

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0115- 05

# 松辽盆地徐家围子断陷 深层火山岩储层特征及有利区预测

刘为付<sup>1,2</sup>

(1. 大庆石油学院地球科学学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:** 松辽盆地徐家围子断陷火山岩可划分为火山熔岩和火山碎屑岩两类, 火山岩储层的有效储集空间包括孔隙和裂缝两种类型。裂缝不仅为储集空间, 还可连通各种孔隙并促进后期溶解作用。在识别裂缝类型的基础上, 建立了裂缝孔隙度计算模型, 根据 12 口井的测井解释结果, 按裂缝孔隙度将火山岩储集层分为 3 级: I 级, 孔隙度大于 0.5%; II 级, 孔隙度为 0.2%~0.5%, II 级, 孔隙度小于 0.2%。火山岩相可划分为边缘亚相、过渡亚相和中心亚相, 其中, 中心亚相位于火山通道附近, 发育构造裂缝和收缩缝, 储集物性较好, 是最有利的储集相带; 过渡亚相的裂缝比较发育, 储集物性中等, 为有利储集相带; 而边缘亚相储集物性差, 为不利储集相带。

**关键词:** 火山岩; 裂缝孔隙度; 储集层特征; 徐家围子断陷, 松辽盆地

中图分类号: TE112.222

文献标识码: A

## Reservoir characteristics of deep volcanic rocks and prediction of favorable areas in Xujiaweizi fault depression in Songliao basin

Liu Weifu<sup>1,2</sup>

(1. Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang; 2. China University of Geosciences, Beijing)

**Abstract:** Volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression in Songliao basin can be classified into lava and volcanoclastic rocks. The effective reservoir spaces of volcanic reservoirs are pores and fissures. Fissures can not only act as reservoir spaces, but can also interconnect pores of different types and promote dissolution at later stages. A computation model of fissure porosity is developed based on recognition of fissure types. According to logging interpretation of 12 wells, the volcanic reservoirs are divided into 3 grades based on their fracture porosity, i. e. grade I with porosity above 0.5%, grade II with porosity ranging from 0.2% to 0.5%, and grade III with porosity below 0.2%. Volcanic rock facies can be subdivided into marginal, transitional and central subfacies. The central subfacies, located near volcanic conduit, has well developed structural and contraction fissures and relatively good poroperm characteristics, so it would be the most favorable reservoir facies belt; the transitional subfacies, having relatively well developed fissures and moderate poroperm characteristics, would be a favorable reservoir facies belt; while the marginal subfacies has poor poroperm characteristics, it would be an unfavorable reservoir facies belt.

**Key words:** volcanic rock; fissure porosity; reservoir features; Xujiaweizi fault depression; Songliao basin

我国东部中生代含油气盆地中发育各种类型的火山岩, 并在火山岩中发现具有商业价值的油气藏, 这些油气藏已成为我国中生代盆地勘探的新领域<sup>[1~3]</sup>。徐家围子断陷位于松辽盆地北

部, 为半地堑型断陷, 上侏罗统中火山岩广泛发育<sup>[4,5]</sup>, 并在火山岩中发现了商业气流<sup>[6,7]</sup>, 如 FS9 井、ZS1 井、SS1 井等, 显示该区火山岩具有广阔的天然气勘探前景, 但各井的产量及储量存在较大

基金项目: 国家 973 重大基础研究项目(2001GB2091043)

作者简介: 刘为付, 男, 39 岁, 博士生, 油气田开发地质和储层沉积地质

收稿日期: 2004- 02- 10

差异,这不仅与火山岩分布有关,而且还与火山岩储层发育程度及成藏条件有关<sup>[8,9]</sup>。本文利用岩心、薄片、扫描电镜、测井等资料,通过该区火山岩储层特征研究,对火山岩有利储集相带分布进行预测。

## 1 火山岩分布及岩石学特征

### 1.1 火山岩分布

本区火山岩分布在晚侏罗世火石岭组、沙河子组、营城组中<sup>[10,11]</sup>。火山活动期,火山熔岩和火山碎屑岩以互层状产出,火山喷发间歇期沉积了陆源碎屑岩。火石岭组沉积时期,火山活动频繁,火山岩厚度大,如ZS1井、SS10井火石岭组火山碎屑岩与火山熔岩互层,发育12套韵律层。沙河子组沉积时期,火山活动较弱,以陆源碎屑岩沉积为主,仅局部地区发育几层薄层火山岩。营城组沉积时期,火山岩较发育,沉积了10层单层厚度大于20m的火山熔岩和凝灰岩。本区火山岩的分布反映了火山喷发具有多期次和多旋回的特点。

### 1.2 岩石学特征

本区火山岩可划分为两类:火山熔岩和火山碎屑岩。火山熔岩从基性、中性、酸性均有分布,其中以中-酸性岩为主,火山碎屑岩有火山角砾岩和凝灰岩,其中以火山角砾岩为主。

#### 1.2.1 火山熔岩

玄武岩呈紫黑色,质硬性脆,主要矿物成分为辉石、橄榄石、斜长石等;具斑状结构,斑晶主要为辉石和橄榄石,基质为隐晶质;气孔、杏仁状构造发育,大小不一,有拉长现象,并有绿帘石、绿泥石充填;岩石具有绿泥石化和碳酸盐化等蚀变现象。

安山岩呈灰绿色,主要矿物成分为斜长石、角闪石,少量的石英;斑状结构,斑晶主要为斜长石,自形晶不完整,偶见板条状角闪石斑晶,基质为隐晶质;有绿泥石化、绿帘石化、闪长石化和碳酸盐化等蚀变现象。

流纹岩的主要矿物成分为钾长石、石英;斑状和球粒状结构,斑晶为石英,基质由隐晶的长英质组成,偶见石英、长石残晶;流纹构造发育,流线清晰。

#### 1.2.2 火山碎屑岩

火山角砾岩的成分主要为熔岩质角砾,棱角分明,角砾含量一般为70%~90%,粒径一般0.5~7.0mm,其中以2~5mm为主;角砾内气孔-杏仁构造发育,角砾间和气孔内充填物主要为碳酸盐

矿物和沸石矿物,含少量硅质。

凝灰岩由火山碎屑、火山尘及陆源碎屑组成,火山碎屑主要见岩屑和晶屑,晶屑间被大量火山尘充填,火山尘具有蚀变和粘土化现象;岩石气孔发育,常被绿泥石充填。

## 2 储集空间类型及特征

储集空间的发育程度是控制火山岩储层的重要因素,本区火山岩虽然岩性较致密,但由于后期构造作用,使储集空间得到很大程度的改善<sup>[12]</sup>。在岩心观察和测试资料分析的基础上,按成因将本区火山岩储集空间划分为孔隙和裂缝两种类型。

### 2.1 孔隙

本区火山岩储层有效的孔隙包括原生孔隙和溶解孔隙两类。原生孔隙常呈孤立状,但由于构造裂隙或收缩裂缝常切穿气孔,从而使孤立的气孔间相互连通,使之成为有效的孔隙,这种孔隙主要见于溢流相熔岩的顶、底带。如SS10井营城子组的安山岩气孔发育带,ZS1井营城组下部玄武岩孔隙发育带都含有大量气孔-杏仁孔,SS1井营城子组上部火山碎屑岩的砾间孔,残余气孔,这些孔隙部分被绿泥石、方解石矿物充填。溶解孔隙在该区也是重要的储集空间,如ZS1井火山爆发相中火山碎屑砾间充填物和火山角砾内的气孔充填物的碳酸盐矿物、沸石类矿物的溶解,SS10井喷溢相中的熔岩溶解作用常顺裂隙发生,即先形成裂隙,后发生溶解作用,溶解物多为长石和辉石等不稳定矿物。

孔隙型储层主要发育在薄层熔岩中,该类储层孔径小于2mm。储层物性在纵向上受单层厚度的控制,变化大,非均质强;而在横向上则变化较慢。因此,该类火山岩储层横向连通性较好,储集性能优越,声波时差值在250μs/m左右,电阻率值高,孔隙度一般大于6%。

### 2.2 裂缝

裂缝是本区火山岩储层主要的储集空间,按成因主要分为收缩缝和构造缝两类。

收缩缝是岩浆冷却过程中温度降低或火山岩在成岩过程中脱水所形成的张性缝,前者称冷凝收缩缝,后者称脱水收缩缝。如ZS1井营城子组中、上部熔岩中发育冷凝收缩缝;SS10井营城子组上部爆发相火山碎屑岩中发育脱水收缩缝,形成

于成岩作用时期,即火山碎屑岩形成之后。按照收缩缝的分布位置又可分为砾内和砾间收缩缝。

构造缝在本区火山岩中分布较广。构造缝为微裂缝,规模小,形成时间较晚,常切穿气孔,使多个气孔相互连通,从而提高了火山岩储层的孔、渗性。

裂缝型储层主要发育在部分熔岩中,储集空间以裂缝为主,该类储集层声波时差值在200  $\mu\text{s}/\text{m}$  左右,实际孔隙度一般小于4%,孔隙不发育,但裂缝发育。

由于本区火山岩储层具有孔隙-裂缝双重介质特征,孔、缝配置关系复杂,储层受多种因素控制,其中构造作用和溶解作用是控制火山岩储层发育的主导因素。在该区勘探已获商业气流的井中,火山岩储层主要以溶孔-裂缝型为主,分布在靠近断裂处,因此,近断裂带的火山岩是气藏分布的有利区带,也是今后勘探的主要目标。

3 测井解释

3.1 岩性识别

本区火山岩与相邻的泥岩在电性上有明显差异,特别是放射性测井差异最明显,泥岩的自然伽马值较高,一般大于90API,火山岩自然伽马值较低,一般小于50API。产生这种变化的原因主要是泥岩颗粒细对放射性物质有较强的吸附能力,因此,自然伽马呈高值;而火山岩是岩浆喷出地表冷凝结晶的产物,放射性物质含量高低主要取决于岩石本身所含放射性物质的多少。本区火山岩自然伽马明显呈现低值,利用这一特性,可有效地区分火山岩与围岩。

岩心观察表明,本区火山喷发具有多期次和多旋回的特点。每个喷发旋回熔岩具有明显分带性,顶、底气孔发育带,中部致密层。熔岩顶部富含气孔、杏仁构造,常见拉长及定向排列,可指示

熔岩流动方向,顶部气孔带形成机理是岩浆喷出地表,压力减小,岩浆中的气体游离出来,在顶部形成气孔发育带;熔岩底部气孔、杏仁孔也很发育,它的形成机理是由于熔浆在潮湿地面上或在水底流动过程中,下伏的水分被汽化进入岩流的低部,形成大量气孔。电性上,顶、底气孔发育带表现为中电阻率、中中子的特点,中部致密层测井表现为高电阻率、低中子的特点;火山碎屑岩以低电阻率、高声波时差、低密度和高中子为特点,利用这些特征可有效的识别火山岩中的储层与非储层(图1,表1)。熔岩顶、底部的气孔发育带和火

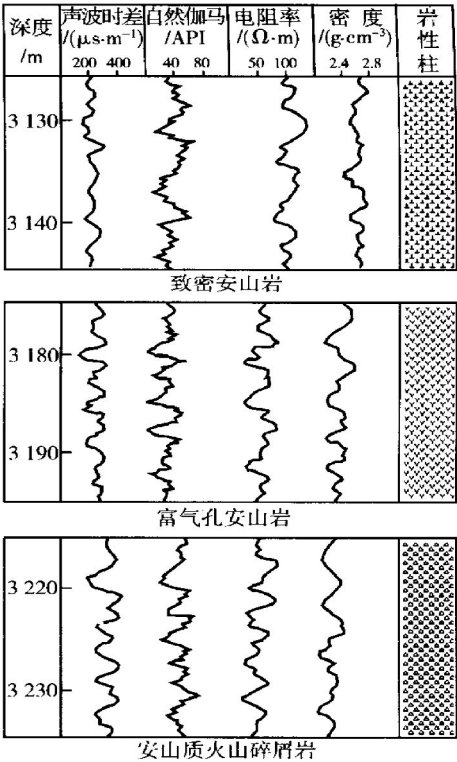


图 1 徐家围子断陷 ZS1 井安山岩测井曲线模式  
Fig. 1 Log model of andesite in ZS1 well  
in Xujiaweizi fault depression

表 1 各类火山岩测井响应值

Table 1 Logging value of different volcanic types

| 岩石类型  | 自然电位/mV | 自然伽马/(API) | 电阻率/( $\Omega\cdot\text{m}$ ) | 密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 中子/%  | 声波时差/( $\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) |
|-------|---------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------|------------------------------------------|
| 富气孔熔岩 | 负异常     | 18~45      | 20~100                        | 2.1~2.5                              | 15~25 | 220~280                                  |
| 致密熔岩  | 基线      | 18~45      | 80~200                        | 2.4~2.8                              | 12~20 | 180~230                                  |
| 火山角砾岩 | 负异常     | 20~50      | 10~80                         | 2.0~2.4                              | 22~32 | 240~310                                  |
| 凝灰岩   | 基线      | 15~40      | 30~120                        | 2.1~2.4                              | 10~22 | 190~265                                  |

山碎屑岩是本区有效储层,熔岩中部致密层因岩性致密未见气显示,为非储层。另外,利用测井的

(中子、声波、密度)任意两条曲线交会(即岩石的弹性模量与泊松比交会、岩石骨架特征的 M、N 交

会 光电吸收指数与补偿密度交会等) 图法, 也可有效区分本区火山岩中的储层与非储层( 图 2) 。

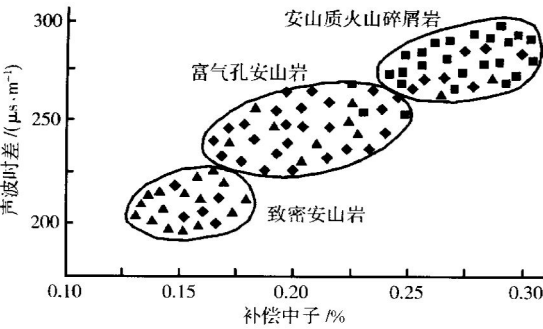


图 2 SS10 井声波时差- 补偿中子交会图  
Fig. 2 Crossplot of interval transit time vs compensated neutron in SS10 well

3.2 参数解释

在对火山岩储层参数进行解释时, 利用裂缝孔隙度表征火山岩储层物性, 能很好反映这种特殊岩性储层的情况。由于裂缝分布十分复杂, 研究难度较大, 传统的方法是用中子孔隙度与声波孔隙度之差来计算, 该方法只有当地层孔隙度较高且不含气时才适用<sup>[13]</sup>。虽然目前国内外许多学者采用多种方法进行研究, 取得很大进展, 但仍处于探索阶段<sup>[14, 15]</sup>。针对本区实际情况, 利用双侧向测井曲线计算裂缝孔隙度取得了很好的效果。研究中, 首先利用双侧向电阻率判断裂缝类型, 然后根据不同类型裂缝, 分别求取裂缝孔隙度。

在岩电实验基础上, 利用深、浅侧向电阻率的差异, 判断裂缝类型, 建立的关系式如下

$$\gamma = (R_d - R_s) / (R_d \times R_s)^{1/2} \tag{1}$$

式中  $R_d$ ,  $R_s$  分别为深、浅侧向电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。当  $\gamma > 0.1$  时为高角度缝;  $0 \leq \gamma \leq 0.1$  时为倾斜裂缝;  $\gamma < 0$  时为低角度缝。

通过岩心分析, 测试资料标定, 在判断裂缝类型的基础上, 利用双侧向电阻率建立计算不同类型裂缝孔隙度关系式

$$\Phi_f = (2.1098 - 1.10966 \rho_g) R_m^{1.0877} \times (a_1 / R_s + a_2 / R_d + a_3) \tag{2}$$

式中  $\Phi_f$  为双侧向电阻率计算的裂缝孔隙度, 小数;  $R_m$  为泥浆电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\rho_g$  为泥浆密度,  $g/cm^3$ ;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  为不同性质的裂缝所取的系数, 无量纲(表 2), 可根据取心资料和分析化验资料并利用数理统计方法求取。

表 2 火山岩储层裂缝孔隙度系数值

Table 2 Coefficient values of fissure porosity of volcanic reservoirs

| 裂缝类型  | $\gamma$     | $a_1$      | $a_2$     | $a_3$   |
|-------|--------------|------------|-----------|---------|
| 高角度裂缝 | $> 0.1$      | 8.876 3    | - 8.431 5 | 0.000 7 |
| 倾斜裂缝  | $0 \sim 0.1$ | - 17.654 3 | 20.375 3  | 0.000 9 |
| 低角度裂缝 | $< 0$        | - 0.989 8  | 1.980 7   | 0.000 4 |

利用上式计算火山岩储层裂缝孔隙度, 将结果与取心井段多种分析实验( 包括 CT 扫描、压录等) 所求得裂缝孔隙度进行了对比, 发现两者的对应层段基本相近, 说明所建公式能够满足本区裂缝孔隙度在测井解释及储层评价中的精度要求。根据对研究区内 12 口钻遇火山岩井的测井解释的结果, 按裂缝孔隙度将火山岩储集层分为 3 级: I 级,  $\Phi_f > 0.5\%$ ; II 级,  $\Phi_f$  介于  $0.2\% \sim 0.5\%$ ; III 级,  $\Phi_f < 0.2\%$ ( 图 3) 。

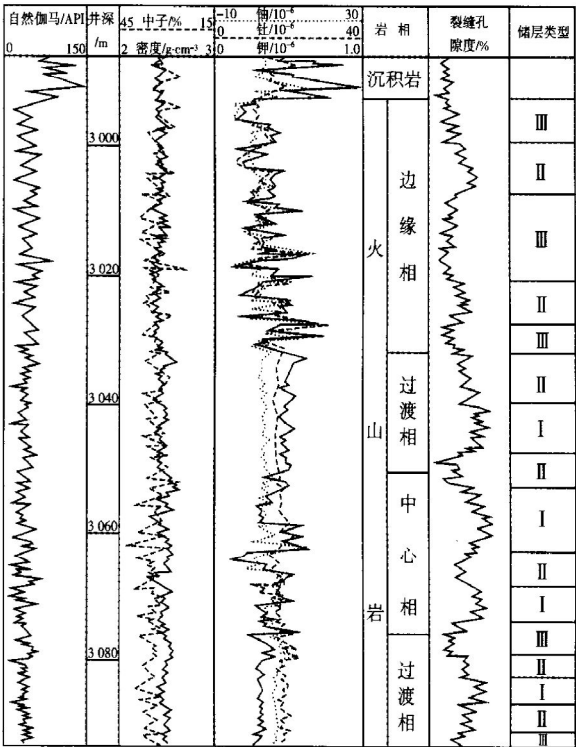


图 3 ZS1 井储层类型与火山岩相关系  
Fig. 3 Relation between reservoir types and volcanic rock facies in ZS1 well

井周声波成像测井图上, 根据回波幅度颜色深浅, 可直观确定裂缝形态和位置, 色浅表示回波幅度高, 岩石致密、坚硬; 色深表示回波幅度低, 岩石疏松。本区火山碎屑岩层段回波幅度深, 说明岩石疏松、孔隙发育, 与岩心观察结果相符; 富气孔熔岩颜色变浅、变花, 说明岩性纯, 孔、缝发育,

取心井岩心观察结果证实, 该层段不仅孔隙发育, 而且裂缝发育, 是主要的储气层; 致密层段颜色为白色, 说明此层段物性极差, 与取心显示致密层段相符。

#### 4 有利储集相带分布预测

对松辽盆地徐家围子晚侏罗世火山岩储集层的形成和发展分析, 认为火山岩储层的发育程度受火山岩相、构造作用、风化作用、成岩作用等因素控制。不同火山岩相以及同一岩相带中不同亚相的储层及其储集特征差异较大。构造作用形成的构造裂缝不仅本身可作为储集空间, 还可连通各种孔隙并促进后期溶解作用的进行, 对改善储集条件具有重要作用; 次生成岩期的溶解作用和风化作用可形成大量孔隙, 但该期也常发生自生矿物充填孔隙和裂缝, 从而降低储层的物性。根据岩性、结构等特征, 可将本区晚侏罗世火山岩相划分为边缘亚相、过渡亚相和中心亚相(图4)。

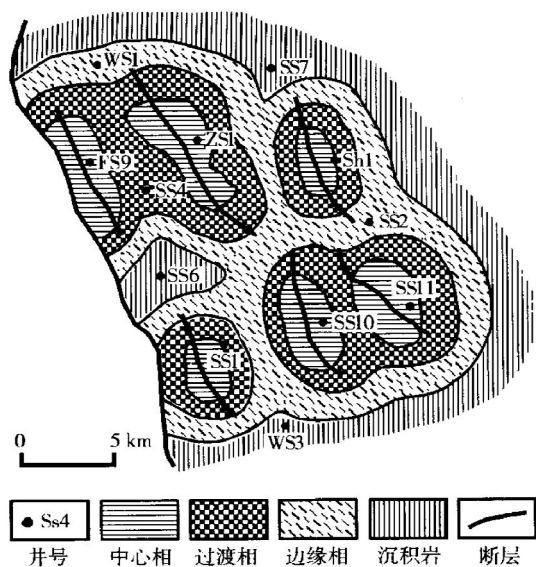


图4 徐家围子断陷营城组火山岩岩相分布图

Fig.4 Lithofacies distribution of volcanic rocks in Yingcheng Formation in Xujiaowei fault depression

边缘亚相位于火山岩靠近围岩一侧, 由于与围岩接触, 喷出的岩浆冷却速度快, 常发育气孔-杏仁构造, 岩性主要为熔岩、凝灰岩, 表现为熔岩、凝灰岩、沉积岩薄层间互, 单层厚度一般5~10m; 该相带由于厚度小, 不利于构造裂缝的形成, 发育部分冷凝收缩缝, 储集空间主要为原生气孔、收缩缝等, 储集物性较差, 是不利的储集相带, 如 WS1 井、WS3 井、SS2 井。中心亚相位于火山喷发的中

央地带, 一般厚度大, 单层厚度大于20m。由于冷凝缓慢, 矿物结晶时间充分, 岩石具有中-粗晶结构, 岩性主要为各种厚层熔岩、火山角砾岩及凝灰岩。从该相带的岩心资料分析, 储集空间主要为裂缝、溶孔、晶间孔等, 其中裂缝占主导, 发育有构造裂缝和收缩缝, 储集物性较好, 是最为有利的储集相带, 如 FS9 井、ZS1 井、SS10 井。过渡亚相位于边缘亚相和中心亚相之间, 岩性和结构特征介于两者之间, 主要是熔岩和火山碎屑岩互层, 岩石结晶时间较充分, 一般为中粒斑状结构, 储集空间也以较发育的裂缝、溶孔等为特征, 储集物性中等, 是较为有利的储集相带, 如 SS1 井、SH1 井、SS4 井。

#### 参 考 文 献

- 高山林, 李学万, 宋柏荣. 辽河盆地欧利坨子地区火山岩储集空间特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 173~177
- 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
- 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 三塘湖盆地二叠系火山岩储层特征[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(6): 483~486
- 唐建仁, 刘金平, 谢春来. 松辽盆地徐家围子断陷的火山岩分布及成藏规律[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 345~351
- 宋维海, 王璞君, 张兴洲, 等. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 12~17
- 程日辉, 刘万洙, 王璞君, 等. 徐家围子断陷火山岩赋存型式及意义[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 24~27
- 刘万洙, 王璞君, 门广田, 等. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 28~31
- 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 松辽盆地莺山断陷火山岩地震反射特征及分布规律[J]. 石油实验地质, 2000, 22(3): 256~259
- Wang Pujun, Ren Yanguang, Shan Xuanlong. The Cretaceous volcanic succession around the Songliao Basin, NE China: relationship between volcanism and sedimentation[J]. Geological Journal, 2002, 37(2): 1~19
- 王璞君, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 18~23
- 程日辉, 王璞君, 刘万洙, 等. 徐家围子断陷带对火山岩体和沉积相的控制[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 126~129
- 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 莺山断陷火山岩储层特征[J]. 大庆石油勘探与开发, 2000, 21(4): 9~11
- 刘为付. 火山岩储集层常规岩石物理研究方法[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 389~391
- 尹志军, 彭仕密, 高荣杰. 裂缝性油气储层定量综合评价[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 240~243
- 刘大昕, 张淑娟, 童亨茂. 任丘潜山油藏裂缝预测及剩余油分布研究[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 49~54