ J ]. 石油大学学报: 自然科学版, 1991, 15(4): 1-7.  
WANG Liu-qi, ZHAO Cheng-lin, LIU Meng-hui. Origin of sedimentation of volcanic detritus in Anan oilfield of Erlian basin [ J ]. Journal of the University of Petroleum, China, 1991, 15(4): 1-7.
- [ 11 ] 余家仁, 郭振彬, 唐阶庭. 对二连盆地哈南潜山凝灰岩储层的初步认识 [ J ]. 新疆石油地质, 1988, 9(3): 33-38.  
YU Jia-ren, GUO Zhen-bin, TANG Jie-ting. Preliminary study on tuff reservoir of Hanan buried hill, Erlian basin [ J ]. Xinjiang Petroleum Geology, 1988, 9(3): 33-38.
- [ 12 ] 唐阶庭. 哈南油田凝灰岩油藏储层特征 [ J ]. 石油勘探与开发, 1991(2): 80-88.  
TANG Jie-ting. Characteristics of the tuff reservoir in Hanan oilfield [ J ]. Petroleum Exploration and Development, 1991(2): 80-88.
- [ 13 ] 梁官忠. 二连盆地哈南凝灰岩油藏裂缝发育特征 [ J ]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 412-417.  
LIANG Guan-zhong. Fracture development of tuff reservoirs in the Hanan area of the Erlian basin [ J ]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(4): 412-417.
- [ 14 ] 操应长, 姜在兴, 邱隆伟. 山东惠民凹陷商741块火成岩油藏储集空间类型及形成机理探讨 [ J ]. 岩石学报, 1999, 15(1): 129-136.  
CAO Ying-chang, JIANG Zai-xing, QIU Long-wei. Study on the type and origin of the reservoir space of igneous oil reservoir in Shang 741 block, Huimin depression [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 129-136.
- [ 15 ] 王金友, 张世奇, 赵俊青, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征 [ J ]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 264-268.  
WANG Jin-you, ZHANG Shi-qi, ZHAO Jun-qing, et al. Characteristics of volcanic rock reservoirs in the Linshang area of the Huimin sag [ J ]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3): 264-268.
- [ 16 ] 杨申谷. 大洼油田中生界火山岩储集层特征 [ J ]. 新疆石油地质, 2004, 25(4): 382-384.  
YANG Shen-gu. Characteristics of Mesozoic volcanic reservoir in Dawa oilfield [ J ]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(4): 382-384.
- [ 17 ] 曹瑞成, 曲希玉, 文全, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷储层物性特征及控制因素 [ J ]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(1): 23-30.  
CAO Rui-cheng, QU Xi-yu, WEN Quan, et al. Physical properties and control factors of reservoir in Beier depression, Halaer basin [ J ]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1): 23-30.
- [ 18 ] 冯立, 王贤君, 王选富, 等. 海拉尔盆地凝灰质火山岩储层矿物学及岩石力学特征研究 [ J ]. 中国石油勘探, 2006(2): 39-42.  
FENG Li, WANG Xian-jun, WANG Xuan-fu, et al. Characteristics of mineralogical and rock dynamics of tuffaceous volcanic reservoir [ J ]. China Petroleum Exploration, 2006(2): 39-42.
- [ 19 ] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义 [ J ]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(4): 449-456.  
WANG Pu-jun, CHI Yuan-lin, LIU Wan-zhu, et al. Volcanic facies of Songliao basin: classification,

- characteristics and reservoir significance[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(4): 449-456.
- [ 20] Feng Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gas field in the Songliao basin, NE China[ J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 416-432.
- [ 21] 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.  
FENG Zi-hui, SHAO Hong-mei, TONG Ying. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao basin [ J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 760-768.
- [ 22] 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.  
WANG Pu-jun, ZHENG Chang-qing, SHU Ping, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao basin[ J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 17-22.
- [ 23] 杨双玲, 刘万洙, 于世泉, 等. 松辽盆地火山岩储层储集空间特征及其成因[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 506-512.  
YANG Shuang-ling, LIU Wan-zhu, YU Shi-quan, et al. Pore textures and its causes of volcanic reservoir in Songliao basin[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 506-512.
- [ 24] 黄玉龙, 王璞珺, 冯志强, 等. 松辽盆地改造残留的古火山机构与现代火山机构的类比分析[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(1): 65-72.  
HUANG Yu-long, WANG Pu-jun, FENG Zhi-qiang, et al. Analogy of physical features amongst modern, ancient and buried volcanoes: a case study from Songliao basin[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(1): 65-72.
- [ 25] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic rocks[ M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 89-123, 340-345.
- [ 26] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms [ M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989: 1-193.
- [ 27] 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.  
SUN Shan-ping, LIU Yong-shun, ZHONG Rong, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: a review [ J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 313-317.
- [ 28] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(5): 805-812.  
WANG Pu-jun, WU He-yong, PANG Yan-ming, et al. Volcanic facies of the Songliao basin: sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(5): 805-812.
- [ 29] 郭振华, 王璞珺, 印长海, 等. 松辽盆地北部火山岩岩相与测井相关关系研究[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(2): 207-214.  
GUO Zhen-hua, WANG Pu-jun, YIN Chang-hai, et al. Relationship between lithofacies and logging facies of the volcanic reservoir rocks in Songliao basin[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(2): 207-214.
- [ 30] Busby C J, Bassett K N. Volcanic facies architecture of an intra-arc strike-slip basin, Santa Rita Mountains, Southern Arizona [ J]. Bull. Volcanol, 2007, 70: 85-103.
- [ 31] Einsele G. Sedimentary basins [ M]. Berlin: Springer, 2000: 69.
- [ 32] 吴颜雄, 王璞珺, 曲立才, 等. 营城组一段及下段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营一D<sub>1</sub>井全取心钻孔资料[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1192-1202.  
WU Yan-xiong, WANG Pu-jun, QU Li-cai, et al. Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the lower member of Yingcheng Formation, based on the latest data of Y<sub>1</sub>D<sub>1</sub> well cores in standard section[ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1192-1202.
- [ 33] 闵飞琼, 王璞珺, 于世全, 等. 营城组三段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营三D<sub>1</sub>井全取心钻孔资料[ J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1203-1216.  
MIN Fei-qiong, WANG Pu-jun, YU Shi-quan, et al. Meticulous depiction of lithology, lithofacies and reservoir porosity and permeability in the third & second member of Yingcheng Formation, based on whole coring Y<sub>3</sub>D<sub>1</sub> well drilled in the standard section [ J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1203-1216.

- [ 34] 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.
- ZHANG Zi-shu, WU Bang-hui. Research status and exploration technique investigation of volcanic oil & gas reservoirs at home and abroad[ J]. Natural Gas Exploration and Development, 1994, 16(1): 1-26.

## 图版说明

1. 流纹质岩屑晶屑凝灰岩, 具水平层理和粒序层理(吉林九台野外露头); 2. 流纹质晶屑凝灰岩(上)与流纹质角砾岩(下), 水平层理和粒序层理(吉林九台野外露头); 3. 流纹质角砾/集块岩(吉林九台野外露头); 4. 流纹质晶屑凝灰岩, 晶屑为石英和透长石(庆深气田钻井岩心); 5. 流纹质角砾岩, 角砾以流纹构造流纹岩为主(庆深气田钻井岩心); 6. 流

纹质集块岩, 集块主要具流纹构造流纹岩(庆深气田钻井岩心); 7. 流纹质晶屑凝灰岩, 晶屑以长石居多、石英次之, 正交偏光(庆深气田钻井岩心薄片); 8. 安山质岩屑晶屑凝灰岩(庆深气田钻井岩心); 9. 安山质角砾岩, 角砾包含凝灰岩、安山岩、玄武岩和粗面岩, 多为棱角状和次棱角状(庆深气田钻井岩心); 10. 安山质岩屑晶屑凝灰岩, 角砾凝灰结构, 岩屑主要为安山岩, 晶屑以长石为主, 正交偏光(庆深气田钻井岩心薄片); 11. 安山质角砾岩, 凝灰角砾结构, 单偏光(庆深气田钻井岩心薄片); 12. 沉凝灰岩, 具水平层理(被后期构造运动掀斜)(吉林九台露头钻井岩心); 13. 沉火山角砾岩, 砾石以流纹岩为主, 其次为玄武岩、安山岩、凝灰岩和砂/泥岩(庆深气田钻井岩心); 14. 沉凝灰岩, 具平行层理, 正交偏光(吉林九台露头钻井岩心薄片); 15. 沉火山角砾岩, 砾石主要见流纹岩、安山岩和凝灰岩, 砂质胶结, 正交偏光(庆深气田钻井岩心薄片)

图版

